



Πανεπιστήμιο Δυτικής

Αττικής

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία:

Μοντελοποίηση Μεταλλικού Αφρού με την Χρήση των Προγραμμάτων Matlab και ANSYS

[Metal foam modeling using Matlab and ANSYS programs]

Προπτυχιακός φοιτητής:

Νελαΐ Σωτήριος

ΑΜ: 46146695

Επιβλέποντες καθηγητές:

Πούλου Μαρία – Ελένη

Στεργίου Κωνσταντίνος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ευρύτερης έρευνας της μηχανικής συμπεριφοράς των μεταλλικών αφρών με την μέθοδο της μοντελοποίησης της γεωμετρίας. Για την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας αλλά και την υποστήριξη κατά την διάρκεια αυτής, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την κυρία Πούλου Μαρία – Ελένη καθώς και τον κύριο Στεργίου Κωνσταντίνο, από τους οποίους μου ανατέθηκε η διεκπεραίωση της , παρέχοντας μου την δυνατότητα με τον τρόπο αυτό να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερου επιστημονικού ενδιαφέροντος, που ερευνάται και εξελίσσεται σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία έτη.

Στην συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου, τους κυρίους Παπανίκο Παρασκευά και Ζαχαρόπουλο Νίκο από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου, για την άψογη τους καθοδήγηση, μετάδοσης γνώσεων, εμπειριών και της σημαντικής τους συνεισφοράς με τις εύστοχες και καίριες συμβουλές τους, όπως καθώς και με τις παρατηρήσεις τους, που βοήθησαν στην ευκολότερη διεξαγωγή της εργασίας αυτής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με στήριξαν πολύ κατά την διάρκεια των σπουδών μου και ειδικότερα κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την μελέτη και μοντελοποίηση μεταλλικών αφρών καθώς και πορωδών υλικών με την χρήση των προγραμμάτων Matlab και ANSYS. Στόχος της εργασίας αυτής είναι η μηχανική ανάλυση των μεταλλικών αφρών, αλλά και των πορωδών υλικών, θέτοντας τις παραμέτρους που χρειάζονται για την μοντελοποίηση τους.

Το πρώτο κεφάλαιο περιγράφει τα μέταλλα και τα μεταλλικά υλικά γενικά, καθώς για την παραγωγή των μεταλλικών αφρών αξιοποιούνται συμπαγή μέταλλα. Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει τους μεταλλικούς αφρούς, τα χαρακτηριστικά τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους καθώς και μια μικρή ιστορική αναδρομή αυτών. Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τους τρόπους παραγωγής των μεταλλικών αφρών για την κατανόηση των νέων αλλά και παλαιών μεθόδων παρασκευής.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις ιδιότητες των μεταλλικών αφρών καθώς και στις εφαρμογές στις οποίες εμφανίζονται. Οι μεταλλικοί αφροί έχουν σαν κοινό γνώρισμα την χαμηλή πυκνότητα σε συνδυασμό με ακουστικές, θερμικές, ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. Με τον τρόπο αυτό στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες γενικές αρχές των πεπερασμένων στοιχείων για την καλύτερη κατανόηση της μοντελοποίησης που θα γίνει.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στην παρουσίαση των αλγορίθμων των οποίων δημιουργήθηκαν στο Matlab και στο ANSYS για την παρασκευή του μοντέλου, καθώς είναι σημαντική η ανάλυση των αλγορίθμων και των σκέψεων πάνω στο κομμάτι της μελέτης. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πιθανών συνδυασμών που μπορούσαν να δημιουργηθούν αλλά και τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τα αποτελέσματα αυτά.

ABSTRACT

The present thesis studies the modeling of a metal foam, and metal porous materials, assisted by Matlab programming and ANSYS. The aim of this thesis is the programming of Matlab and ANSYS, so it can be modeled a metal foam and study its mechanical behavior on ANSYS.

The first chapter focuses on the presentation of metals and metallic materials in general, because they are used to make metal foams. The second chapter is about the metal foams, their profile, their advantages and disadvantages, as well as on their history. The third chapter refers to the different ways of metal foams processing and the ability to understand new and old ways of metal foam processing.

The fourth chapter refers to the properties of metal foam and their applications. Metal foams have as a common feature the characteristic of low density in combination with acoustic, thermal, electrical and mechanical properties. The fifth chapter presents the principles of finite element method for the better understanding of the metal foam modeling.

The sixth chapter refers to the algorithms that were made for Matlab and ANSYS for a better understanding of the whole idea, the final production of the model and the main areas of interest on those algorithms. Finally, on the seventh chapter are presented the results of the model combinations that occurred and the conclusions from the mechanical analysis of them.

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΠΑΠΑΝΙΚΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ	Αναπληρωτής Καθηγητής	
2	ΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ-ΕΛΕΝΗ	Ακαδημαϊκή Υπότροφος (PhD)	
3	ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

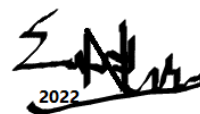
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Νελαΐ Σωτήριος του Αρμπέν, με αριθμό μητρώου 46146695 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Νελαΐ Σωτήριος



2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- Μέταλλα και Μεταλλικά Υλικά.....	8
1.1 Μέταλλα	8
1.1.1 Ορισμός και Ιδιότητες Μετάλλων.....	8
1.1.2 Μεταλλικός Δεσμός και Κοκκώδης Δομή των Μετάλλων	10
1.2 Μεταλλικά Κράματα	12
1.2.1 Σκοπός των Κραμάτων	13
1.2.2 Επίδραση Κοκκώδους Δομής στις Μηχανικές Ιδιότητες	14
1.3 Μηχανικές Ιδιότητες Μετάλλων.....	14
1.3.1 Τάση και Παραμόρφωση	15
1.3.2 Περιοχές Παραμόρφωσης.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Μεταλλικοί Αφροί και Μέθοδοι Χαρακτηρισμού αυτών.....	19
2.1 Αφροί Μετάλλου.....	19
2.2 Ιστορική Αναδρομή Μεταλλικών Αφρών	21
2.3 Χαρακτηριστικά Μεταλλικών Αφρών	23
2.4 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και χρήση των μεταλλικών αφρών.....	25
2.5 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού των μεταλλικών αφρών.....	26
2.5.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι	27
2.5.2 Καταστροφικοί Έλεγχοι	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- Τρόποι Παραγωγής Μεταλλικών Αφρών	30
3.1 Παραγωγή πορωδών από υγρό μέταλλο.....	32
3.1.1 Αφροποίηση με μέσα που δημιουργούν φυσαλίδες (Aiforas).....	32
3.1.2 Αφροποίηση με αέριο	34
3.1.3 Διαδικασία ευτηκτικής στερεοποίησης στερεού- αερίου "Gasars"	35
3.2 Αφροποίηση μεταλλικών αφρών μέσω τήξης σκόνης μετάλλου.....	37
3.2.1 Μέθοδος FORMGRIP.....	37

3.2.2 Συμπύεση Κόνεων (Merura)	38
3.3 Αφροποίηση με ψεκασμό.....	39
3.4 Μέθοδοι Χύτευσης	40
3.4.1 Χύτευση με πολυμερικό πρότυπο	40
3.4.2 Χύτευση (LBM-Lattice Block Materials)	41
3.4.3 Χύτευση για την δημιουργία μεταλλικών αφρών μεταβλητού πορώδους.....	41
3.5 Παρασκευή αφρού αλουμινίου με πολύπλοκο σχήμα.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- Ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών και Εφαρμογές.....	43
4.1 Φυσικές Ιδιότητες Αφρών.....	43
4.2 Χημικές Ιδιότητες Αφρών.....	44
4.3 Μηχανικές Ιδιότητες Αφρών.....	45
4.4 Μέτρο Ελαστικότητας.....	46
4.5 Αντοχή δομής Σάντουιτς	47
4.6 Εφαρμογές Μεταλλικών Αφρών	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- Γενικές Αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM-Finite Element Method).....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- Μοντελοποίηση μεταλλικού αφρού με την βοήθεια του Matlab και του ANSYS	56
6.1 Εισαγωγή	56
6.2 Ανάλυση Αλγορίθμου Προγράμματος Μοντελοποίησης.....	60
6.3 Μοντελοποίηση Γεωμετρίας στο ANSYS.....	64
6.4 Μηχανική Συμπεριφορά.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	71
7.1 Αποτελέσματα Μηχανικής Ανάλυσης	71
7.2 Συμπεράσματα.....	78
Παράρτημα Α – Κώδικας αλγορίθμου για το Matlab	79
Παράρτημα Β – Πρώτος κώδικας αλγορίθμου μοντελοποίησης στο ANSYS.....	81
Παράρτημα Γ – Βελτιωμένος κώδικας αλγορίθμου μοντελοποίησης στο ANSYS	85
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- Μέταλλα και Μεταλλικά Υλικά

1.1 Μέταλλα

Μία μεγάλη κατηγορία χημικών στοιχείων που εμφανίζουν κοινές ορισμένες ιδιότητες είναι τα μέταλλα όπου παρουσιάζουν ιδιότητες όπως είναι η λάμψη, η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, ο σχηματισμός ελασμάτων (ελατά) και συρμάτων (όλκιμα). Τα περισσότερα, όμως όχι όλα, έχουν μεγάλη πυκνότητα, είναι σκληρά και ανθεκτικά. Διακρίνονται από τα αμέταλλα, τα οποία αποτελούν επίσης την δεύτερη μεγάλη κατηγορία των στοιχείων, τόσο για τις φυσικές ιδιότητες τους, όσο και για τις χημικές.

Κάποια από τα πιο βασικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι ο σίδηρος, το αλουμίνιο, ο χαλκός, το τιτάνιο, το νάτριο, ο ψευδάργυρος και πολλά άλλα.

Πολύ σημαντικό είναι να γνωρίζουμε πως όλα τα μέταλλα σε θερμοκρασία δωματίου (20 °C) είναι στερεά, όμως μέσα στα μέταλλα υπάρχει και το υδρογόνο, το οποίο δεν έχει την ίδια κατάσταση όπως τα άλλα μέταλλα σε θερμοκρασία δωματίου. Τέλος, έχουν το χαρακτηριστικό πλατινένιο ή αργυρό χρώμα, με εξαίρεση, φυσικά, τον χρυσό και τον χαλκό, που έχουν κίτρινο και ερυθρό χρώμα αντίστοιχα.

1.1.1 Ορισμός και Ιδιότητες Μετάλλων

Για να μπορέσουμε να διακρίνουμε τα χημικά στοιχεία χρησιμοποιούμε τον περιοδικό πίνακα (Εικόνα 1.1). Από τα χημικά στοιχεία αυτά, τα διακρίνουμε σε μέταλλα, όπου είναι περίπου 70 σε αριθμό, αλλά και στα αμέταλλα τα οποία είναι περίπου 30 σε αριθμό. Η διάκριση αυτών γίνεται λόγω τις διαφοροποίησης των φυσικών και χημικών τους ιδιοτήτων. Ο περιοδικός πίνακας των στοιχείων χωρίζεται σε στήλες, όπου βρίσκονται οι ομάδες, αλλά και σε σειρές, όπου βρίσκονται οι περίοδοι. Ο ηλεκτροθετικός χαρακτήρας των στοιχείων είναι αυξημένος στις πρώτες στήλες και στις τελευταίες σειρές.

1 H Hydrogen																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	*	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	**	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson
			57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
			89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

Εικόνα 1.1: Περιοδικός πίνακας στοιχείων (πηγή: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/>)

Επομένως, μέταλλο λέγεται κάθε υλικό, που λαμβάνεται από διάφορα μεταλλεύματα με την χρήση διαφόρων μεταλλουργικών μεθόδων, παρουσιάζει μεταλλικό δεσμό και κατά κανόνα εμφανίζει τις παρακάτω ιδιότητες:

- Έχει χαρακτηριστική μεταλλική λάμψη
- Παρουσιάζει λευκό χρωματισμό με αποτέλεσμα να ανακλούν όλα τα μήκη κύματος, εκτός από το χαλκό και το χρυσό
- Βρίσκεται σε στερεά κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με εξαίρεση τον υδράργυρο (Hg) που είναι υγρός
- Έχει σχετικά υψηλή πυκνότητα
- Έχει σχετικά υψηλό σημείο τήξεως
- Εμφανίζει υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Διαθέτει πλαστικότητα, δηλαδή είναι δυνατόν να μορφοποιηθεί εν ψυχρώ, χωρίς απαραίτητα να θερμανθεί
- Έχει κρυσταλλική δομή
- Έχουν καλή κατεργασιμότητα
- Διαπερνώνται δύσκολα από ακτίνες X

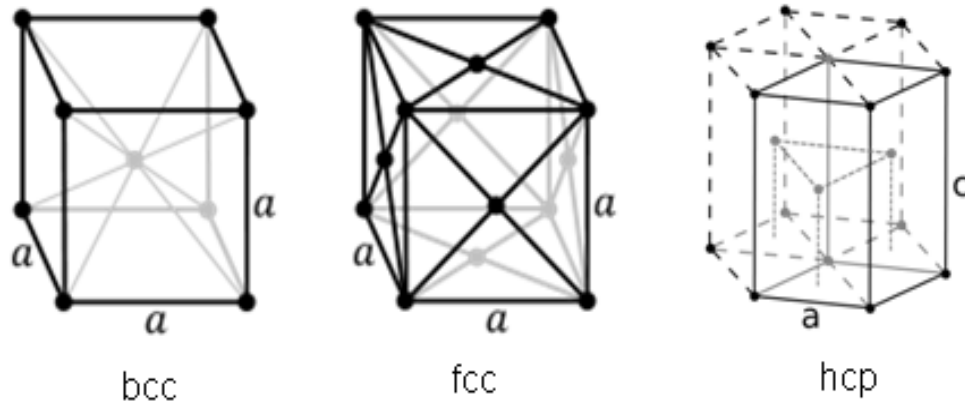
Τέλος, τα μέταλλα διακρίνονται σε ελατά και όλκιμα, ανάλογα αν έχουν υψηλό βαθμό ελασιμότητας ή όλκιμότητας. Η ελασιμότητα χαρακτηρίζει την ικανότητα των μετάλλων και κραμάτων να επιδέχονται

διάφορους τρόπους μορφοποίησης υπό πίεση. Επίσης, αποτελεί μία μορφή πλαστικότητας των μετάλλων με δεδομένο ότι κατά την παραμόρφωση υπό πίεση αυτά δεν θα καταστρέφονται, δηλαδή δεν θραύονται ούτε ρηγματώνονται. Αντιθέτως, Η ελασιμότητα χαρακτηρίζει την ικανότητα των μετάλλων και κραμάτων να επιδέχονται διάφορους τρόπους μορφοποίησης υπό πίεση και έλξη και αναφέρεται στην ιδιότητα των υλικών να εμφανίζουν σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις πριν τη θραύση.

1.1.2 Μεταλλικός Δεσμός και Κοκκώδης Δομή των Μετάλλων

Αρχικά, η δομή των μετάλλων εμφανίζει δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες. Η μία ιδιότητα από αυτές είναι πως έχουν μεταλλικό δεσμό και η άλλη είναι πως όλη η μάζα του μετάλλου αποτελείται από κόκκους. Λόγω του μεταλλικού δεσμού τους, τα μέταλλα εμφανίζουν μία κρυσταλλική δομή κατά την οποία οι πυρήνες των ατόμων είναι διατεταγμένοι σε κανονικές πολυεδρικές μορφές που ονομάζονται κρυσταλλικά πλέγματα.

Με αυτό τον τρόπο έχουμε κρυσταλλικές δομές χωροκεντρομένου κυβικού συστήματος (BCC), εδροκεντρομένου κυβικού συστήματος (FCC) και μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικού (HCP). Έτσι, στην περίπτωση που το μέταλλο μας έχει κρυσταλλική δομή χωροκεντρομένου κυβικού συστήματος, τα άτομα τοποθετούνται στις κορυφές της στοιχειώδους κυβικής κυψελίδας και ένα βρίσκεται στο κέντρο του κύβου (Εικόνα 1.2). Στην περίπτωση του εδροκεντρομένου κυβικού συστήματος, τα άτομα είναι τοποθετημένα στις οκτώ κορυφές της στοιχειώδους κυβικής κυψελίδας, καθώς και στα κέντρα των έξι εδρών του κύβου (Εικόνα 1.2). Επιπροσθέτως, στην περίπτωση της μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικού, το κρυσταλλικό σύστημα της μοναδιαίας κυψελίδας είναι το εξαγωνικό. Το στοιχειώδες κύτταρο είναι ένα ορθό πρίσμα, ρομβικής ή εξαγωνικής βάσης, το οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελείται από έξι ορθά πρίσματα τριγωνικής βάσης. Τα άτομα είναι τοποθετημένα στις κορυφές και στα κέντρα των εξαγώνων των δύο βάσεων και στο επίπεδο το οποίο τέμνει στο μέσο του το ύψος του πρίσματος.

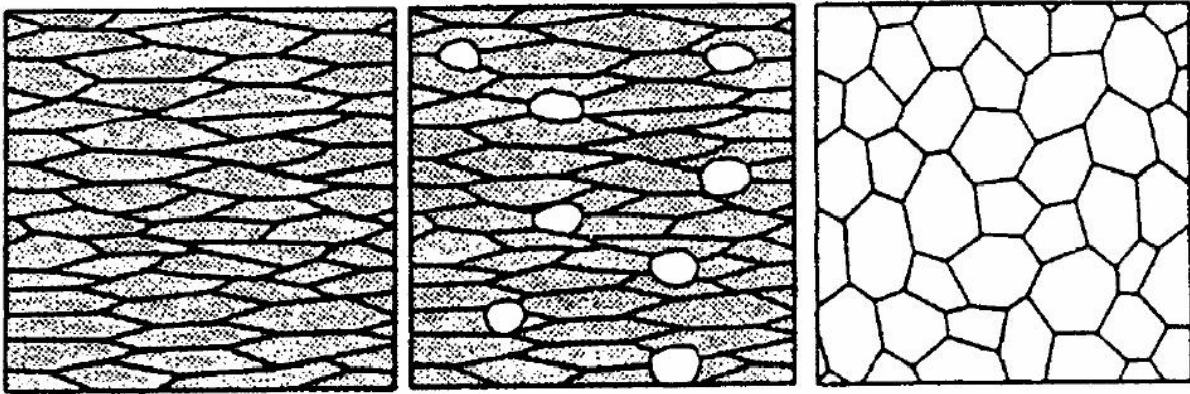


Εικόνα 1.2: Απεικονίσεις κρυσταλλικών πλεγμάτων BCC, FCC και HCP (πηγή: <http://pubs.sciepub.com/ijp/2/6/11/figure/7>)

Από την άλλη όμως πλευρά, έχουμε και την κοκκώδη δομή των μετάλλων, όπου και αυτή η ιδιότητα τους προσδίδει σημαντικά στις μηχανικές τους ιδιότητες. Οι κόκκοι ενός μετάλλου είναι οι πολλοί κρύσταλλοι από τους οποίους αποτελείται το μεταλλικό μας τεμάχιο, όπου έχουν μία συγκεκριμένη κρυσταλλική δομή από τις παραπάνω που προαναφέρθηκαν.

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τήξεως, τα μέταλλα σε αυτές τις θερμοκρασίες βρίσκονται σε υγρή φάση. Καθώς η θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται, τότε αρχίζει και η στερεοποίηση του μετάλλου. Επομένως, σε διάφορα σημεία της μάζας του ρευστού μετάλλου αρχίζει και η στερεοποίηση του σημειακά, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μικροί κρύσταλλοι. Ύστερα, πάνω στους κρυστάλλους που δημιουργήθηκαν προσκολλώνται διαρκώς νέα άτομα, ενώ συγχρόνως εμφανίζονται νέοι κρύσταλλοι. Μετά από ένα χρονικό διάστημα μεγάλο τμήμα της μάζας του μετάλλου θα έχει κρυσταλλοποιηθεί και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την επαφή των κρυστάλλων μεταξύ τους. Αφού γίνει αυτό, το μεταλλικό τεμάχιο θα έχει ελαττώσει θερμοκρασία κάτω από μία κρίσιμη (σημείο πήξης), έχοντας ως αποτέλεσμα το μέταλλο να έχει στερεοποιηθεί και οι κόκκοι να έχουν ενωθεί μεταξύ τους.

Έτσι, η διαδικασία αυτή της στερεοποίησης καταλήγει σε μια μικροδομή κατά την οποία έχουμε τους κόκκους με την κανονική κρυσταλλική τους μορφή, όπου βρίσκονται σε ισορροπία και τα όρια των κόκκων, οι οποίες αποτελούν περιοχές ακαταστασίας της κρυσταλλικής δομής (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Στάδια ανάπτυξης μεταλλικών κόκκων και των ορίων τους (πηγή: <https://docplayer.gr/41137131-Ergastirio-tehnologias-ylikon.html>)

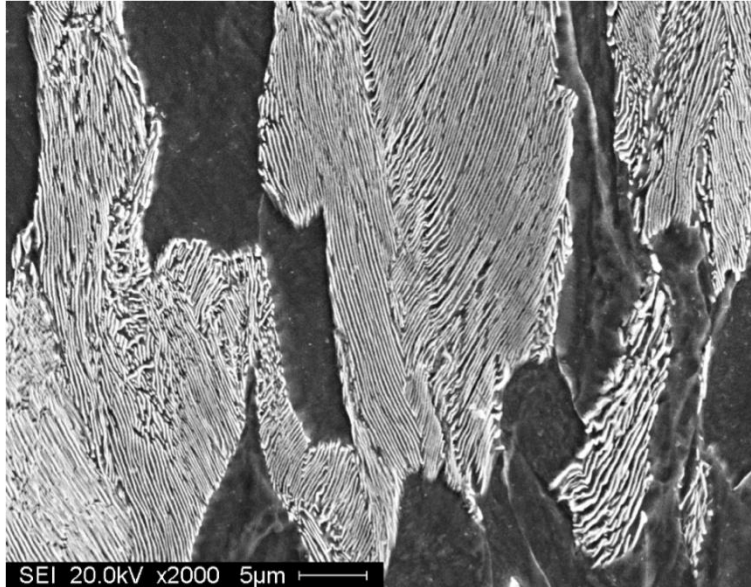
1.2 Μεταλλικά Κράματα

Κράμα ονομάζεται η ομογενής αντικατάσταση που διαμορφώνεται από την ανάμειξη δύο ή περισσότερων στοιχείων, εκ των οποίων ένα από αυτά είναι μέταλλο. Τα είδη των κραμάτων είναι τρία:

- Κράματα που σχηματίζονται από δύο ή παραπάνω μέταλλα
- Κράματα που σχηματίζονται μεταξύ ενός μετάλλου και ενός αμέταλλου
- Κράματα που σχηματίζονται μεταξύ υδραργύρου και ενός άλλου μετάλλου

Έτσι, τα κράματα μετάλλων δημιουργούνται για να συνδυάσουν ιδιότητες των βασικών συστατικών σε ένα καινούριο υλικό. Επομένως, βασικός λόγος κατασκευής των κραμάτων είναι η βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, καθώς ένα κράμα θα έχει βελτιωμένη σκληρότητα, χαμηλό σημείο τήξης, βελτιωμένες ιδιότητες κατά την χύτευση, καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλύτερες χημικές ιδιότητες και αντίσταση στην διάβρωση σε σχέση με τα καθαρά μέταλλα. Ένα απλό παράδειγμα κατασκευή κράματος είναι ο χάλυβας, ο οποίος είναι κράμα σιδήρου με άνθρακα και είναι πιο ανθεκτικός και σκληρός από τον σίδηρο που είναι ένα από τα βασικά του συστατικά.

Τα συστατικά στοιχεία του κράματος συμμετέχουν στην δημιουργία μιας κρυσταλλικής δομής, η οποία συνήθως δημιουργείται λόγω σύντηξης των στοιχείων του κράματος και ακολουθεί στερεοποίηση. Ύστερα από κατάλληλη προετοιμασία μπορούμε να δούμε την μικροδομή (κόκκους) του κράματος ή ενός μετάλλου, με την βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4: Ανάλυση οπτικού μικροσκοπίου της φάσης του Περλίτη σε χάλυβα (πηγή: [https://el.wikipedia.org/wiki/Περλίτης_\(μεταλλουργία\)](https://el.wikipedia.org/wiki/Περλίτης_(μεταλλουργία)))

1.2.1 Σκοπός των Κραμάτων

Τα κράματα έχουν κατασκευαστεί για να διευκολύνουν την πιθανή κατασκευή ενός εξαρτήματος και για πολλούς άλλους λόγους που αποτελούν τον σκοπό για τον οποίο έχουν δημιουργηθεί. Έτσι, σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναδειχθεί ο σκοπός ύπαρξής τους.

Ο λόγος κατασκευής των κραμάτων είναι:

- Επειδή τα καθαρά μέταλλα είναι πολύ μαλακά και αδύναμα, για αυτό το λόγο δεν μπορεί να γίνει χρήση τους για την κατασκευή ισχυρών αντικειμένων. Για αυτό το λόγο κραματοποιούνται για να υπάρξει αύξηση της αντοχής τους.
- Επειδή δύο ή περισσότερα μέταλλα μπορούν να αναμειχθούν με διαφορετικές συστάσεις για να παράγουν διαφορετικά κράματα με επιθυμητά χαρακτηριστικά και για συγκεκριμένες εφαρμογές.
- Η κραματοποίηση μειώνει την χημική αντιδραστικότητα των μετάλλων με τα οξέα, με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο επιρρεπείς στην διάβρωση.
- Η χρήση των κραμάτων σε αντίθεση με τα ακριβά καθαρά μέταλλα βοηθάει στην βελτίωση των οικονομικών παραγόντων μιας βιομηχανίας και στην χρήση των εξαρτημάτων της.

- Το κράμα μπορεί να ενισχύσει ή να καταστείλει την αντοχή και την ηλεκτρική αγωγιμότητα, καθιστώντας ένα κράμα πιο κατάλληλο από το καθαρό μέταλλο για χρήση σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

1.2.2 Επίδραση Κοκκώδους Δομής στις Μηχανικές Ιδιότητες

Με την γνώση των παραπάνω, πλέον μπορεί να γίνει κατανοητό πως ένα μέταλλο που θα αποτελούνταν από ένα μοναδικό κρύσταλλο, θα έσπαγε πολύ εύκολα. Αυτό γίνεται καθώς οι καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η αντοχή και η ελαστικότητα, οφείλονται από την αντοχή που παρουσιάζουν τα όρια των κόκκων μεταξύ τους στην κατάσταση ισορροπίας. Πράγμα που κάνει κατανοητό, γιατί ένα μέταλλο με ένα μοναδικό κρύσταλλο θα έσπαγε πολύ πιο εύκολα. Επομένως, όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι ενός μεταλλικού υλικού, τόσο καλύτερες είναι και οι μηχανικές του ιδιότητες. Τέλος, το μέγεθος των κόκκων μπορεί να ποικίλλει, έτσι χωρίζουμε το υλικό σε χονδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο.

1.3 Μηχανικές Ιδιότητες Μετάλλων

Πάρα πολλά μεταλλικά υλικά, αλλά και μη μεταλλικά υλικά, έχουν ένα χρόνο λειτουργίας κατά την διάρκεια της ζωής τους και αυτό γιατί υπόκεινται σε κάποια φορτία. Για να γίνει αντιληπτό αυτό, μπορεί κάποιος να σκεφτεί πληθώρα μεταλλικών εφαρμογών που αστοχούν, όπως είναι ο χαλκός στα καλώδια λόγω θερμικών φορτίων, οι χάλυβες από τους οποίους κατασκευάζονται οι άξονες των τροχών ενός αυτοκινήτου και τα κράματα αλουμινίου από τα οποία κατασκευάζουμε ελαφριές κατασκευές. Για αυτό το λόγο, θα πρέπει να μην γίνεται υπερδιαστασιολόγηση καθώς είναι απαραίτητο να γνωρίζει κάποιος τα χαρακτηριστικά του υλικού έτσι ώστε να μην επέλθει θραύση. Ανάλογα με την δύναμη που εφαρμόζετε σε ένα υλικό ή το φορτίο η μηχανική συμπεριφορά του υλικού είναι διαφορετική. Πολύ σημαντικές μηχανικές ιδιότητες κατά τον σχεδιασμό είναι:

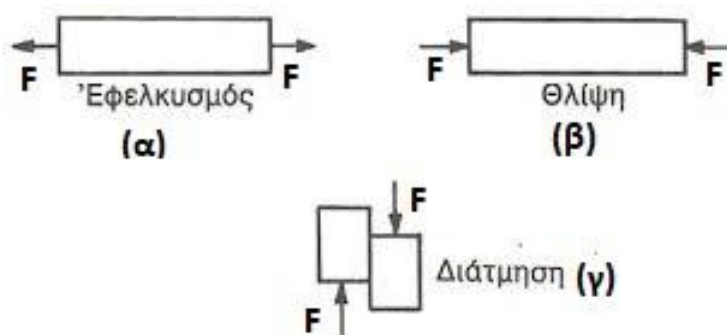
- Η δυσκαμψία
- Η αντοχή
- Η σκληρότητα
- Η ολκιμότητα
- Η δυσθραυστότητα

Για την εύρεση αυτών των μηχανικών ιδιοτήτων, γίνονται πειραματικές διαδικασίες υπό ελεγχόμενα φορτία, συγκεκριμένης διάρκειας εφαρμογής στο υλικό, όπως και επίσης θα πρέπει να είναι υπό

σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα φορτία τα οποία μπορεί να ασκούνται σε ένα υλικό μπορεί να είναι εφελκυστικά, θλιπτικά ή διατμητικά και το μέγεθος τους ή θα μεταβάλλεται με τον χρόνο είτε θα είναι σταθερό. Όμως, ακόμα και η θερμοκρασίες που επικρατούν σε ένα υλικό κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του μπορούν να αποδειχθούν παράγοντες σημαντικοί.

1.3.1 Τάση και Παραμόρφωση

Αν ένα φορτίο μεταβάλλεται σχετικά αργά με την πάροδο του χρόνου ή είναι στατικό, όταν εφαρμόζεται σε μία κάθετη διατομή η μηχανική του συμπεριφορά μπορεί να προσδιορισθεί με μία δοκιμή τάσης-παραμόρφωσης, η οποία γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για να μπορέσει να εφαρμοστεί ένα συγκεκριμένο φορτίο οι μέθοδοι είναι τρεις: εφελκυσμός, θλίψη και διάτμηση, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 1.5. Όμως από πολλές εφαρμογές απορρέει πως πολλά φορτία είναι στρεπτικά παρά αμιγώς διατμητικά.



Εικόνα 1.5: Στην εικόνα αυτή παρουσιάζεται σχηματικά και σε ποια σημεία γίνεται η εφαρμογή φορτίου (α) εφελκυσμός, (β) θλίψη και (γ) διάτμηση (πηγή: <http://users.auth.gr/ptsioras>)

Ο εφελκυσμός είναι από τις πιο συνήθεις μηχανικές δοκιμές που γίνονται για τάση-παραμόρφωση. Η δοκιμή αυτή γίνεται για την εύρεση πολλών σημαντικών μηχανικών ιδιοτήτων που μπορεί να έχει ένα υλικό και πρέπει να συμπεριληφθούν κατά την διαδικασία σχεδιασμού. Για να επιτευχθεί το πείραμα του εφελκυσμού ένα δοκίμιο παραμορφώνεται μέχρι την θραύση του, αυξάνοντας σταδιακά το εφελκυστικό φορτίο που του ασκείται κατά τον άξονα του δοκιμίου. Κατά το εφελκυστικό φορτίο που εφαρμόζεται το δοκίμιο υπό εξέταση εμφανίζει μια παραμόρφωση, από το οποίο μεταβάλλεται το αρχικό του μήκος και επέρχεται μία προκύπτουσα επιμήκυνση. Τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού δίνονται από διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ή αλλιώς τάσης-επιμήκυνσης (Εικόνα 1.6), έως ότου το δοκίμιο θραυέται. Η μηχανική τάση ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας και η παραμόρφωση ως η αλλαγή του σχήματος ή του μεγέθους ενός σώματος μετά από

την άσκηση κάποιας δύναμης πάνω στο σώμα. Στην περίπτωση που η ασκούμενη δύναμη τείνει να επιφέρει επιμήκυνση του στερεού, η τάση έχει θετικό πρόσημο και είναι εφελκιστική. Στην αντίθετη περίπτωση που η τάση έχει αρνητικό πρόσημο τότε θα ήταν θλιπτική. Από αυτό το διαχωρισμό μπορεί να βγει το συμπέρασμα, τι τάσεις δέχεται το υλικό.

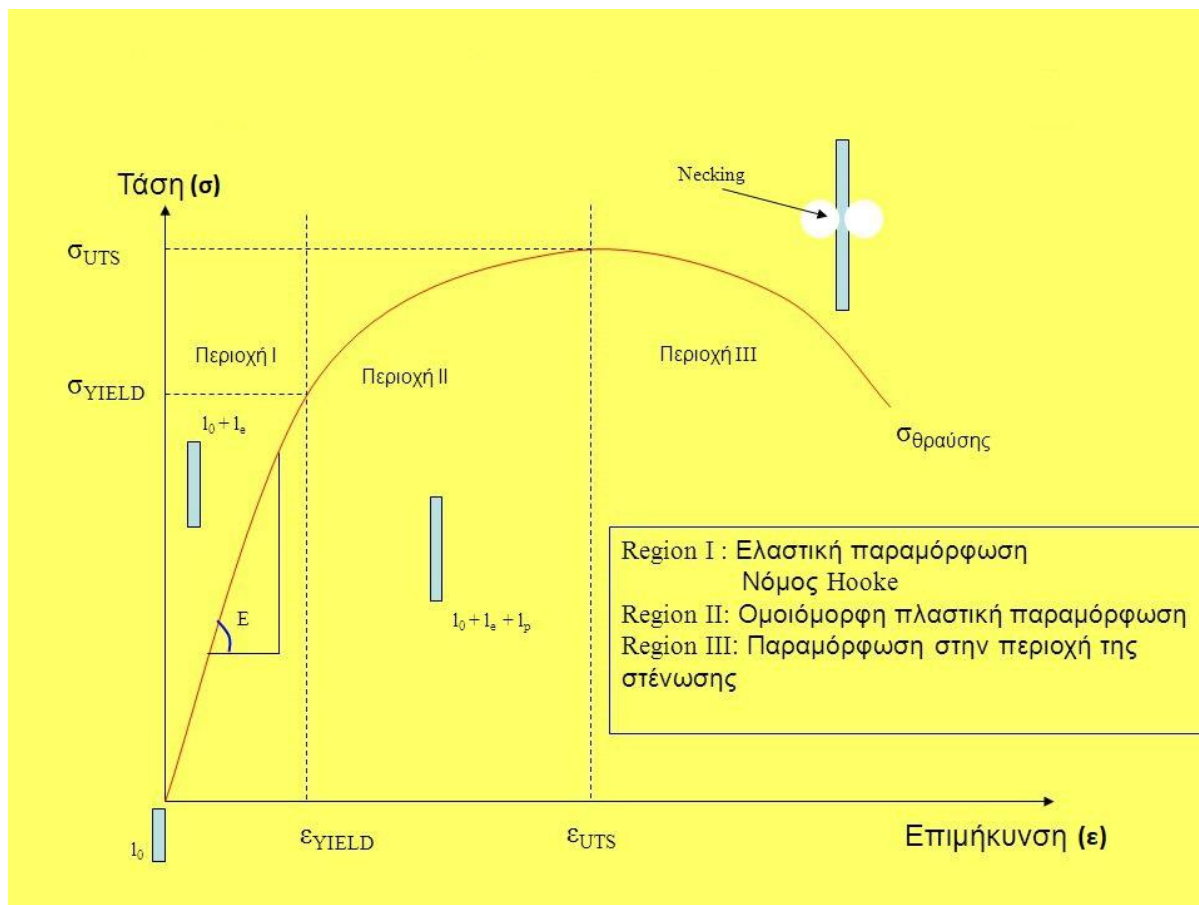
- Μηχανική Ορθή Τάση $\sigma = \frac{F}{A}$, όπου F η δύναμη που ασκείται στο υλικό και A η διατομή του
- Διατμητική Τάση $\tau = \frac{F_s}{A}$, όπου F_s η δύναμη που ασκείται στο υλικό εφαπτομενικά και A η διατομή του
- Μηχανική Παραμόρφωση $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, όπου Δl η στιγμιαία παραμόρφωση και το αρχικό μήκος του υλικού

Η μηχανική παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος, παρόλα αυτά μερικές φορές εκφράζεται και ως ποσοστό επί της εκατό.

Τέλος, κατά την διάτμηση η εφελκιστική τάση που εφαρμόζεται σε έναν από τους άξονες του υλικού, τείνει να επιφέρει μια παράλληλη επιμήκυνση στον άξονα. Με αποτέλεσμα, κατά αυτή την επιμήκυνση το υλικό τείνει να παραμορφωθεί (συμπιεστεί) και κατά τους άλλους δύο άξονες. Για τον λόγο αυτό έχει οριστεί ο λόγος του Poisson ν που είναι το αρνητικό κλάσμα της πλευρικής επιμήκυνσης προς την αξονική.

1.3.2 Περιοχές Παραμόρφωσης

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1.6, υπάρχουν διαφόρων ειδών περιοχές στην οποία μπορεί να φτάσει το υλικό. Η περιοχή I αποκαλείται περιοχή της ελαστικής παραμόρφωσης, καθώς το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά, η περιοχή II αποκαλείται περιοχή της ομοιόμορφης πλαστικής παραμόρφωσης, ή σκέτο πλαστικής παραμόρφωσης, στο οποίο συναντάται το σημείο εφελκυστικής αντοχής (UTS) το οποίο είναι υψηλής σημαντικότητας για το υλικό και η περιοχή III ονομάζεται περιοχή παραμόρφωσης στην στένωση και περιοχή θραύσης υλικού.



Εικόνα 1.6: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης και κρίσιμα σημεία υλικού (πηγή: <https://slideplayer.gr/slide/1990473/>)

Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή I ορίζεται ως περιοχή της ελαστικής παραμόρφωσης και συγκεκριμένα όλα τα στερεά υλικά εμφανίζουν κάτω υπό συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης ένα όριο ελαστικότητας. Το όριο αυτό είναι μία τάση κατά την οποία πάνω από αυτή το υλικό αλλάζει συμπεριφορά. Ένα όλκιμο υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά μετά από αυτό το όριο, ενώ ένα ψαθυρό υλικό θραύεται. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6 στην περιοχή I το υλικό φαίνεται να έχει γραμμική ελαστικότητα, πράγμα που σημαίνει πως ισχύει ο νόμος του Hooke και όπως φαίνεται και από την εικόνα μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας E του υλικού ή μέτρο Young. Έτσι, το υλικό αυτό εμφανίζει γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Ομοίως, για την περίπτωση της καθαρής διάτμησης ισχύει το μέτρο διάτμησης G . Επομένως, αν κατά την διάρκεια φόρτισης, αποσυρθεί το φορτίο και το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή τότε το υλικό επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις.

- Νόμος του Hooke για τον εφελκυσμό: $\sigma = E \cdot \epsilon$
- Νόμος του Hooke για τη διάτμηση: $\tau = G \cdot \gamma$

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας γίνεται είτε γραφικά λόγω της κλίσης της γραμμικής περιοχής, είτε από τον νόμο του Hooke για δεδομένα στοιχεί τάσης παραμόρφωσης, με την προϋπόθεση πάντα πως βρισκόμαστε στην ελαστική περιοχή.

Κατά την περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης, τα περισσότερα μεταλλικά υλικά όταν εφελκυστούν πάνω από περίπου 0,1% της παραμόρφωσης τότε εμφανίζουν αναντίστροφες μεταβολές στις διαστάσεις τους, που καλούνται πλαστικές παραμορφώσεις. Μετά το στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης, το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά, έχοντας ως αποτέλεσμα αύξηση του μήκους και μείωση του πλάτους του. Αφού το φορτίο περάσει το μέγιστο σημείο (UTS), το υλικό θα εμφανίσει ελάττωση της διατομής τοπικά και καλείται ως λαιμός (necking). Ύστερα, από την δημιουργία λαιμού το υλικό θραύεται.

Τα κρίσιμα μεγέθη της Εικόνας 1.6 είναι τα παρακάτω:

- σ_{YIELD} : Ονομάζεται σημείο διαρροής και είναι η τάση κατά την οποία εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή το πρώτο σημείο κατά το οποίο έχουμε παραμόρφωση 0,1%.
- σ_{UTS} : Ονομάζεται μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και είναι το μέγιστο σημείο τάσης πάνω από την οποία εμφανίζεται ο λαιμός.
- E: Μέτρο Ελαστικότητας Υλικού
- $\sigma_{\theta\rho\alpha\upsilon\sigma\eta\varsigma}$: Ονομάζεται τάση θραύσης και είναι η τάση και την οποία το υλικό μας σπάει και έχει ξεπεραστεί η τάση μέγιστης αντοχής, καθώς την συγκεκριμένη τάση το υλικό θα την δεχθεί και πριν την τάση μέγιστης αντοχής, αυτό όμως δεν συνεπάγεται και πως θα σπάσει

Για τιμές μικρότερες του ορίου διαρροής η παραμόρφωση είναι ελαστική ενώ σε μεγαλύτερες η παραμόρφωση είναι το άθροισμα της ελαστικής και πλαστικής. Τέλος, υλικά όπως ο χάλυβας έχουν περιοχή σημείου διαρροής με άνω όριο διαρροής και κάτω όριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Μεταλλικοί Αφροί και Μέθοδοι Χαρακτηρισμού αυτών

2.1 Αφροί Μετάλλου

Με τον όρο “πόρους” ονομάζουμε τους κενούς χώρους μέσα σε κάποιο στερεό υλικό που περικλείουν αέρα. Ο όρος “πορώδες” είναι το ποσοστό κενού χώρου που περιέχεται σε ένα υλικό και εκφράζεται ως ποσοστό ως προς τον συνολικό όγκο. Μικρά ποσοστά των πόρων υποδηλώνουν μικρό πορώδες και ισχύει και το αντίστροφο.

Κυψελίδα, ή κελί, από την άλλη πλευρά, ορίζεται η δομή του υλικού που περικλείει τους πόρους. Τα προηγούμενα χρόνια οι ειδικοί εστίαζαν στην κατασκευή συμπαγών υλικών, καθώς ήθελαν να εξαλείψουν τα ελαττώματα που θεωρούσαν πως είχαν τα υλικά με πόρους.

Ένας τύπος αφρού στερεής κατάστασης ονομάζεται μεταλλικός αφρός. Ο όρος αυτός αποτελεί μια υποκατηγορία της οικογένειας των πορωδών υλικών. Έτσι, ο όρος του αφρού χαρακτηρίζει εγκλείσματα αερίου εντός ενός υγρού περιβάλλοντος. Για να επιτευχθεί η μορφολογία αυτή, γίνεται γρήγορη στερεοποίηση του υγρού, λαμβάνοντας έτσι έναν στερεό αφρό.

Για να χαρακτηριστεί ένα υλικό ως αφρός, θα πρέπει το πορώδες υλικό να έχει πορώδες της τάξης του 65 έως 95% (Εικόνα 2.1). Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της έρευνας και για τον χαρακτηρισμό ενός μετάλλου ως αφρός είναι η εύρεση τεχνικών οδηγιών με τις οποίες θα γίνεται σωστός έλεγχος του ποσοστού του πορώδους, όπως επίσης και το μέγεθος των κελιών κατά την παραγωγή αυτών.

Όμως, τα μεταλλικά συστήματα τα οποία υπάρχουν χωρίζονται στους παρακάτω όρους:

- Κυτταρικά Μέταλλα, είναι υλικά με υψηλό κλάσμα όγκου κενών αποτελούμενο από δίκτυο αντηρίδων και πλακών
- Πορώδη Μέταλλα, έχουν σχεδόν σφαιρικούς πόρους και το πορώδες επίπεδο είναι μικρότερο από 70%. Μηχανικά, δεν αλληλεπιδρούν οι πόροι αν το πορώδες είναι μικρότερο του 20%
- Μεταλλικοί Αφροί, είναι υποομάδα των κυτταρικών μετάλλων, συνήθως πολυεδρικών κυττάρων, αλλά τα σχήματα μπορεί να ποικίλουν

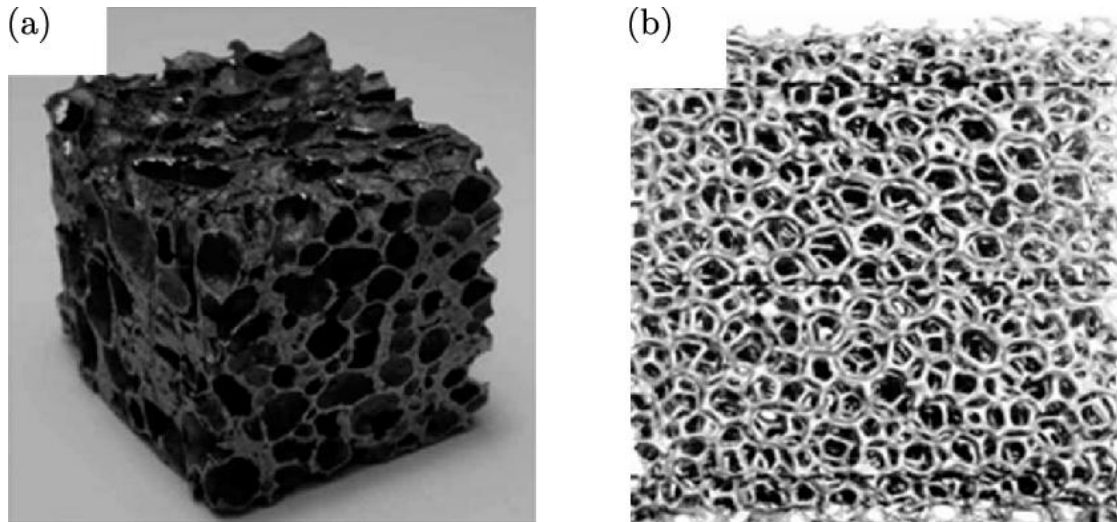


Εικόνα 2.1: Απεικόνιση μεταλλικού αφρού Αλουμινίου (πηγή: <https://www.filter-elements.org/filter-elements/metallic-foams.html>)

Τα πορώδη στερεά δεν είναι αναγκαίο να γίνει η κατασκευή τους από υγρή κατάσταση αλλά μπορεί να γίνει και με τον τρόπο της πυροσυσσωμάτωσης, για τον λόγο αυτό έχουν και διαφορετικές μορφολογίες. Τα υλικά αυτά μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι πολυεδρικά κελιά, αποτελούμενα από δίκτυο ακμών στα κελιά που συνδέονται μεταξύ τους με στερεά λεπτά φυλλίδια του ίδιου υλικού. Εάν τα κελιά είναι στο επίπεδο τότε η μορφολογία είναι κυψελοειδής και αν βρίσκεται στον χώρο τότε προσδιορίζεται ως αφρός.

Τα κύρια στοιχεία του είναι το μέγεθος του υλικού, το πλήθος των πόρων, ο τύπος των κελιών και το μέγεθος των πόρων. Αν ένα υλικό έχει “μικρό πορώδες”, τότε η πυκνότητα του πορώδους του υλικού είναι παρόμοιο με το πρότυπο μεταλλικό υλικό (ή μήτρα), ενώ κατά την αύξηση του πορώδους υπάρχει μείωση της σχετικής πυκνότητας. Τέλος, ο τύπος των κελιών στα πορώδη υλικά τα διακρίνουμε στις εξής δύο κατηγορίες:

- Κλειστού Κελιού (Εικόνα 2.2a), κάθε κελί είναι κλειστό και δεν συνδέεται με γειτονικά του και στις πλευρές διαχωρίζονται το ένα κελί από το άλλο
- Ανοιχτού Κελιού (Εικόνα 2.2b), κάθε κελί ενώνεται με τα γειτονικά του και το υπάρχον υλικό αποτελεί το πλαίσιο και τα όρια του κάθε κελιού



Εικόνα 2.2: Μεταλλικοί Αφροί a) κλειστών κελιών, b) ανοιχτών κελιών (πηγή: https://www.researchgate.net/figure/1-Different-foam-types-a-closed-cell-b-open-cell_fig6_310488467)

2.2 Ιστορική Αναδρομή Μεταλλικών Αφρών

Στις αρχές του 1950 ο Benjamin Sosnicki δημιούργησε μία ιδέα που είχε ως αφορμή την παραγωγή μεταλλικών υλικών σπογγώδους φύσεως, ενώ ήδη από την δεκαετία του 1940 είχε πρωτοπορήσει στην παραγωγή τέτοιου είδους μεταλλικών υλικών. Ο Sosnicki βασίστηκε στην εξάχνωση στοιχείων με χαμηλό σημείο τήξης μέσα σε μεταλλική μήτρα για να μπορέσει να παρασκευάσει τέτοιου είδους μεταλλικούς αφρούς. Αναλυτικότερα, είναι γνωστό πως διαφορετικές φάσεις ορισμένων κραμάτων έχουν και μεγάλη διαφορά στο σημείο βρασμού, πράγμα που έκανε τον Sosnicki να βασιστεί εκεί για την μέθοδο παρασκευής του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για την διαδικασία της μεθόδου να έχουμε την τήξη ενός κράματος στην μία φάση και σε άλλη φάση τον βρασμό του. Η διαδικασία η οποία εκτελείται γίνεται εντός αυτοκλείστου, πρόκειται για εφαρμογή υψηλής πίεσης, στην οποία το συστατικό που έχει ξεκινήσει να βράζει και να βρίσκεται στην αέρια φάση, να μην έχει κάποια οδό διαφυγής από το υγρό μέταλλο.

Στην περίπτωση όπου η πίεση μειωθεί, θα πραγματοποιηθεί βρασμός του κράματος και στην περίπτωση όπου το κράμα ψυχθεί, θα γίνει η παραγωγή ενός στερεού υλικού από εσωτερικούς

κλειστούς πόρους εξαιτίας του αερίου που έχει εγκλωβιστεί. Το υλικό αυτό θα έχει βελτιωμένη θερμική μόνωση, ηχομονωτικές ιδιότητες, κρούσης καθώς και υψηλή ανθεκτικότητα. Επειδή ο τρόπος εφαρμογής ήταν τέτοιος, η χρήση ψευδαργύρου, καδμίου ή υδραργύρου ήταν αναγκαία για την εκμετάλλευση του χαμηλού σημείου βρασμού τους. Παρ' όλα αυτά, η τεχνική αυτή δεν χρησιμοποιήθηκε καθώς ήταν δαπανηρή για την ποσότητα παραγωγής μεταλλικών αφρών και αρκετά επικίνδυνη για τον άνθρωπο.

Στα τέλη του 1950 γίνονται οι πρώτες προσπάθειες μεταλλικών αφρών ανοιχτού πορώδους, όπου γίνονται πολλές καινοτομίες για την παραγωγή τους από την ερευνητική ομάδα United Aircraft Corporation. Η μέθοδος παραγωγής αυτή αξιοποιούσε την ανάμιξη ενός κονιοποιημένου μετάλλου μαζί με ένα υλικό σε σκόνη που θα χρησίμευε στην παραγωγή αερίων. Το υλικό σκόνης θα πρέπει να επιλεγεί με συγκεκριμένο τρόπο, τέτοιο ώστε να έχει παραπλήσια θερμοκρασία αποσύνθεσης με την θερμοκρασία τήξης του μετάλλου. Παρ' όλα αυτά όμως, η μέθοδος είχε το μειονέκτημα πως παρουσιαζόταν πρόβλημα κατά την ψύξη του αφρού.

Οι Hardy και Reisker, το 1962, παρουσίασαν μια καινούρια μέθοδο, όπου για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της ψύξης στον αφρό προσέθεταν την σκόνη αερίου κατευθείαν στο τηγμένο μέταλλο. Αυτή η μέθοδος σε σχέση με το κονιοποιημένο μέταλλο είναι οικονομικότερη, άρα και μέθοδος μεγαλύτερου συμφέροντος. Όμως, λόγω της μη αξιοπιστίας στην αποτελεσματικότητα των μεθόδων αλλά και της αρκετά ακριβής διαδικασίας παραγωγής των μεταλλικών αφρών, η κατασκευή αυτών γινόταν σε Πανεπιστημιακά εργαστήρια.

Στα χρόνια που ακολούθησαν ύστερα πάνω στην παραγωγή μεταλλικών αφρών, έγιναν νέες δημοσιεύσεις από την πανεπιστημιακή κοινότητα, αλλά χωρίς ιδιαίτερα αποτελέσματα προόδου. Όμως η ανάπτυξη των ελαφρών κατασκευών ήρθε το 1990 από ευρωπαϊκά προγράμματα, καθώς εμφανίστηκαν εταιρίες πρόθυμες να εκμεταλλευτούν την χρησιμότητα των υλικών αυτών για το εμπόριο.

Από το 1990 και μετά, το πεδίο εφαρμογής των μεταλλικών αφρών γίνεται όλο και μεγαλύτερο και η ανάπτυξη της έρευνας στον τομέα των πορωδών υλικών αυξάνεται. Πλέον πολλές εταιρίες κατασκευάζουν μεταλλικούς αφρούς με την μέθοδο τήξης, όμως οι υψηλές προδιαγραφές στην ποιότητα είναι ακόμα μία δαπανηρή διαδικασία, πράγμα που κάνει την αγορά αυτών περιορισμένη.

Ωστόσο, πλέον, η έρευνα έχει επικεντρωθεί στον αφρούς αλουμινίου, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του αφρού, του χαμηλού σημείου τήξης που τους προσδίδει την ιδιότητα υψηλής κατεργασιμότητας

και της υψηλής αντοχής σε διάβρωση. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν υλικά όπως το νικέλιο, ο σίδηρος και ο μόλυβδος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή μεταλλικών αφρών.

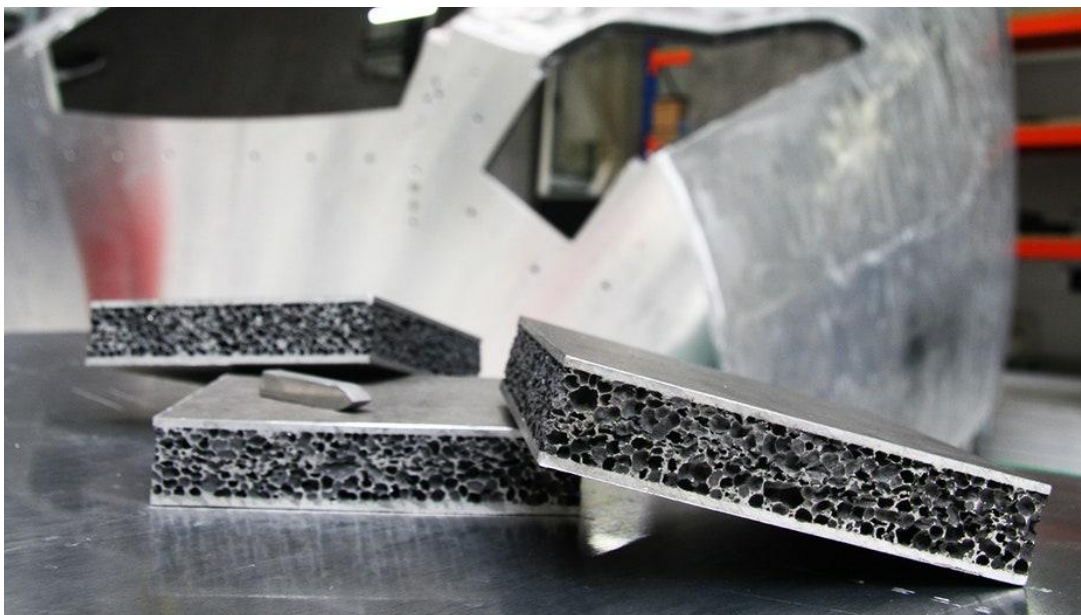
2.3 Χαρακτηριστικά Μεταλλικών Αφρών

Οι μεταλλικοί αφροί λόγω του μεγέθους του πορώδους τους, μπορούν να διατηρούν τις ιδιότητες του υλικού από το οποίο έχουν προέλθει, όμως άλλες ιδιότητες μπορεί να διαφέρουν από αυτές του πρωταρχικού υλικού. Αυτό κάνει το μέγεθος και την ομοιομορφία του πορώδους να είναι βασικοί παράγοντες, οι οποίοι θα επηρεάσουν και τις ιδιότητες του μεταλλικού αφρού. Μερικές χαρακτηριστικές ιδιότητες αυτών είναι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ήχου, το χαμηλό βάρος, όπως επίσης και πως πρόκειται για άφλεκτα υλικά.

Στα πρώτα χρόνια ενασχόλησης με την παραγωγή των μεταλλικών αφρών έγιναν προσπάθειες δημιουργίας συγκεκριμένων δομών. Παρ' όλα αυτά, η παραγωγή τους ήταν πολύ δαπανηρή σε σημείο να μην είναι ευκτική η χρήση τους λόγω του υψηλού κόστους. Επίσης σημαντικό πρόβλημα, ήταν πως δεν υπήρχε δυνατότητα μίας επιτυχούς αναπαραγωγής των επιθυμητών ιδιοτήτων στις δομές που αναζητήθηκαν. Μερικοί όμως από τους παράγοντες στους οποίους οφειλόταν αυτό, ήταν η χαμηλή δυνατότητα αφροποίησης που παρουσίαζε το τηγμένο μέταλλο, η μεγάλη διασπορά του πορώδους και το μέγεθος αυτών, η συρρίκνωση του υλικού κατά την διάρκεια της στερεοποίησης αφότου της τήξης του. Μετά από εκείνες τις έρευνες και ύστερα από συνεχή βελτίωση των ερευνών έχουν εφευρεθεί νέες τεχνολογίες για την παραγωγή μεταλλικού αφρού, με αποτέλεσμα η παρασκευή των αφρών να έχουν υψηλή ποιότητα και χαμηλό κόστος, αφού βελτιστοποιήθηκαν τα παραπάνω προβλήματα.

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά αποτελούν μια τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί και οι μελλοντικές εφαρμογές το θέτουν ως μια πολλά υποσχόμενη ιδέα. Όμως το γεγονός αυτό τα καθιστά δυσεύρετα καθώς δεν υπάρχει ευρεία βιομηχανική παραγωγή και εφαρμογή αυτών. Όπως επίσης, είναι λίγες οι εταιρίες οι οποίες δραστηριοποιούνται στην παραγωγή μεταλλικών αφρών για συγκεκριμένες χρήσεις τους ανά τον κόσμο.

Για το λόγο αυτό, υπάρχουν διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές για τις οποίες χρησιμοποιούνται μεταλλικοί αφροί, όπως στις κατασκευές, στις οικοδομές, στην μηχανολογία και στην χημική βιομηχανία. Πολύ γνωστό παράδειγμα εφαρμογής τους αποτελεί η ενσωμάτωση αυτών σε εσωτερικό στρώμα δομών που καλούνται "σάντουιτς" (Εικόνα 2.3), για το οποίο η χρήση τους συναντάται στις κατασκευαστικές εφαρμογές όπου ως επιδίωξη είναι η ελάττωση του συνολικού βάρους της κατασκευής.



Εικόνα 2.3: Δομή τύπου σάντουιτς (πηγή: <https://www.wired.com/2014/12/aluminum-foam-trains/>)

Στην Εικόνα 2.2 παρατηρείται ένα πλαίσιο τύπου σάντουιτς, κατά το οποίο ο πυρήνας είναι από μεταλλικό αφρό ενώ επιφανειακά αποτελείται από συμπαγές μεταλλικό υλικό.

Οι εφαρμογές των μεταλλικών αφρών, όπως θα αναλυθεί και εκτενέστερα σε μεταγενέστερο κεφάλαιο, είναι πολύ σημαντικές. Παρ' όλα αυτά για την αρχική κατανόηση της εφαρμογής τους σημαντικό είναι η προσαρμογή της ιδέας αυτής σε βασικές εφαρμογές στην καθημερινότητα. Μια από αυτές είναι η εφαρμογή τους στην βιομηχανία αυτοκινήτων, καθώς είναι σημαντική η δυνατότητα απορρόφησης υψηλών ποσών ενέργειας, το οποίο απορροφάται λόγω της ύπαρξης των κυψελίδων στη δομή τους. Για τον λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί πολλά τέτοια τμήματα του αμαξώματος (π.χ. προφυλακτήρες) για το απορρόφηση μεγάλου ποσού ενέργειας σε ενδεχόμενη πρόσκρουση, όπου αυτό το ποσό ενέργειας απορροφάται από τον μεταλλικό αφρό λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Άλλες εφαρμογές, έχουν αναπτυχθεί σε φίλτρα, τύπους εναλλακτών θερμότητας, απορροφητές ήχου.

Τέλος, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάση των παρακάτω χαρακτηριστικών τους:

- Τις ιδιότητες του πρότυπου μεταλλικού υλικού
- Την τοπολογία των κυψελίδων, οι οποίες μπορεί να είναι ανοιχτού ή κλειστού τύπου κελιών, το μέγεθος και το σχήμα τους
- Τη σχετική πυκνότητα τους

2.4 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και χρήση των μεταλλικών αφρών

Οι εφαρμογές των μεταλλικών αφρών γίνονται επιθυμητές και εφαρμόσιμες λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτουν. Η ύπαρξη των πλεονεκτημάτων αυτών βασίζεται στο πρότυπο μεταλλικό υλικό από το οποίο κατασκευάζεται ο αφρός, το οποίο μπορεί να είναι είτε καθαρό μέταλλο είτε κάποιο κραματομένο μέταλλο.

Το κύριο πλεονέκτημα του αφρού, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, είναι η απορρόφηση υψηλών ποσών ενέργειας κατά την συμπίεση ή την κρούση, πράγμα που σημαίνει πως δεν επηρεάζει το υλικό η φορά φόρτισης. Όπως επίσης, πολύ βασικό είναι πως τα πορώδη μεταλλικά υλικά διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητες του πρότυπου μεταλλικού υλικού, κυρίως την αντοχή και την ακαμψία) και διαθέτουν χαμηλό βάρος που το καθιστά ως ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τις βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι, ο συνδυασμός της διατήρησης των μηχανικών ιδιοτήτων του μεταλλικού υλικού με το χαμηλό βάρος προσθέτει ένα ιδιαίτερο προτέρημα σε αυτά. Επιπλέον, η απορρόφηση ταλαντώσεων, ήχου και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας θέτουν τους μεταλλικούς αφρούς ως ένα αποτελεσματικό υλικό για τις εφαρμογές που έχουν τέτοιες απαιτήσεις.

Παρ' όλα αυτά, οι μεταλλικοί αφροί κατά την παραγωγή τους έχουν το πλεονέκτημα πως θα διευρυνθεί η θερμοκρασία λειτουργίας τους καθώς και η ακαμψία του υλικού θα βελτιωθεί. Έτσι, γίνονται πιο ανθεκτικά σε ποσά θερμότητας με τα οποία θα επιδράσουν, όπως επίσης ανθεκτικά και σε πολλές διαφορετικές διαλυτικές ουσίες. Επιπροσθέτως, έχουν βελτιωμένη ανθεκτικότητα και αντοχή σε κόπωση, βελτιωμένα αποτελέσματα στην ηλεκτρική και θερμική τους αγωγιμότητα και είναι καλύτερα στην μορφοποίηση και επεξεργασία. Τα υλικά αυτά είναι πλήρως ανακυκλώσιμα και καθόλου τοξικά, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνουν το περιβάλλον. Έτσι, με το τελευταίο τους πλεονέκτημα είναι ένα από τα προηγμένα υλικά για τα οποία θα επιδιώκεται η παραγωγή και χρήση τους καθώς δεν φέρουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιδράσεις καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Με αυτό τον τρόπο τα βασικότερα μειονεκτήματα που έχουν οι μεταλλικοί αφροί είναι τα εξής:

- Η δυσκολία μαζικής παραγωγής αυτών
- Το υψηλό κόστος
- Η δυσκολία κατασκευής μεταλλικών αφρών συγκεκριμένης δομής κυψελίδων και ιδιοτήτων
- Η διαδικασία παραγωγής του είναι χρονοβόρα

Οι μεταλλικοί αφροί δεν έχουν μια συγκεκριμένη δομή και εμφανίζουν ποικιλομορφία στο μέγεθος και στο σχήμα των κελιών. Επίσης, παρουσιάζουν οπές, ρωγμές ή αυλακώσεις στα τοιχώματα των κυψελίδων πράγμα που τα καθιστά να έχουν ατέλειες και είναι φαινόμενο που οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες που δέχονται κατά την παρασκευή τους. Όμως, λόγω της εξελιξιμότητας στην τεχνολογία αυτή έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που έχουν εξαλείψει κάποια από τα μειονεκτήματα αυτά ή τα έχουν ελαχιστοποιήσει, έτσι ώστε να έχουμε υψηλότερης ποιότητας μεταλλικούς αφρούς. Έτσι, χρησιμοποιούνται συμβατικά υλικά τα οποία είναι φιλικά ως προς το περιβάλλον και έχουν χαμηλό κόστος.

Τέλος, σήμερα γίνεται έρευνα για την πληθώρα εφαρμογών στους μεταλλικούς αφρούς και αναπτύσσονται σε βιομηχανική κλίμακα, για την χρήση των οποίων εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Μεταλλουργία: Υγρής κατάστασης ή κονιομεταλλουργία
- Οικονομοτεχνική Μελέτη: Καταλληλότητα υλικού για συγκεκριμένου όγκου κατασκευές, ανταγωνιστικά υλικά, κόστος παραγωγής
- Μορφολογία μεταλλικού αφρού: Τύπος και πυκνότητα πορώδους, μέγεθος πόρων, απαιτούμενη εσωτερική επιφάνεια κυψελίδων
- Παραγωγική διαδικασία: Μορφοποίηση των μεταλλικών αφρών για κατασκευή σύνθετων διατομών ή εξαρτημάτων που έχουν υψηλές απαιτήσεις

2.5 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού των μεταλλικών αφρών

Οι μεταλλικοί αφροί και τα κράμα μπορούν να τους αποδοθούν ιδιότητες με πολλούς τρόπους. Ο σκοπός βρίσκεται στην απόκτηση μηχανικών ή φυσικών δεδομένων, διερευνώντας τα κελιά των υλικών ή τα χαρακτηριστικά σύνθεσης των κελιών αυτών. Η εξέταση ενός υλικού τέτοιας μορφής δεν διαφέρει κατά πολύ όπως και με την εξέταση οποιουδήποτε μηχανολογικού εξαρτήματος του οποίου θα προσδιοριστούν ιδιότητες. Οι μέθοδοι χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων γίνεται είτε με καταστροφικούς ελέγχους, είτε με μη καταστροφικούς. Αυτό εξαρτάται από το αν ο αφρός παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα ή μεταβάλλεται διαφορετικά ή παραμένει αμετάβλητος κατά τη διάρκεια των μεθόδων. Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι μπορούν να γίνουν με μετρήσεις πυκνότητας, μετρήσεις εμποτισμού με χρώμα, ραδιογραφία και ραδιοσκοπία με ακτίνες Χ, τομογραφία με ακτίνες Χ, αισθητήρες ρεύματος δίνης, ακουστικές μετρήσεις και ανάλυση με ταλάντωση. Από την άλλη όμως οι καταστροφικοί έλεγχοι

έχουν μικρότερη εμβέλεια καθώς τα μόνα μπορούν να γίνουν είναι μηχανικοί έλεγχοι και έλεγχοι διάβρωσης.

2.5.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι

Το εύρος αυτό, όπως αναφέρθηκε, είναι πολύ μεγάλο για τον χαρακτηρισμό των υλικών, όμως στην συνέχεια θα αναπτυχθούν μόνο οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τους μεταλλικούς αφρούς. Έτσι, η πρώτη μέθοδος είναι αυτή της μέτρησης της πυκνότητας. Με την μέθοδο αυτή μπορεί να καθοριστεί η πυκνότητα ενός πορώδους υλικού ζυγίζοντας το και μετρώντας τον όγκο του. Στην περίπτωση που η εξωτερική επιφάνεια του δείγματος δεν είναι κλειστή, το επικαλύπτουμε με ένα υλικό έτσι ώστε να γίνει η παρεμπόδιση της εισχώρησης υγρού στους πόρους.

Η επόμενη μέθοδος είναι αυτή της μέτρησης εμποτισμού με χρώμα. Κατά την παραγωγή ενός μεταλλικού αφρού μπορούν να δημιουργηθούν διάφορες ατέλειες, όπως παρουσιάστηκε στο κομμάτι της Ιστορικής Αναδρομής με το στάδιο την ψύξης. Ατέλειες τέτοιες μπορούν να παρουσιαστούν ως τρύπες ή ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια ή τα τοιχώματα των κελιών. Έτσι με την μέθοδο αυτή θα πρέπει να γίνει επικάλυψη της επιφάνειας του αφρού που είναι υπό εξέταση με ένα χημικό υγρό, το οποίο θα απορροφηθεί από τις ρωγμές και τις οπές. Ύστερα αφού στεγνώσει και η επιφάνεια επαλείφουμε με κατάλληλο βάμμα, το οποίο θα χρωματίσει την εναπομένουσα χημική επίστρωση οπύ δεν απορροφήθηκε. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αποτυπωθούν οι ατέλειες που είναι άμεσα ορατές.

Η μέθοδος της ραδιογραφίας και ραδιοσκοπίας με ακτίνες X μπορεί να αποτυπώσει τα κυψελοειδή υλικά με απορρόφηση των ακτινών X. Αυτό γίνεται ρίχνοντας μία δέσμη ακτινών X στο υλικό και στη συνέχεια γίνεται μέτρηση της ακτίνας X, έτσι ώστε να παρατηρηθεί η τυχόν εξασθένηση της. Έτσι, μετρούνται οι δύο διαστάσεις του δείγματος και διαμορφώνεται μια δισδιάστατη μορφή του αφρού αφού έχει επιλεγεί μια συγκεκριμένη εγκάρσια επιφάνεια.

Κατά τη μέθοδο της τομογραφίας με ακτίνες X, λαμβάνονται εικόνες με ακτίνες X από πολλές διευθύνσεις του δείγματος, συνήθως περιστρέφοντας το. Από τις εικόνες αυτές παρατηρείται η εξασθένηση των ακτινών σε κάθε σημείο του δείγματος και καταγράφεται η τοπική πυκνότητα του με μαθηματικά μοντέλα. Μεγάλο ρόλο παίζει και η επιλογή του μεγέθους που θα επιλεγεί για το δοκίμιο καθώς εξαρτάται από την πληροφορία η οποία είναι αναγκαία να καταγραφεί.

Μια επιπλέον μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου είναι και οι αισθητήρες ρεύματος δίνης. Οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να χαρακτηριστούν από το μέγεθος των πόρων και την σχετική του πυκνότητα με την χρήση μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης. Για την επίτευξη αυτού, γίνεται χρήση ενός πηνίου διέγερσης όπου δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω από το δοκίμιο και μπορεί το ρεύμα αυτό να συλλεχτεί από ένα δεύτερο πηνίο. Αυτό γίνεται, καθώς τα ρεύματα δίνης επηρεάζονται από γεωμετρικούς παράγοντες, την συχνότητα αλλά και τις ιδιότητες του αφρού που χρειάζεται να προσδιοριστούν.

Τέλος, υπάρχουν και η μέθοδος ακουστικής μέτρησης και ανάλυση ταλάντωσης. Η πρώτη, βασίζεται στις ιδιότητες απορρόφησης του ήχου από τους πόρους, όπου μετρούνται με σωλήνα αντίστασης που έχουν υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή η μέτρηση της εξασθένησης έχει να κάνει με την συχνότητα. Στην περίπτωση που το δοκίμιο έχει ανοιχτό πορώδες, όταν θα αυξάνει το κενό οι καμπύλες της απόσβεσης θα έχουν μετατοπιστεί προς χαμηλότερες συχνότητες. Παρ' όλα αυτά δοκίμια κλειστού πορώδους παρουσιάζουν την ίδια καμπύλη απόσβεσης, μιας και είναι εξαρτώμενο του διακένου, αφού ο ήχος απορροφάται στην επιφάνεια.

Στην περίπτωση της ανάλυσης ταλάντωσης, αυτό που παίζει το μεγαλύτερο ρόλο είναι το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο Young) και ο παράγοντας της απώλειας του υλικού που μπορεί να καταγραφεί με την βοήθεια της μεθόδου αυτής. Στην απλούστερη τεχνική, ένα μακρύ ένα λεπτό τετράγωνο φύλλο από ή ένα ορθογωνικό δοκίμιο εξαναγκάζεται σε ταλάντωση, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν διαμήκεις, εγκάρσιες ή στρεπτικές διεγέρσεις. Οι απορρέουσες ταλαντώσεις συλλέγονται από ένα επαγωγικό πηνίο, έτσι παρατηρούνται οι χαρακτηριστικές αιχμές συντονισμού. Οι θέσεις των αιχμών δίνουν την δυνατότητα υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας E από τις διαστάσεις και τη μάζα του δείγματος.

2.5.2 Καταστροφικοί Έλεγχοι

Η μορφολογία του κελιού και η μικροδομή του μπορεί να αναλυθεί και με οπτικές μεθόδους. Παρ' όλα αυτά η ανάλυση της μεθόδου αυτής ενώ ανήκει στους μη καταστροφικούς ελέγχους, η προετοιμασία του δοκιμίου επιβάλλει τη κοπή, λείανση και στίλβωση του με αποτέλεσμα να καθίσταται ως καταστροφικό έλεγχος. Μπορεί να γίνει ο προσδιορισμός των κελιών ή το μέγεθος της κατανομής των πόρων με προγράμματα εικόνας. Τα προγράμματα αυτά είναι ικανά για την αναγνώριση των κελιών στο επίπεδο προετοιμασίας, όμως δεν γίνεται να ληφθούν σημαντικά αποτελέσματα.

Η ανάλυση επιφανειακής παραμόρφωσης είναι μια μέθοδος παραμόρφωσης μεταλλικών αφρών. Με αυτή τη μέθοδο το δοκίμιο θα παραμορφωθεί, ενώ η εξωτερική του επιφάνεια ελέγχεται διαρκώς από μία κάμερα. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται βάση των εικόνων πριν και μετά από κάθε φόρτιση που έχει επιβληθεί.

Η μέθοδος του μηχανικού ελέγχου των μεταλλικών αφρών είναι προαπαιτούμενο πριν γίνει οποιαδήποτε κατασκευή. Τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από μηχανικής απόψεως συμβάλουν στην ανάπτυξη καθορισμένων εφαρμογών και για την δημιουργία δεδομένων που χρησιμεύουν στην επίλυση μαθηματικών μοντέλων με υπολογιστικά συστήματα FEM (Finite Element Method).

Τέλος, θα αναλυθεί η μέθοδος ελέγχου σε διάβρωση ακόμα και αν δεν έχει καθιερωθεί κάποιος τέτοιος έλεγχος μέχρι και σήμερα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται από ελέγχους που γίνονται όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Δείγματα αφρού αλουμινίου εξετάζονται υπό αυτή τη μορφή της μεθόδου δοκιμάζοντας τα σε δέκα κύκλους της μίας βδομάδας, υπό την 24ωρη έκθεση του σε ψεκασμό άλατος, τέσσερις μέρες σε διάφορα περιβάλλοντα υγρασίας και σε 48ωρη έκθεση σε δωμάτιο με κανονικές συνθήκες εργασίας και θερμοκρασίας δωματίου (20-25 °C).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- Τρόποι Παραγωγής Μεταλλικών Αφρών

Κατά την δεκαετία του '90 παρουσιάστηκαν αρκετές μέθοδοι παραγωγής μεταλλικών αφρών. Σύμφωνα με τις μεθόδους παραγωγής, οι οποίες ποικίλουν, έχουν οδηγήσει σε μία ποικιλία υλικών που αφορά την εσωτερική δομή τους.

Παρατηρείται πως μερικές μέθοδοι που εφαρμόζονται έχουν να κάνουν με τεχνικές αφροποίησης υδατογενών ή πολυμερικών μειγμάτων, ενώ σε αντίθετη περίπτωση υπάρχουν και οι τεχνικές εκμετάλλευσης των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των πρόδρομων υλικών. Έτσι μπορούμε να διακρίνουμε τους εξής τρόπους παραγωγής αφρών:

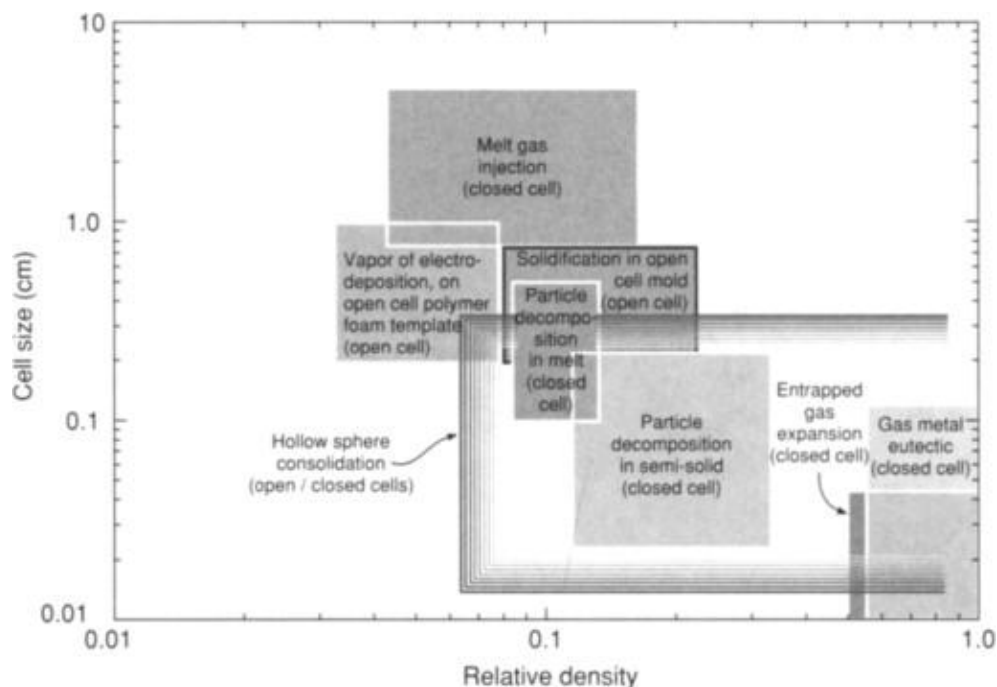
- Μέθοδος παρασκευής υγρής κατάστασης.
- Μέθοδος παρασκευής στερεάς κατάστασης.
- Μέθοδος παρασκευής με διαδικασία ατμοποίησης.

Από τις παραπάνω μεθόδους τα προϊόντα τα οποία μπορεί να προκύψουν, δεν έχουν μεγάλη διαφορά ως προς το μέγεθος του κελιού, την σχετική πυκνότητα και την χημική τους σύσταση. Έτσι, οι βασικότεροι τρόποι παραγωγής μεταλλικών αφρών είναι οι εξής εννέα:

- Παραγωγή με την διοχέτευση αερίου σε λιωμένο Al-SiC ή κράματα Al_2O_3 .
- Παραγωγή με την ανάδευση παράγοντα αφρισμού (όπως TiH_2) σε ένα κράμα (συνήθως κράμα αλουμινίου) όπου βρίσκεται σε κατάσταση τήξης με ελεγχόμενη πίεση ενώ ταυτόχρονα ψύχεται.
- Παραγωγή με την ένωση μετάλλων σε σκόνη (κράματα αλουμινίου) με έναν παράγοντα αφρισμού σωματιδίων με την συνοδεία θέρμανσης. Στην κατάσταση αυτή γίνεται διάσπαση του παράγοντα αφροποίησης με αποτέλεσμα να εκλύεται αέριο υδρογόνου διογκώνοντας το υλικό.
- Παραγωγή με την βοήθεια απόθεσης ατμών ή ηλεκτραπόθεση μετάλλου σε ένα πολυμερές πρόδρομο το οποίο στην συνέχεια καίγεται, αφήνοντας κυτταρικές ακμές με κοίλους πυρήνες.
- Παραγωγή με την κατασκευή κεραμικού καλουπιού από πρόδρομο κερι ή πολυμερές αφρού. Αφού ακολουθήσει καύση του πρόδρομου και με την βοήθεια πίεσης, γίνεται διήθηση του τηγμένου μετάλλου ή μεταλλικής σκόνης, εκ των οποίων στην συνέχεια συντήκονται.
- Παραγωγή με την διάλυση αερίου (κυρίως υδρογόνου) σε ένα μέταλλο υγρής κατάστασης το οποίο βρίσκεται υπό πίεση. Το μέταλλο αυτό επιτρέπει την κυκλοφορία του αερίου με ελεγχόμενο τρόπο κατά την διάρκεια της στερεοποίησης.

- Παραγωγή με την βοήθεια συμπίεσης μεταλλικής σκόνης με άλλα υλικά, τα οποία όμως είναι ευδιάλυτα στο νερό. Κατά αυτή την διαδικασία ακολουθείται απόπλυση και στο τέλος απομένει ο μεταλλικός αφρός.
- Παραγωγή με την βοήθεια πυροσυσσωμάτωσης κοίλων σφαιρών που έχουν δημιουργηθεί από οξείδιο του μετάλλου ή υδρίδιο, από ατομική τροποποιημένη διαδικασία ή από εναπόθεση ατμού του μετάλλου σε σφαίρες πολυμερούς.
- Παραγωγή με την βοήθεια παγίδευσης λόγω υψηλής πίεσης αδρανούς αερίου σε πόρους από σκόνη θερμοϊσοστατικής συμπίεσης η οποία ακολουθείται από την διαστολή του αερίου σε υψηλή θερμοκρασία. Οι σημαντικότερες μέθοδοι παραγωγής θα αναλυθούν εκτενέστερα στο κεφάλαιο αυτό.

Από τις μεθόδους αυτές οι πρώτες πέντε γίνονται για εμπορική παραγωγή. Για τον περιορισμό του φάσματος της σχετικής πυκνότητας στο πορώδες του υλικού κάθε μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ένα μικρό υποσύνολο των μετάλλων. Στην εικόνα που παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 3.1) συνοψίζονται οι σχετικές πυκνότητες, το μέγεθος των κυττάρων και ο τύπος τους (close cell ή open cell).



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα του μεγέθους των κελιών και της σχετικής πυκνότητας για τις διάφορες μεθόδους (πηγή: [Michael-Ashby] *Metal-Foams a design guide*)

3.1 Παραγωγή πορωδών από υγρό μέταλλο

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν πολλοί τρόποι παραγωγής μεταλλικών αφρών που το προϊόν δυστυχώς δεν κατάφερε να χρησιμοποιηθεί για βιομηχανική εφαρμογή. Όμως τα τελευταία χρόνια υπήρξε ένας νέος αριθμός εξελίξεων έτσι ώστε σήμερα να υπάρχουν βελτιωμένες τεχνικές παραγωγής.

Πλέον οι δύο πιο επικρατέστερες τεχνικές είναι δύο και είναι οι εξής:

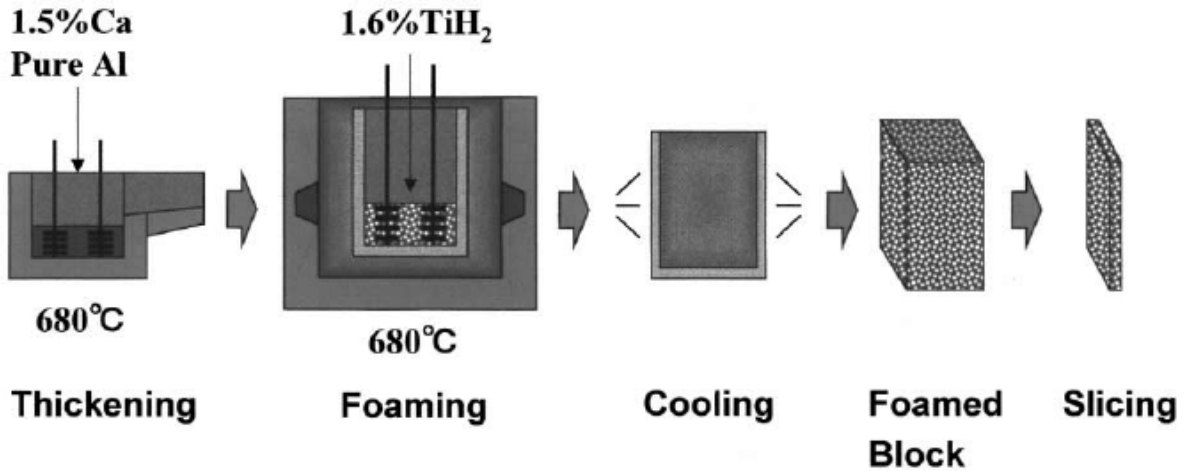
- Εισαγωγή αερίου σε υγρό μέταλλο από εξωτερική πηγή φυσαλίδων.
- Πρόσθεση ενός μέσου στο υγρό μέταλλο με σκοπό το μέσο αυτό όταν διασπάται να απελευθερώνει αέριο.

Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τα μεταλλικά τήγματα μπορούν να αφροποιηθούν απευθείας δημιουργώντας αέριες φυσαλίδες στο υγρό. Οι φυσαλίδες που υπάρχουν πλέον μέσα στο τηγμένο μέταλλο τείνουν να ανέβουν στην επιφάνεια καθώς υπάρχουν οι δυνάμεις άνωσης που ασκούνται λόγω της υψηλής πυκνότητας του υγρού. Το φαινόμενο αυτό με χρήση κεραμικών υλικών σε σκόνη επιβραδύνεται, καθώς τα κεραμικά σε σκόνη αυξάνουν το ιξώδες του τήγματος.

3.1.1 Αφροποίηση με μέσα που δημιουργούν φυσαλίδες (Alporas)

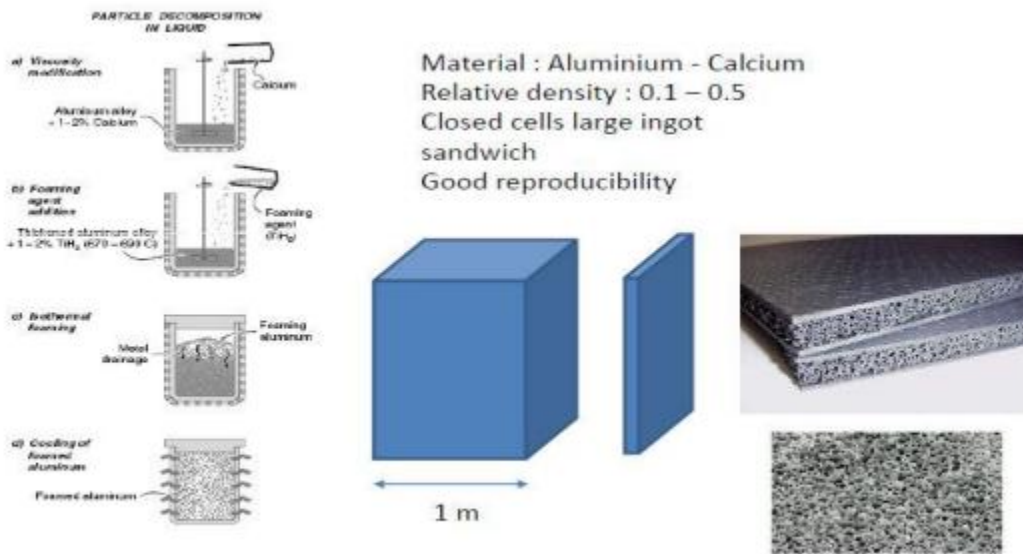
Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή με την ονομασία Alporas και έχει αναπτυχθεί από την ομώνυμη εταιρία Shinko Wire Co Ltd. Στόχος της διαδικασίας είναι η παραγωγή μπλοκ αφρού μεγάλων διαστάσεων.

Για την παραγωγή ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία, όπου προστίθεται 1,5% κ.β Ca σε θερμοκρασία 680 °C σε μία προϋπάρχουσα λιωμένη ποσότητα Al και αναδεύεται για περισσότερο από πέντε λεπτά για την ρύθμιση του ιξώδους. Στην συνέχεια, γίνεται προσθήκη στοιχείου του οποίου είναι αναγκαίο να υπάρχει O₂ καθώς υπάρχει ως στόχος η διευκόλυνση της οξειδωσης και ταυτόχρονα η αύξηση του ιξώδους με παραγωγή οξειδίων CaO, Al₂O₃ και CaAlO₄. Η ποσότητα Al που έχει διογκωθεί μεταφέρεται σε καλούπι στο οποίο θα γίνει έντονη ανάδευση του με ποσότητα 1,6% κ.β TiH₂. Η ποσότητα του TiH₂ διασπάται με αποτέλεσμα να υπάρχει παραγωγή φυσαλίδων H₂ που διαστέλλουν το χυτό και έτσι το καλούπι γεμίζει. Κατά το τελικό μέρος της διαδικασίας το τεμάχιο έχει διαστάσεις 2050 x 450 x 650 σε χιλιοστά και κόβεται σε πλάκες. Ένα τέτοιο τεμάχιο έχει πυκνότητας συνήθως από 0,18 έως 0,24 g/cm³ ενώ το μέσο μέγεθος του κυμαίνεται στα 4,5 mm και έχει μέσο όρο διαμέτρου πόρων από 2 έως 10 mm.



Εικόνα 3.2: Διαδικασία παρασκευής μεταλλικού αφρού με την μέθοδο Alporas (πηγή: *Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams*)

Οι αφροί που παράγονται με την μέθοδο αυτή έχει αποδειχθεί πως έχουν την πιο ομοιογενή μορφή που θα μπορούσε να παρασκευαστεί και στο εμπόριο μπορούν να αναζητηθούν με την ονομασία “Alporas” και είναι οι πιο ακριβοί από τους αφρούς με ενισχυτική φάση. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται ένα δείγμα παρασκευής αφρού αλουμινίου με την μέθοδο Alporas.



Εικόνα 3.3: Δείγμα Αφρών από υγρό μέταλλο (πηγή: *Ashby M. Metal Foam A Design Guide*)

Στην διαδικασία αυτή για την ενίσχυση του ιξώδους του τήγματος αλουμινίου μπορεί αντί για ασβέστιο να χρησιμοποιηθούν τα εξής:

- Καρβίδιο του πυριτίου SiC
- Οξείδια του αλουμινίου
- Αλουμίνιου σε σκόνη

Όπως κάθε μέθοδος και αυτή έχει αρκετά πλεονεκτήματα που την καθιστούν πολύ καλή για την βιομηχανική παραγωγή, αλλά και αρκετά μειονεκτήματα. Στα πλεονεκτήματα της διαδικασίας είναι η απλότητα της μεθόδου, η δημιουργία αρκετά πολύπλοκων σχημάτων που παίζει σημαντικό ρόλο στην βιομηχανία και η ομογενής δομή που έχει ο αφρός. Στον αντίποδα στα μειονεκτήματα υπάρχει το υψηλό κόστος που απαιτείται για την παρασκευή τους, η δυσκολία του ελέγχου της πυκνότητας, του μεγέθους των πόρων και η εισαγωγή ξένων στοιχείων όπως είναι το ασβέστιο (Ca) και το τιτάνιο (Ti).

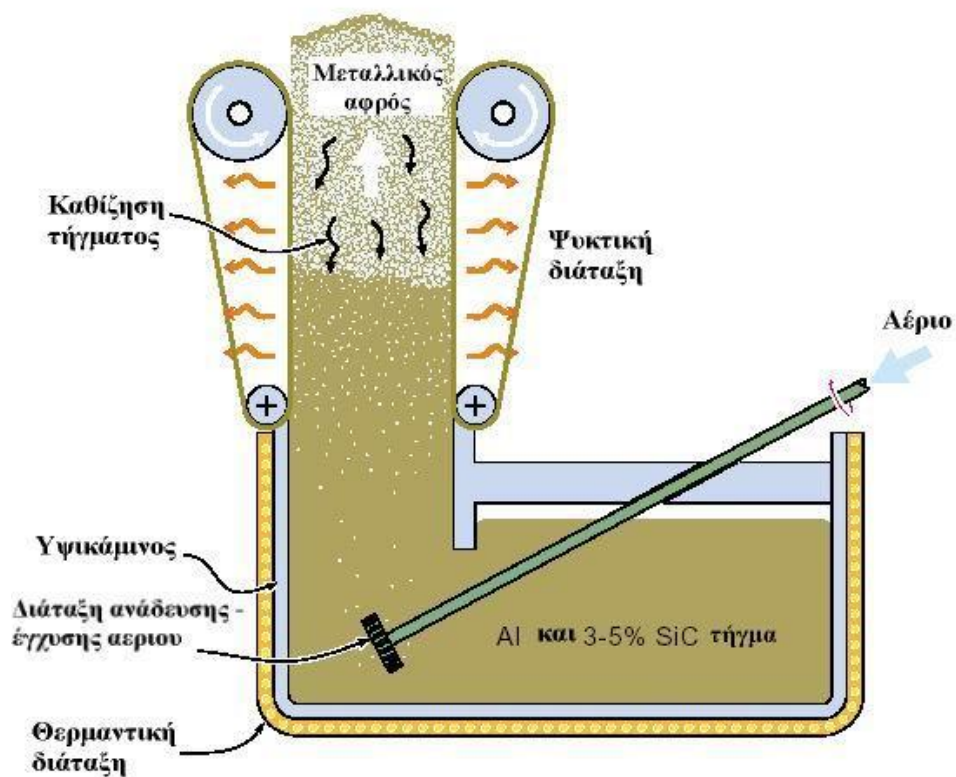
3.1.2 Αφροποίηση με αέριο

Η διαδικασία η οποία ακολουθείται στην μέθοδο αυτή είναι η εξής:

Για να μεγιστοποιηθεί το ιξώδες του τήγματος γίνεται χρήση καρβιδίων του πυριτίου ή οξείδιο (Αλουμινίου/Μαγνησίου). Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ένα σημαντικό πρόβλημα το οποίο είναι ο τρόπος με τον οποίον θα γίνει εισαγωγή των σωματιδίων αυτών στο τήγμα αλλά και το πώς θα μπορούσε να επιτευχθεί η ομοιομορφία στην κατανομή των σωματιδίων αυτών. Έπειτα, με εισαγωγή αερίου (αέρα, άζωτο ή αργό) με την βοήθεια περιστρεφόμενων αναδευτήρων ή ακόμα και ακροφυσίων των οποίων ταλαντώνονται, ακολουθεί η διαδικασία της αφροποίησης του τήγματος. Η χρήση των ταλαντευόμενων ακροφυσίων και των αναδευτήρων γίνεται για την παραγωγή ομοιόμορφων φυσαλίδων στο τήγμα και για να μπορεί να επιτευχθεί μια ομοιομορφία στην κατανομή του τήγματος.

Με την ρύθμιση της ροής αέρα, το σχεδιασμό του στροφείου (δηλαδή τον αριθμό και το σχήμα του ακροφυσίου) και την ταχύτητα περιστροφής του μπορεί να γίνει έλεγχος του μέγεθος των φυσαλίδων. Με την χρήση κεραμικών σωματιδίων η πυκνότητα του χυτού θα αυξηθεί, οι φυσαλίδες θα παγιδευτούν, τα τοιχώματα των κυψελίδων σταθεροποιούνται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην έχουμε συνένωση των κελιών. Έτσι, ο μεταλλικός αφρός που δημιουργείται, θα μεταφερθεί με μία ταινία μεταφοράς και έπειτα θα υποβληθεί σε διαδικασία σταθεροποίησης. Η διαδικασία αυτή θα παράξει panels αφρού με συγκεκριμένο ρυθμό (περίπου 900kg/h), διαστάσεων 1,5 m πλάτος και 25 έως 150 mm πάχος.

Από τα βασικότερα πλεονεκτήματα στην μέθοδο αυτή είναι το χαμηλό κόστος το οποίο έχουν τα υλικά για την αρχική διεργασία, μπορεί να γίνει παραγωγή τεμαχίων μεγάλου αριθμού καθώς μπορεί να ελεγχθεί και η σχετική πυκνότητα του υλικού. Όμως, όπως κάθε μέθοδος και αυτή έχει τα μειονεκτήματά της. Το βασικότερο της μειονέκτημα όμως είναι ότι λόγω της ύπαρξης SiC είναι δύσκολό να κατεργαστεί το τεμάχιο. Ακόμα, παρουσιάζονται προβλήματα παρουσίας μικρών αριθμών φυσαλίδων και καθίζησης του μετάλλου που έχουν ως αποτέλεσμα μια ανομοιόμορφη κατανομή πόρων. Στην εικόνα (Εικόνα 3.4) παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίον γίνεται η διαδικασία της μεθόδου αυτής.



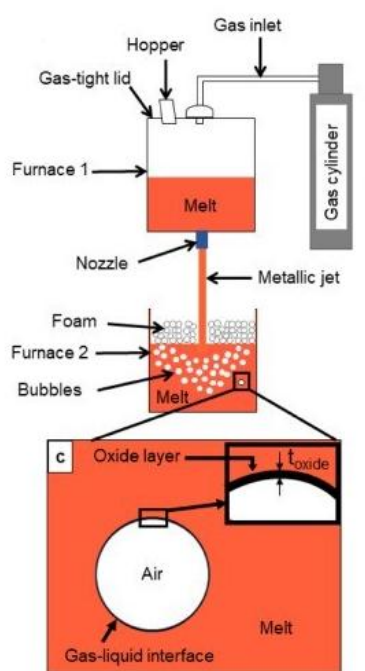
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα τεχνικής έγχυσης αερίου για παραγωγή μεταλλικού αφρού

3.1.3 Διαδικασία ευτηκτικής στερεοποίησης στερεού- αερίου "Gasars"

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην μεταξύ σχέση της πίεσης με την διαλυτότητα του υδρογόνου. Ως γνωστόν μερικά μέταλλα σχηματίζουν ευτηκτικά συστήματα με το υδρογονωμένο αέριο, έτσι και αυτή η τεχνική βασίστηκε πάνω σε αυτή την παρατήρηση. Έτσι, τήκοντας ένα από τα μέταλλα αυτά σε

υδρογονωμένη ατμόσφαιρα, σε πίεση μεγαλύτερη των 50 atm, έχουμε ένα τήγμα ομοιογενές που έχει γεμίσει υδρογόνο.

Με την πτώση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται η μετάβαση σε ετερογενές διφασικό σύστημα (στερεό και αέριο). Όμως με την ψύξη του τήγματος θα μπορέσει να επιτευχθεί σταθεροποίηση. Έτσι κατά την διαδικασία αυτή της στερεοποίησης θα υπάρχει αύξηση του υδρογόνου, άρα και σχηματισμό φυσαλίδων. Η διαδικασία γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθούν μετακινήσεις των φυσαλίδων στην υγρή ζώνη αλλά να βρίσκονται κοντά σε ζώνη στερεοποίησης και να παραμείνουν στο στερεό. Το υδρογόνο, η πίεση, η χημική σύσταση του τήγματος και ο ρυθμός της μεταβολής της θερμότητας παίζουν μεγάλο ρόλο στην μορφολογία των πόρων που θα δημιουργηθούν. Στην εικόνα (Εικόνα 3.5) που ακολουθεί φαίνεται ο τρόπος παραγωγής του μεταλλικού αφρού με την μέθοδο αυτή.



Εικόνα 3.5: Τρόπος παραγωγής μεταλλικού αφρού με την μέθοδο Gasars (πηγή: *Melt injection – A novel method to produce metal foams*)

Οι πόροι που δημιουργούνται έχουν διάμετρο κατά μέσο όρο από 10 μm μέχρι 10 mm, το μήκος τους είναι από 100 μm έως και 300 μm . Ο προσανατολισμός των πόρων εξαρτάται από την διαδικασία στερεοποίησης, μπορεί να εμφανίζεται με αξονική μορφή, με ακτινική μορφή ή και συνδυασμό των δύο. Ο τρόπος παραγωγής μεταλλικών αφρών με την μέθοδο αυτή εφαρμόζεται στο Αλουμίνιο, στο

Χαλκό, στο Νικέλιο και στο Μαγνήσιο. Επίσης, έχει εφαρμογή σε μέταλλα χρωμίου, μολυβδαίνιο, κοβαλτίου και σε μερικά κεραμικά.

3.2 Αφροποίηση μεταλλικών αφρών μέσω τήξης σκόνης μετάλλου

Με την τήξη από σκόνες μπορεί να επιτευχθεί αφροποίηση μετάλλων στο οποίο θα περιέχεται ένα μέσο το οποίο κατά την διάσπαση του θα απελευθερώνει αέριο. Στην κατηγορία αυτή οι σπουδαιότερες μέθοδοι είναι μία τεχνική συμπύεσης κόνεων από το πανεπιστήμιο Fraunhofer στην Γερμανία και μία παραλλαγή αυτής που ονομάζεται FORMGRIP ή ετεροχρονισμένη αφροποίηση προτύπων σε μήτρες.

3.2.1 Μέθοδος FORMGRIP

Η μέθοδος FORMGRIP (Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors) ονομάζεται η ανάμιξη σκόνης υδριδίου του μετάλλου με τηγμένο αλουμίνιο και γίνεται θέρμανση της σκόνης σε συγκεκριμένο χρόνο. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει πλεονεκτήματα των παραπάνω μεθόδων. Με την θερμική διαδικασία αυτή γίνεται σχηματισμός οξειδίου γύρω από τους κόκκους του υδριδίου. Με την παρουσία του οξειδίου υπάρχει καθυστέρηση στην έκλυση του υδρογόνου κατά την εισαγωγή της σκόνης στο τηγμένο μέταλλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάμιξη της σκόνης με ομοιόμορφο τρόπο σε όλη τη μάζα του μετάλλου.

Έπειτα από την χύτευση σε ειδικά καλούπια από γραφίτη, ειδικής διαμόρφωσης, γίνεται αναθέρμανση, η έκλυση υδρογόνου, η αφροποίηση και η σταθεροποίηση της δομής μέσω της ελεγχόμενης ψύξης που γίνεται.

Τα στάδια τα οποία πρέπει να περιλαμβάνονται για την βέλτιστη θερμική επεξεργασία είναι δύο και είναι τα εξής:

- Κατά το πρώτο στάδιο, η θερμοκρασία βρίσκεται κοντά στους 400 °C για να μην υπάρξει διάσπαση του υδριδίου. Η διάρκεια του σταδίου αυτού είναι 24 ώρες και έτσι δημιουργείται το πρώτο στρώμα οξειδίου. Το στρώμα το οποίο έχει δημιουργηθεί έχει σχετικά μικρό πάχος.
- Κατά το δεύτερο στάδιο της θέρμανσης γίνεται αύξηση της θερμοκρασίας στους 500-530 °C. Αυτό το στάδιο έχει διάρκεια από 1 έως και 3 ώρες και δημιουργείται ένα στρώμα οξειδίου μεγαλύτερο από το πρώτο στάδιο, έτσι ώστε να υπάρχει αντοχή στις υψηλότερες θερμοκρασίες του λιωμένου μετάλλου. Η δομή του μεταλλικού αφρού προκύπτει από τον μηχανισμό της

πυρηνοποίησης των πόρων, της απελευθέρωσης του υδρογόνου και της αναδιάταξης τους με το μέταλλο στη φάση της διαστολής του αφρού.

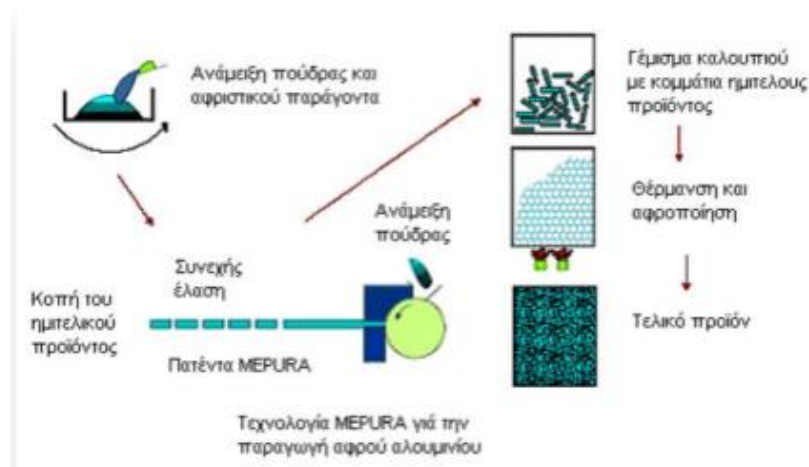
Οι προαναφερθέντες μηχανισμοί επηρεάζονται από την περιεκτικότητα του μετάλλου και από την ροή της μετάδοσης θερμότητας. Για να υπάρξει αύξηση του ιξώδους γίνεται προσθήκη κατάλληλων χημικών ενώσεων όπως του πυριτίου. Με την αύξηση του ιξώδους υπάρχει μείωση του διαχωρισμού των σωματιδίων TiH_2 από το σώμα του μετάλλου, με αποτέλεσμα κατά την αφροποίηση να εμφανίζεται μια ομοιόμορφη και ομαλή δομή. Τέλος, το ιξώδες είναι αυτό το οποίο ρυθμίζει την ανάπτυξη των πόρων.

Η μέθοδος αυτή έχει μία ελεγχόμενη διαδικασία αφροποίησης, τη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων σχημάτων και καλής ποιότητας πορώδους. Παρόλα αυτά ως μειονέκτημα της έχει την προσθήκη ξένων ουσιών στο προϊόν το οποίο προκύπτει και η χρονική διάρκεια στο στάδιο της προπαρασκευής είναι μεγάλη.

3.2.2 Συμπύεση Κόνεων (Meruga)

Η διαδικασία Meruga (Εικόνα 3.6) βασίζεται στη συνεχή διέλαση έτσι ώστε να συμπιεστή το μίγμα. Στο υλικό γίνεται μία θερμική κατεργασία, με θερμοκρασία μικρότερη από εκείνο του σημείου τήξης της μεταλλικής μήτρας και με ανώτατο όριο την θερμοκρασία αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα. Στην θερμοκρασία αυτή ο παράγοντας αφροποίησης αποσυντίθεται και εκλύει αέριο υδρογόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διόγκωση του υλικού και αυτό κατά συνέπεια την διαμόρφωση μίας δομής με υψηλό πορώδες και κλειστούς πόρους. Ο τερματισμός της διαδικασίας αφροποίησης γίνεται με ψύξη σε θερμοκρασίες αρκετά χαμηλότερες από το σημείο τήξης.

Η θερμοκρασία, η πίεση, η χρονική διάρκεια, τύπος και μέγεθος κόκκων, χρόνος ψύξης, οι συνθήκες μίξης, οι παράμετροι αφροποίησης και θέρμανσης είναι παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα του αφρού ο οποίος θα κατασκευαστεί. Για να επιτευχθεί το σχήμα του αφρού το οποίο θεωρείται επιθυμητό είναι απαραίτητο να γίνει εισαγωγή του πρόδρομου υλικού μέσα σε ένα καλούπι. Αλλιώς τα αποτελέσματα θα είναι μεταλλικοί αφροί ακαθόριστου σχήματος.

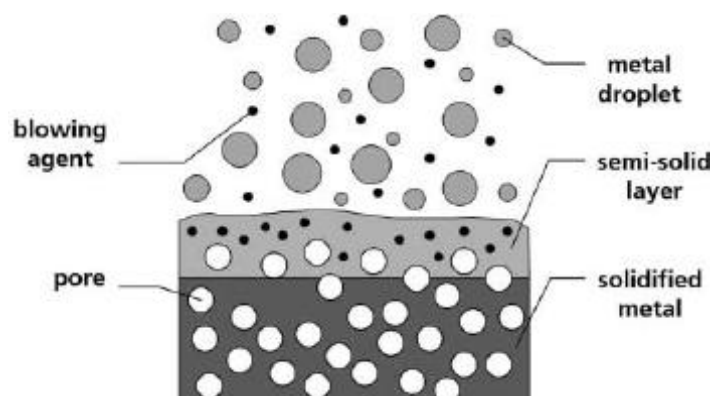


Εικόνα 3.6: Τρόπος παραγωγής μεταλλικού αφρού με την μέθοδο Merura (πηγή: *Aluminum Foam Catrin Kammer Goslar Germany Fraunhofer*)

3.3 Αφροποίηση με ψεκάσμο

Η διαδικασία της αφροποίησης με ψεκάσμο (Εικόνα 3.7) βασίζεται στην δημιουργία νέφους μεταλλικών σταγονιδίων και ενός μέσου αφροποίησης και εφαρμόζεται σε πολλά μέταλλα και κράματα. Τα δύο αυτά στοιχεία θα πρέπει να τοποθετηθούν σε βάση η οποία είναι διαμορφωμένη καταλλήλως.

Κατά την επαφή του υγρού μετάλλου με το αφροποιητικό μέσο γίνεται διάσπαση του τελευταίου. Με τον τρόπο αυτό εκλύεται η σωστή ποσότητα αερίου για να σχηματιστούν πόροι. Η μεγάλη ποικιλία σχημάτων είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου, ενώ η ανομοιογένεια στο πορώδες το κύριο μειονέκτημα της.



Εικόνα 3.7: Τρόπος παραγωγής μεταλλικού αφρού με ψεκάσμο (πηγή: *Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams*)

3.4 Μέθοδοι Χύτευσης

3.4.1 Χύτευση με πολυμερικό πρότυπο

Το 1968 εφαρμόστηκε νέα μέθοδος από την εταιρεία ERG (Energy Research and Generation), με την ονομασία Duocel, κατά την οποία μπορεί να γίνει παρασκευή κυψελοειδή μέταλλα ανοιχτής δομής. Η μέθοδος αυτή αποτελείται από πέντε στάδια τα οποία είναι:

- Κατά το πρώτο στάδιο γίνεται η δημιουργία του αφρού από πολυμερές και την τελική μορφή του προϊόντος.
- Κατά το δεύτερο στάδιο χυτεύεται μίγμα κεραμικών υλικών (ανθρακικό ασβέστιο, μουλίτη ή αλλιώς γύψος, φαινολική ρητίνη) στο κενό χώρο του αφρού, που είναι και το υλικό πλήρωσης.
- Στο τρίτο στάδιο το κεραμικό μίγμα στερεοποιείται και γίνεται αφαίρεση του πολυμερικού αφρού, όπου γίνεται με θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Ύστερα, στο τέταρτο στάδιο, τοποθετείται το μέταλλο με την βοήθεια της χύτευσης στο κενό χώρο που έχει δημιουργηθεί κατά την καύση.
- Στο τελευταίο στάδιο γίνεται απομάκρυνση του υλικού πλήρωσης μηχανικά ή με νερό υπό πίεση.

Πρέπει να σημειωθεί πως απαιτείται προσοχή στην διαδικασία της χύτευσης του μετάλλου καθώς και στην αφαίρεση του υλικού πλήρωσης. Για την χύτευση υπάρχουν τα εξής στάδια:

- Τήξη μετάλλου σε συνθήκες υψηλής πίεσης με σκοπό την μείωση του ιξώδους.
- Διαδικασία χύτευσης σε υψηλή πίεση.
- Αναρρόφηση του μετάλλου με την βοήθεια αντλίας κενού.
- Τέλος, ελεγχόμενη στερεοποίηση.

Με την όλη διαδικασία αυτή γίνεται εισροή του υγρού μετάλλου στο κενό χώρο που δημιουργείται από την απομάκρυνση του πολυμερικού αφρού.

Η διαδικασία αφαίρεσης του υλικού πληρώσεως γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος θραύσης των λεπτών στελεχών του κυψελοειδούς μετάλλου και της καταστροφής της δομής του. Η σύσταση της δομής είναι κυψελοειδής και χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια και στιβαρότητα.

3.4.2 Χύτευση (LBM-Lattice Block Materials)

Η διαδικασία αυτή έχει ως πρώτο βήμα την κατασκευή πολυμερικού προτύπου δικτυωτής δομής. Κατά την διαδικασία της χύτευσης του μετάλλου όπου θα αντικαταστήσει σε θέση τον πολυμερικό αφρό, ο οποίος θα έχει εξαερωθεί. Το πρότυπο το οποίο χρησιμοποιείται θα είναι σε μορφή τέτοια για να μπορέσει η εισροή του υγρού μετάλλου να είναι πιο εύκολη. Το δίκτυο καναλιών είναι γεωμετρικά απλό αλλά και συμμετρικό, όπως επίσης στην διαδικασία αυτή λαμβάνουν μέρος όσα μέταλλα είναι χυτεύσιμα. Τα μέταλλα τα οποία έχουν υψηλή ρευστότητα είναι τα πιο προτιμητέα καθώς η χύτευση ως διαδικασία είναι αρκετά απαιτητική. Επίσης τα μέταλλα που παρουσιάζουν υψηλή ρευστότητα δεν παρουσιάζουν ατέλειες.

Η εταιρία Jamcorp ήταν εκείνη που δημιούργησε τα πρώτα υλικά με τέτοια χαρακτηριστικά και δομή μορφής τρισδιάστατου πλέγματος. Ο όρος για τον οποίον είναι ευρέως γνωστά είναι υλικά δικτυωτής δομής. Σε αυτή την κατηγορία βρίσκονται το σύνολο των κυψελοειδών υλικών με δομή η οποία συνιστάται στην παράθεση στοιχειωδών συμμετρικών μοτίβων στο χώρο ή στο επίπεδο.

σύσταση της δομής είναι κυψελοειδής και χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια και στιβαρότητα.

3.4.3 Χύτευση για την δημιουργία μεταλλικών αφρών μεταβλητού πορώδους

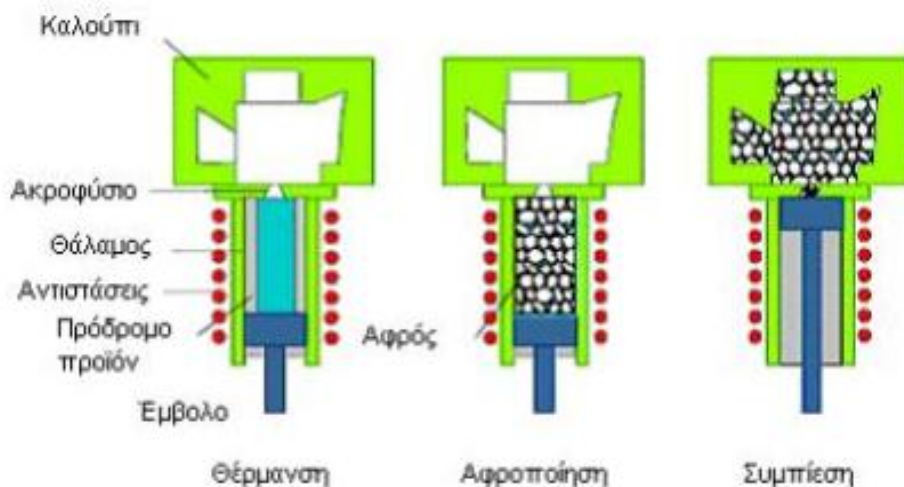
Η διαδικασία αυτή ξεκινά με την κατασκευή αναλώσιμων προτύπων πολυμερικού αφρού με μεταβλητό πορώδες. Στην συνέχεια γίνεται ένωση των προτύπων με ρητίνες, που έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή ενός ενιαίου προτύπου. Το νέο αυτό πρότυπο (ενιαίο πρότυπο) θα επικαλυφθεί από μίγμα κεραμικών ουσιών και στην συνέχεια θα ακολουθήσει η θέρμανση του.

Η ρητίνη θα αφαιρεθεί κατά την διαδικασία και το κεραμικό περίβλημα θα βρεθεί στο στάδιο της στερεοποίησης, το οποίο θα σχηματίσει ένα καλούπι χύτευσης που θα δώσει και το τελικό σχήμα στο μεταλλικό σπόγγο. Το πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι στις εφαρμογές τις οποίες είναι επιθυμητή η ομαλή μετάβαση από τη μια περιοχή στην άλλη (ρυθμιστές ροής ρευστού).

3.5 Παρασκευή αφρού αλουμινίου με πολύπλοκο σχήμα

Με την πάροδο των χρόνων όσο υπάρχει εξέλιξη στον τεχνολογικό τομέα οι απαιτήσεις των κατασκευών θα είναι όλο και πιο πολύπλοκες και θα υπάρχει ανάγκη για την κατασκευή αρκετά πολύπλοκων γεωμετριών. Για την παραγωγή τέτοιων γεωμετριών σε μεταλλικούς αφρούς γίνεται εισαγωγή ποσότητας διογκωμένου αφρού σε υγρή μορφή. Στο οποίο καλούπι θα γίνει και η τελική διόγκωση. Οι πυκνότητες των προϊόντων που προκύπτουν είναι της τάξης του $0,5 \text{ g/cm}^3$ και 1 g/cm^3 . Η αρχική διαδικασία της μεθόδου θα μπορούσε να συσχετιστεί με αυτό της τεχνολογία Merupa. Η ανάμιξη πούδρας αλουμινίου με τον αφριστικό παράγοντα και ύστερα η διέλαση σε ένα αφροποιήσιμο υλικό που είναι συμπαγές, είναι ένα παράδειγμα το οποίο θα μπορούσε να δοθεί.

Το συμπαγές υλικό θα τοποθετηθεί εντός ενός θαλάμου αφροποίησης κατά τον οποίον θα γίνει και η θέρμανση του σε σημείο τέτοιο ώστε το κράμα να φτάσει στο σημείο τήξης του. Η όλη διαδικασία αυτή μας δίνει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός αφρού σε υγρή μορφή, ο οποίος θα χυτευτεί σε ένα μεταλλικό καλούπι ή σε καλούπι από άμμο. Το καλούπι σε άμμο επιτρέπει την δημιουργία πρωτοτύπων σε χαμηλό κόστος και τα τεμάχια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πυρήνες χύτευσης μέσω πίεσης αλουμινίου.



Εικόνα 3.8: Παραγωγή πολύπλοκων τεμαχίων αφρού αλουμινίου (πηγή: http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/8_aluminum_foams.pdf)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- Ιδιότητες Μεταλλικών Αφρών και Εφαρμογές

Οι μεταλλικοί αφροί έχουν πολλές ιδιότητες και διαφορετικές σε σχέση με τα υλικά από τα οποία έχουν παραχθεί. Όπως έχει αναφερθεί, η μορφή που έχουν είναι κυψελοειδής και χρησιμοποιούνται στην μετάδοση θερμότητας και την μηχανική καθώς έχουν μεγάλο λόγο δύναμης-βάρους. Επίσης, είναι ιστροπικά υλικά με ασυνήθιστες ιδιότητες, όπου οι ιδιότητες αυτές είναι πολύ χρήσιμες για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο οι μεταλλικοί αφροί χωρίζονται στους αφρούς κλειστών κυψελών και ανοιχτών κυψελών. Η διαφορά μεταξύ αυτών είναι, πως οι ανοιχτών κυψελών επιτρέπουν την διέλευση ρευστού και έχει εφαρμογές όπως το φιλτράρισμα και εφαρμογές μετάδοσης θερμότητας, ενώ οι κλειστού τύπου χρησιμοποιούνται για δομική χρήση, κατασκευή εξαρτημάτων μηχανοκίνητων οχημάτων και για χρήση απορρόφησης ενέργειας.

4.1 Φυσικές Ιδιότητες Αφρών

Οι πλειοψηφία των μεταλλικών αφρών είναι πολύ ελαφριά καθώς μια πολύ σημαντική ιδιότητα έχει να κάνει με το ειδικό τους βάρος. Η πυκνότητα που μπορεί να έχει η πλειοψηφία τους είναι μικρότερη της μονάδας, έχοντας ως αποτέλεσμα την δυνατότητα να επιπλέουν στο νερό. Οι ιδιότητες των αφρών εξαρτώνται από τα εξής:

- Την διαστασιολόγηση και την μορφή των κελιών.
- Τις ιδιότητες του πρότυπου υλικού.
- Την πυκνότητα και την μεταβολή όγκου του μετάλλου.

Ηχομονωτικές Ιδιότητες

Πλεονέκτημα των μεταλλικών αφρών είναι η ικανότητα απορρόφησης ήχου. Στους αφρούς γίνεται ανάκλαση των κυμάτων λόγω της ακανόνιστης δομής των πόρων. Η ένταση των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων μειώνεται καθώς η κυματική τους ενέργεια δημιουργεί παραμορφώσεις μικρής κλίμακας στα τοιχώματα των κελιών όπου μετατρέπουν την ενέργεια σε θερμική. Επίσης, με την ομοιογένεια των πόρων επιτυγχάνεται αύξηση της απορρόφησης και με την αύξηση των συνδέσεων μεταξύ των πόρων παρατηρείται βελτίωση. Τέλος, οι αφροί με ανοιχτούς πόρους φαίνεται να έχουν την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση ήχου.

Θερμικές Ιδιότητες

Οι θερμικές ιδιότητες των πορωδών μετάλλων είναι:

- Η ειδική θερμότητα
- Το σημείο τήξης
- Η θερμική αγωγιμότητα
- Ο συντελεστής ακτινοβολίας
- Η θερμική διαχυτότητα
- Τα θερμικά σοκ
- Οι αντιστάσεις θερμότητας

Αγωγιμότητα

Το συμπαγές μέταλλο έχει υψηλότερη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχέση με αυτή των αφρών. Αυτό οφείλεται στα τοιχώματα των κελιών τα οποία καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο όγκο σε σχέση με τους πόρους που είναι γεμάτο αέρα. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα τοιχώματα των κελιών περιέχουν στρώματα οξειδίου τα οποία δεν είναι αγωγίμα. Επόμενο είναι να υπάρχει αύξηση της αγωγιμότητας με την αύξηση της πυκνότητας του αφρού. Η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρότερη από αυτή των συμπαγών μετάλλων και επίσης με κατεργασίες οξείδωσης αυτή μπορεί να μειωθεί επιπλέον. Όμως ο συντελεστής θερμικής διαστολής δεν αλλάζει σε αφρούς και συμπαγή μέταλλα με την εξαίρεση πως οι αφοί μόνο θα διογκωθούν ελάχιστα σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, λόγω της θερμικής αγωγιμότητας η οποία είναι χαμηλή, οι αφοί χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά.

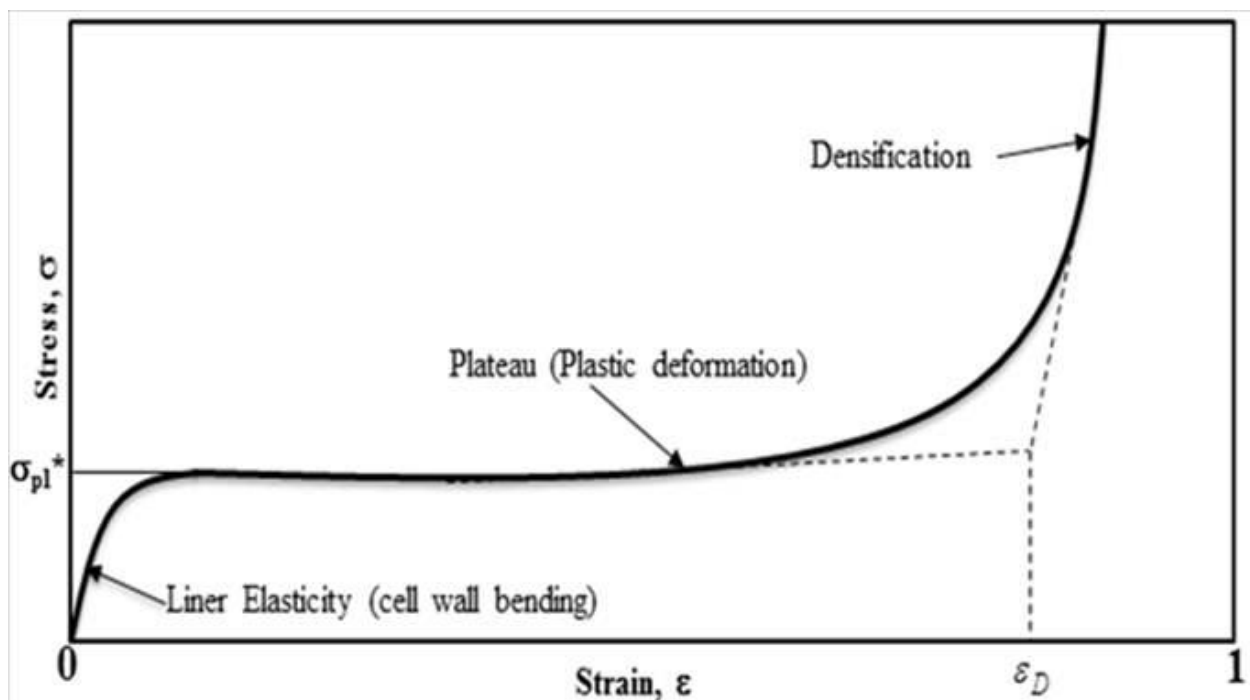
4.2 Χημικές Ιδιότητες Αφρών

Η συμπεριφορά των αφρών ως προς την διάβρωση εξαρτάται από τα κράματα κατασκευής τους και από τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται. Οι αφοί είναι άφλεκτοι, κυρίως οι αφοί αλουμινίου, όπως επίσης εκλύουν τοξικά αέρια κατά την επίδραση υψηλής θερμότητας.

Αξίζει να σημειωθεί πως πριν γίνει χρήση κάποιου μεταλλικού αφρού πρέπει να γνωρίζει κάποιος τον τρόπο παραγωγής και το κράμα από το οποίο έχει προέλθει, καθώς οι ιδιότητες τους διαφοροποιούνται ανάλογα με την κατεργασία.

4.3 Μηχανικές Ιδιότητες Αφρών

Αρχικά, τα πορώδη υλικά για να μελετηθούν ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες ομαδοποιήθηκαν και μελετήθηκαν από τους Ashby και Gibson. Με αφορμή την κυψελωτή τους δομή έχουν διαφορετική συμπεριφορά απ' ότι αυτή των μετάλλων. Αυτό καθιστά τα υλικά μη συμβατά σε απλές καθημερινές δοκιμές που γίνονται στα μεταλλικά υλικά, όπως είναι ο εφελκυσμός. Όμως, τα καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να παρθούν από την δοκιμή της θλίψης όπου δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης 3 περιοχών (Εικόνα 4.1). Επίσης, η συμπεριφορά η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1 εμφανίζεται σε αφρού με κλειστούς ή ανοιχτούς πόρους.



Εικόνα 4.1: Περιοχές διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης μεταλλικού αφρού (πηγή: <http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.ajmsp.20160101.11.html>)

Η εικόνα 4.1 παρουσιάζει μια γραμμική αύξηση της παραμόρφωσης κατά την αρχή επιβολής φορτίου και στην συνέχεια ένα τμήμα το οποίο είναι σχεδόν αμετάβλητης τάσης με το τέλος της καμπύλης να οδηγεί σε απότομη αύξηση της τάσης.

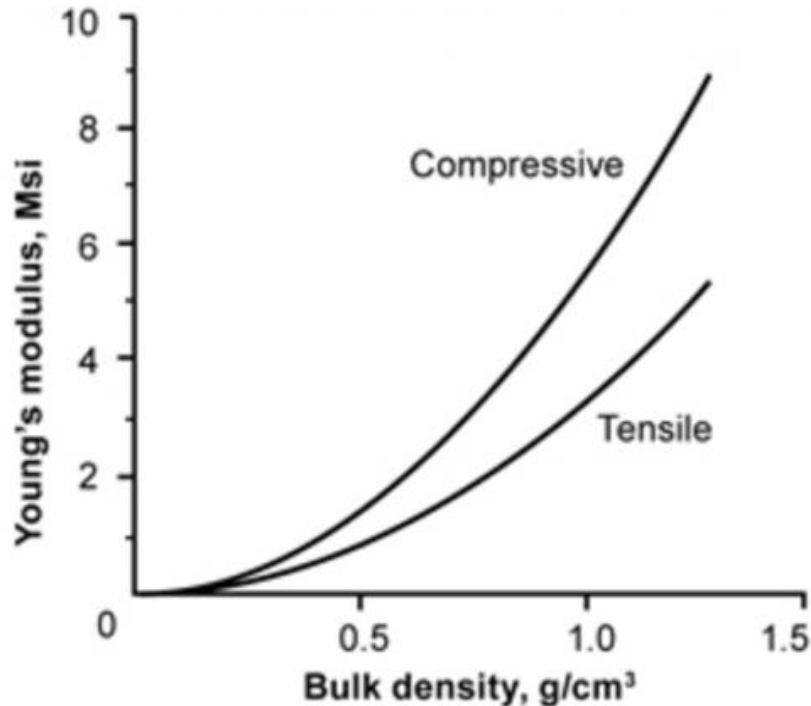
Το πρώτο τμήμα που παρουσιάζεται δεν οφείλεται μόνο σε ελαστική παραμόρφωση, όπως παρουσιάζουν τα μέταλλα, αλλά και σε πλαστική. Έτσι, υπάρχει μη αντιστρεπτή παραμόρφωση στους αφρούς σε χαμηλές τάσεις. Στην συνέχεια το σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα το οποίο ακολουθεί έχει να

κάνει με την ομοιογένεια της πλαστικής παραμόρφωσης. Ενώ το τρίτο τμήμα οφείλεται στην κατάρρευση των κελιών του αφρού.

Οι ιδιότητες των αφρών επηρεάζονται από την επιφάνεια, καθώς χωρίς πυκνή εξωτερική επιφάνεια αναμένεται χαμηλότερη αντοχή. Αυτό συμβαίνει καθώς η εξωτερική επιφάνεια λειτουργεί ως περιοχή σκλήρυνσης. Λόγω της ιστροπικότητας του υλικού δεν παίζει κάποιο ρόλο η κατεύθυνση του αφρού. Όπως στα μέταλλα έτσι και στους μεταλλικούς αφρούς μπορούν να γίνουν θερμικές κατεργασίες αλλά είναι δύσκολο και υπάρχουν πολλά προβλήματα και έτσι δεν αυξάνεται κατά πολύ η αντοχή τους. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των αφρών δεν μπορεί να γίνει ψύξη σε όλο το υλικό με ίδιο ρυθμό. Το μέσο απόψυξης το οποίο χρησιμοποιείται είναι ο πεπιεσμένος αέρας λόγω των αργών ρυθμών ψύξης που επιτυγχάνονται καθώς το νερό δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί καθώς καταστρέφει τα κελιά.

4.4 Μέτρο Ελαστικότητας

Ένα τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από την γεωμετρία του και το μέτρο ελαστικότητας του, εκ του οποίου μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή του προϊόντος.

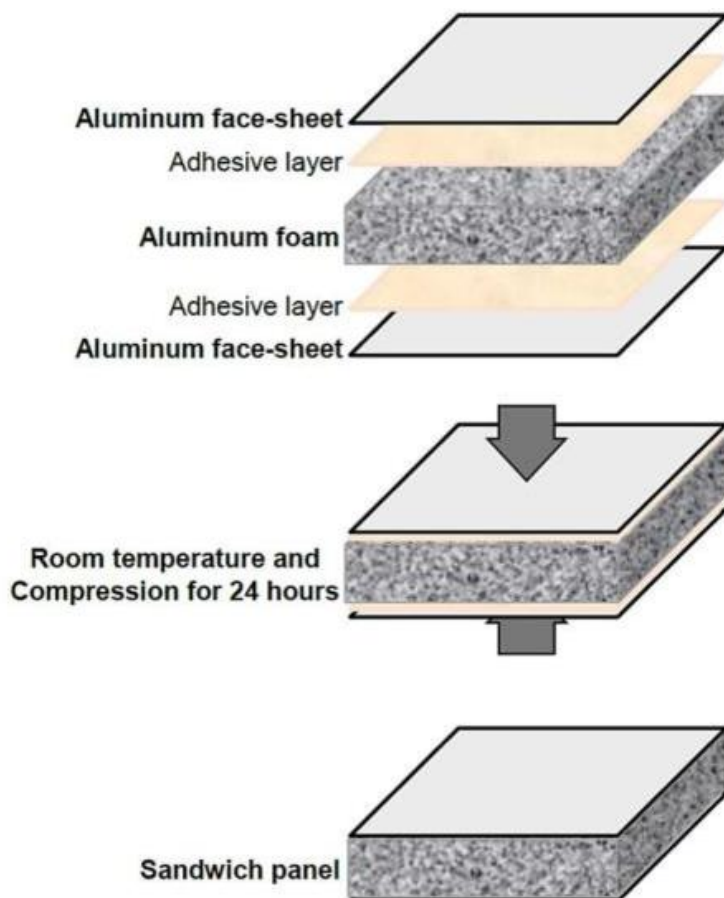


Εικόνα 4.2: Μέτρο Ελαστικότητας μεταλλικών αφρών σε σχέση με την πυκνότητα (πηγή: <https://ultramet.com/refractory-open-cell-foams/properties-of-foam-materials/>)

Στην εικόνα 4.2 παρατηρείται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αφρών καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του υλικού. Το συγκεκριμένο ισχύει για οποιαδήποτε τρόπο παραγωγής μεταλλικού αφρού. Επομένως, μεταβάλλοντας την πυκνότητα του υλικού μπορεί να επιτευχθεί το κατάλληλο μέτρο ελαστικότητας για την εφαρμογή όπου θα είναι επιθυμητή.

4.5 Αντοχή δομής Σάντουιτς

Για την ενίσχυση της αντοχής του μεταλλικού αφρού δημιουργούνται προϊόντα με δομή σάντουιτς όπου στο εξωτερικό τοποθετούνται δύο σκληρά φύλλα σιδήρου ή αλουμινίου και ενδιάμεσα τοποθετείται ο αφρός. Η συγκόλληση που γίνεται μεταξύ του αφρού και των δύο εξωτερικών φύλλων έχει ως στόχο την μεταφορά των φορτιών στα στοιχεία του πάνελ.



Εικόνα 4.3: Σύνθεση δομής σάντουιτς (πηγή: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-investigation-on-the-energy-absorption-of-foam-Golestanipour-Babakhani/ec5ad5d43fc7e69b3b104c1d3d4743abb1075840>)

Συγκεκριμένα τα φύλλα στην επιφάνεια του αφρού δρουν για να εξουδετερώσουν ροπές κάμψης οι οποίες μπορεί να προκύψουν. Το εσωτερικό τμήμα του σάντουιτς που αποτελείται από τον μεταλλικό αφρό είναι υπεύθυνο για την αντιμετώπιση διατμητικών τάσεων που θα παρουσιαστούν και επιτευχθεί σταθεροποίηση των εξωτερικών επιφανειών ως προς τα καμπτικά φορτία. Το κυριότερο πλεονέκτημα της δομής αυτής είναι η μείωση βάρους ενώ επιτυγχάνεται ταυτόχρονα και αντοχή σε κάμψη. Ανάλογα με τις ιδιότητες του κάθε συστατικού που χρησιμοποιούνται, θα έχουν και διαφορετικές ιδιότητες.

Τέλος, η ανάγκη σε μόνωση ήχου, σε θερμική μόνωση και σε κατασκευές χαμηλού ειδικού βάρους κάνουν τις δομές σάντουιτς τις πλέον κατάλληλες στον κατασκευαστικό τομέα.

4.6 Εφαρμογές Μεταλλικών Αφρών

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά βρίσκουν διαρκώς νέες εφαρμογές στην καθημερινότητα. Παρόλο που τα συνθετικά υλικά είναι ελαφριά, οι μεταλλικοί αφροί είναι προτιμητέοι για πολλές κατασκευές στον τομέα της μηχανικής καθώς έχουν καλή αντοχή, δυνατότητα ανακύκλωσης και είναι μη αναφλέξιμα.

Επειδή το φάσμα εφαρμογών των μεταλλικών αφρών είναι μεγάλο, θα αναφερθούν κάποιες ενδεικτικές εφαρμογές. Οι εφαρμογές οι οποίες θα αναλυθούν περισσότερο είναι οι εξής:

- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Φίλτρα
- Αεροναυπηγική
- Εναλλάκτες θερμότητας
- Μπαταρίες
- Καταλύτες
- Ανακύκλωση
- Βιοϊατρική

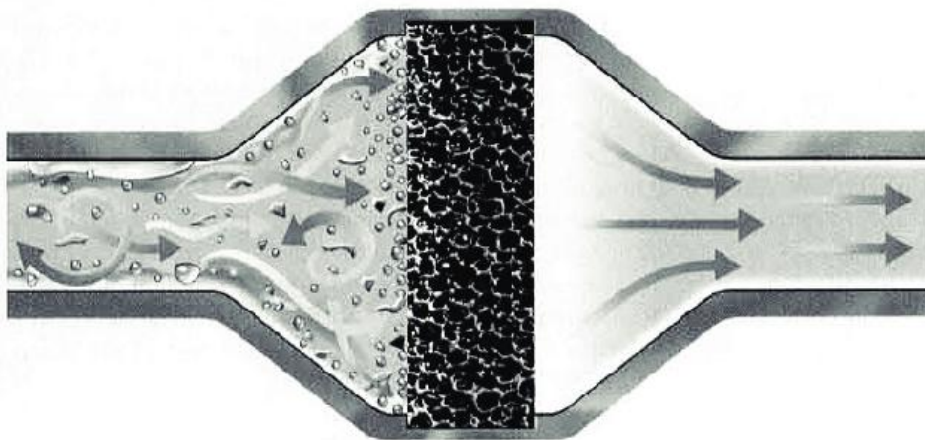
Λόγω των ανησυχιών για το περιβάλλον αλλά και από τις νομοθεσίες, στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι αναγκαία η μείωση του βάρους. Ομοίως, οι ενεργειακές ανάγκες είναι αυξημένες όπως επίσης και η ασφάλεια. Πράγμα που κάνει το κομμάτι της αυτοκινητοβιομηχανίας να αναζητά τις σωστές επιλογές υλικών για τον σχεδιασμό οχημάτων (Εικόνα 4.4). Επίσης, χρειάζεται ένα όχημα να έχει καλή μόνωση χωρίς να γίνεται περίσσεια υλικού, όπου θα αυξήσει το βάρος. Αυτές τις απαιτήσεις καλύπτουν οι μεταλλικοί αφροί όπου είναι τα υλικά που χρειάζονται για την μείωση του βάρους, την μόνωση και την απορρόφηση ενέργειας.

A LOAD BEARING STRUCTURE COMPRESSIVE STRENGTH



Εικόνα 4.4: Μεταλλικοί αφροί στην αυτοκινητοβιομηχανία (πηγή: https://technologystudent.com/joints_flash/metalfoam2.html)

Στα φίλτρα είναι απαραίτητο να γίνεται διαχωρισμός πολύ λεπτών σωματιδίων (Εικόνα 4.5), να υπάρχει αντοχή σε διάβρωση, να γίνεται κατακράτηση σωματιδίων και να έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες. Επομένως, με την κατάλληλη διεργασία ο συνδυασμός των απαιτήσεων αυτών μπορεί να έρθει εις πέρας από τους μεταλλικούς αφρούς. Οι κατηγορίες των φίλτρων είναι, τα φίλτρα κατακράτησης στερεών ή υγρών τεμαχίων διασκορπισμού σε αέριο και κατακράτησης και διαχωρισμού στερεών σωματιδίων σε υγρό. Έτσι, για την χρήση μεταλλικών φίλτρων χρησιμοποιούνται κυρίως πορώδης ανοξείδωτος χάλυβας και πορώδης μπρούτζος.



Εικόνα 4.5: Χρήση μεταλλικών αφρών για φίλτρα(πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Effect-of-foam-filter-on-a-flow-23_fig4_255739159)

Στην αεροναυπηγική είναι σημαντικό το βάρος να είναι χαμηλό. Λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας σε συνδυασμό με την βέλτιστη απόσβεση των ταλαντώσεων, γίνεται εφαρμογή μεταλλικών αφρών στην κατασκευή των υπερσυμπιεστών. Όπως επίσης, λόγω της ισοτροπίας των ιδιοτήτων των πάνελ θα μπορούσε να βοηθήσει στην διατήρηση της δομής σε περίπτωση πυρκαγιάς. Τέλος, στα πλοία είναι αναγκαία η ευκολία στις επεξεργασίες υλικών καθώς τα πλοία δεν είναι κατασκευασμένα με τυποποιημένα μέρη.

Εξαιτίας της υψηλής αγωγιμότητας και της υψηλής εσωτερικής επιφάνειας, οι μεταλλικοί αφροί είναι τα κατάλληλα υλικά για την χρήση τους ως εναλλάκτες θερμότητας (Εικόνα 4.6). Η απόδοση για το ίδιο κόστος είναι καλύτερη σε σχέση με συμβατικούς καταλύτες. Με την ροή ρευστού μέσα από τους πόρους, προσδίδεται ή απάγεται θερμότητα. Για απαγωγή θερμότητας γίνεται χρήση ανοιχτού τύπου μεταλλικοί αφροί. Επίσης, υπάρχουν ιδέες θερμαντικών σωμάτων με μεταλλικούς αφρούς καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα και η διαπερατότητα τους. Επομένως, η μικρή πυκνότητα μεταφράζεται σε μεγαλύτερη αντίσταση και ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη θερμοκρασία θα αναπτύσσεται κατά την ροή ρεύματος.



Εικόνα 4.6: Χρήση μεταλλικών αφρών σε εναλλάκτες θερμότητας (πηγή: <https://www.filter-elements.org/filter-elements/metallic-foams.html>)

Σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ήδη γίνεται χρήση υποστρωμάτων ηλεκτροδίου κατασκευασμένοι από αφρούς νικελίου, όπου υπάρχει μειωμένο συνολικό βάρος και αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα.

Επίσης, αντί για πλέγμα νικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφροί και σε αλκαλικές κυψέλες καυσίμων.

Για να θεωρηθεί ένας καταλύτης αποτελεσματικός θα πρέπει το μέγεθος της διεπιφάνειας καταλύτη και του ρευστού που αντιδρά να είναι η κατάλληλη. Έτσι, οι καταλύτες κατασκευάζονται έχοντας μεγάλο πορώδες. Καταλύτες κεραμικής κατασκευής μπορούν να αντικαταστήσουν κυψελοειδή μέταλλα, ακόμα και αν δεν είναι δυνατόν να ανταγωνιστούν τις ιδιότητες των κεραμικών καταλυτών. Όμως εφαρμογή τέτοιου είδους κατάλυσης γίνεται στις εξατμίσεις ενεργειακών εγκαταστάσεων για την απομάκρυνση οξειδίου του αζώτου.



Εικόνα 4.6: Χρήση μεταλλικών αφρών σε καταλύτες (πηγή: https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/Infobl%C3%A4tter/open_cell_metal_foams_fraunhofer_ifam_dresden.pdf)

Ως προς την ανακύκλωση των αφρών είναι εύκολο να ανακυκλωθεί αφρός αλουμινίου, όπως και ένα συμπαγές αλουμίνιο. Όταν η πυκνότητα είναι χαμηλή ή τα κομμάτια του αλουμινίου πολύ μεγάλα καλό θα ήταν να γίνει συμπίεση αυτών πριν την τήξη. Ο λόγος που γίνεται η ανακύκλωση τέτοιων υλικών είναι για περιβαλλοντικούς λόγους αλλά και επειδή η διαδικασία αυτή είναι επικερδής στις βιομηχανίες.

Τέλος, στην Βιοϊατρική γίνεται χρήση αφρών από τιτάνιο ή χρωμίου-κοβαλτίου για την κατασκευή εμφυτευμάτων δοντιών ή πρόσθετων μελών και αυτό λόγω της βιοσυμβατότητας τους με τον ανθρώπινο οργανισμό. Αυτό είναι ικανό καθώς μπορούν να κατασκευαστούν μεταλλικοί αφροί οι οποίοι να έχουν ιδιότητες που πλησιάζουν τις μηχανικές αντοχές των οστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- Γενικές Αρχές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM- Finite Element Method)

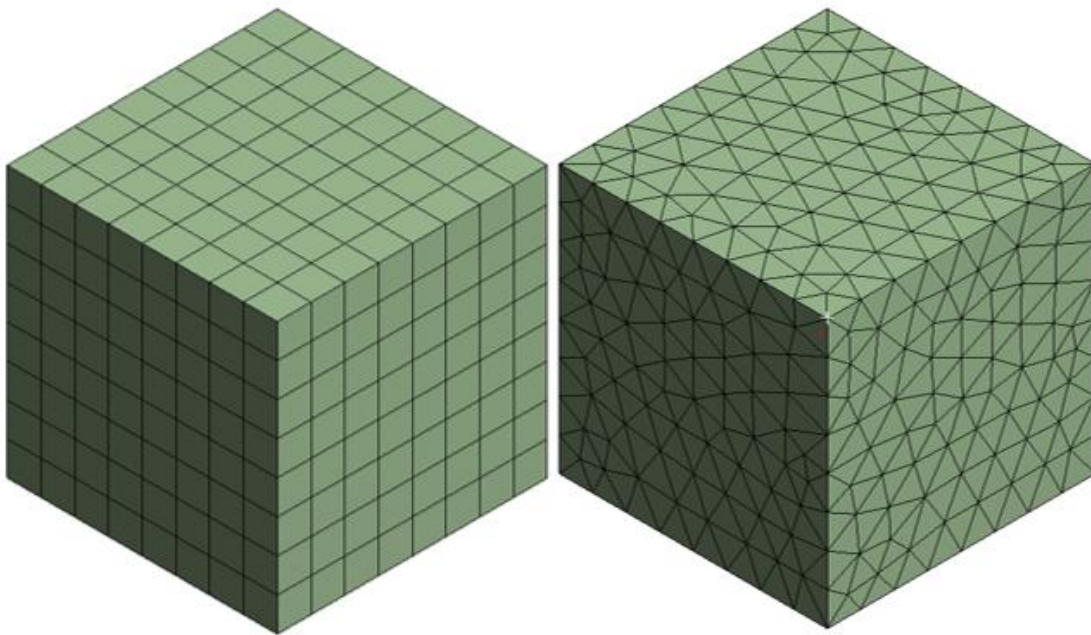
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, είναι μία τεχνική με την οποία αναλύονται τάσεις που δημιουργούνται σε κατασκευές, με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Υπάρχει η δυνατότητα αντιμετώπισης δύσκολων προβλημάτων που δεν μπορούν να λυθούν με το χέρι και μπορούν να εκφραστούν με την μορφή διαφορικών εξισώσεων. Στην αρχή η χρήση τέτοιων μεθόδων ήταν περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους που είχαν για την ανάλογη υπολογιστική ισχύ ώστε να αντιμετωπίσουν προβλήματα που προέκυπταν σε πρακτικές εφαρμογές. Για τον λόγο αυτό γινόταν χρήση αυτών μόνο σε περίπλοκα προβλήματα τα οποία χρειαζόντουσαν επίλυση. Σήμερα, η υπολογιστική ισχύς που απαιτούν τέτοιες εφαρμογές είναι πιο εύκολα προσβάσιμη. Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την μέθοδο των FEM με συγκεκριμένες επεξεργασίες μπορούν να είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα, με αποτέλεσμα να τα καθιστά ικανοποιητικά.

Τα FEM χρησιμοποιούνται για σχεδιασμό προϊόντων των οποίων δεν υπάρχει ακόμα φυσική υπόσταση και σχεδιάζονται σε Η/Υ και ύστερα υπόκεινται σε αναλύσεις ιδιοτήτων ώστε να αποκρυπτογραφηθούν χαρακτηριστικά τα οποία θα εμφανίσουν αν το προϊόν είναι κατάλληλο για μία φυσική εφαρμογή. Επίσης, η μέθοδος των πεπερασμένων βοηθάει στην βελτίωση προϊόντων που ήδη υπάρχουν και χρειάζεται να υποστούν κάποια μετατροπή καθώς και στην περίπτωση που υπάρχουν ενδείξεις μηχανικών αστοχιών και πρέπει να γίνει διαπίστωση και διόρθωση του προβλήματος.

Ανάλογα από το μοντέλο, οι μέθοδοι ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι δύο και είναι οι αναλύσεις δύο διαστάσεων και τριών διαστάσεων (2D analysis, 3D analysis). Το κόστος σε ανάλυση δισδιάστατα μοντέλα είναι χαμηλό, η ανάλυση που γίνεται είναι απλούστερη και είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και σε έναν απλό Η/Υ, παρόλα αυτά τα αποτελέσματα τα οποία θα ληφθούν θα είναι χαμηλής ακρίβειας. Η ανάλυση τριών διαστάσεων είναι μεγάλης λεπτομέρειας και υψηλότερης ακρίβειας στις προβλέψεις τις οποίες θα δώσει. Η υπολογιστική ισχύς η οποία απαιτείται είναι μεγάλη και χρειάζεται ειδικό λογισμικό, όπως επίσης και πιο απαιτητική ως προς τον σχεδιασμό της.

Επίσης, τα πεπερασμένα στοιχεία στηρίζονται στην λογική της επιμήκυνσης μιας γεωμετρίας που της επιβάλλεται ένα συγκεκριμένο φορτίο. Επομένως, η μέθοδος εξαρτάται από το μέγεθος της φόρτισης όπως και επίσης από της ιδιότητες του υλικού της γεωμετρίας.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1, ο νόμος του Hooke αναφέρει πως η φόρτιση που ασκείται σε ένα σώμα ισούται με το γινόμενο της ακαμψίας του υλικού το οποίο μελετάται επί την παραμόρφωση που προκαλεί η δράση της. Κατά την χρήση της μεθόδου ανάλυσης των FEM η δομή θα διααιρεθεί σε ένα πεπερασμένο αριθμό επιμέρους δομών (elements), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι (nodes) και δημιουργούν ένα πλέγμα. Η συνολική φόρτιση την οποία θα δέχεται η γεωμετρία η οποία έχει σχεδιαστεί θα είναι ίση με το άθροισμα του γινομένου της ακαμψίας επί την παραμόρφωση για κάθε στοιχείο του πλέγματος (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Δημιουργία πλεγμάτων σε κυβικά δοκίμια (πηγή: <https://www.dfrsolutions.com/blog/fea-proper-mesh-generation>)

Τα στάδια μίας ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι τα εξής:

- Διάκριση της γεωμετρίας που είναι να μελετηθεί σε κόμβους, στοιχεία και δημιουργία της πλεγματοποίησης (meshing).
- Υπολογισμός των συντελεστών ακαμψίας (stiffness matrix) και της επιβαλλόμενης φόρτισης (load vector).
- Εφαρμογή περιορισμών.
- Επίλυση εξισώσεων.
- Επεξήγηση των αποτελεσμάτων και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.

Τα στοιχεία έχουν μορφή γνωστών γεωμετρικών σχημάτων, όπως τρίγωνο, τετράγωνο ή παραλληλόγραμμο (Εικόνα 5.1). Στις τρισδιάστατες δομές τα στοιχεία μπορεί να έχουν σχήματα όπως είναι οι πυραμίδες, κύβοι ή παραλληλεπίπεδα. Κάθε στοιχείο αποτελεί βασική μονάδα ανάλυσης με συγκεκριμένους βαθμούς ελευθερίας. Το πλέγμα που δημιουργείται από τα στοιχεία αποτελείται από κόμβους από τους οποίους εκτείνονται στοιχεία πλέγματος σε γειτονικούς κόμβους. Οι δομικές ιδιότητες μπορούν να δοθούν στο πλέγμα με τον σωστό προγραμματισμό και οι ιδιότητες του υλικού που θα προσδιορίσει το πώς θα συμπεριφερθεί η γεωμετρία ή κατασκευή υπό συνθήκες φόρτισης. Επίσης, σε περιοχές που μπορεί να χρειάζεται υψηλή ακρίβεια, η πυκνότητα των κόμβων είναι μεγαλύτερη από άλλες περιπτώσεις όπου δεν χρειάζεται η ακρίβεια να είναι τόσο υψηλή.

Δίνεται μεγαλύτερη σημασία στις περιοχές στις οποίες παρατηρείται συχνότερη αστοχία και εμφάνιση υψηλών τάσεων. Η πυκνότητα του πλέγματος είναι ένας παράγοντας ο οποίος είναι πολύ σημαντικός για την επιτυχία της μεθόδου. Αν το πλέγμα έχει λίγα στοιχεία, τα αποτελέσματα τα οποία θα ληφθούν μπορεί να μην είναι λεπτομερή και να μην έχουν μεγάλη αξιοπιστία. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή που το πλέγμα είναι πολύ πυκνό, το κόστος και ο χρόνος υπολογισμού θα είναι υψηλός, όπως και τα αποτελέσματα θα έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Όμως η τοποθέτηση πολύ πυκνού πλέγματος δεν είναι πάντα η βέλτιστη λύση για ένα πρόβλημα στο οποίο μπορεί να παίρνεις ικανοποιητικά αποτελέσματα και με ένα βασικό πλέγμα, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Για τον λόγο αυτό θα ήταν καλό να υπάρχει μια πλήρη εμπειρική γνώση πάνω στην οποιαδήποτε μελέτη για τα ποσά των αποτελεσμάτων των οποίων μπορεί να προκύψουν, έτσι ώστε να γνωρίζει ο μελετητής τον βέλτιστο τρόπο μελέτης του προβλήματος. Για σημαντικές μεταβολές τάσεων και παραμορφώσεων θα χρησιμοποιείται λεπτομερής πλεγματοποίηση, ενώ για σχετικά σταθερές μεταβολές απλή πλεγματοποίηση. Η παραμόρφωση των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφεται από πολλές απλές πολυωνυμικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις ισορροπίας καταγράφονται σε μητρώο και επιλύονται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες συνθήκες περιορισμού (boundary conditions) και εφαρμόζοντας στην γεωμετρία την κατάλληλη φόρτιση, επιλύονται τα μητρώα των κόμβων και έτσι υπολογίζονται οι παραμορφώσεις. Έτσι, στην συνέχεια υπολογίζονται οι τάσεις που ασκούνται στην γεωμετρία. Οι πληροφορίες που μπορεί να πάρει κάποιος από τα FEM συστήματα για την γεωμετρία είναι η μάζα, ο όγκος, η θερμοκρασία, η παραμόρφωση, η τάση, η δύναμη και άλλα.

Επίσης, στο ίδιο πείραμα το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μπορεί να γίνει έλεγχος σε υλικά διαφορετικών ιδιοτήτων. Η ανάλυση γίνεται σε γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα. Τα γραμμικά μοντέλα κάνουν χρήση των απλών παραμέτρων καθώς θεωρούν πως το υλικό δεν έχει υποστεί

πλαστικής παραμόρφωση, ενώ στα μη γραμμικά μοντέλα γίνονται φορτίσεις που γίνονται εκτός της ελαστικής περιοχής καθώς θεωρείται πως το υλικό έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση.

Η ανάλυση αυτή έχει τρία στάδια, το προ-υπολογιστικό στάδιο, το στάδιο της επίλυσης και το μετά-υπολογιστικό στάδιο. Το προ-υπολογιστικό στάδιο της ανάλυσης απαρτίζεται από τα εξής:

- Ορισμός προβλήματος.
- Επιλογή προτιμήσεων.
- Ορισμός τύπου και μορφής πεπερασμένων (2D ή 3D).
- Καθορισμός ιδιοτήτων του υλικού (λόγος Poisson, μέτρο ελαστικότητας κ.λπ.).
- Δημιουργία γεωμετρίας με τις επιθυμητές διαστάσεις.
- Επιλογή πυκνότητας του πλέγματος.
- Δημιουργία πλέγματος.

Στο στάδιο της επίλυσης θέτονται οι περιορισμοί του μοντέλου και οι συνθήκες φόρτισης και επιλύονται από τον Η/Υ οι εξισώσεις που είναι προς επίλυση.

Στο μετά-υπολογιστικό στάδιο γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα οποία μπορεί να είναι σε μορφή πίνακα ή διαγραμμάτων.

Τέλος, η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα σημαντικό εργαλείο για κάθε μηχανικό που ασχολείται με την βιομηχανία και το μηχανολογικό σχέδιο καθώς οι μελέτες που μπορούν να γίνουν είναι οι εξής:

- Προσομοίωση συγκρούσεων.
- Σχεδιασμός της δομικής αντοχής κατασκευών.
- Θερμικές Αναλύσεις.
- Ανάλυση Shock.
- Μελέτη δονήσεων.
- Μελέτη ηλεκτρικών φαινομένων.
- Μελέτη ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων.
- Προβλήματα λυγισμού.
- Δυναμικές αναλύσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- Μοντελοποίηση μεταλλικού αφρού με την βοήθεια του Matlab και του ANSYS

6.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό έχει ως στόχο την ανάλυση των βημάτων του αλγόριθμου που υλοποιήθηκε με την χρήση του Matlab. Η επιλογή του μαθηματικού προγράμματος Matlab στηρίχθηκε στην εκτενή βιβλιοθήκη και την προσιτή αλλά και υψηλή γλώσσα προγραμματισμού. Η χρήση του Matlab θα βοηθήσει να δημιουργηθούν τα κέντρα των σφαιρών τα οποία σε μεταγενέστερη φάση θα μπορέσει να επεξεργαστεί το ANSYS για την μοντελοποίηση του μεταλλικού αφρού.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο κώδικας ο οποίος συντάχθηκε στο Matlab, λόγω του συγκεκριμένου εύρους πυκνότητας που είναι επιτρεπτό για την κατασκευή ενός μεταλλικού αφρού, είχε ως κύριο γνώμονα την απλότητα των εντολών μέσω της χρήσης της βιβλιοθήκης αλλά και την ευελιξία του στις πιθανές διορθώσεις. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην ταχύτητα αλλά και απαιτούμενη μνήμη που χρειάζεται ένας υπολογιστής για την υλοποίησή του. Η επιλογή αυτή έχει ως συνέπεια να προκύψουν μια σειρά από ανοιχτά προβλήματα που αφορούν τόσο τις επιλογές των εντολών του προγράμματος αλλά και της ίδιας της κατασκευής των σφαιρών που θα αναλυθούν στο τέλος του κεφαλαίου.

Πριν την ανάλυση του αλγορίθμου που δημιουργήθηκε, αξίζει να αναφερθούμε σε δύο εργασίες οι οποίες προτείνουν διαφορετικούς τρόπους επίλυσης σχετικών προβλημάτων κατασκευής μεταλλικού αφρού. Στην εργασία των Amir H. Roohi, H. Moslemi Naeini, M. Hoseinpour Gollo, M. Soltanpour και M. Abbaszadeh με τίτλο “ On the random-based closed-cell metal foam modeling and its behavior in laser forming process ”, αναλύεται μια μεθοδολογία κατασκευής των σφαιρών η οποία στηρίζει την επιλογή της απόσταση των σφαιρών μεταξύ τους σε γωνίες περιστροφής. Αναλυτικότερα στην εργασία αυτή οι συγγραφείς με βασικές προϋποθέσεις τις ακόλουθες

- Η θέση των σφαιρών είναι τυχαία,
- Οι ακτίνες των σφαιρών επιλέγονται από συγκεκριμένο εύρος μήκους,
- Το πάχος του αφρού είναι ελεγχόμενο,
- Η σχετική πυκνότητα του αφρού είναι ελεγχόμενη,

υλοποίησαν έναν μακρο –προγραμματισμό με την βοήθεια του λογισμικού Catia για την παραγωγή τυχαίων παραμέτρων που χρειάζονται στην κατασκευή σφαιρών με συγκεκριμένο εύρος μήκους ακτίνας. Το πρώτο βήμα του αλγόριθμου είναι η κατασκευή των ορίων των διαστάσεων x,y,z του

στερεού. Στην συνέχεια επιλέγεται τυχαία από συγκεκριμένο εύρος διαστήματος ένας αριθμός που θα αντιπροσωπεύσει την ακτίνα της πρώτης σφαίρας. Η σφαίρα αυτή τοποθετείται στην αρχή των αξόνων και αφαιρείται ώστε να δημιουργηθεί το πορώδες. Για την δημιουργία της δεύτερης σφαίρας η αρχή των αξόνων τοποθετείται στο κέντρο της πρώτης καθιστώντας την ως σφαίρα αναφοράς. Διαλέγονται τιμές new_x , new_y , new_z και new_radius από μια λίστα τυχαίων αριθμών. Όσο οι νέες αυτές συντεταγμένες δεν υπερβαίνουν τις διαστάσεις του στερεού και η απόσταση των κέντρων των δύο σφαιρών είναι θετική, δηλαδή

$$L = \sqrt{(new_x - x_j)^2 + (new_y - y_j)^2 + (new_z - z_j)^2} - (new_radius + radius_j) \times \gamma > 0 \quad (1)$$

δημιουργούμε την δεύτερη σφαίρα με κέντρο (new_x, new_y, new_z) και σε κατεύθυνση για $\theta=0^\circ$ και $\phi=0^\circ$ σε σχέση με την σφαίρα αναφοράς όπου

$$\begin{aligned} new_x &= dr \times \sin(\varphi) \times \cos(\theta) + x_j \\ new_y &= dr \times \sin(\varphi) \times \sin(\theta) + y_j \\ new_z &= dr \times \cos(\varphi) + z_j \end{aligned} \quad (2)$$

Και ακτίνα

$$new_radius = ((max_radius - min_radius) \times rnd + min_radius) \quad (3)$$

Όπως φαίνεται, η παράμετρος της απόστασης, L , εξαρτάται από το γ το οποίο προσδιορίζει το πορώδες γύρω από τις σφαίρες. Έτσι, όταν αυξάνεται η τιμή του γ μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των σφαιρών. Στην παραπάνω σχέση τα x_j , y_j , z_j και $radius_j$ αποτελούν τα δεδομένα όλων των σφαιρών αναφοράς.

Για τον υπολογισμό της τρίτης σφαίρας επιλέγεται τυχαίο ϕ σύμφωνα με την σχέση

$$\phi = \phi + rnd(0^\circ - 15^\circ) \quad (4)$$

Και ακολουθούν τα βήματα των σχέσεων (2)-(4) για τον σχηματισμό της σφαίρας και την αφαίρεση της. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται όσο

$$\phi \leq 180^\circ \quad (5)$$

Όταν η σχέση (5) δεν ισχύει ουσιαστικά έχει γίνει μια περιστροφή γύρω από την σφαίρα αναφοράς ως προς το επίπεδο xz. Συνεπώς, μηδενίζοντας την γωνία ϕ μπορεί κανείς να ξεκινήσει την κίνηση ως προς το επίπεδο xy και την γωνία θ (Εικόνα 6.1), δηλαδή

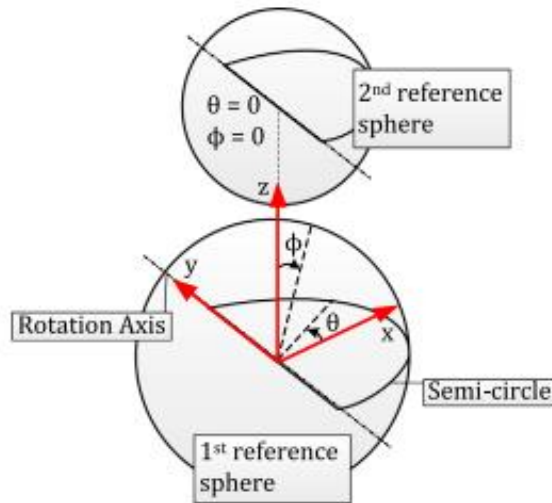
$$\theta = \theta + \text{rnd}(0^\circ - 15^\circ) \quad (6)$$

Στις παραπάνω σχέσεις αξίζει να σημειωθεί πως οι παραμέτρους των σχέσεων έχουν υπολογιστεί από τους εξής τύπους:

$$\begin{aligned} dr &= (\max_dr - \min_dr) \times \text{rnd} + \min_dr \\ \max_dr &= (\text{new_radius} + \text{radius_ref}) \times \alpha \\ \min_dr &= (\text{new_radius} + \text{radius_ref}) \times \beta \end{aligned} \quad (7)$$

όπου:

- α και β , είναι ο μέγιστος και ελάχιστος συντελεστής πορώδους
- radius_ref , είναι η ακτίνα της σφαίρας αναφοράς

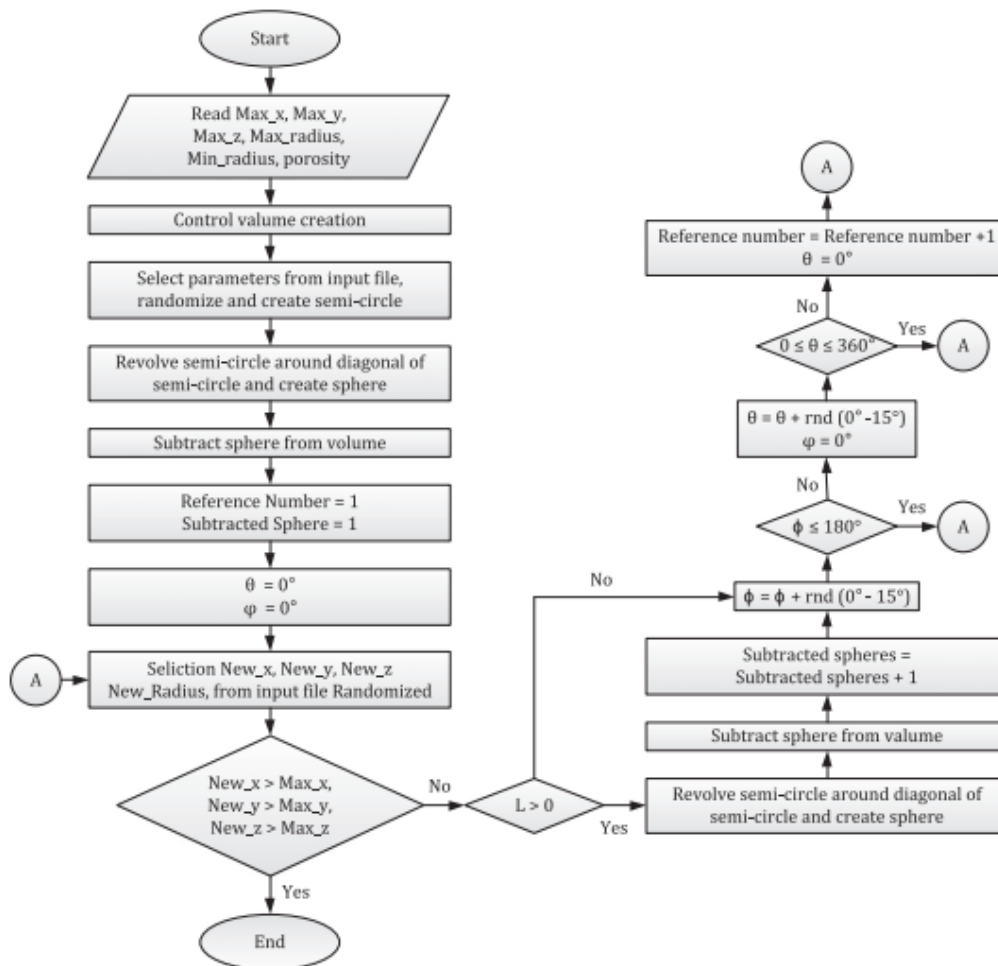


Εικόνα 6.1: Θέση δεύτερης σφαίρας σε σχέση με την πρώτη σφαίρα αναφοράς (πηγή: *On the random-based closed-cell metal foam modeling and its behavior in laser forming process*)

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρείται πως όταν τα $\alpha, \beta > 1$, τότε η απόσταση των σφαιρών θα είναι μεγαλύτερη, έχοντας ως αποτέλεσμα να σχηματίζεται αφρός κλειστών κυψελίδων με υψηλή σχετική πυκνότητα. Ενώ αν τα $\alpha, \beta < 1$, τότε θα υπάρχει επικάλυψη των σφαιρών με αποτέλεσμα να παράγεται αφρός ανοιχτών κυψελίδων.

Τέλος, όταν μια σφαίρα δεν πληροί την προϋπόθεση (1), δεν γίνεται αφαίρεση της σφαίρας αλλά επιλέγεται νέο τυχαίο ϕ με νέο εύρος. Με τον τρόπο αυτό ελέγχονται όλοι οι πιθανοί σχηματισμοί για να μην υπάρχει επικάλυψη. Στην περίπτωση αυτή, δηλαδή $L < 0$, είναι απαραίτητη η αλλαγή του μεγέθους της ακτίνας. Με αποτέλεσμα η απόσταση L να αφαιρείται από την αρχική ακτίνα που έχει επιλεγεί για την σφαίρα και έτσι η νέα ακτίνα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$new_radius = new_radius - |L| \quad (8)$$



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα ροής που ακολουθήθηκε από την εργασία με τίτλο "On the random-based closed-cell metal foam modeling and its behavior in laser forming process"

Η νέα τιμή της ακτίνας θα πρέπει να είναι εντός του εύρους των προεπιλεγμένων ακτινών που έχουν τεθεί από τον χρήστη. Εάν η ακτίνα όμως είναι μικρότερη από την μικρότερη τιμή του εύρους που έχει θέσει ο χρήστης τότε η επόμενη σφαίρα δημιουργείται σύμφωνα με τον αλγόριθμο (Εικόνα 6.2):

$$new_radius - |L| > min_radius \times resize_factor \quad (9)$$

Μετά την διόρθωση της ακτίνας, η απόσταση μεταξύ της σφαίρας και της σφαίρας αναφοράς δεν θα είναι η ελάχιστη δυνατή. Γι' αυτό η απόσταση μεταξύ των δύο σφαιρών διορθώνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$dr = dr - |L| \quad (10)$$

6.2 Ανάλυση Αλγορίθμου Προγράμματος Μοντελοποίησης

Στην υποενότητα αυτή θα γίνει η ανάλυση του αλγορίθμου που υλοποιήθηκε για την κατασκευή του μεταλλικού αφρού. . Αναλυτικότερα, βασικές προϋποθέσεις του αλγορίθμου είναι οι ακόλουθες

- Η θέση των σφαιρών να είναι τυχαία,
- Οι ακτίνες των σφαιρών να είναι τυχαίες,
- Να μην υπάρχει επικάλυψη σφαιρών.

Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι η επιλογή των τυχαίων παραμέτρων που προσδιορίζουν τα κέντρα των σφαιρών. Συγκεκριμένα, επειδή οποιαδήποτε κατάσταση στην οποία κάθε αποτέλεσμα σε ένα χώρο δείγματος είναι ισοπίθανο χρησιμοποιεί ομοιόμορφη κατανομή η λίστα των συντεταγμένων των σφαιρών x, y, z επιλέχθηκε να ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή ενώ για την κατασκευή μιας ακολουθίας τιμών που θα αποτελέσουν τις ακτίνες επιλέχθηκε η τυπική κατανομή. Για το εύρος του μήκους των ακτινών προσδιορίζουμε μια ελάχιστη τιμή και μια μέγιστη. Συγκεκριμένα έχουμε

$$r = ((b - a) \times rand(n, 1)) + a \quad (11)$$

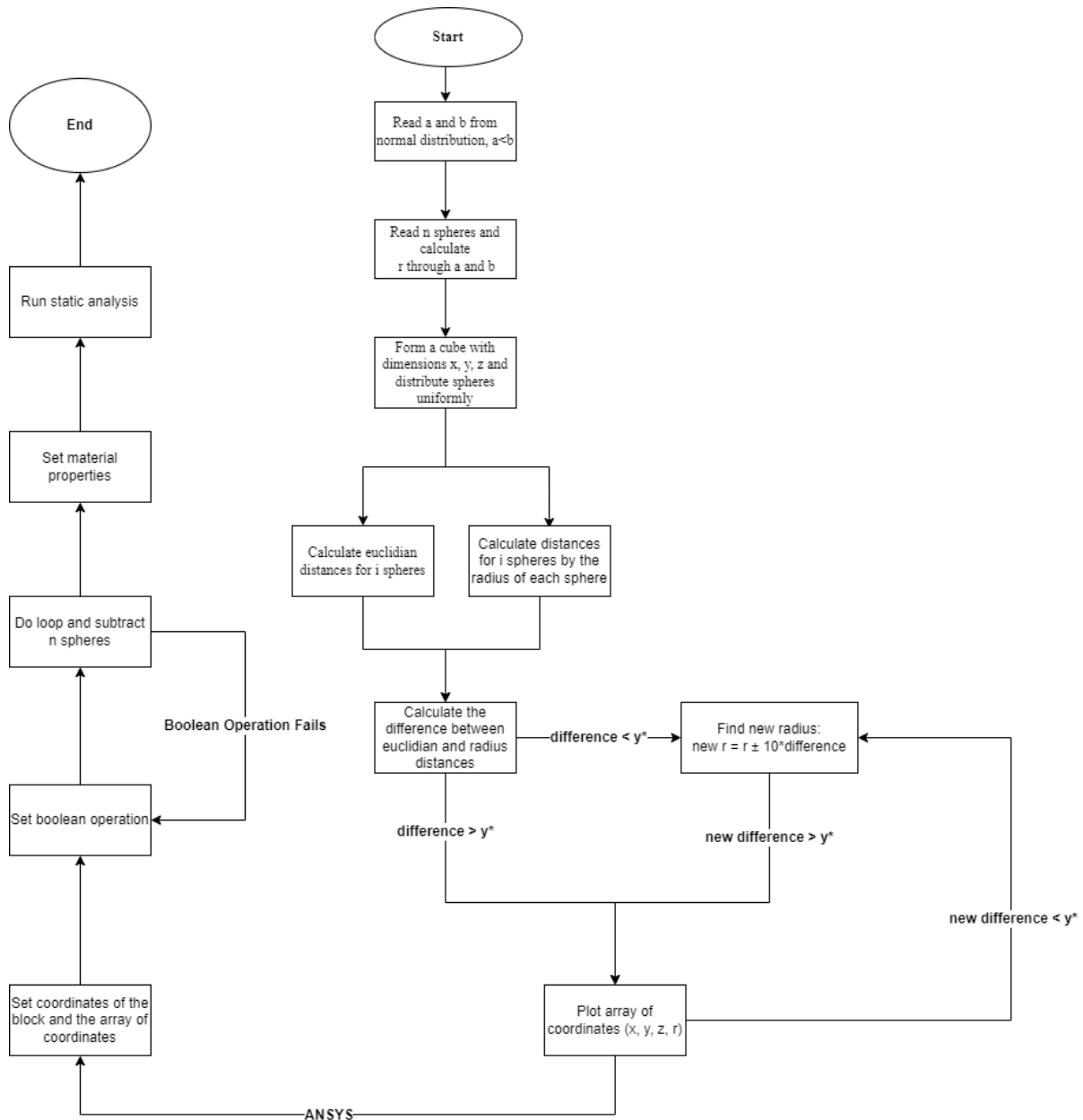
Η αρχική επιλογή ήταν $a=0.3$ ως ελάχιστη ακτίνα και $b=0.7$ ως μέγιστη. Αν και οι τιμές αυτές είναι τυχαίες έχουμε πάρει υπόψιν μας ότι για να αποφύγουμε βασικά αίτια ανομοιομορφίας όπως η ταυτόχρονη ανάπτυξη φυσαλίδων διαφορετικού μεγέθους ή η συγχώνευση γειτονικών πόρων, το εύρος των τιμών θα έπρεπε να μην είναι μεγάλο. Αξίζει εδώ να τονίσουμε ότι ο αλγόριθμος αφορά την κατασκευή των σφαιρών χωρίς να μας ενδιαφέρουν οι παράμετροι πάχους αφρού και πυκνότητα αφρού με αποτέλεσμα οι αρχικές διαστάσεις του στερεού να είναι $1 \times 1 \times 1$.

Μετά την δημιουργία των ακολουθιών που προσδιορίζουν τις ακτίνες και τις συντεταγμένες γίνεται ο έλεγχος των επικαλύψεων. Για να ελεγχθούν οι αποστάσεις των σφαιρών μεταξύ τους, για να μπορεί να επιτευχθεί συγκεκριμένος τύπος αφρού χρησιμοποιούνται οι τύποι (12) και (13), δηλαδή ο τύπος

υπολογισμού της Ευκλείδειας απόστασης (12) και της απόστασης μεταξύ των ακτινών των σφαιρών (13).

$$d_1 = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \quad (12)$$

$$d_2 = r_i + r_{i+1} \quad (13)$$



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα ροής που ακολουθήθηκε για τον προγραμματισμό της μοντελοποίησης του μεταλλικού αφρού

* γ , είναι η τιμή που επιλέγει ο χρήστης να θέσει στο Matlab και στην περίπτωση της αρχικής σκέψης η τιμή αυτή ήταν 0.02.

Εάν οι διαφορές

$$d_1 - d_2 > 0.02 \quad (14)$$

για κάθε ζεύγος σφαιρών έχουν τιμές μεγαλύτερες του 0.02 τότε οι σφαίρες δεν επικαλύπτονται με αποτέλεσμα να παράγεται αφρός κλειστού τύπου. Στην περίπτωση όμως που η απόσταση είναι μικρότερη του 0.02, λόγω σφάλματος των υπολογιστικών συστημάτων θα αναγνωρίζονται οι σφαίρες ως επαπτόμενες μεταξύ τους. Το ενδεχόμενο αυτό απορρίπτεται λόγω φυσικής υπόστασης, καθώς θα υπάρξει διάχυση των δύο σφαιρών μεταξύ τους σε μία μεγαλύτερη σφαίρα που θα δημιουργήσει προβλήματα επικάλυψης. Τέλος, στην περίπτωση που η διαφορά των αποστάσεων είναι μικρότερη του μηδενός θα υπάρχει επικάλυψη των σφαιρών και κατά συνέπεια θα παραχθεί αφρός ανοιχτού τύπου.

Ενδεχόμενο επικάλυψης δύο σφαιρών: Έστω ότι είμαστε στην σφαίρα i . Στην περίπτωση που προκύπτει μια επικάλυψη μεταξύ δύο σφαιρών i και j με $i < j$ τότε υπολογίζεται μια νέα ακτίνα (new_r) από την σχέση (15).

$$new_{r(i)} = r(i) + 10 \ x_difference \quad (15)$$

όπου $r(i)$ η ακτίνα της σφαίρας i και

$$x_difference = d_i - d_j$$

Με τον τρόπο διορθώνεται η ακτίνα της σφαίρας i αποφεύγοντας την επικάλυψη.

Ενδεχόμενο συγχώνευσης δύο σφαιρών: Έστω ότι είμαστε στην σφαίρα i . Για την αποφυγή συγχώνευσης γνωρίζουμε ότι αν η διαφορά των αποστάσεων είναι θετική και αρκετά μικρή τότε πρέπει να απορριφθεί. Για τον λόγο αυτό έχουμε

$$new_{r(i)} = r(i) - 10 \ x_difference \quad (16)$$

Ενδεχόμενο επικάλυψης τριών σφαιρών: Έστω ότι είμαστε στην σφαίρα i η οποία επικαλύπτεται από τις σφαίρες j , k με $i < j < k$. Επειδή η σφαίρα αναφοράς είναι η ίδεν μας απασχολεί η σχέση των $j < k$. Γνωρίζουμε ότι για να υπάρχει επικάλυψη και οι δύο διαφορές των ακτινών είναι αρνητικές, δηλαδή

$$x_difference = d_i - d_j < 0$$

$$x_difference = d_i - d_k < 0$$

Για το λόγο αυτό διορθώνουμε την ακτίνα της σφαίρας αναφοράς διαλέγοντας την μέγιστη κατά απόλυτο τιμή διαφορά των αποστάσεων, δηλαδή

$$new_{r(i)} = r(i) - 10 \max(\text{abs}(x_difference)) \quad (17)$$

Ενδεχόμενο επικάλυψης και συγχώνευσης τριών σφαιρών: Έστω σφαίρα αναφοράς i . Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μια σφαίρα j που επικαλύπτει την σφαίρα αναφοράς και μια σφαίρα k που έχει μικρή απόσταση από αυτήν. Όπως και πριν μπορούμε να διαλέξουμε την (17) ως νέα ακτίνα για την σφαίρα αναφοράς.

Γενικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο τύπος (17) μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε σφαίρα αναφοράς που εμφανίζει επικάλυψη ή κίνδυνο συγχώνευσης με 2 ή παραπάνω σφαίρες.

Ο αλγόριθμος κλείνει με την απόρριψη των νέων ακτινών $new_{r(i)}$ που λόγο πράξεων βγαίνουν αρνητικές ή μικρότερες από το κάτω άκρο του επιτρεπτού εύρους διαστήματος σφαιρών. Συνεπώς δημιουργείται ένα νέο αρχείο που έχει μόνο τις συντεταγμένες x , y , z και $new_{r(i)}$ που θα χρησιμοποιηθούν ως τα μητρώα στο ANSYS για την παραγωγή των σφαιρών.

Ο χρήστης θέτει τις διαστάσεις του τεμαχίου ίδιες με αυτές στο Matlab στο πρόγραμμα ANSYS και γίνεται η εισαγωγή των συντεταγμένων των σφαιρών, ως αρχεία txt για κάθε στοιχείο ανάγνωσης ξεχωριστά.

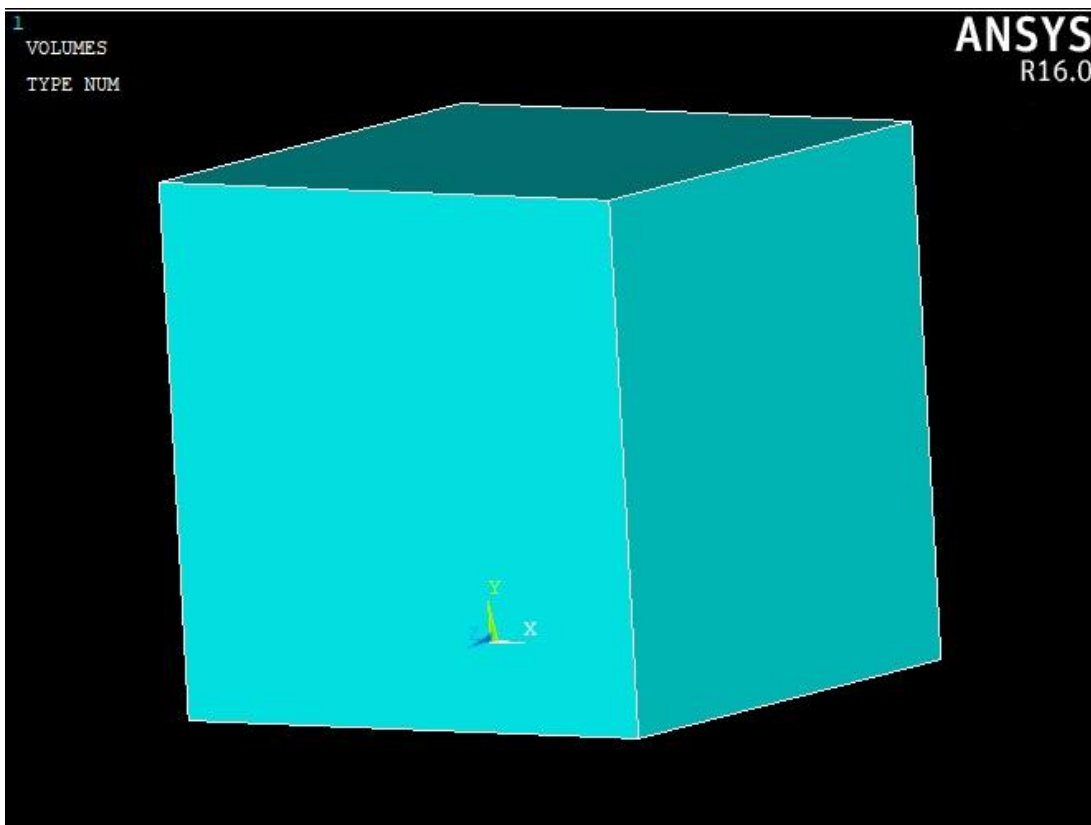
Στην συνέχεια θέτεται ένας δυαδικός τελεστής (Boolean operator) για τον οποίο ανάλογα με την τιμή του η απεικόνιση θα μπορεί να παραχθεί από το ANSYS. Έτσι θα γίνει το loop για τον πλήθος σφαιρών που έχει θέσει ο χρήστης και θα γίνει η αφαίρεση των σφαιρών για να δημιουργηθεί το πορώδες. Στην περίπτωση όμως που ο δυαδικός τελεστής αστοχήσει, ο χρήστης χειροκίνητα θα πρέπει να τον αλλάξει ώστε να βρεθούν οι σωστές ανοχές για να μπορεί να γίνει η παραγωγή της εικόνας του αφρού. Η αστοχία του τελεστή μπορεί να οφείλεται στις ανοχές του τελεστή καθώς και στο πλήθος των σφαιρών που έχει επιλέξει ο χρήστης να παραχθούν.

Τέλος, ο χρήστης έχει θέσει τις ιδιότητες του υλικού του οποίου επιθυμεί να απεικονιστεί ο μεταλλικός αφρός.

6.3 Μοντελοποίηση Γεωμετρίας στο ANSYS

Ο τελικός σχεδιασμός του δοκιμίου έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 16.0 με χρήση του Ansys Parametric Design Language (APDL). Ο κώδικας του παραρτήματος Α χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των δεδομένων και ο κώδικας του παραρτήματος Β για την μελέτη του τελικού δοκιμίου. Για την μοντελοποίηση του δοκιμίου, ελήχθησαν αρχεία σε μορφή .txt όπου είχαν ως δεδομένα τις συντεταγμένες των σφαιρών καθώς και τις ακτίνες τους. Η χρήση των αρχείων αυτών γίνεται σε μορφή τέτοια καθώς μπορεί να γίνει η ανάγνωση τους μέσω του APDL.

Έτσι, η πρώτη γεωμετρία που δημιουργήθηκε ήταν ένα κυβικό δοκίμιο διαστάσεων 1x1x1 (Εικόνα 6.4). Αξίζει να σημειωθεί πως οι διαστάσεις των δοκιμίων έχουν αδιάστατη μορφή, καθώς στο APDL δεν είναι αναγκαίο να θέσει ο μελετητής σύστημα μονάδων, αρκεί να γνωρίζει την τάξη μεγέθους την οποία μελετάει, αλλά και σε ποια κλίμακα θέλει να αναφερθεί ως προς την μελέτη του.

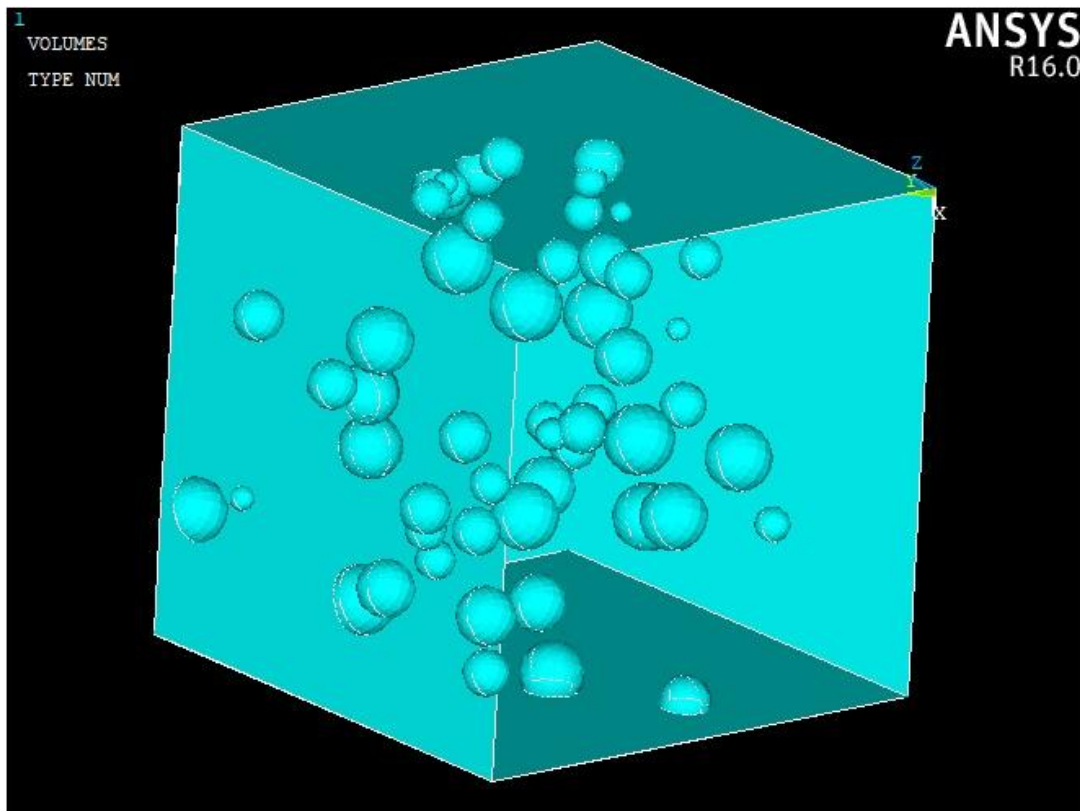


Εικόνα 6.4: Δημιουργία κυβικού δοκιμίου χωρίς την παρουσία σφαιρών

Η δημιουργία του δοκιμίου αυτού γίνεται προσδιορίζοντας το πλήθος των σφαιρών που θα πρέπει να παραχθούν. Το πλήθος αυτό έχει προσδιοριστεί στον κώδικα του APDL, που είναι σε μορφή .txt, ως NN.

Αφού προσδιορισθεί το πλήθος, πρέπει να προσδιορισθούν οι διαστάσεις του δοκιμίου κατά του άξονες x , y και z . Αυτό προσδιορίζεται από τα αρχικά σημεία x_1 , y_1 και z_1 και τα τελικά σημεία x_2 , y_2 και z_2 . Οι αριθμοί που δίνονται στα αρχικά και τελικά σημεία δεν έχουν κάποια σημασία αρκεί η διαφορά αυτών να δίνει ως αποτέλεσμα την επιθυμητή διάσταση του δοκιμίου για την δημιουργία του αφρού.

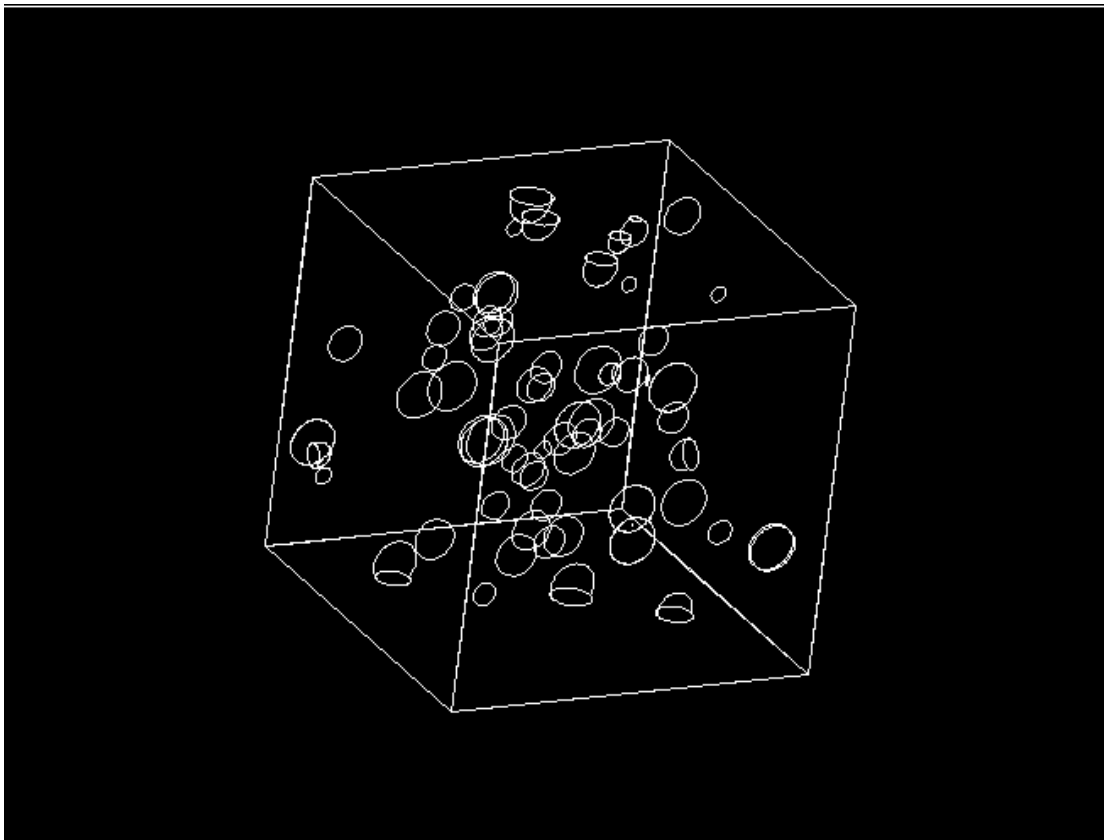
Έτσι, πριν την δημιουργία της επανάληψης (loop) που πρέπει να γίνει για την παραγωγή των σφαιρών (Εικόνα 6.5), προσδιορίζεται μία δυαδική ανοχή στο σύστημα. Η ανοχή (BTOL) αυτή μπορεί να δώσει μεγαλύτερη ακρίβεια στην μοντελοποίηση που θα παραχθεί, αλλά λόγω των σφαλμάτων που μπορεί να έχει ένα πρόγραμμα, η μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να οδηγήσει και σε μη υλοποίηση κάποιων δεδομένων.



Εικόνα 6.5: Δημιουργία κυβικού δοκιμίου υπό την παρουσία σφαιρών

Αυτό παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό στα δοκίμια όταν το πλήθος των σφαιρών αυξάνεται. Έπειτα κατά την διαδικασία της επανάληψης γίνεται η παραγωγή των σφαιρών, όπου από τα .txt αρχεία δημιουργείται η πρώτη σφαίρα με τα δεδομένα που υπάρχουν και στην συνέχεια αφαιρείται. Αυτό τίθεται ως ένα νέο ενιαίο σώμα στο οποίο παράγεται η επόμενη σφαίρα και ακολουθείται η ίδια

διαδικασία για όλο το πλήθος των σφαιρών (Εικόνα 6.5), έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία του τεμαχίου (Εικόνα 6.6)



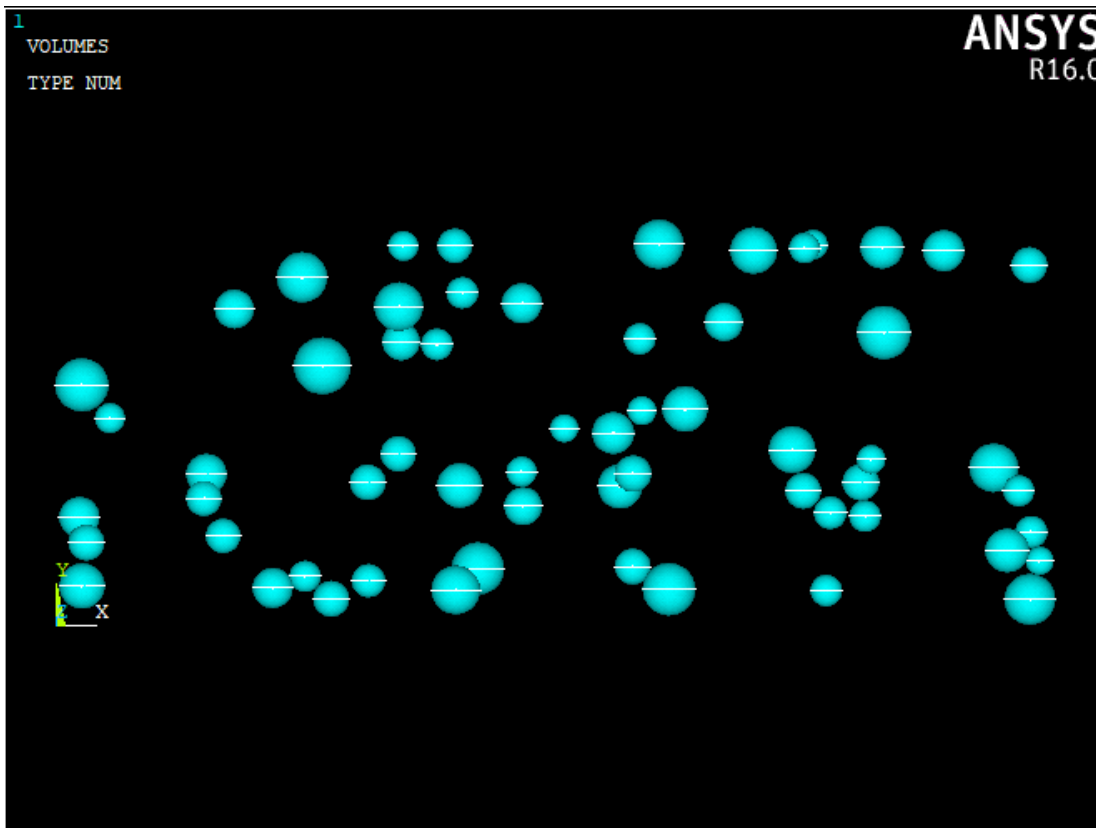
Εικόνα 6.6: Αφαίρεση σφαιρών στο κυβικό δοκίμιο για την δημιουργία του κυβικού αφρού

Παρόλα αυτά επειδή το δοκίμιο μας είναι κυβικό, ο εφελκυσμός του σε μια διεύθυνση επηρεάζεται σημαντικά από την πάκτωση σε μια μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με το μήκος του και μπορεί να δώσει λάθος αποτελέσματα σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει να αλλάξουν οι διαστάσεις του δοκιμίου σε παραλληλεπίπεδο. Έτσι οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν για το τελικό δοκίμιο συμβαδίζουν με τις διαστάσεις που μπορεί να αγοράσει κάποιος στην βιομηχανία. Οι διαστάσεις αυτές είναι 50x20x5 στις οποίες θα γίνει η ίδια διαδικασία.

Επίσης, για τον λόγο που προαναφέρθηκε με την ανοχή (BTOL) έγινε αλλαγή των διαστάσεων του δοκιμίου στο Matlab. Αυτό έγινε σύμφωνα με τα όρια των ακτινών των σφαιρών, ακαι βπου τέθηκαν στο πρόγραμμα μας. Έτσι το δοκίμιο στο Matlab, θα είχε διαστάσεις $[50-(b \times 0.1)] \times [20-(b \times 0.1)] \times [5-(b \times 0.1)]$, ενώ στο ANSYS θα είχε τις προκαθορισμένες βιομηχανικές διαστάσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω ευελιξίας και χρόνου, ο κώδικας του παραρτήματος Β τροποποιήθηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να

παραχθούν πρώτα όλες οι σφαίρες και ύστερα να αφαιρεθούν όλες μαζί από το δοκίμιο για την δημιουργία του τελικού τεμαχίου (Παράρτημα Γ).

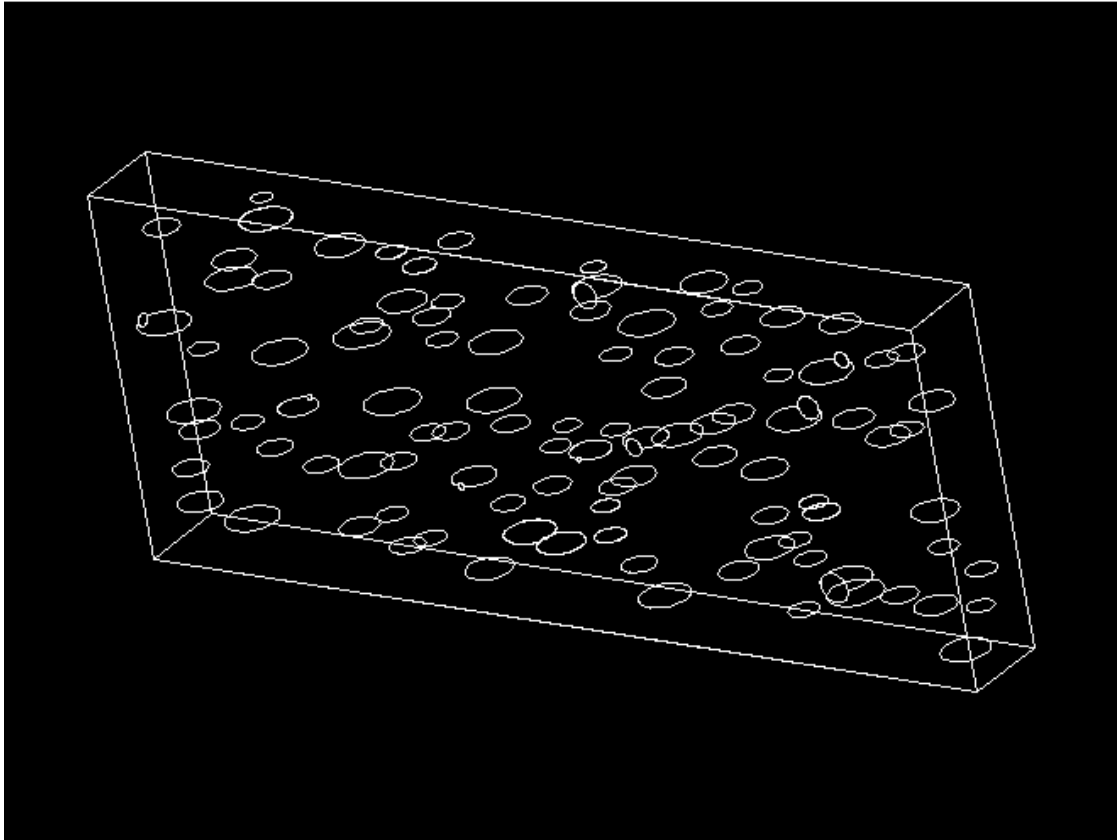
Με τον τρόπο αυτό παράχθηκε το δοκίμιο στην εικόνα 6.9 το οποίο δεν έχει τοποθετημένες τις σφαίρες εντός του για να αφαιρεθούν. Έτσι, με την ανάγνωση των τχταρχείων από τον κώδικα, γίνεται η παραγωγή όλου του πλήθους των σφαιρών που έχει τεθεί, χωρίς την ύπαρξη του blockπου θα σχηματιστεί στο τέλος (Εικόνα 6.7).



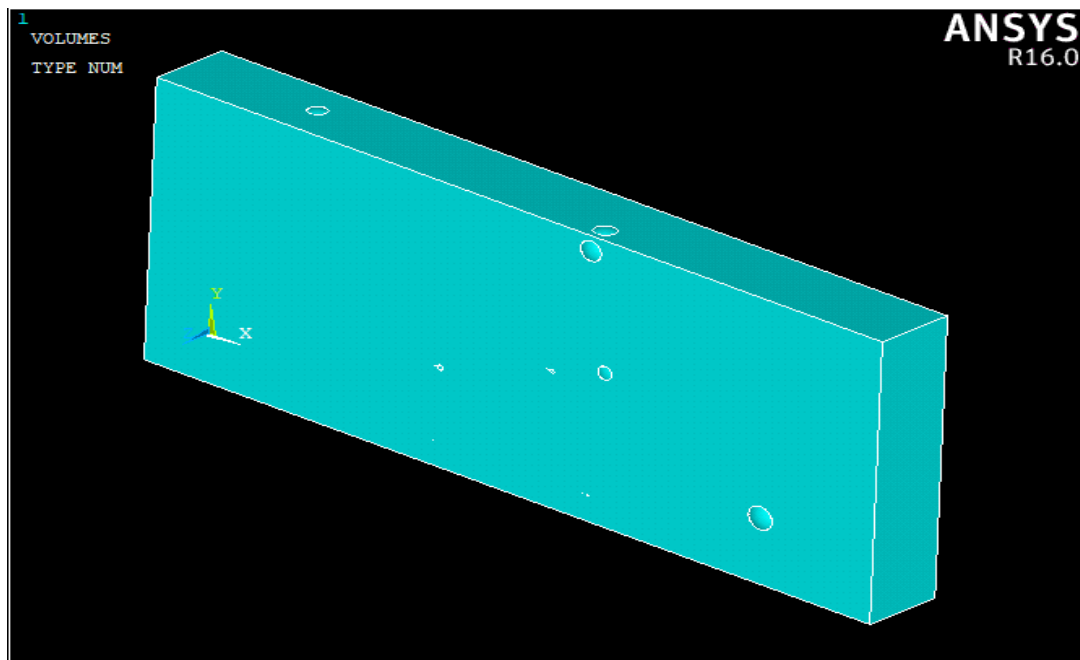
Εικόνα 6.7: Παραγωγή σφαιρών σε περιορισμένο όγκο που δεν έχει σχηματιστεί, διαστάσεων 50x20x5

Ύστερα από την παραγωγή των σφαιρών γίνεται και η δημιουργία του block, με αποτέλεσμα στην εικόνα 6.8 να εμφανίζονται οι αφαιρούμενες σφαίρες από το συμπαγές δοκίμιο.

Τέλος, από τις σφαίρες αυτές δημιουργείται ένα πορώδες που δίνει την τελική εικόνα ενός αφρού στο δοκίμιο (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.8: Απεικόνιση σφαιρών που έχουν αφαιρεθεί από το συμπαγές δοκίμιο



Εικόνα 6.9: Απεικόνιση τελικού προϊόντος με χαρακτηριστικά αφρού

6.4 Μηχανική Συμπεριφορά

Στη συνέχεια έγινε η μηχανική ανάλυση της τελικής γεωμετρίας με υλικό κράμα αλουμινίου της σειράς 6xxx (κράματα Al-Mg-Si) και συγκεκριμένα το 6061. Το πλεονέκτημα των κραμάτων της σειρά αυτής είναι η καλή του εφελκυστική ικανότητα και το γεγονός πως μπορούν να δεχθούν θερμικές κατεργασίες. Επίσης, παρουσιάζονται και τα στοιχεία κραμάτωσης του αλουμινίου αυτού κατά βάρος (Εικόνα 6.10).

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Zn	Ti	Mn	Remainder
95.85 - 98.56	0.8 - 1.2	0.40 - 0.8	0.0 - 0.7	0.15 - 0.40	0.04 - 0.35	0.0 - 0.25	0.0 - 0.15	0.0 - 0.15	0.05 each, 0.15 total

Εικόνα 6.10: Στοιχεία κραμάτωσης 6061 κατά βάρος (πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/6061_aluminium_alloy)

Έτσι, στην μηχανική συμπεριφορά της γεωμετρίας ορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας του υλικού το οποίο είναι τα 68000 MPa (Εικόνα 6.11). Επίσης, προσδιορίζεται και ο λόγος του Poissonστο 0.3 για το υλικό το οποίο επιλέχθηκε (Εικόνα 6.11).

Για να μπορέσει να γίνει η μηχανική ανάλυση του δοκιμίου θα πρέπει ο χρήστης να δημιουργήσει ένα πλέγμα με στοιχεία για να μπορέσει να προσεγγιστεί η γεωμετρία όσο το δυνατότερο σωστά. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο όσο πιο αναλυτικό είναι το πλέγμα τόσο μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς θα χρειαστεί ο χρήστης και περισσότερο χρόνο τρεξίματος για το πρόγραμμα. Για τον λόγο αυτό τέθηκε το μέγεθος του στοιχείου για το δοκίμιο στο 0.01 (Εικόνα 6.11), έτσι ώστε τα αποτελέσματα τα οποία θα παρθούν να είναι αντιπροσωπευτικά αλλά και ο χρόνος να είναι όσο το δυνατόν ο ελάχιστος δυνατός.

Ύστερα από τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού θέτουμε την πάκτωση στο αριστερό άκρο του δοκιμίου ($x=x_1$) περιορίζοντας τις μετακινήσεις σε όλους τους άξονες (Εικόνα 6.12). Στο άλλο άκρο ($x=x_2$) επιβάλλουμε μετατόπιση ίση με το 1% του μήκους του δοκιμίου ώστε η επιβαλλόμενη παραμόρφωση να είναι $\epsilon=1\%$ (Εικόνα 6.11). Από την ανάλυση υπολογίζουμε τις αντιδράσεις στον άξονα x στο πακτωμένο άκρο και έτσι υπολογίζουμε την τάση ($\sigma=F/A$), όπου F είναι η αντίδραση στο x και A το εμβαδόν της πακτωμένης επιφάνειας. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως $E=\sigma/\epsilon$.

```

! Modulus
MPDATA,EX,1,,68000

! Poisson's ratio
MPDATA,PRXY,1,,0.3

! Element size
!esize,0.01

! Meshing
vmesh,NN+2

allsel
save

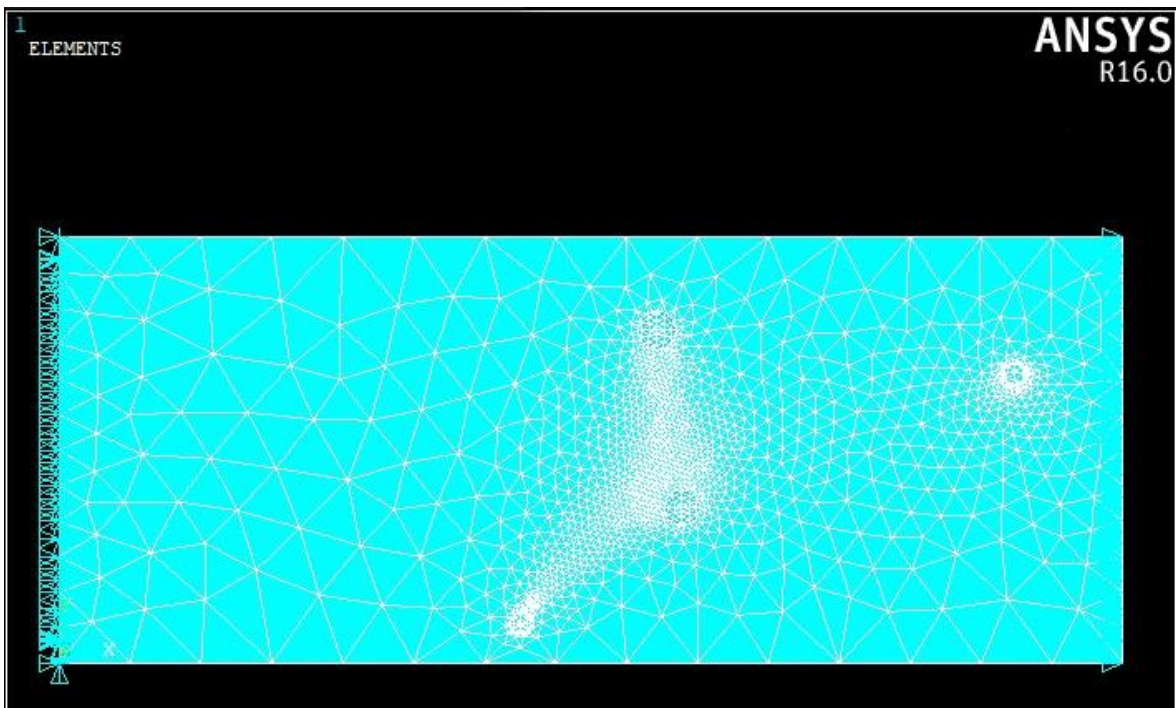
! Solution
/solu

! Fix all nodes at x=xx1
nset,s,loc,x,xx1
d,all,all,0

! Apply displacement (1% strain) at x=xx2
nset,s,loc,x,xx2
d,all,ux,0.01*(xx2-xx1)
!d,all,uy,0
!d,all,uz,0
allsel

```

Εικόνα 6.11: Κομμάτι του κώδικα με την τοποθέτηση των παραμέτρων για την Μηχανική Ανάλυση



Εικόνα 6.12: Πάκτωση τμήματος $x=x_1$ και εφαρμογή δύναμης στο σημείο $x=x_2$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η αναλυτική περιγραφή της παραγωγής των αποτελεσμάτων, η παρουσίαση των διαγραμμάτων του μέτρου ελαστικότητας και της μέγιστης τάσης σε σχέση με την πυκνότητα του δοκιμίου, όπως και τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα αυτά.

7.1 Αποτελέσματα Μηχανικής Ανάλυσης

Για την παραγωγή των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε να μεταβληθούν η ακτίνα των σφαιρών (r), η ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση που μπορεί να έχουν οι σφαίρες μεταξύ τους, καθώς και το πλήθος των σφαιρών (N). Έτσι, τα δεδομένα για τα οποία έγιναν συλλογή είχαν πλήθος σφαιρών από $N=40$ έως $N=90$, εύρος ακτίνας σφαιρών από $r=0.8$ έως $r=1.5$ και $r=1$ έως $r=1.4$, ενώ οι ελάχιστες αποστάσεις των σφαιρών ήταν $d_{\text{sphere}}=0.02, 0.04, 0.06, 0.08$ και 0.1 . Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 1) που εμπεριέχει τους συνδυασμούς οι οποίοι λειτούργησαν χωρίς κανένα πρόβλημα στην δημιουργία αποτελεσμάτων.

Πίνακας 1: Συνδυασμοί που λειτούργησαν χωρίς κανένα πρόβλημα στην δημιουργία αποτελεσμάτων

		r			
N	40	$r=0.8-1.5,$ $d_{\text{sphere}}=0.02,0.04,0.1$	$r=1-1.4, d_{\text{sphere}}=0.08$	$r=1.2(r<0.5), d_{\text{sphere}}=0.02$	$r=1.2$ $(r<0.999),$ $d_{\text{sphere}}=0.02$
	50	$r=0.8-1.5, d_{\text{sphere}}=0.04$	$r=0.8-1.5, d_{\text{sphere}}=0.02$	$r=1-1.4, d_{\text{sphere}}=0.08$	$r=1.2$ $(r<0.999),$ $d_{\text{sphere}}=0.02$
	60	$r=0.8-1.5, d_{\text{sphere}}=0.04$	$r=0.8-1.5, d_{\text{sphere}}=0.02$	-	-
	70	$r=0.8-1.5, d_{\text{sphere}}=0.04$	-	-	-
	80	$r=0.8-1.5, d_{\text{sphere}}=0.04$	-	-	-
	90	$r=0.8-1.5, d_{\text{sphere}}=0.04$	-	-	-

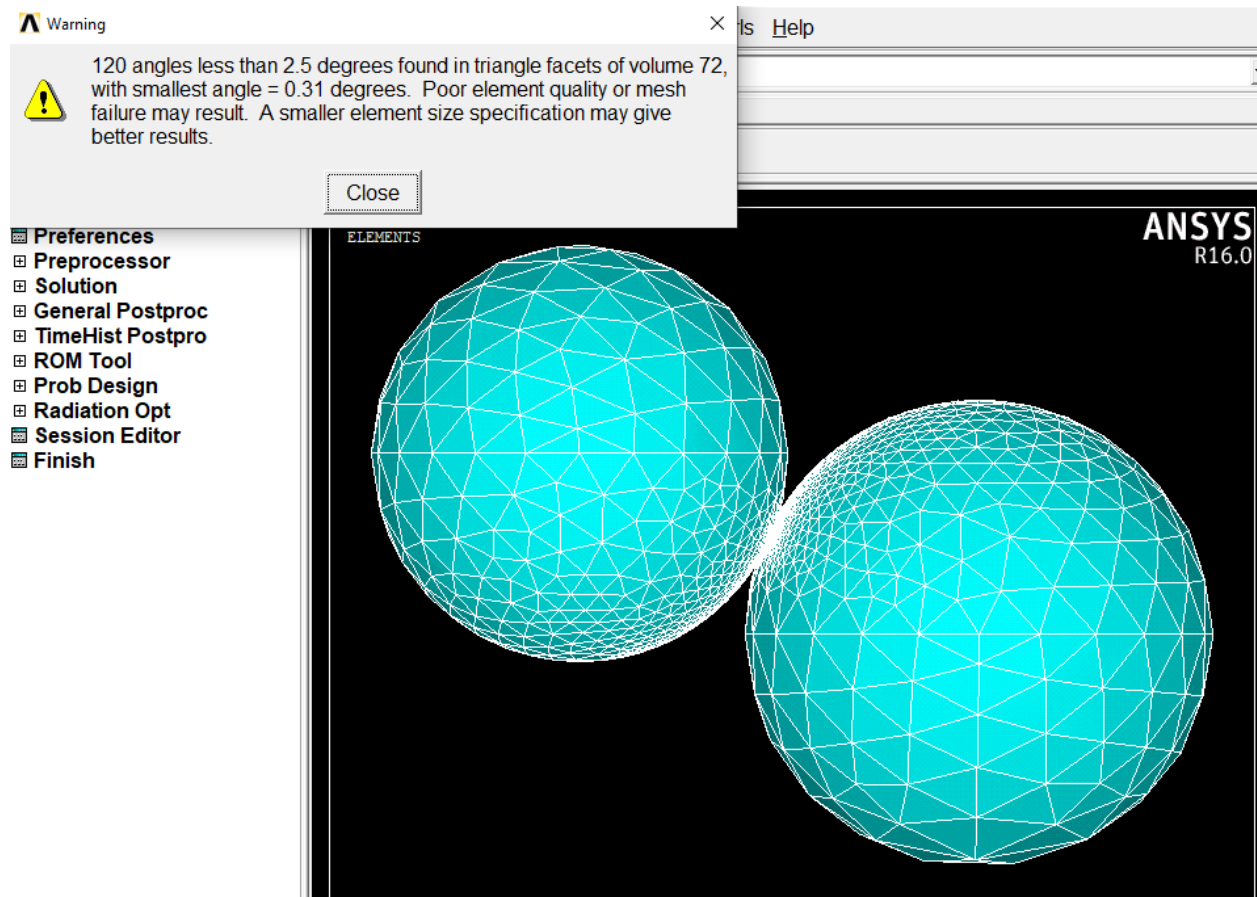
Επίσης, να σημειωθεί πως τα r εντός των παρενθέσεων (Πίνακας 1) είναι αναφορές που γίνονται κατά την διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος στο Matlab και έχει να κάνει με την ελάχιστη επιτρεπόμενη ακτίνα που μπορεί να δώσει ως αποτέλεσμα ο κώδικας στο Matlab ύστερα από την διόρθωση της ακτίνας που αναφέρει το Κεφάλαιο 6.

Πίνακας 2: Συνδυασμοί και αποτελέσματα συνδυασμών πριν την τελική τους μορφή

		N= 40		N= 50		N= 60		N= 70		N= 80		N= 90	
		F	ρ	F	ρ	F	ρ	F	ρ	F	ρ	F	ρ
1	r=0.8-1.5, d _{shpere} =0.02	64947	0.97	63626	0.96	62083	0.95						
	σ (stess)	649.47		636.26		620.83							
	E (Modulus)	64947		63626		62083							
2	r=0.8-1.5, d _{shpere} =0.04	63630	0.96	62473	0.95	61176	0.94	59680	0.93	58020	0.91	56215	0.90
	σ (stess)	636.3		624.73		611.76		596.8		580.2		562.15	
	E (Modulus)	63630		62473		61176		59680		58020		56215	
3	r=1-1.4, d _{shpere} =0.04	64196	0.96	63059	0.95								
	σ (stess)	641.96		630.59									
	E (Modulus)	64196		63059									
4	r=1-1.4, d _{shpere} =0.08	64576	0.97										
	σ (stess)	645.76											
	E (Modulus)	64576											
5	r=0.8-1.5, d _{shpere} =0.1	63230	0.96										
	σ (stess)	632.3											
	E (Modulus)	63230											
6	r=1.2, d _{shpere} =0.02	64117	0.97										
	σ (stess)	641.17											
	E (Modulus)	64117											
7	r=1.0 (rr<0.999), d _{shpere} =0.02	63463	0.96	62172	0.95								
	σ (stess)	634.63		621.72									
	E (Modulus)	63463		62172									

Με αφορμή τον Πίνακα 1, δημιουργήθηκαν τα αρχικά αποτελέσματα των συνδυασμών που λειτούργησαν σωστά στον Πίνακα 2 και επεξεργάστηκαν με τέτοιο τρόπο για την δημιουργία του Πίνακα 3 όπου χρειάστηκε για την δημιουργία των διαγραμμάτων.

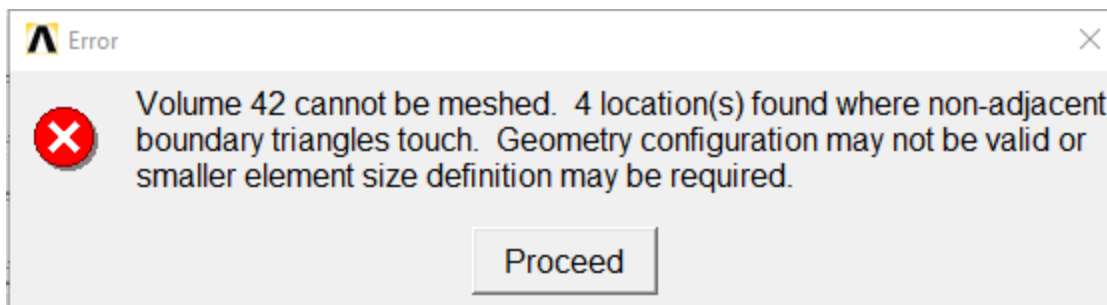
Έτσι, οι συνδυασμοί που δεν λειτούργησαν στο ANSYS είχαν παρουσιάσει σφάλματα μορφής γεωμετρίας κατά την διάρκεια της πλεγματοποίησης τα οποία δεν μπορούσαν να επιλυθούν ακόμα και με την αλλαγή του αριθμού των στοιχείων στο πλέγμα (Εικόνα 7.1).



Εικόνα 7.1: Σφάλμα αλλαγής γεωμετρίας κατά την πλεγματοποίηση του δοκιμίου

Το σφάλμα της Εικόνας 7.1 έχει μεταγενέστερη επίπτωση στα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης για αυτό τον λόγο το ANSYS το αναφέρει και ως "warning" αλλά όχι ως "error".

Επίσης, άλλη μορφή σφάλματος που εμφανίστηκε ήταν εκείνη της μη ανάγνωσης όγκου κατά την διαδικασία της πλεγματοποίησης (Εικόνα 7.2). Το συγκεκριμένο σφάλμα μπορεί να οφείλεται σε αποστάσεις σφαιρών που μπορεί να είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους αλλά και στο μέγεθος της ακτίνας των σφαιρών που συμπεριλαμβάνονται στην γεωμετρία αυτή.



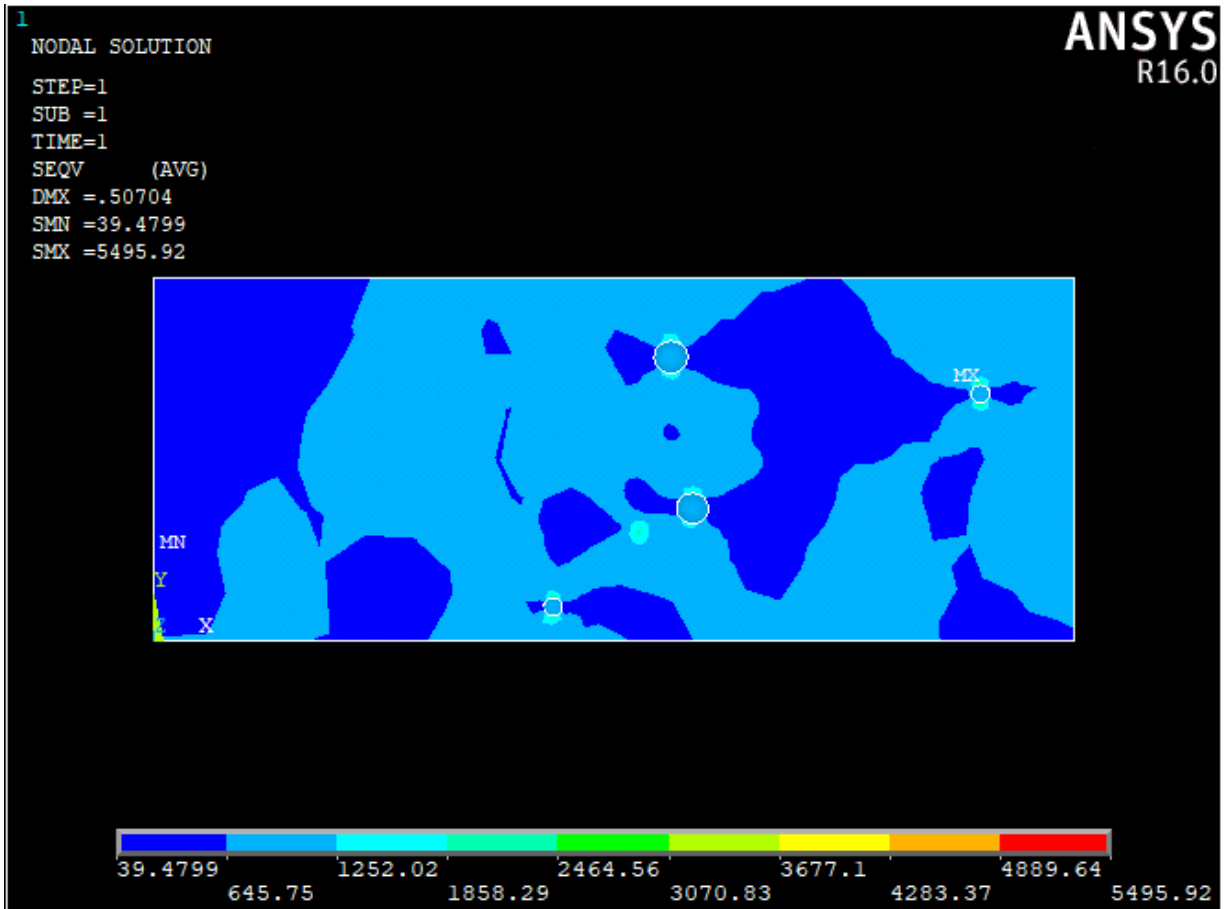
Εικόνα 7.2: Σφάλμα μη ανάγνωσης όγκου (ή και όγκων) λόγω της πλεγματοποίησης

Έτσι, για τους συνδυασμούς του Πίνακα 1 βρέθηκαν οι δυνάμεις που ασκήθηκαν στο δοκίμιο και υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας (E) του δοκιμίου καθώς και οι τάσεις των δοκιμίων για παραμόρφωση $\epsilon=0,01$ μέσω των τύπων $\sigma=F/A$ και $\sigma=E\epsilon$. Η εφελκόμενη διατομή έχει διαστάσεις 5×20 και εμβαδόν $A=100$. Επίσης, βρέθηκαν ο όγκος των δοκιμίων καθώς και οι ισοδύναμες τάσεις (Von Mises) των δοκιμίων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας αποτελεσμάτων των 17 δοκιμίων (Πίνακας 3).

Πίνακα 3: Πίνακας αποτελεσμάτων των δοκιμίων που λειτούργησαν

a/a	ρ	F (N)	σ (MPa)	E (MPa)	En	E/En	σ_{vm} (MPa)	σ_{vm}/σ_n	Ρσφαιρών
1	0.90	56215	562.15	56215	68000	0.83	54384.7	79.98	10.03%
2	0.91	58020	580.2	58020		0.85	4788.84	7.04	8.60%
3	0.93	59680	596.8	59680		0.88	4953.78	7.28	7.14%
4	0.94	61176	611.76	61176		0.90	5495.92	8.08	6.05%
5	0.95	62172	621.72	62172		0.91	22528.2	33.13	5.30%
6	0.95	62083	620.83	62083		0.91	38647.9	56.84	5.17%
7	0.95	62473	624.73	62473		0.92	56414.4	82.96	4.97%
8	0.95	63059	630.59	63059		0.93	6110.29	8.99	4.54%
9	0.96	63463	634.63	63463		0.93	22618.6	33.26	4.24%
10	0.96	63230	632.3	63230		0.93	4410.17	6.49	4.03%
11	0.96	63626	636.26	63626		0.94	40028.9	58.87	4.02%
12	0.96	63630	636.3	63630		0.94	5991.13	8.81	3.98%
13	0.96	64196	641.96	64196		0.94	6058.24	8.91	3.59%
14	0.97	64117	641.17	64117		0.94	39815.7	58.55	3.45%
15	0.97	64576	645.76	64576		0.95	3608.38	5.31	3.30%
16	0.97	64947	649.47	64947		0.96	42218.7	62.09	2.96%
17	1.00	68000	680	68000		1.00	680	1	0.00%

Επίσης, παρουσιάζονται και οι εικόνες που δείχνουν την διαφορά που εμφανίζεται στην κατανομή των τάσεων σε περιπτώσεις που είχαμε μικρή ή μεγάλη συγκέντρωση τάσεων (Εικόνα 7.3 και Εικόνα 7.4).



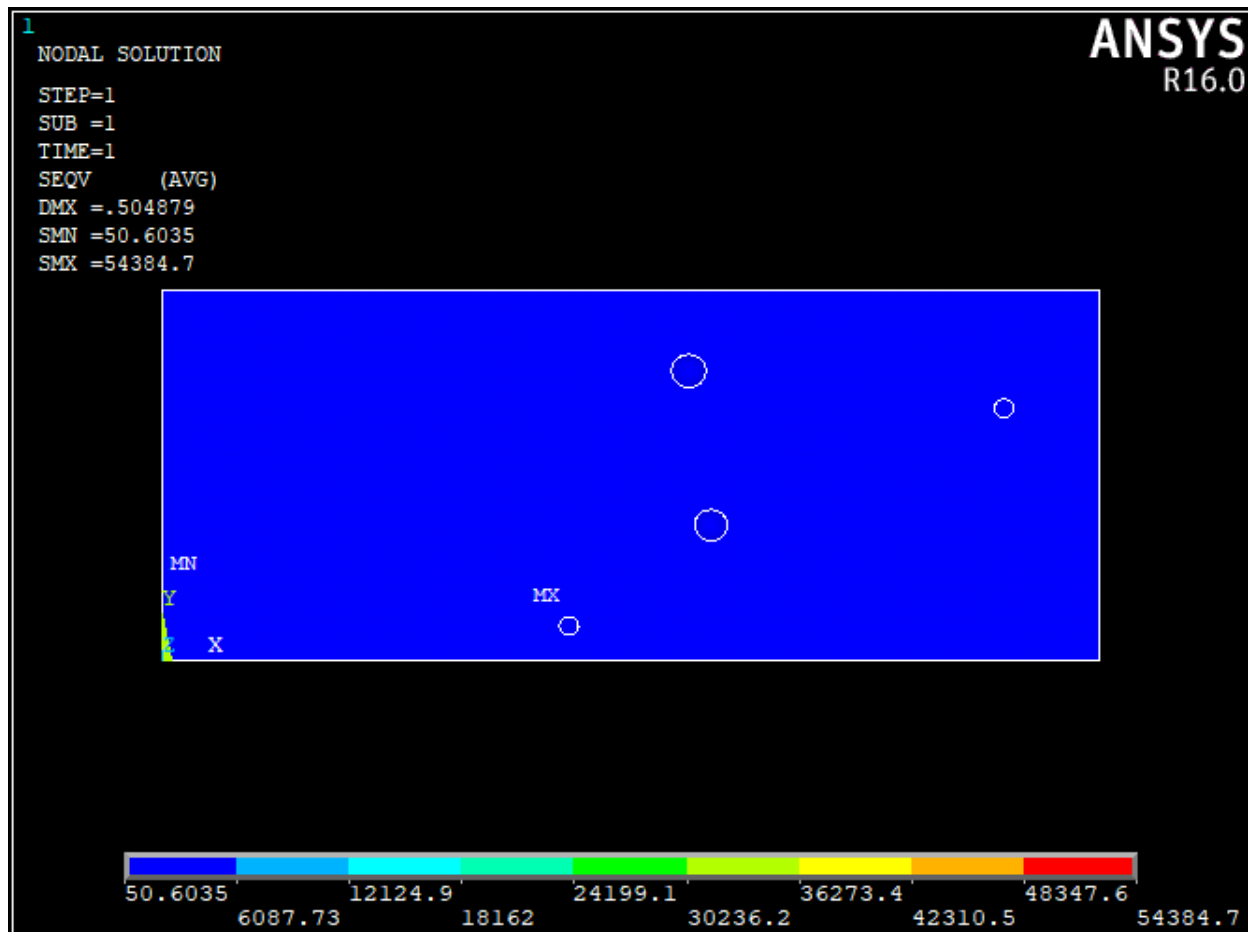
Εικόνα 7.3: Κατανομή τάσεων που δεν παρουσιάζουν υψηλές τιμές

Η διαφορά των εικόνων 7.3 και 7.4 μπορεί να οφείλεται στη κατανομή των σφαιρών σε σχέση με το εφαρμοζόμενο φορτίο και για αυτό τον λόγο να υπάρχουν τόσο μεγάλες διαφορές.

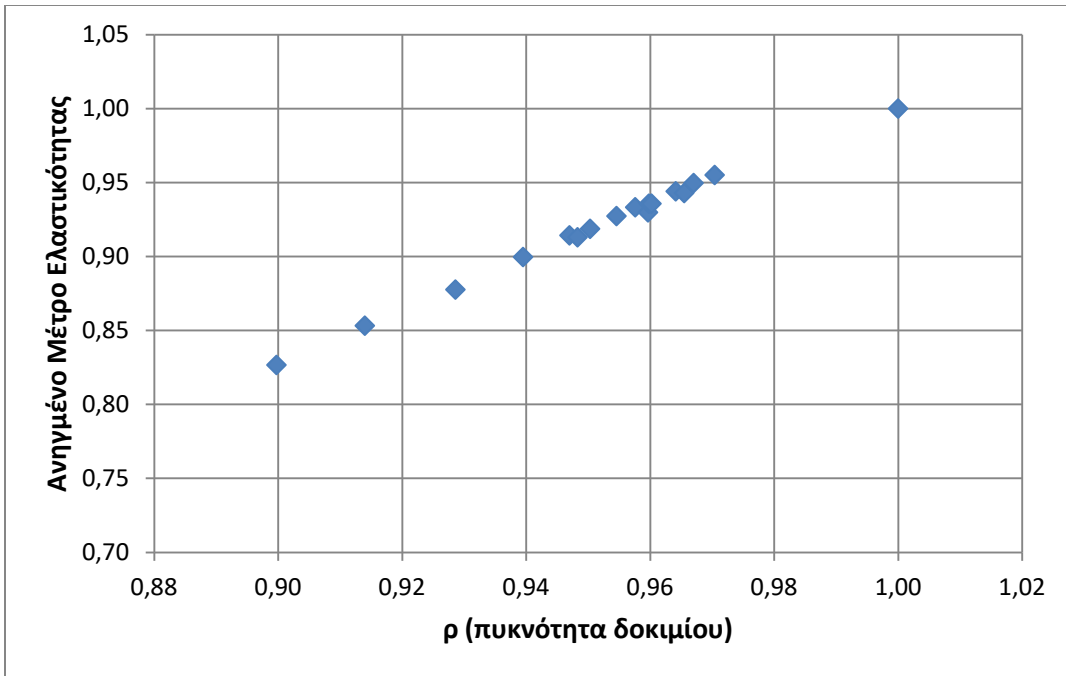
Χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 3 μπορούμε να εκφράσουμε σε αδιάστατη μορφή τόσο το μέτρο ελαστικότητας (Εικόνα 7.5) όσο και τις μέγιστες τάσεις (Εικόνα 7.6). Παρατηρούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την πυκνότητα του δοκιμίου. Αν και αυτό δεν είναι σε συμφωνία με τη συμπεριφορά πορωδών υλικών μπορεί να εξηγηθεί επειδή αναφέρεται σε πολύ μεγάλες πυκνότητες μόνο (μικρό πορώδες).

Στο διάγραμμα της Εικόνας 7.6 παρουσιάζεται μεγάλη μεταβολή στις μέγιστες τάσεις ανάλογα με τη γεωμετρία του δοκιμίου και όχι τόσο με την πυκνότητα. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην

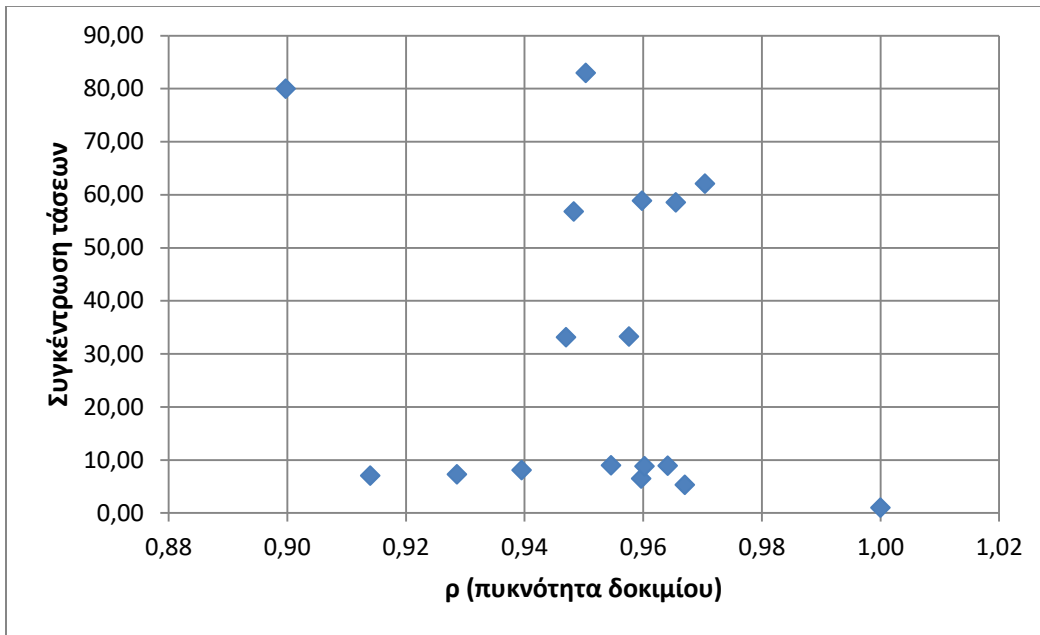
τυχαιότητα της κατανομής των οπών, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί τυχαία δύο οπές να βρεθούν πολύ κοντά και αυτό να οδηγήσει σε μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση είναι ελαστική, πράγμα που εξηγεί και τις μεγάλες τιμές της συγκέντρωσης τάσεων.



Εικόνα 7.4: Κατανομή τάσεων που παρουσιάζουν υψηλές τιμές



Εικόνα 7.5: Διάγραμμα Ανηγμένου μέτρου ελαστικότητας με την συνολική πυκνότητα του δοκιμίου



Εικόνα 7.6: Διάγραμμα συγκεντρωμένων τάσεων με τη συνολική πυκνότητα του δοκιμίου

7.2 Συμπεράσματα

Η μοντελοποίηση της κατανομής των οπών, όπως υπολογίστηκε από το Matlab, σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (όπως το ANSYS) παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα κυρίως όσο αυξάνεται η πυκνότητα των οπών. Η τυχαιότητα της κατανομής οδηγεί συχνά σε γεωμετρίες που απαιτούν πολύ καλύτερη πλεγματοποίηση με μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Για τους παραπάνω λόγους, οι αναλύσεις περιορίστηκαν σε σχετικά μεγάλες πυκνότητες του δοκιμίου.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι σε σχετικά μικρές πυκνότητες των οπών μπορεί να θεωρηθεί ότι η σχέση μεταξύ μέτρου ελαστικότητας και σχετικής πυκνότητας του υλικού είναι γραμμική. Το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίστηκε είναι γενικά μικρότερο από αυτό που μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον κανόνα μιγμάτων.

Δεν κατέστη δυνατό να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα για την σχέση μεταξύ των μέγιστων τάσεων και της πυκνότητας. Ο κύριος λόγος είναι η τυχαιότητα της κατανομής των οπών που οδηγεί τότε με μικρή και τότε σε μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Για να υπολογιστεί η αντοχή των δοκιμίων είναι αναγκαίο να γίνει μη γραμμική ανάλυση και μελέτη της διάδοσης βλάβης ή/και ρωγμών.

Παράρτημα Α – Κώδικας αλγορίθμου για το Matlab

```
clf
clear
a=6.1;
b=8.5;
% n number of spheres
n=350;
% radius of the sphere by using normal distribution
r=((b-a).*rand(n,1)) + a;
%x,y,z with uniform distribution
A1=[unifrnd(0,50,n,1),unifrnd(0,20,n,1),unifrnd(0,5,n,1)]
A2=[A1,r];
% density
r1=(r.^3)*4*pi./3;
density=sum(r1)
[x, y, z] = sphere;
%euclidian distance
k=pdist(A1)';
i=0;
reject=[];
reject1=zeros(n,5);
while i<=size(A1,1)-1
i=i+1;
    dist=sqrt(sum((A1(i:end,:)-repmat(A1(i,:),size(A1,1)-i+1,1)).^2,2));
    rad=0.1*r(i:end,1)+0.1*repmat(r(i,1),size(r,1)-i+1,1);
neig=dist(2:end,:)-rad(2:end,:)
if find(neig<0.05)
negativ=find(neig<0.05);
fprintf('%d\n',negativ,i);
reject=zeros(1,length(negativ)+2);
if length(negativ)<2
reject(1)=i;
reject(2:end)=negativ(1)
reject1(i,1)=reject(1);
reject1(i,2)=reject(2)+i;
ifneig>0
r(i)=r(i)-10*neig(negativ);
else
r(i)=r(i)+10*neig(negativ);
end
elseif length(negativ)==2;
    k=neig(neig<0.05);
reject(1)=i;
reject(2)=negativ(1)
reject(3)=negativ(2)
if k(1)*k(2)>0
r(i)=r(i)-10*max(abs(neig(negativ)));
```



```

else k(1)*k(2)<0
r(i)=r(i)-10*max(abs(neig(negativ)));
end
else length(negativ)>=3;
reject(1)=i;
reject(2)=negativ(1)
reject(3)=negativ(2)
reject1(i,1)=reject(1);
reject1(i,2)=reject(2)+i;
reject1(i,3)=reject(3)+i;
reject(4)=negativ(3)
reject1(i,1)=reject(1);
reject1(i,2)=reject(2)+i;
reject1(i,4)=reject(4)+i;
end
end
end
reject1
r
A=[A1,r];
m1=find(reject1(:,4)~=0);
m2=find(reject1(:,5)~=0);
A(m1,:)=[];
A(m2,:)=[];
A(A(:,4)<5.1,:)=[]
r2=(A(:,4).^3)*4*pi./3;
density=sum(r2)
[x, y, z] = sphere;
fori=1:size(A)
s1=surf(0.1*x*A(i,4)+A(i,1),0.1*y*A(i,4)+A(i,2),0.1*z*A(i,4)+A(i,3));
hold on
end
axis('tight')
T = array2table(A);
filename = 'spheresdata2.xlsx';
writetable(T,filename)

```

Παράρτημα Β – Πρώτος κώδικας αλγορίθμου μοντελοποίησης στο ANSYS

FINISH

/CLEAR,START

! Pre-processing

/PREP7

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Number of spheres

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

NN=3

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Arrays of spheres centers and radii

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*DIM,xx,array,NN

*DIM,yy,array,NN

*DIM,zz,array,NN

*DIM,rr,array,NN

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Read x,y,z, and r arrays

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*VREAD,xx(1),xx,txt

(F15.5)

*VREAD,yy(1),yy,txt

(F15.5)

*VREAD,zz(1),zz,txt

(F15.5)

```

*VREAD,rr(1),rr,txt
(F15.5)
! Original block corner points
xx1=0
xx2=1
yy1=0
yy2=1
zz1=0
zz2=1
! Create original block
BLOCK,xx1,xx2,yy1,yy2,zz1,zz2
! Boolean operations tolerance
btol,1e-4
! Loop
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,II,1,NN
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Set volume number to 1
NUMCMP,VOLU
! Create sphere at 0,0 with radius rr(II) = volume 2
SPH4,0,0,rr(II)
! Move above sphere by xx,yy,zz
VGEN,2,2,,,xx(II),yy(II),zz(II),,,1
! Cut volume 1 by volume 2
VSBV,1,2,,DELETE,DELETE

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*ENDDO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Set volume number to 1

NUMCMP,VOLU

! Element type

ET,1,SOLID285

!*

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

! Modulus

MPDATA,EX,1,,70000

! Poisson's ratio

MPDATA,PRXY,1,,0.3

! Element size

esize,1

! Meshing

vmesh,1

allsel

save

! Solution

/solu

```
! Fix all nodes at x=xx1
nset,s,loc,x,xx1
d,all,all,0
! Apply displacement (1% strain) at x=xx2
nset,s,loc,x,xx2
d,all,ux,0.01*(xx2-xx1)
d,all,uy,0
d,all,uz,0
allsel
! Solve
solve
! Post-processing
/post1
/dsc,1,1
plns,u,x
! Reaction forces
nset,s,loc,x,0
prsol
/eof
```

Παράρτημα Γ – Βελτιωμένος κώδικας αλγορίθμου μοντελοποίησης στο ANSYS

FINISH

/CLEAR,START

! Pre-processing

/PREP7

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Number of spheres

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

NN=3

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Arrays of spheres centers and radii

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*DIM,xx,array,NN

*DIM,yy,array,NN

*DIM,zz,array,NN

*DIM,rr,array,NN

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! Read x,y,z, and r arrays

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*VREAD,xx(1),xx,txt

(F15.5)

*VREAD,yy(1),yy,txt

(F15.5)

*VREAD,zz(1),zz,txt

(F15.5)

```

*VREAD,rr(1),rr,txt
(F15.5)
! Original block corner points
xx1=0
xx2=50
yy1=0
yy2=20
zz1=0
zz2=5
! Boolean operations tolerance
btol,1e-7
! Loop
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,II,1,NN
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Create sphere at 0,0 with radius rr(II) = volume II
SPH4,0,0,rr(II)
! Move above sphere by xx,yy,zz
VGEN,2,II,,xx(II),yy(II),zz(II),,,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Create original block NN+1
BLOCK,xx1,xx2,yy1,yy2,zz1,zz2

```

```
! Cut volume NN+1 by volumes
VSBV,NN+1,ALL,,DELETE,DELETE

! Element type
ET,1,SOLID285

!*

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

! Modulus
MPDATA,EX,1,,68000

! Poisson's ratio
MPDATA,PRXY,1,,0.3

! Element size
lesize,0.01

! Meshing
vmesh,NN+2

allsel

save

! Solution
/solu

! Fix all nodes at x=xx1
nsel,s,loc,x,xx1

d,all,all,0

! Apply displacement (1% strain) at x=xx2
nsel,s,loc,x,xx2

d,all,ux,0.01*(xx2-xx1)
```



```
!d,all,uy,0
!d,all,uz,0
allsel
! Solve
solve
! Post-processing
/post1
/dsc,1,1
plns,u,x
! Reaction forces
nsel,s,loc,x,xx1
prsol
/eof
```

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aluminium Foam Catrin Kammer Goslar Germany FraunhoferInstitute for Applied Materials Research J. Banhart, J Banmeister.
2. Amir H. Roohi, H. Moslemi Naeini, M. Hoseinpour Gollo, M. Soltanpour και M. Abbaszadeh , “ On the random-based closed-cell metal foam modeling and its behavior in laser forming process ”
3. Ashby M. F., 1983, The Mechanical Properties of Cellular Solids, Metallurgical Transactions 14A., pp. 1755-1769.
4. Ashby M.A, Evans A, Fleck N, Gibson L, Hutchinson J, Wadley H. (2000). Metal foams, a design guide. Elsevier. Burlington.
5. Ashby M.F, Hutchinson J.W, Evans A.G., A Design Guide: Cambridge University Press. Cambridge. UK., 1998.
6. Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley, 2000, H.N.G, Metal Foams: A Design Guide. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
7. ASM International Handbook Committee, 1988, ASM Handbook, Powder Metal Technologies and Applications, Volume 7, ASM International, Metals Park.
8. Babcs’an N, Leitmeier D, Banhart J., Metal foams-High temperature colloids Part 1. Ex situ analysis of metal foams. A Hahn-Meitner Institute, Department of Materials Science, Glienicker, Berlin, Germany, 2004.
9. Banhart J. (2000). Production Methods for Metallic foams. Institute for Applied Materials Research. Jom, 22-27.
10. Banhart, J., 2001, Manufacture Characterization and Application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science 46., pp. 559-632.
11. Bedyk, J.C. (2002). Production and Application of Aluminium foam, Past Product Potential Revisited in the New Millennium– Light Metal Age, 24- 29.
12. Catrin Kammer, 1999, Aluminum foam, EAA – European Aluminum Association, Goslar, Germany.

13. Conde Y., Despois J.F., Goodall R., Marmottant A., Salvo L., San Marchi C., Mortensen A., 2006, Replication processing of highly porous materials, *Adv Eng Mater* 8, pp. 795-803.
14. Degischer, B. Kriszt, 2002, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing Application*, Wiley-VCH, Germany.
15. Figliola R, Beasley D. (2000). *Theory and design for Mechanical Measurements*, John Wiley and sons, New York.
16. Gergely V, Clyne B. (2000). *The Formgrip Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors*.
17. Gergely V, Simancik F, Matthams T.J, Clyne T.W. (1999). *Preparation of Ceramic/Metal Foam Laminates Using an In Situ Foaming Technique*, in *12th International Conference on Composite Materials*. Paris, Woodhead, Cambridge, 589.
18. Gibson L.J., Ashby M.F., 1997 *Cellular solids, structure and properties*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge University press.
19. Goodall R. and Mortensen A., 2013, *Porous Metals*, Chapter 26 of *Physical Metallurgy Fifth Edition*, Elsevier, Amsterdam.
20. Guner et al. (2015). *New Approaches to Aluminum Integral Foam Production with Casting Methods*. *Metals*. 5, 1553-1565.
21. H. B. Gray, " *Chemical Bonds: An Introduction to Atomic and Molecular Structure*", University Science Books, Mill Valley USA, 1994.
22. J. Martin, *Materials for Engineering*, 3rd Edition, 2006.
23. Kheradmand B, Otraj S, Soleimanpour Z, Beigyfar M. (2013). *Comparison between methods used for manufacturing of aluminum foam*. *Life Science Journal*. 10 (1).
24. Koch A, Thompson M, Nardone V. (1994). *Proceedings 4th International Conference on Aluminum Alloys*. Atlanta. GA, 387.
25. Kunwoo Lee, *Principles of CAD/CAM/CAE*, Seoul National University, United States Edition, 1999
Laughlin D., Hono K., 2013, *Porous Metal*, *Physical Metallurgy*, 5th ed., Elsevier, Amsterdam.

26. Michailidis N., Stergioudi F., Omar H., Tsipas D.N., 2010, An image-based reconstruction of the 3D geometry of an Al open-cell foam and FEM modeling of the material response, *Mech Mater* 42, pp. 142-147.
27. Papadopoulos D.P., Omar H., Stergioudi F., Tsipas S.A., Michailidis N., 2011, The use of dolomite as foaming agent and its effect on the microstructure of aluminum metal foams -ii Comparison to titanium hydride, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 382, pp. 118-123.
28. Shapovalov V.I., Withers J.C. (2008). Hydrogen technology for porous metals (Gasars) production. Withers aterials and Electrochemical Research Corporation. Tucson, USA.
29. Shinko wire Co. (1997). Alporas Data Sheets, Amagasaki-shi, Japan. Yaniv S.L, Acoust J. (1973). *Soc. Am.* 54, 1138.
30. Sobczak J. (2003). High porosity media for transportation. *Journal of kones Internal Combustion Engines*.
31. Sugimura Y, Meyer J, He M, Bart Smith H, Grenestedt J.L, Evans A.G. (1997).
32. Topin F. Bonnet J-P. Madani B. Tadrist L. (2006). Experimental Analysis of Multiphase Flow in Metallic foam: Flow Laws, Heat Transfer and Convective Boiling. *Advanced Engineering Materials* 8 (9): 890.
33. Wiliam F. Gale, Terry C. Totemeier, Smithells Metals Reference book, 8th Edition, 2003.
34. William D. Callister, Jr. David G. Retwisch, 9th Edition, *Fundamentals of Materials Science and Engineering* (2015).
35. Yang B., Wang Y.Q., Zhou B.L., 1998, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol.27B, pp.635.
36. Yu C-J, Eifert H. (1998). Metal foams. *Advanced Materials & processes Mepura Alulight*. Metall pulver GmbH. Brannau, Ranshofen, Austria, 45- 47.
37. Αφρός αλουμινίου. Retrieved from <http://users.uoi.gr/> .
38. Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008.
39. Ε. Ν. Οικονόμου, *Η Φυσική Σήμερα ΙΙ. Οι δέκα κλίμακες της ύλης*, 3η έκδοση, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 1995.
40. Ζ. Λοΐζος, *Γενική Χημεία*, τεύχος 1: Γενικό μέρος, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2013.

41. Παπαδόπουλος Δ., 2004, Μεταλλικοί Αφροί, Στρατιωτική Επιθεώρηση, σ. 140-154.