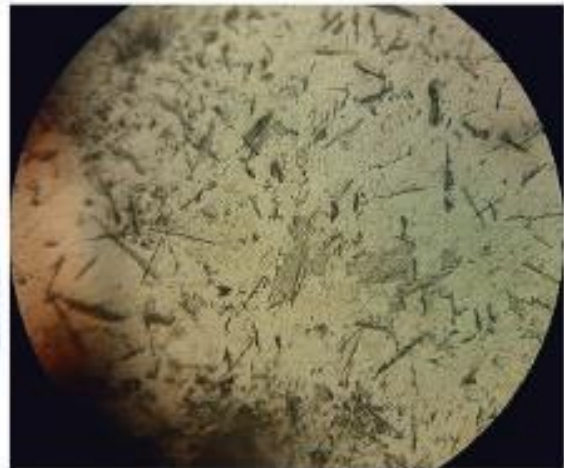
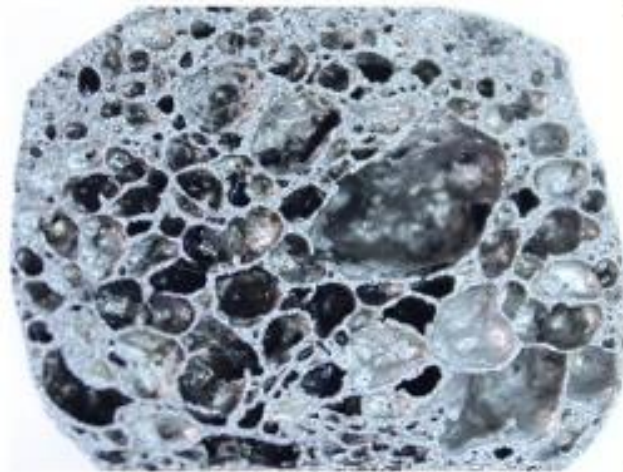




Διπλωματική εργασία:

Ενίσχυση Αφρών Αλουμινίου με ανοξείδωτες Νιφάδες Χάλυβα

[Steel flakes reinforced aluminium foams]



Προπτυχιακός φοιτητής:

Λουρίδας Αλκιβιάδης

ΑΜ: 02104071

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Διπλωματική εργασία:

**Ενίσχυση Αφρών Αλουμινίου με ανοξείδωτες Νιφάδες
Χάλυβα**

[Steel flakes reinforced aluminium foams]

Προπτυχιακός φοιτητής:

Λουρίδας Αλκιβιάδης

ΑΜ: 02104071

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία και το πειραματικό μέρος αυτής, εκπονήθηκαν στα πλαίσια ευρύτερης έρευνας και μελέτης των ιδιοτήτων και των εφαρμογών των μεταλλικών αφρών, που διεξάγεται στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Για την εκπόνηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας αλλά και την υποστήριξή του, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Μανωλάκο Δημήτριο, Καθηγητή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, από τον οποίο και μου ανατέθηκε η διεκπεραίωση της, παρέχοντας μου με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα έντονου επιστημονικού ενδιαφέροντος, που ερευνάται και εξελίσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια.

Στη συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ιωάννη Παπαντωνίου, που υπήρξε άψογος καθοδηγητής, συνεργάτης αλλά και φίλος από την έναρξη, έως το πέρας της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας, που με εύστοχες και καίριες συμβουλές και παρατηρήσεις, βοήθησε στην ευκολότερη διεξαγωγή της εργασίας αυτής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλο το Τεχνικό Προσωπικό του Εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για την πολύτιμη βοήθεια σε κάθε στάδιο των πειραμάτων, με τον χειρισμό των αναγκαίων μηχανημάτων και εργαλείων, την άμεση παροχή κάθε εργαστηριακής πληροφορίας και υποστήριξης που χρειάστηκα, και συνολικά το καλό και ευχάριστο κλίμα που υπήρχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας.

*Αθήνα, Φεβρουάριος 2019
Λουρίδας Αλκιβιάδης*

Περίληψη

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά, αποτελούν μια κατηγορία μη τοξικών και ανακυκλώσιμων υλικών, τα οποία γνωρίζουν σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των πολύ σημαντικών ιδιοτήτων τους σε σχέση με τα συμβατικά μέταλλα. Διαθέτουν: σχετικό χαμηλό βάρος μεγάλων κατασκευών, ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, απόσβεση κραδασμών κ.α. Πολλές ερευνητικές προσπάθειες διεξάγονται διαρκώς για παραγωγή μεταλλικών αφρών υψηλών προδιαγραφών, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης σε διάφορους τομείς, όπως την αυτοκινητοβιομηχανία, τη μηχανολογία, την βιομηχανία των χημικών και αλλού.

Η κονιομεταλλουργία είναι μια ελκυστική μέθοδος για την παραγωγή μεταλλικών αφρών. Η αφροποίηση είναι μια αρκετά γρήγορη διαδικασία. Ωστόσο, η γρήγορη αφροποίηση και (ακολουθώντας) η κατάρρευση του αφρού, καθιστούν δύσκολη την αναπαραγωγή ομοιόμορφων πορώδων δομών. Αυτό έχει ωθήσει τους ερευνητές να βρουν βοηθητικούς παράγοντες που θα ενισχύσουν τη δομή των μεταλλικών αφρών.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσθήκη νιφάδων χάλυβα, ως σταθεροποιητικών-ενισχυτικών παραγόντων, στην παραγωγή μεταλλικών αφρών με χρήση κονιομεταλλουργίας, με στόχο την παρατήρηση και την διεξαγωγή ορισμένων αρχικών συμπερασμάτων καθώς πρόκειται για ένα μάλλον, νέο πεδίο που δεν έχει λάβει ακόμα εκτεταμένη έρευνα.

Πιο αναλυτικά, στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε ανάμιξη κόνεων αλουμινίου (99,4 % κ.β Al) με αφριστικό παράγοντα, υδρίδιο του τιτανίου (0,6 % κ.β TiH₂). Με σταθερή αυτή την αναλογία (Al-TiH₂), προστέθηκαν σε διάφορες αναλογίες οι νιφάδες χάλυβα. Μετά ακολουθήθηκε μέθοδος κονιομεταλλουργίας για παραγωγή διαφορετικής σύστασης δοκιμίων με πορώδες. Στα δοκίμια, επιβλήθηκαν κατεργασίες, τόσο πριν, για προετοιμασία, όσο και μετά την αφροποίηση τους, για τη διαμόρφωση κατάλληλων επιφανειών ώστε να είναι δυνατή η μελέτη τους. Τέλος, για πιο ολοκληρωμένη μελέτη των χαρακτηριστικών (χρόνοι αφροποίησης, μέγεθος πόρων, κ.λπ.) των διογκωμένων δοκιμίων, συλλέχθηκε πληθώρα φωτογραφικού και βιντεοσκοπημένου υλικού υψηλής ανάλυσης, καθ' όλη τη διεξαγωγή του πειράματος, το οποίο στη συνέχεια αναλύθηκε με κατάλληλο λογισμικό. Από την ανάλυση αυτού του υλικού συλλέχθηκαν αρκετά δεδομένα και δημιουργήθηκαν διαγράμματα που μελετούν τη συμπεριφορά της αφροποίησης σε διαφορετικές συνθήκες.

Abstract

Porous metals, or metallic foams, are a category of non-toxic and recyclable materials, which have been experiencing significant development in recent years because of their very important properties relative to conventional metals. They have: relatively low weight of large structures, energy absorption capacity, vibration damping, sound insulation capacity, non-flammable, etc. Numerous research efforts are being carried out around the world to produce high quality metal foams due to their ever-increasing applications in various sectors, such as the automotive, mechanical, chemical and other industries.

Powder metallurgy is an attractive method for producing metal foams. The foaming process is fast enough, and the foam density and structure changes rapidly over time. However, the rapid process of foaming and material collapse, makes it difficult to reproduce a porous of stable structure, which is a negative feature in the production of metal foams. This last point has prompted researchers to find auxiliary agents that will enhance the structure of metallic foams.

The object of this diploma thesis was the addition of stabilizing - reinforcing agents (steel flakes) to the production of metal foams using powder metallurgy, with the aim of observing and carrying out some initial conclusions as it is a rather new field (reinforcing of metallic foams with steel flakes) that still has not extensive research nor extensive bibliography.

More specifically, aluminum powder (99.4% w/w Al) was mixed with titanium hydride foaming agent (0.6% w/w TiH₂) in the experimental process. With constant this ratio (Al-TiH₂), steel flakes were added in various proportions. Then a powder metallurgy method was used to produce metallic foams of different compositions. In the samples, treatments were done, both before for their preparation, as well as after their foaming, to form suitable surfaces for their study. Finally, for a more complete study of the characteristics (foam times, pore size, etc.) of swollen samples, a lot of photographic and video high resolution material was collected throughout the experiment, which was then analyzed with appropriate software. Several data were collected from the analysis of this material and diagrams were developed to study the behavior of foaming in different conditions.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	iii
Abstract.....	v
Περιεχόμενα	vii
Ευρετήριο Εικόνων.....	xi
Ευρετήριο Διαγραμμάτων	xvii
Ευρετήριο Πινάκων.....	xx
A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
1 Κεφάλαιο 1 : Πορώδη Μεταλλικά Υλικά κ Μεταλλικοί Αφροί.....	1-1
1.1 Εισαγωγή.....	1-1
1.2 Μεταλλικοί Αφροί.....	1-4
1.3 Ιστορική αναδρομή στην έρευνα και ανάπτυξη μεταλλικών αφρών	1-5
1.4 Χαρακτηριστικά των μεταλλικών αφρών	1-7
1.5 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και χρήση των μεταλλικών αφρών	1-9
2 Κεφάλαιο 2 : Τεχνολογίες Παραγωγής και Κατεργασίες των Μεταλλικών Αφρών	2-1
2.1 Γενικές αρχές στην παραγωγή μεταλλικών αφρών	2-1
2.1.1 Παραγωγή μεταλλικών αφρών από τηγμένο μέταλλο.....	2-1
2.1.2 Παραγωγή μεταλλικών αφρών από σκόνη μετάλλου.....	2-3
2.1.3 Παραγωγή μεταλλικών αφρών από ατμό ή ιόντα μετάλλων.....	2-4
2.2 Μέθοδοι παραγωγής μεταλλικών αφρών.....	2-5
2.2.1 Μέθοδοι χύτευσης	2-5
2.2.1.a Η τεχνολογία Alcan/Norsk.....	2-5
2.2.1.b Η τεχνολογία Alporas.....	2-6
2.2.1.c Η τεχνολογία Gasar.....	2-7
2.2.1.d Χύτευση δύο σταδίων – Duocel.....	2-9
2.2.1.e Δημιουργία τρισδιάστατης δικτυωτής δομής.....	2-10
2.2.1.f Δημιουργία μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους.....	2-11

2.2.2	Μέθοδοι κονιομεταλλουργίας (PM, Powder Metallurgy)	2-12
2.2.2.a	Τεχνολογία παραγωγής IFAM.....	2-15
2.2.2.b	Τεχνολογία παραγωγής MEPURA.....	2-15
2.2.2.c	Παραγωγή αφρού με πολύπλοκο σχήμα	2-18
2.2.2.d	Τεχνολογίες παραγωγής που χρησιμοποιούν παγιδευμένο αέριο	2-18
2.2.2.e	Τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών με πυροσυσσώματωση.....	2-19
2.2.3	Μέθοδοι εναπόθεσης μετάλλου	2-21
2.2.4	Χημική εναπόθεση ατμών (CVD).....	2-23
2.3	Κατεργασίες μεταλλικών αφρών	2-25
2.3.1	Συγκόλληση με laser	2-26
2.3.2	Συγκόλληση με τόξο TIG/MIG.....	2-27
2.3.3	Flow drilling	2-28
2.3.4	Κοπή με laser.....	2-28
2.3.5	Κοπή με jet νερού	2-28
3	Κεφάλαιο 3 : Ιδιότητες και Εφαρμογές Μεταλλικών Αφρών	3-1
3.1	Γενικά	3-1
3.2	Ιδιότητες μεταλλικών αφρών.....	3-1
3.2.1	Φυσικές ιδιότητες μεταλλικών αφρών.....	3-3
3.2.2	Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών αφρών	3-4
3.3	Εφαρμογές μεταλλικών αφρών	3-7
3.3.1	Κατασκευαστικές εφαρμογές	3-9
3.3.1.a	Βιομηχανία αυτοκινήτων.....	3-9
3.3.1.b	Αεροδιαστημική βιομηχανία	3-11
3.3.1.c	Ναυπηγική.....	3-12
3.3.1.d	Οικοδομικές και κτιριακές κατασκευές	3-12
3.3.1.e	Μηχανολογικά δομικά στοιχεία.....	3-13
3.3.2	Λειτουργικές εφαρμογές.....	3-13
3.3.2.a	Αποσβεστήρες	3-13
3.3.2.b	Φίλτρα	3-14
3.3.2.c	Φλογοπαγίδες.....	3-15
3.3.2.d	Βιοϊατρικά εμφυτεύματα.....	3-16

3.3.2.e	Εναλλάκτες θερμότητας	3-16
3.3.2.f	Καταλύτες	3-17
3.3.2.g	Ηλεκτρόδια.....	3-18
3.3.2.h	Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	3-19
4	Κεφάλαιο 4 : Χαρακτηρισμός Μεταλλικών Αφρών	4-1
4.1	Δομικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αφρών	4-1
4.2	Χαρακτηρισμός των κυψελοειδών μεταλλικών υλικών	4-5
4.2.1	Καταστροφικές μέθοδοι	4-5
4.2.1.a	Παρατήρηση μορφολογίας	4-6
4.2.1.b	Ανάλυση επιφανειακής παραμόρφωσης.....	4-6
4.2.1.c	Δοκιμή σε θλίψη.....	4-6
4.2.1.d	Μέτρηση αντοχής σε διάβρωση.....	4-7
4.2.2	Μη καταστροφικές μέθοδοι.....	4-7
4.2.2.a	Μέτρηση σχετικής πυκνότητας	4-8
4.2.2.b	Μέθοδος εμποτισμού με χρώμα	4-9
4.2.2.c	Ραδιογραφία και ραδιοσκοπία με ακτίνες-Χ.....	4-9
4.2.2.d	Τομογραφία με ακτίνες-Χ.....	4-9
4.2.2.e	Έλεγχος με αισθητήρες ρεύματος δίνης.....	4-10
4.2.2.f	Μέτρηση της απορρόφησης ήχου.....	4-11
4.2.2.g	Μέτρηση της ελαστικότητας με ταλάντωση	4-12
5	Κεφάλαιο 5 : Σύνθετοι και Νανοσύνθετοι Μεταλλικοί Αφροί.....	5-1
5.1	Εισαγωγικά.....	5-1
5.1.1	Επισκόπηση ιδιοτήτων και εφαρμογών μεταλλικών αφρών.....	5-1
5.1.2	Ανάπτυξη και μελέτη μεθόδων για ενίσχυση των μεταλλικών αφρών	5-2
5.2	Σύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με κεραμικά σωματίδια	5-4
5.2.1	Προσθήκη κεραμικών σωματιδίων με τεχνικές άμεσης αεροποίησης	5-5
5.2.2	Προσθήκη κεραμικών σωματιδίων με μεθόδους κονιομεταλλουργίας	5-7
5.3	Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί.....	5-13
5.3.1	Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με κεραμικά σωματίδια ...	5-14
5.3.2	Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με CNTs.....	5-15
5.3.3	Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με κεραμικές ίνες	5-24

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ
6 Κεφάλαιο 6 : Διεξαγωγή Πειραματικής Διαδικασίας.....	6-1
6.1 Εισαγωγή.....	6-1
6.2 Η μέθοδος της κονιομεταλλουργίας	6-1
6.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας	6-2
6.3.1 Στάδιο των αποφάσεων	6-3
6.3.2 Στάδιο υπολογισμών	6-4
6.3.3 Στάδιο εκτέλεσης πειραματικών διαδικασιών	6-6
7 Κεφάλαιο 7 : Τα αποτελέσματα του πειράματος	7-1
7.1 Εισαγωγή.....	7-1
7.2 Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	7-1
7.2.1 Αφροποίηση των δοκιμίων	7-1
7.2.2 Κοπή και ηλεκτροδιάβρωση των δοκιμίων	7-41
7.2.3 Παρατήρηση δοκιμίων στο οπτικό μικροσκόπιο	7-71
7.3 Συμπεράσματα	7-96
7.4 Προτάσεις.....	7-98
Βιβλιογραφία

Ευρετήριο Εικόνων

1.1.1	Αποψη της δομής του εσωτερικού του τοιχώματος μίσχου νούφαρον [118]	1-2
1.1.2	Διατομή εσωτερικού φύλλου σε μικροσκόπιο SEM [119].....	1-2
1.1.3	Τομή της εσωτερικής δομής ενός αγκαθιού σκαντζόχοιρου [120]	1-3
1.1.4	Κελιά ανοικτού (αριστερά) και κλειστού τύπου (δεξιά) [121]	1-3
1.2.1	Μεταλλικός αφρός από αλουμίνιο [122].....	1-4
1.3.1	Πατέντα που απονεμήθηκε στον Sosnicki (1951) για παραγωγή «σπογγώδους μετάλλου». [9].	1-5
1.4.1	Δομή τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου [123]	1-8
1.5.1	Αφροί "σάντουιτς", από μεθόδους κονιομεταλλουργίας, για διάφορες εφαρμογές [124]	1-11
2.1.1.1	Παραγωγή μεταλλικού αφρού με χύτευση σε καλούπι από πολυμερικό αφρό. [7]	2-2
2.1.1.2	Παραγωγή μεταλλικού αφρού με χύτευση γύρω από σφαιρικά σωματίδια. [7].....	2-3
2.1.3.1	Διαδικασία εναπόθεσης ιόντων για την παραγωγή μεταλλικού αφρού. [7]	2-4
2.2.1.a.1	Παραγωγή μεταλλικού αφρού με τεχνολογία Alcan/Norsk Hydro [7]	2-6
2.2.1.b.1	Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής Alporas [125]	2-7
2.2.1.b.2	Δείγμα αφρού αλουμινίου παραγόμενου με τη μέθοδο Alporas [8].....	2-7
2.2.1.c.1	Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας Gasar [126].....	2-8
2.2.1.d.1	Μεταλλικός αφρός Duocel με κυψελοειδή ανοικτή δομή [127].....	2-10
2.2.1.e.1	Τετραεδρικό πλέγμα με δικτυακή δομή από χύτευση σε πολυμερικό πρότυπο [128].....	2-11
2.2.1.f.1	Απεικόνιση της μεθόδου παρασκευής μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους. [21]	2-12
2.2.1.f.2	Διεπιφάνεια μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικού πορώδους. [21].....	2-12
2.2.2.1	Μορφολογία δοκιμίου AlSi7σε διαφορετικά στιγμιότυπα της αφροποίησης [22]	2-14
2.2.2.a.1	Παραγωγή αφρού αλουμινίου με χρήση της τεχνολογίας IFAM [129].....	2-15
2.2.2.b.1	Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία MEPUA. [9].....	2-16
2.2.2.b.2	Σωλήνες γεμισμένοι με αφρό αλουμινίου. [24]	2-16
2.2.2.b.3	Πολυστρωματικό πάνελ αλουμινίου [130].....	2-17
2.2.2.b.4	Πάνελ τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου. [7].....	2-17
2.2.2.c.1	Απεικόνιση παραγωγής πολύπλοκων τεμαχίων μεταλλικών αφρών. [7].....	2-18
2.2.2.d.1	Σύνδεση πορώδους πυρήνα με το εξωτερικό φύλλο Ti6Al4V. [23]	2-19
2.2.2.e.1	(Αριστερά) Κόκκοι μετά τη πυροσυσσώματωση, (Δεξιά) Κοντινή άποψη σύνδεσης. [25]....	2-20
2.2.3.1	Μεταλλικός αφρός από Α,Δ) χαλκό (SEM), Β) άργυρο, Γ) νικέλιο,. [28].....	2-22
2.2.4.1	α) Διαπίδυση πολυουρεθάνης, b) Τομή αφρού νικελίου κατά τη θέρμανση [131].....	2-24

2.2.4.2 Διαφορετικού πορώδους επιφάνειες αφρών νικελίου παραγωγής INCOFOAM [131]	2-25
2.3.1.1 Μέθοδοι χρήσης υλικού πλήρωσης κατά τη συγκόλληση μεταλλικών αφρών. [33].....	2-27
2.3.5.1 Κοπή δομής σάντουιτς από αφρό αλουμινίου με Jet νερού. [34].....	2-28
3.3.1.a.1 Αυτοκίνητο με μέρη από αφρό αλουμινίου [134].....	3-10
3.3.1.b.1 Διάταξη της NASA για μείωση του θορύβου από περίβλημα μεταλλικού αφρού. [40].....	3-11
3.3.1.e.1 Οδοντωτοί τροχοί από αφρούς αλουμινίου [135].....	3-13
3.3.2.a.1 Αποσβεστήρες μεταλλικών αφρών [136].....	3-14
3.3.2.b.1 Φίλτρα από διάφορα είδη μεταλλικών αφρών. [10].....	3-15
3.3.2.c.1 Φλογοπαγίδες μεταλλικού αφρού [13].....	3-15
3.3.2.d.1 Εμφύτευμα οστών από αφρό τιτανίου [138]	3-16
3.3.2.e.1 Εναλλάκτες με αφρούς για αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας [139]	3-17
3.3.2.f.1 Εξωτερική εμφάνιση φίλτρου από μεταλλικό αφρό, εξάτμισης αυτοκινήτου [140].....	3-18
3.3.2.g.1 Χρήση μεταλλικών αφρών από κράματα νικελίου σε ηλεκτρόδια μπαταριών. [45].....	3-18
3.3.2.h.1 Πορώδες υλικό για απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [36-37].....	3-19
4.1.1 Μεταλλικός αφρός κλειστών κυψελών [141]	4-1
4.1.2 Μεταλλικός αφρός ανοικτών κυψελίδων [142]	4-2
4.1.3 Αφροί αλουμινίου με πυκνότητα πορώδους 10, 20 και 40 ppi, αντίστοιχα. [143]	4-3
4.1.4 Γεωμετρία τετράεδρου και δεκάεδρου ενός κελιού [144].....	4-4
4.1.5 Ιδανικό «τετραδεκάεδρο» (tetradecahedron) μιας κυψέλης. [49]	4-5
4.2.2.d.1 Διαδικασία τομογραφίας ακτινών -X (X-ray tomography). [52]	4-10
4.2.2.d.2 3D εικόνα υψηλής ανάλυσης αφρού αλουμινίου. [52].....	4-10
5.3.2.1 Προσέγγιση για την παρασκευή μεταλλικών αφρών ενισχυμένων με νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) με συνδυασμό της κονιομεταλλουργίας και κολλοειδούς επεξεργασίας. [109,110]	5-16
5.3.2.2 Μικρογραφίες SEM των αρχικών πρώτων υλών: (α) κράμα Al-12, (b) σκόνη TiH ₂ · (c) πολλαπλών τοιχωμάτων νανοσωλήνες άνθρακα MWCNTs-COOH. [106].....	5-17
5.3.2.3 Υψηλής ποιότητας σφαιρικοί κόκκοι παρασκευασμένοι με ψύξη – κοκκοποίηση – λυοφιλοποίηση, και η επιφάνειά τους (α) με, και (β) χωρίς πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs. Δομικά χαρακτηριστικά προδρόμων υλικών (και επιφανειών θραύσης τους) που παρασκευάζονται από κόκκους (c) με, και (d) χωρίς MWCNTs-COOH. [106]	5-18
5.3.2.4 (a) Κυψελοειδής πόρος, και μεγεθυμένες εικόνες της μικροδομής του πορώδους τοιχώματος (b) με πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs διασκορπισμένους στη μήτρα αλουμινίου του και (c) χωρίς πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs. [106].....	5-19
5.3.2.5 Διαδικασία παραγωγής αφρών αλουμινίου κλειστών κυψελίδων με και χωρίς MWCNTs. [111]	5-21
5.3.2.6 Διάγραμμα διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή CNT / Al. [141]	5-22

6.3.3 1 Ο τόρνος του εργαστηρίου στον οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάδευση.....	6-7
6.3.3 2 Ψηφιακή ζυγαριά ακρίβειας 0,001 γραμμαρίων.....	6-8
6.3.3 3 10 g μίγματος, έτοιμο για συμπίεση.....	6-8
6.3.3 4 Πρέσα 100 τόνων του εργαστηρίου	6-9
6.3.3 5 <i>a.</i> Συνσωμάτωμα - Προϊόν συμπίεσης, <i>b.</i> Γεωμετρική απεικόνιση των διαστάσεων του κυλινδρικού δοκιμίου.....	6-9
6.3.3 6 <i>a.</i> Επαγωγικός φούρνος <i>Osmund b.</i> Τεχνικά χαρακτηριστικά του φούρνου <i>c.</i> Ρυθμιστής θερμοκρασίας επαγωγικού φούρνου.	6-11
6.3.3 7 Το πυρίμαχο γυαλί που τοποθετήθηκε στη κεντρική οπή του φούρνου.....	6-11
6.3.3 8 <i>a.</i> (0 %) Δοκίμιο 1, <i>b.</i> Δοκίμιο 2, <i>c.</i> Δοκίμιο 3, <i>d.</i> (2 %) Δοκίμιο 4, <i>e.</i> Δοκίμιο 5, <i>f.</i> Δοκίμιο 6, <i>g.</i> (5 %) Δοκίμιο 7, <i>h.</i> Δοκίμιο 8, <i>i.</i> Δοκίμιο 9, <i>j.</i> (10 %) Δοκίμιο 10, <i>k.</i> Δοκίμιο 11, <i>l.</i> Δοκίμιο 12, <i>m.</i> (8 %) Δοκίμιο 13	6-12
6.3.3 9 Κύλινδρος προσέγγισης αφροποιημένων δοκιμίων	6-13
6.3.3 10 Η δισκοτόμος του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε	6-13
6.3.3 11 <i>a.</i> Διάταξη για την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης EDM <i>b.</i> Πίνακας ελέγχου μηχανής με τις ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν.....	6-14
6.3.3 12 Συσκευή στίλβωσης	6-14
6.3.3 13 <i>a.</i> Νιτρικό οξύ και απιονισμένο νερό, <i>b.</i> Χημική προσβολή - Εμβάπτιση δοκιμίων στο νιτρικό οξύ, <i>c.</i> Καθαρισμός δοκιμίων στο απιονισμένο νερό	6-15
6.3.3 14 Το οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου	6-15
7.2.1 1 Αφροποίηση Δοκιμίου 1 (0 % Steel Flakes, 280 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-4
7.2.1 2 Αφροποίηση Δοκιμίου 2 (0 % Steel Flakes, 265 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-5
7.2.1 3 Αφροποίηση Δοκιμίου 3 (0 % Steel Flakes, 269 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-6
7.2.1 4 Αφροποίηση Δοκιμίου 4 (2 % Steel Flakes, 243 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-7
7.2.1 5 Αφροποίηση Δοκιμίου 5 (2 % Steel Flakes, 211 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-8
7.2.1 6 Αφροποίηση Δοκιμίου 6 (2 % Steel Flakes, 227 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-9
7.2.1 7 Αφροποίηση Δοκιμίου 7 (5 % Steel Flakes, 250 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-10
7.2.1 8 Αφροποίηση Δοκιμίου 8 (5 % Steel Flakes, 234 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-11
7.2.1 9 Αφροποίηση Δοκιμίου 9 (5 % Steel Flakes, 254 sec μέγιστη αφροποίηση)	7-12
7.2.1 10 Αφροποίηση Δοκιμίου 10 (10 % Steel Flakes)	7-13
7.2.1 11 Αφροποίηση Δοκιμίου 11 (10 % Steel Flakes)	7-14
7.2.1 12 Αφροποίηση Δοκιμίου 12 (10 % Steel Flakes)	7-15
7.2.1 13 Αφροποίηση Δοκιμίου 13 (8 % Steel Flakes)	7-16
7.2.1 14 Δοκίμιο 1, επιλογή περιοχών για τον υπολογισμό των εμβαδών μέσω της εφαρμογής	7-17

7.2.2 1 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 1 (0 % κ.β. Steel Flakes)	7-42
7.2.2 2 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 2 (0 % κ.β. Steel Flakes)	7-42
7.2.2 3 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 3 (0 % κ.β. Steel Flakes)	7-42
7.2.2 4 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 4 (2 % κ.β. Steel Flakes)	7-43
7.2.2 5 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 5 (2 % κ.β. Steel Flakes)	7-43
7.2.2 6 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 6 (2 % κ.β. Steel Flakes)	7-43
7.2.2 7 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 7 (5 % κ.β. Steel Flakes)	7-44
7.2.2 8 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 8 (5 % κ.β. Steel Flakes)	7-44
7.2.2 9 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 9 (5 % κ.β. Steel Flakes)	7-44
7.2.2 10 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 10 (10 % κ.β. Steel Flakes)	7-45
7.2.2 11 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 11 (10 % κ.β. Steel Flakes)	7-45
7.2.2 12 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 12 (10 % κ.β. Steel Flakes)	7-45
7.2.2 13 a. A όψη, και b. B όψη Δοκιμίου 13 (8 % κ.β. Steel Flakes)	7-46
7.2.2 14 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 2 (0 % κ.β. Steel Flakes), A όψη.....	7-47
7.2.2 15 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 2 (0 % κ.β. Steel Flakes), B όψη	7-49
7.2.2 16 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 3 (0 % κ.β. Steel Flakes), A όψη.....	7-51
7.2.2 17 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 3 (0 % κ.β. Steel Flakes), B όψη	7-53
7.2.2 18 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 5 (2 % κ.β. Steel Flakes), A όψη.....	7-55
7.2.2 19 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 5 (2 % κ.β. Steel Flakes), B όψη	7-57
7.2.2 20 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 6 (2 % κ.β. Steel Flakes), A όψη.....	7-59
7.2.2 21 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 6 (2 % κ.β. Steel Flakes), B όψη	7-61
7.2.2 22 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 8 (5 % κ.β. Steel Flakes), A όψη.....	7-63
7.2.2 23 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 8 (5 % κ.β. Steel Flakes), B όψη	7-65
7.2.2 24 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 9 (5 % κ.β. Steel Flakes), A όψη.....	7-67
7.2.2 25 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 9 (5 % κ.β. Steel Flakes), B όψη	7-69
7.2.3 1 a. Νιφάδες χάλυβα σε μεγέθυνση (50x) b. κλίμακα μεγεθυμένη (50x).....	7-72
7.2.3 2 a. Νιφάδες χάλυβα σε μεγέθυνση (100x) b. κλίμακα μεγεθυμένη (100x).....	7-72
7.2.3 3 a. Σκόνη TiH ₂ σε μεγέθυνση (100x) b. κλίμακα μεγεθυμένη (100x).....	7-72
7.2.3 4 Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 2 (0 % κ.β. Steel Flakes), B Όψη.....	7-73
7.2.3 5 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 2, B Όψη.....	7-73
7.2.3 6 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, B Όψη.....	7-74
7.2.3 7 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 2, B Όψη.....	7-74

7.2.3 8	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Όψη.....	7-75
7.2.3 9	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Όψη.....	7-75
7.2.3 10	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Όψη.....	7-76
7.2.3 11	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Όψη.....	7-76
7.2.3 12	Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 5 (2 % κ.β. Steel Flakes), Α Όψη	7-77
7.2.3 13	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-77
7.2.3 14	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-78
7.2.3 15	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-78
7.2.3 16	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-79
7.2.3 17	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-79
7.2.3 18	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-80
7.2.3 19	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-80
7.2.3 20	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη	7-81
7.2.3 21	Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 8 (5 % κ.β. Steel Flakes), Β Όψη.....	7-81
7.2.3 22	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-82
7.2.3 23	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-82
7.2.3 24	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-83
7.2.3 25	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-83
7.2.3 26	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-84
7.2.3 27	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-84
7.2.3 28	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-85
7.2.3 29	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (500x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Όψη.....	7-85
7.2.3 30	Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 10 (10 % κ.β. Steel Flakes), Α Όψη	7-86
7.2.3 31	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 10, Α Όψη	7-86
7.2.3 32	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 10, Α Όψη	7-87
7.2.3 33	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 10, Α Όψη	7-87
7.2.3 34	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 10, Α Όψη.....	7-88
7.2.3 35	Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 11 (10 % κ.β. Steel Flakes), Β Όψη.....	7-88
7.2.3 36	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη.....	7-89
7.2.3 37	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη.....	7-89
7.2.3 38	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη.....	7-90
7.2.3 39	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη.....	7-90

7.2.3 40	Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 13 (8 % κ.β. <i>Steel Flakes</i>), 'B Όψη.....	7-91
7.2.3 41	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-91
7.2.3 42	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-92
7.2.3 43	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-92
7.2.3 44	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-93
7.2.3 45	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-93
7.2.3 46	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-94
7.2.3 47	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-94
7.2.3 48	Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 13, 'B Όψη.....	7-95

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

2-1 Αφροποίηση δοκιμίου $AlSi7$ συναρτήσει του χρόνου [22]	2-14
3-1 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων αφρών αλουμινίου ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, $w_1 = w_2 = w_3$). [36]	3-2
3-2 Τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μετάλλων και ενέργεια απορρόφησης [132]	3-4
3-3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σε δοκιμή θλίψης σε σωλήνες από αφρούς αλουμινίου με διαφορετικές πυκνότητες [133]	3-6
3-4 Διάγραμμα αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης για σωλήνες με και χωρίς μεταλλικό αφρό. [14].	3-7
3-5 Συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας με την πυκνότητα του μεταλλικού αφρού. [19]	3-7
3-6 Διάγραμμα κατανομής εφαρμογών πορώδων υλικών. [19]	3-8
4-1 Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για αφρούς αλουμινίου με διαφορετικές πυκνότητες [g/cm^3] [145]	4-7
4-2 Συντελεστής απορρόφησης ήχου, συναρτήσει συχνότητας για δείγματα με διαφορετικό μέγεθος πόρων ($A < B < C$) [53]	4-11
5-1 Επίδραση περιεκτικότητας (a) SiC και (b) TiB_2 σωματιδίων, σε αφρούς αλουμινίου. [106]	5-12
5-2 Επίδραση περιεκτικότητας σωματιδίων (a) SiC και (b) Al_2O_3 , στην τάση διαρροής και στην τάση πλατό των αφρωδών υλικών. (c) Επίδραση του ρυθμού καταπόνησης στη θλιπτική συμπεριφορά των ενισχυμένων αφρών που περιέχουν 5% κατ' όγκο σωματίδια SiC . [106]	5-12
5-3 Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για μεταλλικό αφρό υπό μονοαξονική συμπίεση. [106]	5-13
7-1 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 1 (0 % Steel Flakes)	7-18
7-2 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 2 (0 % Steel Flakes)	7-19
7-3 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 3 (0 % Steel Flakes)	7-20
7-4 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 4 (2 % Steel Flakes)	7-21
7-5 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 5 (2 % Steel Flakes)	7-22
7-6 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 6 (2 % Steel Flakes)	7-23
7-7 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 7 (5 % Steel Flakes)	7-24
7-8 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 8 (5 % Steel Flakes)	7-25
7-9 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 9 (5 % Steel Flakes)	7-26
7-10 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 10 (10 % Steel Flakes)	7-27
7-11 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 11 (10 % Steel Flakes)	7-28
7-12 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 12 (10 % Steel Flakes)	7-30
7-13 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 13 (8 % Steel Flakes)	7-31

7-14 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Πρώτη (0 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμια 1, 2 και 3	7-32
7-15 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Δεύτερη (2 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμια 4, 5 και 6	7-33
7-16 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Τρίτη (5 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμια 7, 8 και 9	7-34
7-17 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Τέταρτη (10 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμια 10, 11 και 12	7-35
7-18 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0 %) και 4 (2 %)...	7-36
7-19 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0 %) και 7 (5 %)...	7-37
7-20 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0 %) και 11 (10%)	7-38
7-21 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0 %) και 13 (8 %).	7-39
7-22 Συγκεντρωτικό Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0 %), 4 (2 %), 7 (5 %), 11 (10 %) και 13 (8 %).....	7-40
7-23 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm	7-48
7-24 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-48
7-25 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm	7-50
7-26 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-50
7-27 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm	7-52
7-28 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-52
7-29 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm	7-54
7-30 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-54
7-31 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm	7-56
7-32 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-56
7-33 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm	7-58

7-34 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-58
7-35 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-60
7-36 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-60
7-37 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-62
7-38 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-62
7-39 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-64
7-40 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-64
7-41 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 2 mm.....	7-66
7-42 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 2 mm.....	7-66
7-43 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-68
7-44 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-68
7-45 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-70
7-46 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm.....	7-70

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 5-1 Δοκιμές ενισχυμένων αφρών αλουμινίου με κεραμικά σωματίδια, με χρήση κονιομεταλλουργίας.....	5-1
Πίνακας 5-2 Δοκιμές ενισχυμένων αφρών αλουμινίου με κεραμικά σωματίδια, με χρήση άμεσης αεροποίησης.....	5-2
Πίνακας 5-3 Επίδραση του μεγέθους και της περιεκτικότητας σωματιδίων SiC στη συμπεριφορά τάσεων των αφρών AlSi7[84].....	5-11
Πίνακας 6-1 Αναγκαίες ποσότητες σε Al, TiH ₂ και Steel Flakes	6-5
Πίνακας 6-2 Μάζα, Διάμετρος και Ύψος Προϊόντων Συμπύεσης.....	6-10
Πίνακας 7-1 Δοκίμιο 1 (0 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-18
Πίνακας 7-2 Δοκίμιο 2 (0 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-19
Πίνακας 7-3 Δοκίμιο 3 (0 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-20
Πίνακας 7-4 Δοκίμιο 4 (2 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-21
Πίνακας 7-5 Δοκίμιο 5 (2 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-22
Πίνακας 7-6 Δοκίμιο 6 (2 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-23
Πίνακας 7-7 Δοκίμιο 7 (5 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-24
Πίνακας 7-8 Δοκίμιο 8 (5 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-25
Πίνακας 7-9 Δοκίμιο 9 (5 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-26
Πίνακας 7-10 Δοκίμιο 10 (10 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-27
Πίνακας 7-11 Δοκίμιο 11 (10 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-28
Πίνακας 7-12 Δοκίμιο 12 (10 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-29
Πίνακας 7-13 Δοκίμιο 13 (8 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου	7-30
Πίνακας 7-14 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 2 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-47
Πίνακας 7-15 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 2 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-49
Πίνακας 7-16 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 3 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-51
Πίνακας 7-17 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 3 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-53
Πίνακας 7-18 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 5 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-55

Πίνακας 7-19 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Οψης του Δοκιμίου 5 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-57
Πίνακας 7-20 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Οψης του Δοκιμίου 6 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-59
Πίνακας 7-21 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Οψης του Δοκιμίου 6 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-61
Πίνακας 7-22 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Οψης του Δοκιμίου 8 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-63
Πίνακας 7-23 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Οψης του Δοκιμίου 8 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 2 mm)	7-65
Πίνακας 7-24 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Οψης του Δοκιμίου 9 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-67
Πίνακας 7-25 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Οψης του Δοκιμίου 9 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)	7-69

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1 Κεφάλαιο 1 : Πορώδη Μεταλλικά Υλικά κ Μεταλλικοί Αφροί

1.1 Εισαγωγή

«Πόρους» ονομάζουμε τους κενούς χώρους μέσα σε κάποιο στερεό υλικό που περικλείουν αέρα. Ο όρος «πορώδες» αποτελεί το ποσοστό του κενού χώρου που περιέχεται σε ένα υλικό, εκφραζόμενο ως ποσοστό του συνολικού του όγκου. Όσο πιο μικρό είναι το ποσοστό των πόρων, τόσο πιο μικρό θεωρείται και το πορώδες και το αντίστροφο. ^{[1],[2]} Ως κυψελίδα, κυψέλη ή και κελί, ονομάζεται η δομή του υλικού που περικλείει τους πόρους.

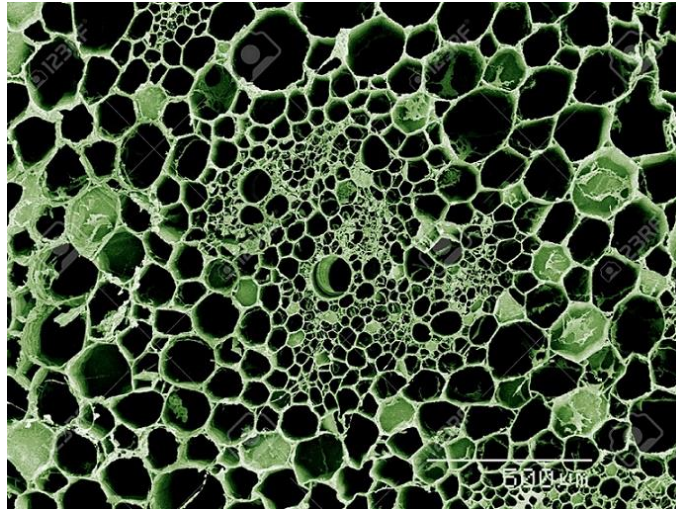
Ως προς τους πόρους (οπές), κυρίαρχη άποψη ήταν, πως η ύπαρξη τους στο εσωτερικό ενός υλικού, αποτελεί ελάττωμα και υποβαθμίζει το ίδιο το υλικό. Συνεπώς, η επιστήμη της μεταλλουργίας, τα προηγούμενα χρόνια, εστίαζε περισσότερο στην ανακάλυψη και μελέτη μεθόδων παρασκευής συμπαγών υλικών όπου και θα εξαλείφονταν τέτοιου είδους ατέλειες.

Αντίθετα με αυτή την επικρατούσα άποψη, ο Ashby εξέφρασε την άποψη ότι αρκετά υλικά, τα οποία συναντώνται στη φύση, σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά, δύνανται να διαθέτουν πορώδες, συνδυάζοντας όμως στιβαρότητα, υψηλή αντοχή σε καταπονήσεις και καλή αναλογία βάρους-πορώδους. Τέτοια υλικά, αποτελούν το ξύλο, τα οστά, όπως επίσης και τα κοράλλια. ^[3]

Τα κύρια στοιχεία της δομής που διακρίνουμε σε ένα υλικό με πορώδες, είναι το μέγεθος του υλικού, το πλήθος των πόρων, ο τύπος των κελιών (κλειστού ή ανοικτού τύπου) και το μέγεθος των πόρων του. Έτσι όταν αναφερόμαστε σε «μικρό πορώδες», αυτό σημαίνει πως η πυκνότητα του πορώδους του υλικού πλησιάζει αυτή του μητρικού υλικού, ενώ όσο αυξάνεται το πορώδες μειώνεται η σχετική πυκνότητα.

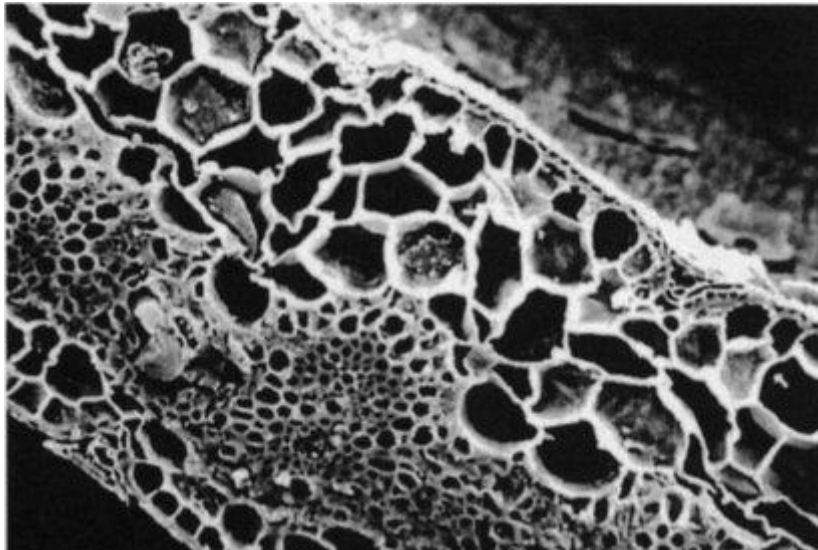
Μερικά από τα χαρακτηριστικά της κυψελοειδούς δομής όπως συναντάται στη φύση, φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν, όπου διακρίνεται η σχεδιαστική τελειότητα της φύσης, που επιτυγχάνει βέλτιστο μηχανικό αποτέλεσμα.

Στην παρακάτω εικόνα (1.1.1), φαίνεται πως η κυψελοειδής δομή του μίσχου μπορεί να αυξήσει τη στιβαρότητα του φυτού και να προσφέρει παράλληλα ένα εκτεταμένο δίκτυο αγωγών τροφοδοσίας.



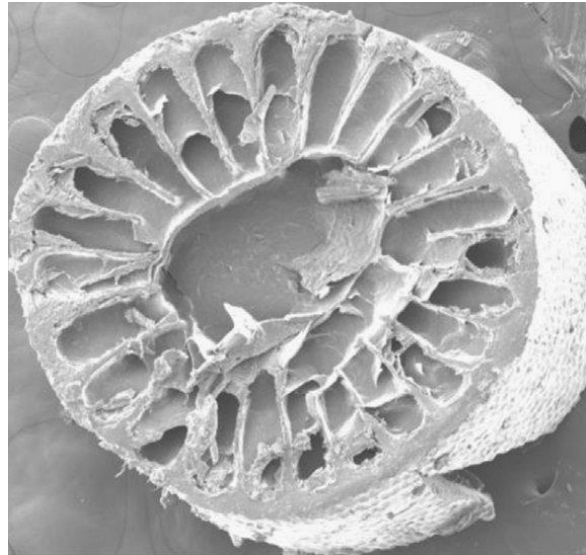
1.1.1 Αποψη της δομής του εσωτερικού του τοιχώματος μίσχου νούφαρου [118]

Η ακόλουθη εικόνα (1.1.2), παρουσιάζει την εσωτερική δομή ενός φύλλου, το οποίο μελετήθηκε σε εργαστήριο με μικροσκόπιο SEM (Scanning Electron Microscope). Λόγω της κυψελοειδούς δομής, προσφέρει υψηλό λόγο επιφάνειας / βάρους, με σκοπό το φυτό να χρησιμοποιεί μέγιστη επιφάνεια για να φωτοσυνθέτει.



1.1.2 Διατομή εσωτερικού φύλλου σε μικροσκόπιο SEM [119]

Η εικόνα 1.1.3 δείχνει την εσωτερική δομή από ένα αγκάθι σκαντζόχοιρου, η οποία προσφέρει ψηλή αντοχή στο αγκάθι, και λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του ζώου.



1.13 Τομή της εσωτερικής δομής ενός αγκαθιού σκαντζόχοιρου [120]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα κελιά (κυψελίδες) του πορώδους ενός υλικού, μπορούν να είναι είτε (α) ανοικτού τύπου, ή (β) κλειστού τύπου. Στου ανοικτού τύπου, κάθε κελί ενώνεται με τα γειτονικά του και το υπάρχον υλικό απαρτίζει το πλαίσιο και τα όρια του κάθε κελιού. Σε πορώδες με κλειστού τύπου κελιά, κάθε κελί είναι κλειστό και δε συνδέεται με τα γειτονικά του, δηλαδή το υλικό βρίσκεται εκτός από το πλαίσιο, και στις πλευρές, διαχωρίζοντας το ένα κελί από το άλλο. Οι δύο αυτοί τύποι κελιών, διαφέρουν όχι μόνο στον τρόπο παραγωγής, αλλά και στις ιδιότητες που έχουν, καθώς και στις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται. ^{[4], [5]} Στην εικόνα (1.1.4) απεικονίζεται η δομή ανοικτού και κλειστού τύπου κελιών, αντίστοιχα.



1.14 Κελιά ανοικτού (αριστερά) και κλειστού τύπου (δεξιά) [121]

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων, με την έρευνα και την κατασκευή υλικών με μικρό ή μεγάλο πορώδες. Αποτέλεσμα αυτής της έρευνας, είναι πως τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ιδιαίτερα το

ενδιαφέρον και για τους «μεταλλικούς αφρούς». Η αύξηση της έρευνας στον τομέα αυτό οφείλεται σε πληθώρα χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, τόσο σε επιστημονικό αλλά όσο και σε επίπεδο εφαρμογών σε βιομηχανική κλίμακα.^[6]

1.2 Μεταλλικοί Αφροί

Με τον όρο «μεταλλικός αφρός» αποκαλούμε έναν τύπο αφρού στερεής κατάστασης. Οι μεταλλικοί αφροί αποτελούν μια υποκατηγορία της ευρύτερης οικογένειας των πορώδων υλικών. Σύμφωνα με τον Banhart,^[7] ο όρος αφρός χαρακτηρίζει τα εγκλείσματα αερίου σε υγρό περιβάλλον. Η μορφολογία αυτή που δημιουργείται, μπορεί κατόπιν να διατηρηθεί με γρήγορη στερεοποίηση του υγρού, λαμβάνοντας έτσι «στερεό αφρό».

Ως αφροί, μεταλλικοί ή κεραμικοί, χαρακτηρίζονται τα πορώδη υλικά με μεγάλο πορώδες, συνήθως της τάξης του 65-95%. Σημαντικό στοιχείο στην εξέλιξη της έρευνας και τον χαρακτηρισμό των μεταλλικών αφρών αποτελεί η εύρεση τεχνικών με τις οποίες μπορεί να είναι ελεγχόμενο το ποσοστό του πορώδους, αλλά και το μέγεθος των κελιών κατά την παραγωγή των αφρών.^[8]



1.2 1 Μεταλλικός αφρός από αλουμίνιο [122]

1.3 Ιστορική αναδρομή στην έρευνα και ανάπτυξη μεταλλικών αφρών

Στις αρχές της δεκαετίας του '50 ο Benjamin Sosnicki δημιουργεί πατέντα που αφορούσε την παραγωγή «σπογγώδους μετάλλου» (foamlike metal), που του απονεμήθηκε το 1951 (εικόνα 1.3.1). Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '40, ο Sosnicki, ήταν πρωτοπόρος στην παραγωγή του σπογγώδους μετάλλου. Η μέθοδος παρασκευής του συγκεκριμένου τύπου μεταλλικού αφρού, βασιζόταν στην εξάχνωση στοιχείων με χαμηλό σημείο τήξης μέσα σε μεταλλική μήτρα. [9]

Patented May 15, 1951

2,553,016

UNITED STATES PATENT OFFICE

2,553,016

FOAMLIKE METAL

Benjamin Sosnick, San Francisco, Calif.

No Drawing. Application December 26, 1947.

Serial No. 794,087

4 Claims. (Cl. 148—31)

1.3.1 Πατέντα που απονεμήθηκε στον Sosnicki (1951) για παραγωγή «σπογγώδους μετάλλου». [9]

Πιο αναλυτικά, η συγκεκριμένη μέθοδος παρασκευής βασιζόταν στο ότι διαφορετικές φάσεις ορισμένων κραμάτων έχουν και μεγάλη διαφορά στο σημείο βρασμού. Συνεπώς, μια φάση ενός κράματος μπορεί να τηχθεί ή να βράσει ανεξάρτητα από μία άλλη. Εν ολίγοις, απαιτείται να έχουμε στη διάθεση μας ένα πολυφασικό κράμα, το οποίο πρέπει να έχει τέτοια σύσταση, ώστε όταν του προσδίδουμε ποσά θερμότητας, το ένα συστατικό του κράματος να βράζει, ενώ το άλλο να έχει μόλις ξεκινήσει να τήκεται.

Πρόκειται για μία διαδικασία υψηλής πίεσης. Όσο διαρκεί η θέρμανση του κράματος, αυτό πρέπει να βρίσκεται εντός αυτοκλείστου. Το να βρίσκεται μέσα σε αυτόκλειστο είναι απαραίτητο έτσι ώστε το συστατικό που έχει ξεκινήσει να βράζει και να βρίσκεται και στην αέρια φάση, να μην έχει οδούς διαφυγής από το υγρό μέταλλο.

Αν τώρα μειωθεί η πίεση, θα πραγματοποιηθεί ξαφνικός βρασμός του κράματος, και αν στη συνέχεια ψυχθεί το κράμα, παράγεται ένα στερεό υλικό γεμάτο από εσωτερικούς (κλειστούς) πόρους, λόγω του αερίου συστατικού που έχει εγκλωβιστεί εντός του. Το νέο αυτό υλικό έχει υψηλή ανθεκτικότητα, ενώ παράλληλα έχει και βελτιωμένη θερμική μόνωση καθώς και ηχομονωτικές ιδιότητες.

Για να μπορεί να εφαρμοστεί αυτή η τεχνική, χρειάζεται το σημείο βρασμού της μιας από τις φάσεις να είναι πολύ χαμηλό. Αυτό πραγματοποιείται αν το κράμα στη σύστασή του αποτελείται από ψευδάργυρο, κάδμιο ή υδράργυρο. Η συγκεκριμένη τεχνική ωστόσο δε χρησιμοποιήθηκε ποτέ, καθώς ενώ είχε δυνατότητα παραγωγής μικρής ποσότητας μεταλλικού αφρού (σπογγώδους μετάλλου), ήταν αρκετά δαπανηρή και χειριζόταν «επικίνδυνα» μέταλλα για τον άνθρωπο. ^[9-11]

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1950 γίνεται μια πρώτη προσπάθεια παραγωγής μεταλλικών αφρών με ανοιχτού τύπου κελιά, όπου και σημειώνονται πολύ σημαντικές καινοτομίες στην παραγωγή τους, από την ερευνητική ομάδα της εταιρίας United Aircraft Corporation. Η νέα μέθοδος παραγωγής περιλάμβανε ανάμιξη του κονιοποιημένου μετάλλου (μετάλλου σε μορφή σκόνης), με μια σκόνη που χρησίμευε στην παραγωγή αερίων. Το κατάλληλο υλικό για την παραγωγή ικανής ποσότητας αερίου επιλεγόταν προσεκτικά, έτσι ώστε να έχει παραπλήσια θερμοκρασία αποσύνθεσης με την αντίστοιχη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου. ^[9-11] Το πρόβλημα που ανέκυπτε, ωστόσο, από την εν λόγω διαδικασία αφορούσε την ψύξη του αφρού.

Το 1962 οι Hardy και Peisker παρουσίασαν μια καινούργια μέθοδο, στην οποία προσέθεταν κατευθείαν τη σκόνη παραγωγής αερίου (αφριστικό παράγοντα) στο τηγμένο μέταλλο, για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της ψύξης του μετάλλου. Επρόκειτο για μια συμφέρουσα μέθοδο, καθώς ήταν πολύ πιο οικονομική από την προαναφερθείσα με το κονιοποιημένο μέταλλο. Σε γενικές γραμμές όμως, η παραγωγή των μεταλλικών αφρών ήταν αρκετά ακριβή διαδικασία, μη αξιόπιστη ως προς την αποτελεσματικότητα των μεθόδων, και πραγματοποιούνταν κατά κύριο λόγο στα Πανεπιστημιακά εργαστήρια για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Στα χρόνια που ακολούθησαν, η έρευνα πάνω στη παραγωγή μεταλλικών αφρών συνεχίστηκε, και οδήγησε σε νέες επιστημονικές δημοσιεύσεις και ευρεσιτεχνίες, χωρίς ωστόσο να παρουσιαστεί μεγάλη πρόοδος. Τη δεκαετία του 1990 παρουσιάστηκε σημαντική ανάπτυξη στον τομέα των ελαφρών κατασκευών, με τη βοήθεια ευρωπαϊκών προγραμμάτων (LISA, EFG, MURI, InnoZelmet, ULMA),

ενώ παράλληλα εμφανίστηκαν εταιρίες που επιθυμούσαν να αναλάβουν την εμπορική εκμετάλλευση των νέων υλικών. Επιπρόσθετα η ύπαρξη τεχνογνωσίας σχετικά με την παραγωγή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites-MMC). βοήθησε στην περαιτέρω ανάπτυξη των νέων αυτών υλικών, καθώς η συμπεριφορά τους υπακούει στους ίδιους νόμους και διέπεται από τους ίδιους περιορισμούς. ^[9-11]

Από τη δεκαετία του 1990 έως σήμερα, οι μεταλλικοί αφροί βρίσκουν διαρκώς όλο και μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής, οπότε και απαιτείται παραπάνω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των πορώδων υλικών. Υπάρχουν πλέον διάφορες εταιρίες ανά τον κόσμο, οι οποίες παρασκευάζουν προϊόντα από αφρούς μέσω τήξης. Όμως, η παραγωγή μεταλλικού αφρού με υψηλές προδιαγραφές ποιότητας παραμένει μια αρκετά δαπανηρή διαδικασία, γεγονός που υποχρεώνει την αγορά μεταλλικών αφρών να είναι αρκετά περιορισμένη.

Στις μέρες μας, μεγάλο μέρος της έρευνας επικεντρώνεται στους αφρούς αλουμινίου, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του συγκεκριμένου τύπου μεταλλικών αφρών, της υψηλής αντοχής σε διάβρωση και του χαμηλού σημείου τήξης, το οποίο τους προσδίδει την ιδιότητα υψηλής κατεργασιμότητας. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή μεταλλικών αφρών, όπως είναι ο σίδηρος, το νικέλιο και ο μόλυβδος. Για παράδειγμα, αφροί νικελίου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χημικών φίλτρων, ενώ οι αφροί από διαφορετικά υλικά, λόγω της χαμηλής τους ποιότητας, ενδιαφέρουν πιο πολύ σε ερευνητικό επίπεδο. ^[12]

1.4 Χαρακτηριστικά των μεταλλικών αφρών

Οι μεταλλικοί αφροί, ανάλογα και με το μέγεθος του πορώδους τους, μπορούν να διατηρούν ορισμένες από τις ιδιότητες του μητρικού τους υλικού, ενώ άλλες ιδιότητες τους μπορεί να διαφέρουν από τις αντίστοιχες του υλικού από το οποίο προέρχονται. Έτσι το μέγεθος και η ομοιομορφία στο πορώδες είναι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν και τις ιδιότητες των μεταλλικών αφρών. Κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες αυτών, είναι το χαμηλό βάρος, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ήχου, ενώ επίσης πρόκειται για άφλεκτα υλικά. ^{[13], [7-8]}

Στις περασμένες δεκαετίες έγιναν πολλές προσπάθειες με σκοπό να δημιουργηθούν συγκεκριμένες δομές μεταλλικών αφρών. Η παραγωγή τους ωστόσο ήταν πολύ δαπανηρή, και το γεγονός αυτό καθιστούσε απαγορευτική την

εφαρμογή αυτών των προϊόντων από εκεί και έπειτα. Ένα άλλο, επίσης σημαντικό πρόβλημα, που προέκυπτε, ήταν ότι δεν υπήρχε η δυνατότητα μιας επιτυχούς αναπαραγωγής των ιδιοτήτων των εν λόγω δομών. Συνήθως αυτό οφειλόταν σε διάφορους παράγοντες, μερικοί εκ των οποίων ήταν η χαμηλή δυνατότητα αφροποίησης που παρουσίαζε ένα λιωμένο - τηγμένο μέταλλο, το μέγεθος των πόρων και η μεγάλη διασπορά αυτών, η συρρίκνωση του υλικού κατά την φάση της στερεοποίησης του μετά την τήξη του κ.α. Έκτοτε, και μετά από εκτεταμένη και διαρκή έρευνα, έχουν εφευρεθεί νέες τεχνολογίες για παραγωγή μεταλλικών αφρών, με τις οποίες έχουν μειωθεί τα παραπάνω προβλήματα, με αποτέλεσμα την δυνατότητα παραγωγής αφρών υψηλής ποιότητας και χαμηλού κόστους. ^[13]

Τα πορώδη μεταλλικά υλικά αποτελούν πλέον μια τεχνολογία που βρίσκεται σε ανάπτυξη και είναι πολλά υποσχόμενη για εφαρμογές του μέλλοντος. Παρ' όλα αυτά, προς το παρόν, δεν υπάρχει ευρεία βιομηχανική παραγωγή και εφαρμογή μεταλλικών αφρών, και είναι ακόμη λίγες οι εταιρίες ανά τον κόσμο που δραστηριοποιούνται στην παραγωγή τους για εξειδικευμένες χρήσεις. ^[14]

Έτσι, υπάρχουν διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, στις οποίες γίνεται χρήση των μεταλλικών αφρών, σε κλάδους όπως η μηχανολογία, οι κατασκευές, οι οικοδομές, οι οικιακές συσκευές και η βιομηχανία των χημικών. Ένα παράδειγμα εφαρμογής των μεταλλικών αφρών που ξεχωρίζει, αποτελεί η ενσωμάτωσή τους σαν εσωτερικό στρώμα κάποιων δομών, οι οποίες καλούνται και δομές τύπου «σάντουιτς» (εικόνα 1.4.1) που η χρήση τους συναντάται σε κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως στην αεροναυπηγική, όπου επιδιώκεται η ελάττωση του βάρους του συνόλου της κατασκευής.



1.4.1 Δομή τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου [123]

Στην παραπάνω εικόνα (1.4.1) παρουσιάζεται ένα πλαίσιο με δομή τύπου σάντουιτς, στο οποίο ο πυρήνας είναι από μεταλλικό αφρό με μητρικό υλικό τον χάλυβα, , ενώ η επιφάνεια αποτελείται από ίνες άνθρακα.

Η εφαρμογή μεταλλικών αφρών στην βιομηχανία αυτοκινήτων είναι πολύ σημαντική, καθώς δίνεται η δυνατότητα απορρόφησης υψηλών ποσών ενέργειας, το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη κυψελίδων στη δομή τους. Έτσι λοιπόν έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές που περιλαμβάνουν προϊόντα μεταλλικών αφρών στους προφυλακτήρες αυτοκινήτων, αλλά και σε άλλα μέρη του αμαξώματος, καθώς σε πιθανό ενδεχόμενο πρόσκρουσης, μεγάλο ποσοστό της ενέργειας, δύναται να απορροφηθεί από αυτόν τον μεταλλικό αφρό, μέσω πλαστικής παραμόρφωσης του. ^[14]

Άλλες εφαρμογές, που βασίζονται στις ιδιότητες των μεταλλικών αφρών, έχουν αναπτυχθεί σε φίλτρα, σε διάφορους τύπους εναλλάκτων θερμότητας, σε απορροφητές ενέργειας στην καταπόνηση σωλήνων, καθώς και σε απορροφητές ήχου. Επίσης μελετάται η εφαρμογή τους στην ιατρική ως εμφυτεύματα σε οστά, αλλά και σε άλλα επιστημονικά πεδία.

Τέλος, για τους μεταλλικούς αφρούς, υπάρχει δυνατότητα να κατηγοριοποιηθούν βάσει των πιο κάτω χαρακτηριστικών τους:

- i. Τη σχετική πυκνότητά τους,
- ii. την τοπολογία των κυψελών, (ανοιχτού ή κλειστού τύπου κελιών), το μέγεθος και το σχήμα τους, και
- iii. τις ιδιότητες του μητρικού τους μεταλλικού υλικού.

1.5 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και χρήση των μεταλλικών αφρών

Οι πολλές εφαρμογές των μεταλλικών αφρών, μερικές εκ των οποίων αναφέρθηκαν και προηγουμένως, οφείλονται στα πλεονεκτήματα που διαθέτουν. Η ύπαρξη αυτών των πλεονεκτημάτων βασίζεται στο μητρικό υλικό τους, το οποίο μπορεί να είναι είτε καθαρό μέταλλο ή κάποιο κράμα μετάλλων.

Βασικό πλεονέκτημα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, αποτελεί η ικανότητα απορρόφησης υψηλών ποσών ενέργειας, κατά την κρούση ή την συμπίεση, ικανότητα που δεν επηρεάζεται από την φορά που έχει η φόρτιση. Επίσης τα πορώδη μεταλλικά υλικά διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητες του

μητρικού τους υλικού (κυρίως αντοχή και ακαμψία) και διαθέτουν χαμηλό βάρος που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για βιομηχανικές εφαρμογές. Ο συνδυασμός χαμηλού βάρους με ταυτόχρονη την διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του μεταλλικού υλικού από το οποίο παράχθηκαν οι αφροί, αποτελεί ιδιαίτερο προτέρημα για την παραγωγή αυτών. Επιπρόσθετα, οι μεταλλικοί αφροί είναι εξίσου πολύ αποτελεσματικοί στην απορρόφηση ταλαντώσεων, ήχου, και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. ^{[6], [8], [16-17]}

Κατά την παραγωγή μεταλλικών αφρών, διευρύνεται η θερμοκρασία λειτουργίας και αυξάνεται η ακαμψία του υλικού. Επίσης ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι πως μεγαλώνει η αντίσταση σε πολλές διαλυτικές ουσίες και στη φωτιά. Συγκριτικά με τους κεραμικούς αφρούς, τα πορώδη μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν βελτιωμένα αποτελέσματα στην ανθεκτικότητα και την αντοχή σε κόπωση, την θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, καθώς επίσης διαθέτουν καλύτερη ικανότητα μορφοποίησης και επεξεργασίας. Πρόκειται για πλήρως ανακυκλώσιμα και καθόλου τοξικά υλικά, τα οποία δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Το τελευταίο σημείο, έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς στις μέρες μας επιδιώκεται όλο και πιο επιτακτικά η παραγωγή, χρήση και η διάθεση νέων προηγμένων υλικών που να μην φέρουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιδράσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. ^{[13], [17-18]}

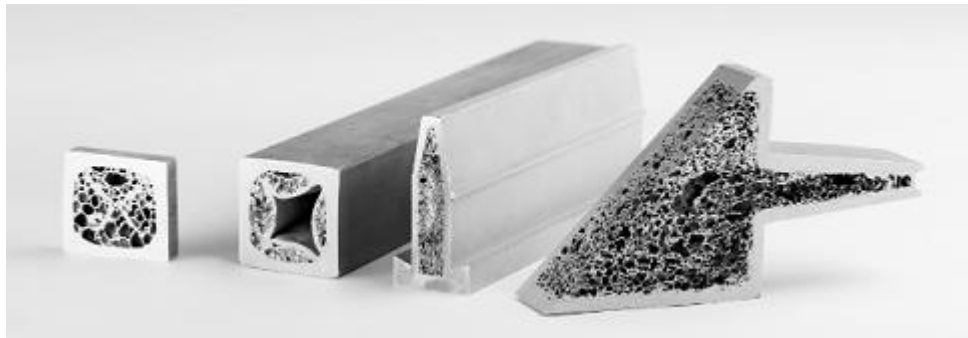
Από την άλλη μεριά, στα κύρια μειονεκτήματα των μεταλλικών αφρών συγκαταλέγονται τα εξής:

- i. Το υψηλό κόστος παραγωγής τους,
- ii. η διαδικασία παραγωγής τους, η οποία συνήθως είναι χρονοβόρα,
- iii. η δυσκολία στην αναπαραγωγή αφρών με συγκεκριμένη δομή κυψελίδων και ιδιοτήτων, και
- iv. η δυσκολία μαζικής παραγωγής τους.

Οι μεταλλικοί αφροί έχουν «ακατάστατη» δομή και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος και το σχήμα των κελιών. Επίσης, παρουσιάζουν ατέλειες όπως ρωγμές, οπές ή αυλακώσεις στις επιφάνειες των τοίχων των κυψελίδων, φαινόμενο που αποδίδεται στις υψηλές θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της παρασκευής τους. ^[17]

Παρόλα όμως τα αρνητικά, τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί νέες μέθοδοι με τις οποίες έχουν μειωθεί στο ελάχιστο ή ακόμα έχουν εξαλειφθεί εντελώς τα προαναφερθέντα προβλήματα, με αποτέλεσμα πλέον να παράγονται μεταλλικοί αφροί υψηλής ποιότητας. Αυτές οι μέθοδοι αφορούν απλές

διαδικασίες παραγωγής χαμηλού κόστους, με προϊόντα τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον χρησιμοποιώντας συμβατικά υλικά. [3], [11]



1.5.1 Αφροί "σάντουιτς", από μεθόδους κονιομεταλλουργίας, για διάφορες εφαρμογές [124]

Σήμερα πληθώρα εφαρμογών μεταλλικών αφρών, αλλά και γενικότερα των πορώδων μεταλλικών υλικών ερευνώνται αλλά και αναπτύσσονται σε βιομηχανική κλίμακα, η χρήση των οποίων εξαρτάται από τους ακόλουθους κυρίαρχους παράγοντες: [12], [19]

- i. Μορφολογία μεταλλικού αφρού: Τύπος του πορώδους (π.χ. ανοικτού ή κλειστού τύπου κελιών), πυκνότητα του πορώδους, επιθυμητό μέγεθος πόρων, απαίτηση σε συνολική εσωτερική επιφάνεια του κυψελοειδές υλικού.
- ii. Μεταλλουργία: Υγρής κατάστασης ή κονιομεταλλουργία. [6]
- iii. Παραγωγική διαδικασία: Δυνατότητα μορφοποίησης των μεταλλικών αφρών για κατασκευή απαιτούμενων εξαρτημάτων ή σύνθετων διατομών (profiles).
- iv. Οικονομοτεχνική μελέτη: Ρυθμός και κόστος παραγωγής, ανταγωνιστικά υλικά, καταλληλόλητα υλικού για μεγάλου όγκου κατασκευές.

2 Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες Παραγωγής και Κατεργασίες των Μεταλλικών Αφρών

2.1 Γενικές αρχές στην παραγωγή μεταλλικών αφρών

Οι μεταλλικοί αφροί είναι δυνατό να παρασκευαστούν με χρήση διάφορων μεθόδων. Ανάλογα με το ποια μέθοδος χρησιμοποιείται κάθε φορά, το μητρικό υλικό του μετάλλου μπορεί να βρίσκεται αρχικά α) είτε σε υγρή μορφή, β) είτε σε κονιορτοποιημένη μορφή (μορφή σκόνης μετάλλου), είτε γ) μπορεί να απαιτείται ηλεκτρολύτης που περιέχει ιόντα μετάλλου. Δεν είναι όλες οι τεχνικές εφαρμόσιμες σε κάθε είδος μετάλλου, ενώ και το πορώδες μεταλλικό υλικό που παράγεται από κάθε μέταλλο και την αντίστοιχη μέθοδο αφροποίησης, παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία και πυκνότητα. ^[7]

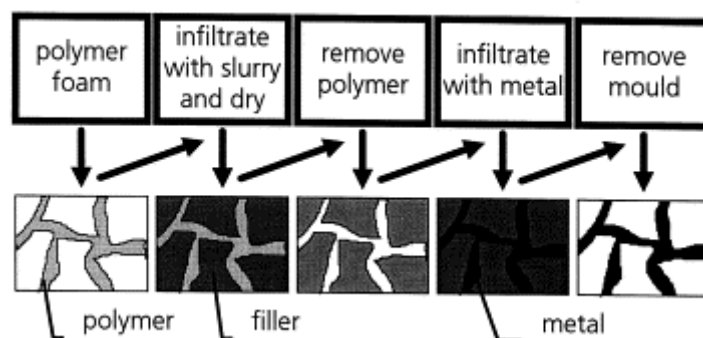
2.1.1 Παραγωγή μεταλλικών αφρών από τηγμένο μέταλλο

Σε αυτή τη πρώτη κατηγορία ανήκουν όλες οι μέθοδοι, τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε επίπεδο έρευνας, οι οποίες εφαρμόζουν παραγωγή μεταλλικών αφρών μέσω χύτευσης του τηγμένου μετάλλου και περαιτέρω επεξεργασίας αφού στερεοποιηθεί. Η διαδικασία της αφροποίησης λαμβάνει μέρος με κάποια από τις εξής μεθοδολογίες: α) Με χρήση ενός αφριστικού παράγοντα, β) με χρήση ενός πολυμερικού αφρού, και γ) με χύτευση γύρω από στερεά σωματίδια, τα οποία μετά το πέρας της χύτευσης απομακρύνονται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τα κελιά του μεταλλικού αφρού. ^{[7],[8]}

Ένας τρόπος που μπορεί να πραγματοποιηθεί αφροποίηση ενός μετάλλου μέσω χύτευσης, είναι με την έγχυση ενός αερίου στο τηγμένο μέταλλο. Σε αυτή τη περίπτωση χρειάζεται να είναι αρκετά μεγάλο το ιξώδες του υγρού μετάλλου, ούτως ώστε το τήγμα να μπορεί να παρασυρθεί προς την επιφάνεια μαζί με το αέριο, το οποίο ανεβαίνει προς την επιφάνεια λόγω των ανωστικών δυνάμεων. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται πόροι, και το τμήμα που αφροποιείται ανεβαίνει στην επιφάνεια και απομακρύνεται με κατάλληλο τρόπο. Αν αφροποιηθεί όλη η μάζα του μετάλλου, το υλικό πρέπει να ψυχθεί ώστε να στερεοποιηθεί και να διατηρήσει τη μορφή του αφρού, πριν διαφύγει το αέριο.

Ένας άλλος τρόπος αφροποίησης λαμβάνει μέρος με την προσθήκη ενός αφριστικού παράγοντα, αντί για αέριο που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Ο αφριστικός παράγοντας σε κατάλληλη θερμοκρασία αντιδρά - διασπάται και εκλύει αέριο, το οποίο προκαλεί την αφροποίηση του τήγματος. ^{[7],[8]}

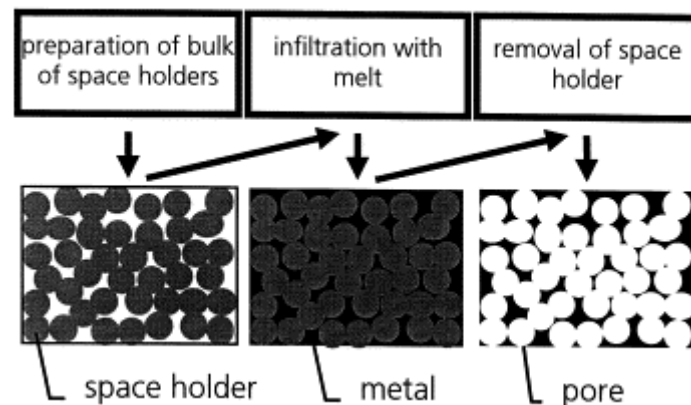
Ένας τρίτος τρόπος αφροποίησης βασίζεται στην αντιγραφή της μορφής ενός πολυμερικού αφρού, και της δημιουργίας καλούπιού βάσει αυτού. Ο πολυμερικός αφρός δηλαδή, λειτουργεί ως πρότυπο για τον μεταλλικό αφρό. Ήδη υπάρχουν διάφορες γεωμετρίες πολυμερικών αφρών με ανοικτού τύπου κελιά. Αφού επιλεγεί ο πολυμερικός αφρός με την επιθυμητή γεωμετρία, οι πόροι του πληρώνονται με υλικό, το οποίο σα χαρακτηριστικό έχει την αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (για να αντέξει το τηγμένο μέταλλο που θα εισέλθει στη συνέχεια). Στη συνέχεια αυτό το υλικό πλήρωσης, ψύχεται και στερεοποιείται και ακολουθεί η αφαίρεση της πολυμερικής μήτρας. Μετά την αφαίρεση της μήτρας, τα κενά που έχουν απομείνει αποτελούν τη γεωμετρία του πολυμερικού αφρού που επιλέγηκε στην αρχή. Με τη σειρά τους πληρώνονται και αυτά, τώρα όμως από το τήγμα του μετάλλου που ενδιαφέρει ώστε να παραχθεί μεταλλικός αφρός. Συνήθως αυτή η διαδικασία λαμβάνει μέρος υπό πίεση, και στη συνέχεια το τήγμα ψύχεται και στερεοποιείται. Στο τέλος αφαιρείται το καλούπι από το υλικό πλήρωσεως, και προκύπτει ο μεταλλικός αφρός, ο οποίος έχει την ίδια ακριβώς μορφή με τον πολυμερικό αφρό. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται εποπτικά, στην ακόλουθη εικόνα (2.1.1.1): ^[7]



2.1.1.1 Παραγωγή μεταλλικού αφρού με χύτευση σε καλούπι από πολυμερικό αφρό. [7]

Τέλος, ένας τέταρτος τρόπος παραγωγής μεταλλικού αφρού είναι αυτός της χύτευσης του μετάλλου γύρω από σωματίδια με μορφή κόκκων. Τα σφαιρικά αυτά σωματίδια πρέπει πρώτον να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά ταυτόχρονα να διαλύονται στο νερό και έτσι να υπάρχει δυνατότητα

αφαίρεσής τους και να παράγεται ο επιθυμητός μεταλλικός αφρός. Κατά τη μέθοδο αυτή μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα λόγω της επιφανειακής τάσης μεταξύ του υγρού μετάλλου και των κόκκων. Η μέθοδος της χύτευσης διευκολύνεται δημιουργώντας κενό ή ασκώντας πίεση. Η διαδικασία αυτής της τελευταίας μεθόδου χύτευσης γύρω από σφαίρες σωματιδίων απεικονίζεται στην εικόνα 2.1.1.2: [7]



2.1.1.2 Παραγωγή μεταλλικού αφρού με χύτευση γύρω από σφαιρικά σωματίδια. [7]

2.1.2 Παραγωγή μεταλλικών αφρών από σκόνη μετάλλου

Στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν μέθοδοι όπου το μέταλλο από το οποίο θα προκύψει και ο μεταλλικός αφρός βρίσκεται σε μορφή σκόνης (κονιορτοποιημένο), δηλαδή το μέταλλο είναι στη στερεή του φάση, στην οποία και παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια της μεθόδου που ακολουθείται. Έτσι το μητρικό υλικό στις τεχνικές αυτές δεν μεταπίπτει ποτέ στην υγρή φάση. Ορισμένες μέθοδοι ομοιάζουν με αντίστοιχες μεθόδους που περιγράφηκαν στη κατηγορία της χύτευσης προηγουμένως.

Ένας τρόπος παραγωγής του μεταλλικού αφρού σε αυτή τη κατηγορία, είναι η απευθείας πυροσυσσωμάτωση της σκόνης του μετάλλου. Με τη τεχνική της πυροσυσσωμάτωσης παράγεται αφρός με πορώδες της τάξης 20-50 %. Για να δημιουργηθεί το πορώδες, συνήθως γίνεται χρήση κάποιου υλικού το οποίο καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ των κόκκων της σκόνης μετάλλου και στη συνέχεια κατά την διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης το υλικό αυτό εξατμίζεται. [20]

Μια διαφορετική μέθοδο αποτελεί η συμπίεση της σκόνης του μετάλλου σε αρχικό στάδιο. Στη συνέχεια διοχετεύεται στη συμπιεσμένη σκόνη ένα αέριο. Το υλικό

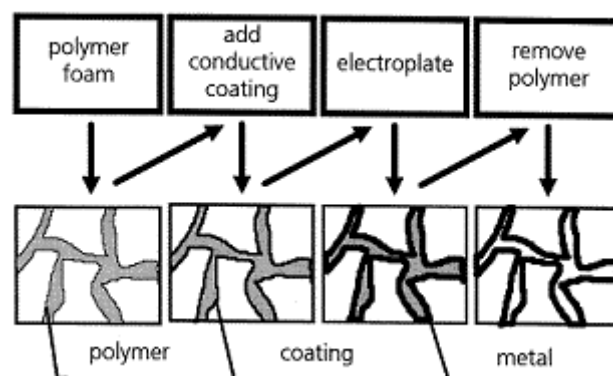
θερμαίνεται και το μέταλλο διογκώνεται λόγω της πίεσης που του ασκείται από το αέριο που έχει μπει στο εσωτερικό του. Και με τη μέθοδο αυτή το ποσοστό του πορώδους φτάνει σε παρόμοιες τιμές με την προηγούμενη μέθοδο, έως 50 %. [21]

Τέλος μια άλλη περίπτωση χρήσης σκόνης μετάλλου είναι αυτή όπου μπορεί να προστεθεί αφροποιητικός παράγοντας, ομοίως με την περίπτωση που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, με το τηγμένο μέταλλο. Σε περίπτωση εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνικής σημαντική είναι η σταθεροποίηση του μείγματος. [22]

2.1.3 Παραγωγή μεταλλικών αφρών από ατμό ή ιόντα μετάλλων

Στην περίπτωση παραγωγής μεταλλικού αφρού από ατμό, γίνεται πρώτα παραγωγή μεταλλικού ατμού σε θάλαμο κενού με χρήση, για παράδειγμα, ηλεκτρικού τόξου. Στη συνέχεια ο μεταλλικός αυτός ατμός συμπυκνώνεται στην επιφάνεια ενός στερεού υλικού, το οποίο συνήθεστερα είναι πολυμερικό, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα στρώμα, που έχει πάχος τόσο μεγαλύτερο, όσο περισσότερος είναι και ο χρόνος εναπόθεσης στην επιφάνεια και εξαρτάται και από την πυκνότητα του μετάλλου. Μετά το στρώμα ψύχεται και στερεοποιείται και ακολουθεί η αφαίρεση του πολυμερούς με θερμική ή χημική διεργασία. Το υλικό που απομένει έχει τη δομή μεταλλικού αφρού, και υφίσταται πυροσυσσωμάτωση, έτσι ώστε να ενισχυθούν οι δεσμοί μεταξύ των πόρων. [7]

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στη μέθοδο εναπόθεσης ιόντων μετάλλου σε μια πολυμερική επιφάνεια, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (2.1.3.1):



2.1.3.1 Διαδικασία εναπόθεσης ιόντων για την παραγωγή μεταλλικού αφρού. [7]

2.2 Μέθοδοι παραγωγής μεταλλικών αφρών

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή συγκεκριμένων τεχνολογιών παραγωγής μεταλλικών αφρών, που κάνουν χρήση κάποια εκ των γενικών μεθόδων (αναλόγως τη φάση που βρίσκεται το βασικό μέταλλο), που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Πιο συγκεκριμένα, για να παραχθεί ένας μεταλλικός αφρός, το αρχικό μέταλλο όπως ειπώθηκε, είναι δυνατό να βρίσκεται είτε σε υγρή μορφή είτε σε μορφή πούδρας-σκόνης, ή στη μορφή ατμού, ή και στη μορφή ιόντων. Βάσει του Banhart λοιπόν, όλες οι μέθοδοι παραγωγής μεταλλικών αφρών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω τέσσερις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με την αρχική κατάσταση του υπό επεξεργασία μετάλλου: ^[7]

- i. Μέθοδοι τηγμένου μετάλλου (χύτευσης),
- ii. μέθοδοι παραγωγής από μέταλλο σε μορφή σκόνης (κονιομεταλλουργίας),
- iii. μέθοδοι παραγωγής από ατμό μετάλλων ή από αέριο μεταλλικό μίγμα (εναπόθεσης μετάλλων), και τέλος
- iv. μέθοδοι παραγωγής από διαλύματα μεταλλικών ιόντων.

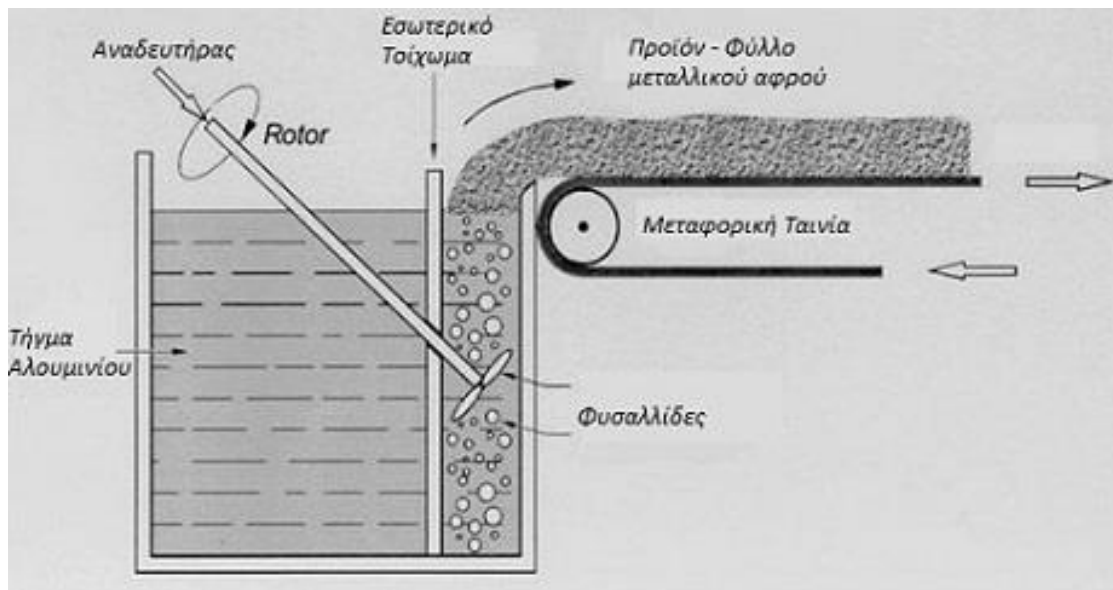
2.2.1 Μέθοδοι χύτευσης

Οι αφροί μεταλλικών τηγμάτων, όπως λέγονται, απαιτούν αρχικά την τήξη του μετάλλου που πρόκειται να αφροποιηθεί. Οι βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών από τηγμένο μέταλλο, περιγράφονται στη συνέχεια.

2.2.1.a Η τεχνολογία Alcan/Norsk

Η συγκεκριμένη τεχνολογία ακολουθεί τα εξής βήματα: Για αρχή, στο τηγμένο μέταλλο προστίθεται αλουμίνιο (Al), καρβίδιο του πυριτίου (SiC), ή οξειδίο του αργιλίου (Al_2O_3), σε ποσοστό 10-15 % προκειμένου να αυξηθεί το ιξώδες του τήγματος. Στη συνέχεια προστίθεται αέριο, άζωτο ή αργό, αναδεύοντας συνεχώς το τήγμα με περιστρεφόμενη προπέλα. Το επιπλέον υγρό, με εγκλωβισμένο αέριο, απομακρύνεται από την επιφάνεια του παραγόμενου

υλικού μέσω μεταφορικής ταινίας. Έτσι γίνεται παραγωγή φύλλου μεταλλικού αφρού με πορώδες 80-97%. [14]



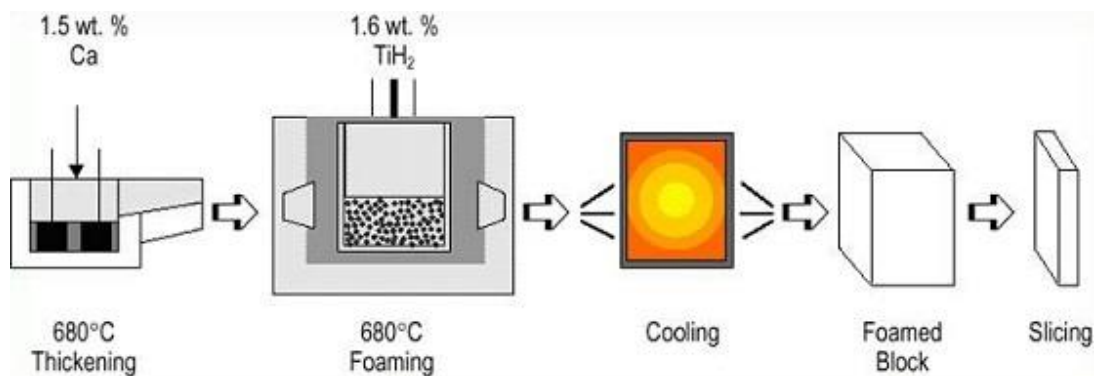
2.2.1.a 1 Παραγωγή μεταλλικού αφρού με τεχνολογία Alcan/Norsk Hydro [7]

2.2.1.b Η τεχνολογία Alporas

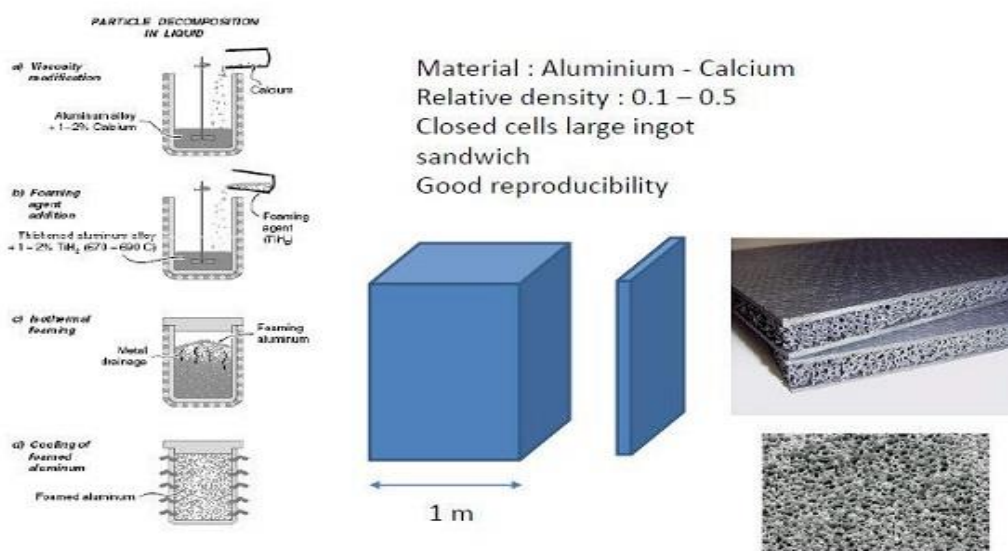
Η τεχνολογία παραγωγής που αναλύεται σε αυτή τη παράγραφο ονομάζεται Alporas, και ανήκει στην ιαπωνική εταιρία Shinko Wire. Η εν λόγω τεχνολογία αποτελείται από τα στάδια που ακολουθούν: Αρχικά, στο τηγμένο αλουμίνιο γίνεται προσθήκη ασβεστίου σε ποσοστό 1,5 % στους 680 °C, έτσι ώστε να αυξηθεί το ιξώδες του μετάλλου. Στη συνέχεια λαμβάνει μέρος η ανάδευση του τήγματος για 6 λεπτά της ώρας σε κανονικό περιβάλλον. Με αυτή τη διαδικασία προκύπτει ένα πυκνότερο τήγμα το οποίο μεταγγίζεται σε καλούπι χύτευσης. Εκεί γίνεται ανάδευση εκ νέου, με περιστρεφόμενη προπέλα, ενώ παράλληλα γίνεται προσθήκη αφριστικού παράγοντα, του υδρίδιου του τιτανίου (TiH_2).

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας προκαλείται αποσύνθεση του υδρίδιου, και εκλύεται αέριο υδρογόνου. Με αυτό το τρόπο σχηματίζεται ο μεταλλικός αφρός, ο οποίος διαστέλλεται έως ότου να γίνει πλήρωση του καλουπιού χύτευσης, μέσα σε ένα διάστημα 15 min. Έπειτα ακολουθεί η ψύξη του αφρού με χρήση ανεμιστήρων. Ο μεταλλικός αφρός στερεοποιείται και οι «χελώνες» αφρού που προκύπτουν έχουν πορώδες της τάξης 89%-93%. Οι «χελώνες» αυτές μπορούν στη συνέχεια να κοπούν σε φύλλα επιθυμητού πάχους. [14] Η προηγούμενη διαδικασία

φαίνεται εποπτικά στην εικόνα 2.2.1.b.1, και μετά, στην εικόνα 2.2.1.b.2, εμφανίζεται ένα δείγμα παρασκευής αφρού με τη μέθοδο αυτή:



2.2.1.b 1 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής Alporas [125]

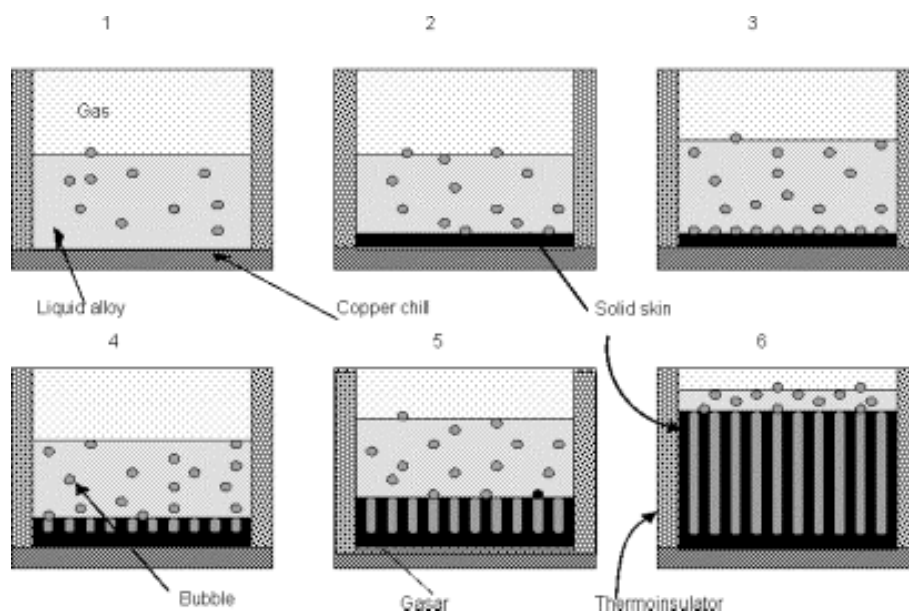


2.2.1.b 2 Δείγμα αφρού αλουμινίου παραγόμενου με τη μέθοδο Alporas [8]

2.2.1.c Η τεχνολογία Gasar

Μία άλλη τεχνολογία παραγωγής αφρών αλουμινίου από τηγμένο μέταλλο είναι η τεχνολογία Gasar. Η συγκεκριμένη τεχνολογία στηρίζεται στη μεταβολή της διαλυτότητας (ικανότητα της ουσίας να διαλύεται μέσα σε άλλη) του υδρογόνου σε συνθήκες αυξημένης πίεσης. Συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η πίεση, αυξάνεται και η διαλυτότητα του υδρογόνου εντός του τήγματος. Η τήξη του μετάλλου γίνεται μέσα σε αυτόκλειστο. Στη συνέχεια, αφού το ποσοστό του αερίου

υδρογόνου αυξηθεί, το τήγμα μεταγγίζεται μέσα σε καλούπι που είναι επίσης εντός του αυτόκλειστου. Μετά η πίεση μειώνεται έτσι ώστε να γίνει κατευθυνόμενα η στερεοποίηση του μεταλλικού αφρού, με αποτέλεσμα το υδρογόνο να παγιδευτεί στο μέτωπο στερεοποίησης σε μακρόστενους πόρους. Με τη διαδικασία αυτή παράγεται αφρός με χαμηλό πορώδες, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 5-75 %. [14], [20] Η τεχνολογία Gasar παρουσιάζεται εποπτικά στην επόμενη εικόνα (2.2.1.c.1):



2.2.1.c 1 Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας Gasar [126]

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι, στις οποίες παράγεται μεταλλικός αφρός από τηγμένο μέταλλο που εγχύεται σε κάποιο καλούπι. Ένα παράδειγμα είναι αυτό όπου χρησιμοποιείται αρχικά δικτυωμένος αφρός πολυουρεθάνης. Αυτός ο αφρός βυθίζεται σε θερμοανθεκτικό υλικό, ώστε να δημιουργηθεί το καλούπι. Μετά ακολουθεί ξήρανση του θερμοανθεκτικού υλικού, και αφαιρείται ο αφρός της πολυουρεθάνης. Στο καλούπι που δημιουργείται εγχύεται το χυτό μέταλλο. Ακολούθως, γίνεται αφαίρεση του μεταλλικού αφρού από το καλούπι με χρήση νερού υπό πίεση. Ο παραγόμενος μεταλλικός αφρός αυτής της παραγωγικής διαδικασίας, έχει πόρους με ανοικτού τύπου κελιά, και το πορώδες του είναι της τάξης είναι 80% ως 97% . Άλλη περίπτωση αποτελεί το παράδειγμα αφρού που παράγεται αν το τηγμένο μέταλλο εκχυθεί σε όγκο πληρωτικού υλικού που έχει τη μορφή ανόργανων κόκκων ή κούφιων σφαιρών. [14], [20]

2.2.1.d Χύτευση δύο σταδίων – Duocel

Πρόκειται για μια μέθοδο που εφαρμόστηκε πρώτη φορά το 1968 από την εταιρία E.R.G. (Energy Research and Generation USA), με την εμπορική ονομασία Duocel. Τα στάδια για την παραγωγή πορώδους μετάλλου με ανοικτού τύπου κυψελίδες περιγράφονται ακολούθως: ^[20]

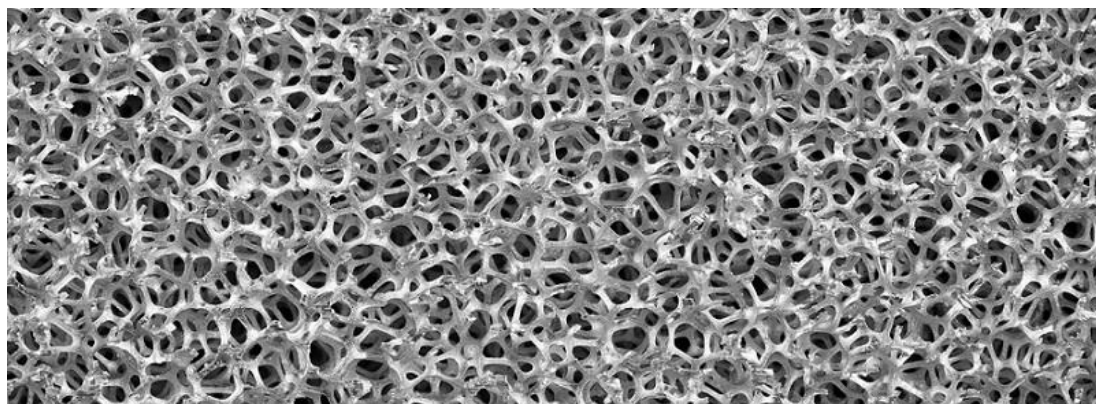
- i. Στην αρχή δημιουργείται πολυμερικός αφρός με τη μορφή που είναι επιθυμητό να έχει ο τελικός μεταλλικός αφρός.
- ii. Στη συνέχεια πραγματοποιείται χύτευση μίγματος κεραμικών υλικών (πρώτο στάδιο χύτευσης), όπως μολύβδης, φαινολική ρητίνη, ανθρακικό ασβέστιο, και καλύπτεται ο κενός χώρος του πολυμερικού αφρού.
- iii. Το κεραμικό μίγμα στερεοποιείται και στη συνέχεια θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία (καύση) προκειμένου να αφαιρεθεί ο πολυμερικός αφρός.
- iv. Προστίθεται το μεταλλικό τήγμα με χύτευση (δεύτερο στάδιο χύτευσης) στους κενούς χώρους του κεραμικού υλικού, που δημιουργήθηκαν μετά την αφαίρεση της πολυμερικής μήτρας.
- v. Τέλος πραγματοποιείται απομάκρυνση του κεραμικού υλικού πλήρωσης, είτε με μηχανικό τρόπο ή με νερό υπό πίεση, και απομένει ο μεταλλικός αφρός. ^[20]

Σημαντικό στην όλη διαδικασία Duocel, είναι η προσοχή που πρέπει να δοθεί στον τρόπο χύτευσης του μετάλλου και στον τρόπο αφαίρεσης του πληρωτικού υλικού προκειμένου να προκύψει η επιθυμητή μορφή του μεταλλικού αφρού.

Επιπρόσθετα θα πρέπει να γίνει χρήση υψηλής πίεσης για να τηχθεί το μέταλλο, έτσι ώστε να μειωθεί σημαντικά το ιξώδες του υγρού μετάλλου, η χύτευση πρέπει να γίνει με υψηλή πίεση, η αναρρόφηση του μετάλλου με αντλία κενού και η στερεοποίηση χρειάζεται να είναι κατευθυνόμενη. Αν ακολουθηθούν οι συνθήκες που περιγράφηκαν προηγουμένως, το τηγμένο μέταλλο εισέρχεται στον κενό χώρο που έχει δημιουργηθεί με την αφαίρεση του πολυμερούς. ^[22]

Πρόκειται για μια μέθοδο με την οποία παράγονται μεταλλικοί αφροί πολύπλοκων δομών με ανοικτού τύπου κελιά. Οι κυψελίδες έχουν την κατανομή η οποία έχει επιλεγεί αρχικά για να δημιουργηθεί ο πολυμερικός αφρός (συνήθως ομοιόμορφη). Ωστόσο η εν λόγω μέθοδος έχει υψηλό κόστος, ενώ ταυτόχρονα παραπροϊόντα που δημιουργούνται είναι επιβαρυντικά για το περιβάλλον. Ένα

ακόμα μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι και ο περιορισμός στο μέγεθος του τελικού προϊόντος που δύναται να κατασκευαστεί. [20], [22]



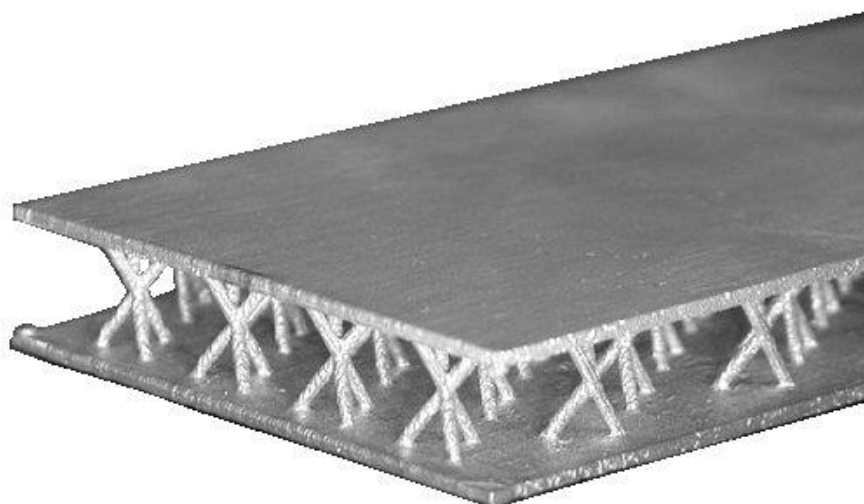
2.2.1.d 1 Μεταλλικός αφρός Duocel με κυψελοειδή ανοικτή δομή [127]

2.2.1.e Δημιουργία τρισδιάστατης δικτυωτής δομής

Η εταιρία Jonathan Aerospace Materials Corporation (JAMCORP) είναι μια από τις πρώτες εταιρίες που έφτιαξαν υλικά δικτυωτής δομής, υλικά δηλαδή με δομή τρισδιάστατου πλέγματος. Αυτά τα υλικά αποτελούνται από συμμετρικό μοτίβο το οποίο επαναλαμβάνεται είτε στις δύο είτε στις τρεις διαστάσεις. Η δομή τους αυτή ονομάζεται συντακτική ή περιοδική. Τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν μόνο στατιστική ομοιομορφία ονομάζονται στοχαστικά. [23]

Στη μέθοδο δημιουργίας μεταλλικών αφρών τρισδιάστατης δικτυωτής δομής, το πρώτο βήμα είναι η κατασκευή πολυμερικού προτύπου αφρού με κατάλληλη δικτυακή δομή. Αφού δημιουργηθεί το πολυμερικό πρότυπο ακολουθεί χύτευση του τηγμένου μετάλλου, που καθώς εγχύεται παίρνει τη θέση του πολυμερικού αφρού ενώ αυτός εξαερώνεται. Λόγω της συμμετρικής δομής που έχει το αρχικό πρότυπο, η διαδικασία της χύτευσης είναι πιο εύκολη και οι ατέλειες ελαχιστοποιούνται.

Η διαδικασία μπορεί να γίνει με όλα τα χυτεύσιμα μέταλλα, αλλά προτιμώνται όσα έχουν ικανοποιητική ρευστότητα. Στην επόμενη εικόνα (2.2.1.e.1) φαίνεται ένα τετραεδρικό πλέγμα με δικτυωτή δομή το οποίο παράχθηκε με την πιο πάνω διαδικασία. Αρχικά δημιουργήθηκε το πολυμερικό πρότυπο, που στη συνέχεια αντικαταστάθηκε από χυτό κράμα μετάλλου. [23]



2.2.1.e 1 Τετραεδρικό πλέγμα με δικτυακή δομή από χύτευση σε πολυμερικό πρότυπο [128]

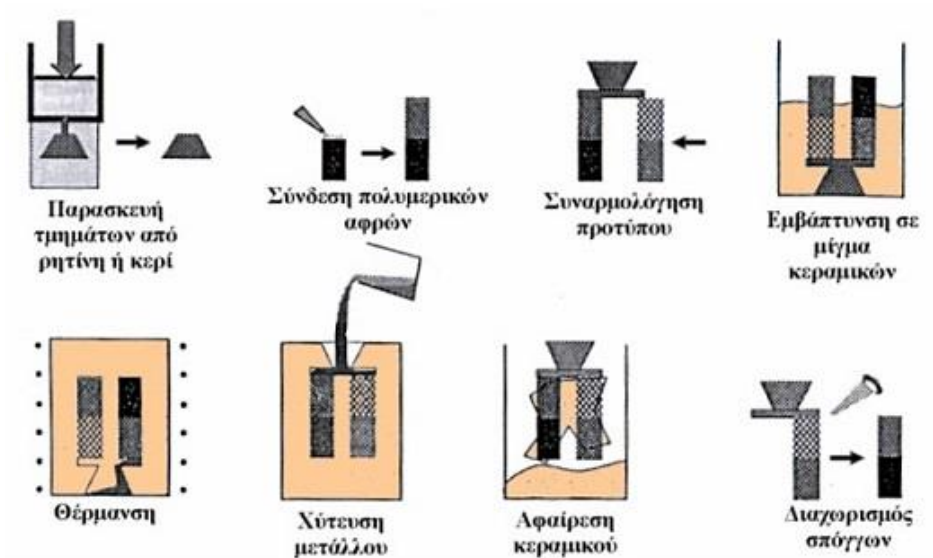
2.2.1.f Δημιουργία μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους

Αυτή η τελευταία μέθοδος που περιγράφεται εδώ αποτελεί μια παραλλαγή της μεθόδου Duocel. Επίσης βασίζεται στη δημιουργία αναλώσιμων προτύπων πολυμερικού αφρού, διαφορετικού πορώδους. Έτσι διαφορετικά πρότυπα συνενώνονται μεταξύ τους με κερί ή ρητίνη, δημιουργώντας ένα επιθυμητό ενιαίο πρότυπο, το οποίο εμβαπτίζεται σε μίγμα κεραμικών.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της θέρμανσης, όπου λιώνει το κερί ή η ρητίνη, ενώ ταυτόχρονα στερεοποιείται και ξηραίνεται το κεραμικό περίβλημα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται το καλούπι για τη χύτευση του τηγμένου μετάλλου και την κατασκευή του μεταλλικού σπόγγου.

Με τη χρήση της παραπάνω μεθόδου είναι δυνατή η δημιουργία μεταλλικών σπόγγων που φέρουν ταυτόχρονα δύο ή και παραπάνω διαφορετικά μεγέθη πορώδους, που στο τέλος μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους. Υπάρχουν όμως και ειδικές εφαρμογές, στις οποίες απαιτείται να μεταβάλλεται το πορώδες με ομαλό τρόπο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υλικό χωρίς να γίνει διαχωρισμός.

Ορισμένες φορές, ο μεταλλικός σπόγγος χρησιμοποιείται για να αποτελέσει μήτρα για χύτευση ενός δεύτερου μετάλλου ή κράματος, και το υλικό που παράγεται φέρει ιδιότητες εξαρτώμενες από το τοπικό πορώδες του σπόγγου.^[21] Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται εποπτικά στην εικόνα 2.2.1.f.1.^[21] Στην εικόνα 2.2.1.f.2, παρουσιάζεται η διεπιφάνεια μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικού πορώδους:



2.2.1.f1 Απεικόνιση της μεθόδου παρασκευής μεταλλικών σπόγγων μεταβλητού πορώδους. [21]



2.2.1.f2 Διεπιφάνεια μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικού πορώδους. [21]

2.2.2 Μέθοδοι κονιομεταλλουργίας (PM, Powder Metallurgy)

Οι μέθοδοι της κονιομεταλλουργίας, αφορούν στην παραγωγή μεταλλικού αφρού από μεταλλική σκόνη, ή αλλιώς μεταλλική πούδρα, αντί για τις μεθόδους με τηγμένο μέταλλο που περιγράφηκαν προηγουμένως. Σε αυτές τις μεθόδους, η μεταλλική σκόνη ανακατεύεται με μία άλλη σκόνη, που έχει τον ρόλο του αφριστικού παράγοντα (foaming agent). Ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται και

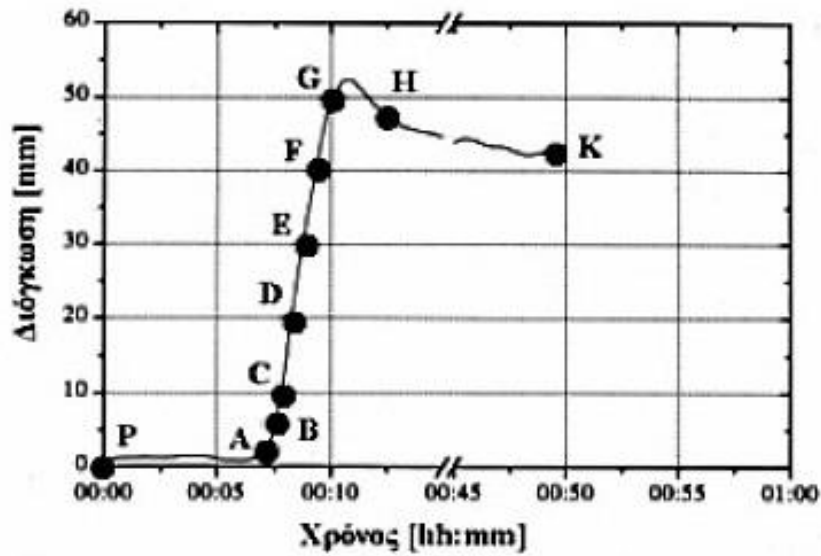
κάποια άλλα πρόσθετα σε μορφή σκόνης, τα οποία βοηθούν στη σταθεροποίηση της δομής (stabilizing agents). Η ανάπτυξη της μεθόδου αυτής, ξεκίνησε από ινστιτούτο Fraunhofer-IFAM στη Γερμανία, πλέον όμως εφαρμόζεται και από εταιρίες με την εμπορική ονομασία Foaminal (IFAM) και Alulight.^[24]

Η μεταλλική σκόνη συνήθως αποτελείται από καθαρό αλουμίνιο, αλλά μπορεί επίσης να αποτελείται από κράμα αλουμινίου με χαλκό, με μαγνήσιο και πυρίτιο, καθώς και από κράματα χύτευσης (AlSi7 ή AlSi12). Τα κράματα χύτευσης έχουν καλή αφριστικότητα, λόγω και του χαμηλού σημείου τήξης τους. Για την αφροποίηση του αλουμινίου και των κραμάτων του, χρησιμοποιείται συνήθως αφριστικός παράγοντας TiH_2 (υδρίδιο του τιτανίου) που αναμειγνύεται με τη μεταλλική σκόνη σε περιεκτικότητα 0,4-0,6 % κ.β. Αντίστοιχα για την αφροποίηση κραμάτων αλουμινίου και ψευδαργύρου χρησιμοποιείται ZrH_2 (υδρίδιο του ζirkονίου), ενώ για τους χάλυβες χρησιμοποιείται $SrCO_3$ (ανθρακικό στρόντιο).^[24]

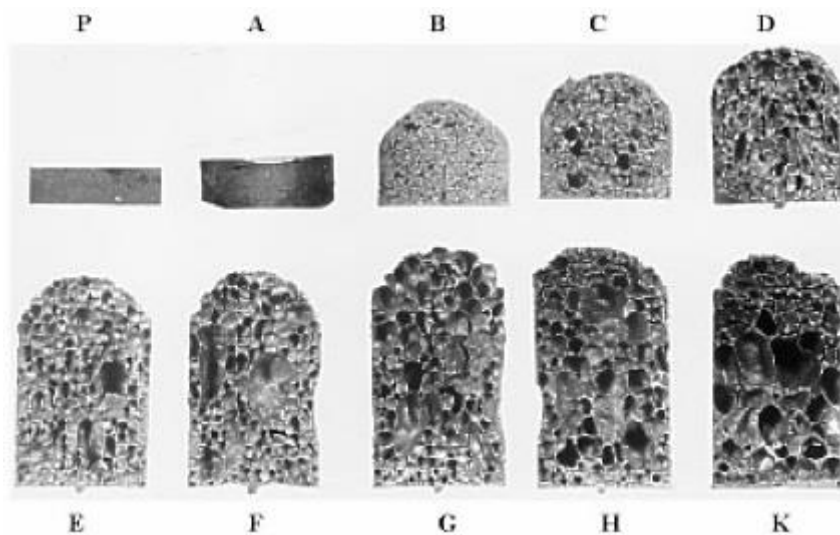
Μετά και την ανάμιξη του αφριστικού παράγοντα (και ενδεχομένως των σταθεροποιητικών παραγόντων), το μίγμα συμπιέζεται ώστε να δημιουργηθεί ένα πυκνό, ημιτελικό προϊόν, το λεγόμενο και πρόδρομο δοκίμιο.^[14]

Στη συνέχεια ακολουθεί θερμική διεργασία του συμπιεσμένου μείγματος κοντά στο σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας και απαραίτητως σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή της αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα. Με αυτή τη διαδικασία, επιδιώκεται η αποσύνθεση του αφριστικού παράγοντα ώστε να εκλυθεί αέριο υδρογόνο (στην περίπτωση του υδρίδιου του τιτανίου), το οποίο εγκλωβισμένο στη στερεά ουσία, οδηγεί στη διόγκωση του υλικού και στην δημιουργία πόρων με κλειστού τύπου κελιά. Το πόσο θα διαρκέσει η διαδικασία της αφροποίησης εξαρτάται από τη σύσταση του μείγματος, τη θερμοκρασία που εφαρμόζεται στο πρόδρομο δοκίμιο και τον όγκο του συμπιεσμένου υλικού, και συνήθως κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα ως μερικά λεπτά. Το πορώδες αυτών των αφρών κυμαίνεται από 60 % ως 85 %.

Το μείγμα αφροποιείται μέχρι ένα μέγιστο βαθμό, που όταν ξεπεραστεί αυτό το σημείο, οι πόροι που έχουν αναπτυχθεί αρχίζουν να «καταρρέουν», να συγχωνεύονται δηλαδή μεταξύ τους και να μικραίνει το πορώδες. Για να σταματήσει η αφροποίηση (συμπεριλαμβανομένου της φάσης κατάρρευσης), πρέπει το υλικό να ψυχθεί σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του σημείου τήξης της μεταλλικής μήτρας. Στο διάγραμμα 2-1 και την εικόνα 2.2.2.1 φαίνεται η εξέλιξη της αφροποίησης, σε κάποια χρονικά στιγμιότυπα:^{[14],[24]}



2-1 Αφροποίηση δοκιμίου AlSi7 συναρτήσει του χρόνου [22]



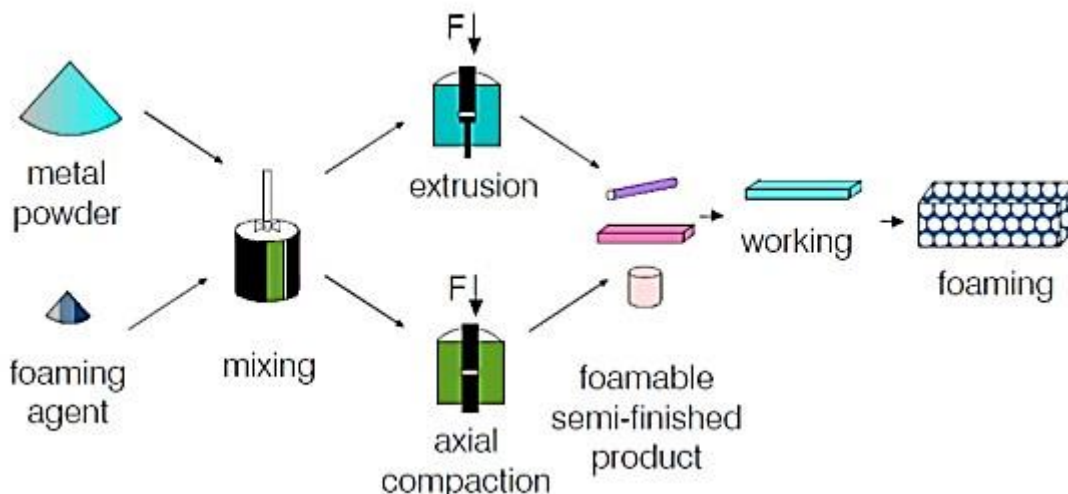
2.2.2.1 Μορφολογία δοκιμίου AlSi7σε διαφορετικά στιγμιότυπα της αφροποίησης [22]

Οι συνθήκες συμπίεσης (τεχνολογία που χρησιμοποιείται, θερμοκρασία, πίεση, χρόνος συμπίεσης, βαθμός παραμόρφωσης), η ποιότητα της μεταλλικής σκόνης (τύπος, κοκκομετρία, είδος κράματος, συνθήκες ανάμιξης, ομοιομορφία σύστασης), οι συνθήκες κατά τη διαδικασία αφροποίησης (θερμοκρασία, ρυθμός θέρμανσης, χρόνος ψύξης) καθώς και η γεωμετρία του ημιτελικού προϊόντος, είναι όλοι παράγοντες που επηρεάζουν στην τελική ποιότητα του μεταλλικού αφρού. Τέλος η πυκνότητα του πορώδους εξαρτάται και από την περιεκτικότητα του αρχικού μείγματος σε αφριστικό παράγοντα, τη θερμοκρασία και το ρυθμό θέρμανσης. [20]

Στη συνέχεια περιγράφονται διαδεδομένες τεχνολογίες για παραγωγή μεταλλικών αφρών που βασίζονται στις μεθόδους κονιομεταλλουργίας.

2.2.2.a Τεχνολογία παραγωγής IFAM

Στη συγκεκριμένη τεχνολογία, αναμιγνύεται η μεταλλική σκόνη με τον αφριστικό παράγοντα και μέσω έλασης ή διέλασης παράγεται ένα ημιτελικό προϊόν το οποίο ύστερα από θερμική διεργασία αφροποιείται, εξαιτίας της αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα. ^[24] Στην παρακάτω εικόνα (2.2.2.a.1) διακρίνουμε τα στάδια που ακολουθούνται για παραγωγή αφρού αλουμινίου με χρήση της τεχνολογίας IFAM.

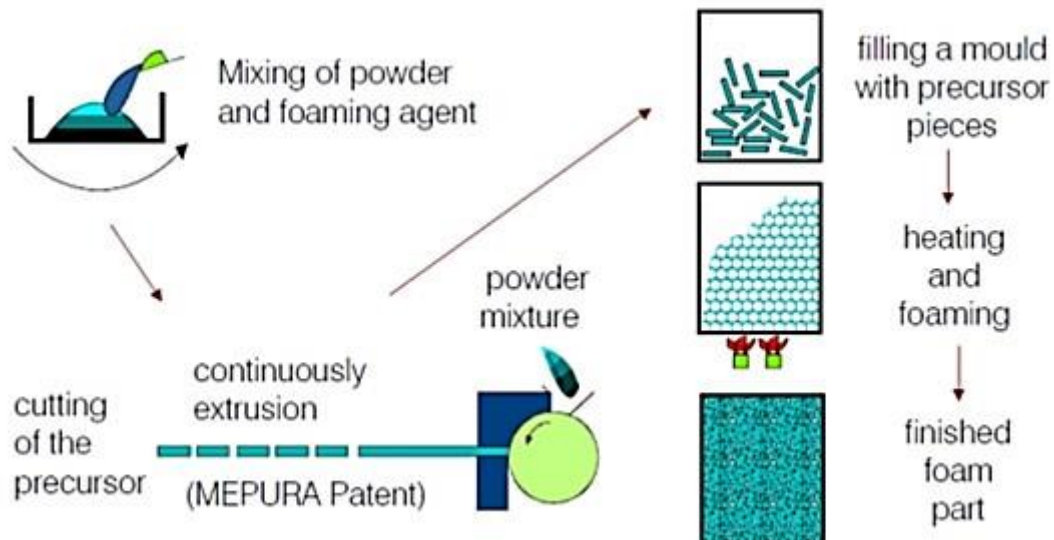


2.2.2.a 1 Παραγωγή αφρού αλουμινίου με χρήση της τεχνολογίας IFAM [129]

2.2.2.b Τεχνολογία παραγωγής MEPURA

Προκειμένου να παρασκευαστούν μεταλλικοί αφροί με συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα χρησιμοποιούνται καλούπια με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια. Σύμφωνα με την τεχνολογία παραγωγής MEPURA, αρχικά τοποθετείται σκόνη που έχει συμπιεστεί μαζί με αφριστικό παράγοντα στο καλούπι, και στη συνέχεια προσδίδεται θερμότητα στο καλούπι για να πραγματοποιηθεί η αποσύνθεση του αφριστικού παράγοντα. Με αυτό το τρόπο είναι δυνατό να κατασκευαστούν δομές τύπου σάντουιτς πολλών στρωμάτων, με συμπαγές εξωτερικό περίβλημα και πορώδες εσωτερικό. Στην ακόλουθη εικόνα

(2.2.2.b.1) παρουσιάζεται η εν λόγω τεχνολογία, όπου γίνεται παραγωγή πλαισίου με μεταλλικό αφρό στο εσωτερικό του. [14], [20]



2.2.2.b 1 Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία MEPURA. [9]

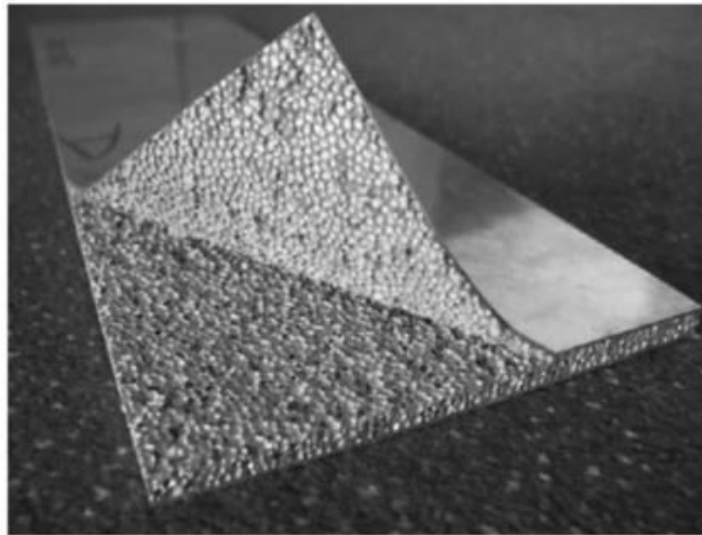
Στην τεχνολογία MEPURA το ημιτελικό προϊόν πρέπει να εισαχθεί σε καλούπι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ώστε να πάρει την επιθυμητή μορφή. Η διαδικασία της αεροποίησης γίνεται μέσα στο κλειστό καλούπι οπότε και το υλικό θα πάρει το σχήμα του αντίστοιχου καλουπιού.

Είναι επίσης εφικτή η ένωση κομματιών αφρού με κομμάτια μετάλλου. Στην εικόνα 2.2.2.b.2 φαίνονται διάφορα είδη σωλήνων, οι οποίοι στο εσωτερικό τους έχουν παραχθεί με αυτή τη τεχνολογία.[14]

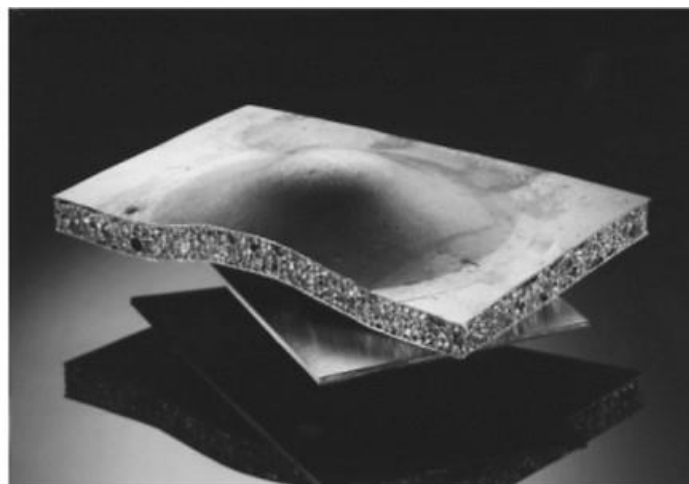


2.2.2.b 2 Σωλήνες γεμισμένοι με αφρό αλουμινίου. [24]

Στη συγκεκριμένη φωτογραφία συμπιεσμένο μίγμα σκόνης και αφριστικού παράγοντα τοποθετήθηκε στο εσωτερικό των κοίλων κυλίνδρων πρώτα, και έπειτα οι σωλήνες θερμάνθηκαν. Το σημείο τήξης του μεταλλικού αφρού πρέπει να είναι χαμηλότερο από το σημείο τήξης του υλικού των κυλίνδρων. Με τον ίδιο τρόπο είναι δυνατό να παραχθούν φύλλα αλουμινίου σε μορφή σάντουιτς που περιέχουν στο εσωτερικό τους μεταλλικό αφρό. Τα φύλλα αλουμινίου μπορούν να κολληθούν σε ένα φύλλο αφρού ή διαφορετικά μπορεί να γίνει η διεργασία της έλασης, αφού έχουν ήδη τοποθετηθεί πάνω και κάτω από το πρόδρομο υλικό, προκειμένου να δημιουργηθούν μεταλλικοί δεσμοί στις επαφές μετάλλου και αφρού.



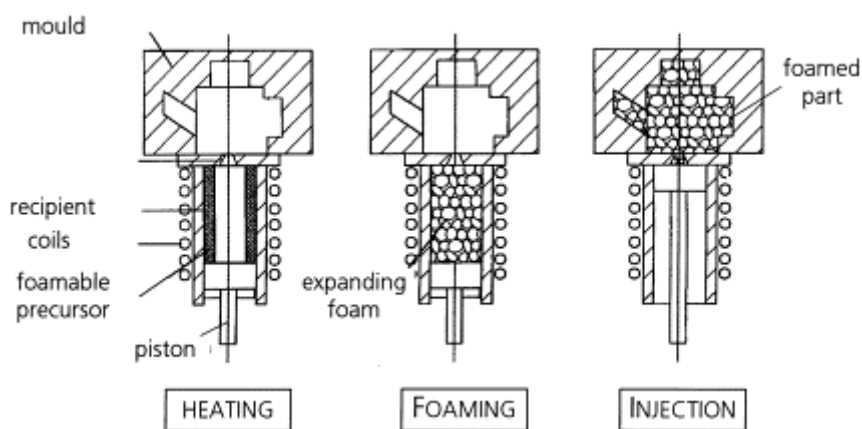
2.2.2.b 3 Πολυστρωματικό πάνελ αλουμινίου [130]



2.2.2.b 4 Πάνελ τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου. [7]

2.2.2.c Παραγωγή αφρού με πολύπλοκο σχήμα

Πολύπλοκα σχήματα μπορούν να παραχθούν αν εισάγουμε με κάποιο τρόπο ένα διογκωμένο, υγρό αφρό σε καλούπι με την πολύπλοκη μορφή που επιθυμούμε και εκεί να γίνει η τελική φάση της διόγκωσης. Με τη διαδικασία αυτή παράγονται τελικά προϊόντα που έχουν πυκνότητα μεταξύ 0,5-1 gr/cm³. Η αρχή αυτής της τεχνολογίας είναι παρόμοια με αυτή της διαδικασίας ΜΕΡΥΡΑ π.χ. μίξη πούδρας αλουμινίου με αφριστικό παράγοντα και συνεχής διέλαση για να παραχθεί ένα συμπαγές πρόδρομο υλικό που στη συνέχεια θα αφροποιηθεί. Η διαφορά σε αυτή τη διαδικασία είναι πως σε αυτή την περίπτωση το πρόδρομο υλικό θερμαίνεται σε ένα θάλαμο αφροποίησης έως το σημείο τήξης του κράματος ώστε να προκύψει υγρός αφρός. Αυτός ο αφρός χυτεύεται με ελεγχόμενο τρόπο σε μεταλλικό καλούπι ή σε καλούπι από άμμο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η παραγωγή σε μεγάλη ή σε μικρή κλίμακα και η δημιουργία πρωτοτύπων σε ικανοποιητικό κόστος. Τέτοια κομμάτια αφρού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυρήνες στην χύτευση υπό πίεση του αλουμινίου.

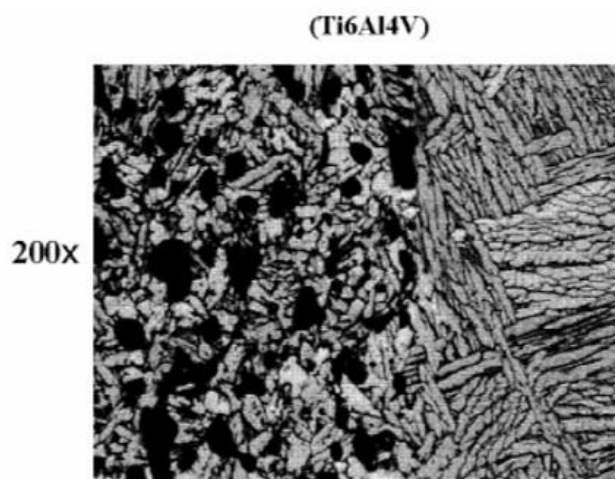


2.2.2.c 1 Απεικόνιση παραγωγής πολύπλοκων τεμαχίων μεταλλικών αφρών. [7]

2.2.2.d Τεχνολογίες παραγωγής που χρησιμοποιούν παγιδευμένο αέριο

Ένας μεταλλικός αφρός, μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας ένα παγιδευμένο αέριο όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Η σκόνη του μετάλλου εισάγεται σε έναν ασφυκτικά κλειστό θάλαμο και στη συνέχεια εισάγεται στο θάλαμο ένα αέριο υπό πίεση, π.χ. αργό. Το αέριο γεμίζει όλα τα κενά που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων. Μετά το μίγμα αυτό θερμαίνεται, και οι κόκκοι της σκόνης φτάνουν στο

σημείο τήξης τους και ενώνονται μεταξύ τους, παγιδεύοντας το αέριο. Η παραχθείσα χελώνα υφίσταται έλαση και θερμαίνεται, έτσι το παγιδευμένο αέριο εκτονώνεται και παράγει ένα μεταλλικό αφρό (McDonell Douglas). Με τον τρόπο αυτό παράγονται σωλήνες με πορώδη πυρήνα, και είναι επίσης δυνατή η κατασκευή οποιουδήποτε άλλου γεωμετρικού σχήματος. Το μέταλλο παραμένει σε στερεή κατάσταση και άρα δεν καταπονούνται ιδιαίτερα τα εξωτερικά φύλλα. Συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελάσματα πολύ μικρού πάχους. ^{[14],[23]}

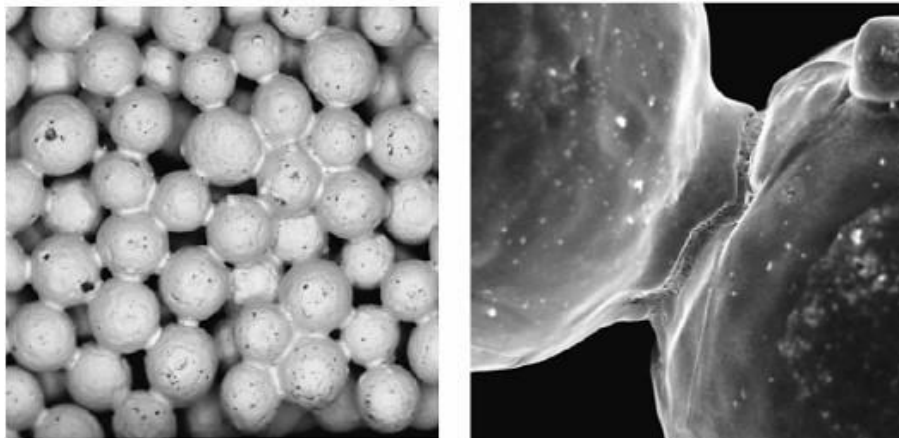


2.2.2.d 1 Σύνδεση πορώδους πυρήνα με το εξωτερικό φύλλο Ti6Al4V. [23]

2.2.2.e Τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών με πυροσυσσωμάτωση

Τέλος περιγράφεται η διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης κόνεων. Η εν λόγω διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την παραγωγή πορώδων δομών, κάνοντας χρήση μεταλλικών κόνεων. Σε αυτή τη περίπτωση, η μεταλλική σκόνη δεν μεταπίπτει ούτε στην υγρή ούτε στην ημιυγρή κατάσταση, αλλά μένει πάντα στη στερεή του φάση. Η εικόνα 2.2.2.e.1 παρουσιάζει δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα, όπου γίνεται αντιληπτή η δομή των κόκκων και των συνδέσμων που αναπτύσσονται από τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης. Όπως απεικονίζεται, το σφαιρικό σχήμα αντιστοιχεί στους κόκκους της σκόνης που έχουν διατηρήσει την αρχική τους μορφή, ενώ έχουν αναπτυχθεί λεπτοί σχηματισμοί οι οποίοι επιτυγχάνουν τη σύνδεση των κόνεων. Με αυτή τη διαδικασία, οι μεταλλικοί αφροί που κατασκευάζονται διαθέτουν ανοικτού τύπου κελιά, εν αντιθέσει με τη διαδικασία της αφροποίησης όπου παράγονται κλειστού

τύπου αφροί, λόγω των αναπτυσσόμενων επιφανειακών τάσεων που οδηγούν σε σφαιροποίηση των πόρων. [25]



2.2.2.e 1 (Αριστερά) Κόκκοι μετά τη πυροσυσσώματωση, (Δεξιά) Κοντινή άποψη σύνδεσης. [25]

Τα βασικά στάδια της διαδικασίας της πυροσυσσώματωσης, είναι α) κλασματοποίηση της μεταλλικής σκόνης, β) συμπίεση ή τοποθέτηση σε καλούπι και γ) θέρμανση. Οι συνθήκες που εφαρμόζονται για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία διαφέρουν για το κάθε υλικό.

Για παράδειγμα στην περίπτωση του μπρούντζου $\text{Cu}_{89}\text{Sn}_{11}$, δεν εφαρμόζεται επιπλέον συμπίεση ενώ η θερμοκρασία συσσωμάτωσης φτάνει τους $820\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το πορώδες που επιτυγχάνεται κυμαίνεται από 20 % έως 50 % και ο αφρός χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή μηχανική αντοχή. Σε άλλα υλικά συνήθως εφαρμόζεται συμπίεση πριν τη θέρμανση. Η αξονική συμπίεση σε καλούπι, η ισοστατική συμπίεση και η εν θερμώ εξέλαση προκαλούν σύνδεση εν ψυχρώ των κόκκων αυξάνοντας έτσι την αντοχή του μεταλλικού αφρού. Τα μεταλλικά υλικά, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εμπορικές εφαρμογές, είναι το καθαρό αλουμίνιο και τα κράματά του, το τιτάνιο (Ti) και τα κράματά του, οι μπρούντζοι και οι ανοξείδωτοι χάλυβες. [26]

Αναφορικά με το καθαρό αλουμίνιο και τα κράματά του, η εν θερμώ σύνδεση επιτυγχάνεται δύσκολα εξαιτίας του επιφανειακού στρώματος της αλούμινας (Al_2O_3) που αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα ευρείας χρήσης του εν λόγω μετάλλου. Έτσι αρχικά εφαρμόζεται συμπίεση, ώστε με την αναπτυσσόμενη μηχανική πίεση να προκληθεί θραύση του στρώματος οξειδίου και να γίνει εφικτή η σύνδεση των κόκκων μεταξύ τους. Αρνητικό σε αυτή τη διαδικασία είναι ότι η συμπίεση προκαλεί παράλληλα μείωση του τελικού πορώδους. Έτσι προκύπτει

ανάγκη προσθήκης επιπλέον σκόνης μετάλλου ως στοιχείο του κράματος, όπως χαλκός, μαγνήσιο ή πυρίτιο τα οποία βοηθάνε στη δημιουργία ευτηκτικών φάσεων, οι οποίες απαιτούν χαμηλότερη θερμοκρασία για την πυροσυσσώματωση και τη σύνδεση των κόκκων, περίπου 595 – 625 °C. ^[27]

2.2.3 Μέθοδοι εναπόθεσης μετάλλου

Πρόκειται για μία μέθοδο παραγωγής μεταλλικών αφρών, χημικής διεργασίας και για το λόγο αυτό δεν δύναται να ενταχθεί στις κατηγορίες παραγωγής μεταλλικών αφρών που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Η αρχή αυτής της μεθόδου βασίζεται στη δημιουργία ενός κολλοειδούς κρυσταλλικού προτύπου από μικροσφαιρίδια οξειδίου του πυριτίου. Η διείσδυση του μετάλλου γίνεται είτε με χημική μετατροπή, είτε με κατευθυνόμενη εισαγωγή νανοκρυστάλλων, είτε με ηλεκτρολυτική εναπόθεση. Σημαντική δυσκολία της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί η πυκνή διάταξη των μικροσφαιριδίων, η οποία αποτρέπει τη διείσδυση των ιόντων μετάλλου στον κενό χώρο του προτύπου. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι τα κολλοειδή υλικά έχουν μειωμένη αντοχή στη μηχανική καταπόνηση, που δημιουργείται από το εκλυόμενο αέριο κατά την αναγωγή των μεταλλικών ιόντων. ^[28]

Μια παραλλαγή της χημικής εναπόθεσης είναι αυτή όπου πραγματοποιείται κατασκευή προτύπου από πολυστυρένιο. Μετά την κατασκευή του προτύπου από πολυστυρένιο στον κενό χώρο που έχει δημιουργηθεί, είναι δυνατό να διεισδύσει διάλυμα ιόντων μετάλλου σε οξύ ή σε αραιό διάλυμα αιθανόλης, λόγω των τριχοειδών φαινομένων. Με την ολοκλήρωση του εμποτισμού, το επιπλέον διάλυμα απομακρύνεται με τη βοήθεια αντλίας κενού.

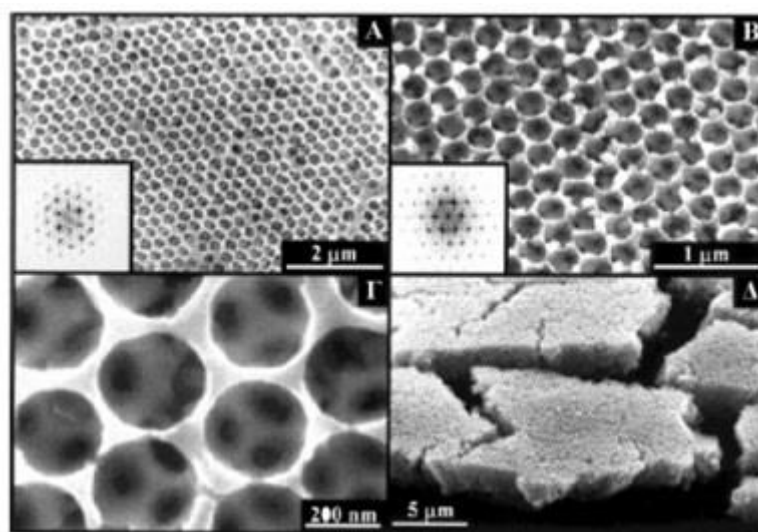
Στη συνέχεια, το πρότυπο εμποτίζεται σε οξαλικό οξύ, διαδικασία που δημιουργεί ένα στρώμα μεταλλικού οξαλικού άλατος στην επιφάνεια του προτύπου. Το δείγμα θερμαίνεται ακολούθως σε αέρα ή σε άζωτο, ώστε να απομακρυνθεί το πολυστυρένιο και να σχηματισθεί οξείδιο μετάλλου (σε αέρα) ή καθαρό μέταλλο (σε άζωτο). Εάν η θέρμανση γίνει σε αέρα, πρέπει να ακολουθήσει ένα επιπλέον βήμα όπου το δείγμα θερμαίνεται και υπό άζωτο για την απομάκρυνση των εναπομεινάντων οξειδίων.

Όπως γίνεται κατανοητό, οι συνθήκες της μεθόδου είναι πολύ σημαντικές προκειμένου να παραχθεί μεταλλικός αφρός με την κατάλληλη τελική αναλογία καθαρού μετάλλου/οξειδίου. Η δομική αντοχή του μεταλλικού σπόγγου δεν

επηρεάζεται από τα εκλυόμενα αέρια CO₂. Μάλιστα, οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι δυνατό να ενισχύσουν την αντοχή του, λόγω της ανάπτυξης των κόκκων στο πορώδες υπόστρωμα. Η μέση διάμετρος των πόρων του μεταλλικού αφρού μπορεί να φθάσουν τα 250 έως 500 nm. [28-30]

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

Στην εικόνα 2.2.3.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα άλλων χρησιμοποιούμενων υλικών (χαλκού, αργύρου και νικελίου) για την κατασκευή μεταλλικών αφρών. Στην συγκεκριμένη εικόνα η διάμετρος των πόρων του μεταλλικού αφρού από χαλκό είναι 325 ± 15 nm. Η διάμετρος των πόρων του αφρού από άργυρο είναι 353 ± 17 nm. Στο τρίτο καρέ (αφρός νικελίου) φαίνονται οι οπές επικοινωνίας των πόρων με μέγεθος 60 ± 10 nm. Το τελευταίο καρέ δείχνει σε μικρότερη μεγέθυνση τον αφρό από χαλκό, όπου διακρίνονται τα κομμάτια σε θραύση. [28-30]



2.2.3 1 Μεταλλικός αφρός από A,Δ) χαλκό (SEM), B) άργυρο, Γ) νικέλιο,. [28]

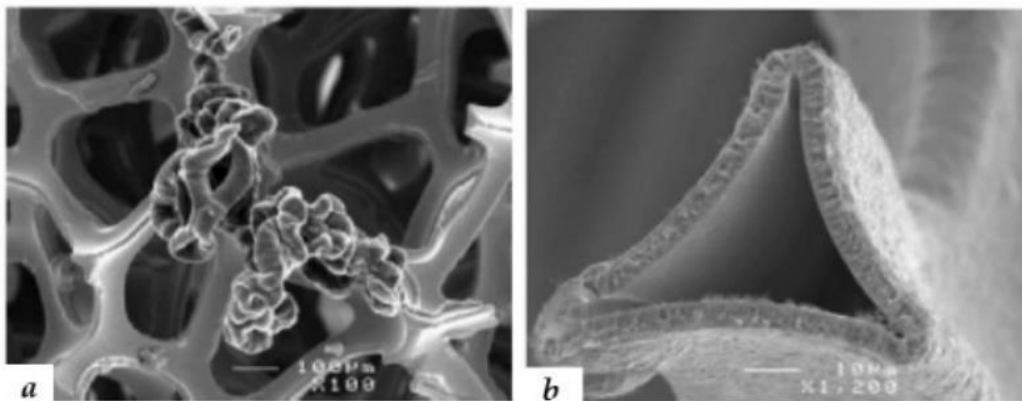
2.2.4 Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)

Η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης ατμών (chemical vapor deposition - CVD) είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος και ιδιαίτερος εύχρηστη. Αυτός είναι και ο λόγος που υιοθετήθηκε και για την παραγωγή μεταλλικών αφρών. Μία από τις πρώτες εφαρμογές αποτελεί ο αφρός νικελίου INCOFOAM, με πορώδες της τάξεως 70 % έως 98 % κ.ο., ενώ το μέγεθος το κελιών του κυμαίνεται από 450 έως 3200 μm . Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων αφρών είναι η υψηλή καθαρότητα (προσμίξεις = 0,08 % C και 0,02 % S κ.β.), η εξαιρετική ομοιογένεια πορώδους και η ανοιχτή δομή των κελιών. ^[28]

Για την παρασκευή μεταλλικών αφρών νικελίου INCOFOAM, χρησιμοποιείται ένα αφρώδες πρότυπο από πολυμερές, που συνήθως είναι πολυουρεθάνη, πάνω στο οποίο επικάθεται το νικέλιο. Ακολούθως το δείγμα θερμαίνεται για την απομάκρυνση του πολυμερούς και τη συσσωμάτωση του νικελίου. Στη συνέχεια η επικάλυψη του αφρού με το νικέλιο γίνεται είτε με μεθόδους επιμετάλλωσης, είτε με ηλεκτροεναπόθεση, είτε με χημική εναπόθεση ατμού. Πιο συχνή είναι η χρήση της μεθόδου της χημικής εναπόθεσης ατμών. Σαν βασικό συστατικό της χημικής διεργασίας χρησιμοποιείται το τετρακαρβονύλιο του νικελίου $\text{Ni}(\text{CO})_4$. Πρόκειται για μια σύνθεση της ένωσης που επετεύχθη για πρώτη φορά το 1888 από τους Carl Langer και Ludwig Mond. Μέχρι το 1902 η βασική της χρήση αφορούσε τον εξευγενισμό του νικελίου και την παραγωγή του σε μορφή σκόνης. Με σημείο βρασμού τους 43 °C μπορεί εύκολα να αποσυντεθεί σε καθαρό νικέλιο και μονοξείδιο του άνθρακα, με θέρμανση στους 150 – 200 °C βάσει της αντίδρασης $\text{Ni}(\text{CO})_4 \rightarrow \text{Ni} + 4\text{CO}$.

Σημαντικό πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επιβάλλονται, είναι δυνατό να γίνει χρήση της σε υλικά με μικρή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης μπορεί να γίνει χρήση της και για μαζική παραγωγή όπως περιγράφεται στη συνέχεια: Κατασκευάζεται ένα υπόστρωμα πολυουρεθάνης μήκους 2000 m, πλάτους 1 m και πάχους 1.3-3mm. Το φύλλο αυτό κινείται μεταξύ δύο μηχανισμών περιέλιξης και διέρχεται από μια σειρά θαλάμων εναπόθεσης του μετάλλου. Πρόκειται για διαδικασία με ελεγχόμενη θερμοκρασία, και ατμοσφαιρική σύσταση. Με τον έλεγχο της θερμοκρασίας του υποστρώματος, την επιφάνεια του, τη διάρκεια παραμονής του υποστρώματος σε κάθε θάλαμο, και τη σύσταση του αερίου – φορέα, καθορίζεται και η ποσότητα του μετάλλου που θα εναποτεθεί στο υπόστρωμα. Ένας τυπικός ρυθμός εναπόθεσης που μπορεί να επιτευχθεί είναι το 1 $\mu\text{m}/\text{min}$. ^[28]

Μετά το στάδιο της εναπόθεσης ατμών ακολουθεί θέρμανση, ώστε να απομακρυνθεί η πολυουρεθάνη και να σταθεροποιηθεί η δομή του νικελίου. Η θερμοκρασία η οποία επιλέγεται είναι ~1000 °C. Στην εικόνα 2.2.4.1 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της διαπίδυσης (βίαιης εξαγωγής) του αφρού πολυουρεθάνης από τα κελιά του μετάλλου. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει λόγω της αναπτυσσόμενης υπερπίεσης στο περίβλημα, ενώ στη συνέχεια λόγω της θερμοότητας καίγεται, δημιουργώντας έτσι ένα κοίλο δικτυωτό πλέγμα νικελίου.

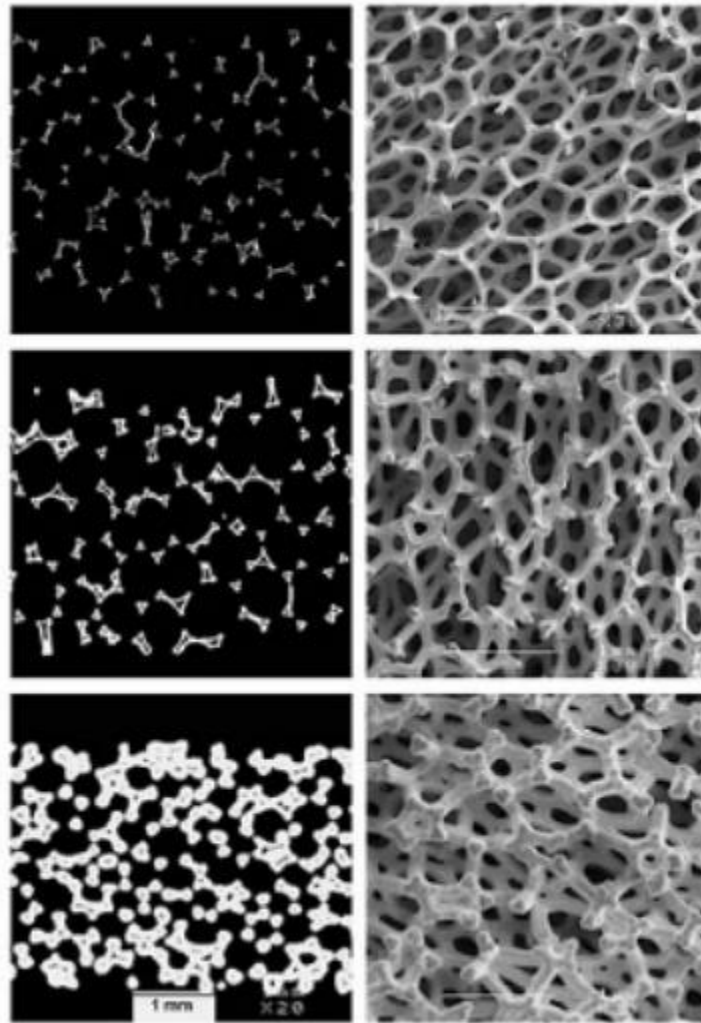


2.2.4.1 a) Διαπίδυση πολυουρεθάνης, b) Τομή αφρού νικελίου κατά τη θέρμανση [131]

Σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι δημιουργούνται επικίνδυνα χημικά παραπροϊόντα, μιας και τόσο κατά την εναπόθεση του μετάλλου όσο και κατά τη διάρκεια της καύσης, παράγονται χημικές ενώσεις επιβλαβείς για το περιβάλλον. [28]

Εταιρίες που έχουν υιοθετήσει και εφαρμόσει την εν λόγω μέθοδο παρασκευής μεταλλικών αφρών είναι η Ultramet και η Recemat. Η διαφορά είναι ότι οι εταιρίες αυτές χρησιμοποιούν πρότυπο αφρού άνθρακα αντί για πολυουρεθανικό αφρό. Οι ρυθμοί εναπόθεσης που επιτυγχάνονται είναι 100 – 400 μm/h. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι ζιρκόνιο (Zr), νιόβιο (Nb), άφνιο (Hf), ταντάλιο (Ta), βολφράμιο (W), ρήνιο (Re) και για κεραμικά όπως : οξειδία, νιτρίδια, καρβίδια, βορίδια και πυριτιούχες κεραμικές ενώσεις. [31]

Στην επόμενη σελίδα, στην εικόνα 2.2.4.2, παρουσιάζονται διαφορετικού πορώδους επιφανειακές μικρογραφίες αφρών νικελίου παραγωγής INCOFOAM, από μικροσκόπιο SEM.



2.2.4.2 Διαφορετικού πορώδους επιφάνειες αφρών νικελίου παραγωγής INCOFOAM [131]

2.3 Κατεργασίες μεταλλικών αφρών

Οι συνήθεις μηχανουργικές κατεργασίες είναι πιθανό να παραμορφώσουν την δομή ενός τεμαχίου από μεταλλικό αφρό, λόγω της κυψελοειδούς δομής του. Για να αποφευχθεί ένα τέτοιο ενδεχόμενο, και η ανάγκη περαιτέρω μηχανουργικών κατεργασιών, χρειάζεται να έχει προηγηθεί επαρκής σχεδιασμός για την παραγωγή του μεταλλικού αφρού.

Είναι όμως σύνηθες να χρειάζεται να γίνει κάποια μορφοποίηση ή συγκόλληση, αναλόγως την εφαρμογή στην οποία χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ο μεταλλικός αφρός. Έτσι είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη τα πιο κάτω χαρακτηριστικά των μεταλλικών αφρών πριν από μια μηχανουργική κατεργασία. Κάθε ένα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά έχει συγκεκριμένες

επιπτώσεις ως προς την κατεργασιμότητα των μεταλλικών αφρών (στοιχεία εντός παρενθέσεων):^[32]

- i. Αντοχή σε κρούσεις (δύσκολη μορφοποίηση και κατεργασία),
- ii. υψηλή ευαισθησία σε αξονικές καταπονήσεις (δύσκολη μορφοποίηση),
- iii. ατέλειες σε κυτταρικά τοιχώματα και στην επιφάνεια (δύσκολη επικάλυψη),
- iv. παρουσία οξειδίων στην επιφάνεια (δύσκολη επικάλυψη και συγκόλληση),
- v. παρουσία των στερεοποιητικών κεραμικών (δύσκολη κατεργασία).

Τα προβλήματα που προκύπτουν συνήθως, είναι παραμόρφωση των λεπτότοιχων πόρων του αφρού, δηλαδή κάμψη ή θραύση των τοιχωμάτων στα λεπτότερα σημεία τους. Αν καμφθούν ή σπάσουν αυτά τα λεπτότοιχα σημεία τους, τότε προκύπτει ένα τεμάχιο χαμηλής ποιότητας και μειωμένης ακρίβειας επιφάνειας. Για το λόγο αυτό οι παραδοσιακές τεχνικές κατεργασίας δεν ενδείκνυνται τις περισσότερες φορές.

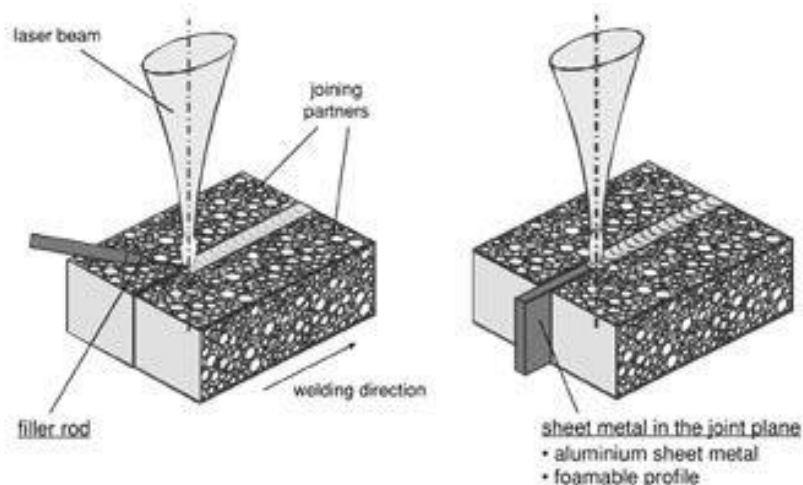
Μια τεχνική η οποία είναι αρκετά αποδοτική, είναι η κατεργασία με ηλεκτρική εκκένωση, με την οποία δεν επιτελούνται μηχανικές παραμορφώσεις στο εσωτερικό των τεμαχίων μεταλλικού αφρού. Επίσης, υπάρχουν διάφορες τεχνικές συγκόλλησης που εφαρμόζονται στα υπόλοιπα κυψελοειδή υλικά, όπως ηλεκτροσυγκόλληση και κασσιτεροκόλληση. Παρόλα αυτά, το κόστος των συγκεκριμένων τεχνικών είναι ιδιαίτερος υψηλό. Στη συνέχεια, περιγράφονται ορισμένες από τις συνηθέστερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατεργασιμότητα των μεταλλικών αφρών.^[32]

2.3.1 Συγκόλληση με laser

Η συγκόλληση με laser είναι μία τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την τοποθέτηση ανθεκτικών κατασκευών στο πίσω ή στο κάτω μέρος του αμαξώματος ενός αυτοκινήτου, ώστε να αυξηθεί η στρεπτική του ακαμψία. Η διαδικασία αυτού του τύπου συγκόλλησης περιλαμβάνει ένωση μόνο των εξωτερικών φύλλων του τεμαχίου, αφήνοντας έτσι ανέπαφο οτιδήποτε βρίσκεται στο εσωτερικό του (στην περίπτωση που μελετάται εδώ, την κυψελοειδή δομή του). Το υλικό πλήρωσης τοποθετείται μπροστά από την κεφαλή του laser κατά μήκος της διεύθυνσης της συγκόλλησης.^[33]

Μπορούν να επιτευχθούν αρκετά υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, μειώνονται όμως για να συγκολληθούν και τα δύο φύλλα της δομής του τεμαχίου. Στις συγκολλήσεις μεταλλικών αφρών με φύλλα μετάλλου, παράγονται καλύτερα αποτελέσματα όταν γίνεται χρήση παλμικού laser, ή laser συνεχόμενης ακτινοβολίας.

Στην επόμενη εικόνα (2.3.1.1) παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί τρόποι για να συγκολληθούν δυο τεμάχια μεταλλικού αφρού με laser. Αριστερά χρησιμοποιείται ράβδος πλήρωσης, που το υλικό της τήκεται πάνω στη ραφή συγκόλλησης, μεταξύ των δύο επιφανειών που συγκολλούνται. Δεξιά το πληρωτικό μέσο είναι ένα φύλλο μετάλλου που τοποθετείται ενδιάμεσα από τα δυο τεμάχια αφρού αλουμινίου.



2.3.1.1 Μέθοδοι χρήσης υλικού πλήρωσης κατά τη συγκόλληση μεταλλικών αφρών. [33]

2.3.2 Συγκόλληση με τόξο TIG/MIG

Ένας άλλος τρόπος συγκόλλησης είναι με τη χρήση τεχνολογίας TIG/MIG. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται εξαιρετικά αποτελέσματα συγκόλλησης για δημιουργία μεταλλικών αφρών τύπου σάντουιτς, όπως επίσης και στη συγκόλληση δύο τεμαχίων μεταλλικού αφρού. Πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου, αποτελούν η ευελιξία στην εφαρμογή της, καθώς και το χαμηλό κόστος της. Η διαδικασία συγκόλλησης στοχεύει στην κόλληση μόνο του κελύφους, έτσι ώστε να αποφευχθεί η παραμόρφωση της εσωτερικής δομής του τεμαχίου. [32]

2.3.3 Flow drilling

Πρόκειται για μια τεχνική κατεργασίας, όπου ασκείται αξονική πίεση στο τεμάχιο από το ένα πολυγωνικό περικόχλιο, το οποίο περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Στην επαφή με το τεμάχιο αναπτύσσεται υψηλή θερμοκρασία λόγω της τριβής. Με αυτόν τον τρόπο το υλικό μαλακώνει και μορφοποιείται ευκολότερα. ^[32]

2.3.4 Κοπή με laser

Η κοπή με laser είναι μια τεχνική κοπής όπου απαιτείται τροποποίηση κάθε φορά των παραμέτρων της διαδικασίας σύμφωνα με το υπό επεξεργασία τεμάχιο, και με περισσότερη προσοχή όταν πρόκειται να γίνει ταυτόχρονη κοπή των δύο όψεων. Το πρόβλημα που προκύπτει συνήθως με αυτή τη μέθοδο κοπής, είναι η τήξη του μετάλλου στο εσωτερικό του τεμαχίου, και η κατάρρευση του μεταλλικού αφρού στα εξωτερικά φύλλα και εκχείλιση του μετάλλου, μειώνοντας έτσι την ποιότητα της τελικής επιφάνειας του τεμαχίου. ^[33]

2.3.5 Κοπή με jet νερού

Τέλος, μία άλλη μέθοδος κοπής, είναι η κοπή με Jet νερού. Το πρόβλημα που υπάρχει σε αυτού του είδους τη διαδικασία, είναι η ύπαρξη μικροαντικειμένων στο πορώδες του αφρού, τα οποία δεν μπορούν να απομακρυνθούν ούτε με πλύση ούτε με γυαλιστικά. Τέτοια τεμάχια απορρίπτονται αφού δεν γίνονται αποδεκτά τέτοια υπολείμματα στο τελικό προϊόν. Στην επόμενη εικόνα (2.3.2) απεικονίζεται η κοπή με Jet νερού, μιας δομής σάντουιτς με αφρό αλουμινίου.



2.3.5 1 Κοπή δομής σάντουιτς από αφρό αλουμινίου με Jet νερού. ^[34]

3 Κεφάλαιο 3 : Ιδιότητες και Εφαρμογές Μεταλλικών Αφρών

3.1 Γενικά

Οι μεταλλικοί αφροί έχουν διάφορες ιδιότητες, ανάλογα με τη δομή τους, το μητρικό υλικό και τον τρόπο με τον οποίο παρήχθησαν. Αυτό στη πράξη σημαίνει ότι ένας μεταλλικός αφρός μπορεί να παραχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους και να έχει διαφορετικές ιδιότητες κάθε φορά, ακόμη και αν η σύσταση του κράματος μετάλλων είναι ακριβώς η ίδια. Επίσης από την μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί ο μεταλλικός αφρός, θα υπάρχουν και διαφορετικές ατέλειες στο τελικό τεμάχιο, που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μεταλλικού αφρού. Έτσι, αναλόγως τις ιδιότητες που είναι επιθυμητό να έχει ο μεταλλικός αφρός, επιλέγεται το αρχικό κράμα μετάλλων αλλά και ο κατάλληλος τρόπος παραγωγής.

Πολλές φορές οι μεταλλικοί αφροί προσεγγίζονται ως διαφασικά μίγματα (στερεά-αέρια) αέριων εγκλεισμάτων μέσα σε στερεό μεταλλικό υλικό, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την αντοχή τους με βάση απλουστευμένα μοντέλα. Η προσέγγιση αυτή ωστόσο έχει δείξει πως οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές. ^[12] Κατ' επέκταση, αναλόγως με τις ιδιότητες, υπάρχει πληθώρα εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι μεταλλικοί αφροί. Τα πορώδη μεταλλικά υλικά βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στη βιομηχανία χάρη στο μεγάλο εύρος των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων τους. Είναι δύσκολο να απαριθμήσει κάποιος όλες τις υφιστάμενες και δυνητικά πιθανές εφαρμογές των μεταλλικών αφρών.

Ωστόσο, θα γίνει μία προσπάθεια στις επόμενες παραγράφους να αναφερθούν βασικές ιδιότητες και εφαρμογές των μεταλλικών αφρών.

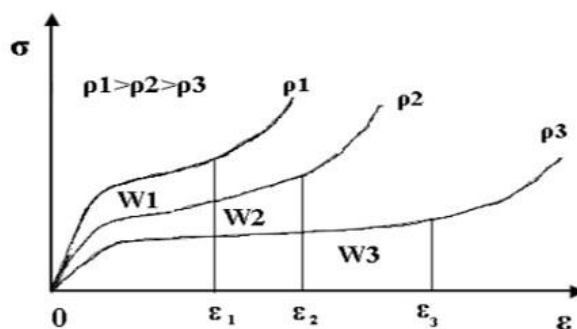
3.2 Ιδιότητες μεταλλικών αφρών

Οι ιδιότητες των μεταλλικών αφρών καθορίζονται από τις εξής τρεις θεμελιώδεις παραμέτρους: ^{[12],[13]}

- i. Τις ιδιότητες του μητρικού υλικού, σε συνδυασμό με την επίδραση σε αυτές των σταθεροποιητικών παραγόντων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν,
- ii. την μορφολογία και τοπολογία των κυψελίδων, και τέλος
- iii. την σχετική πυκνότητα και το ποσοστό του κλάσματος του όγκου του μετάλλου που βρίσκεται στις πλευρές των κελιών.

Οι ιδιότητες αυτές διαφοροποιούνται αν πρόκειται για αφρό με ανοικτούς ή κλειστούς πόρους. Τα ανοικτού τύπου κελιά, όταν υφίστανται μονοαξονική συμπίεση, παραμορφώνονται μέσω λυγισμού των ακμών τους. Όσο αυξάνει η τιμή του φορτίου, τα τοιχώματα των κελιών υφίστανται πλαστική παραμόρφωση. Από την άλλη πλευρά, στους μεταλλικούς αφρούς με κλειστού τύπου κελιά, συμβαίνει ταυτόχρονη παραμόρφωση των οριζόντιων τμημάτων με λυγισμό και των κατακόρυφων με τάνυση.

Οι ιδιότητες του μητρικού μετάλλου μπορούν να τροποποιηθούν σημαντικά, αν στη βασική αυτή δομή εισαχθούν τασιενεργά σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά μπορούν είτε να αντιδράσουν με το υγρό μέταλλο είτε να παραμείνουν ανενεργά. Στην πρώτη περίπτωση παράγεται στερεό διάλυμα, ενώ στη δεύτερη τα χημικώς ανενεργά σωματίδια συσσωρεύονται μεταξύ των πόρων ή στα τοιχώματα των κελιών. Η μέση διάμετρος των πόρων αυξάνεται. ^[35] Ανομοιομορφίες στους πόρους όπως οι καμπυλώσεις οφείλονται στη διαφορά πίεσης του αερίου μέσα και έξω από τον πόρο, ενώ ανομοιομορφίες όπως οι πτυχώσεις σχετίζονται με τη στερεοποίηση του αφρού και εμφανίζονται κυρίως σε αφρούς χαμηλής πυκνότητας με μεγάλα κελιά. ^[36] Οι ιδιότητες των μεταλλικών αφρών εξαρτώνται επίσης από τη σχετική πυκνότητα και τη βάρθρωσή της μέσα στη μεταλλική δομή. Στο παρακάτω διάγραμμα (3-1) παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ) σε αφρούς αλουμινίου διαφορετικών πυκνοτήτων, με ίσα ποσά απορροφούμενης ενέργειας.



3-1 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων αφρών αλουμινίου ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, $w_1 = w_2 = w_3$). [36]

Το σύνολο των ιδιοτήτων που συναντώνται στους μεταλλικούς αφρούς, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο ευρύτερες κατηγορίες: α) Στις φυσικές ιδιότητες, και β) στις μηχανικές ιδιότητες.

3.2.1 Φυσικές ιδιότητες μεταλλικών αφρών

Μία πρώτη ιδιότητα των μεταλλικών αφρών είναι αυτή της μικρότερης πυκνότητας σε σχέση με εκείνη των πυκνών μητρικών μετάλλων. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις είναι τόσο μικρή αυτή η πυκνότητα, που φέρουν την ικανότητα να επιπλέουν σε υγρά. Επίσης, οι βασικές θερμικές ιδιότητες μεγάλης πρακτικής σημασίας των πορώδων μεταλλικών υλικών είναι: α) το σημείο τήξης, β) η ειδική θερμότητα, γ) η θερμική αγωγιμότητα, δ) η θερμική διαχυτότητα, ε) ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας της επιφάνειας, και στ) οι αντιστάσεις σε θερμότητα και θερμικά σοκ.

Σε σχέση με τα συμπαγή μέταλλα, οι μεταλλικοί αφροί έχουν χαμηλότερη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, εξαιτίας του λιγότερου όγκου που καταλαμβάνει το υλικό που υπάρχει μόνο στα τοιχώματα των κελιών, ενώ το υπόλοιπο τεμάχιο απαρτίζεται από το κενό των κελιών. Η αγωγιμότητα μειώνεται ακόμη περισσότερο, καθώς τα μεταλλικά τοιχώματα επικαλύπτονται με στρώμα οξειδίου, το οποίο δεν είναι αγωγίμο. Επομένως η αγωγιμότητα ενός μεταλλικού αφρού, αυξάνει όσο αυξάνεται και η πυκνότητα του αφρού.

Ειδικότερα για τη θερμική αγωγιμότητα εκτιμάται ότι στους αφρούς με κλειστού τύπου κελιά, είναι περίπου δέκα φορές χαμηλότερη σε σύγκριση με τα συμπαγή μέταλλα. Οι μεταλλικοί αφροί με ανοιχτού τύπου κελιά, πρέπει να εξετάζονται κάθε φορά για την αγωγιμότητα τους, αναλόγως την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται, καθώς η ικανότητα τους να επιτρέπουν στα ρευστά να διέρχονται από μέσα τους, επηρεάζει και τον υπολογισμό της τιμής της αγωγιμότητας. Οι αφροί μεγαλύτερης πυκνότητας έχουν μεγαλύτερη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η διαστολή του μεταλλικού αφρού προκαλεί ελάχιστη διόγκωση και αύξηση της αγωγιμότητας, χωρίς όμως να χάνεται το σχήμα του. Οι ιδιότητες αυτές κάνουν τους μεταλλικούς αφρούς κατάλληλους για μονωτικές εφαρμογές. ^[14]

Οι μεταλλικοί αφροί έχουν επίσης εξαιρετική ικανότητα να απορροφούν τον ήχο. Αυτό οφείλεται στο ότι ένα ηχητικό κύμα υφίσταται ανακλάσεις ακανόνιστα λόγω και της ακανόνιστης δομής των πόρων του αφρού. Η ενέργεια του κύματος

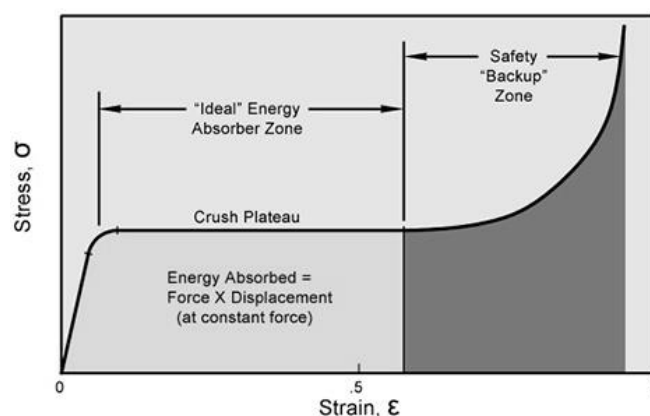
παραμορφώνει ελαφρώς τα τοιχώματα του μεταλλικού αφρού και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Με αυτό το τρόπο μειώνεται η ένταση των κυμάτων. Η ομοιογένεια των πόρων, σύμφωνα με μελέτες ερευνητών, επιδρά θετικά στην απορρόφηση του ήχου. Ακόμη, καλύτερη ηχομονωτική συμπεριφορά παρουσιάζουν οι αφροί με ανοικτούς πόρους. Συγκεκριμένα, ο αφρός Alporas που έχει παραχθεί μέσω έλασης έχει παρόμοιο συντελεστή απορρόφησης ήχου με το γυαλί ή το ξύλο. Επίσης βελτίωση παρατηρείται όσο αυξάνουν οι συνδέσεις μεταξύ των πόρων.

Τέλος, στις φυσικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών συμπεριλαμβάνονται δύο πολύ σημαντικές ιδιότητες τους: α) Οι μεταλλικοί αφροί είναι υλικά άφλεκτα, και β) είναι ατοξικά υλικά ακόμη και κάτω από συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. ^[14]

3.2.2 Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών αφρών

Οι μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών και γενικά των πορωδών υλικών μελετήθηκαν αρχικά από τους Gibson και Ashby. ^[12] Στη συνέχεια γίνεται μια περιγραφή των πιο χαρακτηριστικών από αυτές.

Αρχικά η απορρόφηση ενέργειας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες των μεταλλικών αφρών. Δύο είναι τα βασικά μεγέθη που ενδιαφέρουν για τα υλικά απορρόφησης ενέργειας: α) Η ενέργεια απορρόφησης ανά μονάδα μάζας, και β) η τάση στην οποία μπορεί να απορροφηθεί η ενέργεια αυτή. Η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται παρουσιάζεται γραφικά από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, εκεί που η καμπύλη δεν μεταβάλλεται ως προς την τάση (διάγραμμα 3-2). ^[37]



3-2 Τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μετάλλων και ενέργεια απορρόφησης [132]

Η ικανότητα ενός μεταλλικού αφρού να απορροφά ενέργεια εξαρτάται από τη μορφολογία των κελιών, τη σχετική πυκνότητα της δομής, από το όριο αντοχής και από τις διαστάσεις του μεταλλικού αφρού.^[37] Σημασία έχει επίσης ο τρόπος επιβολής του φορτίου, αν δηλαδή πρόκειται για στατική ή για δυναμική φόρτιση. Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αυτής της ιδιότητας της απορρόφησης ενέργειας,, είναι η δοκιμή θλίψης, που δίνει ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων–παραμορφώσεων.

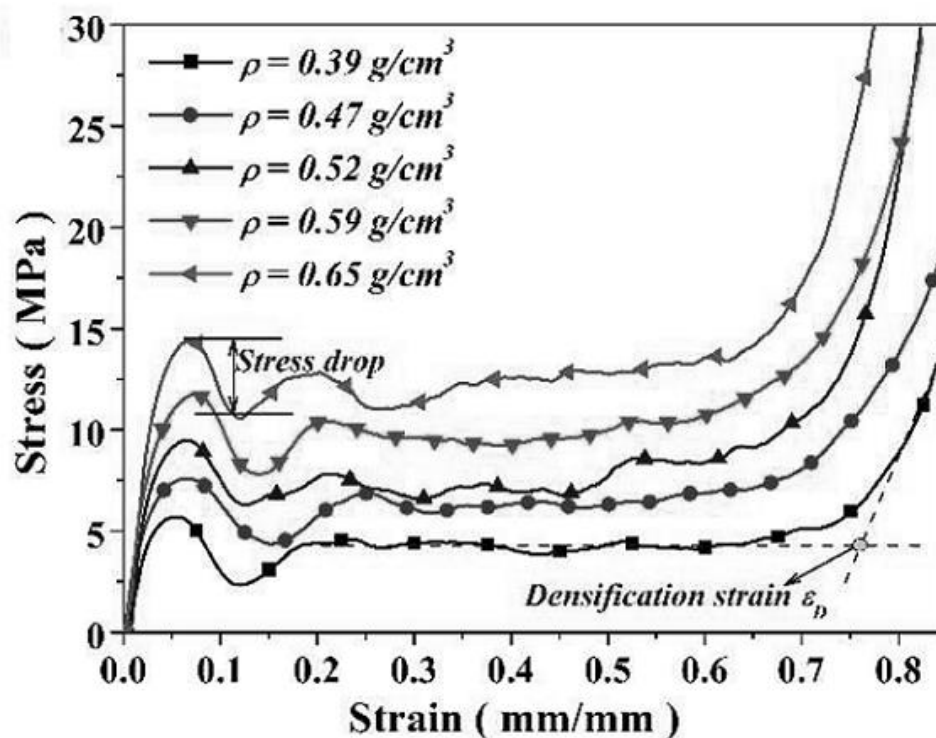
Το διάγραμμα τάσεων–παραμορφώσεων, γενικά μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές. Στην πρώτη περιοχή, φαίνεται μία γραμμικότητα στη σχέση τάσης και παραμόρφωσης, όπου υπάρχει γραμμική αύξηση της τάσης λόγω ελαστικής παραμόρφωσης. Μετά ακολουθεί μια περιοχή που η τάση φαίνεται σχεδόν αμετάβλητη. Σε αυτή τη περιοχή λαμβάνει μέρος η πλαστική παραμόρφωση. Τέλος, στο τρίτο μέρος ακολουθεί μια απότομη αύξηση της τάσης παραμόρφωσης.

Εξαιτίας της κυψελοειδούς τους δομής οι μεταλλικοί αφροί έχουν διαφορετική συμπεριφορά στις καταπονήσεις από ότι τα συμπαγή μέταλλα. Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια να μην μπορούν να ελεγχθούν με κάποιες βασικές τεχνικές, όπως λόγου χάριν τον εφελκυσμό. Επίσης στο διάγραμμα τάσεων–παραμορφώσεων, στην περίπτωση των μεταλλικών αφρών, σε αντίθεση με τα συμπαγή μέταλλα, η γραμμικότητα στην πρώτη περιοχή δεν είναι αποτέλεσμα μόνο της ελαστικής παραμόρφωσης, αλλά είναι συνέπεια και πλαστικής παραμόρφωσης. Στους μεταλλικούς αφρούς, λόγω των λεπτών τοιχωμάτων, μόνιμη παραμόρφωση μπορεί να συμβεί και σε χαμηλές τάσεις. Το σχεδόν ευθύγραμμο κομμάτι (πλατό), εμφανίζεται λόγω μιας ομογενούς πλαστικής παραμόρφωσης. Όταν πρόκειται για αφρούς με ίδια πυκνότητα και ίδιο μητρικό υλικό, το πλατό εμφανίζεται σε ίδια περίπου τάση τόσο για τους αφρούς με ανοικτούς όσο και με κλειστούς πόρους. Η τάση πλατό είναι πολύ σημαντική τιμή για τον μεταλλικό αφρό.^{[14],[16]} Το τρίτο στάδιο οφείλεται στην κατάρρευση των κελιών, όπου τα απέναντι τοιχώματα αγγίζουν το ένα το άλλο.

Οι ιδιότητες των αφρών επηρεάζονται επίσης από την επιφάνεια τους. Όταν αφαιρείται η εξωτερική επιφάνεια, οι μεταλλικοί αφροί έχουν μικρότερη αντοχή. Η εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά είναι πως η εξωτερική επιφάνεια λειτουργεί σαν μέσο σκλήρυνσης όπως για παράδειγμα συμβαίνει στις δομές τύπου σάντουιτς. Η ίδια συμπεριφορά χαρακτηρίζει και σωλήνες που στο εσωτερικό τους περιλαμβάνουν μεταλλικό αφρό. Η κατεύθυνση του αφρού δεν επηρεάζει

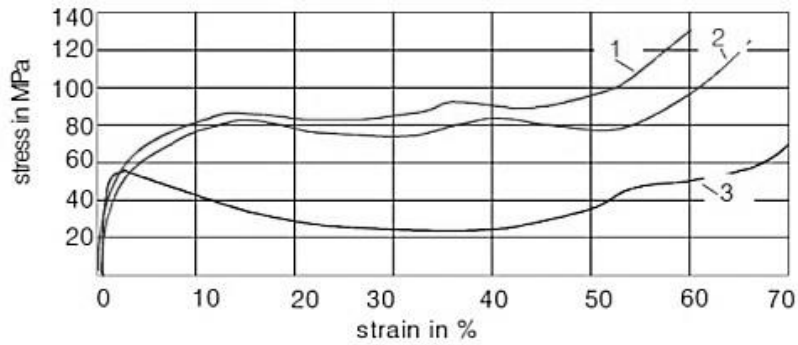
κάπως τις ιδιότητες, καθώς οι μεταλλικοί αφροί τείνουν να είναι ισοτροπικά υλικά.

Στο διάγραμμα 3-3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης σε σωλήνες διαφορετικής πυκνότητας. Τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης εξαρτώνται από την πυκνότητα του αφρού και το κράμα που χρησιμοποιείται. Το μήκος του πλατό αυξάνεται με μείωση της πυκνότητας. Φαίνεται επίσης ότι η τάση πλατό είναι μικρότερη όταν η πυκνότητα είναι μικρότερη. [14],[16]



3-3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σε δοκιμή θλίψης σε σωλήνες από αφρούς αλουμινίου με διαφορετικές πυκνότητες [133]

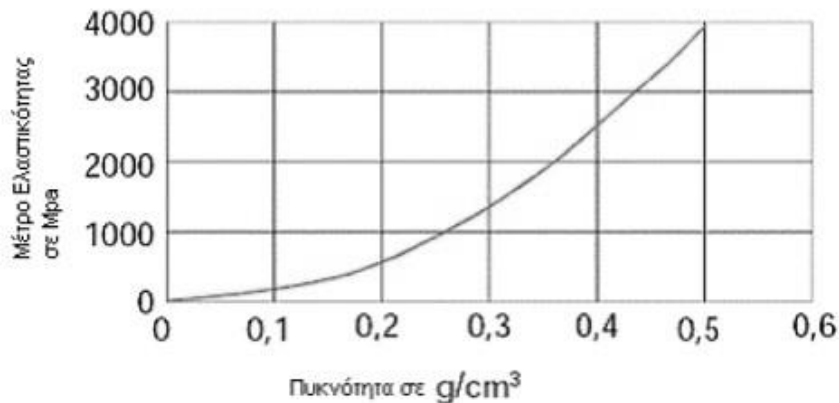
Στο διάγραμμα 3-4, ακολούθως, φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης σε δύο σωλήνες (1 και 2) που περιέχουν στο εσωτερικό τους μεταλλικό αφρό αλλά σε διαφορετική πυκνότητα, και σε ένα τρίτο σωλήνα που περιείχε μεταλλικό αφρό αλλά πλέον είναι κενός εσωτερικά. Στην περίπτωση των γεμάτων σωλήνων η τιμή της τάση πλατό είναι μεγαλύτερη. Επίσης το εμβαδό που σχηματίζει η καμπύλη με τον οριζόντιο άξονα στην περιοχή του πλατό είναι μεγαλύτερο για τα δύο δοκίμια με αφρό, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας είναι μεγαλύτερη.



1 - tube with aluminium foam filling, foam density 0.57 g/cm³
 2 - tube with aluminium foam filling, foam density 0.49 g/cm³
 3 - tube with former aluminium foam filling, but foam removed

3-4 Διάγραμμα αποτελεσμάτων δοκιμής θλίψης για σωλήνες με και χωρίς μεταλλικό αφρό. [14]

Μία ακόμη μηχανική ιδιότητα των μεταλλικών αφρών είναι το μέτρο ελαστικότητας Young. Ωστόσο στους μεταλλικούς αφρούς το μέτρο ελαστικότητας δε μπορεί να προσδιοριστεί με δοκιμή εφελκυσμού λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς τους. Χρησιμοποιώντας μη καταστροφικές μεθόδους, υπολογίστηκε πως το μέτρο ελαστικότητας έχει σχεδόν γραμμική συμπεριφορά με την πυκνότητα του μεταλλικού αφρού (διάγραμμα 3-5).

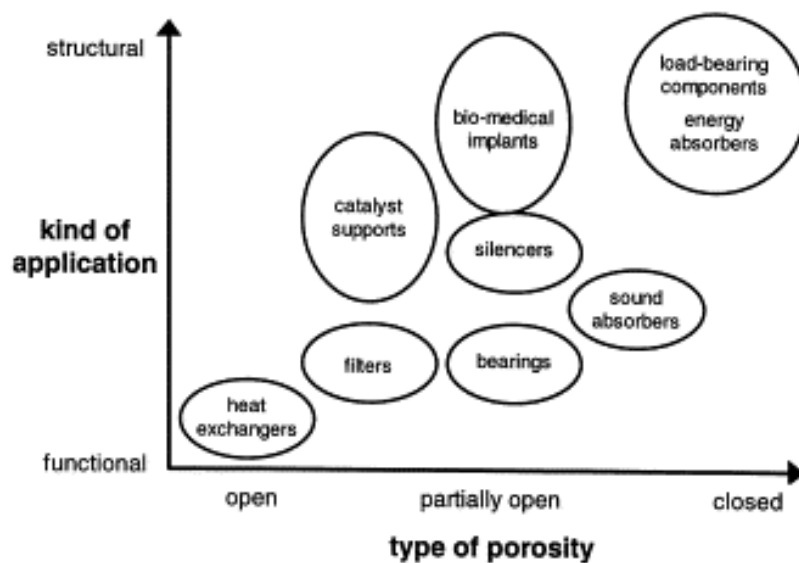


3-5 Συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας με την πυκνότητα του μεταλλικού αφρού. [19]

3.3 Εφαρμογές μεταλλικών αφρών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το φάσμα των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται ή που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν μεταλλικοί αφροί,

είναι πολύ ευρύ. Σε μία προσπάθεια να περιγράψουν αυτές οι εφαρμογές, μπορεί να γίνει μια κατηγοριοποίηση σε κατασκευαστικές εφαρμογές, δηλαδή εφαρμογές που αφορούν χρήση μεταλλικών αφρών στον κατασκευαστικό τομέα, και σε λειτουργικές εφαρμογές, δηλαδή εφαρμογές που αξιοποιούν μεταλλικούς αφρούς εκμεταλλευόμενες κάποια ή κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες τους. [7],[10] Στο παρακάτω διάγραμμα (3-6) φαίνεται μία κατανομή των διάφορων εφαρμογών σε σχέση με τη χρησιμότητά τους και το είδος του πορώδους τους.



3-6 Διάγραμμα κατανομής εφαρμογών πορώδων υλικών. [19]

Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του καταλληλότερου μεταλλικού αφρού, είναι το υλικό παραγωγής του. Μερικά παραδείγματα είναι τα ακόλουθα: Στις κατασκευές για διάφορα είδη φορτίου οι μεταλλικοί αφροί πρέπει να είναι χαμηλού βάρους, διαφορετικά χρησιμοποιούνται τα παραδοσιακά συμπαγή μέταλλα ή κράματα. Συνεπώς μεταλλικοί αφροί που έχουν παραχθεί από αλουμίνιο, μαγνήσιο, τιτάνιο ή από άλλο πορώδες μέταλλο προτιμώνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Ένα άλλο παράδειγμα είναι οι αποσβεστήρες ενέργειας, όπου οι μεταλλικοί αφροί με περισσότερη ομοιομορφία, λόγω της ισότροπης δομής τους μπορούν να παραμορφώνονται ομοιόμορφα σε οποιαδήποτε διεύθυνση επιβολής φορτίου και να δέχονται σημαντική πλαστική παραμόρφωση ανά μονάδα του όγκου τους. Το τιτάνιο ενδείκνυται για ιατρικές εφαρμογές, εξαιτίας της συμβατότητάς του με τους ιστούς. Επίσης, ο ανοξείδωτος χάλυβας ή το τιτάνιο προτιμάται για αγροτικές εφαρμογές ή σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες, λόγω της

αυξημένης αντοχής τους. ^{[7],[10]} Ένα άλλο κριτήριο επιλογής μεταλλικού αφρού για κάποια εφαρμογή είναι το πορώδες του, μιας και ορισμένες εφαρμογές απαιτούν να έχουν ανοιχτού τύπου κελιά για να μπορεί να διέρχεται ρευστό διαμέσου του πορώδους, ενώ άλλες χρειάζονται αφρούς με κλειστού τύπου κελιά καθώς πρόκειται για εφαρμογές που δέχονται μεγάλο φορτίο. ^[10]

Στη συνέχεια περιγράφονται μερικές από τις βασικές εφαρμογές μεταλλικών αφρών.

3.3.1 Κατασκευαστικές εφαρμογές

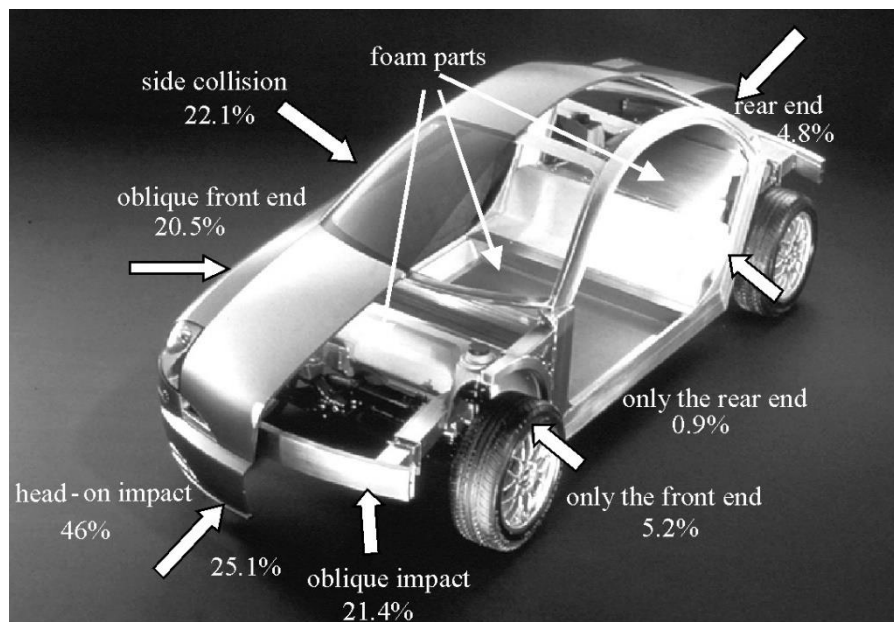
Οι μεταλλικοί αφροί βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις κατασκευές, και πιο συγκεκριμένα στους χώρους α) της βιομηχανίας αυτοκινήτων, β) της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, γ) της ναυπηγικής, δ) στις οικοδομικές-κτιριακές κατασκευές, και ε) των μηχανολογικών εξαρτημάτων.

3.3.1.a Βιομηχανία αυτοκινήτων

Στη βιομηχανία αυτοκινήτων η τάση για μείωση του βάρους του οχήματος προκειμένου να επιτευχθεί μικρότερη κατανάλωση καυσίμων, και λιγότερη μόλυνση του περιβάλλοντος, η ανάγκη για μείωση του μεγέθους των οχημάτων, χωρίς να μειωθεί το μέγεθος της καμπίνας των επιβατών, (συνεπώς η μείωση του χώρου για τα μηχανικά μέρη), ή οι καλές ηχομονωτικές ιδιότητες, αποτελούν απαιτήσεις των σημερινών εποχών που καλύπτονται με χρήση των μεταλλικών αφρών. Οι μεταλλικοί αφροί, και κυρίως οι αφροί αλουμινίου, μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα. ^{[7],[38]}

Η μείωση του βάρους του αυτοκινήτου συνδέεται άμεσα με τα υλικά κατασκευής του. Η χρήση μεταλλικών αφρών για δεδομένη τιμή δυσκαμψίας, σε δομές τύπου σάντουιτς είναι δυνατό να επιτύχει το ελάχιστο βάρος. Χρήση των αφρών σε μέρη όπως το καπό, οι πόρτες ή ο αποθηκευτικός χώρος μπορούν να μειώσουν το συνολικό βάρος μέχρι και 50 %, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη δυσκαμψία του οχήματος ως και 10 φορές. ^[39] Η χρήση μεταλλικών αφρών και σε άλλα σημεία του οχήματος θα βοηθούσε στη μείωση των συνολικών απαιτούμενων κομματιών άρα και του κόστους.

Στην εικόνα 3.3.1.a.1 φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης μεταλλικών αφρών σε διάφορα σημεία του αυτοκινήτου, μαζί με τους πιθανούς τύπους σύγκρουσης και το επακόλουθο κόστος της ζημιάς στο όχημα. Κατ' επέκταση, οι μεταλλικοί αφροί βρίσκουν εφαρμογή και σε τρένα, όπου το βάρος και το μέγεθος της κατασκευής παίζει μεγάλο ρόλο στην εμπορική τους αξία. ^[7]



3.3.1.a 1 Αυτοκίνητο με μέρη από αφρό αλουμινίου [134]

Τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας κατά τις συγκρούσεις αποτελούν ένα διαδομένο μηχανισμό παθητικής ασφάλειας, όπου γίνεται εκμετάλλευση της πλαστικής παραμόρφωσης. Σε αυτή την εφαρμογή οι μεταλλικοί αφροί έχουν καλύτερη απόδοση από τους πολυμερικούς αφρούς χάρη στη μεγαλύτερη αντοχή τους σε θλίψη, άρα και στη μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. ^[7] Όσο πιο μεγάλο είναι το πλατό της δεύτερης ζώνης στο διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων, τόσο περισσότερη ενέργεια μπορεί να απορροφήσει ο μεταλλικός αφρός. ^[38]

Η ηχητική μόνωση των χώρων του αυτοκινήτου για ελάττωση των εξωτερικών θορύβων και των θορύβων της μηχανής, είναι ένα άλλο κομμάτι εφαρμογής των μεταλλικών αφρών. Δεδομένου ότι είναι ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία που π.χ. πολυμερικοί αφροί δε μπορούν, όπως ο χώρος του κινητήρα. ^[7]

3.3.1.b Αεροδιαστημική βιομηχανία

Όπως στην βιομηχανία αυτοκινήτων, έτσι και στην αεροδιαστημική, είναι κοινός προσανατολισμός η ανάγκη για ελαφριές κατασκευές. Επίσης η αντικατάσταση ακριβών κατασκευών μεγάλου βάρους από αντίστοιχες κυψελοειδούς μορφής με φύλλα από αφρούς αλουμινίου ή από πλαίσια μεταλλικών αφρών τύπου σάντουιτς είναι δυνατό να οδηγήσουν σε καλύτερες εφαρμογές με μικρότερο κόστος και μικρότερο βάρος.

Πλεονέκτημα των μεταλλικών αφρών είναι η ισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων του και η δυνατότητα σύνθετων κατασκευών χωρίς συγκολλήσεις. Το τελευταίο στοιχείο είναι πολύ σημαντικό, μιας και δίνει καλύτερη συμπεριφορά στις περιπτώσεις των πυρκαγιών, όπου είναι ουσιώδης η κατασκευή να συγκρατείται ακέραια όσο το δυνατό περισσότερο. ^{[38],[40-41]}

Εφαρμογές των μεταλλικών αφρών υπάρχουν σε κατασκευαστικά κομμάτια μέσα σε τουρμπίνες, όπου ο συνδυασμός της ακαμψίας με την αυξανόμενη απόσβεση είναι πολύτιμη. Ασπίδες μεταξύ των διαφόρων βαθμίδων της μηχανής είναι επίσης από πορώδες υλικό.

Στην τεχνολογία του διαστήματος, ο αφρός αλουμινίου χρησιμοποιείται για την απορρόφηση ενέργειας στο σύστημα προσγείωσης των διαστημικού οχημάτων, σαν ενίσχυση σε ορισμένα τμήματα δορυφόρων, και ως αντικατάσταση υλικών που δημιουργούν προβλήματα στο περιβάλλον του εξωτερικού διαστήματος. Για τις εφαρμογές του διαστήματος χρησιμοποιούνται κράματα αφρού από Li-Mg. Τα κράματα αυτά είναι πολύ χρήσιμα σε συνθήκες κενού. ^[40]



3.3.1.b 1 Διάταξη της NASA για μείωση του θορύβου από περίβλημα μεταλλικού αφρού. [40]

3.3.1.c Ναυπηγική

Οι ελαφριές κατασκευές έχουν μεγάλη σημασία και στη ναυπηγική. Τα σύγχρονα επιβατικά πλοία μπορούν να κατασκευαστούν εξ' ολοκλήρου από ελάσματα αλουμινίου, και από αφρούς αλουμινίου. Για τα μεγάλα πλαίσια με πυρήνα από αφρό αλουμινίου υπάρχει η προσδοκία να πρωταγωνιστήσουν σε μερικές από τις προαναφερθείσες κατασκευές. Στις εφαρμογές μεταλλικών αφρών που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική, συμπεριλαμβάνονται πορώδη υλικά τύπου σάντουιτς τα οποία συνδέουν κατάλληλα τεμάχια κατά τη διάρκεια της ναυπήγησης. ^{[10],[19]}

3.3.1.d Οικοδομικές και κτιριακές κατασκευές

Ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών των μεταλλικών αφρών έχει αναπτυχθεί στις οικοδομικές και κτιριακές κατασκευές. Καθώς τα μοντέρνα κτίρια κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, οι προσόψεις τους επενδύονται με πλαίσια, τα οποία καλύπτουν το σκυρόδεμα και βελτιώνουν την εμφάνιση του κτιρίου. Αυτά τα πλαίσια θα πρέπει να είναι ελαφριά, άκαμπτα και αντιπυρικά. Αρκετά συχνά χρησιμοποιούμε λεπτά φύλλα μαρμάρου ή άλλων διακοσμητικών πετρωμάτων και τα προσαρμόζουμε στους τοίχους των κτιρίων. Τέτοια υλικά μπορούν να αντικατασταθούν από μεταλλικούς αφρούς. Τα κάγκελα των μπαλκονιών χρειάζεται να ικανοποιούν συγκεκριμένες προδιαγραφές ασφαλείας. Μερικά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι πολύ βαριά και προβληματικά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η αντικατάσταση από αφρούς αλουμινίου, θα έλυσε πολλά από τα προβλήματα. ^{[37],[39]}

Εξαιτίας της συχνής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και της υψηλής ταχύτητας στους σύγχρονους ανελκυστήρες, οι ελαφριές κατασκευές είναι πολύ σημαντικός παράγοντας. Οι αφροί αλουμινίου είναι πολύ υποσχόμενα υλικά και στον τομέα αυτό, επειδή συνδυάζουν απορρόφηση ενέργειας με ακαμψία. Οι ελαφριές πόρτες κλιβάνου και οι θυρίδες εκμεταλλεύονται την σχετικά φτωχή θερμική αγωγιμότητα και την αντίσταση από τη φωτιά, με χαμηλής πυκνότητας αφρό αλουμινίου. Αν και το σημείο τήξεως του αλουμινίου είναι αρκετά χαμηλό (<660°C), οι αφροί αλουμινίου είναι εκπληκτικά σταθεροί όταν εκτίθενται σε φλόγες εξαιτίας της έντονης οξειδωσης κάτω από αυτές τις συνθήκες. ^[39] Δοκοί, πλάκες και περιβλήματα μπορούν κάλλιστα να κατασκευάζονται από μεταλλικούς αφρούς. Οι οικοδομικές απαιτήσεις σε αντοχή, κόπωση και

Λειτουργικότητα μπορούν να καλυφθούν άνετα και να συνδυαστούν με χαμηλό βάρος, αυξημένη απορρόφηση ενέργειας αλλά και μερικές μη κατασκευαστικές ιδιότητες όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η απορρόφηση κραδασμών. Ιδανικό υλικό για αυτές τις εφαρμογές είναι ο αφρός χάλυβα.^[41]

3.3.1.e Μηχανολογικά δομικά στοιχεία

Εφαρμογές των μεταλλικών αφρών συναντάμε σε στοιχεία μηχανών, όπως άκαμπτα τμήματα αφρού ή άξονες από αφρό με μειωμένη αδράνεια και αναβαθμισμένη απόσβεση, που μπορούν να αντικαταστήσουν τροχαλίες, κυλίνδρους ή δάπεδα από παραδοσιακά υλικά. Τέτοιου είδους υλικά χρησιμοποιούνται σε σταθερά δράπανα ή σε μύλους με τέτοια πιστότητα όπως τα πρωτότυπα.



3.3.1.e 1 Οδοντωτοί τροχοί από αφρούς αλουμινίου [135]

3.3.2 Λειτουργικές εφαρμογές

Οι λειτουργικές εφαρμογές των μεταλλικών αφρών, αφορούν σε κάποια συγκεκριμένη ιδιότητα τους. Έτσι πιο συγκεκριμένα, συχνά βρίσκουμε τις εξής εφαρμογές:

3.3.2.a Αποσβεστήρες

Όπως το όνομα τους αποκαλύπτει, οι αποσβεστήρες βασίζονται στην ιδιότητα των μεταλλικών αφρών να απορροφούν ενέργεια από κρουστικά φορτία. Αυτοί οι αποσβεστήρες μπορεί να είναι σε προφυλακτήρες αυτοκινήτων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ή σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή υπάρχει ανάγκη

απόσβεσης. Σε υψηλής ταχύτητας μηχανές λείανσης, η χρήση αφρού αλουμινίου ως αποσβεστήρα ενέργειας για τα προστατευτικά καλύμματα έχει δείξει εξαιρετικά αποτελέσματα. Επίσης, είναι κατάλληλος για το σχηματισμό των ζωνών παραμόρφωσης του αυτοκινήτου μπροστά και πίσω από των χώρο των επιβατών έτσι ώστε να βελτιωθεί η ασφάλειά τους. Αφροί χαλκού πυκνότητας 5-10 % έχει παρατηρηθεί ότι έχουν καλύτερες επιδόσεις από το καουτσούκ ως βάσεις αποσβέσεων κρούσεων. ^[38]



3.3.2.a 1 Αποσβεστήρες μεταλλικών αφρών [136]

3.3.2.b Φίλτρα

Υπάρχουν δύο ειδών φίλτρα: αυτά που χρησιμοποιούνται για να διαχωρίζουν στερεά σωματίδια ή ίνες από ένα υγρό, και εκείνα που παγιδεύουν στερεά ή υγρά σωματίδια από αέριο.

Παραδείγματα για την πρώτη κατηγορία είναι φίλτρα για καθαρισμό ανακυκλωμένων (λιωμένων) πολυμερών, για απομάκρυνση μαγιάς από την μύρα ή για μολυσμένο λάδι. Ο δεύτερος τύπος περιλαμβάνει εφαρμογές, όπως φιλτράρισμα diesel καυσαερίων και απομάκρυνση νερού στις αερογραμμές. Κάποια από τα γενικά χαρακτηριστικά τους είναι η πολύ καλή ικανότητα φιλτράρισματος, ο καλός διαχωρισμός σωματιδίων, η ικανότητα να καθαρίζονται, οι καλές μηχανικές ιδιότητες και η αντίσταση στη διάβρωση. ^{[19], [39]}



3.3.2.b 1 Φίλτρα από διάφορα είδη μεταλλικών αφρών. [10]

3.3.2.c Φλογοπαγίδες

Οι φλογοπαγίδες είναι εφαρμογές που βασίζονται στην ιδιότητα των μεταλλικών αφρών ότι είναι άφλεκτοι, και μπορούν να σταματήσουν τη διάδοση της φλόγας σε συμπιεσμένα αέρια. Αφροί ανοιχτής κυψελίδας έχουν επιδείξει ικανότητα να αναστέλλουν φλόγα που κινείται με ταχύτητα 500 m/s. Ήδη τέτοια εξαρτήματα χρησιμοποιούνται από τον Ελληνικό Στρατό σαν αντιεκρηκτικό υλικό και τοποθετούνται στις δεξαμενές καυσίμων τεθωρακισμένων οχημάτων. [7], [10]



3.3.2.c 1 Φλογοπαγίδες μεταλλικού αφρού [13]

3.3.2.d Βιοϊατρικά εμφυτεύματα

Μεταλλικοί αφροί από τιτάνιο ή κράματα κοβαλτίου-χρωμίου χρησιμοποιούνται συχνά σαν ιατρικά εμφυτεύματα, καθώς πρόκειται για υλικά συμβατά με τον ανθρώπινο οργανισμό. Παρά την ήδη υπάρχουσα εφαρμογή τους, η έρευνα γύρω από αυτά τα εμφυτεύματα, και ιδιαίτερα ως προς τον σχεδιασμό τους, είναι διαρκώς ευρεία, καθώς η παραγωγή τους απαιτεί τη μέγιστη δυνατή αντοχή στη φθορά και τη βέλτιστη λειτουργικότητα. Επιπρόσθετα, αφροί μαγνησίου χρησιμοποιούνται σαν βιοδιασπώμενα πρόσθετα, για στήριξη των οστών και στη συνέχεια, καθώς τα οστά αναπτύσσονται, το βιοδιασπώμενο υλικό απορροφάται από τον οργανισμό. [10], [42]



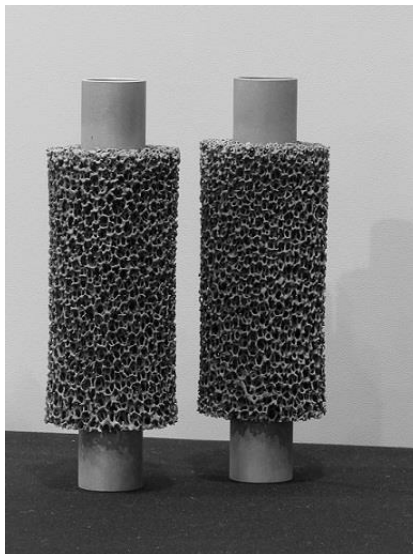
3.3.2.d 1 Εμφύτευμα οστών από αφρό τιτανίου [138]

3.3.2.e Εναλλάκτες θερμότητας

Οι μεταλλικοί αφροί είναι αποτελεσματικά υλικά, για εναλλάκτες θερμότητας λόγω της υψηλής εσωτερικής επιφάνειας που παρουσιάζουν, αλλά και λόγω της υψηλής αγωγιμότητας που έχουν. Μάλιστα έχουν καλύτερη απόδοση και μάλιστα στο ίδιο κόστος σε σχέση με συμβατικούς εναλλάκτες που χρησιμοποιούν πτυχωτές επιφάνειες. [28], [29] Για τέτοιου είδους εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως μεταλλικοί αφροί νικελίου, χαλκού ή αλουμινίου.

Έτσι η θερμότητα είναι δυνατό να απομακρύνεται από τα ρευστά, καθώς αυτά ρέουν στο εσωτερικό των μεταλλικών αφρών εναλλάσσοντας ποσά θερμότητας μεταξύ τους. Βέβαια, σε αυτές τις εφαρμογές, υπάρχει πτώση πίεσης του ρευστού,

η οποία είναι τόσο μεγαλύτερη όσο πιο πυκνό είναι το πορώδες του μεταλλικού αφρού.



3.3.2.e 1 Εναλλάκτες με αφρούς για αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας [139]

Επίσης μεταλλικοί αφροί χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ηλιακών συλλεκτών, καθώς μπορούν να διατηρήσουν την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει απάνω τους. Άλλες εφαρμογές σαν εναλλάκτες θερμότητας είναι σε αερόθερμα και σε ψυκτικές συσκευές μικροηλεκτρονικών συσκευών με υψηλή πυκνότητα θερμοκρασίας, όπως οι μικροεπεξεργαστές ηλεκτρονικών υπολογιστών. [43]

3.3.2.f Καταλύτες

Οι μεταλλικοί αφροί έχουν καλή και αποτελεσματική χρήση στον τομέα των καταλυτών, όπου, όπως και στους εναλλάκτες θερμότητας, η κύρια ιδιότητα που αξιοποιείται, είναι αυτή της μεγάλης επιφάνειας αλληλεπίδρασης μεταξύ καταλύτη και του αερίου ή του υγρού που πρέπει να αντιδράσει. Γι' αυτό το λόγο, οι καταλύτες από μεταλλικούς αφρούς κατασκευάζονται με υψηλό πορώδες.

Τα πορώδη υλικά μπορούν να αντικαταστήσουν τους κεραμικούς καταλύτες, γιατί έχουν υψηλή ολκιμότητα και θερμική αγωγιμότητα. Μία τέτοια εφαρμογή είναι για απομάκρυνση οξειδίων του αζώτου (NO_x) από καυσαέρια. Ο αφρός διαποτίζεται με ένα διάλυμα, που περιέχει καταλυτικές ουσίες και μετά από διάφορες κατεργασίες όπως διέλαση, θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες κλπ., δημιουργείται μέσα στην δομή ένα αντιδιαβρωτικό λεπτό φιλμ που παραμένει σταθερό ακόμα και μετά από πολλούς θερμοκινικούς κύκλους. Στην επόμενη εικόνα

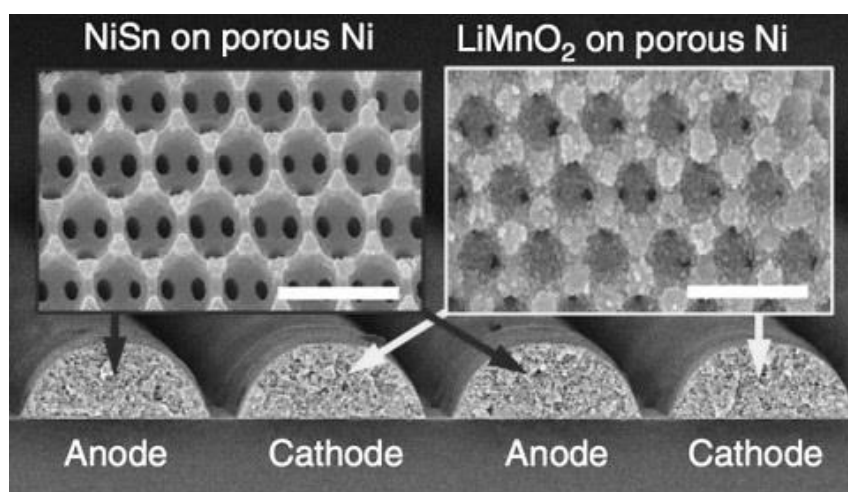
(3.3.2.6) παρουσιάζεται μια εξάτμιση, η οποία φέρει καταλύτη από αφρό χαλκού με πολύ καλά χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας. ^[44]



3.3.2.f1 Εξωτερική εμφάνιση φίλτρου από μεταλλικό αφρό, εξάτμισης αυτοκινήτου [140]

3.3.2.g Ηλεκτρόδια

Μεταλλικοί αφροί νικελίου (Ni) χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα ηλεκτροδίων σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd), μειώνοντας το συνολικό βάρος και αυξάνοντας την πυκνότητα ενέργειας. ^{[7], [45]} Επίσης, οι αφροί νικελίου χρησιμοποιούνται, αντί του πλέγματος νικελίου, και στις αλκαλικές κυψέλες καυσίμων (AFC – Alkaline Fuel Cell), η οποία είναι η πιο διαδεδομένη και ανεπτυγμένη τεχνολογία κυψελών καυσίμου. ^[10]



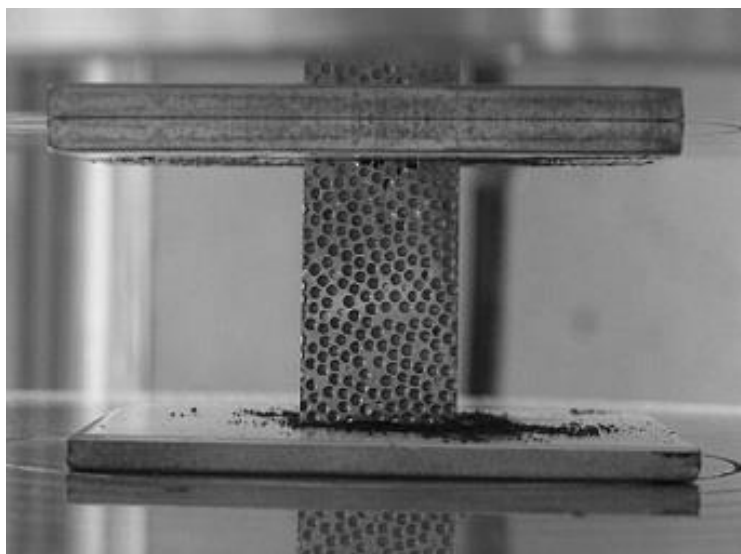
3.3.2.g 1 Χρήση μεταλλικών αφρών από κράματα νικελίου σε ηλεκτρόδια μπαταριών. [45]

3.3.2.h Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Μια τελευταία εφαρμογή μεταλλικών αφρών που αξίζει να αναφερθεί είναι αυτή της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης. Οποιαδήποτε συσκευή λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα εκπέμπει ένα μικρότερο ή μεγαλύτερο ποσό ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γύρω της.

Σε πολλές εφαρμογές έχουμε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία με υψηλότερες συχνότητες και όταν αυτά εκπέμπονται σε κυματική μορφή πρόκειται για ραδιοκύματα, όπως στα ραδιοφωνικά ή στα τηλεοπτικά σήματα.^[46]

Η ενέργεια αυτή μπορεί να απορροφηθεί από διάφορα υλικά όπως επίσης και από το ανθρώπινο σώμα, ακτινοβολίες επιβλαβείς για την σωματική υγεία. Έτσι λοιπόν οι μεταλλικοί αφροί, εξαιτίας της πορώδους δομής τους, έχουν πολύ καλές ιδιότητες απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην επόμενη εικόνα (3.3.2.8).^[47]



3.3.2.h 1 Πορώδες υλικό για απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [36-37]

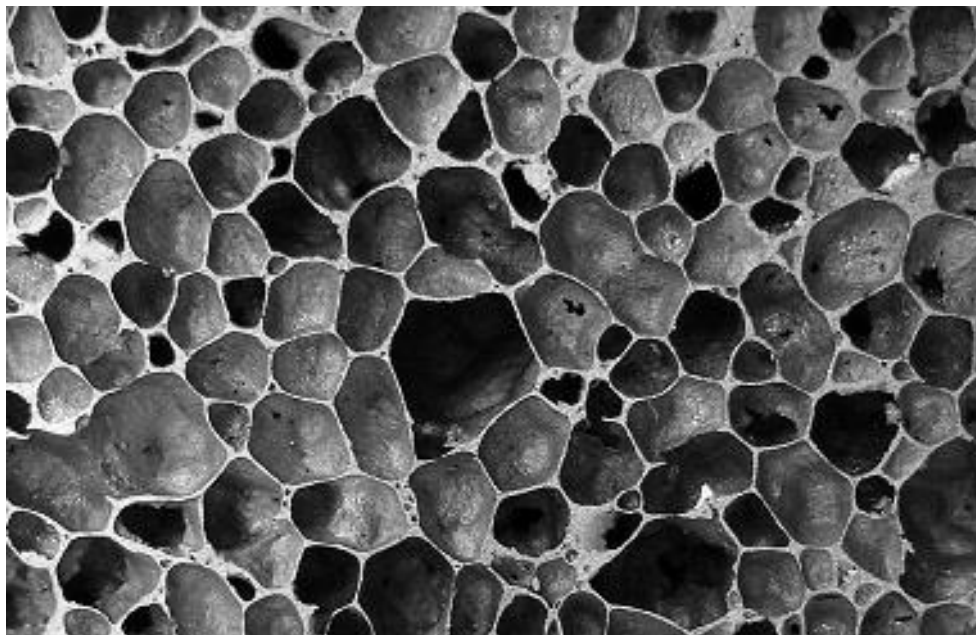
4 Κεφάλαιο 4 : Χαρακτηρισμός Μεταλλικών Αφρών

4.1 Δομικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αφρών

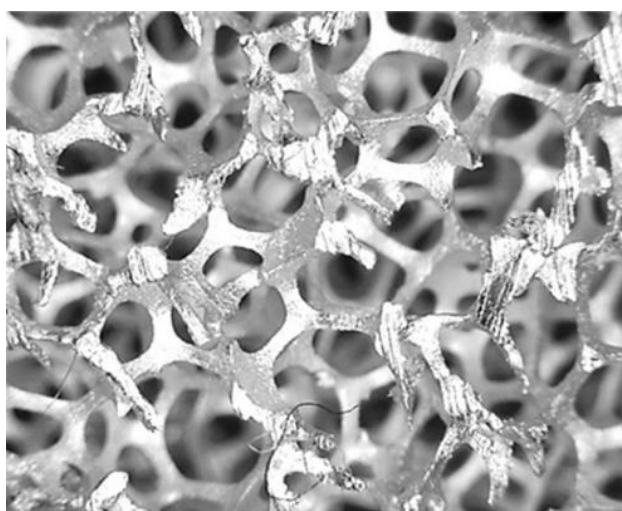
Στην αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μεθόδων χαρακτηρισμού των μεταλλικών αφρών. Στη παρούσα ενότητα περιγράφονται τα δομικά χαρακτηριστικά των μεταλλικών αφρών.

Ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό των μεταλλικών αφρών αφορά τη δομή τους και πιο συγκεκριμένα οι αφροί μπορούν να χαρακτηριστούν από την τοπολογία και την μορφολογία των πόρων τους. Αν έχουν δηλαδή ανοικτού ή κλειστού τύπου κυψέλες, τη πυκνότητα του πορώδους σε σχέση με τον όγκο του δοκιμίου, το μέγεθος των κυψελίδων, το σχήμα των πόρων και την ανισοτροπία που εμφανίζουν.

Οι μεταλλικοί αφροί συνήθως κατασκευάζονται από αλουμίνιο, νικέλιο ή τιτάνιο. Επιλέγεται το υλικό πάντα που είναι καταλληλότερο για την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθούν οι αφροί. Οι μεταλλικοί αφροί που κυκλοφορούν στο εμπόριο, έχουν πυκνότητα πορώδους που κυμαίνεται από 2 % έως και 100 %. Στη συνέχεια παραθέτονται χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταλλικών αφρών διαφορετικών δομών.



4.1.1 Μεταλλικός αφρός κλειστών κυψελών [141]



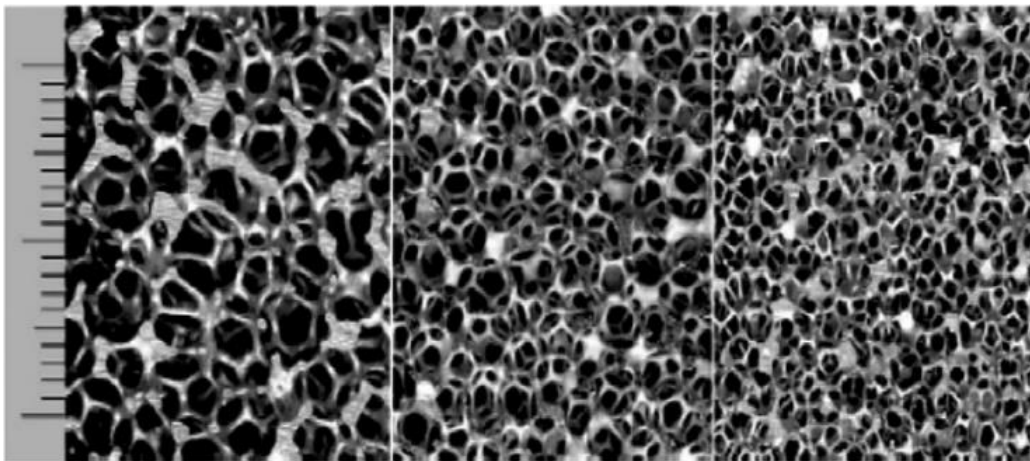
4.1.2 Μεταλλικός αφρός ανοικτών κυψελίδων [142]

Στην εικόνα 4.1.1 φαίνεται το εσωτερικό από ένα τεμάχιο μεταλλικού αφρού με κλειστού τύπου κελιά. Στην εικόνα 4.1.2 φαίνεται μεταλλικός αφρός με ανοικτού τύπου κυψελίδες.^[48] Στις εικόνες αυτές, διακρίνονται οι χαρακτηριστικές διαφορές στη δομή των μεταλλικών αφρών με ανοικτού και κλειστού τύπου κυψελίδες.

Ιδιότητα των κυψελίδων ανοικτού τύπου είναι το ότι επιτρέπουν τη διέλευση ρευστού από το εσωτερικό τους, και οι αντίστοιχοι μεταλλικοί αφροί έχουν εφαρμογή σε διάφορες βιομηχανικές κατασκευές όπως φίλτρα, εναλλάκτες θερμότητας. Η χρήση αυτών των μεταλλικών αφρών σε εφαρμογές φίλτρων, ενδείκνυται ειδικά για εφαρμογές με ρευστά που έχουν υψηλή θερμοκρασία. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές είναι απαραίτητο να είναι ελεγχόμενο το μέγεθος των κυψελίδων. Άλλη ιδιότητα των αφρών αυτών είναι η υψηλή απορροφητικότητα ενέργειας. Ωστόσο η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή τους είναι ως εναλλάκτες θερμότητας. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι έχουν υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, αυξημένο εμβαδόν επιφανείας και επιτρέπουν την διόδο του ρευστού μέσω των πόρων τους.

Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η πυκνότητα των πόρων, η οποία υπολογίζεται συνήθως ως πόροι ανά ίντσα (pores per inch - ppi). Όσο μικρότερη είναι η ποσότητα αυτή, σημαίνει πως θα υπάρχουν λιγότεροι πόροι ανά γραμμική ίντσα, που με τη σειρά του αυτό σημαίνει ότι η διάμετρος των κυψελίδων θα είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με ένα δείγμα με υψηλότερη αντίστοιχη τιμή πυκνότητας των πόρων. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι στην εικόνα 4.1.3, όπου παρουσιάζονται τρία δείγματα με 10, 20 και 40 ppi αντίστοιχα. Κοιτώντας προσεχτικά τις

φωτογραφίες είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι το δείγμα με 10 ppi έχει λιγότερους πόρους στο ίδιο μήκος σε σχέση με τα άλλα δύο δείγματα, και οι πόροι του έχουν μεγαλύτερη διάμετρο. Η πραγματική πυκνότητα του αφρού συσχετίζεται άμεσα με το μέγεθος των πόρων και τη διάμετρο των δοκίδων (strut diameter) στις κυψελίδες. [49], [50]



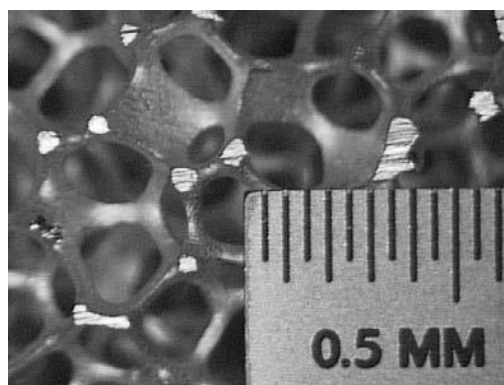
4.13 Αφροί αλουμινίου με πυκνότητα πορώδους 10, 20 και 40 ppi, αντίστοιχα. [143]

Από την άλλη μεριά, οι πόροι κλειστού τύπου είναι ιδανικοί στην απορρόφηση ενέργειας, και συνεπώς οι μεταλλικοί αφροί που απαρτίζονται από τέτοια μορφής πορώδες, είναι κατάλληλοι για δομικές εφαρμογές, όπως εφαρμογή σε προφυλακτήρες αυτοκινήτων, γέφυρες αλλά και κτίρια. Οι μεταλλικοί αφροί αυτοί, εμφανίζουν εξαιρετική ακαμψία ως προς το ειδικό βάρος όταν ασκείται πάνω τους καμπτική φόρτιση και έτσι χρησιμοποιούνται σε ελαφρές κατασκευές. Συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές απόσβεσης ήχου, είτε σε οχήματα καθώς επίσης και σε κτίρια. Άλλου τύπου εφαρμογές είναι αυτές για καθυστέρηση της εξάπλωσης φωτιάς το οποίο συμβαίνει λόγω της θερμικής μόνωσης που έχουν οι κλειστού τύπου κυψελίδες.

Επίσης στους μεταλλικούς αφρούς με κλειστού τύπου κελιά, το αέριο συνήθως παγιδεύεται στο εσωτερικό των κυψελίδων και συνεπώς δρα σαν κακός αγωγός της θερμότητας και ως εκ τούτου ως μονωτής. Τα αέρια, που παγιδεύονται μέσα, επιπροσθέτως βοηθάνε στην απορρόφηση ενέργειας από κρούση. Μετά την κρούση, τα τοιχώματα κάμπτονται και τα αέρια συμπιέζονται στο εσωτερικό του αφρού και προσφέρουν επιπλέον απόσβεση. Μια άλλη εφαρμογή βασίζεται στην δυνατότητα επίπλευσης, καθώς η χαμηλή τους πυκνότητα και η καλή αντοχή στη

διάβρωση καθιστά τους μεταλλικούς αφρούς κλειστών κυψελίδων ικανούς να επιπλέουν. [50]

Ο σχηματισμός των κυψελίδων στους μεταλλικούς αφρούς προσδίδουν την ιδιότητα απορρόφησης της ενέργειας προς όλες τις κατευθύνσεις. Το σχήμα του κελιού, είναι τετράεδρο και δεκάεδρο, γεγονός που καθιστά ανθεκτικό τον αφρό στην κατεύθυνση ή ιστροπικό, ιδανικά μιλώντας. Αυτή η γεωμετρία επιτρέπει στον αφρό πέρα από το να απορροφά ενέργεια από οποιαδήποτε κατεύθυνση, να μεταδίδεται επίσης η θερμότητα, και να ρέει ρευστό από όλες τις κατευθύνσεις και αυξάνει τη θερμική αντοχή.

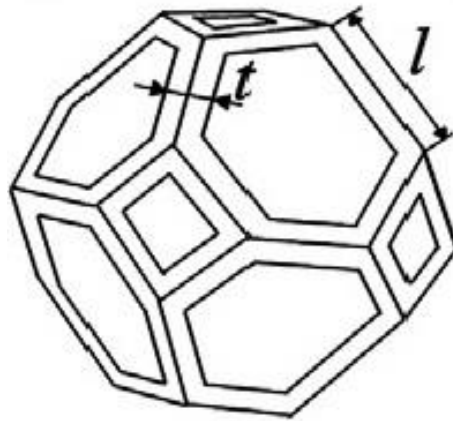


4.1.4 Γεωμετρία τετράεδρον και δεκάεδρον ενός κελιού [144]

Οι μεταλλικοί αφροί που διαθέτουν περιοδικότητα και ομοιομορφία στην κατανομή των κυψελίδων και του πορώδους τους, αναφέρονται ιδανικά και ως ισότροπα. Ωστόσο αυτό είναι κάτι πού δύσκολο να συμβεί, καθώς όταν γίνεται επεξεργασία των μεταλλικών αφρών, πάντα προκύπτουν ατέλειες στις κυψέλες και επηρεάζεται η κατανομή τους. Συνήθως υπάρχει στρέβλωση προς την κατεύθυνση όπου οι φυσαλίδες ανέβηκαν κατά την αεροποίηση, και οι πόροι των κυψελίδων ποικίλουν σε μέγεθος.

Στην εικόνα 4.1.4 παρουσιάζεται ένα πραγματικό παράδειγμα του «τετραδεκαέδρου» (tetradecahedron) μιας κυψέλης. Το κελί της εικόνας 4.1.4 με μια πρώτη ματιά μοιάζει να είναι ισότροπο, ωστόσο αν παρατηρηθεί πιο προσεκτικά, φαίνεται πως κάθε μία από τις κυψέλες έχει υποστεί ελαφριά στρέβλωση διαφορετικού μεγέθους. Επομένως, το να αναφέρεται αυτό το δείγμα ως ισότροπο περιλαμβάνει ανακρίβεια. Από την άλλη, η ύπαρξη αυτών των ελαφρώς στρεβλωμένων κυψελίδων, δεν σημαίνει ότι σε επίπεδο μακροκλίμακας, το δοκίμιο δεν συμπεριφέρεται με έναν ομοιογενή τρόπο, κατά τη διάρκεια

μηχανικής φόρτιση. Μεταλλικοί αφροί ομοιόμορφων κυψελίδων με ελαφρά στρέβλωση, λειτουργούν ομοιογενώς. ^[50] Στην εικόνα 4.1.5 παρουσιάζει μία εξιδανικευμένη εκδοχή της γεωμετρίας τετραδεκαέδρου:



4.1.5 Ιδανικό «τετραδεκάεδρο» (truncated octahedron) μιας κυψέλης. [49]

4.2 Χαρακτηρισμός των κυψελοειδών μεταλλικών υλικών

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι κύριες μέθοδοι χαρακτηρισμού των μεταλλικών αφρών. Πρόκειται για μεθόδους μετρήσεων των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων των μεταλλικών αφρών.

Γενικά, οι μέθοδοι χαρακτηρισμού των υλικών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) τις καταστροφικές και β) τις μη καταστροφικές, ανάλογα με το αν υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση στον υπό μέτρηση δοκίμιο, ή αν αυτό παραμένει αμετάβλητο ή μεταβάλλεται ελάχιστα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Σε γενικές γραμμές υπάρχει μεγάλο εύρος μη καταστροφικών μεθόδων, το οποίο χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό υλικών και εξαρτημάτων. Στη συνέχεια περιγράφονται μόνο οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην έρευνα των κυψελοειδών μεταλλικών υλικών. ^[50]

4.2.1 Καταστροφικές μέθοδοι

Σε αυτή τη παράγραφο περιγράφονται οι καταστροφικές μέθοδοι χαρακτηρισμού που χρησιμοποιούνται για να μελετηθούν οι ιδιότητες των μεταλλικών αφρών.

4.2.1.a Παρατήρηση μορφολογίας

Η μορφολογία του κελιού και η μικροδομή των κυψελοειδών υλικών μπορεί να αναλυθεί με οπτικές παρατηρήσεις σε διάφορες μεγεθύνσεις. Γενικά δεν πρόκειται για μία συγκεκριμένη μέθοδο. Αν και η διαδικασία της ανάλυσης είναι μη καταστροφική, η προετοιμασία ωστόσο του δείγματος συνήθως επιβάλλει την κοπή και το γυάλισμα του δείγματος και για το λόγο αυτό συμπεριλαμβάνεται στις μεθόδους καταστροφικού ελέγχου.

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

4.2.1.b Ανάλυση επιφανειακής παραμόρφωσης

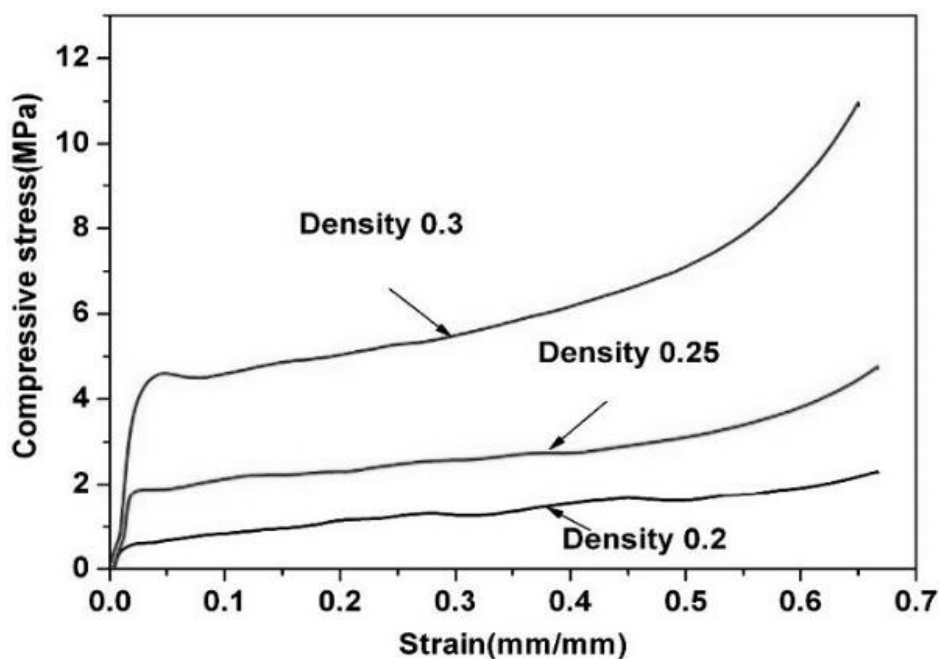
Μια μέθοδος ανάλυσης της επιφάνειας των μεταλλικών αφρών είναι αυτή που αποκαλείται που καλείται «ανάλυση επιφανειακής παραμόρφωσης». Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένα δείγμα αφρού παραμορφώνεται, ενώ συγχρόνως η εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου παρατηρείται συνεχώς με μια κάμερα. Συσχετίζοντας τις αναλύσεις μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών με οπτικό μικροσκόπιο, λαμβάνουμε τις επιθυμητές μετρήσεις. ^[51]

4.2.1.c Δοκιμή σε θλίψη

Η δοκιμή σε θλίψη είναι η κύρια μέθοδος προσδιορισμού, της ικανότητας των μεταλλικών αφρών να απορροφήσουν ενέργεια. Η διαδικασία είναι ίδια με αυτή στα συμπαγή υλικά και μέσω του επόμενου διαγράμματος πληροφορεί για την ανελαστική συμπεριφορά των αφρών, και καθορίζει έτσι τη χρήση τους.

Οι μηχανικοί έλεγχοι των κυψελοειδών υλικών είναι προαπαιτήση να έχουν διενεργηθεί πριν από την εφαρμογή τους σε κάθε κατασκευή. Τα αποτελέσματα των μηχανικών μετρήσεων είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη καθορισμένων

εφαρμογών ή γενικότερα για τη δημιουργία βάσεων δεδομένων, που χρειάζονται για τη δημιουργία επίλυσης μοντέλων με τα υπολογιστικά συστήματα. ^[50]



4-1 Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για αφρούς αλουμινίου με διαφορετικές πυκνότητες [g/cm³] [145]

4.2.1.d Μέτρηση αντοχής σε διάβρωση

Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν καθιερωμένοι έλεγχοι για τη διάβρωση στους μεταλλικούς αφρούς. Συνήθως εφαρμόζονται μέθοδοι ελέγχου από άλλες διαδικασίες, όπως για παράδειγμα οι έλεγχοι που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Επίπεδα δείγματα τύπου σάντουιτς με πυρήνα από αφρό αλουμινίου χαρακτηρίζονται από ελέγχους, κατά τους οποίους τα δείγματα δοκιμάζονται σε 10 κύκλους των 7 ημερών με 24ώρη έκθεση σε αλατώδες ψεκασμό, 4 ημέρες επί 24 ώρες σε διάφορα περιβάλλοντα υγρασίας, και 48ώρη έκθεση σε θερμοκρασία δωματίου με κανονική υγρασία (23 °C, 50 %). ^[50]

4.2.2 Μη καταστροφικές μέθοδοι

Στη παρούσα παράγραφο γίνεται περιγραφή επτά βασικών μη καταστροφικών μεθόδων χαρακτηρισμού των μεταλλικών αφρών:

4.2.2.a Μέτρηση σχετικής πυκνότητας

Το σημαντικότερο μέγεθος για να χαρακτηριστούν οι μεταλλικοί αφροί είναι η σχετική πυκνότητα, η οποία εκφράζεται με το πηλίκο της πυκνότητας του αφρώδους υλικού ρ^* , προς την πυκνότητα του μητρικού μετάλλου (υλικό βάσης) ρ_s , από το οποίο είναι φτιαγμένος ο αφρός (ρ^*/ρ_s). Το μέγεθος αυτό επηρεάζεται από το μέγεθος των κυψελίδων, το πάχος των τοιχωμάτων και τη διάμετρο των πόρων. Τα αποτελέσματα αυτής της μέτρησης πληροφορούν σχετικά με τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του αφρού.

Όταν υπολογίζεται μεγάλη τιμή σχετικής πυκνότητας, επί της ουσίας υποδεικνύεται μεγαλύτερο ποσοστό βασικού υλικού στον όγκο του αφροποιημένου δοκιμίου και συνεπώς παχύτερα δομικά στοιχεία όπως ακμές ή έδρες. Αυτό άμεσα σημαίνει πως τα δομικά στοιχεία είναι δυνατό να παραλαμβάνουν μεγαλύτερα φορτία μέχρι το ανώτατο σημείο ελαστικής παραμόρφωσης.

Γενικά, οι τιμές που παίρνει η σχετική πυκνότητα, συνήθως βρίσκονται μεταξύ 0,05 και 0,27, πάντα όμως αυτό το ποσό είναι κάτω από 0,3. Το 0,3 αποτελεί όριο πάνω από το οποίο το υλικό δεν χαρακτηρίζεται ως μεταλλικός αφρός, αλλά ως μέταλλο με απομονωμένους πόρους. Για μήκος κυψέλης l και πάχος τοιχωμάτων t (εικόνα 4.1.5), αν ισχύει $t \ll l$, τότε η σχετική πυκνότητα για μεταλλικούς αφρούς κλειστού κελιού είναι: ^[49]

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

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

Μπορούμε να καθορίσουμε την πυκνότητα ενός πορώδους υλικού ζυγίζοντάς το και μετρώντας τον όγκο, χρησιμοποιώντας την αρχή του Αρχιμήδη. Εάν το προς εξέταση δείγμα δεν έχει κλειστή εξωτερική επιφάνεια, για να εμποδίσουμε την εισχώρηση του υγρού στους πόρους, το επικαλύπτουμε με ένα υλικό, π.χ. με ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς. ^{[19],[49]}

4.2.2.b Μέθοδος εμποτισμού με χρώμα

Όταν παράγονται μεταλλικοί αφροί, το υλικό περνάει από διάφορες καταστάσεις, και έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το τελικό δοκίμιο να περιλαμβάνει διαφόρων ειδών ατέλειες. Τέτοιου είδους ατέλειες είναι τρύπες ή ρωγμές στα τοιχώματα των κελιών των κελιών, ή ακόμα και στην εξωτερική επιφάνεια.

Η μέθοδος εμποτισμού με χρώμα, βοηθάει προκειμένου να φανούν και να αποτυπωθούν αυτές οι ατέλειες. Η διαδικασία είναι απλή, όπου γίνεται επάλειψη με ένα χημικό υγρό στην επιφάνεια του δοκιμίου μεταλλικού αφρού που εξετάζεται. Το υγρό αυτό απορροφάται από τα σημεία που υπάρχουν οπές και τις ρωγμές.

Αφού στεγνώσει η υπό εξέταση επιφάνεια, αλείφεται με ένα κατάλληλο βάμμα, το οποίο χρωματίζει την παραμένουσα χημική επίστρωση, στις περιοχές που δεν απορροφήθηκε, λόγω μη ύπαρξης ρωγμών.

Με αυτό τον τρόπο αποτυπώνονται όλες οι ατέλειες, οι οποίες γίνονται άμεσα ορατές. ^[19]

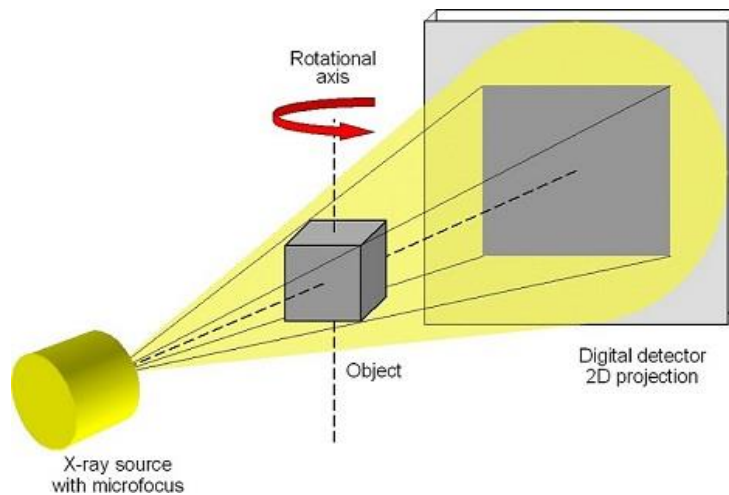
4.2.2.c Ραδιογραφία και ραδιοσκοπία με ακτίνες-Χ

Η δομή των υλικών με κυψελοειδή μορφή είναι δυνατό να αποτυπωθούν κάνοντας χρήση τεχνικών απορρόφησης ακτινών-Χ. Με μία τέτοια μέθοδο, μια δέσμη ακτινών-Χ πέφτει πάνω στο δείγμα και στη συνέχεια μετριέται η εξασθένησή της.

Επιλέγεται μια συγκεκριμένη εγκάρσια επιφάνεια όπου πραγματοποιείται μέτρηση στις δύο διαστάσεις, διαμορφώνοντας έτσι μια διδιάστατη αποτύπωση του αφρού. ^[51]

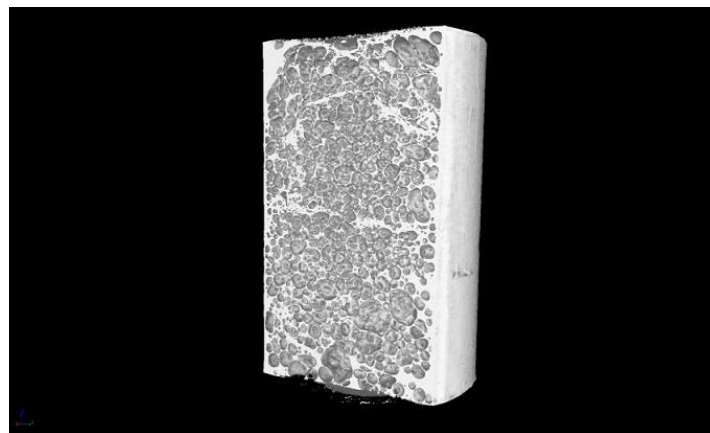
4.2.2.d Τομογραφία με ακτίνες-Χ

Η μη καταστροφική μέθοδος χαρακτηρισμού των υλικών με ακτίνες-Χ αποτελείται από δύο βήματα: α) σάρωση και β) αναδόμηση όγκου όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.2.d.1



4.2.2.d 1 Διαδικασία τομογραφίας ακτίνων -X (X-ray tomography). [52]

Κατά τη διάρκεια της σάρωσης λαμβάνονται πολλές εικόνες από ένα μεγάλο αριθμό διευθύνσεων του δείγματος, το οποίο περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα. Από τις διάφορες εικόνες λαμβάνεται η εξασθένηση των ακτίνων σε κάθε σημείο του αντικειμένου και με τον τρόπο αυτό η τοπική πυκνότητα καταγράφεται με μαθηματικό τρόπο. Στην εικόνα 4.2.2.d.2 παρουσιάζεται μια 3D εικόνα μεταλλικού αφρού αλουμινίου από τομογραφία. [52]



4.2.2.d 2 3D εικόνα υψηλής ανάλυσης αφρού αλουμινίου. [52]

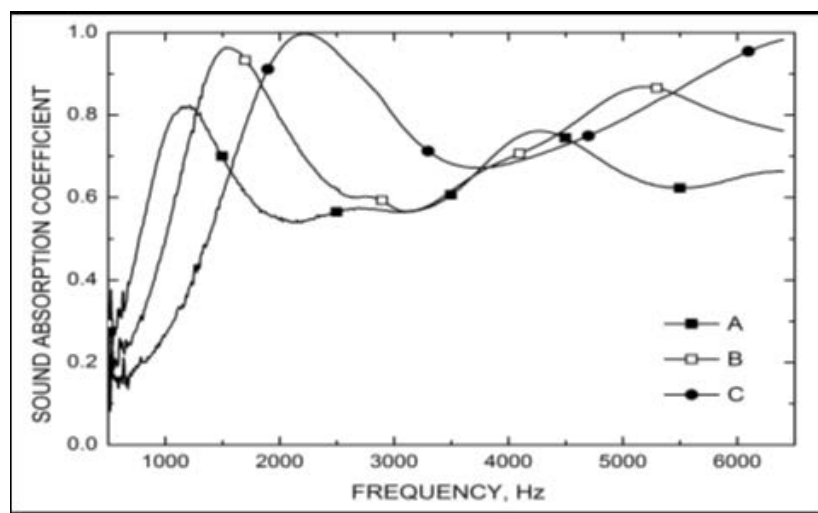
4.2.2.e Έλεγχος με αισθητήρες ρεύματος δίνης

Είναι δυνατό να μετρηθεί η σχετική πυκνότητα και το μέγεθος των πόρων ενός μεταλλικού αφρού, με χρήση ηλεκτρικής αντίστασης. Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος υλικών με δινορεύματα στηρίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ

εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ύλης. Η διαδικασία σε αυτή τη περίπτωση είναι η εξής: Αρχικά το δοκίμιο που θέλουμε να μετρήσουμε πυκνότητα και μέγεθος πόρων, και που είναι από ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό, τοποθετείται μέσα σε ένα πηνίο (ή παραπλήσια σε αυτό). Στο πηνίο αυτό εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, και με αυτό το τρόπο δημιουργούνται στο εσωτερικό του ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει στο εσωτερικό του δοκιμίου ρεύμα ίδιας συχνότητας με αυτή της μεταβολής του πεδίου. Το επαγωγικό αυτό ρεύμα με τη σειρά του δημιουργεί δευτερογενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλοεπιδρά με το αρχικό του πηνίου. Έτσι είναι δυνατό να ανιχνευθούν αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα ή τη μαγνητική διαπερατότητα, που οφείλονται στην παρουσία διαφορετική χημικής σύστασης. [49],[50]

4.2.2.f Μέτρηση της απορρόφησης ήχου

Οι ιδιότητες της απορρόφησης του ήχου από πορώδη υλικά συνήθως μετρούνται με το σωλήνα αντίστασης, με τον οποίο πετυχαίνουμε γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2.2.f.1 η μέτρηση της εξασθένησης του ήχου, είναι συνάρτηση της συχνότητας:



4-2 Συντελεστής απορρόφησης ήχου, συναρτήσεως συχνότητας για δείγματα με διαφορετικό μέγεθος πόρων(A<B<C) [53]

Οι αφροί αλουμινίου με ανοιχτού τύπου κυψελίδες είναι καλοί στην απορρόφηση του ήχου, και οι καμπύλες της απόσβεσης είναι μετατοπισμένες προς τις

υψηλότερες συχνότητες, όσο η πυκνότητα του πορώδους αυξάνει. Από την άλλη, συμπαγή δείγματα και πορώδη μεταλλικά υλικά με κλειστού τύπου πόρους έχουν την ίδια καμπύλη απόσβεσης, εξαρτώμενη από το διάκενο, καθώς ο ήχος δεν μπορεί να διαπεράσει το δείγμα και η απορρόφηση γίνεται στην επιφάνεια. ^[53]

4.2.2.g Μέτρηση της ελαστικότητας με ταλάντωση

Το μέτρο του Young και ο παράγοντας της απώλειας του υλικού μπορεί να καταγραφεί με τη βοήθεια της ανάλυσης με ταλάντωση. Στην πιο απλή τεχνική, ένα μακρύ ορθογωνικό δοκίμιο ή ένα λεπτό τετράγωνο φύλλο από το υπό εξέταση υλικό εξαναγκάζεται σε ταλάντωση. Μπορούν να δημιουργηθούν διαμήκεις, εγκάρσιες ή στρεπτικές διεγέρσεις. Οι απορρέουσες ταλαντώσεις συλλέγονται από ένα επαγωγικό πηνίο. Το εύρος των ταλαντώσεων ως συνάρτηση της συχνότητας διεγέρσεως μας δείχνει τις χαρακτηριστικές αιχμές συντονισμού. Οι θέσεις αυτές των αιχμών επιτρέπουν τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας E από τις διαστάσεις και τη μάζα του δείγματος. ^{[50], [54]}

5 Κεφάλαιο 5 : Σύνθετοι και Νανοσύνθετοι Μεταλλικοί Αφροί

5.1 Εισαγωγικά

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετώνται οι σύνθετοι μεταλλικοί αφροί, οι αφροί δηλαδή που προκύπτουν με ενίσχυση σωματιδίων είτε σε μικροκλίμακα είτε σε νανοκλίμακα. Αναλύονται σχηματισμοί των εν λόγω αφρών από κατεξοχήν χρησιμοποιούμενα σωματίδια σε ερευνητικό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο. Αρχικά γίνεται μία επισκόπηση των ιδιοτήτων και εφαρμογών των μεταλλικών αφρών, όπως παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Σε αυτό το κεφάλαιο μελετώνται οι σύνθετοι μεταλλικοί αφροί, οι αφροί δηλαδή που προκύπτουν με ενίσχυση σωματιδίων είτε σε μικροκλίμακα είτε σε νανοκλίμακα. Αναλύονται σχηματισμοί των εν λόγω αφρών από κατεξοχήν χρησιμοποιούμενα σωματίδια σε ερευνητικό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο. Αρχικά γίνεται μία επισκόπηση των ιδιοτήτων και εφαρμογών των μεταλλικών αφρών, όπως παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

5.1.1 Επισκόπηση ιδιοτήτων και εφαρμογών μεταλλικών αφρών

Οι άφλεκτοι, ανακυκλώσιμοι και ελαφροί μεταλλικοί αφροί, ανοιχτού και κλειστού τύπου κελιών χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα ως λειτουργικές και κατασκευαστικές εφαρμογές.^{[7-8], [11-12]} Οι μεταλλικοί αφροί με ανοιχτές κυψελίδες χρησιμοποιούνται εκτενώς ως εναλλάκτες θερμότητας, φίλτρα, ηλεκτρόδια, απορροφητές κραδασμών, που εκμεταλλεύονται την μεγάλη εσωτερική τους επιφάνεια και τις υψηλές θερμικές και ηλεκτρικές αγωγιμότητές τους.^{[8],[11]} Οι αφροί κλειστών κυψελίδων, και ιδιαίτερος οι αφροί κράματος αλουμινίου, έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές δομικών εφαρμογών (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική βιομηχανία, βιομηχανικός εξοπλισμός και κατασκευή κτιρίων) που απαιτούν ελαφρές κατασκευές με υψηλή αντοχή σε βάρος και υψηλές αναλογίες ακαμψίας - βάρους, υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κρούσης και καλή απόσβεση θορύβου και κραδασμών.^{[7],[12]} Οι μεταλλικοί αφροί, και ειδικότερα οι αφροί αλουμινίου κλειστού τύπου κελιού, συνήθως εφαρμόζονται ως πυρήνας των πάνελ τύπου

σάντουιτς ^[55], ή ως πληρωτικό υλικό των δομών με λεπτό τοίχωμα, ^[56] αντίστοιχα. Σε αυτές τις σύνθετες κατασκευές, τα λεπτά μεταλλικά φύλλα ^[57] και οι δομές με λεπτά τοιχώματα (π.χ. σωλήνες) ^{[58],[59]} εξασφαλίζουν την υψηλή μηχανική αντοχή, ενώ ο αφρός είτε ως πυρήνας ή πληρωτικό υλικό, συμβάλλει κυρίως στην υψηλή αντοχή κατά την κρούση ^{[56],[60]}. Παρά τη σχετικά χαμηλή μηχανική αντοχή αυτών των αφρών δεν περιορίζεται το φάσμα των εφαρμογών τους.

5.1.2 Ανάπτυξη και μελέτη μεθόδων για ενίσχυση των μεταλλικών αφρών

Καταβάλλονται ερευνητικές προσπάθειες για την ενίσχυση της μηχανικής απόδοσης των υπαρχόντων αφρών και για την ανάπτυξη αφρών κραμάτων αλουμινίου υψηλής αντοχής ή ακόμη την ανάπτυξη μιας νέας κατηγορίας υψηλής απόδοσης, ώστε να διευρυνθεί ακόμη περισσότερο το φάσμα των εφαρμογών αυτών των υλικών. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την ενίσχυση της μεταλλικής μήτρας, ή με τη βελτιστοποίηση της δομής των πόρων. Οι πλέον οικονομικοί τρόποι που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των υφιστάμενων αφρών αλουμινίου είναι: α) η επιλογή ενός ισχυρού κράματος αλουμινίου (Al) είτε σε μορφή σκόνης ή σε ράβδο, ή β) εφαρμογή συμβατικών διαδικασιών θερμικής επεξεργασίας (π.χ., καθίζηση και ανόπτηση) που συνήθως χρησιμοποιούνται για τα κράματα αλουμινίου ^[61-64]. Οι θερμικές επεξεργασίες προάγουν τον σχηματισμό ιζημάτων από στερεό διάλυμα (σκλήρυνση με καθίζηση) ή τη διάχυση στοιχείου κράματος στη μήτρα, σχηματίζοντας ένα στερεό διάλυμα.

Μερικοί ερευνητές μελέτησαν τις επιδράσεις αυτών των θερμικών επεξεργασιών στις μηχανικές ιδιότητες τόσο για τους αφρούς αλουμινίου ανοικτών ^{[61],[62]} όσο και για τους αφρούς κλειστών κελιών ^{[63],[64]}. Ο Zhou ^[61] διερεύνησε τα αποτελέσματα της ανόπτησης με T6 σκλήρυνση, στη συμπεριφορά αφρών αλουμινίου ανοικτών κελιών (10 PPI), που υπόκεινται σε θλιπτική παραμόρφωση, και διαπίστωσε ότι η T6-σκλήρυνση αυξάνει την αντοχή αυτών των αφρών (π.χ. η μέγιστη τάση άλλαξε από 2,2 σε 3,2 MPa). Από την άλλη πλευρά, η θερμική ανόπτηση έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή σε θλίψη αυτών των αφρών, όπου οι κύριες μηχανικές παράμετροι μειώνονται (η μέγιστη τάση μειώθηκε από 2,2 σε 1,0 MPa μετά την επεξεργασία). Ο Yamada ^[62] βρήκε παρόμοια αποτελέσματα για αφρούς κράματος αλουμινίου κλειστών κυψελίδων. Για παράδειγμα, η αντοχή σε θλίψη των αφρών 6101 ^{[63],[64]} και 7075 ^[63] αλουμινίου θα μπορούσε να βελτιωθεί εφαρμόζοντας μια κατάλληλη επεξεργασία T6-σκλήρυνσης. Παρ' όλα αυτά,

μερικές από αυτές τις θερμικές επεξεργασίες αναπτύσσουν ρωγμές στα τοιχώματα των κυψελίδων λόγω των θερμικών τάσεων που είναι υπεύθυνες για την αστάθεια-ταλάντωση της τάσης στην περιοχή του πλατό. ^[64] Η μηχανική απόδοση των υπαρχόντων αφρών μπορεί επίσης να αυξηθεί μειώνοντας το μέγεθος των κυψελοειδών πόρων τους, όπως καταδεικνύεται από τους Xia ^[65] και Jiang. ^[66] Εν τούτοις, οι προαναφερθείσες μεθοδολογίες επιτρέπουν ελαφρά αύξηση της μηχανικής αντοχής τέτοιων αφρών, αλλά δεν επιτρέπουν την κατασκευή αφρών υψηλής αντοχής.

Έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες για την κατασκευή μεταλλικών αφρών υψηλής αντοχής. Οι περισσότερες ιδέες σε αυτές τις έρευνες, προέκυψαν με βάση την έρευνα που διεξήχθη για την κατασκευή συμπαγών μετάλλων υψηλής αντοχής. ^{[67],[68]} Μια μέθοδος σκλήρυνσης των κραμάτων αλουμινίου είναι η προσθήκη άλλων στοιχείων (π.χ. Mg, Ni) για την δημιουργία σχηματισμού διαμεταλλικών ενώσεων (π.χ. σκλήρυνση με καθίζηση). ^[67] Μια άλλη μέθοδος, ενσωματώνει ενισχυτικά μικροσκοπικά στοιχεία στη μεταλλική μήτρα για την ενίσχυση της απόδοσης του εύπλαστου μετάλλου. ^[68] Για παράδειγμα, κεραμικά σωματίδια, π.χ. αλουμίνα (Al_2O_3), καρβίδιο του πυριτίου (SiC), ^[67] κεραμικές ίνες, ^[67] κεραμικά νανοσωματίδια ^[69] είναι μερικά από τα συνηθέστερα ενισχυτικά υλικά. Πιο πρόσφατα, υπήρξε αυξημένο ενδιαφέρον για την εξερεύνηση ανθρακούχων υλικών ως ενισχυτικών παραγόντων για κράματα μετάλλων. ^[70-72] Αυτό αποτέλεσε ένα ελκυστικό ερευνητικό πεδίο τόσο από την άποψη των επιστημονικών όσο και των βιομηχανικών εφαρμογών. Έχουν διεξαχθεί σημαντικές ερευνητικές δραστηριότητες που αφορούν τα νανοσύνθετα μεταλλικά πλέγματα. Μέχρι σήμερα, οι ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώθηκαν κυρίως σε κράματα αλουμινίου ενισχυμένα με νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon Nano-Tubes, CNTs). ^{[70],[72]} Όπως είναι γνωστό, οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν υψηλό λόγο διαστάσεων (δηλ. λόγο μήκους προς διάμετρο ή λόγο μήκους προς πάχος) και παρουσιάζουν εκπληκτικό υψηλό ελαστικό μέτρο και μηχανική αντοχή, καθώς και εξαιρετικές ηλεκτρικές και θερμικές αγωγιμότητες. ^[71] Ως αποτέλεσμα, θεωρούνται τα αποτελεσματικότερα ενισχυτικά στοιχεία για την κατασκευή σύνθετων υλικών για δομικές και λειτουργικές εφαρμογές. ^[73] Αν και τα αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα, η ενσωμάτωση των CNTs σε μεταλλικές μήτρες εξακολουθεί να είναι ένα άλυτο πρόβλημα λόγω της υψηλής τάσης τους να συσσωματώνονται σε συστάδες, της κακής τους διασποράς σε μεταλλικές μήτρες και της χαμηλής διαβρεξιμότητας (διαβρεξιμότητα αποκαλείται η ικανότητα να διατηρηθεί επαφή μεταξύ υγρού και στερεής επιφάνειας) του άνθρακα από τηγμένο μέταλλο. Η κακή διαβρεξιμότητα προέρχεται από τη

μεγάλη διαφορά επιφανειακών τάσεων μεταξύ CNTs και τηγμένου μετάλλου. Επίσης, ο σχηματισμός διεπιφανειακών προϊόντων αντίδρασης που οδηγούν σε απώλεια της δομικής τους ακεραιότητας είναι ένα άλλο μειονέκτημα. Αυτές είναι οι τρέχουσες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν στο πεδίο σύνθετης μεταλλικής μήτρας.¹⁷⁰ Τα ενισχυμένα υλικά με μικροστοιχεία (της τάξης μικρών “μ”) και νανοστοιχεία (της τάξης νάνο “n”), χαρακτηρίζονται ως σύνθετα μεταλλικά υλικά (ή σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας) ή ως νανοσύνθετα μεταλλικά υλικά, αντίστοιχα..

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση των κύριων σύνθετων και νανοσύνθετων μεταλλικών αφρών με βελτιωμένες μηχανικές επιδόσεις, με ιδιαίτερη έμφαση στους αφρούς αλουμινίου που είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι.

5.2 Σύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με κεραμικά σωματίδια

Όπως ειπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι ενισχυμένοι μεταλλικοί αφροί με μικροστοιχεία (της τάξης των μικρών “μ”) αναφέρονται ως σύνθετοι μεταλλικοί αφροί. Στη συγκεκριμένη παράγραφο αναφέρονται σύνθετοι μεταλλικοί αφροί που έχουν ενισχυθεί με μικροσωματίδια από κεραμικό υλικό.

Τα κεραμικά σωματίδια μικρού μεγέθους χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στο στους μεταλλικούς αφρούς για την ενίσχυση της σταθερότητας (stabilizing agent) του υγρού αφρού και την αποφυγή του σχηματισμού μη ομοιόμορφου μεγέθους πόρων. Τα κεραμικά σωματίδια μετακινούνται κατά προτίμηση στη διεπιφάνεια υγρού/αερίου και σταθεροποιούν τις φυσαλίδες, ενώ αυξάνουν το ιξώδες του τήγματος.¹⁷⁴ Επίσης εμποδίζουν την αποστράγγιση (ροή του υγρού τήγματος προς τα κάτω) του μεταλλικού τήγματος και τη συνένωση των φυσαλίδων, τα οποία αποτελούν κυρίαρχες αιτίες μη ομοιόμορφων δομών σε αφρούς. Η μετακίνηση των σωματιδίων στις διασυνδέσεις υγρού/αερίου σχετίζεται κυρίως με τις διαφορές επιφανειακών τάσεων μεταξύ των στερεών σωματιδίων και του τηγμένου μετάλλου και την κακή ικανότητα ύγρανσης-διαβρεξιμότητας. Από αυτή την άποψη, τα κεραμικά σωματίδια σε μεταλλικούς αφρούς παίζουν έναν σταθεροποιητικό ρόλο παρόμοιο με αυτόν των ουσιών που δρουν σε επιφάνειες σε πολλά άλλα συστήματα αφρού (γαλακτώματα, υδατικοί υγροί αφροί κλπ.). Η παρουσία κεραμικών σωματιδίων στις διεπιφάνειες υγρού/αερίου συμβάλλει στο

σχηματισμό γεφυρών μεταξύ αντίθετων διεπαφαιών υγρού/αερίου, εμποδίζοντας τες να πλησιάσουν μεταξύ τους, να σπάσουν οι φυσαλίδες και να συνενωθούν. Κατά συνέπεια, τείνουν να επιβραδύνουν τη ροή του υγρού εκτός του αφρού και να παρεμποδίζουν την ανάπτυξη των φυσαλίδων, συμβάλλοντας σε μια πιο ομοιόμορφη δομή αφρού.

5.2.1 Προσθήκη κεραμικών σωματιδίων με τεχνικές άμεσης αφροποίησης

Τα σταθεροποιητικά κεραμικά σωματίδια (π.χ. SiC και Al₂O₃) απαιτούνται για την κατασκευή αφρών αλουμινίου κλειστών κυψελών με τεχνική άμεσης αφροποίησης, η οποία είναι μία από τις πιο κοινές και οικονομικές μεθόδους.^{[74],[75]} Οι μέθοδοι άμεσης αφροποίησης, όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2, ξεκινούν από τηγμένο μέταλλο που περιέχει διασκορπισμένα κεραμικά σωματίδια, μέσα στα οποία εγχύονται άμεσα φυσαλίδες αερίου^[76] ή δημιουργούνται χημικά με την αποσύνθεση ενός αφροποιητικού παράγοντα (π.χ. υδρίδιο του τιτανίου, ανθρακικό ασβέστιο) ή με κατακρήμνιση διαλυμένου αερίου στο τήγμα ελέγχοντας τη θερμοκρασία και την πίεση.^[77] Όταν διασκορπίζονται στο τηγμένο μέταλλο, τα κεραμικά σωματίδια εναποτίθενται στις διεπιφάνειες αερίου/μετάλλου των διογκούμενων φυσαλίδων, μπλοκάροντας την κατάρρευσή τους.^[75] Εν τούτοις, απαιτείται συνήθως μεγάλη περιεκτικότητα σε κεραμικά σωματίδια (άνω του 10% κατ' όγκο) για την αποτελεσματικότητα των αφρών. Για παράδειγμα, οι αφροί AlSi7Mg (A356) παρασκευάζονται ανακατεύοντας σωματίδια SiC 20% κατ' όγκο στο τήγμα AlSi7Mg που περιέχει υδρίδιο του τιτανίου ως παράγοντα αφροποίησης.^[78] Κατά συνέπεια, οι ενισχυμένοι αφροί που προκύπτουν παρουσιάζουν εύθραυστη μηχανική συμπεριφορά, γεγονός που προσδίδεται στην τόσο υψηλή περιεκτικότητα σε σωματίδια, τοποθετημένα στο τοίχωμα των κυψελίδων όπου προκαλούν εντοπισμένες παραμορφώσεις. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο τέτοιοι ελαφροί ενισχυμένοι αφροί δεν συνιστώνται για δομικές εφαρμογές που απαιτούν ομαλή συμπεριφορά. Τέτοιου τύπου αφροί χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή κτιρίων όταν πληρούν και άλλους ρόλους, όπως ηχομόνωση και θερμική μόνωση.^{[7],[11]} Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα κεραμικών σωματιδίων σε αυτούς τους αφρούς καθιστά δύσκολη την κοπή και τη μηχανική κατεργασία (αύξηση του χρόνου κατεργασίας) συμβάλλοντας στην αύξηση του κόστους παραγωγής. Η μείωση του μεγέθους των ενισχυτικών σωματιδίων οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων για δεδομένη σύσταση και μπορεί να επιτρέψει τη μείωση της περιεκτικότητας κατ'

όγκο που απαιτείται για μια αποτελεσματική σταθεροποίηση του αφρού, με ταυτόχρονη μείωση του κόστους και της ευθραυστότητας των αφρών.

Τα κεραμικά σωματίδια έχουν διερευνηθεί επίσης για τον έλεγχο της κυψελοειδούς δομής (π.χ. μεγέθους των πόρων) ελαχιστοποιώντας τα δομικά ελαττώματα και τις ατέλειες, και βελτιώνοντας τη ποιότητα των αφρών.^[79] Η διερεύνηση του ρόλου των κεραμικών σωματιδίων ως ενισχυτικών υλικών επιχειρήθηκε επίσης ως μία οδός για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της μεταλλικής μήτρας των ήδη υπαρχόντων αφρών. Στην πραγματικότητα, όλα αυτά τα χαρακτηριστικά συνδέονται στενά μεταξύ τους, καθώς η κυψελοειδής δομή (όπως το μέγεθος πορώδους) και τα ποσοστά πυκνότητας επηρεάζουν έντονα τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων μεταλλικών αφρών που προκύπτουν. Διάφορα κεραμικά μικροσωματίδια έχουν διερευνηθεί τόσο ως σταθεροποιητικοί παράγοντες (stabilizing agents) όσο και ως ενισχυτικοί παράγοντες (reinforcing agents), συμπεριλαμβανομένων των Al_2O_3 ,^[80-82] SiC ,^[83-91] διβωρικού τιτανίου (TiB_2),^[92] οξειδίο υτρίου (Y_2O_3)^[93] και AlN .^[94] Τα κεραμικά σωματίδια μπορούν είτε να διασκορπιστούν απ' ευθείας στο τηγμένο κράμα αλουμινίου ή να σχηματιστούν επί τόπου είτε μέσω χημικών αντιδράσεων (π.χ. οξειδωση) ή μεταλλουργικών αντιδράσεων (π.χ. διαμεταλλικών ενώσεων). Η ποσότητα του επί τόπου σχηματισμού σωματιδίων μπορεί να προσαρμοστεί με έλεγχο της ατμόσφαιρας και της ανάδευσης που ενισχύεται από την κίνηση των φυσαλίδων αερίου που έχουν εγχυθεί λόγω άνωσης, ή με την εφαρμογή περαιτέρω μηχανικής ανάδευσης. Η προσθήκη στοιχείων που αναζητούν οξυγόνο (βηρύλλιο, μαγνήσιο, ασβέστιο, στροντίου και βάριο) είναι ένας κοινός τρόπος για την προώθηση της εσωτερικής οξειδωσης. Για παράδειγμα, σταθεροί αφροί Alporas παρασκευάζονται προσθέτοντας ασβέστιο σε τήγμα αλουμινίου υπό μηχανική ανάδευση και παράλληλη έγχυση αέρα, βελτιώνοντας το ιξώδες του τήγματος λόγω του επί τόπου σχηματισμού σωματιδίων οξειδίου. Στη συνέχεια προστίθεται παράγοντας αφροποίησης στο τήγμα. Μια άλλη προσέγγιση για τον επί τόπου σχηματισμό σταθεροποιητικών σωματιδίων καρβιδίου και βοριδίου σε μεταλλικούς αφρούς, συνίσταται στην προσαρμογή της μεθόδου τήξης με υποβοηθούμενη ροή.^[95]

Τα ευρήματα που αναφέρονται σε μια σειρά δημοσιευμένων εργασιών που περιλαμβάνουν διαφορετικές μεθόδους παρασκευής συνοψίζονται στους Πίνακες 5-1 και 5-2. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από μεθόδους και άμεσης αφροποίησης όπου τα σωματίδια μικρού μεγέθους διασκορπίζονται απευθείας στο τηγμένο μέταλλο σε υψηλές θερμοκρασίες υπό μηχανική ανάδευση, αλλά και

έμμεσης,^[74] όπου τα σωματίδια μικρού μεγέθους αναμιγνύονται με μεταλλικές σκόνες με βάση τη μέθοδο κονιομεταλλουργίας,^[96] αντίστοιχα.

5.2.2 Προσθήκη κεραμικών σωματιδίων με μεθόδους κονιομεταλλουργίας

Η μέθοδος κονιομεταλλουργίας,^{[22],[97]} μια από τις πλέον εμπορικά εκμεταλλεύσιμες για την κατασκευή των μεταλλικών αφρών κλειστών κυψελίδων, συνίσταται στη θέρμανση ενός προδρόμου δοκιμίου που λαμβάνεται με συμπίεση μεταλλικού κράματος (π.χ. κράμα αλουμινίου) με σκόνες παράγοντα αφροποίησης (π.χ., υδρίδιο του τιτανίου, TiH_2). Υπό την εσωτερική πίεση αερίου, που προέρχεται από την αποσύνθεση του παράγοντα αφροποίησης, ομοιόμορφα διεσπαρμένη εντός του προδρόμου δοκιμίου, το μέταλλο αφροποιείται και αποκτά μία πορώδη δομή κλειστών κυψελίδων. Θα πρέπει να υπάρχει μια καλή συσχέτιση μεταξύ της θερμικής αποσύνθεσης του παράγοντα αφροποίησης με την απελευθέρωση ενός αερίου (π.χ. υδρογόνου, H_2) και με την τήξη του μετάλλου.^[22] Ο υγρός αφρός στη συνέχεια στερεοποιείται με ψύξη στον αέρα για να ληφθούν στερεοί αφροί που αποτελούνται από κλειστά κελιά και καλύπτονται από ένα λεπτό εξωτερικό αλλά πυκνό μεταλλικό δέγμα που τους προσδίδει ένα καλό επιφανειακό φινιρίσμα.^[98] Αυτό επιτρέπει την παραγωγή μεταλλικών αφρών με πορώδες μεταξύ 75% και 90%.^[22] Η ικανότητα της μεθόδου κονιομεταλλουργίας να παράγει μεταλλικούς αφρούς με διαφορετικές αρχιτεκτονικές (π.χ. συστήματα σάντουιτς, γεμισμένα προφίλ και δομές 3D σύνθετου σχήματος) είναι το κύριο πλεονέκτημα της εν λόγω μεθόδου.^[98] Επιπρόσθετα, διαφορετικά υλικά ή διαφορετικές δομές μπορούν να συνδεθούν κατά τη διάρκεια του σταδίου αφροποίησης, χωρίς τη χρήση χημικών συγκολλητικών ουσιών. Για παράδειγμα, οι σύνδεσμοι ή τα τυποποιημένα μέρη που χρησιμοποιούνται στα οχήματα (π.χ. παξιμάδια, βίδες, βίδες, πριτσίνια) θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στον μεταλλικό αφρό κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του.^[99] Η μέθοδος κονιομεταλλουργίας επιτρέπει επίσης την παραγωγή επί τόπου σωλήνων γεμισμένων με αφρό, στους οποίους ο αφρός αλουμινίου γεμίζει άδειους σωλήνες από κράματα αλουμινίου, ενώ διογκώνεται κατά τη διαδικασία αφροποίησης.^[56] Το υψηλό κόστος παραγωγής που προέρχεται κυρίως από το πρόδρομο παρασκεύασμα και η δυσκολία κατασκευής μεγάλου όγκου αφρωδών εξαρτημάτων είναι τα κύρια μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου. Εδώ, τα κεραμικά μικροσωματίδια (κατώτερα από 10% κατ' όγκο) διασκορπίζονται απευθείας στο μίγμα σκόνης μετάλλου και

παράγοντα αφροποίησης, χρησιμοποιώντας μηχανικούς αναμικτήρες. Τα πυκνά ενισχυμένα πρόδρομα δοκίμια λαμβάνονται με θερμή συμπίεση του μίγματος κόνεων. Η μέθοδος κονιομεταλλουργίας απαιτεί μικρότερη περιεκτικότητα κεραμικών σωματιδίων σε σύγκριση με την άμεση αφροποίηση τήξης.

Μια αποτελεσματική διασπορά των ενισχυτικών σωματιδίων στη μήτρα είναι απαραίτητη για την πλήρη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της ενσωμάτωσής τους. Ωστόσο, τα σωματίδια μικρού μεγέθους συχνά δεν βρίσκονται καλά διασκορπισμένα στη μεταλλική μήτρα. Η τάση τους να δημιουργούν συστάδες που εμφανίζονται στα τοιχώματα των κελιών, αποδίδεται στην ύπαρξη επιφανειακών τάσεων. Η ευκολία με την οποία τα σωματίδια μικρού μεγέθους αντιδρούν με τη μήτρα μετάλλου κατά τη διάρκεια της τήξης και αφροποίησης για να σχηματίσουν διαμεταλλικά προϊόντα που αυξάνουν το ιξώδες του τήγματος είναι ένα άλλο μειονέκτημα. Οι μηχανισμοί πύκνωσης και σταθεροποίησης των αφρών μπορούν να αξιολογηθούν με ποσοτικοποίηση των διαμεταλλικών αυτών φάσεων που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διεργασίας αφροποίησης τήγματος.^[100-102] Η ανάλυση των φάσεων αναμένεται επίσης πως θα ρίξει φως στη συμπεριφορά των ρωγμών στον αφρό.^{[103],[104]} Ωστόσο, οι επιπτώσεις των αλλαγών φάσης στη διαδικασία αφροποίησης δεν είναι αναλύονται με τον ίδιο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα μερικοί ερευνητές ισχυρίζονται ότι οι διαμεταλλικές φάσεις είναι σημαντικές, ενώ άλλοι πιστεύουν πως τα οξειδία είναι ο κύριος υπεύθυνος για την σταθερότητα του αφρού.^[105] Επιπλέον, το αέριο που απελευθερώνεται από παράγοντες αφροποίησης (π.χ. υδρίδιο του τιτανίου και ανθρακικό ασβέστιο) μπορεί να συσσωρεύεται στη διεπιφάνεια μεταξύ αυτών των σωματιδίων ενίσχυσης και της μεταλλικής μήτρας κατά τη διάρκεια της αφροποίησης, οδηγώντας σε μια ασθενή διασύνδεση. Αυτό αναπόφευκτα περιορίζει τις δυνατότητες ενίσχυσης των μεταλλικών αφρών.

Τα ευρήματα που συνοψίζονται στους Πίνακες 5-1 και 5-2 αποκαλύπτουν ότι πέραν του σταθεροποιητικού ρόλου των κεραμικών σωματιδίων που υπάρχουν σε σύνθετους μεταλλικούς αφρούς, αυξάνουν επίσης την ακαμψία και την εύθραυστη συμπεριφορά των αφρών. Επομένως, για δεδομένη σύσταση (κράματος αλουμινίου και σταθεροποιητικών ή ενισχυτικών παραγόντων), οι πειραματικές μεταβλητές (τύπος σωματιδίων, μέσος όρος μεγέθους, περιεχόμενο σωματιδίων, περιεκτικότητα κατ' όγκο πόρων κ.λπ.) πρέπει να συνυπολογιστούν, λαμβάνοντας υπόψη τις γενικές αλλαγές που προκλήθηκαν στη διαδικασία παραγωγής σύνθετων αφρών μεταλλικής μήτρας.

Πίνακας 5-1 Δοκιμές ενισχυμένων αφρών αλουμινίου με κεραμικά σωματίδια, με χρήση κονιομεταλλουργίας

Μέταλλο	Κεραμικά Σωματίδια	Αρχική Σύσταση	Συνθήκες Δοκιμών	Συμπεράσματα
Al	SiC 8.6–20% κ.ο. (22 μm)	Al (σε κόνεις): <74 μm TiH ₂ (σε κόνεις): <37 μm	Φ 20 mm × 20 mm Συμπέση 0.1 mm·s ⁻¹	Σε σύγκριση με τους μη ενισχυμένους αφρούς Αλουμινίου, τα SiC σωματίδια μειώνουν τα φαινόμενα της αποστράγγισης και εκτρέχυνση των κελιών, αυξάνουν τη γραμμική διαστολή και τη θλιπτική αντοχή των αφρών αλουμινίου, αλλά προκαλούν διακυμάνσεις στην περιοχή του πλατό της καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων και εντείνουν την εύθραυστη συμπεριφορά σύνθετων αφρών. [33]
AlSi7	SiC 10% κ.ο. (3–16μm)	Al (σε κόνεις): <160 μm Si (σε κόνεις): <150 μm TiH ₂ (σε κόνεις): <63 μm	Φ 30 mm × 40 mm Συμπέση 1.1 × 10 ⁻³ s ⁻¹	Η αύξηση των προστιθέμενων ποσοτήτων SiC ή η μείωση του μεγέθους τους μειώνει την αποστράγγιση αλλά οδηγεί σε λιγότερο ομοιογενείς δομές αφρού. Οι συμπιεστικές ιδιότητες και η αποδοτικότητα απορρόφησης ενέργειας υποβαθμίζονται λόγω της έντασης της ευθραυστότητας σε σύγκριση με τους μη ενισχυμένους αφρούς AlSi7. [34]
Al	TiB ₂ 6% κ.ο. (10 μm)	Al (σε κόνεις): 48μm TiH ₂ (σε κόνεις): 33μm	Φ 22 mm × 24 mm Συμπέση 0.5 mm·min ⁻¹	Τα σωματίδια TiB ₂ ενισχύουν σημαντικά τη μέγιστη διόγκωση του αφρού αλλά βελτιώνουν τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των αφρών λόγω της κακής διαβροχής τους από το τηγμένο αλουμίνιο, όπως αποδεικνύεται από τα σωματίδια που προεξέχουν από τα τοιχώματα των κυψελίδων προς την αέρια κατάσταση. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης στην περιοχή του πλατό είναι ομαλές και χαρακτηρίζονται από ελαφρά αυξανόμενη κλίση, ανεξάρτητα από την παρουσία ή την απουσία ενίσχυσης. Η μέγιστη τάση επιτυγχάνεται για σύνθετους αφρούς TiB ₂ -Al. [42]
Al	SiC 0–20% κ.ο. (22 μm)	Al (σε κόνεις): 34.64μm TiH ₂ (σε κόνεις): <37μm	Φ 13 mm × 13 mm Συμπέση 3 × 10 ⁻³ s ⁻¹	Τα σωματίδια SiC αυξάνουν την γραμμική αύξηση του αφρού αυξάνοντας τα ιξώδη. Οι σύνθετοι αφροί SiCp-Al είναι πιο εύθραυστοι σε σύγκριση με τους αφρούς Al. [35]
Al	Al ₂ O ₃ 0–10% κ.ο. (10 μm)	Al (σε κόνεις) Carbamide: 1.2 mm Ethanol: 1–3 wt. %	Φ 25 mm × 30 mm Συμπέση 0.1 mm·s ⁻¹	Η αύξηση περιεκτικότητας κατ' όγκο του Al ₂ O ₃ αυξάνει το συντελεστή Young και η αντοχή σε θλίψη των σύνθετων αφρών εκτείνεται ανάλογα με το μέγεθος πορώδους. Για ένα δεδομένο πορώδες, το πλατό σύνθετων αφρών είναι λιγότερο ομαλό και βραχύτερο από ό, τι για τον αφρό αλουμινίου. Η τάση του πλατό και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αυξάνονται με την περιεκτικότητα σε Al ₂ O ₃ να αυξάνεται έως 2% κατ' όγκο, αλλά αυτή η τάση αντιστρέφεται για περιεκτικότητες υψηλότερου όγκου. Ωστόσο, αντίθετα με άλλες αναφορές [34,41], η αποδοτικότητα απορρόφησης ενέργειας των σύνθετων αφρών είναι πάντοτε υψηλότερη από αυτή των μη ενισχυμένων αφρών Al. [30]
AlSi9Mg	SiC 4% κ.ο. (28 μm)	AlSi9 (κράμα) NaCl (0.9–4 mm in size)	15 mm × 15 mm × 35 mm Συμπέση 10 ⁻³ s ⁻¹	Τα σωματίδια SiC αυξάνουν την τάση και αυξάνουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των σύνθετων αφρών. Οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων των σύνθετων αφρών είναι λιγότερο ομαλές από εκείνες από εκείνες των μη ενισχυμένων αφρών. [36]
Al	Y ₂ O ₃ 0.3–1.2% κ.β. (50 μm)	Al (σε κόνεις) NaCl (σωματίδια): 0.66–0.90 mm	12.8 mm × 6.5 mm × 35 mm Συμπέση 3 mm·min ⁻¹	Η ποσότητα όγκου του Y ₂ O ₃ έως 0,8% κ.β. ενισχύουν την αντοχή σε κάμψη μέχρι το μέγιστο των 20,4 MPa, μια τάση που αντιστρέφεται για περαιτέρω προστιθέμενες ποσότητες, ενώ η μέγιστη μικρό σκληρότητα επιτυγχάνεται εντός της περιοχής από 0,5–0,8% κατά βάρος. [43]

Πίνακας 5-2 Δοκιμές ενισχυμένων αφρών αλουμινίου με κεραμικά σωματίδια, με χρήση άμεσης αεροποίησης

Μέταλλο	Κεραμικά Σωματίδια	Αρχική Σύσταση	Συνθήκες Δοκιμών	Συμπεράσματα	
Zn-22Al	SiC 7% κ.ο. (28 μm)	ZA22 (κράμα μετάλλου) CaCO ₃ : 44 μm	15 mm × 15 mm × 35 mm Συμπύεση (2.2 × 10 ⁻³ s ⁻¹)	Τα σωματίδια SiC αυξάνουν την ευθραυστότητα και ενισχύουν τις διακυμάνσεις της τάσης στην περιοχή του πλατό των σύνθετων αφρών. Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας βελτιώνεται ελαφρώς, αλλά η αποδοτικότητα απορρόφησης ενέργειας υποβαθμίζεται σε σύγκριση με τους μη ενισχυμένους αφρούς.	[41]
AlSi9Mg	SiC 0–20% κ.ο. (28μm)	AlSi9Mg (κράμα) CaCO ₃ : 44 μm	15 mm × 15 mm × 35 mm Συμπύεση (10 ⁻³ s ⁻¹)	Τα ίδια συμπεράσματα με τα ανωτέρω [41]. Σε μια δεδομένη σχετική πυκνότητα, η απόδοση και οι συσσωρευτικές τάσεις των σύνθετων αφρών αυξάνονται με την αυξανόμενη ποσότητα όγκου σωματιδίων SiC.	[37]
Zn-22Al	SiC 10% κ.ο. (28 μm)	ZA22 (σε κόνεις) 40 μm CaCO ₃ : 44 μm	15 mm × 15 mm × 30 mm Συμπύεση (2.2 × 10 ⁻³ s ⁻¹) Φ 70 mm × 10 mm Απόσβεση (400 Hz)	Τα ίδια συμπεράσματα όπως παραπάνω [37,41]. Η ικανότητα απόσβεσης των σύνθετων αφρών είναι ελαφρώς υψηλότερη από εκείνη του κράματος ZA22 και των αφρών ZA22.	[38]
AlSi9Mg	SiC 10% κ.ο. (28 μm)	AlSi9Mg (κράμα) CaCO ₃ : 44 μm	15 mm × 15 mm × 35 mm Συμπύεση 5 × 10 ⁻⁴ -1 × 10 ⁻² s ⁻¹ Φ 30 mm × 10 mm Υψηλή ταχύτητα καταπόνησης (600; 1600 s ⁻¹)	Τα ίδια συμπεράσματα όπως παραπάνω σχετικά με τις επιδράσεις των σωματιδίων SiC στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων αφρών [37,38,41]. Η τάση διαρροής εξαρτάται τόσο από τη σχετική πυκνότητα όσο και από την ταχύτητα παραμόρφωσης, που είναι 10 MPa και 40 MPa για στατικές (<10 ⁻² s ⁻¹) και δυναμικές (1600 s ⁻¹) καταπονήσεις.	[39]
A359	Al ₂ O ₃ 0–15% κ.ο. (50–140 μm)	CaCO ₃	Συμπύεση 3 × 10 ⁻³ s ⁻¹	Τα σωματίδια Al ₂ O ₃ ενισχύουν την ομοιομορφία της μικροδομής του αφρού και οι προκύπτουσες καμπύλες συμπεστικής τάσης-παραμόρφωσης σύνθετων αφρών είναι ομαλές. Οι μηχανικές παράμετροι αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της ποσότητας όγκου σωματιδίων Al ₂ O ₃ . Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας δεν είναι πολύ ευαίσθητη στη ποσότητα όγκου σωματιδίων Al ₂ O ₃ έως 10% κ.ο., αυξάνοντας για υψηλότερα περιεχόμενα.	[32]
Al-3.7 Pct Si-0.18 Pct Mg	AlN	Υγρή χαλύβδινη αντίδραση στερεών / υγρών	10 mm × 10 mm × 10 mm Συμπύεση 1 mm-min ⁻¹	Τα σωματίδια AlN αποκαλύπτουν έναν αποτελεσματικό ενισχυτικό ρόλο που αυξάνει τις μηχανικές ιδιότητες των αφρών αλουμινίου. Απουσία τάσεων ταλαντώσεων στην περιοχή του πλατό των καμπυλών τάσεων - παραμορφώσεων σύνθετων αφρών, όπως παρατηρήθηκε για τους σύνθετους αφρούς αλουμινίου Al ₂ O ₃ p [32] και TiB ₂ p [42].	[44]

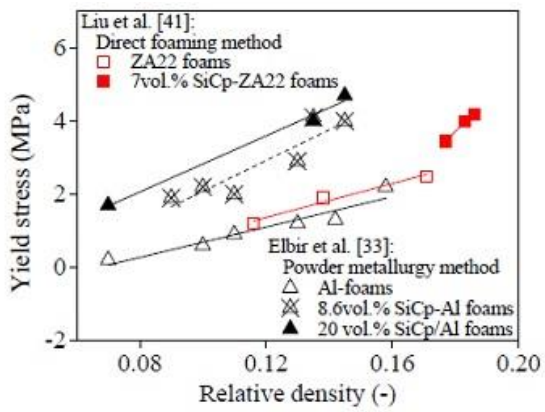
Ωστόσο, οι λεπτομέρειες της εξέλιξης των ιδιοτήτων των αφρών ως συνάρτηση μιας δεδομένης πειραματικής μεταβλητής, δύσκολα μπορούν να εξαχθούν λόγω των ποικίλων συνθηκών κατασκευής και δοκιμών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες μελέτες. Τα πιο απλά συμπεράσματα θα απαιτούσαν μια συστηματική πειραματική προσέγγιση κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες, συγκεκριμένα όσον αφορά την επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στη συμπεριφορά αφροποίησης και στις μηχανικές ιδιότητες.

Σε μια προσπάθεια να επεξηγηθούν τα ευρήματα σχετικά με αυτό το θέμα που αναφέρθηκε από τον Esmaeelzadeh,^[84] ο Πίνακας 5-3 συνοψίζει τα αποτελέσματα της επίδρασης του μεγέθους των ενισχυτικών σωματιδίων SiC, στη συμπεριφορά των αφρών AlSi7 σε συμπίεση. Χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια SiC διαφορετικού μεγέθους για την ενίσχυση των αφρών AlSi7 που παρασκευάστηκαν με μέθοδο κονιομεταλλουργίας, χρησιμοποιώντας TiH₂ ως παράγοντα αφροποίησης. Φαίνεται ότι όλες οι μηχανικές παράμετροι ευνοούνται όταν χρησιμοποιούνται μικρότερα σωματίδια.

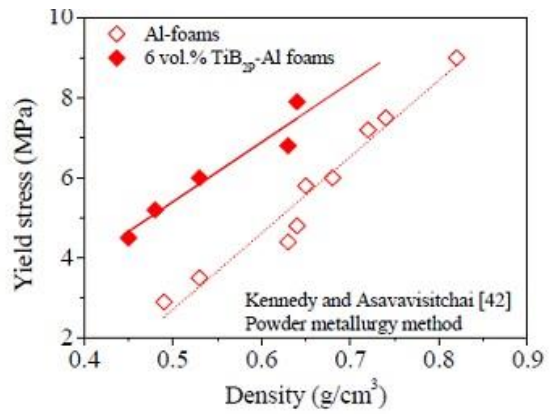
Πίνακας 5-3 Επίδραση του μεγέθους και της περιεκτικότητας σωματιδίων SiC στη συμπεριφορά τάσεων των αφρών AlSi7[84]

Μέγεθος SiC (μm)	Περιεκτικότητα SiC (% κ.ο.)	Τάση Διαρροής (MPa)	$\sigma_{0.1}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{0.3}$ (MPa)	$\sigma_{0.4}$ (MPa)
	0	1.13	1.13	1.36	1.41	1.5
3	3	1.58	1.33	1.72	1.75	1.88
	6	1.25	1.13	1.33	1.41	1.88
16	3	1.25	1	1.25	1.38	1.58

Τα διαγράμματα 5-1 και 5-2 συμπυκνώνουν κάποια στοιχεία σχετικά με τις επιδράσεις μικροσκοπικών κεραμικών σωματιδίων (SiC, TiB₂ και Al₂O₃) στη συμπεριφορά διαφορετικών μεταλλικών αφρών (ZA22, Al, AlSi9Mg και AlSi7) που παράγονται μέσω διαφορετικών διαδικασιών στη συμπίεση. Τα διαγράμματα δείχνουν ότι, ανεξαρτήτως της μεθόδου αφροποίησης και της μεταλλικής μήτρας, η τάση διαρροής (σημείο διαρροής) σύνθετων αφρών είναι πάντα υψηλότερη σε σύγκριση με τους απλούς. Η τάση διαρροής δείχνει επίσης μια γενική αύξηση όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα κεραμικών σωματιδίων όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5-1 (a) και 5-2 (a), και (b) και στους πίνακες 5-1 και 5-2. Ωστόσο, η τάση του πλατό εξαρτάται έντονα από τη πυκνότητα πορώδους.

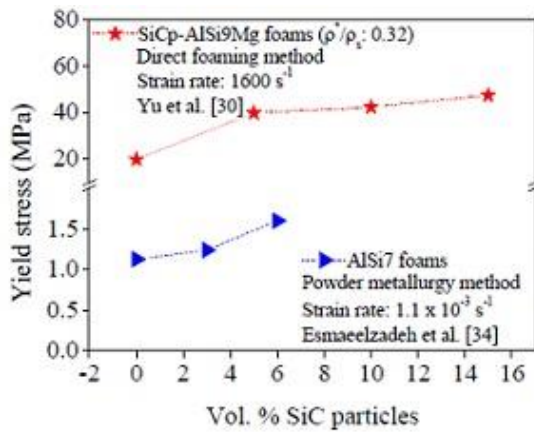


(a)

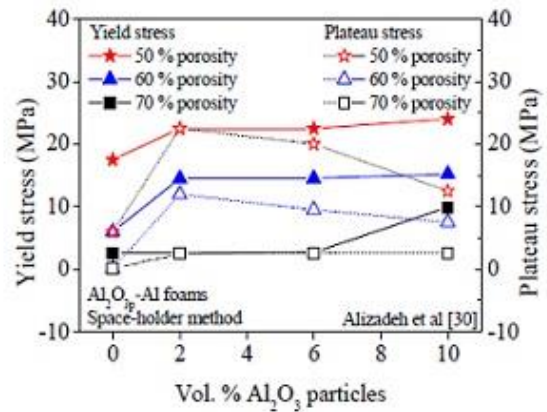


(b)

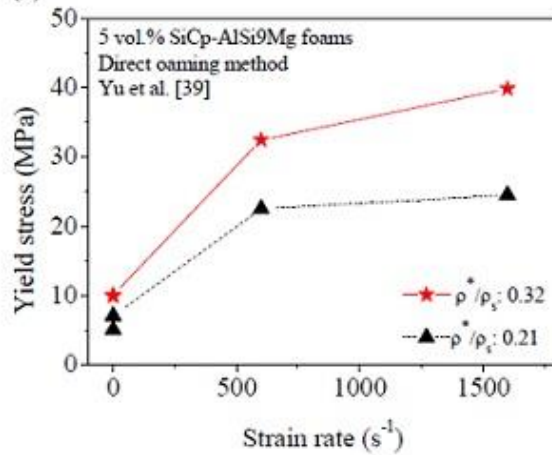
5-1 Επίδραση περιεκτικότητας (a) SiC και (b) TiB₂ σωματιδίων, σε αφρούς αλουμινίου. [106]



(a)



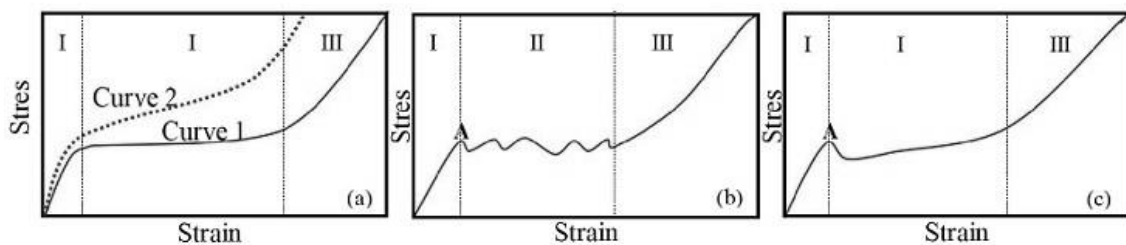
(b)



(c)

5-2 Επίδραση περιεκτικότητας σωματιδίων (a) SiC και (b) Al₂O₃, στην τάση διαρροής και στην τάση πλατό των αφρωδών υλικών. (c) Επίδραση του ρυθμού καταπόνησης στη θλιπτική συμπεριφορά των ενισχυμένων αφρών που περιέχουν 5% κατ' όγκο σωματίδια SiC. [106]

Χρησιμοποιώντας πιο ανθεκτικά και στιβαρά ενισχυτικά κεραμικά σωματίδια, ενισχύεται η αντοχή των κυψελοειδών τοιχωμάτων. Το επόμενο διάγραμμα (5-3) δείχνει μια σχηματική αναπαράσταση της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων, που μετρήθηκε σε μονοαξονική συμπίεση μεταλλικών αφρών. Αυτές οι καμπύλες συνήθως περιλαμβάνουν τρεις περιοχές (την ελαστική, το πλατό και την περιοχή κατάρρευσης). Η πρώτη περιοχή εκτείνεται από την αρχή έως την σημείο διαρροής. Ακολουθεί η περιοχή του πλατό (II) που χαρακτηρίζεται από ένα επίπεδο και ομαλό επίπεδο καταπόνησης, μερικές φορές με ελαφρώς αυξανόμενη κλίση ή με ορισμένες διακυμάνσεις. Και τέλος είναι η περιοχή κατάρρευσης (III). Είναι συχνά δύσκολο να καθοριστεί με ακρίβεια το σημείο διαρροής.



5-3 Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για μεταλλικό αφρό υπό μονοαξονική συμπίεση. [106]

Από τα γνωστά δεδομένα, οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης των σύνθετων αφρών συνήθως εμφανίζουν διακυμάνσεις τάσης εντός της περιοχής του πλατό (5.2.3 b), ανεξάρτητα από τη διαδικασία κατασκευής. Ωστόσο, στις περιπτώσεις αφρών ενισχυμένων με TiB_2 ^[92] που παράγονται με τη μέθοδο κωνιομεταλλουργίας (πίνακας 5-1) και στους σύνθετους αφρούς ενισχυμένους με Al_2O_3 ^[82] και AlN ^[94] που παρασκευάζονται με την μέθοδο άμεσης αεροποίησης (πίνακας 5-2), παρατηρείται έλλειψη διακυμάνσεων της καμπύλης στην περιοχή του πλατό (5.2.3 a).

5.3 Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί

Μία διαφορετική στρατηγική για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των συμβατικών αφρών είναι αυτή που κάνει χρήση των νανομεγέθων ενισχυτικών, όπως σωματίδια, ίνες, ή νανοσωλήνες, αντί για τις ενισχύσεις μικρομεγέθων σωματιδίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι αντίστοιχοι μεταλλικοί αφροί

ονομάζονται «νανοσύνθετοι» μεταλλικοί αφροί. Τα ενισχυτικά νανοκλίμακας είναι πολύ αποτελεσματικότερα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων σε σύγκριση με τα ενισχυτικά της μικροκλίμακας λόγω της υψηλής αναλογίας τους μέσα στον όγκο του αφρού. Μερικά πλεονεκτήματα της χρήσης ενισχυτικών νανοσωματιδίων είναι οι πολύ μικρότερες ποσότητες που απαιτούνται και η αμελητέα συνεισφορά στο βάρος για τους προκύπτοντες νανοσύνθετους μεταλλικούς αφρούς.

5.3.1 Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με κεραμικά σωματίδια

Η προσθήκη κεραμικών νανοσωματιδίων (π.χ. αλουμίνας ^[107] ή SiC ^[108]) έδειξε ότι ενισχύει την σταθερότητα του αφρού και την ομοιογένεια της κυψελοειδούς δομής, χωρίς να προκαλεί δομικά ελαττώματα. Διαφορετικές διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί για την ομοιόμορφη διασπορά των νανοσωματιδίων στο μείγμα σκόνης με τη χρήση υπερηχητικών μεθόδων, ή την ενσωμάτωσή τους σε τηγμένο μέταλλο μέσω μιας επιτόπιας αντίδρασης. Μετά τα πρώτα αποτελέσματα, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες για να μελετηθούν οι επιδράσεις των νανοσωματιδίων στην μηχανική απόδοση των προκύπτοντων νανοσύνθετων αφρών που παρασκευάζονται χρησιμοποιώντας τόσο άμεσες όσο και έμμεσες μεθόδους αφροποίησης.

Για παράδειγμα, οι αφροί αλουμινίου ενισχυμένοι με νανοσωματίδια SiC (SiCp, Sic particles), παρασκευάζονται με ανάμιξη νανοσωματιδίων εντός κόνεων αλουμινίου με σφαιρόμυλο υψηλής ενέργειας. Μετά από αυτό, προστίθεται ανθρακικό ασβέστιο (ως αφροποιητικός παράγοντας) στο αρχικό μείγμα χρησιμοποιώντας ένα μηχανικό αναδευτήρα. Το πυκνό αφροποιημένο πρόδρομο υλικό, ετοιμάζεται με θερμή συμπίεση του μίγματος που περιέχει όλα τα στερεά και θερμαίνεται σε θερμοκρασίες κοντά στην θερμοκρασία τήξης για να ληφθούν οι ενισχυμένοι αφροί. Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι τα κεραμικά νανομεγέθη σωματίδια μειώνουν την ευθραυστότητα των αφρών σε σύγκριση με τα μικρομεγέθη σωματίδια. Επιπλέον, οι μικρές προσθήκες νανοσωματιδίων βελτίωσαν τη δομή του αφρού, το μέγεθος των πόρων και την ομοιογένεια της κατανομής τους, που οδήγησε σε σημαντικές βελτιώσεις της τάσης διαρροής (κατά 194,5 %), της τάσης του πλατό, της αύξησης της απορρόφησης ενέργειας (κατά 69,4 %) σε σύγκριση με τους συμβατικούς αφρούς αλουμινίου. ^[108] Οι πόροι των νανοσύνθετων αφρών ήταν πολύ καλύτεροι από τους πόρους των απλών αφρών αλουμινίου, αλλάζοντας από χιλιοστόμετρα σε μικρόμετρα στο εύρος.

Στην πραγματικότητα, τα νανοσωματίδια λειτουργούν ως σταθεροποιητικοί παράγοντες (stabilizing agents) και ενισχυτικά μέσα (reinforcing agents) ταυτόχρονα.

Τα ενισχυτικά νανοκλίμακας έχουν ενσωματωθεί σε διάφορους τύπους μετάλλων για να ληφθούν νανοσύνθετοι αφροί. Μια μικρή προσθήκη (συνήθως λιγότερο από 2 % κ.β.) νανοσωματιδίων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη μεταλλική μήτρα, επιλύοντας τα προβλήματα των σημερινών αφρών αλουμινίου που ενσωματώνουν υψηλές φορτίσεις (γενικά άνω του 10 % κατ' όγκο) από τις ενισχύσεις μικροκλίμακας, που απαιτούνται για την επίτευξη των επιθυμητών επιπέδων στις μηχανικές ιδιότητες (π.χ. μέτρο ελαστικότητας) και τη σταθερότητα των διαστάσεων, επηρεάζοντας έτσι το βάρος και την ανθεκτικότητα των τελικών σύνθετων υλικών.

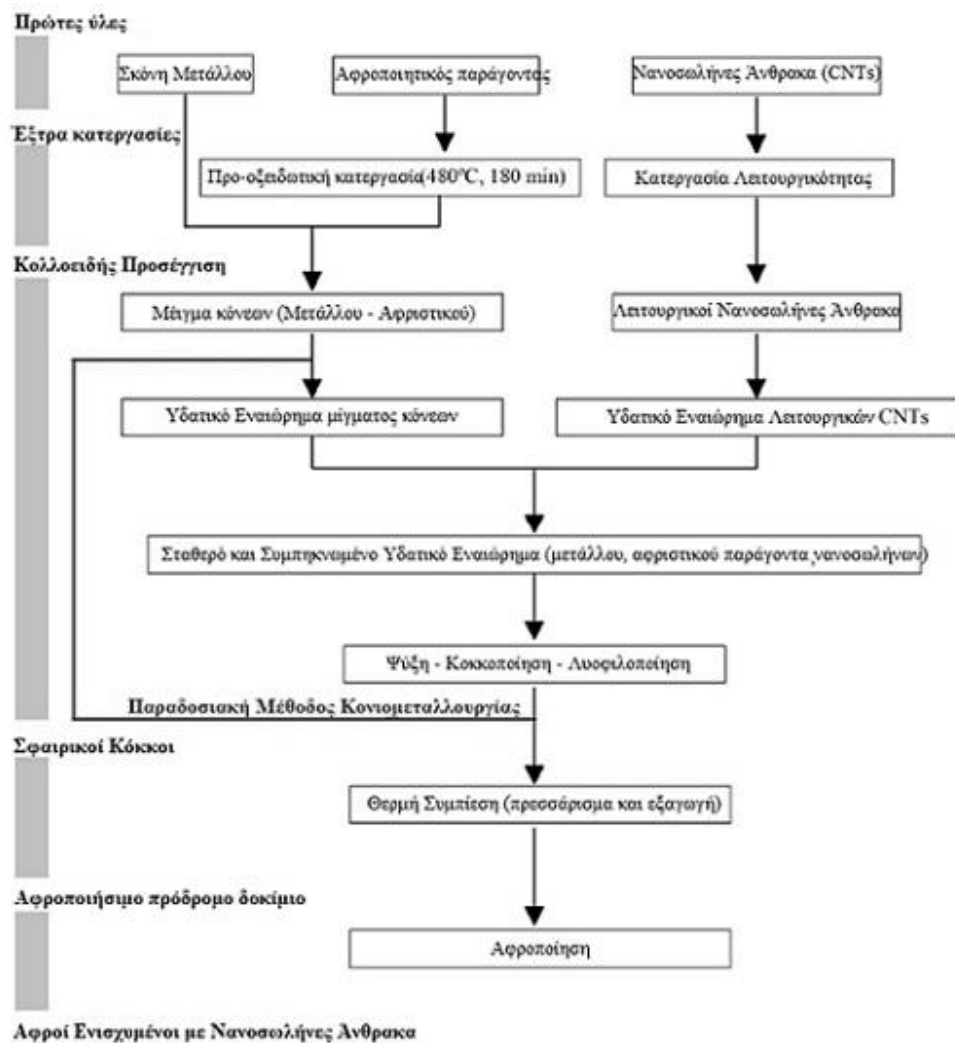
Οι κύριες δυσκολίες που αντιμετωπίζονται κατά την παραγωγή νανοσύνθετων υλικών είναι ο υψηλός λόγος επιφάνειας προς όγκο και η γενικά χαμηλή διαβρεξιμότητα των κεραμικών σωματιδίων από το αλουμίνιο. Τα μικρότερα σωματίδια έχουν ισχυρότερη τάση συσσωμάτωσης και σχηματισμού συστάδων, χάνοντας την αποτελεσματικότητά τους στην παρεμπόδιση εξαρθρώσεων του υλικού. Για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να παρασκευαστούν με απλές συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Είναι σημαντικό να τροποποιηθούν αυτές οι μέθοδοι.

5.3.2 Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με CNTs

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs, Carbon Nano-Tubes) έχουν αναδειχθεί ως δυνητικά ιδανικά νανομεγέθη ενισχυτικά για την κατασκευή σύνθετων μεταλλικών υλικών, ελαφρού βάρους και υψηλής αντοχής, λόγω της χαμηλής πυκνότητάς τους και των υψηλών αναλογιών, μηχανικής αντοχής, ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας. Εντούτοις, η ενσωμάτωση των CNTs στις μεταλλικές μήτρες σε ορισμένες περιπτώσεις είναι προβληματική, λόγω της υψηλής τάσης τους να σχηματίζουν συστάδες, της χαμηλής τους ικανότητας διασποράς και χαμηλής διαβρεξιμότητας του άνθρακα από λιωμένο μέταλλο (λόγω μεγάλης διαφοράς επιφανειακών τάσεων). Ο σχηματισμός προϊόντων διεπιφανειακής αντίδρασης σε τηγμένα μέταλλα είναι ένας άλλος περιορισμός της ευρείας χρήσης τους ως ενισχυτικών. Διάφορες στρατηγικές επεξεργασίας (π.χ., μεταλλουργία σκόνης, ανάμιξη σε μοριακό επίπεδο, ψεκασμός πλάσματος και χύτευση) έχουν χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, αλλά με περιορισμένη επιτυχία.^[70] Η επίτευξη ομοιόμορφης ανάμιξης των CNTs

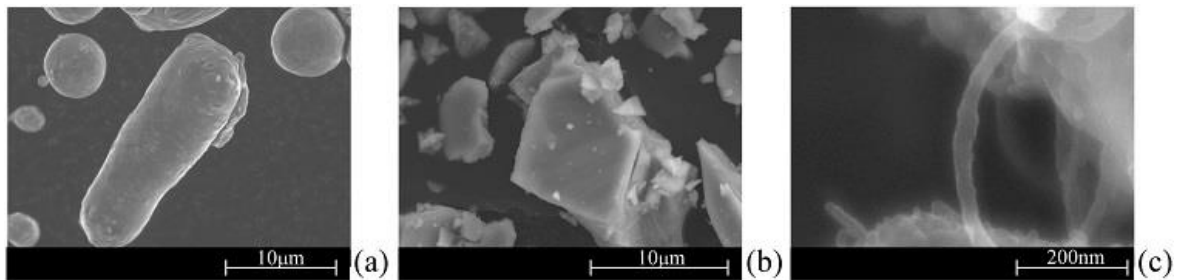
στη μεταλλική μήτρα, ο σχηματισμός ισχυρών διεπιφανειακών δεσμών και η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας των CNTs είναι οι κύριες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για την επιτυχή ανάπτυξη νανοσύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας για βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτές είναι βασικές απαιτήσεις για την βέλτιστη λειτουργία του ομοιογενούς τρισδιάστατου ενισχυτικού ρόλου των CNTs και την παροχή αποτελεσματικής μεταφοράς φορτίου.

Στην πραγματικότητα, οι CNTs τείνουν να εμφανίζονται σε συστάδες, ως εκ τούτου, ακυρώνουν τις δυνατότητες τους ως ενισχυτικά. Για το λόγο αυτό, ερευνητικά έχει αναπτυχθεί μία προσέγγιση που συνδυάζει την επεξεργασία κολλοειδών (με κατάψυξη-κοκκοποίηση-λυοφιλοποίηση) και της μεθόδου κονιομεταλλουργίας, που φαίνεται στην εικόνα 5.3.2.1.



5.3.2.1 Προσέγγιση για την παρασκευή μεταλλικών αφρών ενισχυμένων με νανοδομημένες άνθρακα (CNTs) με συνδυασμό της κονιομεταλλουργίας και κολλοειδούς επεξεργασίας. [109,110]

Η εικόνα 5.3.2.2 στη συνέχεια, δείχνει σκόνη κράματος αλουμινίου (Al-12Si), υδρίδιο του τιτανίου (TiH_2 , ως παράγοντα αφροποίησης) και νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MultiWall Carbon Nano-Tubes ή MWCNTs-COOH ως ενισχυτικά στοιχεία), ως τις κύριες πρώτες ύλες που εξ αρχής χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω διαδικασία που απεικονίζεται στην εικόνα 5.3.2.1.

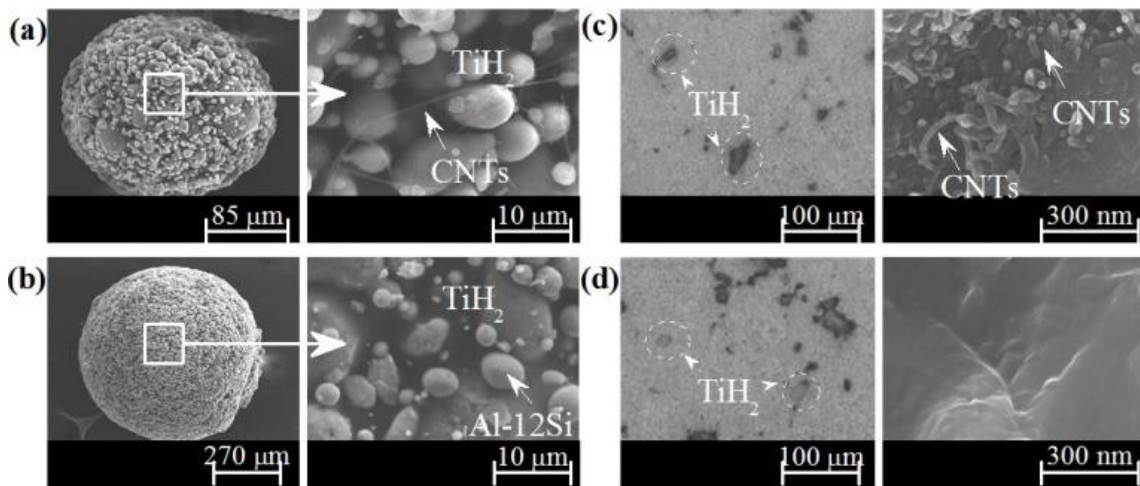


5.3.2 2 Μικρογραφίες SEM των αρχικών πρώτων υλών: (α) κράμα Al-12, (β) σκόνη TiH_2 · (γ) πολλαπλών τοιχωμάτων νανοσωλήνες άνθρακα MWCNTs-COOH. [106]

Οι έρευνες στην παρασκευή σφαιρικών κόκκων με ελεύθερη κοκκοποίηση και παρασκευή προδρομών υλικών, δείχνουν στοιχεία καλής διασποράς των MWCNTs, εντός των προδρομών δοκιμίων. ^[109] Επίσης αποκαλύπτονται οι επιδράσεις των πιο σχετικών σταδίων επεξεργασίας με πιο συστηματικό τρόπο, συμπεριλαμβανομένου ενός λεπτομερούς χαρακτηρισμού των αρχικών πρώτων υλών και της θερμικής επεξεργασίας προ-οξειδωσης στον παράγοντα αφροποίησης.

Μια λεπτομερής μελέτη της συμπεριφοράς διασποράς των MWCNTs με τη χρήση διαφορετικών βοηθητικών παραγόντων διασποράς προπαρασκευάστηκε μέσω συμπληρωματικών τεχνικών.

Οι παρακάτω εικόνες (5.3.2.3) από μικροσκόπιο SEM, δείχνουν ότι υψηλής πυκνότητας κόκκοι ελήφθησαν ανεξάρτητα από την απουσία (5.3.2.3 a) ή την παρουσία (5.3.2.3 b) MWCNTs. Αυτές οι εικόνες δίνουν επίσης σαφείς αποδείξεις για την ομοιόμορφη διασπορά των πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs και του TiH_2 στους λυοφιλοποιημένους κόκκους (5.3.2.3 a, b) και στα πρόδρομα συμπιεσμένα δοκίμια (5.3.2.3. c, d).

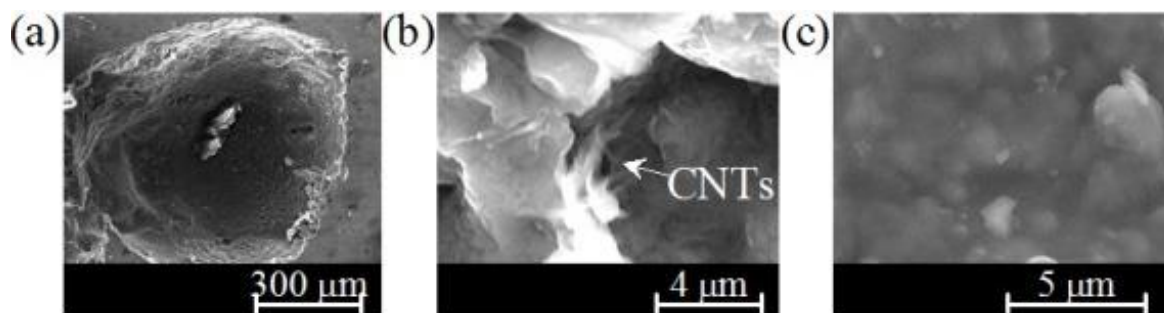


5.3.2.3 Υψηλής ποιότητας σφαιρικοί κόκκοι παρασκευασμένοι με ψύξη – κοκκοποίηση – λυοφιλοποίηση, και η επιφανεία τους (α) με, και (β) χωρίς πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs. Δομικά χαρακτηριστικά προδρόμων υλικών (και επιφανειών θραύσης τους) που παρασκευάζονται από κόκκους (c) με, και (d) χωρίς MWCNTs-COOH. [106]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3.2.3 (α), οι πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs εμφανίζονται ξεχωριστά και διασκορπισμένοι, αποφεύγοντας τη φυσική τους τάση να σχηματίζουν συστάδες που ακυρώνουν τις ενισχυτικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, το TiH_2 είναι επίσης διασκορπισμένο ομοιόμορφα (διάσπαρτα-κυκλικά, εικόνα 5.3.2.3 (α),(β)) εξασφαλίζοντας την ποιότητα του αφρού. Το κλειδί για την επιτυχή παρασκευή αφρών αλουμινίου ενισχυμένων με πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs, εξασφαλίζεται από την καλή διασπορά τους. Αυτοί οι εξαιρετικά σφαιρικοί κόκκοι εύκολα συμπυκνώνονται για να σχηματίσουν πυκνά πρόδρομα υλικά που παρουσιάζουν τυπικές μικροδομές, συγκρίσιμες με εκείνες των πρόδρομων δοκιμίων που παρασκευάζονται με τη μέθοδο κονιομεταλλουργίας όπως φαίνεται από τις εικόνες 5.3.2.3 (c) και 5.3.2.3 (d).

Η προσέγγιση αυτή, που αποτελεί μια τροποποίηση της μεθόδου της παραδοσιακής κονιομεταλλουργίας, με την προσθήκη ενός σταδίου επεξεργασίας κολλοειδούς, επιτρέπει: α) την επίτευξη μιας αποτελεσματικής διασποράς των λειτουργικών MWCNTs σε υδατικά μέσα, και την ομοιογενή ανάμιξη με τα άλλα συστατικά, β) διατήρηση της ομοιογένειας και της δομικής ακεραιότητας (σωληνωτή δομή) των νανοσωλήνων άνθρακα μέσω της διαδικασίας, και γ) δημιουργία ισχυρών δεσμών μεταξύ MWCNTs και μεταλλικής μήτρας, τα οποία παρέχουν αποτελεσματική μεταφορά φορτίου. Συνεπώς, σε σύγκριση με τους μη ενισχυμένους αφρούς αλουμινίου, οι μέσες τιμές της μικροσκληρότητας των ενισχυμένων αυξήθηκαν μεταξύ 55 % και 125 %. Ωστόσο, χρειάζονται περαιτέρω έρευνες για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις άλλων σχετικών πειραματικών μεταβλητών που δεν έχουν ακόμη καλυφθεί, όπως: (i) η

αναπαραγωγή του πορώδους και ο γενικός ποιοτικός έλεγχος της αφροποίησης, (ii) ο καθορισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου περιεχόμενου πολλαπλών τοιχωμάτων CNT που μπορεί να ενσωματωθεί χωρίς να υποβαθμιστεί η αφροποίηση ή η ποιότητα των αφρών, (iii) η εφαρμογή της μεθόδου σε άλλα κράματα αλουμινίου και μεταλλικά συστήματα, (iv) η αξιολόγηση των ιδιοτήτων και των επιδόσεων των αφρών σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας και επίδειξη των μοναδικών και ανταγωνιστικών πλεονεκτημάτων τους έναντι των υφιστάμενων ομολόγων τους. Οι εξατομικευμένοι πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs μπορούν να παρατηρηθούν τυχαία κατανομημένοι στη μήτρα αλουμινίου (εικόνα 5.3.2.4). Αυτή η μη συσσωματωμένη κατάσταση επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διασποράς που επιτυγχάνεται στο στάδιο της κολλοειδούς επεξεργασίας. Η τεντωμένη κατάσταση είναι πιθανό να ενισχυθεί κατά την αφροποίηση, ευνοώντας περαιτέρω την ενίσχυση.



5.3.2.4 (a) Κυψελοειδής πόρος, και μεγεθυμένες εικόνες της μικροδομής του πορώδους τοιχώματος (b) με πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs διασκορπισμένους στη μήτρα αλουμινίου του και (c) χωρίς πολλαπλών τοιχωμάτων CNTs. [106]

Η μικροσκληρότητα Vickers που μετρήθηκε στις αντηρίδες (τοιχώματα των πόρων) άλλαξε από $60 \pm 5,18$ HV για μη ενισχυμένο αφρό αλουμινίου σε $93,43 \pm 19,30$ HV για το δείγμα που περιείχε 0,5 % κ.β. MWCNTs, με ορισμένες τιμές να υπερβαίνουν περισσότερο από το διπλάσιο των μη ενισχυμένων. Η μεγάλη απόκλιση που συναντάται στους ενισχυμένους αφρούς μπορεί να αποδοθεί (i) στη μικρή προστιθέμενη ποσότητα MWCNTs, και (ii) τη γειτονιά μεταξύ σημείου εγκοπής και των ενισχυτικών MWCNT. Αυτό σημαίνει ότι η σκληρότητα μπορεί να αλλάζει τυχαία από το ένα σημείο στο άλλο, ανάλογα με την εγγύτητα κοντά σε ενισχυτικά σωματίδια MWCNT.

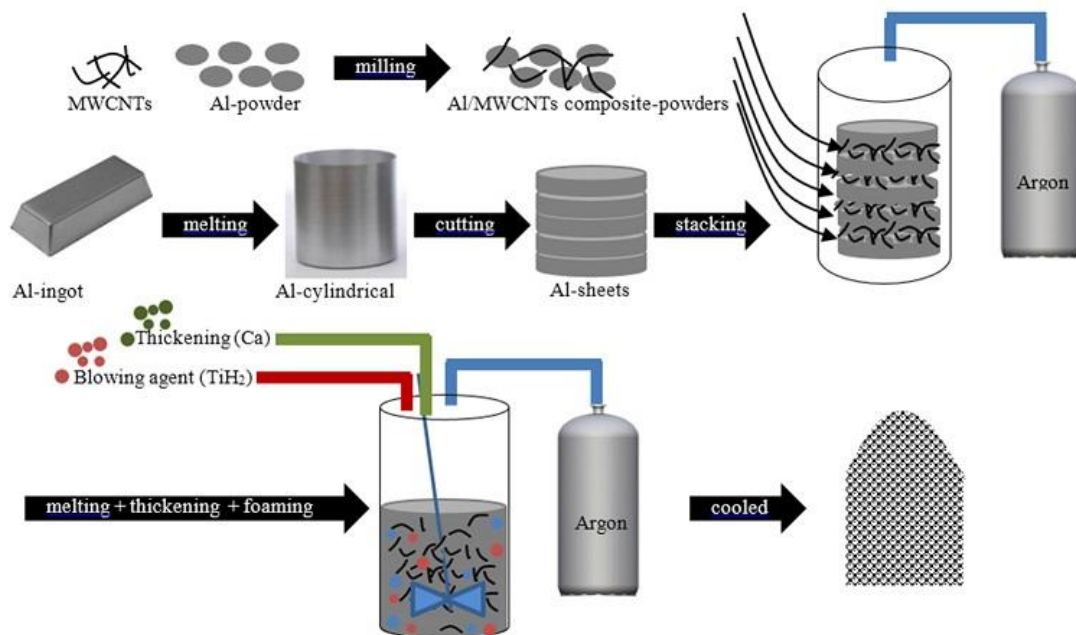
Ο Zhang ^[111] ανέπτυξε αφρούς αλουμινίου κλειστών κυψελίδων ενισχυμένους με διαφορετικά περιεχόμενα MWCNTs κάνοντας χρήση μιας τροποποιημένης μεθόδου αφροποίησης με τήξη (εικόνα 5.3.2.5). Η διαδικασία αυτής της μεθόδου

κάνει χρήση του υψηλής ενέργειας σφαιρόμυλου με προσαρμοσμένες τις παραμέτρους άλεσης, για τη διασπορά των MWCNTs στις σκόνες μετάλλου και αφριστικού παράγοντα. Οι MWCNT παρουσιάζονται κυρίως σε τρεις καταστάσεις: α) πλήρως ενσωματωμένοι στο τοίχωμα των κυψελίδων, β) εν μέρει ενσωματωμένοι στο τοίχωμα των κυψελίδων, και γ) πλήρως εκτεθειμένοι στην επιφάνεια του τοιχώματος. Έτσι προκύπτει διεπιφανειακό διαμεταλλικό προϊόν (π.χ. Al_4C_3) λόγω της αντίδρασης μεταξύ των MWCNTs και του κράματος αλουμινίου, που φέρεται να οδηγεί σε ισχυρή διασύνδεση μεταξύ MWCNTs και μήτρας αλουμινίου. Παρόλα αυτά, η διαδικασία ανάμιξης υψηλής ενέργειας, είναι πιθανό να προκαλέσει δομική βλάβη και απώλεια της δομικής ακεραιότητας των CNTs. Βελτιώσεις διασποράς των CNTs στην μήτρα αλουμινίου κάνοντας χρήση σφαιρόμυλου για εκτεταμένους χρόνους φέρεται να προκαλούν ταυτόχρονα ορισμένες δομικές βλάβες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σοβαρό για τα CNTs μονού τοιχώματος, καθώς η σωληνωτή δομή τους χάνεται. Από την άλλη οι πολλών τοιχωμάτων CNTs μπορούν ακόμα να παρέχουν την επιθυμητή δομική ακεραιότητα ακόμη και αν υφίστανται κάποια βλάβη στα εξωτερικά τοιχώματα. Ο ενδεχόμενος σχηματισμός διαμεταλλικών προϊόντων που οφείλονται σε διεπιφανειακές αντιδράσεις μεταξύ CNT και τηγμένου μετάλλου σε έντονες συνθήκες, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε απώλεια της δομικής ακεραιότητας.

Στις έρευνες έχει μελετηθεί η επίδραση της περιεκτικότητας των MWCNTs (0,0-1,0 % κατά βάρος) στη συμπεριφορά σε θλιπτική καταπόνηση, και στην απορρόφηση ενέργειας αυτών των νανοσύνθετων αφρών. Διαπιστώθηκε ότι η αντοχή σε θλίψη αυξήθηκε για περιεκτικότητα 0,5 % κατά βάρος MWCNTs, ενώ η αντίθετη τάση παρατηρήθηκε με περαιτέρω προστιθέμενες ποσότητες MWCNTs. Για παράδειγμα, η αντοχή σε θλίψη των νανοσύνθετων αφρών που περιέχουν 1% κ.β. MWCNTs ήταν κατώτερη από εκείνη του μη ενισχυμένου αφρού (χωρίς MWCNTs). Παρόμοια συμπεράσματα για την επίδραση των MWCNTs προέκυψαν από τις καμπύλες απορρόφησης ενέργειας που λαμβάνονται από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, με τις μέγιστες και τις χαμηλότερες τιμές απορρόφησης ενέργειας να μετριούνται για τους αφρούς με 0,5 % κ.β. και 1,0 % κ.β. των MWCNTs, αντίστοιχα.

Αν και η επίδραση διαφορετικών περιεκτικότητων MWCNTs επί των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών είναι πιθανό να εξαρτάται από το μητρικό υλικό, και ειδικότερα από την διεπιφανειακή δύναμη σύνδεσης μεταξύ των ενισχυτικών MWCNTs και της μήτρας εμφάπτισης, είναι σημαντικό ότι οι απαιτούμενες ποσότητες MWCNTs για μια αποτελεσματική ενίσχυση είναι συνήθως μικρές (~

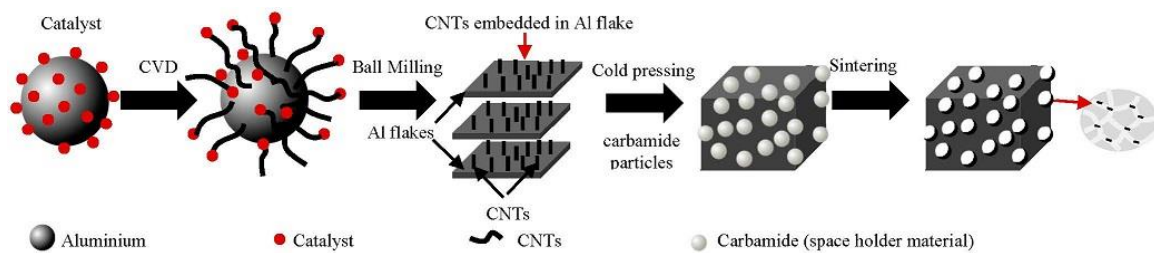
0,5% κ.β.), υπό την προϋπόθεση ότι είναι καλά διασκορπισμένες. Η πιθανή μη εκπλήρωση αυτής της συνθήκης στην έρευνα που αναφέρθηκε από τον Zhang, ^[111] ειδικά για περιεκτικότητα MWCNT > 0,5% κατά βάρος θα εξηγούσε γιατί η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των αφρών αλουμινίου που προέκυψαν ήταν ακόμη χειρότερη από ό, τι στους μη ενισχυμένους.



5.3.2.5 Διαδικασία παραγωγής αφρών αλουμινίου κλειστών κυψελίδων με και χωρίς MWCNTs. [111]

Μία μέθοδος για επί τόπου αναπτυσσόμενους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) για την ενίσχυση των αφρών αλουμινίου προτάθηκε από τον Wang και περιγράφεται στη συνέχεια. ^[112]

Η μέθοδος αυτή, που συνδυάζει χημική απόθεση ατμών (CVD, Chemical Vapor Deposition), άλεση-ανάμιξη με χρήση σφαιρόμυλου, και τεχνική διατήρησης κενών χώρων (space-holder technique), απεικονίζεται στην εικόνα 5.3.2.6. Οι CNTs αναπτύχθηκαν πάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων του κράματος αλουμινίου με την επιτόπια χημική εναπόθεση ατμών και οι νιφάδες Al / CNTs χρησιμοποιήθηκαν έπειτα για την κατασκευή των νανοσύνθετων υλικών. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την καλή διασπορά και ενσωμάτωση των CNTs σε σκόνες αλουμινίου και προάγει την καλή διασύνδεση μεταξύ CNTs και αλουμινίου, ενώ παράλληλα η μορφολογία και το μέγεθος των πόρων ελέγχεται εύκολα από τα υλικά διατήρησης του χώρου (space-holder materials).



5.3.2 6 Διάγραμμα διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή CNT / Al. [141]

Οι εικόνες που λαμβάνονται από μικροσκόπιο SEM των προκύπτοντων νανοσύνθετων αφρών, δείχνουν ορισμένους κλειστούς πόρους, αλλά και μερικούς πόρους που επικοινωνούν εσωτερικά και που προέρχονται από τις αμοιβαίες επαφές μεταξύ των σφαιριδίων καρβαμιδίου (υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την διατήρηση κενών χώρων). Ο τύπος των αφρών που λαμβάνονται (κλειστών κυψελίδων έναντι ανοιχτών) εξαρτάται έντονα από τη πρόσθετη περιεκτικότητα των σφαιριδίων. Κάτω από το όριο της ένωσης (percolation threshold), οι πόροι τείνουν να φαίνονται χωρισμένοι μεταξύ τους και σχηματίζονται αφροί κυψελίδων κλειστού τύπου. Από αυτή την προοπτική, τα κενά επικοινωνίας θα μπορούσαν ακόμη να θεωρηθούν ως δομικές ατέλειες. Έχουν επίσης διερευνηθεί οι επιδράσεις της άλεσης με σφαιρόμυλο στη συμπεριφορά σε καταπόνηση θλίψης και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε μη αλεσμένους και αλεσμένους σε σφαιρόμυλο σύνθετους αφρούς, που ετοιμάστηκαν με συσσωμάτωση κόνεων Al/CNT χωρίς να έχει γίνει χρήση σφαιρόμυλου ή μετά από άλεση, αντίστοιχα. ^[112] Οι ιδιότητες των προκύπτοντων νανοσύνθετων αφρών συγκρίθηκαν με τους μη ενισχυμένους αφρούς αλουμινίου (χωρίς CNTs), που έκαναν όμως επίσης χρήση της μεθόδου διατήρησης κενού. Οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας αποκάλυψαν ότι με τη χρήση νανοσύνθετων υπάρχει τυπική συμπεριφορά αντοχής των αφρών αλουμινίου, που χαρακτηρίζονται από τρεις περιοχές (γραμμική ελαστική, πλατό, κατάρρευση). Αυτή η διαδικασία ξεκαθάρισε πως κάνοντας χρήση άλεσης με σφαιρίδια σε σκόνες αλουμινίου με CNTs, είναι απαραίτητο για να επωφεληθεί από την χημική εναπόθεση των CNTs στην επιφάνεια των σωματιδίων αλουμινίου, καθώς οι συνολικές ιδιότητες των αφρών αλουμινίου που κατασκευάζονται από μη αλεσμένες σκόνες ενισχυμένες με CNTs, ήταν χειρότερες από εκείνες των μη ενισχυμένων. Εκτός από τις ανώτερες μηχανικές ιδιότητες των αλεσμένων σύνθετων αφρών, οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας είναι ομαλότερες. Η αντοχή σε θλίψη των αλεσμένων σύνθετων αφρών με 2 % κ.β. CNTs, φάνηκε ότι είναι 25 % και 67 %

ανώτερη σε σύγκριση με τους καθαρούς αφρούς αλουμινίου και τους μη αλεσμένους νανοσύνθετους αφρούς (με επίσης περιεκτικότητα 2 % κ.β. CNTs), αντίστοιχα. Για να λειτουργούν αποτελεσματικά οι CNTs ως ενισχυτικοί παράγοντες πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι και χωρίς δομική βλάβη για τη βελτίωση της διεπιφανειακής σύνδεσης μεταξύ των CNTs και της μήτρας αλουμινίου, και να λειτουργούν ως γέφυρες για τον περιορισμό των παραμορφώσεων του τοιχώματος των κυψελίδων.

Για την πλήρη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων των CNTs, είναι σημαντικό να κατανοηθεί πώς ενεργούν για να ενισχύσουν ένα σύνθετο υλικό. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μια οδό κονιομεταλλουργίας για να κατασκευάσουν σύνθετα μεταλλικά υλικά αλουμινίου ενισχυμένα με 0,6 % κατά βάρος MWCNTs που παράγονται με χημική εναπόθεση ατμών, και διεξήγαγαν προηγμένες επιτόπιες δοκιμές εφελκυσμού με χειρισμό του σταδίου εφελκυσμού με ένα δείγμα CNT / Al εντός ενός FE-SEM θαλάμου. ^[113] Αυτή η επιτόπια προσέγγιση παρέχει μια άμεση και εύκολη μέθοδο για τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των MWCNT σε σύνθετα υλικά, η οποία ουσιαστικά ρυθμίζεται μέσω ενός μηχανισμού ενίσχυσης μεταφοράς φορτίου. Όταν εφαρμόζεται μια δύναμη στο σύνθετο υλικό, τα MWCNT αρχικά λειτουργούν σαν γέφυρα για την καταστολή της ανάπτυξης ρωγμών. Καθώς εφαρμόζεται περισσότερη δύναμη, τα εξωτερικά τοιχώματα των νανοσωλήνων που έρχονται σε επαφή με την μήτρα αλουμινίου αρχίζουν να σπάνε. Οι εσωτερικοί τοίχοι στη συνέχεια θραύονται είτε κάθετα είτε ανοίγουν για να εκθέσουν τα επόμενα εσωτερικά τοιχώματα και ούτω καθ' εξής. Οι εικόνες από το SEM δείχνουν ξεκάθαρα τα σπασμένα τοιχώματα των MWCNTs.

Έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί ενίσχυσης των MWCNTs σε σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας. Ωστόσο, η δύναμη του σύνθετου υλικού μπορεί να είναι ένα συνδυαστικό αποτέλεσμα διαφόρων μηχανισμών, αν και δεν είναι εύκολο να διευκρινιστεί η συνεισφορά κάθε ενός. Δοκιμές εφελκυσμού έδειξαν ότι η μηχανική συμπεριφορά των MWCNTs στα σύνθετα υλικά ελέγχεται ουσιαστικά από ένα μηχανισμό ενίσχυσης της μεταφοράς φορτίου. Υπήρξε μια αποτελεσματική μεταφορά φορτίου μεταξύ των MWCNTs και της μήτρας αλουμινίου και μεταξύ των τοιχωμάτων των κελιών, κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης στη δοκιμή εφελκυσμού.

Τέλος μια μέθοδος παραγωγής σύνθετου μεταλλικού αφρού-CNTs και μετάλλου-γραφενίου που κατοχύρωσαν οι Zhendong και Wang με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, περιλαμβάνει ένα μεταλλικό υπόστρωμα αφρού και ένα στρώμα με φύλλο γραφίτη τοποθετημένο στο υπόστρωμα. ^{[114],[115]} Η παραγωγή του σύνθετου

μετάλλου-γραφενίου έγινε με μέθοδο ηλεκτροφόρησης. Η μέθοδος παρασκευής περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: απομάκρυνση λιπαρών ουσιών και οξειδίων από την επιφάνεια του μεταλλικού αφρώδους υποστρώματος, παρασκευή γραφενίου με τη μέθοδο οξειδωτικής αναγωγής, τροποποίηση γραφενίου και διεξαγωγή ηλεκτροφορητικής εναπόθεσης γραφενίου στην επιφάνεια του μεταλλικού αφρώδους υποστρώματος. Σε ορισμένες περιοχές ηλεκτρομαγνητικής ζώνης, ο σύνθετος αφρός από μέταλλο-γραφένιο έχει τα δομικά πλεονεκτήματα ελαφρού βάρους και πορώδους, μεγάλης ειδικής επιφανείας και καλής αγωγιμότητας. Από την άλλη πλευρά, το σύνθετο υλικό ενσωματώνει εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή διηλεκτρική σταθερά, ικανότητα να είναι πιο αγωγίμο για την απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λόγω της μεγάλης ποσότητας ελαττωμάτων και υπολειμμάτων λειτουργικών ομάδων και άλλων ιδιοτήτων του κατασκευασμένου γραφενίου. Το σύνθετο υλικό έχει εξαιρετική απόδοση ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης.

5.3.3 Νανοσύνθετοι μεταλλικοί αφροί ενισχυμένοι με κεραμικές ίνες

Οι μικρές κεραμικές ίνες (Al_2O_3) είναι πιο αποτελεσματικές από τα κεραμικά σωματίδια για την ενίσχυση του ιξώδους των μεταλλικών τηγμάτων λόγω της υψηλής αναλογίας των διαστάσεων τους. Συνεπώς, επιχειρήθηκε η χρήση τους ως σταθεροποιητικών παραγόντων για την κατασκευή μεταλλικών αφρών.

Ο Liu ^[116,117] κατασκεύασε σύνθετους αφρούς κλειστού κελιού Zn-22Al, ενισχυμένους με 3 % κ.β. ινών Al_2O_3 μέσω της απευθείας μεθόδου αφροποίησης τήγματος χρησιμοποιώντας CaCO_3 ως παράγοντα αφροποίησης. Η μήτρα Zn-22Al τήχθηκε στους 590 °C σε έναν ηλεκτρικό κλίβανο και στη συνέχεια προστέθηκε σκόνη CaCO_3 στο τήγμα υπό μηχανική ανάδευση (900 rpm) για 2 λεπτά. Η θερμοκρασία αυξήθηκε σε 700 °C έως 720 °C, και διατηρήθηκε για αρκετά λεπτά για να επιτραπεί η απελευθέρωση φυσαλίδων αερίου από την αποσύνθεση του παράγοντα αφροποίησης. Τελικά, οι σύνθετοι αφροί ψύχθηκαν για να παραχθεί η σταθερή δομή.

Η κατανομή των κεραμικών ινών στους σύνθετους αφρούς παρατηρήθηκαν με μικροσκόπιο SEM και οι ιδιότητες συμπίεσης των σύνθετων αφρών διερευνήθηκαν σε σχεδόν στατική κατάσταση. Οι κεραμικές ίνες Al_2O_3 στους σύνθετους αφρούς διανεμήθηκαν ως επί το πλείστον σε δύο καταστάσεις: μερικές ομοιόμορφα διασκορπισμένες στα τοιχώματα των κελιών, ενώ άλλες

διαπερνώντας τις κυψελίδες. Οι ενισχυμένοι αφροί Zn-22Al με ίνες Al_2O_3 εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή σε θλίψη και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από τους μη ενισχυμένους αφρούς κράματος Zn-22Al. Επιπλέον, οι θλιπτικές καμπύλες σύνθετων αφρών είναι ομαλότερες χωρίς ταλαντώσεις στην περιοχή πλατό και αυξάνονται ταχύτερα από αυτές των αφρών κράματων Zn-22Al.

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΌ ΜΕΡΟΣ

6 Κεφάλαιο 6 : Διεξαγωγή Πειραματικής Διαδικασίας

6.1 Εισαγωγή

Στη παρούσα ενότητα γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας διεξαγωγής του πειράματος, που ανατέθηκε μαζί με τη διπλωματική εργασία. Αντικείμενο της, όπως άλλωστε φανερώνει και ο τίτλος του παρόντος πονήματος, είναι η δημιουργία δοκιμίων μεταλλικών αφρών αλουμινίου, με ενίσχυση νιφάδων χάλυβα, με χρήση της μεθόδου κονιομεταλλουργίας. Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν δοκίμια αφρού αλουμινίου, με δημιουργία ενός πρόδρομου μίγματος σταθερής αναλογίας μεταλλικής σκόνης αλουμινίου (Al, 99,4 % κ.β) με υδρίδιο του τιτανίου (TiH_2 , 0,6 % κ.β.), το οποίο στη συνέχεια αναμίχθηκε με νιφάδες χάλυβα (Steel Flakes), σε διαφορετικές αναλογίες μεταξύ του πρόδρομου μίγματος και των νιφάδων του χάλυβα. Τα πειράματα και οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Στη συνέχεια, για λόγους πληρότητας και κατανόησης του πειράματος γίνεται εν συντομία μια υπενθύμιση από την θεωρία των βασικών σταδίων της μεθόδου παραγωγής μεταλλικού αφρού με χρήση κονιομεταλλουργίας και αφριστικού παράγοντα, και έπειτα ακολουθεί, στις επόμενες ενότητες, η περιγραφή της διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας.

6.2 Η μέθοδος της κονιομεταλλουργίας

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας, ακολουθούνται τα εξής βασικά βήματα: Αρχικά η μεταλλική σκόνη αναμιγνύεται με τον αφριστικό παράγοντα στην επιθυμητή αναλογία. Σε αυτό το σημείο προστίθενται και άλλες σκόνες που έχουν το ρόλο του σταθεροποιητικού ή του ενισχυτικού παράγοντα.

Το μίγμα που προκύπτει, αφού ανακατευτεί με μηχανικό τρόπο για την καλύτερη διασπορά του αφριστικού παράγοντα (ή και των άλλων σκονών) εντός της μεταλλικής σκόνης, συμπιέζεται ώστε να δημιουργηθεί ένα πυκνό, ημιτελικό προϊόν στη μορφή συσσωματώματος, που ονομάζεται πρόδρομο δοκίμιο (precursor). Μετά τη συμπίεση ακολουθεί θερμική κατεργασία κοντά στο σημείο

τήξης της μεταλλικής μήτρας, και σε θερμοκρασία απαραίτητως μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία αποσύνθεσης του αφριστικού παράγοντα, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της αφροποίησης. Το στάδιο αυτό στοχεύει στην αποσύνθεση του αφριστικού παράγοντα με σκοπό να εκλυθεί αέριο υδρογόνο, το οποίο, καθώς είναι εγκλωβισμένο εντός της στερεάς ουσίας, θα οδηγήσει στη διόγκωση του υλικού και στην δημιουργία πορώδους δομής με κλειστούς πόρους, δηλαδή στη δημιουργία μεταλλικού αφρού κλειστού τύπου.

Η διάρκεια της αφροποίησης ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία που προσδίδεται και τον όγκο του συμπιεσμένου πρόδρομου δοκιμίου, και μπορεί να κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα ως μερικά λεπτά μέχρι τη μέγιστη αφροποίηση. Αν το διάστημα αυτό ξεπεραστεί, οι πόροι αρχίζουν να αναπτύσσονται υπερβολικά και να συγχωνεύονται μεταξύ τους, και τα τοιχώματα των κυψελίδων αρχίζουν να θραύονται, με αποτέλεσμα να αρχίζει και η φάση της κατάρρευσης της δομής.

Για την αφροποίηση του αλουμινίου και των κραμάτων του απαιτείται συνήθως ο αφριστικός παράγοντας υδρίδιο του τιτανίου (TiH_2) σε περιεκτικότητα 0,4 %-0,6 % κ.β. στο μίγμα. Αντίστοιχα για την αφροποίηση κραμάτων αλουμινίου και ψευδαργύρου χρησιμοποιείται υδρίδιο του ζιρκονίου (ZrH_2), ενώ για τους χάλυβες χρησιμοποιείται ανθρακικό στρόντιο (SrCO_3). Το πορώδες αυτών των μεταλλικών αφρών κυμαίνεται συνήθως από 60 % ως 85 %. ^[10]

Οι σημαντικότεροι παράγοντες, από τους οποίους εξαρτάται η επιτυχία της παραπάνω μεθόδου είναι οι ακόλουθοι:

- i. Η μορφή και η κοκκομετρία των κόνεων μετάλλου που επιλέγονται,
- ii. η περιεκτικότητα κ.β. του αφριστικού παράγοντα στο μίγμα,
- iii. η δύναμη συμπίεσης του πρόδρομου δοκιμίου στην πρέσα,
- iv. η επιλογή της θερμοκρασίας αφροποίησης στο φούρνο, και
- v. ο χρόνος θέρμανσης/παραμονής του δοκιμίου στο φούρνο.

6.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Από την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και του πειράματος, η μετέπειτα περίοδος διεξαγωγής του πειράματος μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα κύρια στάδια. Στις τέσσερις αυτές διαφορετικές φάσεις διεξήχθησαν οι απαραίτητες

λειτουργίες για την πραγμάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα τέσσερα αυτά στάδια είναι:

- i. Το στάδιο των αποφάσεων,
- ii. το στάδιο των απαραίτητων υπολογισμών,
- iii. το στάδιο εκτέλεσης των πειραματικών διαδικασιών, και τέλος
- iv. το στάδιο ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Από αυτά τα τέσσερα στάδια, στη παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά για τα τρία πρώτα, ενώ για το τέταρτο, την ανάλυση των αποτελεσμάτων, αφιερώνεται το επόμενο κεφάλαιο.

6.3.1 Στάδιο των αποφάσεων

Όπως περιγράφηκε στην εισαγωγική παράγραφο, το αντικείμενο της παρούσας πειραματικής διπλωματικής εργασίας, ήταν η δημιουργία αφρών αλουμινίου, από μεταλλική σκόνη αλουμινίου με υδρίδιο του τιτανίου ως αφριστικό παράγοντα, με ανάμιξη νιφάδων χάλυβα σε διαφορετικές αναλογίες. Ως εκ τούτου, η πρώτη απόφαση που χρειάστηκε να παρθεί αφορούσε σε ποιες αναλογίες θα αναμιγνύονταν η σκόνη πρόδρομου μείγματος (Al-TiH₂) με νιφάδες χάλυβα (Steel Flakes). Αποφασίστηκε αρχικά να δημιουργηθούν οι παρακάτω τέσσερις αναλογίες μιγμάτων:

- i. **Αναλογία πρώτη:** Μίγμα με μηδενική προσθήκη νιφάδων χάλυβα, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σα μέτρο σύγκρισης για τις υπόλοιπες αναλογίες.
- ii. **Αναλογία δεύτερη:** Μίγμα με προσθήκη 2 % κ.β. νιφάδων χάλυβα (πρόδρομο μίγμα Al-TiH₂ 98 % κ.β.).
- iii. **Αναλογία τρίτη:** Μίγμα με προσθήκη 5 % κ.β. νιφάδων χάλυβα (πρόδρομο μίγμα Al-TiH₂ 95 % κ.β.).
- iv. **Αναλογία τέταρτη:** Μίγμα με προσθήκη 10 % κ.β. νιφάδων χάλυβα (πρόδρομο μίγμα Al-TiH₂ 90 % κ.β.).

Στις τέσσερις πιο πάνω αναλογίες προστέθηκε αργότερα, μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων, λόγω των αποτελεσμάτων που παρήγαγαν, όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, και μία **πέμπτη αναλογία**, με προσθήκη 8 % κ.β. νιφάδων χάλυβα (πρόδρομο μίγμα Al-TiH₂ 92 % κ.β.).

Μετά τα παραπάνω, η δεύτερη απόφαση που χρειάστηκε να παρθεί αφορούσε το **πόσα δοκίμια από κάθε αναλογία θα παρασκευαστούν:**

Αποφασίστηκε να παρασκευαστούν για κάθε μία από τις τέσσερις πρώτες αναλογίες (περιεκτικότητας σε νιφάδες χάλυβα 0 % κ.β., 2 % κ.β., 5 % κ.β. και 10 % κ.β. αντίστοιχα) τρία δοκίμια, όπου το πρώτο εξ αυτών θα αφροποιηθεί μέχρι να καταρρεύσει, ενώ τα άλλα δύο θα αφροποιηθούν μέχρι το σημείο της μέγιστης αφροποίησης, βάσει των χρόνων που πάρθηκαν από το αντίστοιχο πρώτο δοκίμιο της αναλογίας. Για την πέμπτη αναλογία (περιεκτικότητας σε νιφάδες χάλυβα 8 % κ.β.) αποφασίστηκε να φτιαχτεί μόνο ένα δοκίμιο για λόγους παρατήρησης, το οποίο θα αφροποιηθεί μέχρι να καταρρεύσει.

Τέλος, η τρίτη απόφαση αφορούσε το **πόσο θα είναι το βάρος του κάθε δοκιμίου** όπου αποφασίστηκε ότι θα πρέπει να είναι 10 g, και πως για λόγους ασφάλειας θα πρέπει να υπολογιστεί στις απαραίτητες ποσότητες μισό επιπλέον δοκίμιο/αναλογία.

6.3.2 Στάδιο υπολογισμών

Αφού πάρθηκαν όλες οι απαραίτητες αποφάσεις, το επόμενο βήμα ήταν η υλοποίηση όλων των αναγκαίων υπολογισμών. Έτσι, και βάσει των παραπάνω, υπολογίστηκαν οι απαραίτητες ποσότητες συνολικά σε μεταλλική σκόνη αλουμινίου, υδρίδιο του τιτανίου, και νιφάδες χάλυβα, για τη δημιουργία 35 γραμμαρίων μίγματος για κάθε αναλογία, που αντιστοιχούν σε 3,5 (τριάμισι) δοκίμια βάρους 10 g/δοκίμιο, για τις τέσσερις μόνο πρώτες αναλογίες. Στα 3,5 γραμμάρια έχουν υπολογιστεί και 0,5 g για ασφάλεια. Το μίγμα της πέμπτης αναλογίας παρασκευάστηκε από την περίσσια που προέκυψε από τις προηγούμενες ποσότητες ασφαλείας.

Στον ακόλουθο πίνακα (6-1) παρουσιάζονται οι υπολογισμοί όλων των ποσοτήτων για τις τέσσερις πρώτες αναλογίες καθώς και οι αναγκαίες ποσότητες υλικών για τη δημιουργία ενός δοκιμίου της πέμπτης αναλογίας. Σημειώνεται πως στον πίνακα 6-1 η αναλογία μεταξύ σκόνης αλουμινίου (Al) και υδριδίου του τιτανίου (TiH₂) παραμένει διαρκώς σταθερή (Al 99,4 % κ.β – TiH₂ 0,6 % κ.β.) σε όλα τα μίγματα, είναι διαφορετική όμως η συμμετοχή τους στο τελική περιεκτικότητα του κάθε μίγματος (εκτός βέβαια από την περίπτωση της μηδενικής προσθήκης νιφάδων χάλυβα, προφανώς).

Πίνακας 6-1 Αναγκαίες ποσότητες σε Al, TiH₂ και Steel Flakes

	Steel Flakes	Al-TiH ₂	Al	TiH ₂
Πρώτη Αναλογία (Steel Flakes 0 % κ.β.)				
Περιεκτικότητα [% κ.β.]	0,00%	100,00%	99,40%	0,60%
Ποσότητα για 10 g μίγματος [g]	0,00	10,00	9,94	0,06
Ποσότητα για 35 g μίγματος [g]	0,00	35,00	34,79	0,21
Δεύτερη Αναλογία (Steel Flakes 2 % κ.β.)				
Περιεκτικότητα [% κ.β.]	2,00%	98,00%	97,41%	0,59%
Ποσότητα για 10 g μίγματος [g]	0,20	9,80	9,7412	0,0588
Ποσότητα για 35 g μίγματος [g]	0,70	34,30	34,0942	0,2058
Τρίτη Αναλογία (Steel Flakes 5 % κ.β.)				
Περιεκτικότητα [% κ.β.]	5,00%	95,00%	94,43%	0,57%
Ποσότητα για 10 g μίγματος [g]	0,50	9,50	9,443	0,057
Ποσότητα για 35 g μίγματος [g]	1,75	33,25	33,0505	0,1995
Τέταρτη Αναλογία (Steel Flakes 10 % κ.β.)				
Περιεκτικότητα [% κ.β.]	10,00%	90,00%	89,46%	0,54%
Ποσότητα για 10 g μίγματος [g]	1,00	9,00	8,946	0,054
Ποσότητα για 35 g μίγματος [g]	3,50	31,50	31,311	0,189
Πέμπτη Αναλογία (Steel Flakes 8 % κ.β.)				
Περιεκτικότητα [% κ.β.]	8,00%	92,00%	91,45%	0,55%
Ποσότητα για 10 g μίγματος [g]	0,80	9,20	9,1448	0,0552
Ποσότητα για τα 140 g των τεσσάρων πρώτων μιγμάτων [g]	5,95	134,05	133,2457	0,8043

Στον παραπάνω πίνακα, η τελευταία γραμμή δείχνει τις απαραίτητες ποσότητες σε Al, TiH₂ και Steel Flakes, για τη δημιουργία των τεσσάρων μιγμάτων με ασφάλεια μισού δοκιμίου. Από αυτές τις ποσότητες στρογγυλοποιώντας τις τιμές προς τα πάνω αλλά διατηρώντας πάντα σταθερή την αναλογία Al-TiH₂, υπολογίστηκαν οι τελικά αναγκαίες ποσότητες: **Al: 149,1 g, TiH₂: 0,9 g, και Steel Flakes: 6,7 g.**

Οι ποσότητες που πραγματικά χρειάζονται για τα τρία δοκίμια 10 g της κάθε αναλογίας που αποφασίστηκε να παρασκευαστούν (υπολογίζοντας από τον πίνακα 6-1 για 30 g μίγματος), είναι Al-114,21 g, TiH₂-0,69 g και Steel Flakes-5,1 g. Συνεπώς οι ποσότητες με ασφάλεια που υπολογίστηκαν, καλύπταν τις ανάγκες του πειράματος για τη δημιουργία τουλάχιστον δύο δοκιμίων ακόμη (για το λόγο αυτό δε χρειάστηκε να υπολογιστούν εκ νέου ποσότητες για το μίγμα της πέμπτης αναλογίας), και μπορούσαμε να συνεχίσουμε στο επόμενο στάδιο.

6.3.3 Στάδιο εκτέλεσης πειραματικών διαδικασιών

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, έγινε η συλλογή των υλικών στις ποσότητες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν:

- i. 149,1 g μεταλλικής σκόνης λεπτόκοκκου αλουμινίου μέσου μεγέθους 7-15 μm, 99,5 % ελάχιστη καθαρότητα (Alfa Aesar), ^[146]
- ii. 0,9 g σκόνης υδριδίου του τιτανίου (TiH₂) ως αφριστικός παράγοντας 99 % ελάχιστη καθαρότητα, 450 °C θερμοκρασία αποσύνθεσης (Alpha Aesar), ^[147]
- iii. 6,7 g νιφάδες ανοξειδώτου χάλυβα, μέσου μεγέθους, 0,4-1,2 μm, σύστασης Fe 67,5 % κ.β., Cr 17 % κ.β., Ni 13 % κ.β., Mo 2,5 % κ.β. (Alpha Aesar). ^[148]

Με τις παραπάνω ποσότητες έτοιμες, το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία των μιγμάτων. Αρχικά δημιουργήθηκε το πρόδρομο μίγμα Al-TiH₂ 150 γραμμαρίων, αναμιγνύοντας συνολικά τις δύο σκόνες, και επιτυγχάνοντας αναλογία Al 99,4 % κ.β., και TiH₂ 0,6 % κ.β.

Προκειμένου να επιτευχθεί καλή ανάμιξη του πρόδρομου αυτού μίγματος και καλή διασπορά της σκόνης του υδριδίου του τιτανίου εντός της σκόνης του αλουμινίου, έγινε μηχανική ανάδευση, με χρήση τόνου με τον εξής τρόπο: Το μίγμα τοποθετήθηκε σε ασφαλές δοχείο, και στη συνέχεια προσδέθηκε στον τόνου του εργαστηρίου (εικόνα 6.3.3.1) σε 35 στροφές το λεπτό (rpm) για μισή ώρα,

και στη συνέχεια για 10 λεπτά στις 60 rpm. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για όλα τα μίγματα που δημιουργήθηκαν στη συνέχεια.



6.3.3 1 Ο τόρνος του εργαστηρίου στον οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάδευση

Αφού ετοιμάστηκε το πρόδρομο μίγμα, χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των τελικών μιγμάτων με περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα 2, 5 και 10 % κ.β. Με τη βοήθεια του πίνακα 6-1, μετρήθηκαν οι αναγκαίες ποσότητες για 3 δοκίμια των 10 γραμμαρίων για κάθε ένα από αυτά τα τρία μίγματα, καθώς επίσης διαχωρίστηκε και μία ποσότητα 30 γραμμαρίων που θα αποτελούσε το αρχικό μίγμα για τα τρία δοκίμια μηδενικής περιεκτικότητας σε νιφάδες χάλυβα (30 γραμμάρια μίγματος ανά αναλογία για 4 αναλογίες 0, 2, 5 και 10 % κ.β.). Η ζύγιση των ποσοτήτων αυτών έγινε με χρήση ηλεκτρονικής ψηφιακής ζυγαριάς, ακρίβειας ενός χιλιοστού του γραμμαρίου (τριών δεκαδικών ψηφίων), δηλαδή το 0,001 g (εικόνα 6.3.3.2). Για την ακρίβεια, τοποθετήθηκαν ελάχιστα παραπάνω ποσότητες κατά τη ζύγιση των μιγμάτων, τηρουμένων όμως των αναλογιών, για ενδεχόμενες απώλειες από την επικόλληση υλικού εξ αυτών στα τοιχώματα των δοχείων που τοποθετήθηκαν. Καθώς πρόκειται για σκόνες αρκετά λεπτόκοκκες, κατά την επαφή τους με τις επιφάνειες των δοχείων, οι οποίες έχουν τραχύτητα που σε αυτά τα μεγέθη δεν μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη, μια ποσότητα από το υλικό εναποτίθεται στα τοιχώματα και δεν αποκολλάται. Μετά τη ζύγιση, τα ξεχωριστά μίγματα αναδεύτηκαν στον τόρνο με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε προηγουμένως κατά τη δημιουργία του πρόδρομου μίγματος Al-TiH₂.



6.3.3 2 Ψηφιακή ζυγαριά ακρίβειας 0,001 γραμμαρίων

Με έτοιμα τα 4 μίγματα (0, 2, 5 και 10 % κ.β. περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα), ζυγίστηκαν οι ποσότητες των 10 γραμμαρίων για τα 12 δοκίμια (3 δοκίμια ανά αναλογία). Στην εικόνα 6.3.3.3 απεικονίζεται ένα μίγμα 10 γραμμαρίων πριν την φάση της συμπίεσης σε πρέσα. Στην εικόνα αυτή φαίνεται πως υπάρχει απώλεια υλικού από την επικόλληση του στα τοιχώματα του πλαστικού δοχείου.



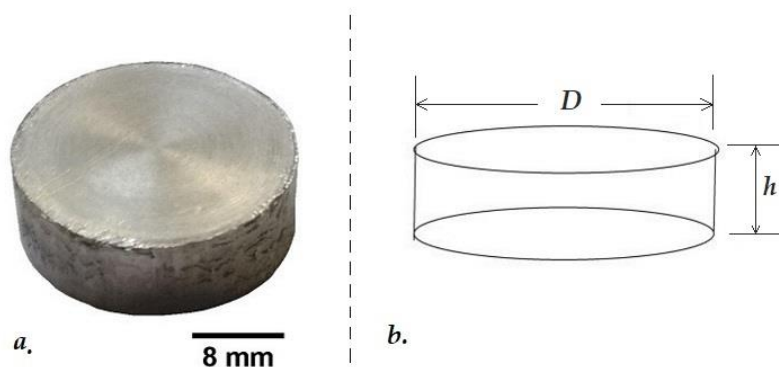
6.3.3 3 10 g μίγματος, έτοιμο για συμπίεση

Ακολούθως τα δώδεκα μίγματα συμπίεστηκαν στην πρέσα 100 τόνων του εργαστηρίου της εικόνας 6.3.3.4. Η συμπίεση έγινε με εφαρμογή σταθερής δύναμης 480 kN. Από αυτή τη διαδικασία παράχθηκαν τα πρόδρομα δοκίμια (precursors).



6.3.3 4 Πρέσα 100 τόνων του εργαστηρίου

Μετά και από αυτή τη διαδικασία, τα πρόδρομα δοκίμια, λειάνθηκαν με σμυριδόπανο, για να απομακρυνθούν οι ατέλειες που προέκυψαν στην εξωτερική κυκλική επιφάνεια. Λόγω της μικρής διαφοράς διαμέτρου της μήτρας που τοποθετήθηκε η σκόνη, σε σχέση με τη διάμετρο του εμβόλου που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεση της. Η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή, αλλά το γεγονός ότι οι σκόνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι λεπτόκοκκες της τάξης μικροκλίμακας, είχε ως αποτέλεσμα, λίγο υλικό να διαφύγει προς τα κενά και να δημιουργηθούν «αυτάκια», τα οποία έπρεπε να αφαιρεθούν, για να μην επηρεαστούν τα δοκίμια κατά τη φάση της αφροποίησης τους. Ένα παράδειγμα των δοκιμίων, όπως αυτά προέκυψαν μετά τη συμπίεση και λείανση τους, φαίνεται στην εικόνα 6.3.3.5 *a*.



6.3.3 5 *a*. Συσσωμάτωμα - Προϊόν συμπίεσης, *b*. Γεωμετρική απεικόνιση των διαστάσεων του κυλινδρικού δοκιμίου

Στη συνέχεια με κατάλληλα μετρητικά όργανα (ζυγαριά ακριβείας τριών δεκαδικών, ηλεκτρονικό παχύμετρο) μετρήθηκαν η μάζα, η διάμετρος και το ύψος των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6-2. Στον ίδιο πίνακα αναγράφονται και η μάζα των μιγμάτων πριν τη διαδικασία συμπίεσης της σκόνης και τη δημιουργία των πρόδρομων δοκιμίων, καθώς και το εμβαδό της τελευταίας στήλης είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί ως το εμβαδό του κάθε δοκιμίου για το χρόνο $t=0$ sec στη φάση της αφροποίησης στο επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 6-2 Μάζα, Διάμετρος και Ύψος Προϊόντων Συμπίεσης

<i>α/α</i> Μίγματος/Δοκιμίου		Μάζα Μίγματος προ συμπίεσης [g]	Μάζα Πρόδρομου Δοκιμίου [g]	Διάμετρος [mm]	Ύψος [mm]	Εμβαδό Μέσης Επιφάνειας [mm ²]
1η αναλογία (Steel Flakes 0 %)	1	10,102	9,868	24,98	7,51	187,5998
	2	10,108	9,943	25,00	7,56	189,0000
	3	10,112	9,920	25,06	7,53	188,7018
2η αναλογία (Steel Flakes 2 %)	4	10,103	9,908	24,97	7,46	186,2762
	5	10,101	9,985	25,04	7,51	188,0504
	6	10,115	9,905	25,01	7,46	186,4496
3η αναλογία (Steel Flakes 5 %)	7	10,118	9,990	24,98	7,44	185,8512
	8	10,102	9,945	25,01	7,32	183,0732
	9	10,114	9,974	25,03	7,37	184,4711
4η αναλογία (Steel Flakes 10 %)	10	10,102	9,836	24,96	7,41	184,9536
	11	10,109	9,928	25,00	7,50	187,5000
	12	10,112	9,932	24,98	7,49	187,1002
5η αναλογία (Steel Flakes 8 %)	13	10,101	9,942	25,01	7,34	183,5734

Η επόμενη διαδικασία που έλαβε μέρος ήταν η αφροποίηση των δοκιμίων. Βάσει βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε η θερμοκρασία αφροποίησης να είναι 780 °C. Για τους χρόνους ψησίματος, όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, το πρώτο δοκίμιο από τα τρία, της κάθε αναλογίας, αφροποιήθηκε μέχρι τη φάση της κατάρρευσης ενώ τα υπόλοιπα δύο αφροποιήθηκαν μέχρι τη μέγιστη διόγκωση, βάσει και των χρόνων που παρατηρήθηκαν στο πρώτο δοκίμιο. Τα 12 πρόδρομα δοκίμια (και εν συνεχεία και το 13^ο τη πέμπτης αναλογίας) μεταφέρθηκαν στον επαγωγικό φούρνο Osmund του Εργαστηρίου Χύτευσης (εικόνα 6.3.3.6 α), όπου και τοποθετήθηκαν ένα τη φορά, εντός του φούρνου, και η διαδικασία της

αφροποίησης τους βιντεοσκοπήθηκε εξ ολοκλήρου, με κάμερα υψηλής ανάλυσης, από οπή που βρίσκεται στο κέντρο της πόρτας του φούρνου (εικόνα 6.3.3.7). Η οπή αυτή έχει καλυφθεί με πυρίμαχο γυαλί για την ελαχιστοποίηση των θερμοκρασιακών απωλειών από τον φούρνο προς τα έξω, αλλά επίσης και για την αποφυγή καταστροφής του φακού της κάμερας λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, στην οποία αυτός εκτίθεται όντας σε απόσταση μισού μέτρου.



a.



b.



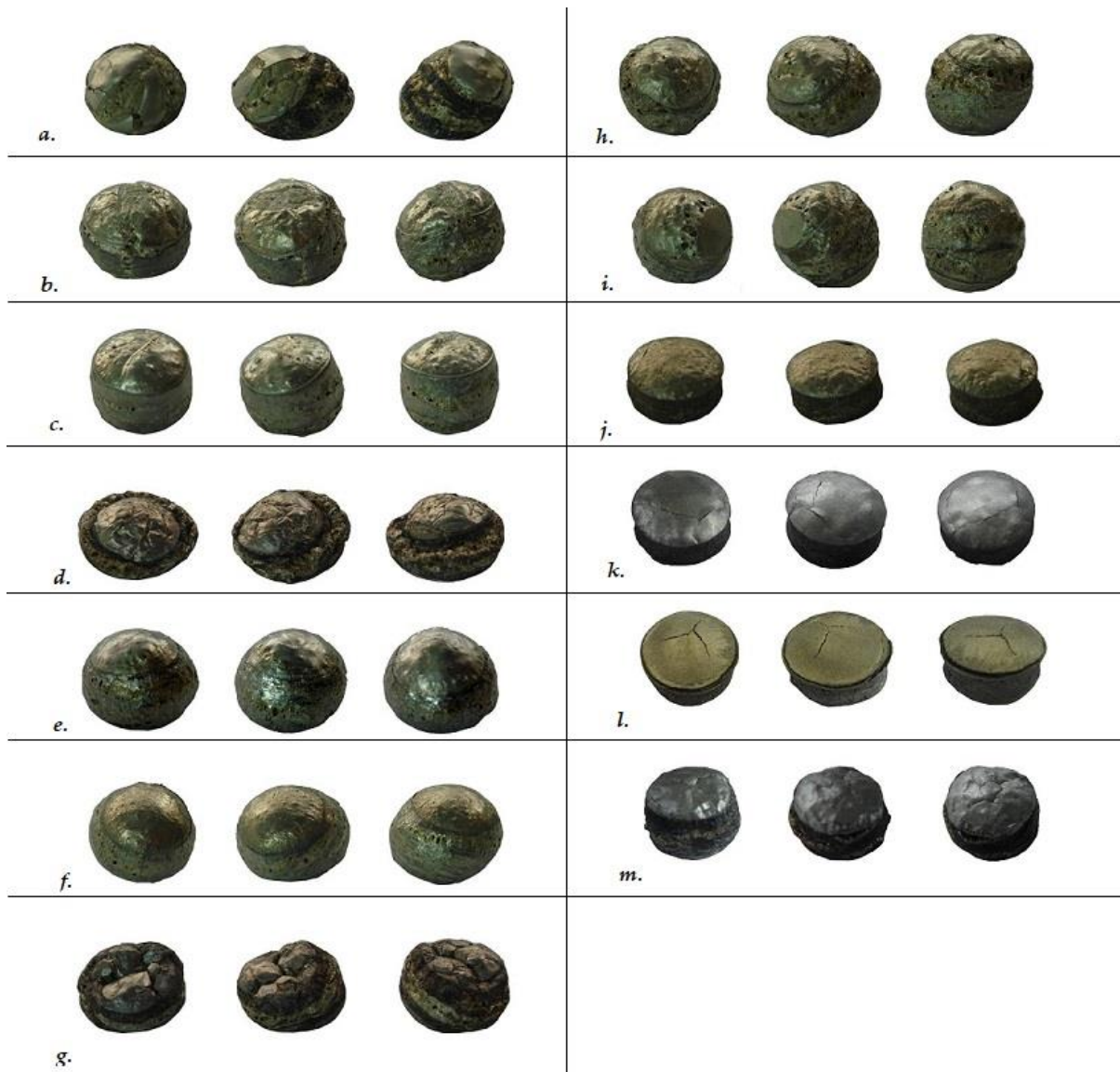
c.

6.3.3 6 a. Επαγωγικός φούρνος Osmund **b.** Τεχνικά χαρακτηριστικά του φούρνου **c.** Ρυθμιστής θερμοκρασίας επαγωγικού φούρνου.



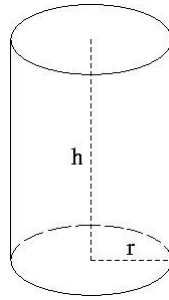
6.3.3 7 Το πυρίμαχο γυαλί που τοποθετήθηκε στη κεντρική οπή του φούρνου

Τα βίντεο που συλλέχθηκαν από αυτή τη διαδικασία επεξεργασθήκαν με κατάλληλο λογισμικό, και αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο. Η εικόνα 6.3.3.8 απεικονίζει τα δοκίμια όπως προέκυψαν από τη διαδικασία της αφροποίησης σε διαφορετικές λήψεις.



6.3.3.8 *a.* (0 %) Δοκίμιο 1, *b.* Δοκίμιο 2, *c.* Δοκίμιο 3, *d.* (2 %) Δοκίμιο 4, *e.* Δοκίμιο 5, *f.* Δοκίμιο 6, *g.* (5 %) Δοκίμιο 7, *h.* Δοκίμιο 8, *i.* Δοκίμιο 9, *j.* (10 %) Δοκίμιο 10, *k.* Δοκίμιο 11, *l.* Δοκίμιο 12, *m.* (8 %) Δοκίμιο 13

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.3.3.8 τα δοκίμια μετά τη διαδικασία αφροποίησης μπορούν να προσεγγιστούν στη μορφή από ένα κύλινδρο ύψους h και ακτίνας r (διαμέτρου d), όπου το ύψος h συμπίπτει με το μέγιστο ύψος του αφροποιημένου δοκιμίου, και η ακτίνα r συμπίπτει με το ήμισυ της μέγιστης διαμέτρου του αφροποιημένου δοκιμίου (εικόνα 6.3.3.9).



6.3.3 9 Κύλινδρος προσέγγισης αφροποιημένων δοκιμίων

Στη συνέχεια τα δοκίμια, μετά και την έξοδό τους από τον φούρνο, αφέθηκαν να ψυχθούν φυσικά στον ατμοσφαιρικό αέρα για επαρκές χρονικό διάστημα, περίπου 30 min, ώστε να μπορέσει στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί η εγκάρσια κοπή τους κατά το επίπεδο που ορίζεται από το μέγιστο ύψος h και τη μέγιστη διάμετρο d , όπως αυτά ορίστηκαν παραπάνω, με τη βοήθεια της δισκοτόμου του εργαστηρίου (εικόνα 6.3.3.10).



6.3.3 10 Η δισκοτόμος του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε

Καθώς η διαδικασία κοπής με τον τροχό, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τραχείας επιφάνειας, με έντονες διακυμάνσεις και εγχοπές, αποφασίστηκε η περαιτέρω κατεργασία των επιφανειών που προέκυψαν με ηλεκτροδιάβρωση (EDM, Electrical Discharge Machining), με την οποία είναι δυνατό να παραχθεί ομοιόμορφη επιφάνεια. Έτσι, τα κομμένα δοκίμια μεταφέρθηκαν στη μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης EDM του εργαστηρίου που απεικονίζεται στην εικόνα 6.3.3.11, όπου αφαιρέθηκε μία στρώση υλικού πάχους μισού χιλιοστού. Έτσι αποκαλύφθηκαν οι πόροι που είχαν καλυφθεί από μετακίνηση υλικού κατά τη διαδικασία της κοπής στον δισκοτόμο (smearing).^[151]



a.



b.

6.3.3 11 a. Διάταξη για την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης EDM b. Πίνακας ελέγχου μηχανής με τις ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν

Τα δοκίμια στη συνέχεια αφού πλύθηκαν, μετρήθηκε το πλάτος τους με χρήση ηλεκτρονικού παχύμετρου. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του πορώδους του επόμενου κεφαλαίου. Στη συνέχεια έγινε λήψη φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης για τη μελέτη του πορώδους και της κατανομής των πόρων που δημιουργήθηκαν. Από τα κομμένα δοκίμια επιλέχθηκαν τα δοκίμια 2 (0 %), 5 (2 %), 8 (5 %), 10, 11 (10 %) και 13 (8 %), για να κατεργαστούν με τη μέθοδο χημικής προσβολής. Για να επιτευχθεί αυτό έπρεπε πρώτα να πραγματοποιηθεί στίλβωση, στη συσκευή στίλβωσης της εικόνας 6.3.3.12. Εκεί, προκειμένου να γυαλιστούν, χρησιμοποιήθηκαν σταδιακά λειαντικά χαρτιά μικρότερης κοκκομετρίας λειαντικών κόκκων. Τέλος για τη στίλβωση της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε διαμάντόπαστα, σε στιλβωτικό πανί βελούδου. Ακολούθησε η χημική προσβολή των δοκιμίων σε νιτρικό οξύ για 17 δευτερόλεπτα (εικόνα 6.3.3.13).



6.3.3 12 Συσκευή στίλβωσης



6.3.3 13 *a.* Νιτρικό οξύ και απιονισμένο νερό, *b.* Χημική προσβολή - Εμβάπτιση δοκιμίων στο νιτρικό οξύ, *c.* Καθαρισμός δοκιμίων στο απιονισμένο νερό

Τέλος, τα δοκίμια που πέρασαν τις παραπάνω κατεργασίες της στίλβωσης και της χημικής προσβολής, ήταν αυτά που παρατηρήθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου, που απεικονίζεται ακολούθως (εικόνα 6.3.3.14). Σε αυτή τη 'φάση έγινε και λήψη φωτογραφιών με απευθείας σύνδεση του μικροσκοπίου σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, που δείχνουν πώς κατανεμήθηκαν οι νιφάδες του χάλυβα στο υπόλοιπο μίγμα, και παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.



6.3.3 14 Το οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου

7 Κεφάλαιο 7 : Τα αποτελέσματα του πειράματος

7.1 Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο, όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, ασχολείται κατά κύριο λόγο με την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ στη συνέχεια γίνεται μία προσπάθεια να εξαχθούν, χρήσιμα και ασφαλή ταυτόχρονα συμπεράσματα, αλλά και να δοθούν και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική περαιτέρω έρευνα. Κατά την ανάλυση, που αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος αυτού του κεφαλαίου, γίνεται η μελέτη του υλικού που συλλέχθηκε στη διάρκεια της εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας, με τη βοήθεια των εξής εφαρμογών: α) Χρήση του λογισμικού μοναί για επεξεργασία των βίντεο, ^[149] και β) χρήση της εφαρμογής Fiji (αποτελεί συγκεκριμένη έκδοση της εφαρμογής ImageJ) για επεξεργασία των φωτογραφιών, ^[150] αλλά και των στιγμιότυπων που λήφθηκαν από τα βίντεο, και εν συνεχεία με συλλογή κατάλληλων στοιχείων από τα βίντεο, τα στιγμιότυπα, και τις φωτογραφίες, δημιουργούνται πίνακες και διαγράμματα που επιτρέπουν τη βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της αφροποίησης των συγκεκριμένων δοκιμίων.

Αυτή η ενότητα, δομείται σε τρεις βασικές υποκατηγορίες: α) Την ανάλυση του βιντεοσκοπημένου υλικού από τη φάση της αφροποίησης των δοκιμίων, β) την ανάλυση του συγκεντρωμένου υλικού από τις φωτογραφίες των δοκιμίων μετά και από τη φάση της ηλεκτροδιάβρωσης EDM, και γ) την τρίτη, όπου αναλύεται το φωτογραφικό υλικό που συλλέχθηκε από το οπτικό μικροσκόπιο.

7.2 Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων

7.2.1 Αφροποίηση των δοκιμίων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, ένα δοκίμιο από κάθε αναλογία που δημιουργήθηκε, αφέθηκε μέχρι και τη πραγματοποίηση της κατάρρευσης της δομής του μεταλλικού αφρού, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια της ίδιας αναλογίας, έμειναν εντός του επαγωγικού φούρνου, Osmond, μέχρι το σημείο της μέγιστης αφροποίησης τους. Το δοκίμιο που επιλέχθηκε για να

παραμείνει στο φούρνο μέχρι και να επέλθει η κατάρρευση, ήταν το πρώτο δοκίμιο από κάθε αναλογία.

Επιλέχθηκαν αρχικά, τα δοκίμια 1 (0 %), 4 (2 %), 7 (5 %) και 10 (10 %), ως τα δοκίμια που θα πληρούσαν τον παραπάνω σκοπό. Ωστόσο στο δοκίμιο 10 της τέταρτης αναλογίας (10 % κ.β. Steel Flakes), παρατηρήθηκε διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα των άλλων αναλογιών, και επί της ουσίας δε πραγματοποιήθηκε ποτέ με την κλασσική έννοια αφροποίηση και κατάρρευση του δοκιμίου. Για όση ώρα παρέμεινε το συγκεκριμένο δοκίμιο εντός του φούρνου, είχε μία ελάχιστη διόγκωση, και δε παρουσίασε κάποια μέγιστη αφροποίηση, και (τουλάχιστον φαινομενικά, εσωτερικά δεν υπάρχει δυνατότητα να παρατηρήσουμε) δεν επήλθε ούτε κατάρρευση του δοκιμίου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν και τα άλλα δύο δοκίμια της αναλογίας, για ακόμη μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, όπου επαληθεύθηκε η ίδια συμπεριφορά. Αυτός ήταν και ο λόγος που αποφασίστηκε να γίνει και μία δοκιμή με την πέμπτη αναλογία (8 %).

Βάσει των παραπάνω, κατά την ανάλυση των βίντεο με την εφαρμογή μονανί, αποφασίστηκε να ληφθεί ανάλογα με το χρόνο παραμονής των δοκιμών στον επαγωγικό φούρνο, αντίστοιχος αριθμός στιγμιότυπων. Έτσι λήφθηκαν 16 στιγμιότυπα, ισαπέχοντων χρονικών διαστημάτων, για τα δοκίμια που παρέμειναν μέχρι τη μέγιστη αφροποίηση τους. Επίσης 16 στιγμιότυπα λήφθηκαν, και για το δοκίμιο 10, το πρώτο της τέταρτης αναλογίας. Για τα δοκίμια των τριών πρώτων αναλογιών που παρέμειναν στο φούρνο μέχρι την κατάρρευση τους (δοκίμια 1, 4 και 7), λήφθηκαν 16 στιγμιότυπα, ισαπέχοντων χρονικών διαστημάτων, μέχρι τη στιγμή μέγιστης αφροποίησης, και 9 στιγμιότυπα έως τη στιγμή αφαίρεσης των δοκιμών από τον επαγωγικό φούρνο. Συνολικά για τα τρία αυτά δοκίμια λήφθηκαν 25 στιγμιότυπα. Για τα δοκίμια 11 (10 %) και 13 (8 %) λήφθηκαν 30 στιγμιότυπα ισαπέχοντων χρονικών διαστημάτων. Τέλος, για το δοκίμιο 12 (10 %), το οποίο έμεινε και τη περισσότερη ώρα σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα, λήφθηκαν, με τη βοήθεια της εφαρμογής, 36 στιγμιότυπα ισαπέχοντων χρονικών διαστημάτων. Σε κάθε περίπτωση από τις προηγούμενες το τελευταίο στιγμιότυπο συμπίπτει και με το τέλος της παραμονής του κάθε δοκιμίου εντός του επαγωγικού φούρνου (και προφανώς το τελευταίο στιγμιότυπο συμπίπτει και με τη στιγμή της μέγιστης αφροποίησης των πρώτων δοκιμών με τα 16 στιγμιότυπα).

Τα στιγμιότυπα του κάθε δοκιμίου αφού συντάχθηκαν όλα μαζί σε ενιαίο κολλάζ, παρουσιάζονται στις εικόνες 7.2.1.1 έως 7.2.1.13. Πάνω στα στιγμιότυπα πέρα από

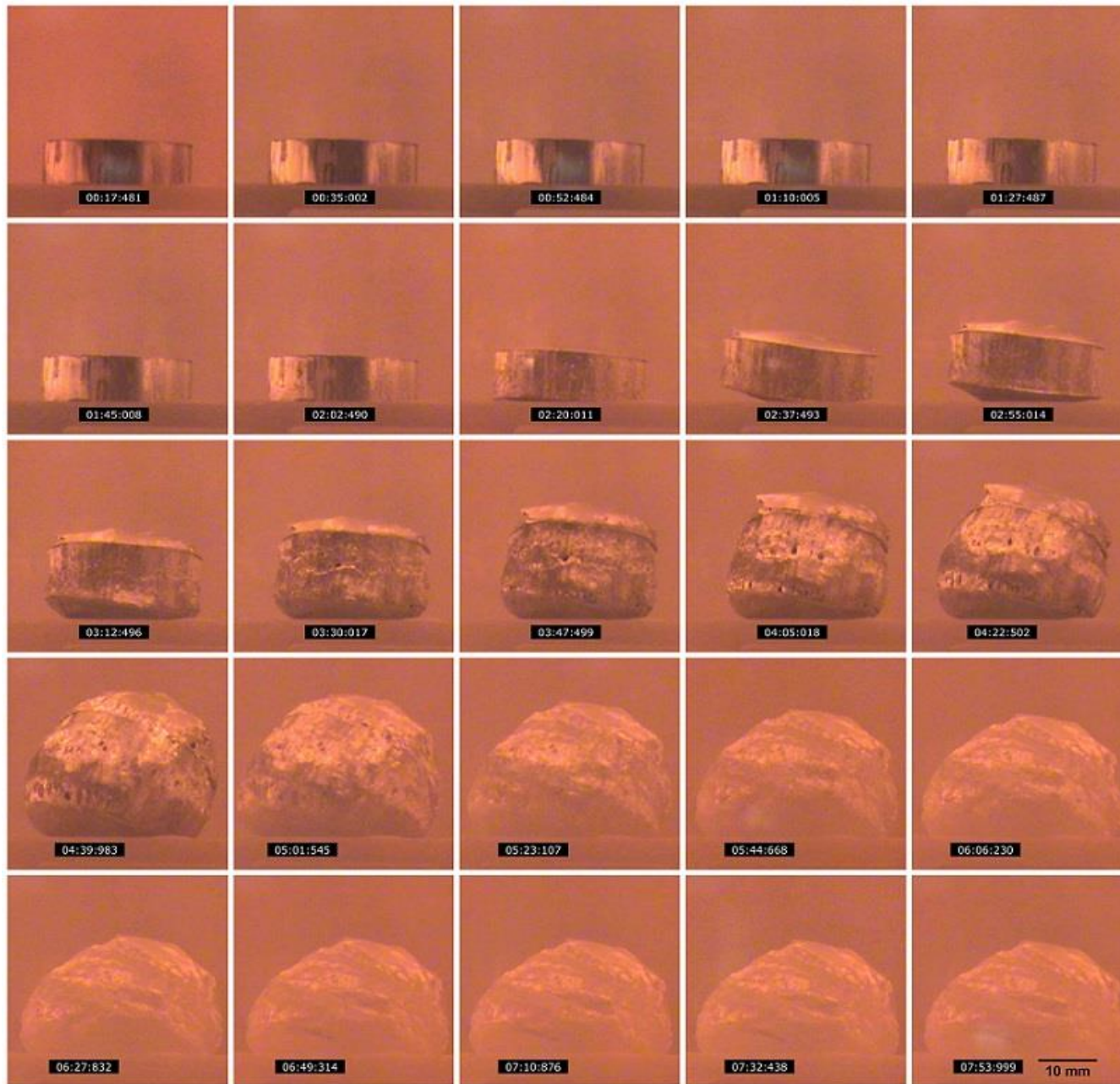
το δοκίμιο, απεικονίζεται και ο χρόνος που λήφθηκε το στιγμιότυπο. Κάνοντας χρήση επίσης των μετρήσεων των διαμέτρων και των υψών των συσσωματωμένων από τη πρέσα δοκιμίων, που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (πίνακας 6-2) έγινε διαστασιολόγηση της κλίμακας του κολλάζ (scale στο κάτω δεξί μέρος του κολλάζ, με χρήση του προγράμματος Fiji). Σε αυτό το σημείο, επισημαίνεται πως η κλίμακα που φαίνεται κάτω δεξιά στο τελευταίο στιγμιότυπο όλων των εικόνων (7.2.1.1 έως 7.2.1.13) αντιστοιχεί με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα στιγμιότυπα της αντίστοιχης εικόνας, καθώς αυτά λήφθηκαν από βίντεο που πραγματοποιήθηκε με κάμερα σε σταθερή απόσταση από το δοκίμιο.

Χρήση της εφαρμογής Fiji όμως, πραγματοποιήθηκε πέρα από την επιβολή κλίμακας στις εικόνες, και για τον υπολογισμό των εμβαδών των διογκούμενων δοκιμίων, και κατ' επέκταση τον υπολογισμό της διαστολής του όγκου των δοκιμίων. Η εφαρμογή αυτή προσφέρει τη δυνατότητα, με την επιβολή κλίμακας και με την επιλογή οποιασδήποτε επιφάνειας, να υπολογίζει μόνη της το εμβαδό της επιφάνειας. Έτσι αφού επιλέχτηκε με κατάλληλο εργαλείο της εφαρμογής, περιμετρικά η επιφάνεια των δοκιμίων σε κάθε ένα στιγμιότυπο, δόθηκε εντολή στην εφαρμογή να υπολογιστούν τα αντίστοιχα εμβαδά, σε τετραγωνικά χιλιοστά (mm²).

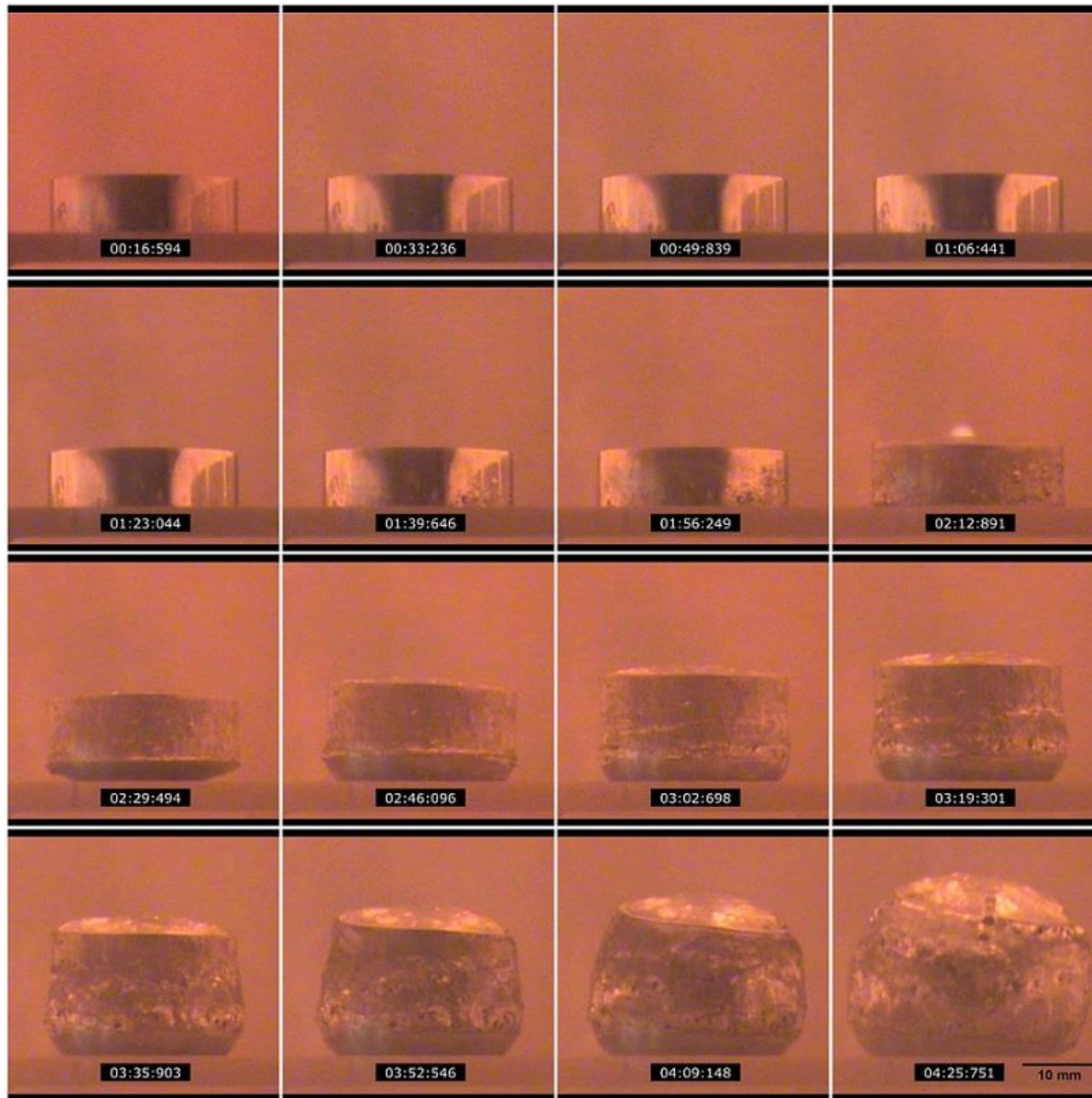
Ένα παράδειγμα της παραπάνω διαδικασίας απεικονίζεται στην εικόνα 7.2.1.14 όπου δείχνει τις περιοχές που επιλέχτηκαν προκειμένου το πρόγραμμα να υπολογίσει τα αντίστοιχα εμβαδά. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για όλα τα υπόλοιπα δοκίμια. Μέσω αυτών των εμβαδών, αφού τους αφαιρέθηκε πρώτα το αρχικό εμβαδό, υπολογίστηκε η διαστολή του όγκου, με κανονικοποίηση βάσει του τύπου :

$$\Delta. O. = \frac{E_T - E_A}{E_T}$$

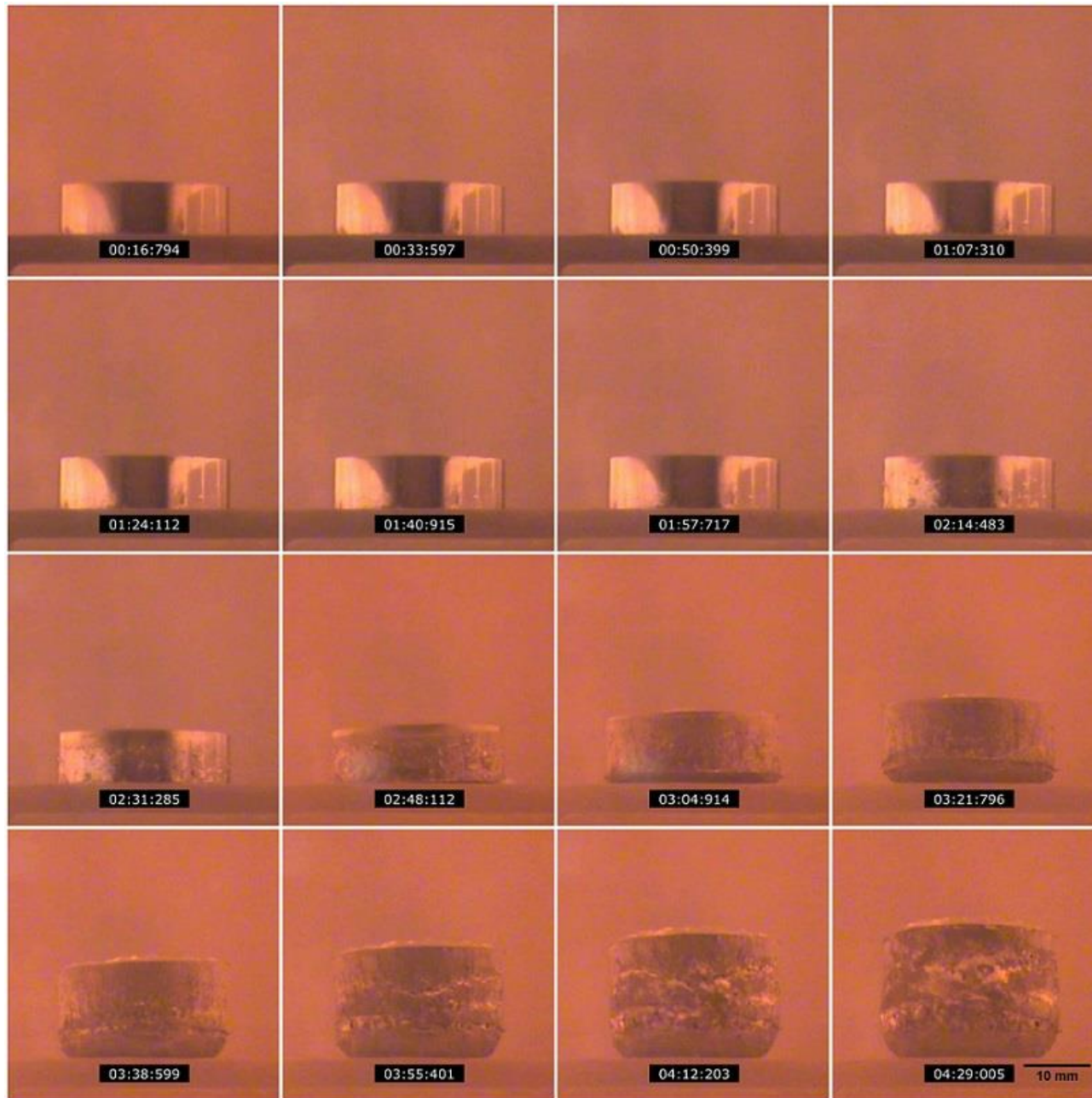
όπου $\Delta. O.$, Διαστολή του Όγκου (αδιάστατο), E_T το εμβαδό που υπολογίστηκε από την εφαρμογή για το κάθε στιγμιότυπο, και E_A το αρχικό εμβαδό, όπου χρησιμοποιήθηκε το ήδη υπολογισμένο εμβαδό, από τον πίνακα 6-2, για τη χρονική στιγμή $t=0 \text{ sec}$. Η ποσότητα αυτή, αν και υπολογίζεται με χρήση εμβαδών, ωστόσο συμπίπτει με τη διαστολή του όγκου, καθώς είναι αδιαστατοποιημένη (θα λαμβάναμε ίδια ποσά με χρήση όγκων). Στις επόμενες σελίδες απεικονίζονται τα στιγμιότυπα της αφροποίησης των 13 δοκιμίων.



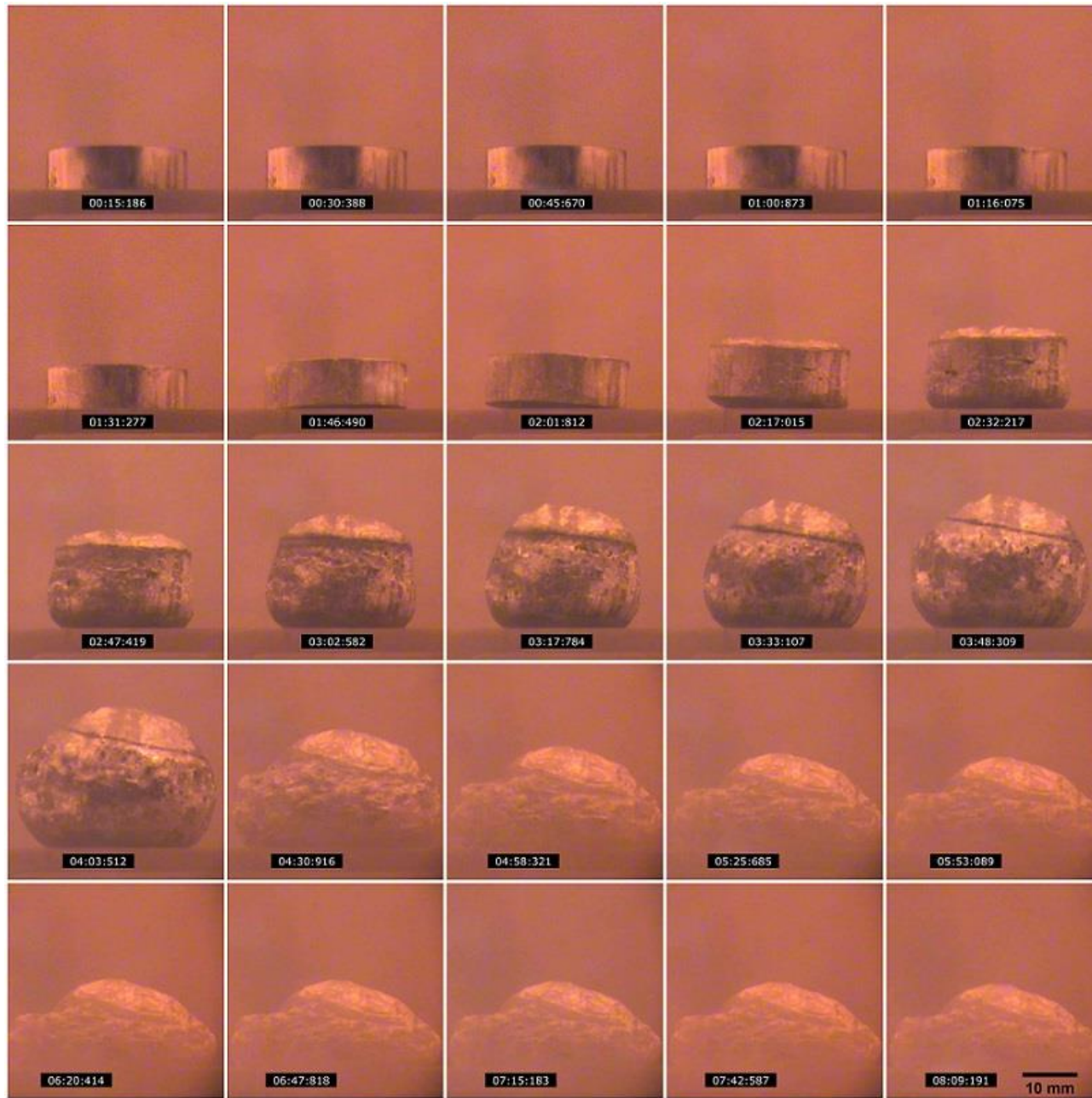
7.2.1 1 Αφροποίηση Δοκιμίου 1 (0 % Steel Flakes, 280 sec μέγιστη αφροποίηση)



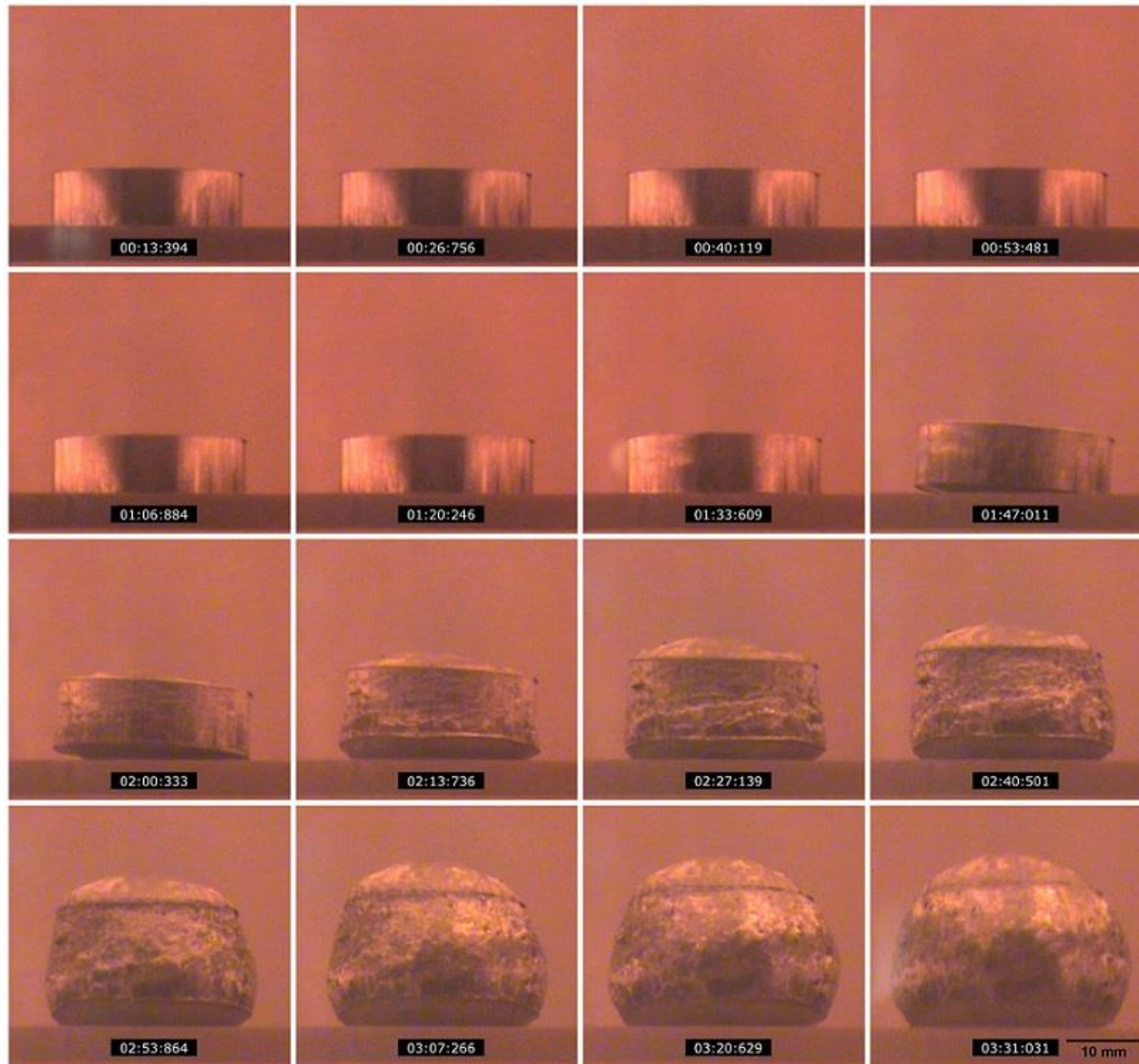
7.2.1.2 Αφροποίηση Δοκιμίου 2 (0 % Steel Flakes, 265 sec μέγιστη αφροποίηση)



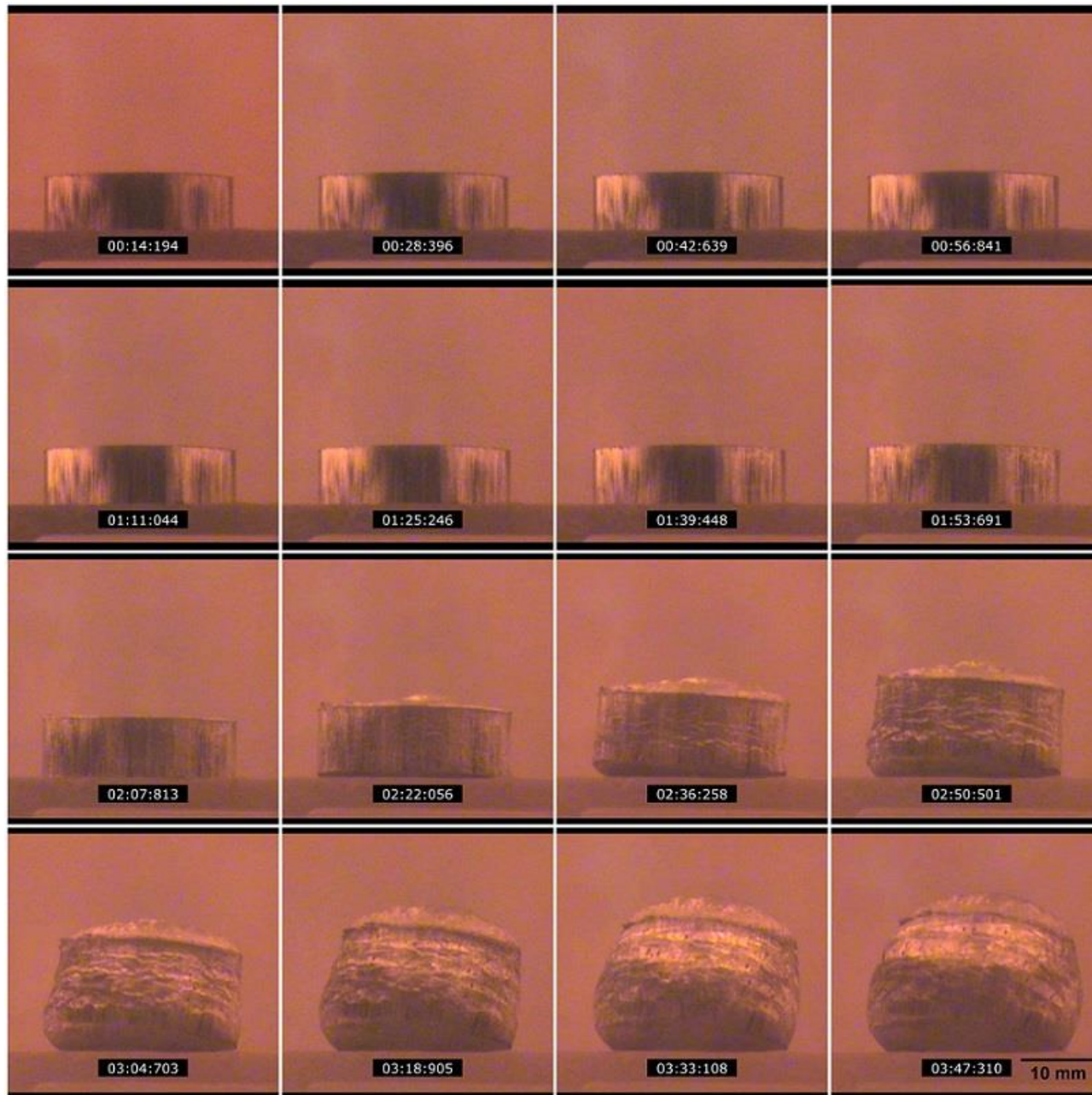
7.2.1 3 Αφροποίηση Δοκιμίου 3 (0 % Steel Flakes, 269 sec μέγιστη αφροποίηση)



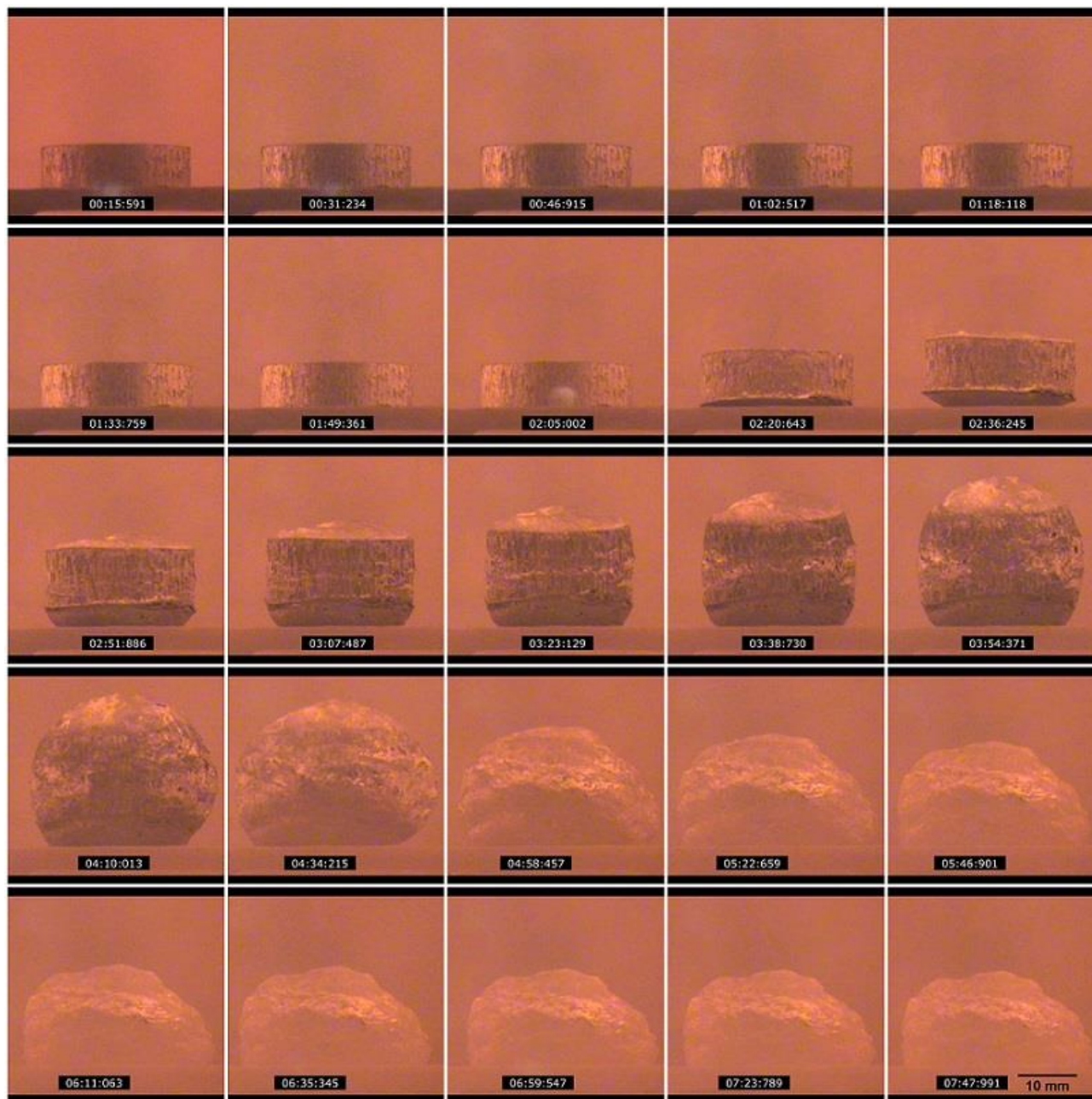
7.2.1 4 Αφροποίηση Δοκιμίου 4 (2 % Steel Flakes, 243 sec μέγιστη αφροποίηση)



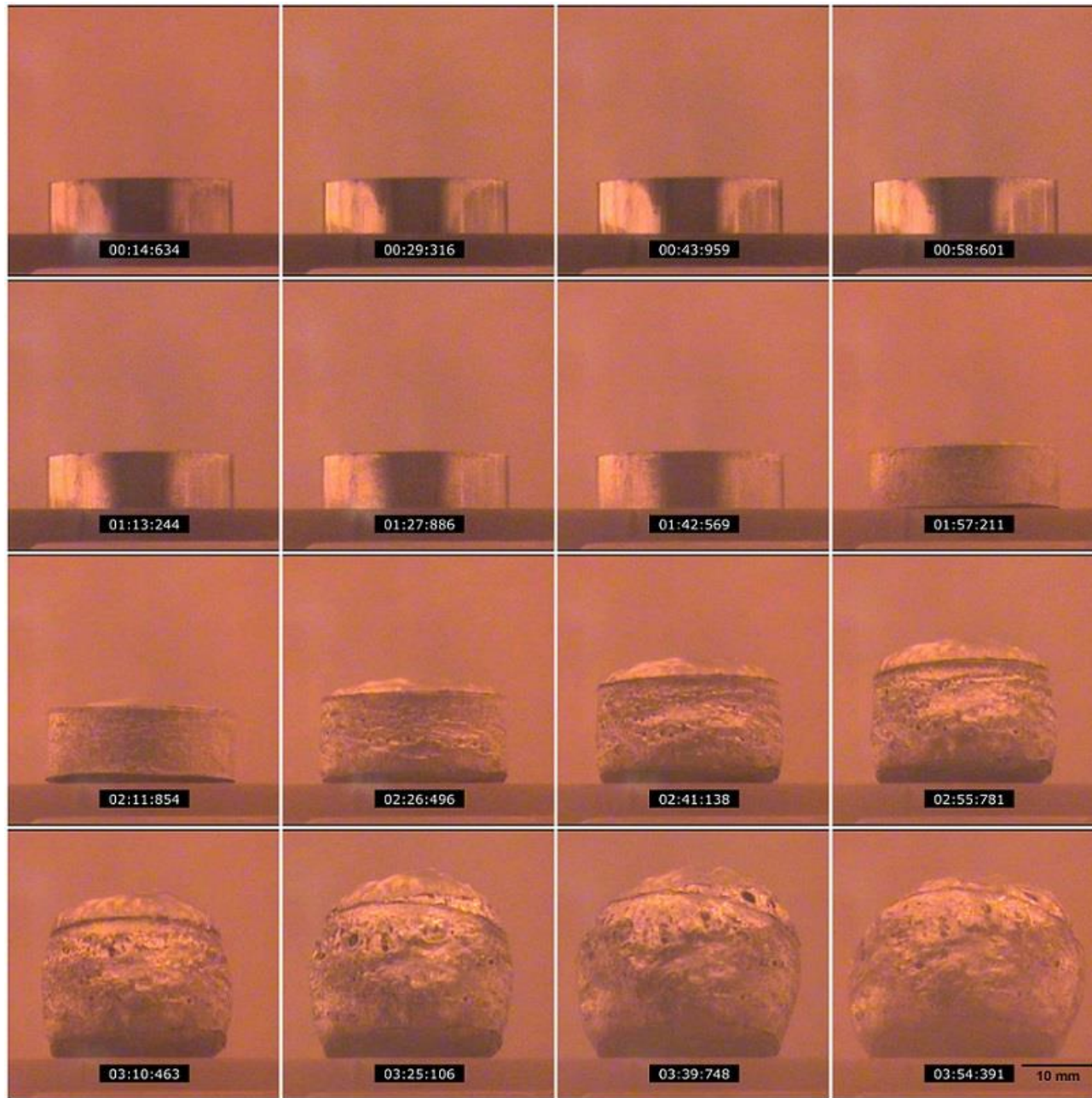
7.2.1.5 Αφροποίηση Δοκιμίου 5 (2 % Steel Flakes, 211 sec μέγιστη αφροποίηση)



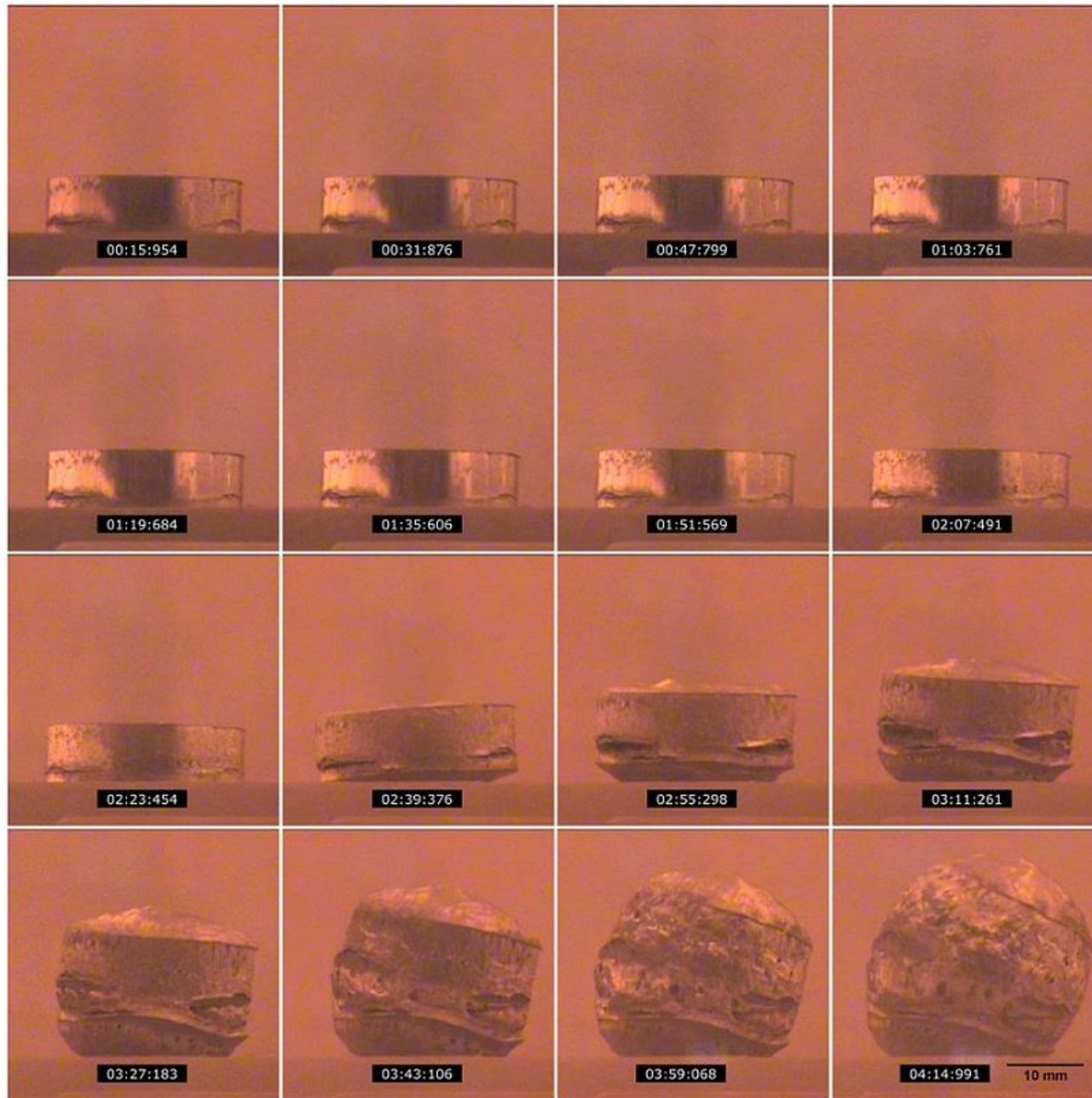
7.2.1 6 Αφροποίηση Δοκιμίου 6 (2 % Steel Flakes, 227 sec μέγιστη αφροποίηση)



7.2.17 Αφροποίηση Δοκιμίου 7 (5 % Steel Flakes, 250 sec μέγιστη αφροποίηση)



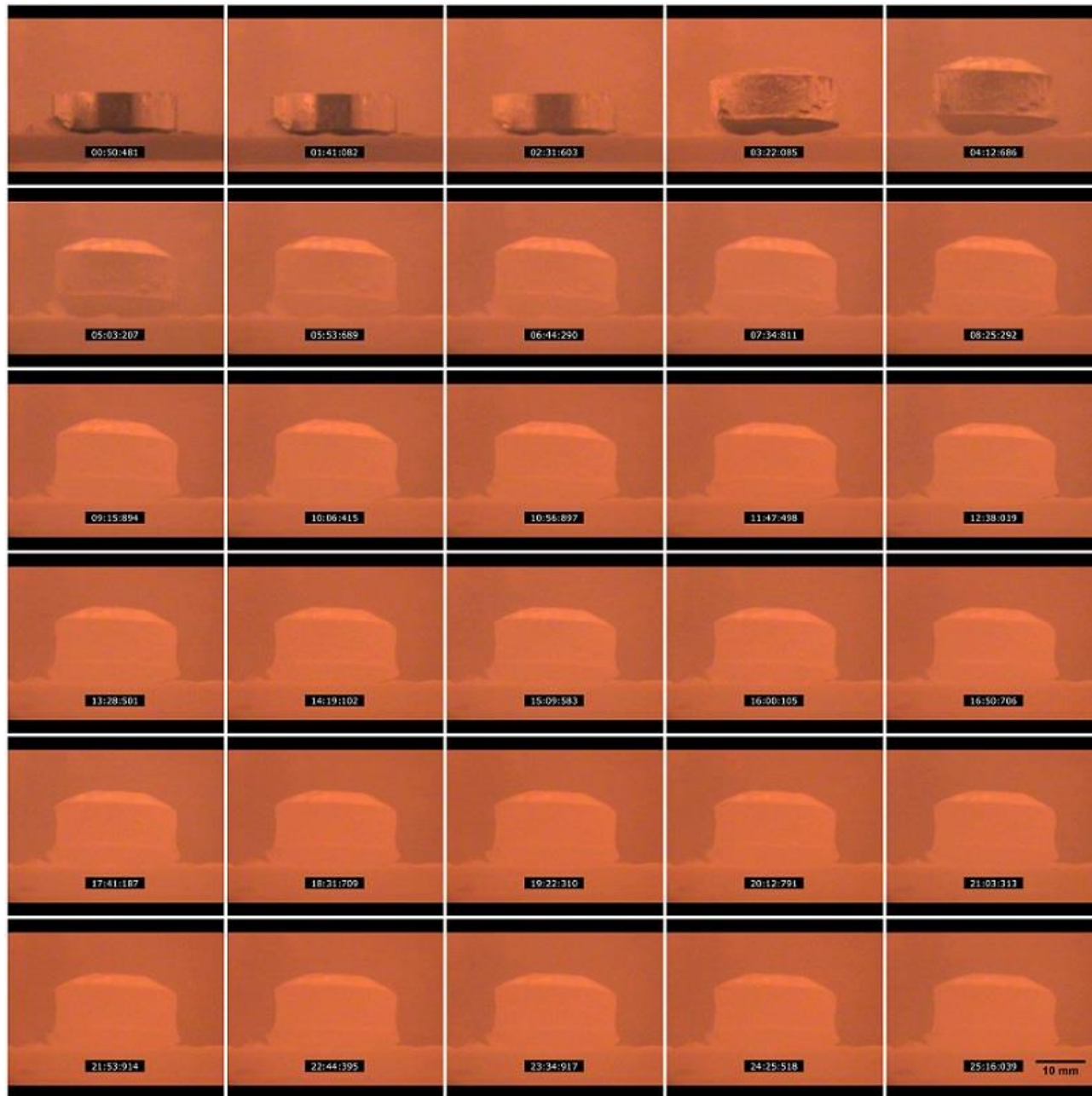
7.2.1.8 Αφροποίηση Δοκιμίου 8 (5 % Steel Flakes, 234 sec μέγιστη αφροποίηση)



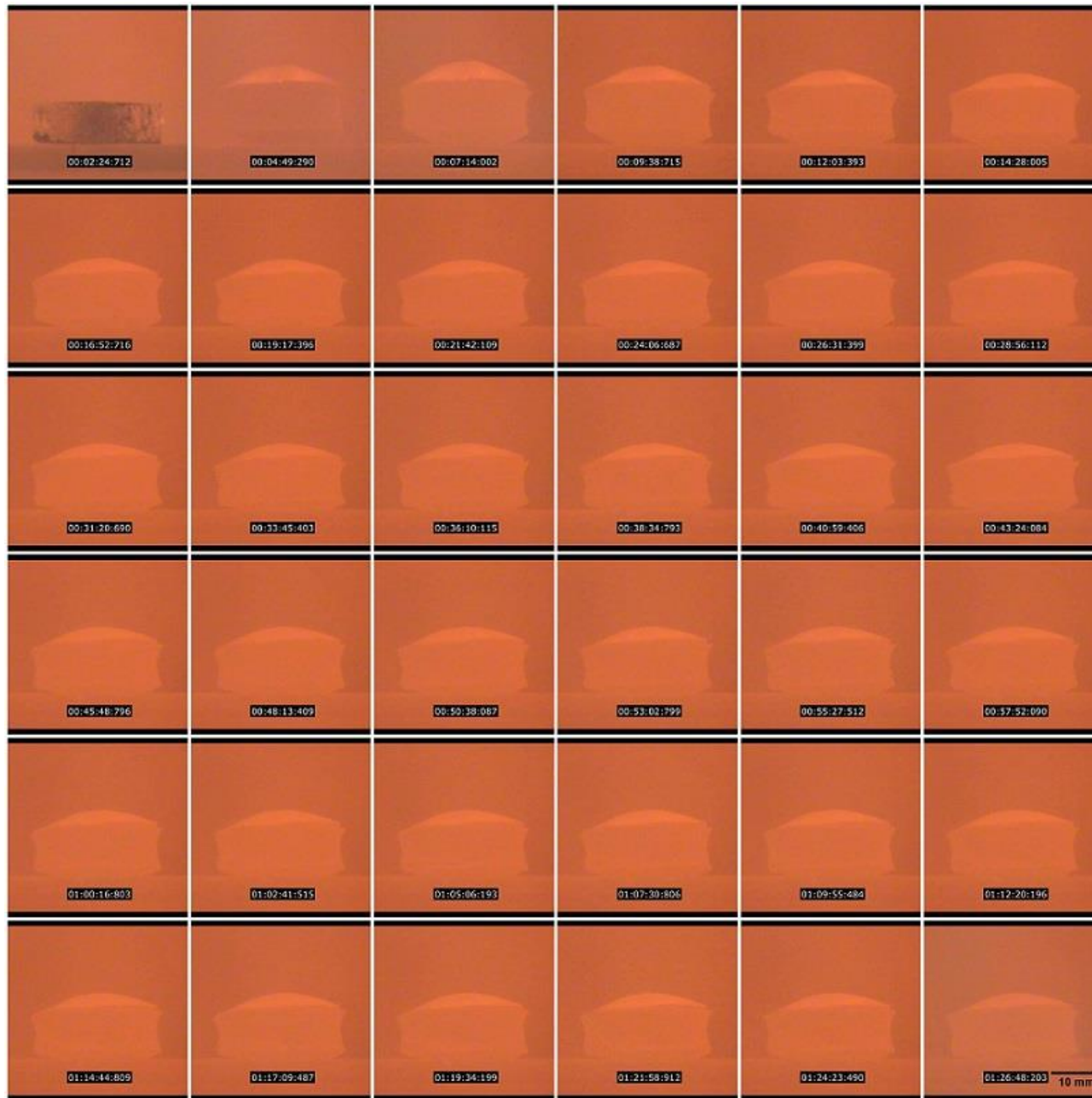
7.2.19 Αφροποίηση Δοκιμίου 9 (5 % Steel Flakes, 254 sec μέγιστη αφροποίηση)



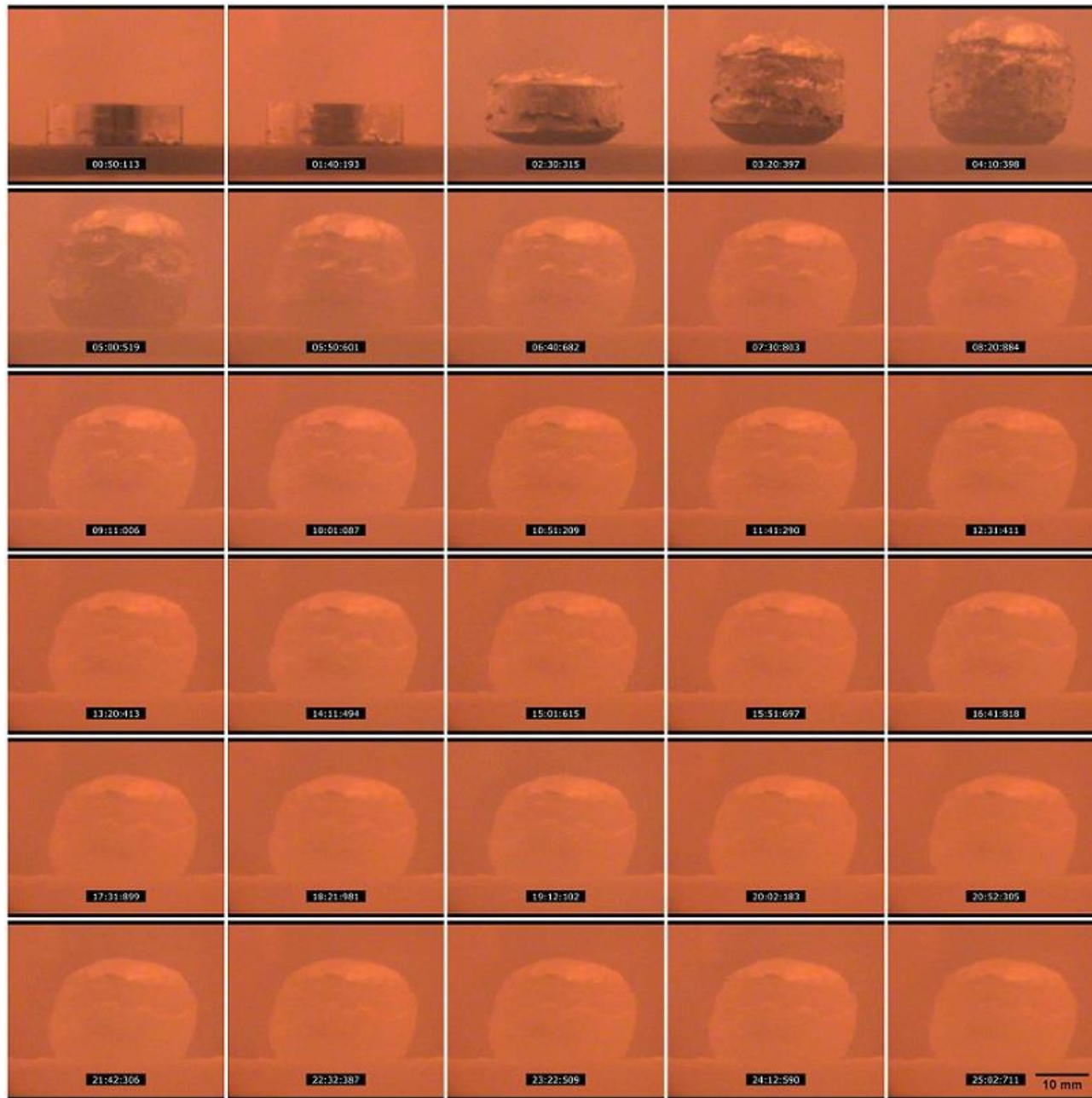
7.2.1 10 Αφροποίηση Δοκμίου 10 (10 % Steel Flakes)



7.2.1 11 Αφροποίηση Δοκιμίου 11 (10 % Steel Flakes)

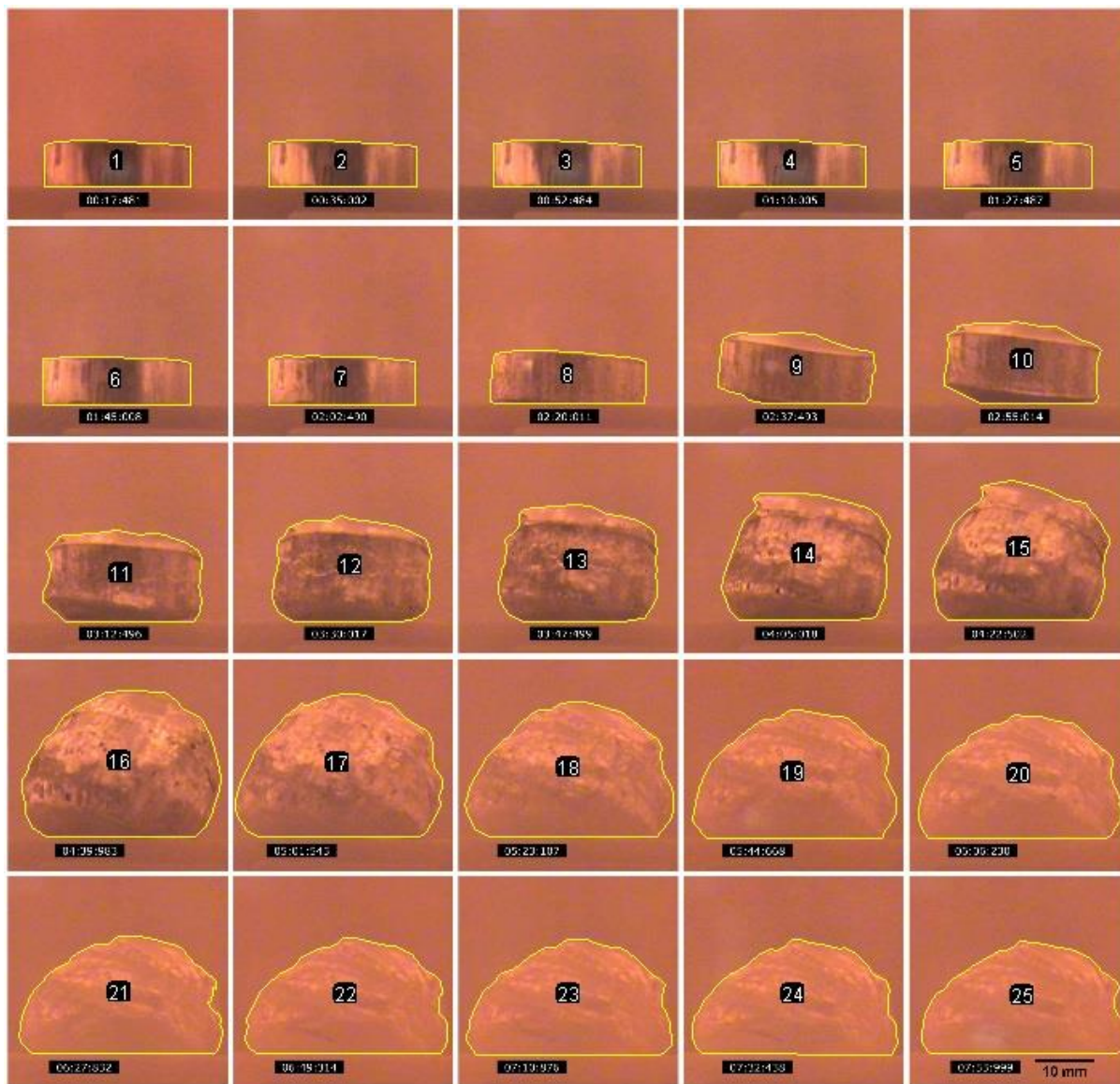


7.2.1 12 Αφροποίηση Δοκμίου 12 (10 % Steel Flakes)



7.2.1 13 Αφροποίηση Δοκιμίου 13 (8 % Steel Flakes)

Ακολουθως απεικονίζεται το παράδειγμα επιλογής των περιμέτρων των στιγμιότυπων, του πρώτου δοκιμίου για τον υπολογισμό των αντίστοιχων εμβαδών από την εφαρμογή Fiji, που αναφέρθηκε προηγουμένως. Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκε η διαδικασία αυτή και για τα άλλα δοκίμια.

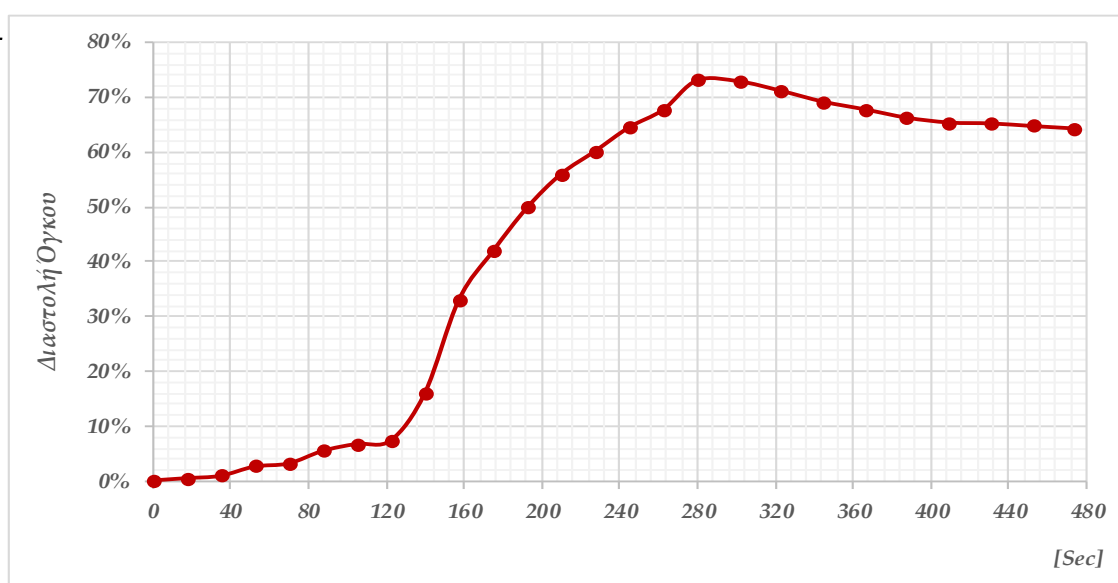


7.2.1 14 Δοκίμιο 1, επιλογή περιοχών για τον υπολογισμό των εμβαδών μέσω της εφαρμογής

Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται οι πίνακες με συγκεντρωμένα τα στοιχεία από τις προηγούμενες εικόνες, και την υπολογισμένη διαστολή του όγκου. Οι πίνακες συνοδεύονται από τα διαγράμματα διαστολής όγκου συναρτήσεως του χρόνου.

Πίνακας 7-1 Δοκίμιο 1 (0 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

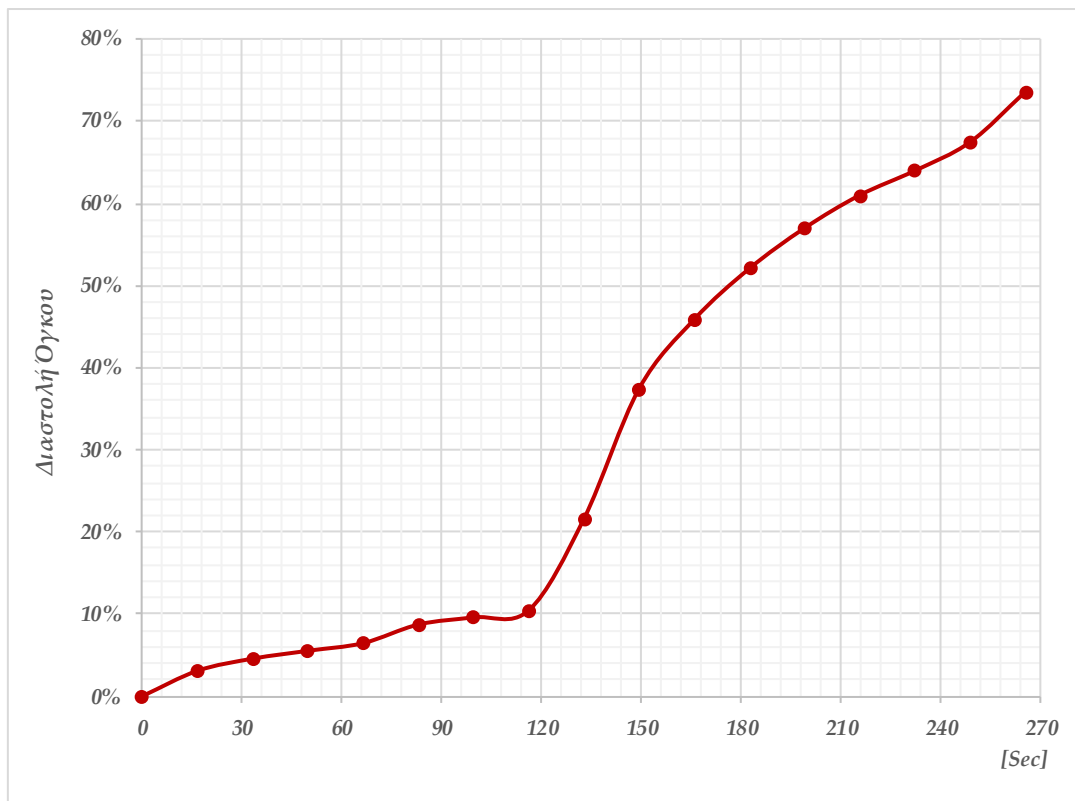
a/a Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	187,6	0,00%
1	17,5	188,4	0,42%
2	35,0	189,2	0,85%
3	52,5	192,5	2,55%
4	70,0	193,6	3,10%
5	87,5	198,3	5,40%
6	105,0	201,0	6,67%
7	122,5	202,4	7,31%
8	140,0	223,1	15,91%
9	157,5	279,8	32,95%
10	175,0	322,5	41,83%
11	192,5	373,3	49,75%
12	210,0	425,4	55,90%
13	227,5	470,0	60,09%
14	245,0	527,5	64,44%
15	262,5	579,6	67,63%
16	280,0	695,2	73,01%
17	301,6	689,9	72,81%
18	323,1	648,7	71,08%
19	344,7	607,3	69,11%
20	366,2	580,7	67,69%
21	387,8	554,7	66,18%
22	409,3	540,7	65,30%
23	430,9	538,1	65,14%
24	452,4	530,8	64,66%
25	474,0	524,2	64,21%



7-1 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 1 (0 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-2 Δοκίμο 2 (0 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Ογκου

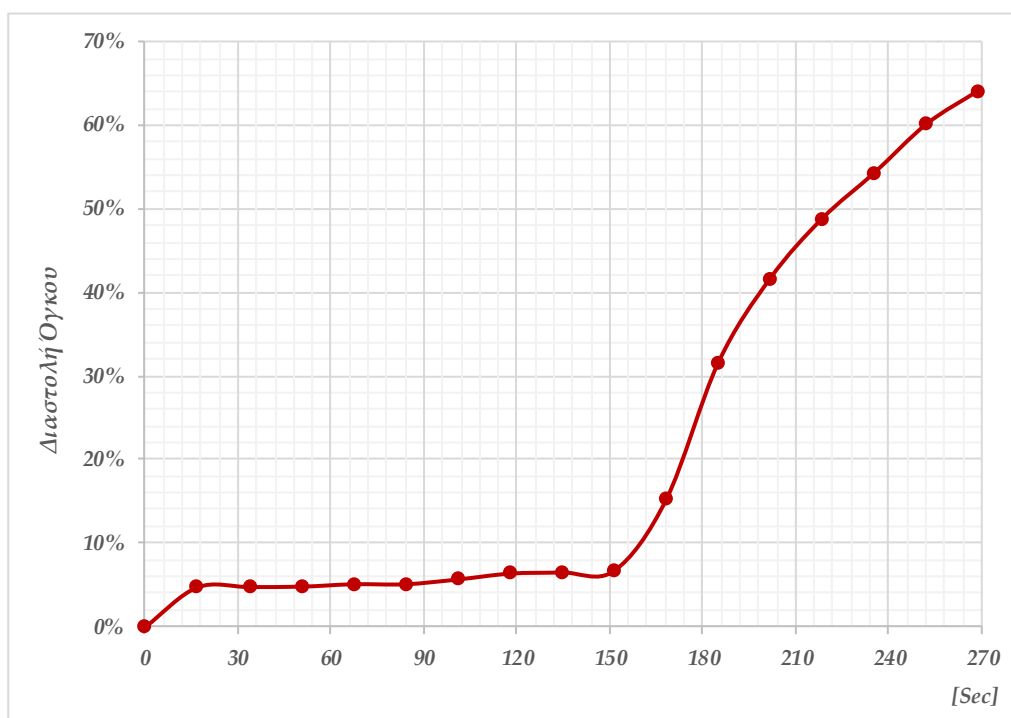
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	189,0	0,00%
1	16,6	195,0	3,08%
2	33,2	198,0	4,55%
3	49,8	200,0	5,50%
4	66,4	202,0	6,44%
5	83,0	207,0	8,70%
6	99,7	209,0	9,57%
7	116,3	211,0	10,43%
8	132,9	241,0	21,58%
9	149,5	302,0	37,42%
10	166,1	349,0	45,85%
11	182,7	394,0	52,03%
12	199,3	439,0	56,95%
13	215,9	484,0	60,95%
14	232,5	524,0	63,93%
15	249,1	580,0	67,41%
16	265,8	714,0	73,53%



7-2 Διάγραμμα Διαστολής Ογκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμο 2 (0 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-3 Δοκίμο 3 (0 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

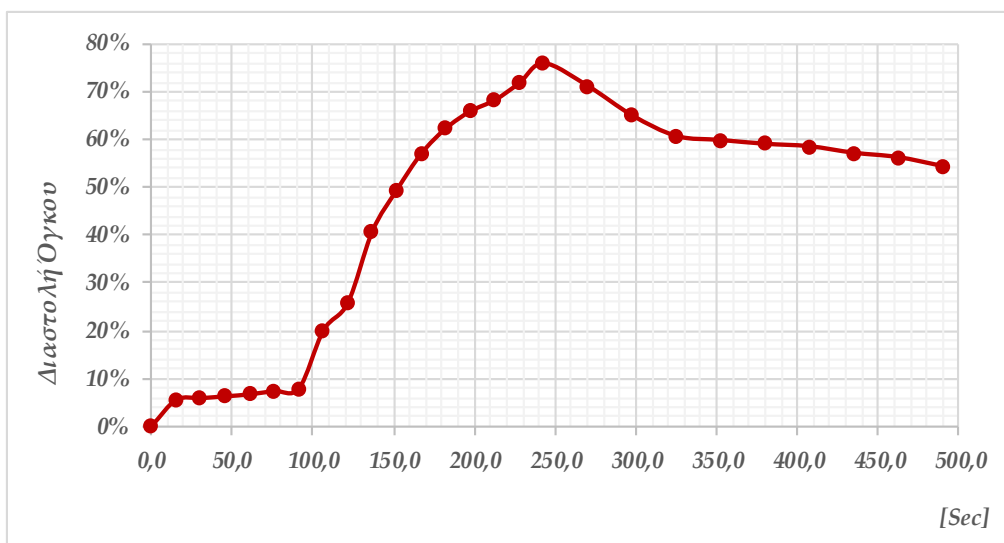
a/a Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	188,7	0,00%
1	16,8	198,1	4,74%
2	33,6	198,2	4,79%
3	50,4	198,3	4,84%
4	67,3	198,9	5,13%
5	84,1	198,9	5,13%
6	100,9	200,1	5,70%
7	117,7	201,6	6,40%
8	134,5	201,9	6,54%
9	151,3	202,3	6,72%
10	168,1	222,6	15,23%
11	184,9	275,9	31,61%
12	201,8	323,7	41,70%
13	218,6	369,0	48,86%
14	235,4	413,1	54,32%
15	252,2	473,4	60,14%
16	269,0	526,3	64,15%



7-3 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμο 3 (0 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-4 Δοκίμιο 4 (2 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Ογκου

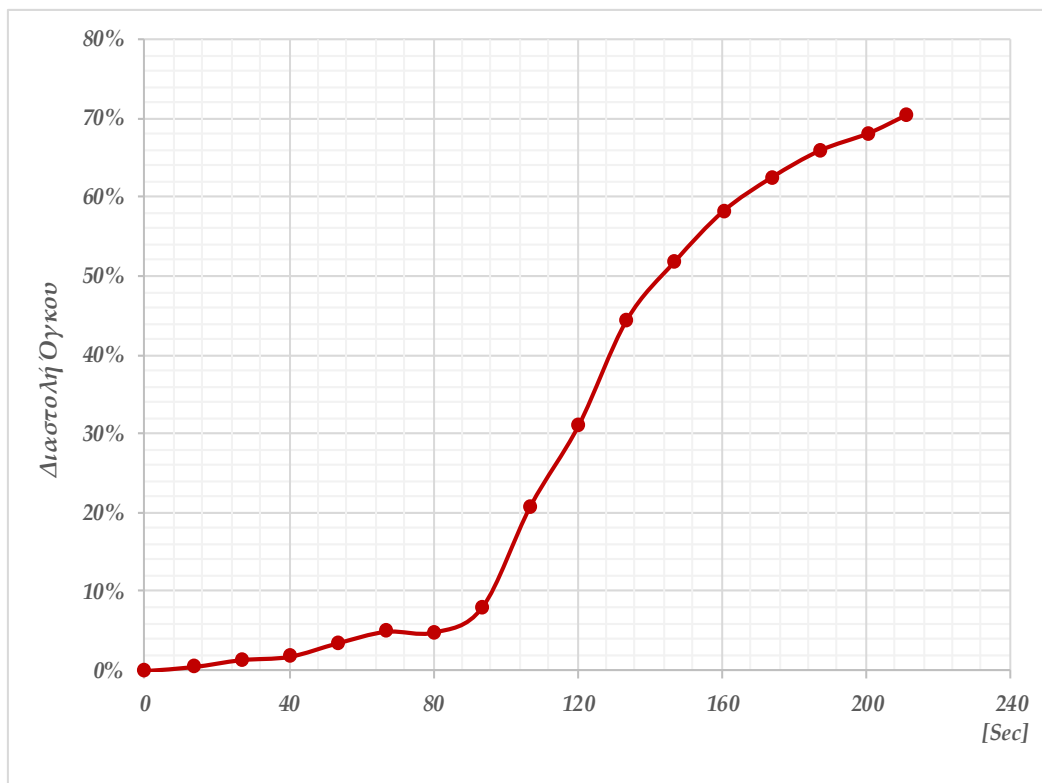
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	186,3	0,00%
1	15,2	196,9	5,40%
2	30,4	197,6	5,73%
3	45,6	198,4	6,11%
4	60,8	199,3	6,53%
5	75,9	200,8	7,23%
6	91,1	201,9	7,74%
7	106,3	232,6	19,92%
8	121,5	250,7	25,70%
9	136,7	314,0	40,68%
10	151,9	367,5	49,31%
11	167,1	432,4	56,92%
12	182,3	492,5	62,18%
13	197,4	544,0	65,76%
14	212,6	584,0	68,10%
15	227,8	657,6	71,67%
16	243,0	770,4	75,82%
17	270,4	643,1	71,03%
18	297,9	530,6	64,89%
19	325,3	472,6	60,58%
20	352,8	462,8	59,75%
21	380,2	453,9	58,96%
22	407,7	448,3	58,45%
23	435,1	434,1	57,09%
24	462,6	425,1	56,18%
25	490,0	407,9	54,33%



7-4 Διάγραμμα Διαστολής Ογκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 4 (2 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-5 Δοκίμιο 5 (2 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

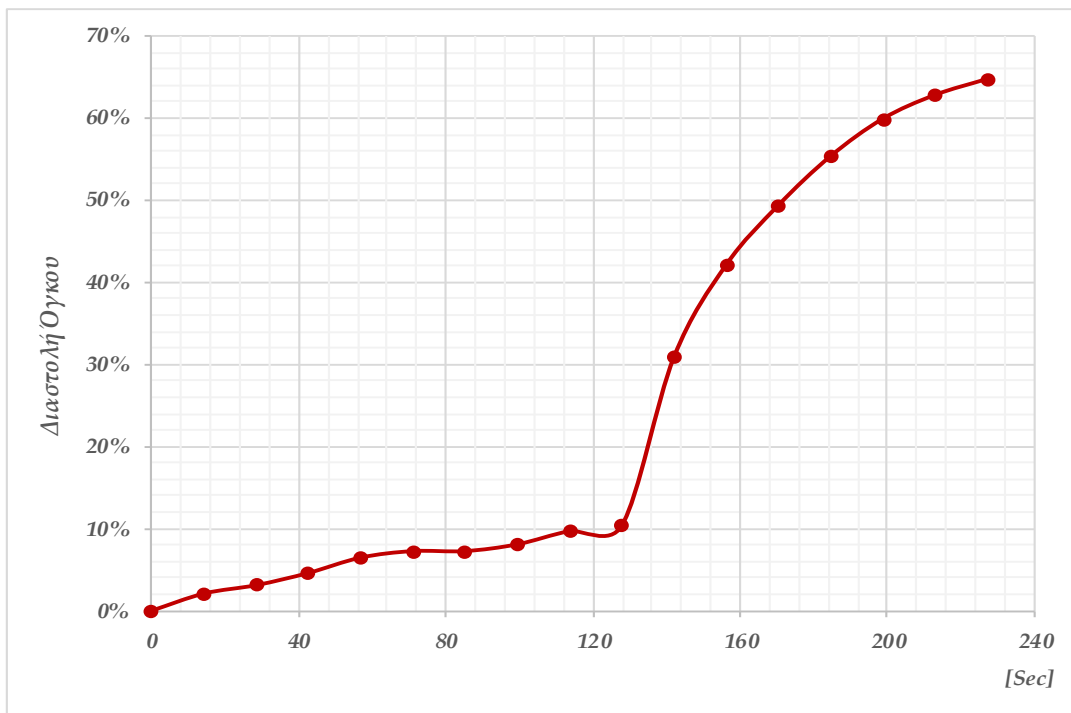
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	188,1	0,00%
1	13,4	189,0	0,50%
2	26,8	190,7	1,39%
3	40,1	191,5	1,80%
4	53,5	194,9	3,51%
5	66,9	197,9	4,98%
6	80,3	197,7	4,88%
7	93,6	204,5	8,04%
8	107,0	237,7	20,89%
9	120,4	273,1	31,14%
10	133,7	338,5	44,45%
11	147,1	391,0	51,91%
12	160,5	450,4	58,25%
13	173,9	501,7	62,52%
14	187,3	552,0	65,93%
15	200,6	589,3	68,09%
16	211,0	634,2	70,35%



7-5 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 5 (2 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-6 Δοκίμιο 6 (2 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Ογκου

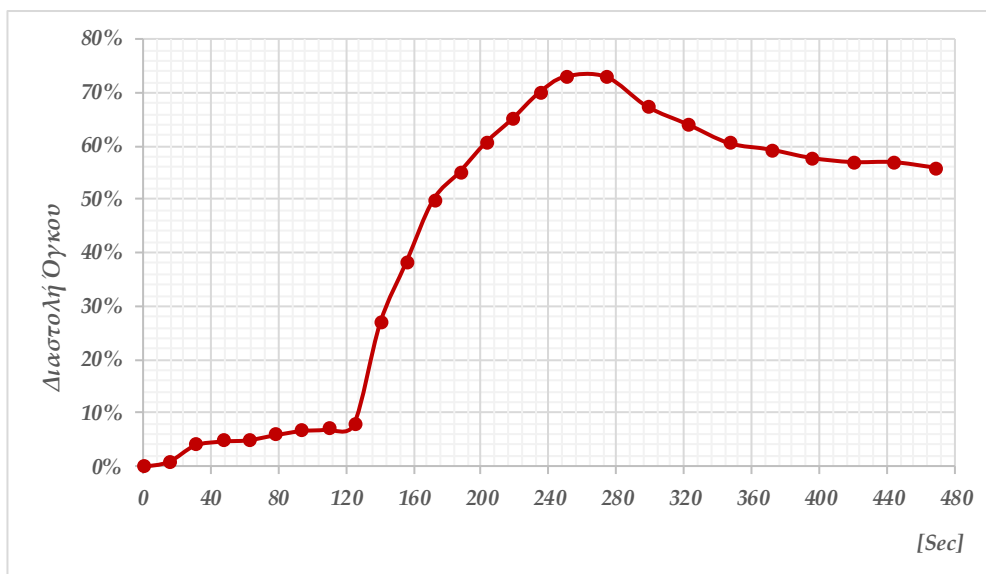
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	186,4	0,00%
1	14,2	190,4	2,07%
2	28,4	192,4	3,09%
3	42,6	195,4	4,58%
4	56,8	199,3	6,45%
5	71,0	201,0	7,24%
6	85,2	201,0	7,24%
7	99,4	202,8	8,06%
8	113,7	206,4	9,67%
9	127,9	207,9	10,32%
10	142,1	269,6	30,84%
11	156,3	321,9	42,08%
12	170,5	368,0	49,33%
13	184,7	417,3	55,32%
14	198,9	464,7	59,88%
15	213,1	501,0	62,78%
16	227,3	528,7	64,73%



7-6 Διάγραμμα Διαστολής Ογκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 6 (2 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-7 Δοκίμιο 7 (5 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

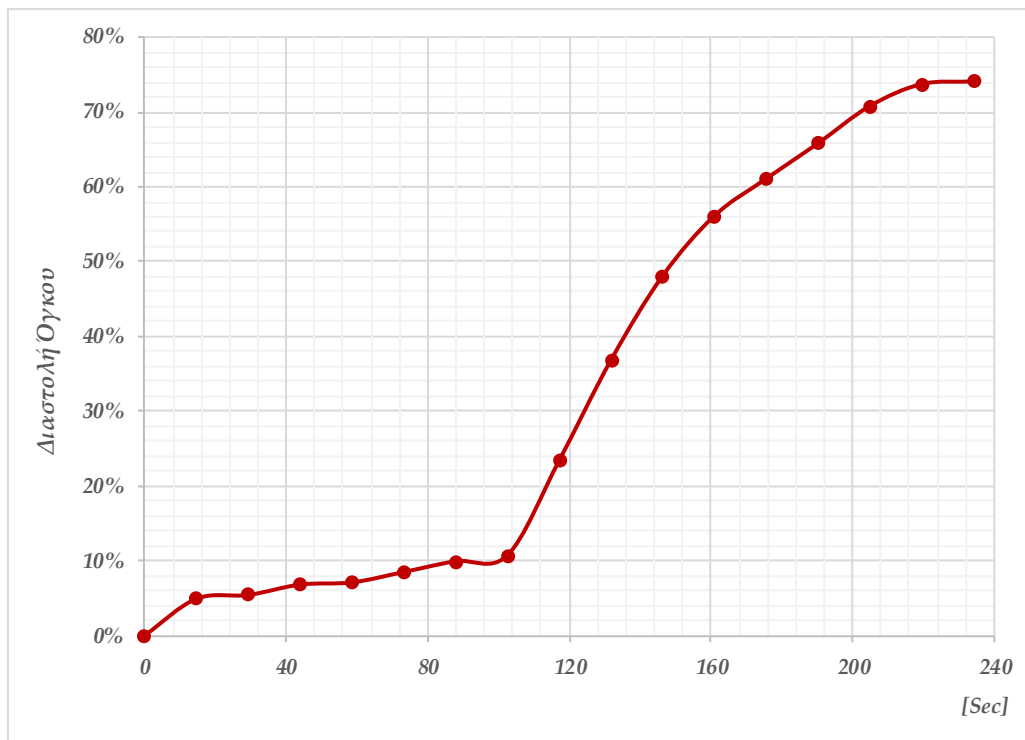
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	185,9	0,00%
1	15,6	187,6	0,93%
2	31,3	193,6	4,00%
3	46,9	195,1	4,74%
4	62,5	195,6	4,98%
5	78,1	197,5	5,90%
6	93,8	199,2	6,70%
7	109,4	199,8	6,98%
8	125,0	201,7	7,86%
9	140,6	254,0	26,83%
10	156,3	301,4	38,34%
11	171,9	370,1	49,78%
12	187,5	413,4	55,04%
13	203,1	471,6	60,59%
14	218,8	531,0	65,00%
15	234,4	616,0	69,83%
16	250,0	685,4	72,88%
17	274,2	684,5	72,85%
18	298,4	568,6	67,31%
19	322,7	515,6	63,95%
20	346,9	470,2	60,47%
21	371,1	456,5	59,29%
22	395,3	439,6	57,72%
23	419,6	431,6	56,94%
24	443,8	431,6	56,94%
25	468,0	421,8	55,94%



7-7 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 7 (5 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-8 Δοκίμο 8 (5 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Ογκου

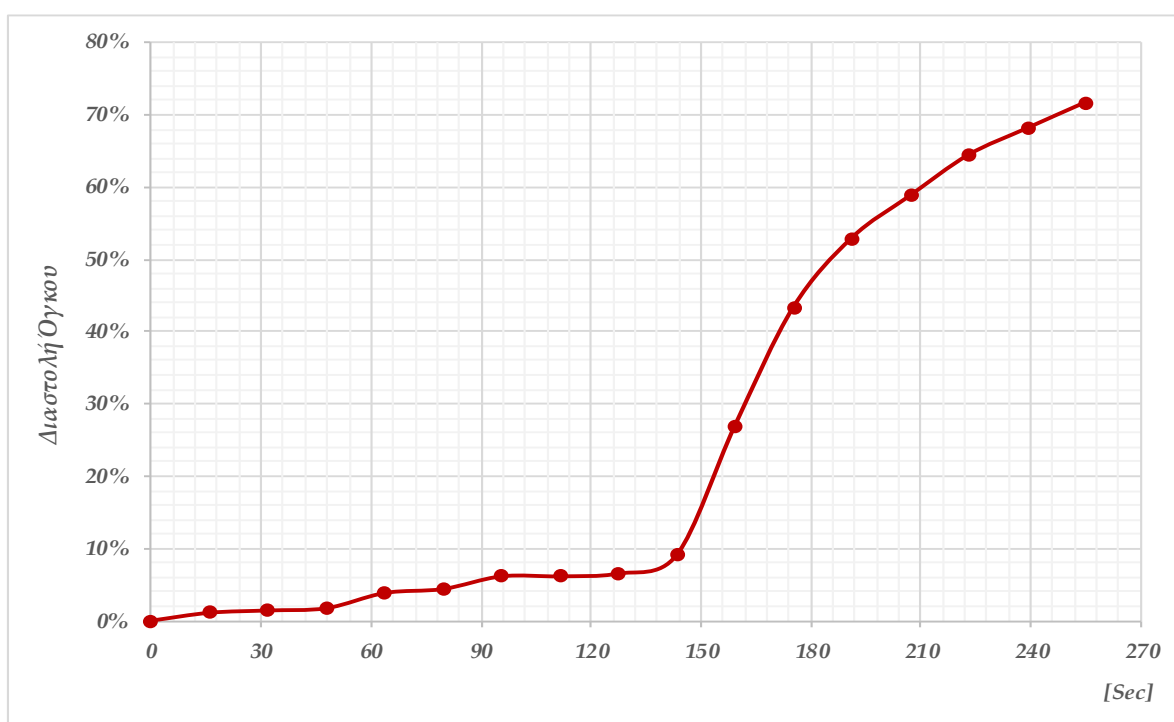
a/a Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	183,1	0,00%
1	14,7	192,5	4,90%
2	29,3	193,5	5,39%
3	44,0	196,4	6,79%
4	58,6	197,0	7,07%
5	73,3	200,0	8,46%
6	87,9	203,2	9,90%
7	102,6	205,0	10,70%
8	117,2	238,9	23,37%
9	131,9	289,7	36,81%
10	146,5	352,7	48,09%
11	161,2	417,3	56,13%
12	175,8	470,5	61,09%
13	190,5	535,6	65,82%
14	205,1	627,0	70,80%
15	219,8	697,2	73,74%
16	234,4	706,6	74,09%



7-8 Διάγραμμα Διαστολής Ογκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμο 8 (5 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-9 Δοκίμιο 9 (5 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

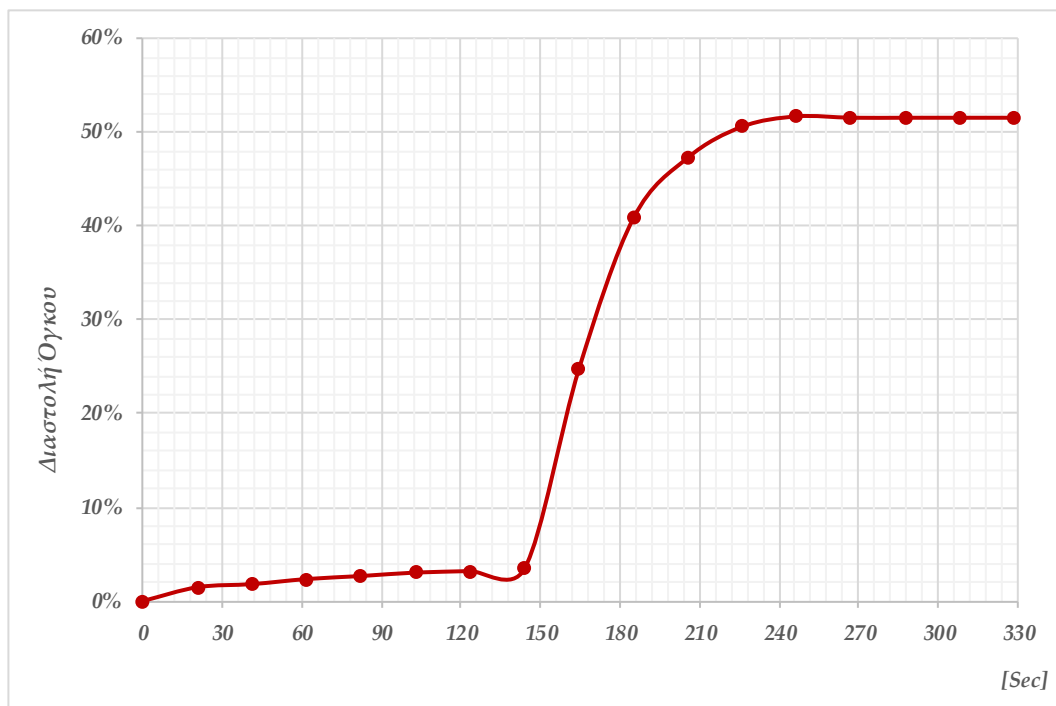
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	184,5	0,00%
1	15,9	186,5	1,09%
2	31,9	187,1	1,41%
3	47,8	187,7	1,72%
4	63,8	191,8	3,82%
5	79,7	192,9	4,37%
6	95,6	196,5	6,12%
7	111,6	196,5	6,12%
8	127,5	197,3	6,50%
9	143,4	202,8	9,04%
10	159,4	252,5	26,94%
11	175,3	325,4	43,31%
12	191,3	391,7	52,91%
13	207,2	447,3	58,76%
14	223,1	518,0	64,39%
15	239,1	577,7	68,07%
16	255,0	650,7	71,65%



7-9 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσεως του Χρόνου, Δοκίμιο 9 (5 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-10 Δοκίμιο 10 (10 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

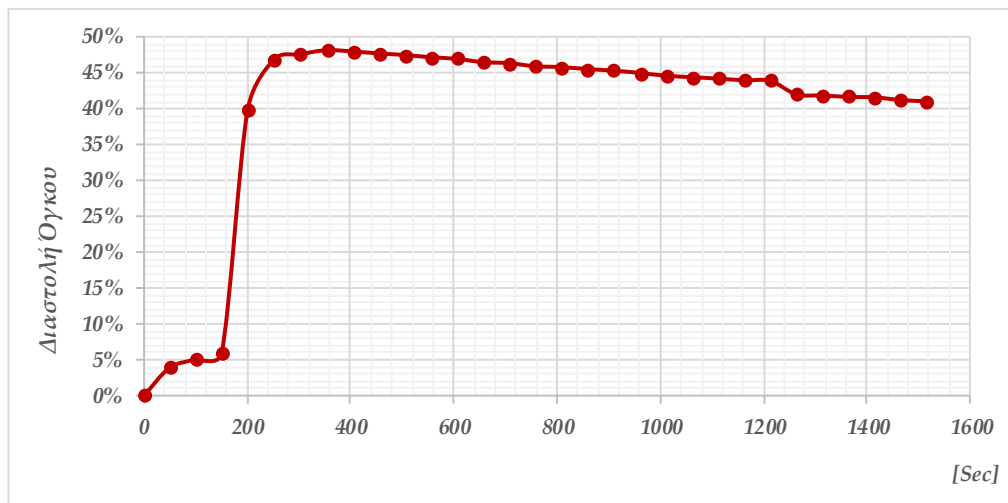
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	177,5	0,00%
1	20,5	180,1	1,46%
2	41,1	180,7	1,79%
3	61,6	181,7	2,33%
4	82,2	182,3	2,65%
5	102,7	183,0	3,02%
6	123,3	183,3	3,18%
7	143,8	183,8	3,45%
8	164,4	236,0	24,80%
9	184,9	300,2	40,88%
10	205,5	337,0	47,34%
11	226,0	359,6	50,65%
12	246,6	367,7	51,74%
13	267,1	366,6	51,59%
14	287,7	366,6	51,59%
15	308,2	366,6	51,59%
16	328,8	366,6	51,59%



7-10 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 10 (10 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-11 Δοκίμιο 11 (10 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

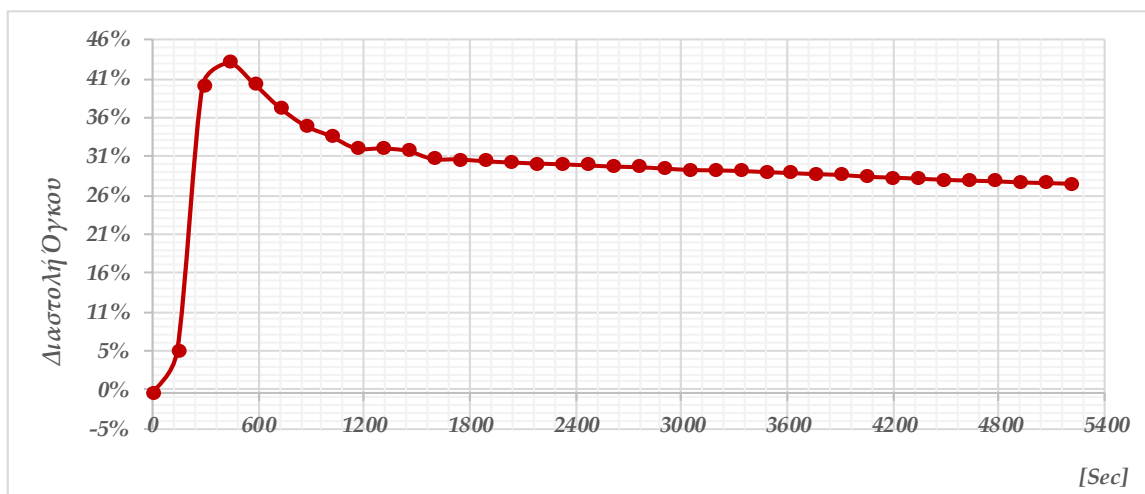
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	187,5	0,00%
1	50,5	195,2	3,94%
2	101,1	197,7	5,16%
3	151,6	199,4	5,97%
4	202,1	311,3	39,77%
5	252,7	351,8	46,70%
6	303,2	357,0	47,48%
7	353,7	360,9	48,05%
8	404,3	359,8	47,89%
9	454,8	357,9	47,61%
10	505,3	356,4	47,39%
11	555,9	354,3	47,08%
12	606,4	352,8	46,85%
13	656,9	349,8	46,40%
14	707,5	348,9	46,26%
15	758,0	346,1	45,82%
16	808,5	345,4	45,72%
17	859,1	343,6	45,43%
18	909,6	342,3	45,22%
19	960,1	340,3	44,90%
20	1010,7	337,9	44,51%
21	1061,2	336,7	44,31%
22	1111,7	335,5	44,11%
23	1162,3	334,1	43,88%
24	1212,8	333,6	43,79%
25	1263,3	322,9	41,93%
26	1313,9	322,0	41,77%
27	1364,4	320,9	41,57%
28	1414,9	320,6	41,52%
29	1465,5	318,5	41,13%
30	1516,0	317,6	40,96%



7-11 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 11 (10 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-12 Δοκίμιο 12 (10 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

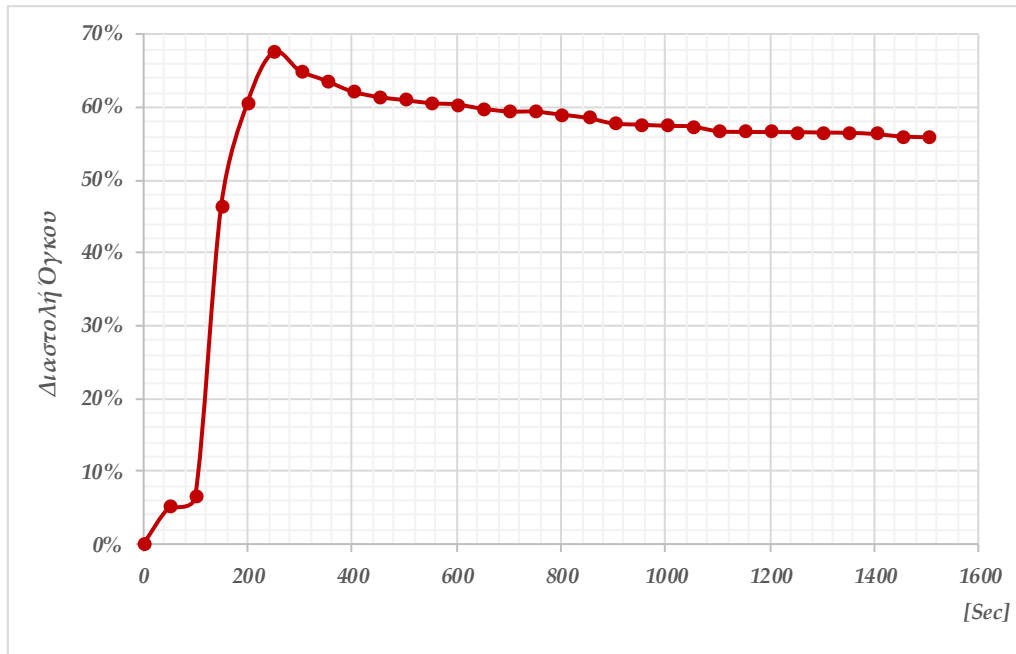
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	187,1	0,00%
1	144,7	197,9	5,46%
2	289,3	310,1	39,66%
3	434,0	325,8	42,57%
4	578,7	311,4	39,92%
5	723,4	296,3	36,85%
6	868,0	285,7	34,51%
7	1012,7	279,9	33,15%
8	1157,4	273,4	31,57%
9	1302,1	273,4	31,57%
10	1446,7	272,2	31,26%
11	1591,4	268,1	30,21%
12	1736,1	267,9	30,16%
13	1880,7	267,0	29,93%
14	2025,4	266,4	29,77%
15	2170,1	265,9	29,64%
16	2314,8	265,5	29,53%
17	2459,4	265,0	29,40%
18	2604,1	264,4	29,24%
19	2748,8	264,1	29,16%
20	2893,4	263,5	28,99%
21	3038,1	262,8	28,81%
22	3182,8	262,6	28,75%
23	3327,5	262,3	28,67%
24	3472,1	261,8	28,53%
25	3616,8	261,3	28,40%
26	3761,5	260,8	28,26%
27	3906,2	260,4	28,15%
28	4050,8	259,6	27,93%
29	4195,5	259,2	27,82%
30	4340,2	258,7	27,68%
31	4484,8	258,2	27,54%
32	4629,5	257,8	27,42%
33	4774,2	257,5	27,34%
34	4918,9	257,0	27,20%
35	5063,5	256,7	27,11%
36	5208,2	256,4	27,03%



7-12 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 12 (10 % Steel Flakes)

Πίνακας 7-13 Δοκίμιο 13 (8 % Steel Flakes), Στιγμιότυπα και Διαστολή Όγκου

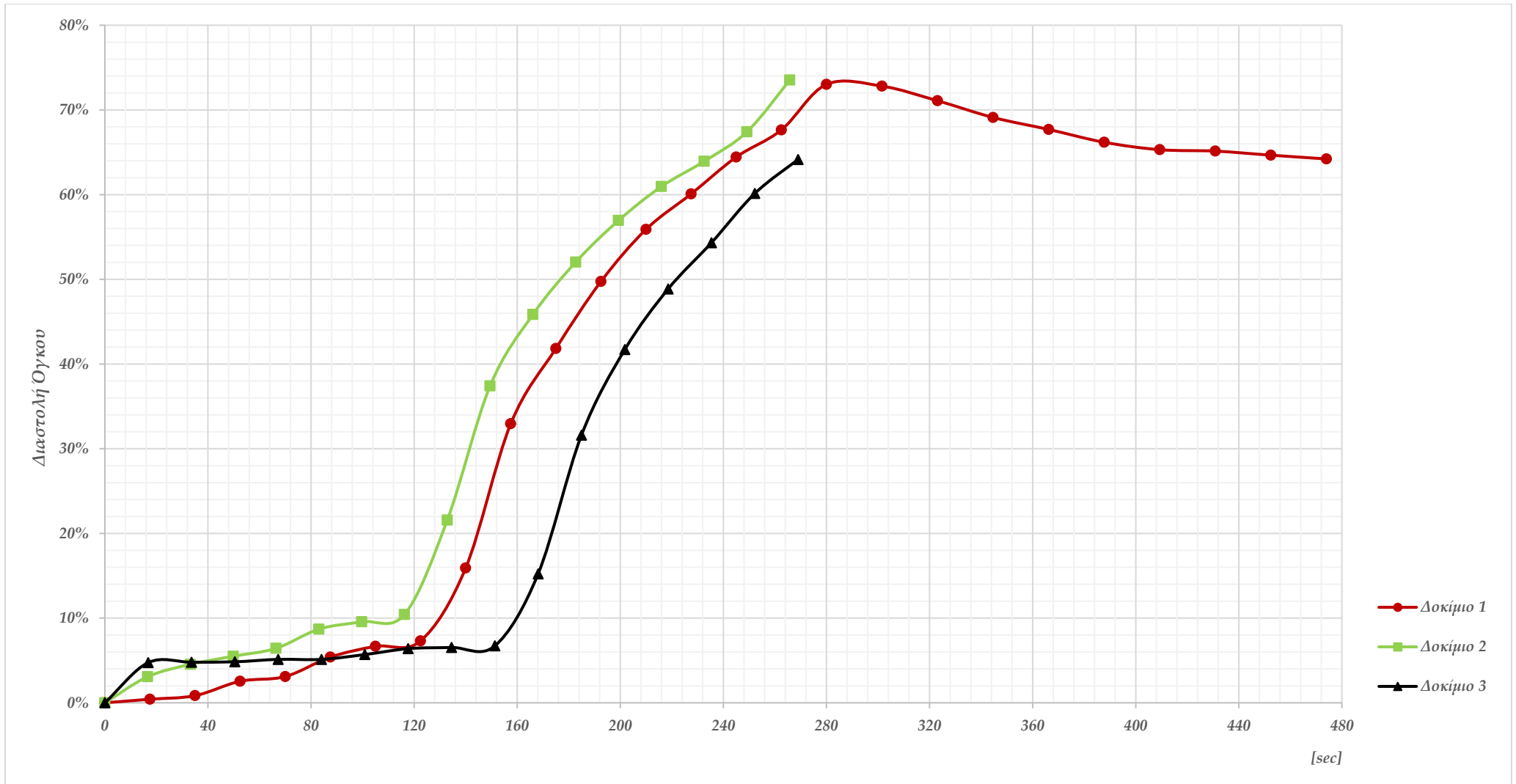
<i>a/a</i> Στιγμιότυπου	Χρόνος [sec]	Εμβαδό [mm ²]	Δ.Ο. [%]
#	0,0	183,6	0,00%
1	50,1	193,4	5,08%
2	100,2	196,4	6,53%
3	150,3	342,6	46,42%
4	200,4	465,1	60,53%
5	250,5	564,6	67,49%
6	300,5	524,1	64,97%
7	350,6	504,4	63,61%
8	400,7	484,7	62,13%
9	450,8	475,2	61,37%
10	500,9	470,1	60,95%
11	551,0	465,0	60,52%
12	601,1	462,9	60,34%
13	651,2	456,1	59,75%
14	701,3	451,9	59,38%
15	751,4	451,7	59,36%
16	801,4	447,1	58,94%
17	851,5	442,4	58,51%
18	901,6	434,3	57,73%
19	951,7	432,7	57,57%
20	1001,8	431,1	57,42%
21	1051,9	430,1	57,32%
22	1102,0	423,6	56,66%
23	1152,1	422,8	56,58%
24	1202,2	422,6	56,56%
25	1252,3	422,5	56,55%
26	1302,3	421,9	56,49%
27	1352,4	421,6	56,46%
28	1402,5	420,0	56,29%
29	1452,6	416,8	55,96%
30	1502,7	415,8	55,85%



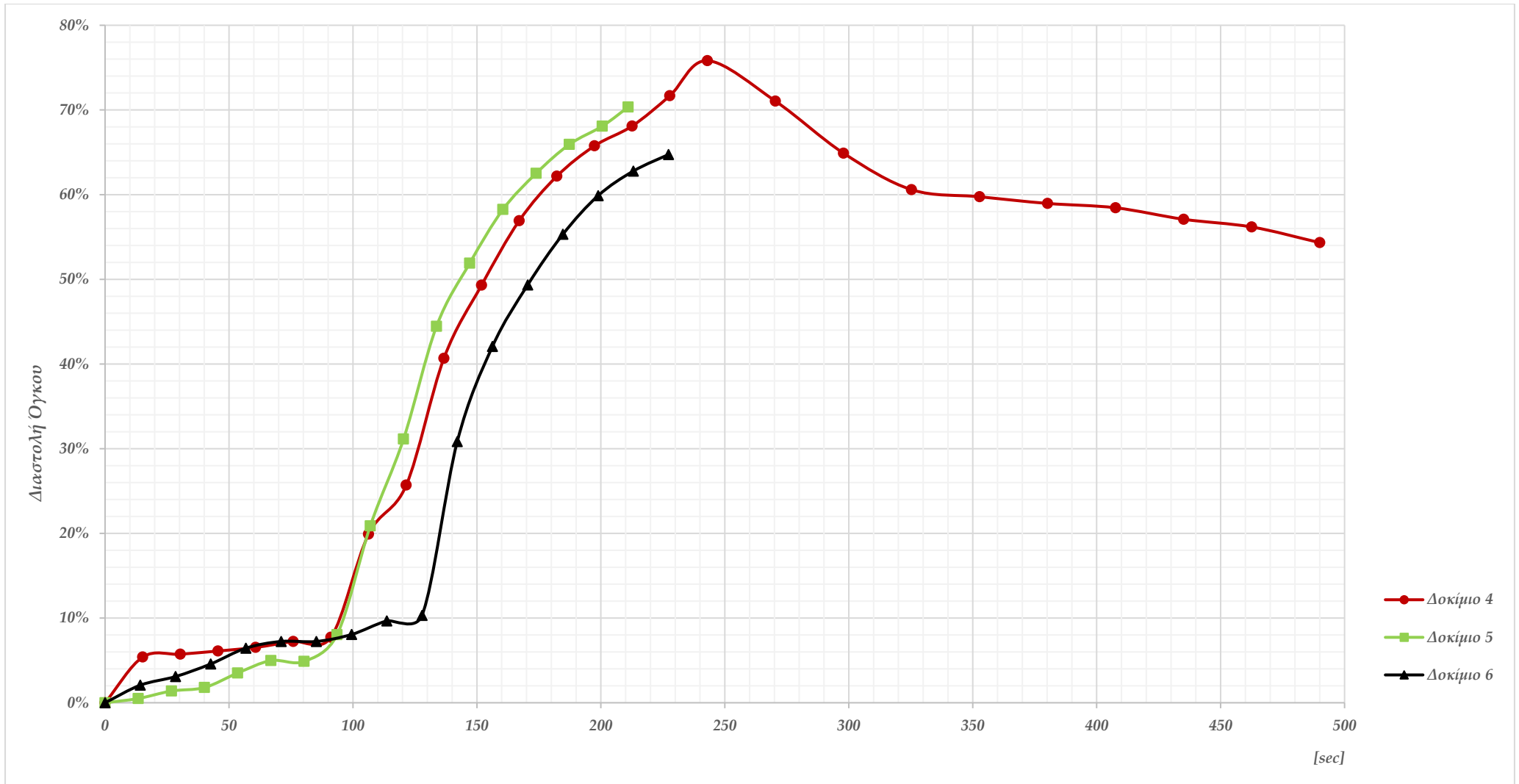
7-13 Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει του Χρόνου, Δοκίμιο 13 (8 % Steel Flakes)

Για να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα, δημιουργήθηκαν διαγράμματα τα οποία συγκρίνουν τη διαστολή όγκου διαφορετικών δοκιμίων. Έτσι ακολουθούν στις επόμενες σελίδες τα εξής διαγράμματα:

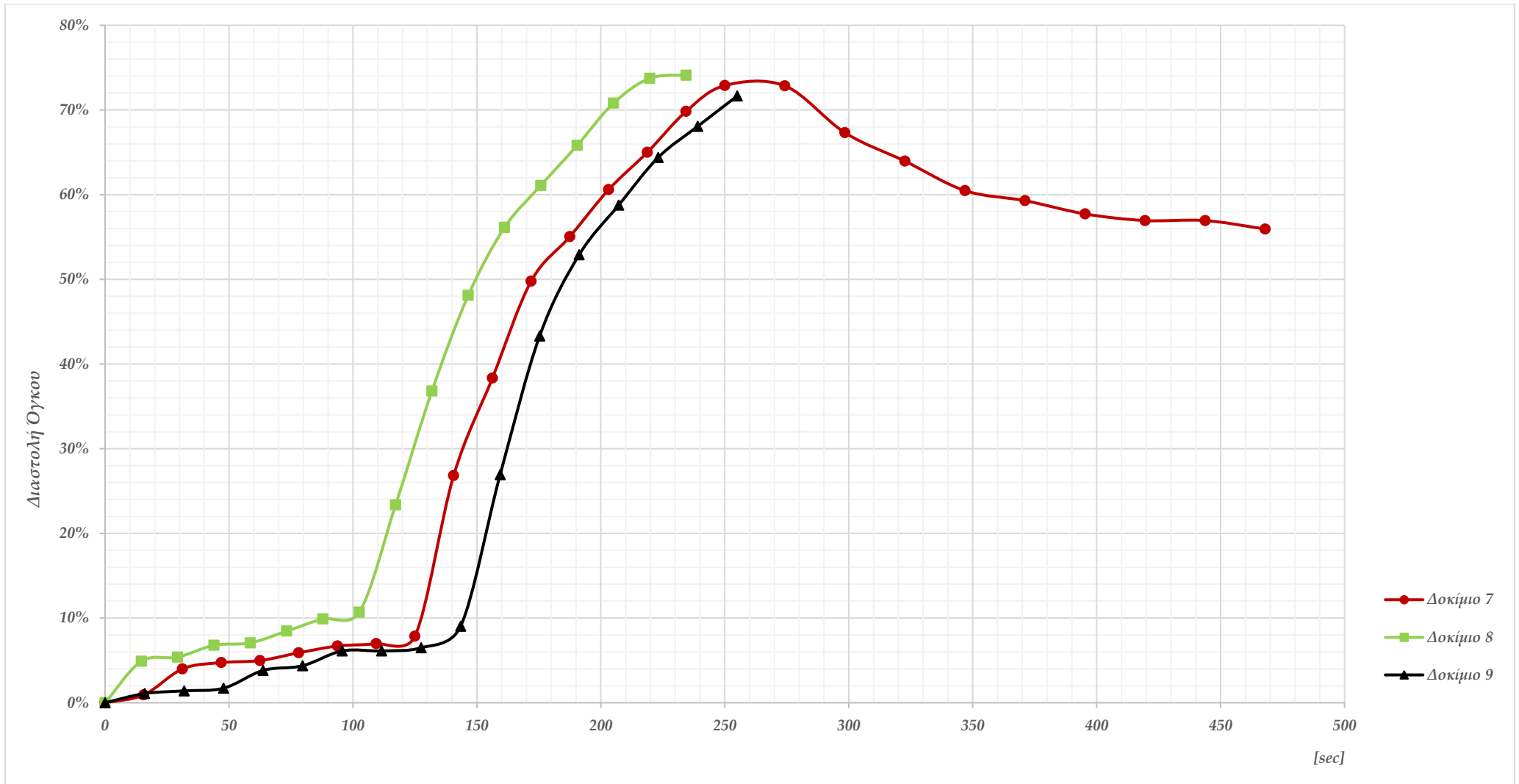
- i. Τέσσερα συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των δοκιμίων της ίδιας αναλογίας, για τις τέσσερις πρώτες αναλογίες,
- ii. τέσσερα συγκριτικά διαγράμματα, μεταξύ του πρώτου δοκιμίου της πρώτης αναλογίας, και των δοκιμίων μέγιστου χρόνου παραμονής στον επαγωγικό φούρνο, από τις άλλες τέσσερις αναλογίες (δοκίμια με τη μέγιστη παραμονή εντός του επαγωγικού φούρνου), και
- iii. ένα συγκεντρωτικό-συγκριτικό διάγραμμα των δοκιμίων με τον μέγιστο χρόνο παραμονής στον επαγωγικό φούρνο, από κάθε αναλογία.



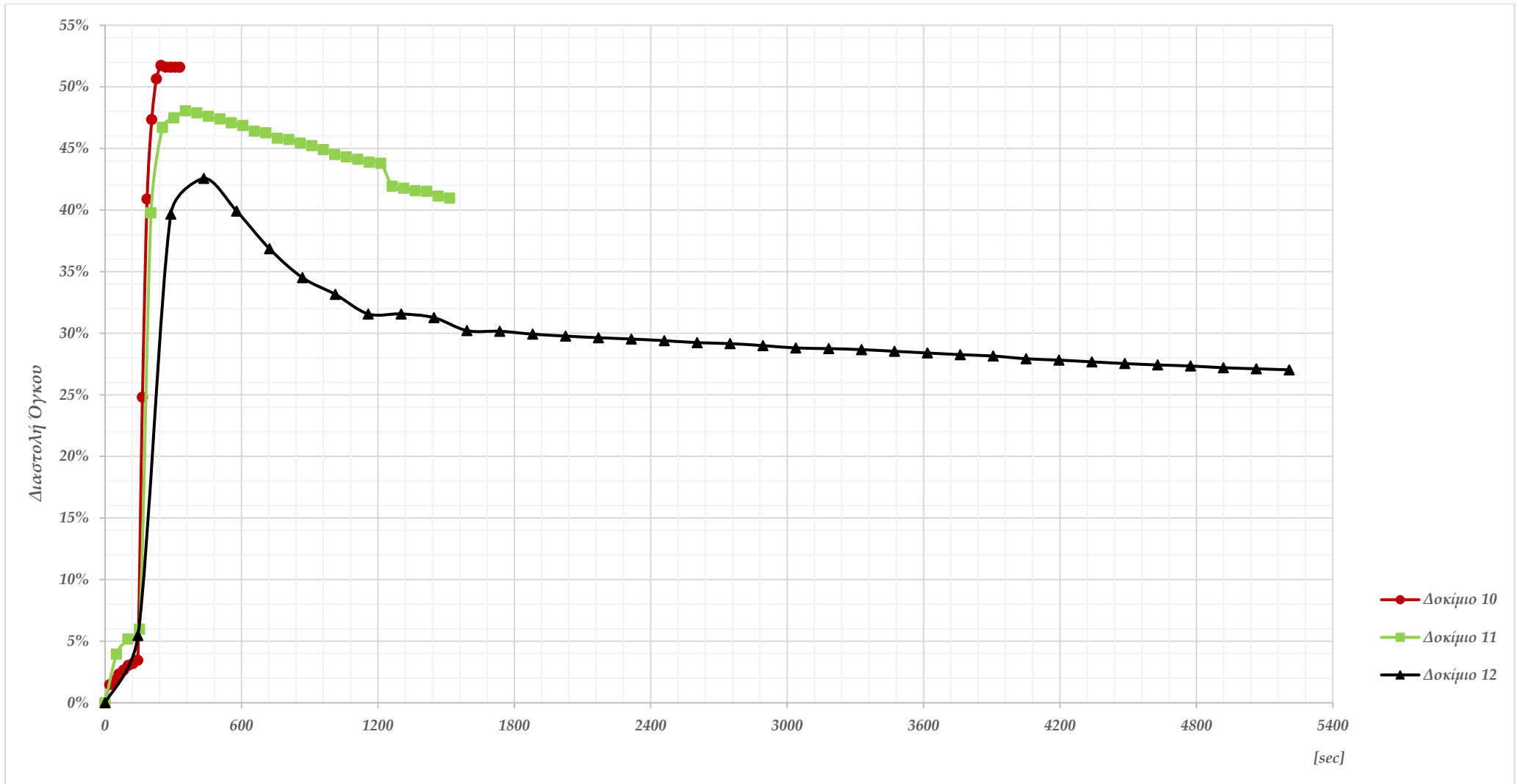
7-14 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Πρώτη (0 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμια 1, 2 και 3



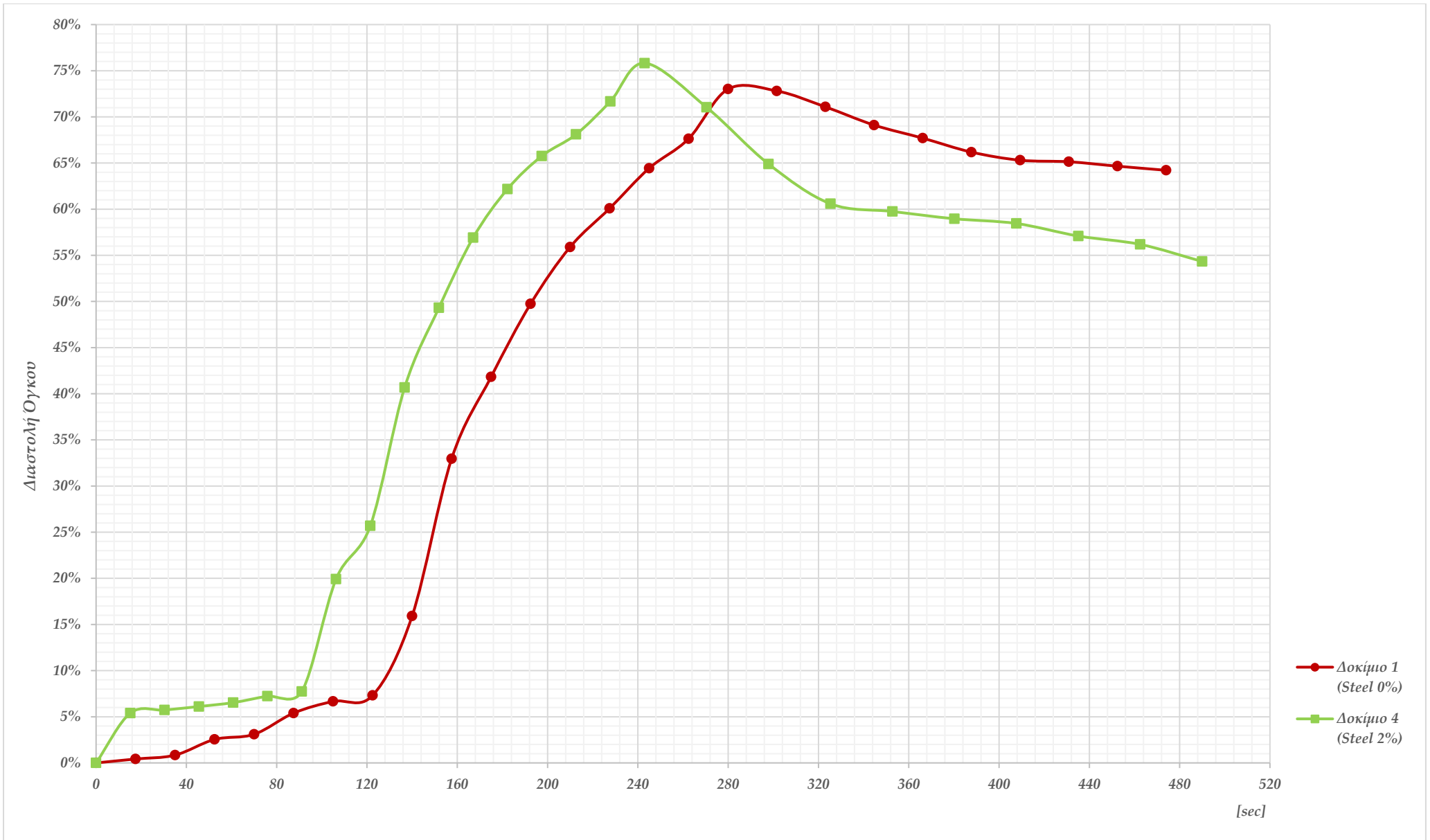
7-15 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Δεύτερη (2 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμο 4, 5 και 6



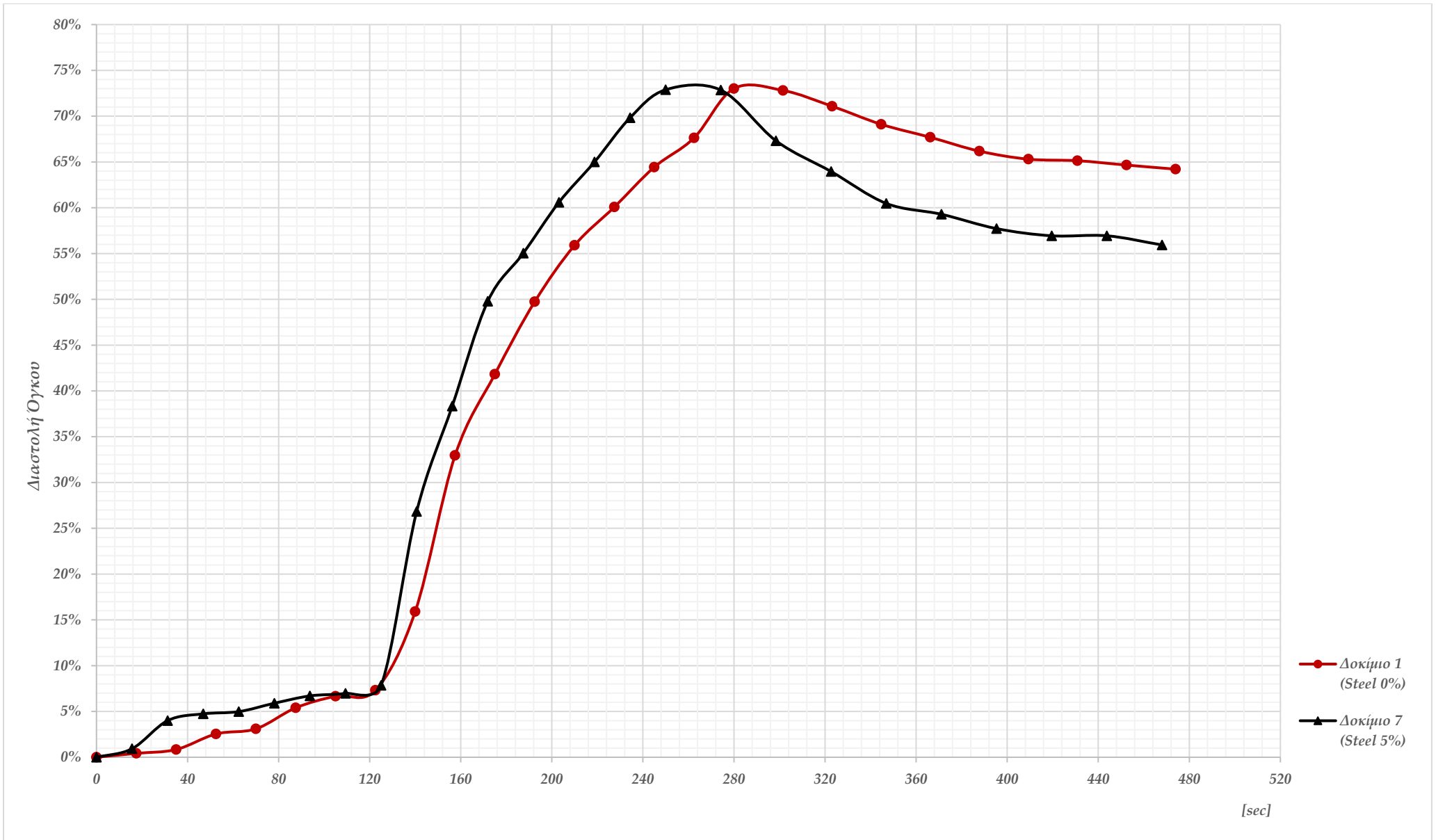
7-16 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Τρίτη (5 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμο 7, 8 και 9



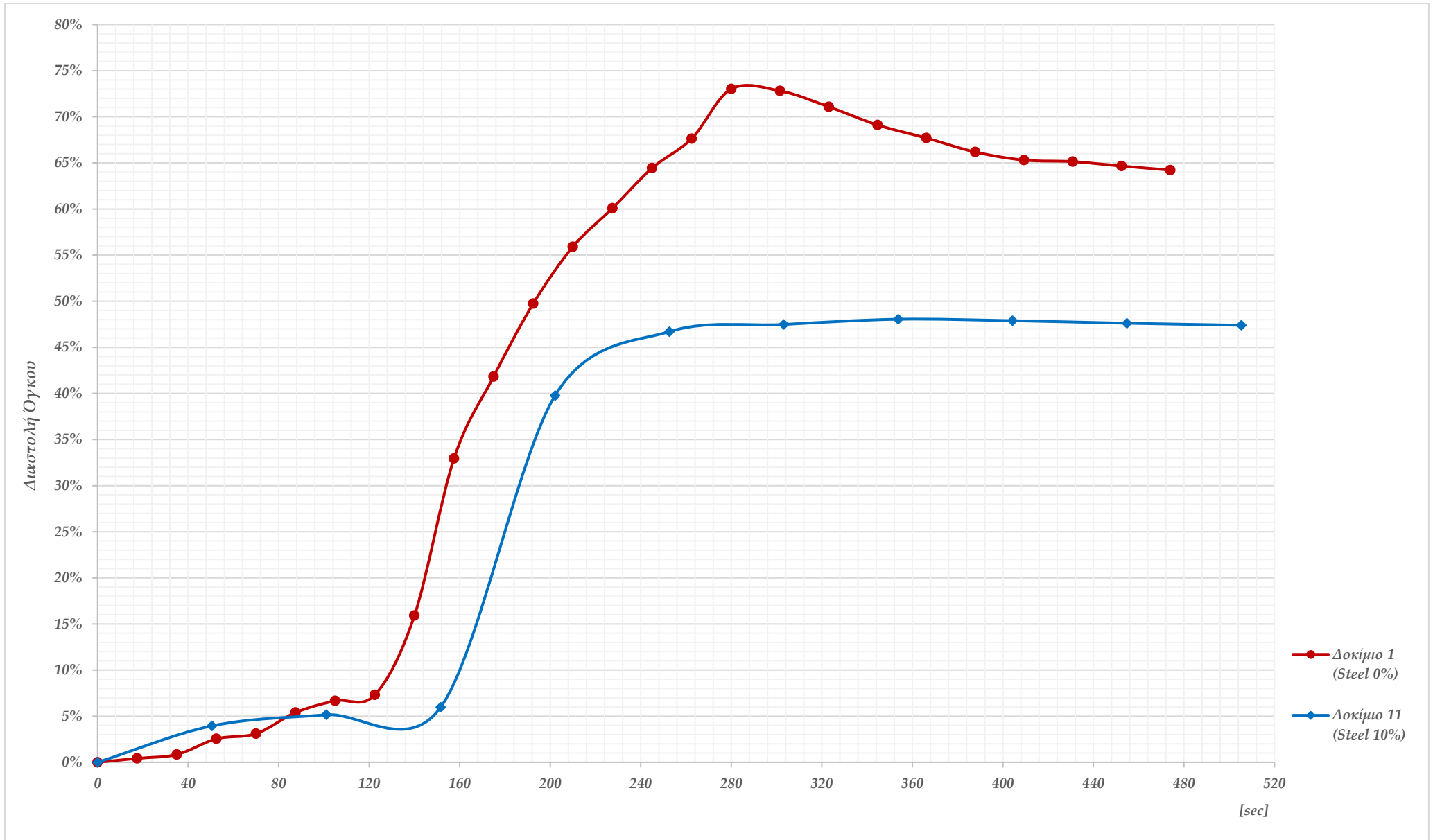
7-17 Διάγραμμα Διαστολής Όγκο συναρτήσει Χρόνου, Αναλογία Τέταρτη (10 % κ.β. Steel Flakes), Δοκίμια 10, 11 και 12



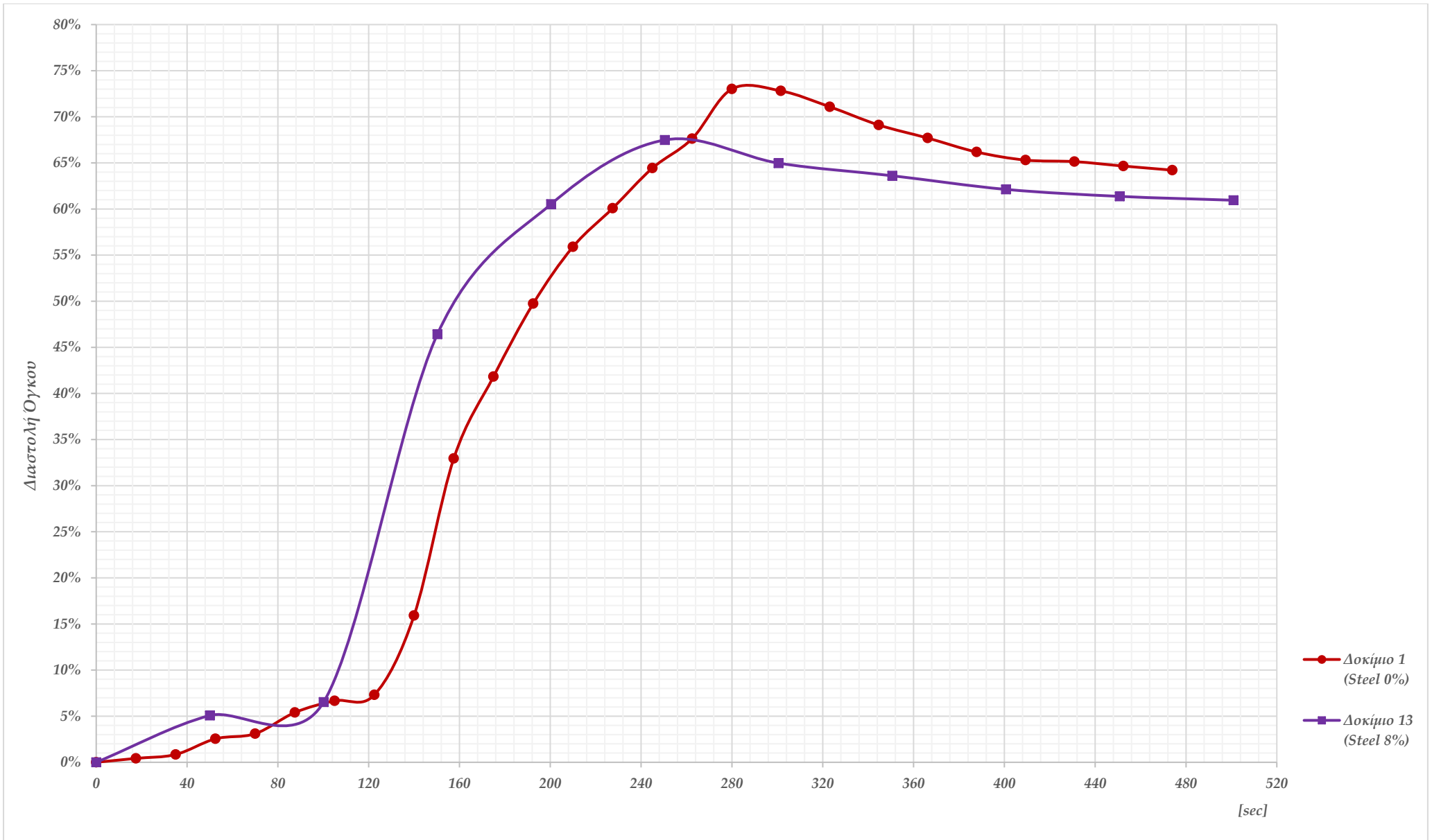
7-18 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0 %) και 4 (2 %)



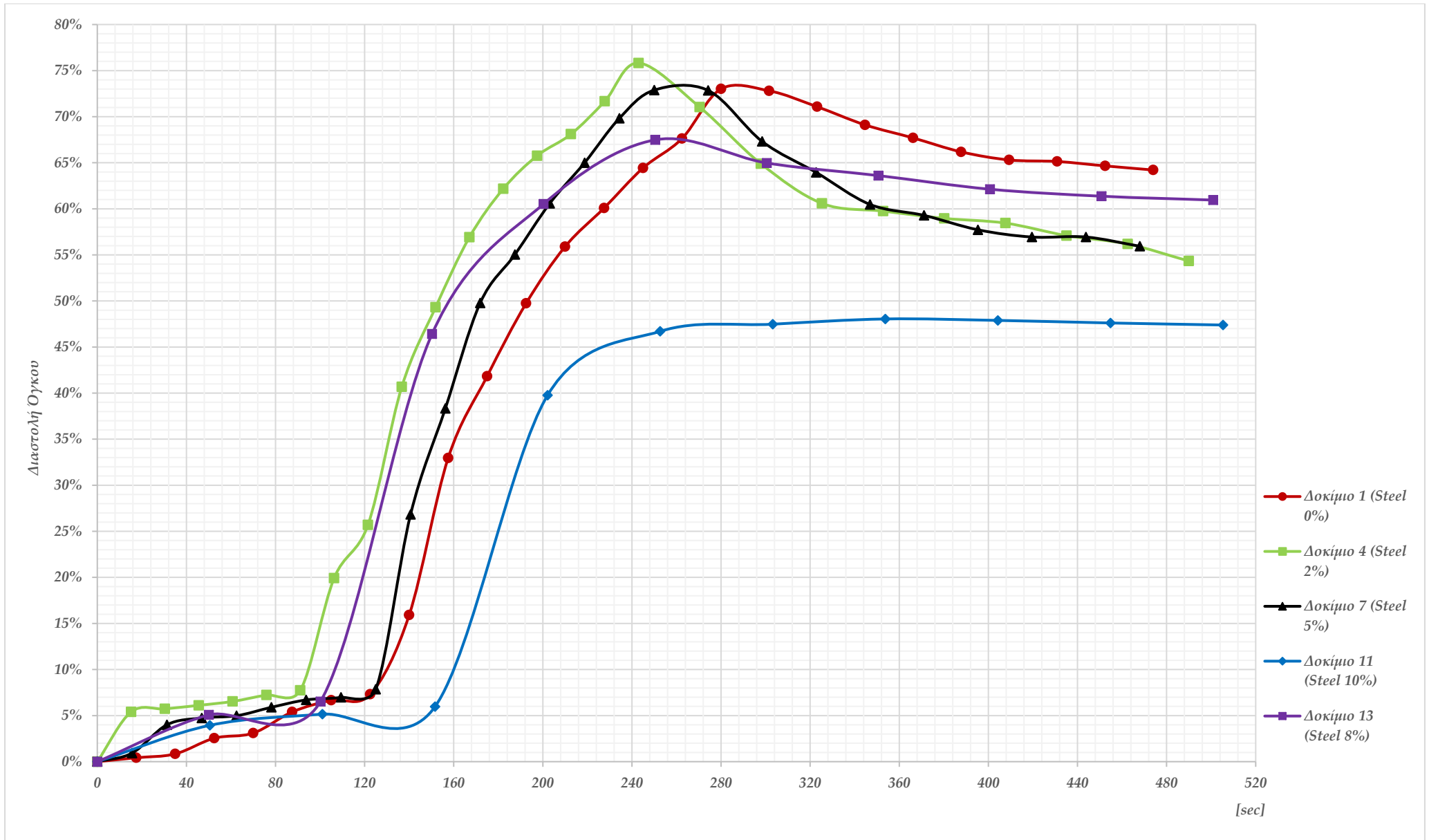
7-19 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Ογκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμιο 1 (0 %) και 7 (5 %)



7-20 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0 %) και 11 (10%)



7-21 Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Όγκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0%) και 13 (8%)



7-22 Συγκεντρωτικό Συγκριτικό Διάγραμμα Διαστολής Ογκου συναρτήσει Χρόνου, Δοκίμια 1 (0%), 4 (2%), 7 (5%), 11 (10%) και 13 (8%)

Από το διάγραμμα 7-17, φαίνεται πως τα δοκίμια αυτής της αναλογίας διαστέλλονται κατά 40 με 55 %. Αυτό βεβαίως είναι εκτός των ορίων αφροποίησης δοκιμίων με χρήση της μεθόδου κονιομεταλλουργίας με προσθήκη αφριστικού παράγοντα, που δίνει αύξηση όγκου 60 έως 85 %, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Έτσι δε μπορεί να θεωρηθεί πως αυτά τα δοκίμια έχουν αφροποιηθεί με την κλασσική έννοια της μεθόδου, και συμπεραίνεται πως η συγκεκριμένη αναλογία νιφάδων χάλυβα, εντός μίγματος κόνεων αλουμινίου και αφριστικού παράγοντα, δίνει άλλα προϊόντα που χρήζουν περαιτέρω μελέτης για να χαρακτηριστούν.

Από το διάγραμμα 7-18, φαίνεται πως η προσθήκη νιφάδων χάλυβα σε αναλογία 2 % κ.β., παράγει γρηγορότερα μεταλλικούς αφρούς, με περισσότερο πορώδες (διαστολή όγκου μεταξύ 65 με 75 %, όταν υπό τις ίδιες συνθήκες, τα δοκίμια χωρίς νιφάδες χάλυβα διαστέλλονται κατά 60 με 70 %). Επίσης η κατάρρευση των δοκιμίων γίνεται με πιο γρήγορο ρυθμό σε σχέση των αντίστοιχων χωρίς προσθήκη νιφάδων χάλυβα.

Στη συνέχεια, από το διάγραμμα 7-19 φαίνεται πως η αναλογία 5 % κ.β. δίνει παρόμοια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα δοκίμια της αναλογίας 2 % κ.β., αλλά το πορώδες έχει μικρότερη διακύμανση (70 με 75 %).

Από το διάγραμμα 7-13, φαίνεται, πως ενώ η μορφή του διαγράμματος μοιάζει με την αντίστοιχη των δοκιμίων της αναλογίας 10 % κ.β., ωστόσο το δοκίμιο της συγκεκριμένης αναλογίας έδωσε διαστολή όγκου κατά 68 %, που είναι εντός των ορίων αφροποίησης δοκιμίων με χρήση της μεθόδου κονιομεταλλουργίας με προσθήκη αφριστικού παράγοντα. Επίσης, από το διάγραμμα 7-21, φαίνεται πως στην συγκεκριμένη αναλογία πραγματοποιείται πιο ομαλή κατάρρευση του δοκιμίου. Τέλος, από το διάγραμμα 7-22 τα συμπεράσματα είναι συνολικά και αναφέρονται σε επόμενη παράγραφο.

7.2.2 Κοπή και ηλεκτροδιάβρωση των δοκιμίων

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δύο όψεις των 13 δοκιμίων, μετά από την κοπή τους στη δισκοτόμο του εργαστηρίου και την δημιουργία ομοιόμορφης επιφάνειας μέσω ηλεκτροδιάβρωσης EDM. Από τις εικόνες αυτές, παρέχεται η δυνατότητα παρακολούθησης της εσωτερικής τους δομής, της ποιότητας του πορώδους τους, καθώς και του μεγέθους των σχηματισμένων κυψελίδων τους. Τα δοκίμια 11, 12 και 13, δημιουργήθηκαν σε δεύτερο χρόνο και φωτογραφήθηκαν πριν την ηλεκτροδιάβρωση (εικόνες 7.2.2 11 έως 7.2.2 13).

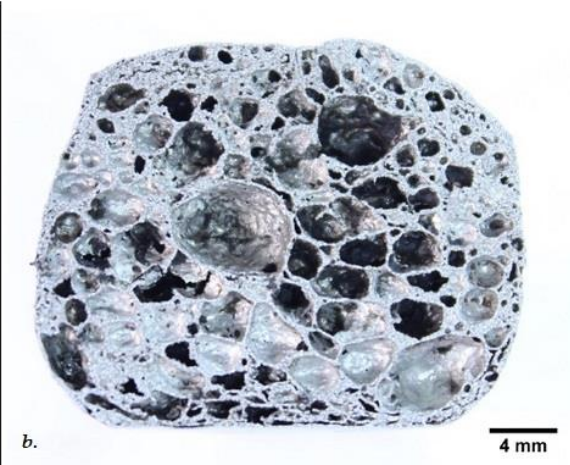
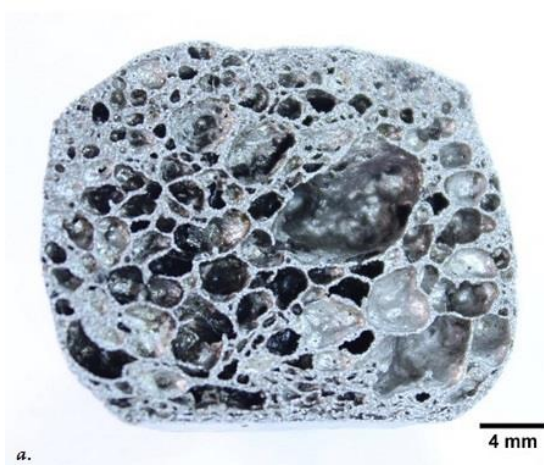
i. Πρώτη Αναλογία (κατά βάρος περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα 0 %) :



7.2.2 1 a. Α όψη, και b. Β όψη Δοκιμίου 1 (0 % κ.β. Steel Flakes)

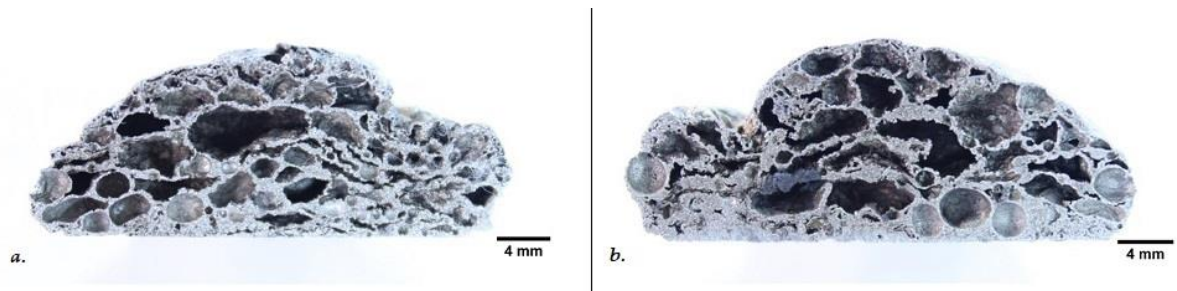


7.2.2 2 a. Α όψη, και b. Β όψη Δοκιμίου 2 (0 % κ.β. Steel Flakes)

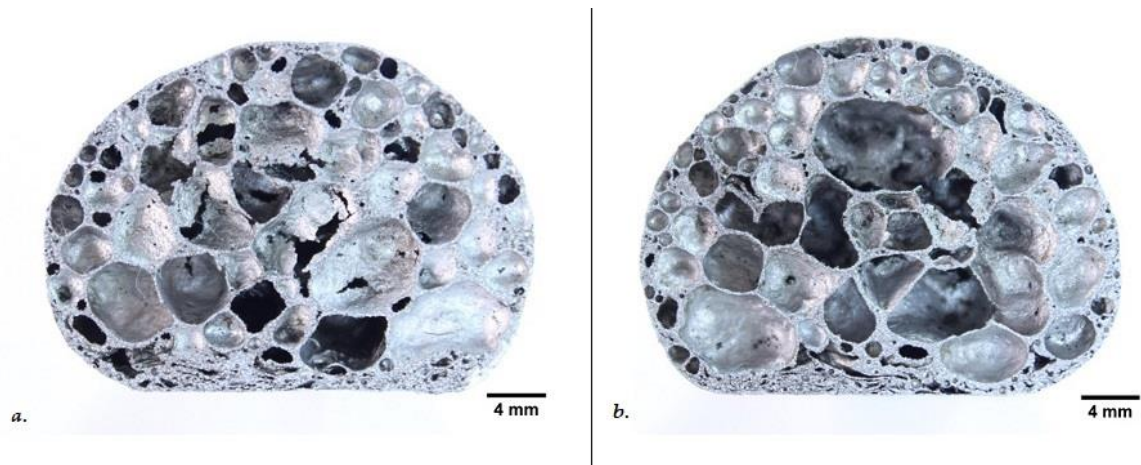


7.2.2 3 a. Α όψη, και b. Β όψη Δοκιμίου 3 (0 % κ.β. Steel Flakes)

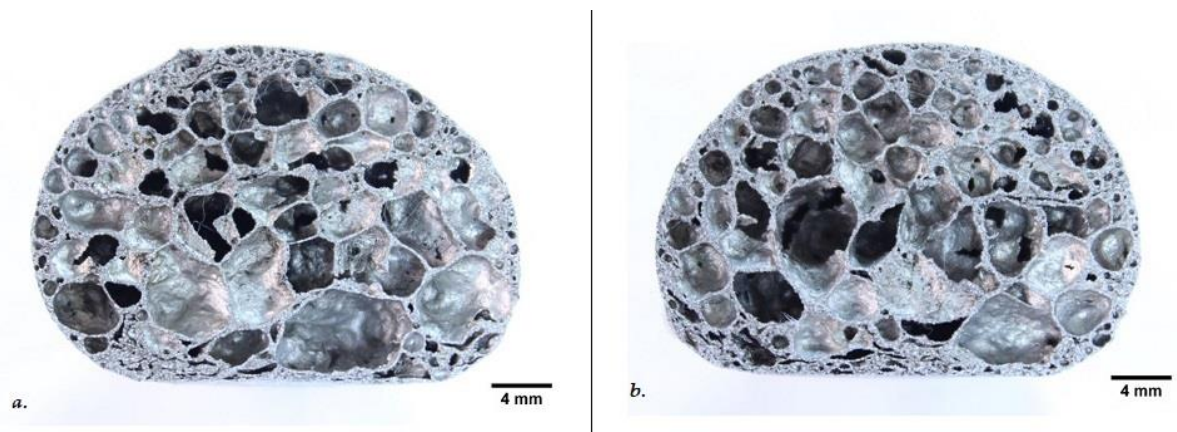
ii. Δεύτερη Αναλογία (κατά βάρος περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα 2 %) :



7.2.2 4 *a.* Α όψη, και *b.* Β όψη Δοκιμίου 4 (2 % κ.β. Steel Flakes)

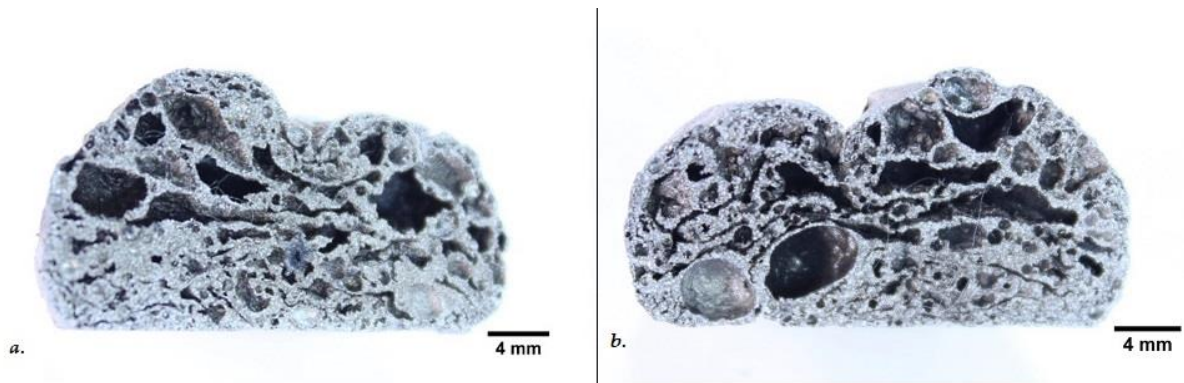


7.2.2 5 *a.* Α όψη, και *b.* Β όψη Δοκιμίου 5 (2 % κ.β. Steel Flakes)

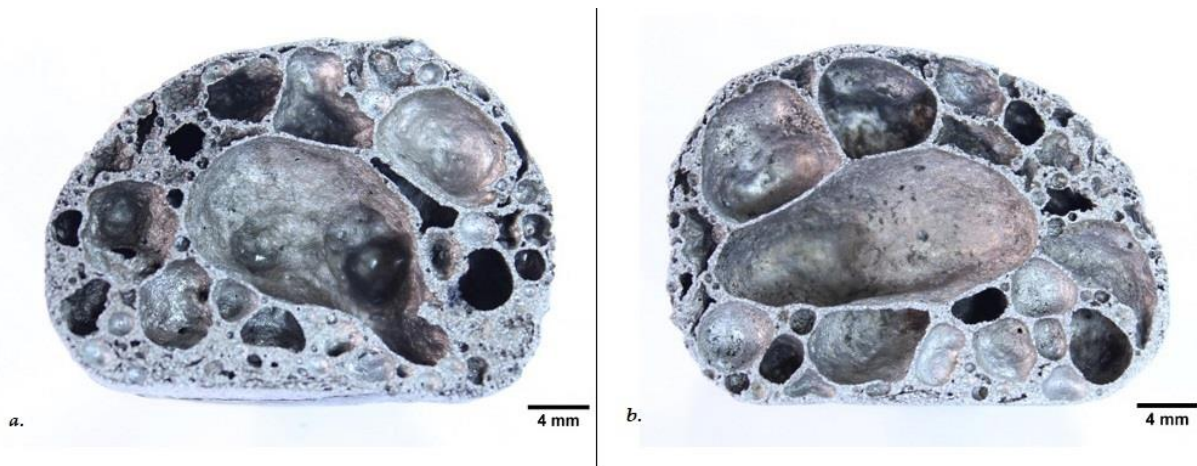


7.2.2 6 *a.* Α όψη, και *b.* Β όψη Δοκιμίου 6 (2 % κ.β. Steel Flakes)

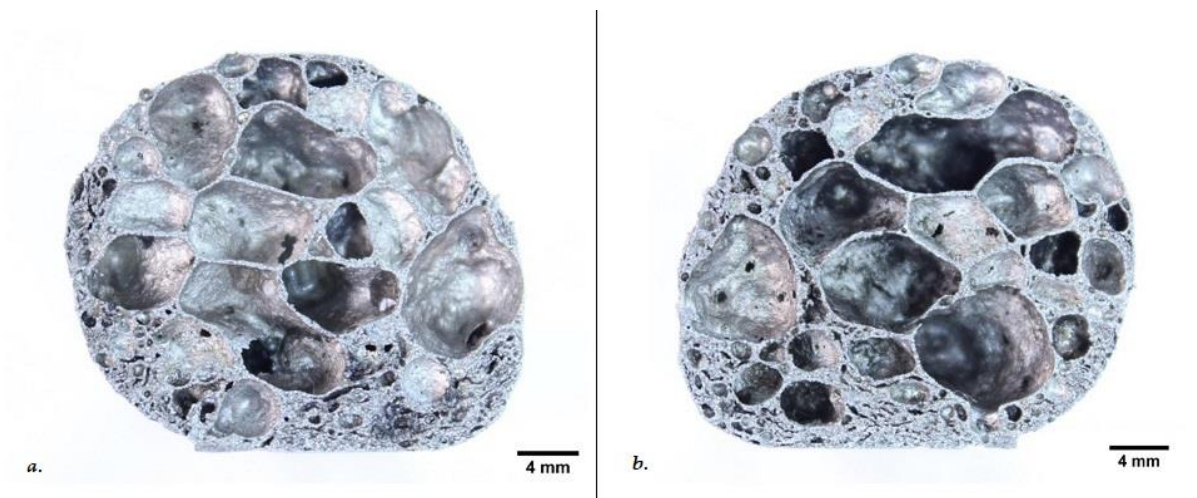
iii. Τρίτη Αναλογία (κατά βάρος περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα 5 %) :



7.2.2 7 *a.* Α όψη, και *b.* Β όψη Δοκιμίου 7 (5 % κ.β. Steel Flakes)

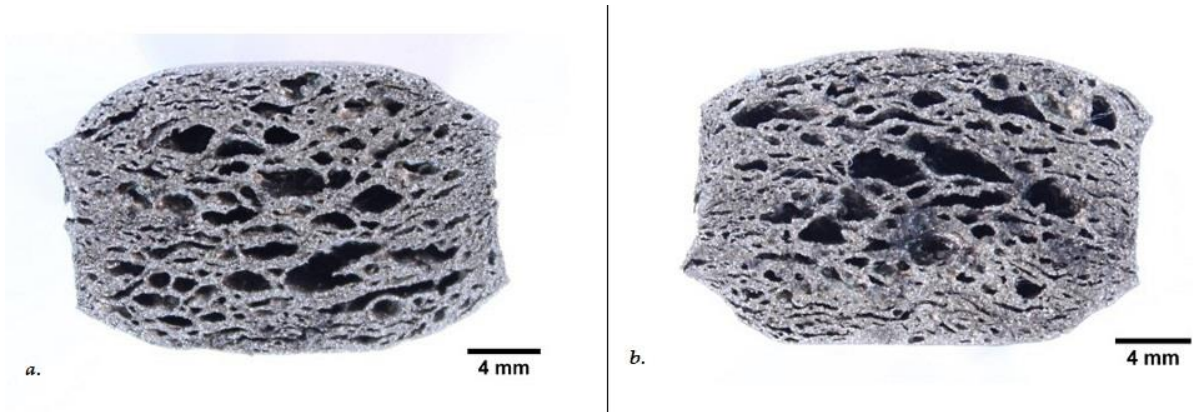


7.2.2 8 *a.* Α όψη, και *b.* Β όψη Δοκιμίου 8 (5 % κ.β. Steel Flakes)

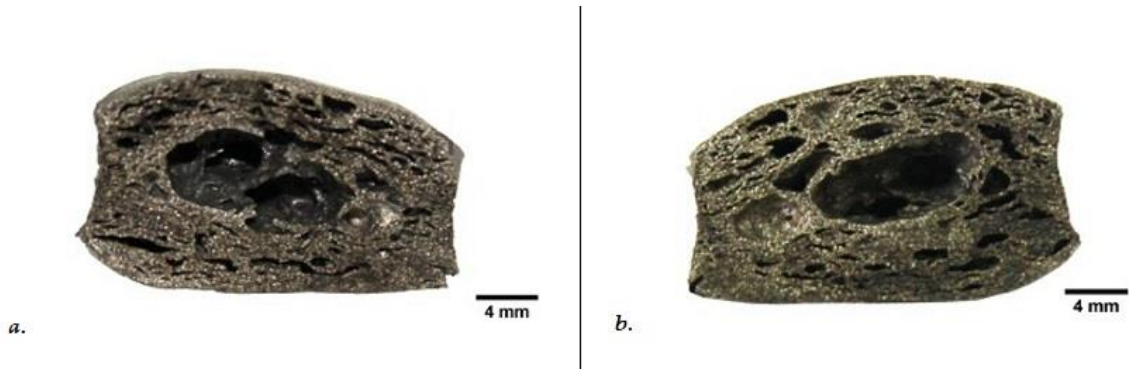


7.2.2 9 *a.* Α όψη, και *b.* Β όψη Δοκιμίου 9 (5 % κ.β. Steel Flakes)

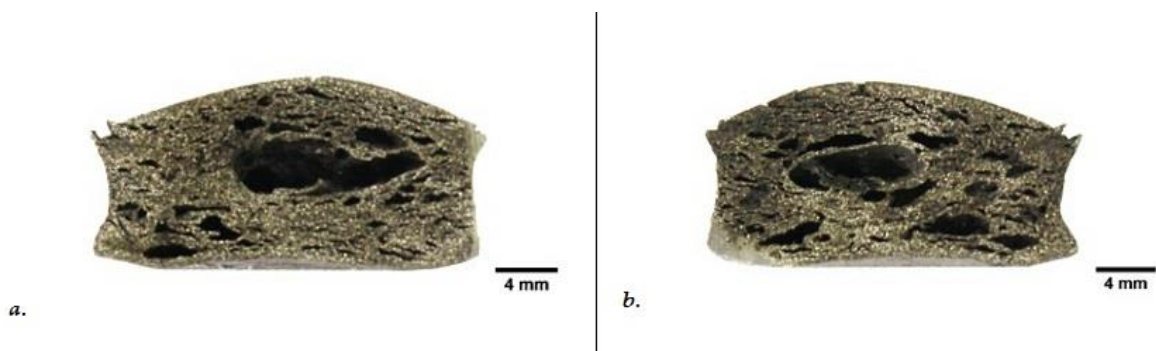
iv. Τέταρτη Αναλογία (κατά βάρος περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα 10 %) :



7.2.2 10 a. Α όψη, και b. Β όψη Δοκιμίου 10 (10 % κ.β. Steel Flakes)

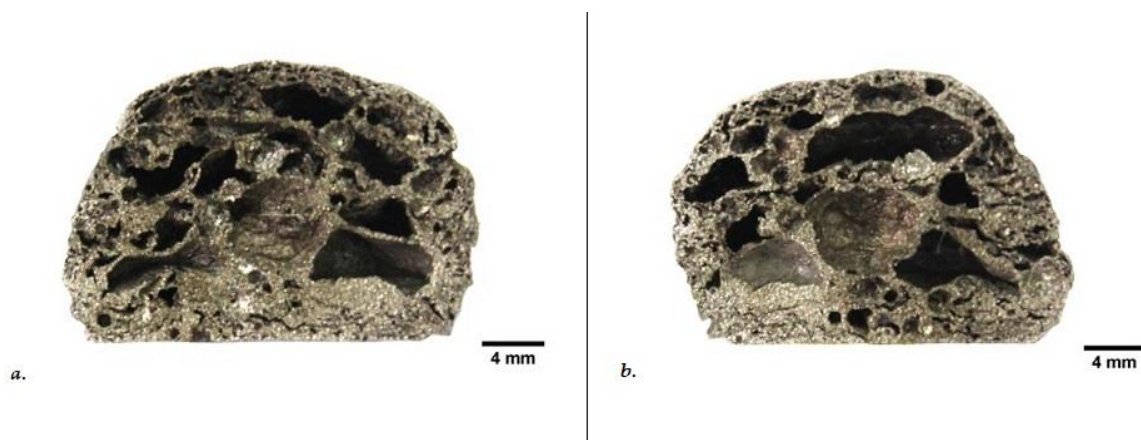


7.2.2 11 a. Α όψη, και b. Β όψη Δοκιμίου 11 (10 % κ.β. Steel Flakes)



7.2.2 12 a. Α όψη, και b. Β όψη Δοκιμίου 12 (10 % κ.β. Steel Flakes)

v. Πέμπτη Αναλογία (κατά βάρος περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα 8 %) :



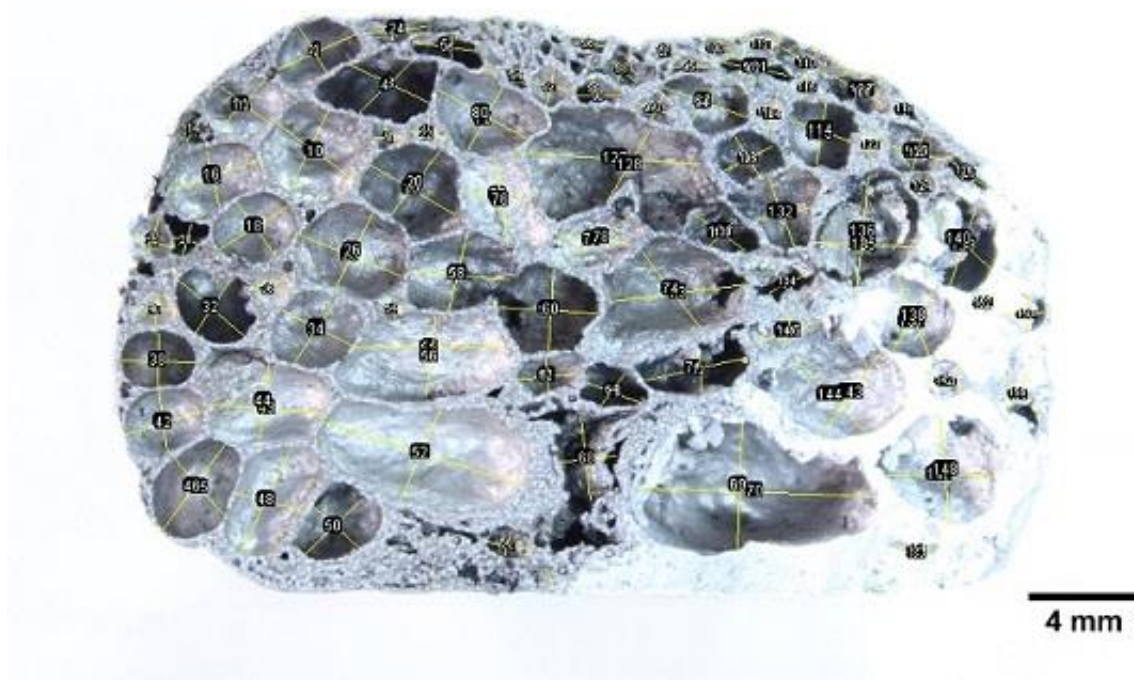
7.2.2 13 a. Α όψη, και b. Β όψη Δοκιμίου 13 (8 % κ.β. Steel Flakes)

Παρατηρώντας τις παραπάνω όψεις των δοκιμίων, λαμβάνονται και οι πρώτες πληροφορίες του εσωτερικού των δοκιμίων, και της μορφής των πορώδων τους. Προκειμένου να μελετηθεί ακόμη καλύτερα η ποιότητα του πορώδους,, έγινε καταμέτρηση των πόρων και του μεγέθους τους, και δημιουργήθηκαν πίνακες και διαγράμματα (ιστογράμματα) που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες. Αυτό πραγματοποιήθηκε μόνο για τα δοκίμια που παρέμειναν εντός του φούρνου, ως τη στιγμή της μέγιστης αφροποίησης τους, πριν δηλαδή καταρρεύσουν, δηλαδή και για τις δύο όψεις των δοκιμίων 2, 3, 5, 6, 8 και 9.

Για τη καταμέτρηση των πόρων χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Fiji, και σε κάθε πόρο επιλέχθηκαν 2 διάμετροι , αυτή με το μέγιστο μήκος και αυτή με το ελάχιστο. Το ημιάθροισμα αυτών των δύο, έδωσε τη μέση διάμετρο των πόρων , η οποία και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των μετέπειτα πινάκων και διαγραμμάτων (ιστογραμμάτων) με κατάλληλες κλάσεις.

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται πρώτα τα στιγμιότυπα από την καταμέτρηση των πόρων και των διαμέτρων τους. Αμέσως μετά από κάθε στιγμιότυπο παρουσιάζονται οι πίνακες στους οποίους κατανεμήθηκαν τα στοιχεία που προέκυψαν από την προηγούμενη διαδικασία για συγκεκριμένα πλάτη κλάσεων. Από τους πίνακες προέκυψαν τα ιστογράμματα που περιγράφουν την κατανομή των πόρων των αντίστοιχων πινάκων και όψεων δοκιμίων.

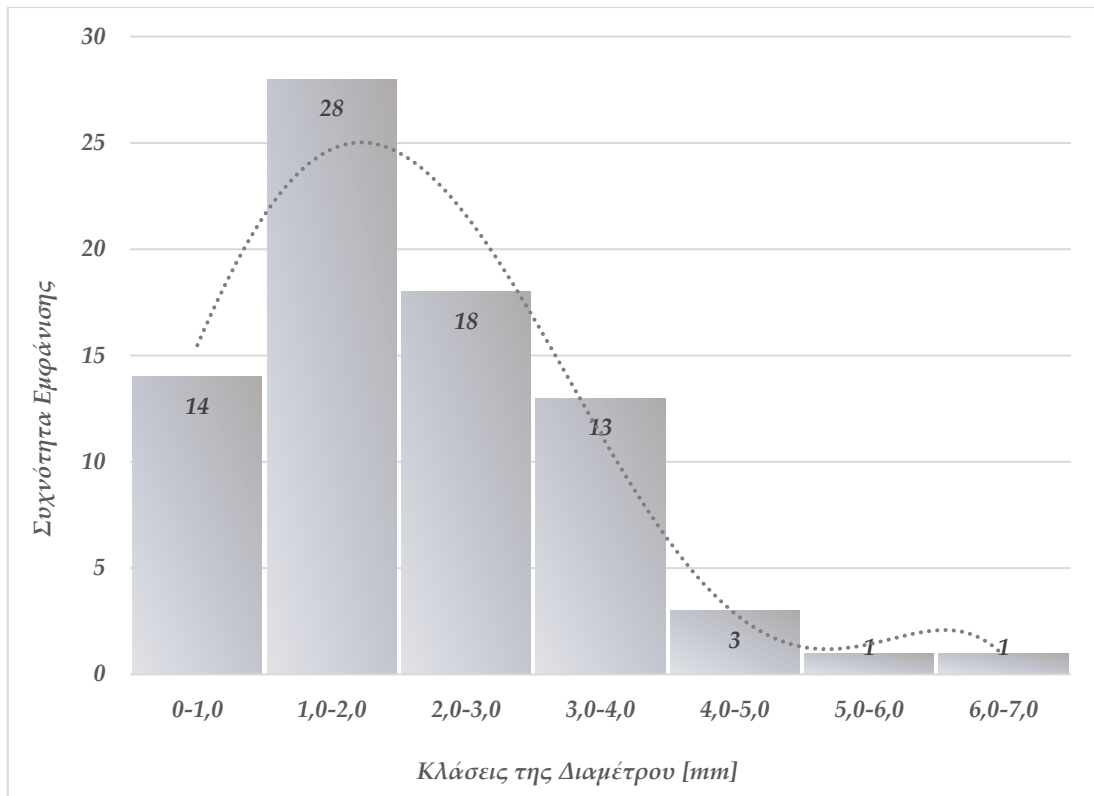
i. Δοκίμιο 2, Α Όψη



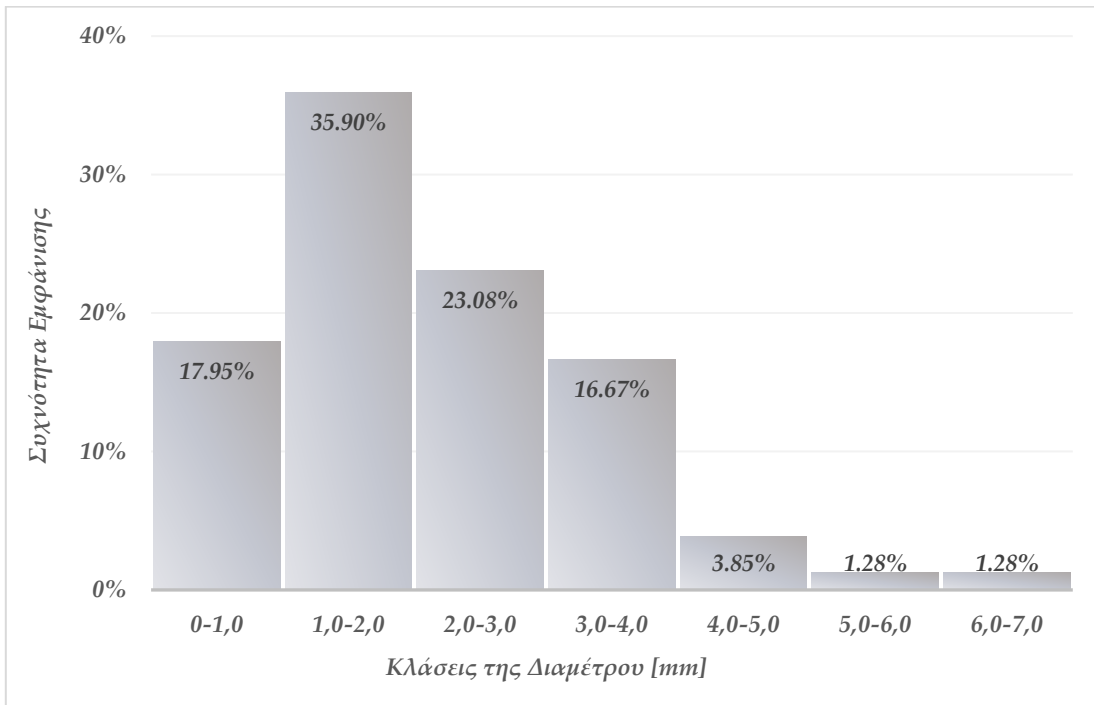
7.2.2 14 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 2 (0 % κ.β. Steel Flakes), Α όψη

Πίνακας 7-14 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 2 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	14	17,95%
2	1,0-2,0	28	35,90%
3	2,0-3,0	18	23,08%
4	3,0-4,0	13	16,67%
5	4,0-5,0	3	3,85%
6	5,0-6,0	1	1,28%
7	6,0-7,0	1	1,28%
	Σύνολο	78	100,00%



7-23 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-24 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

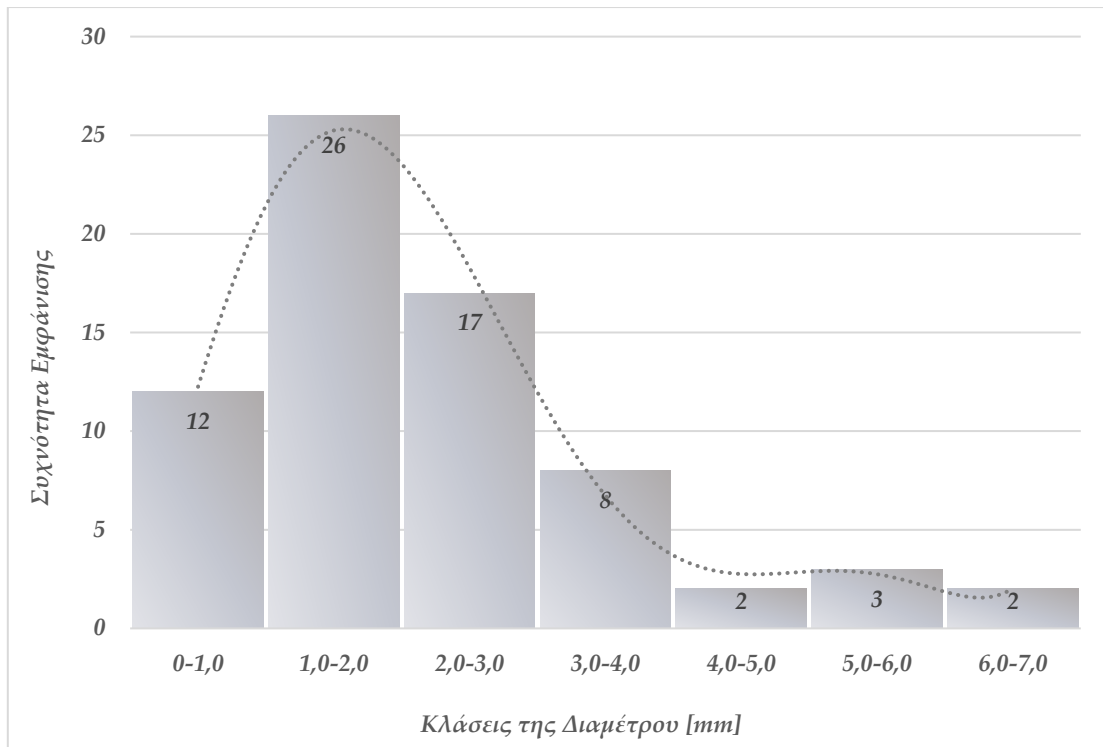
ii. Δοκίμιο 2, 'B Όψη



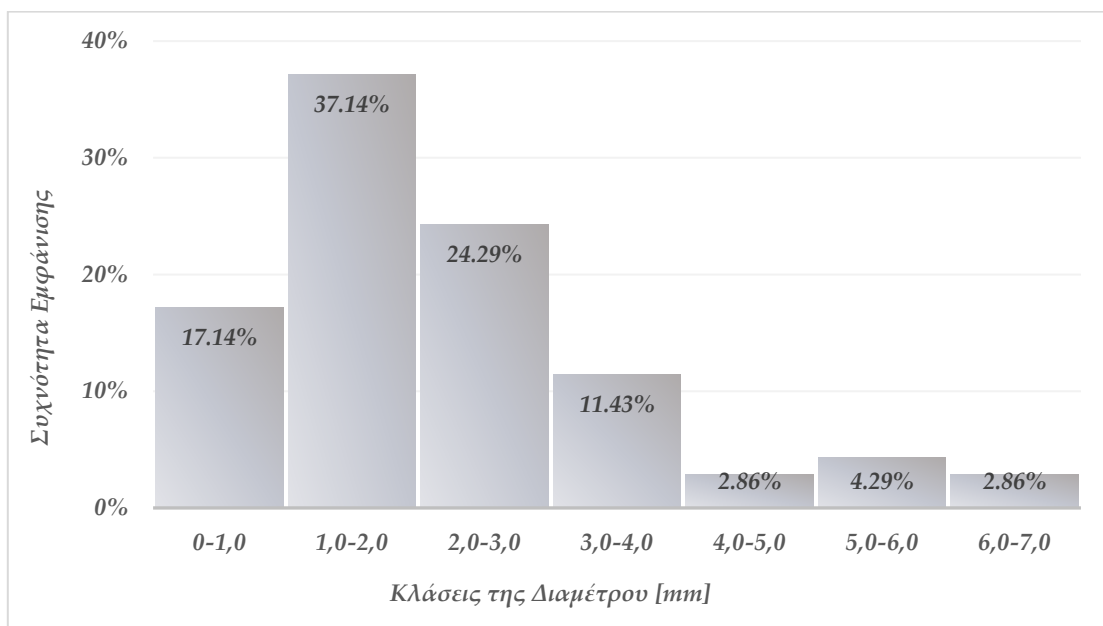
7.2.2 15 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 2 (0 % κ.β. Steel Flakes), 'B όψη

Πίνακας 7-15 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της 'B Όψης του Δοκιμίου 2 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	12	17,14%
2	1,0-2,0	26	37,14%
3	2,0-3,0	17	24,29%
4	3,0-4,0	8	11,43%
5	4,0-5,0	2	2,86%
6	5,0-6,0	3	4,29%
7	6,0-7,0	2	2,86%
	Σύνολο	70	100,00%

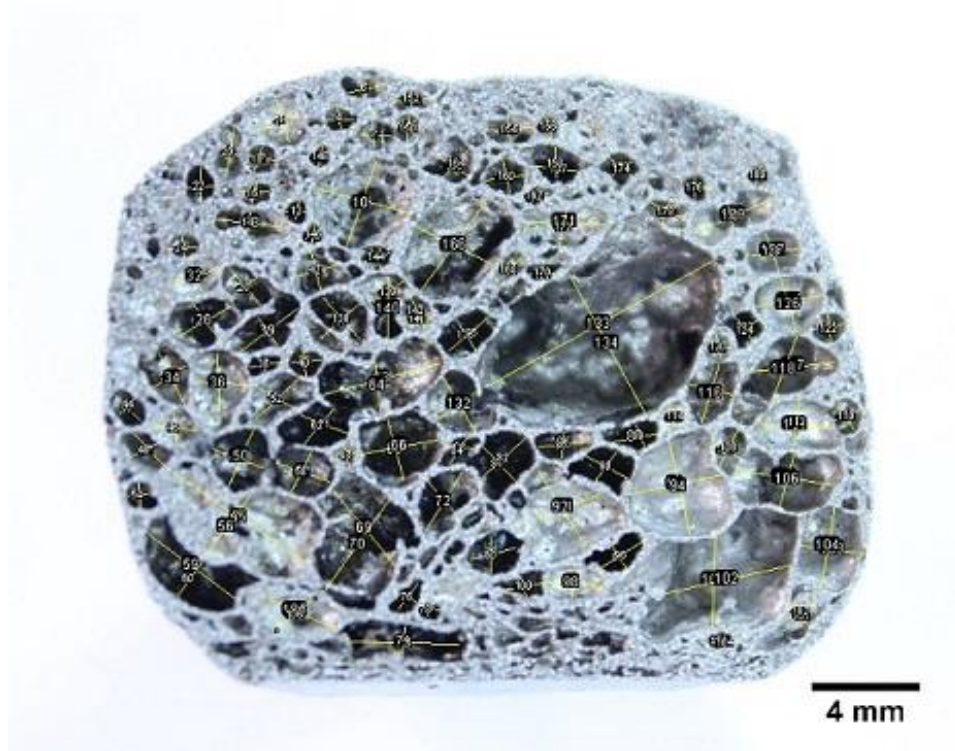


7-25 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-26 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 2, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

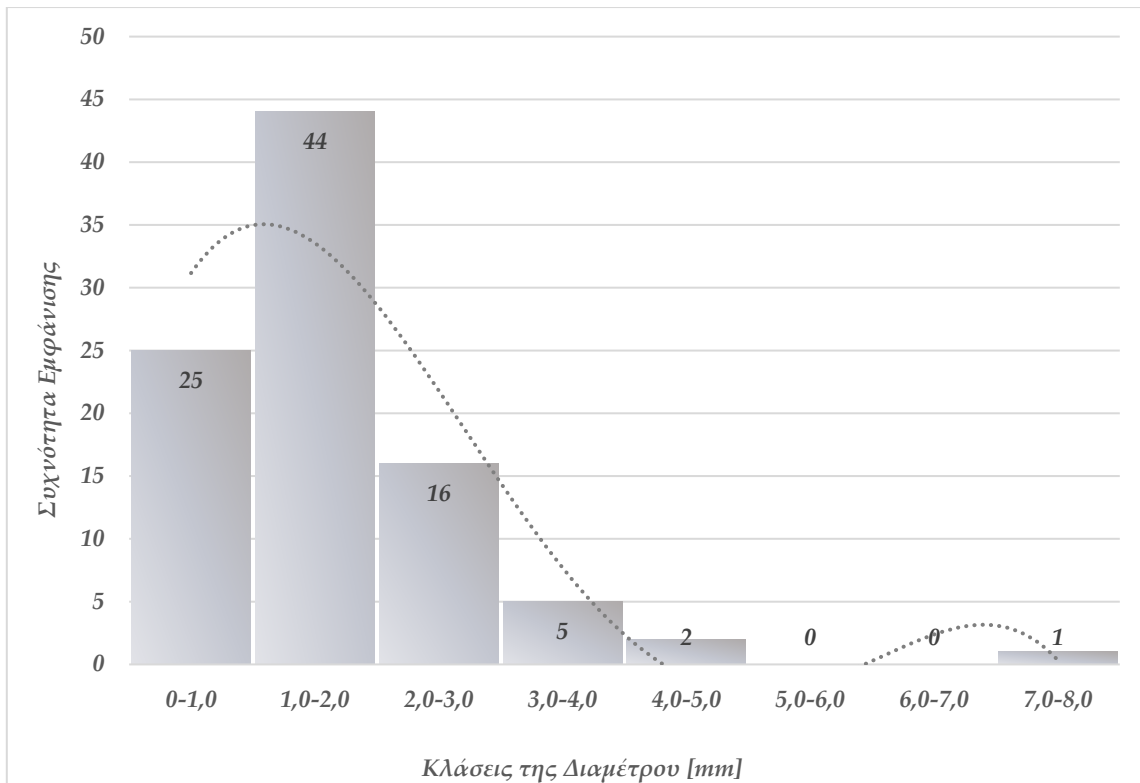
iii. Δοκίμιο 3, Α όψη



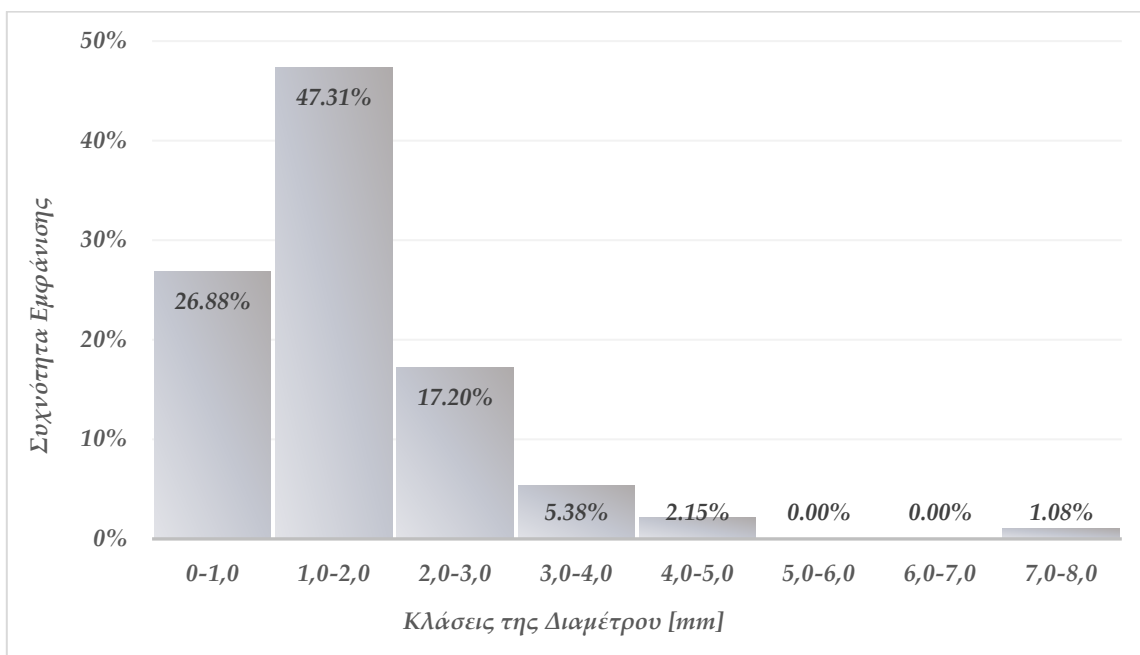
7.2.2 16 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 3 (0 % κ.β. Steel Flakes), Α όψη

Πίνακας 7-16 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκίμιου 3 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	25	26,88%
2	1,0-2,0	44	47,31%
3	2,0-3,0	16	17,20%
4	3,0-4,0	5	5,38%
5	4,0-5,0	2	2,15%
6	5,0-6,0	0	0,00%
7	6,0-7,0	0	0,00%
8	7,0-8,0	1	1,08%
	Σύνολο	93	100,00%

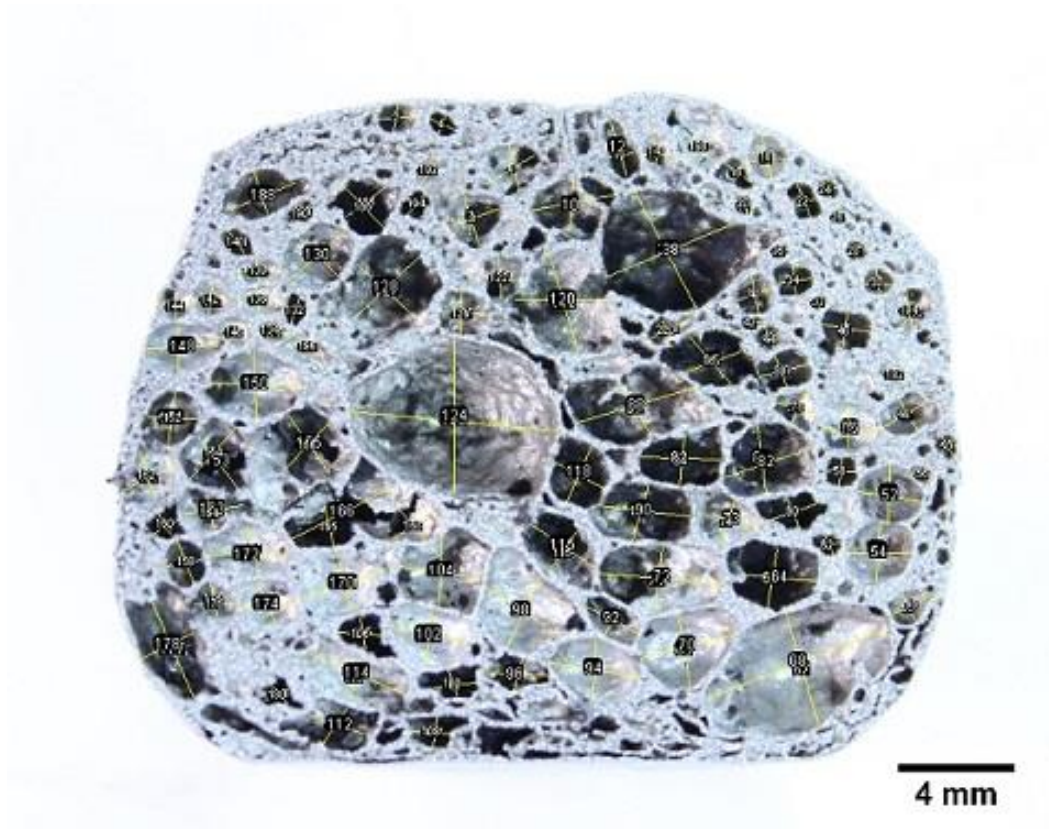


7-27 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-28 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

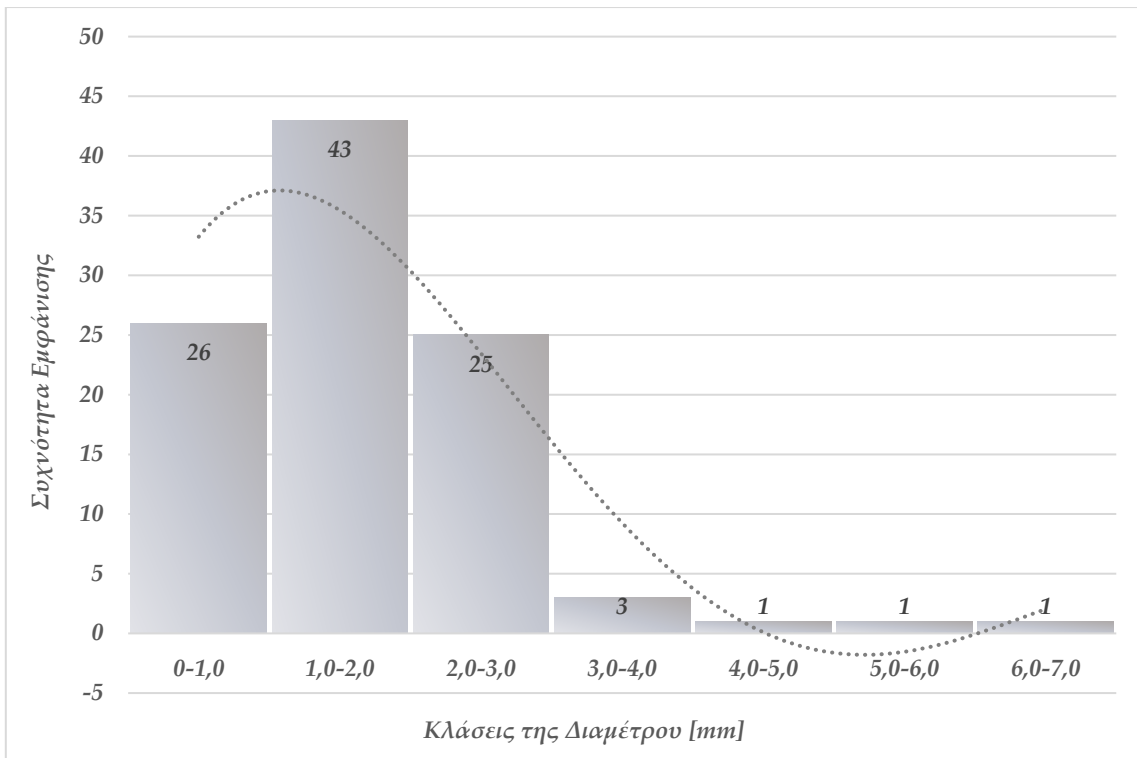
iv. Δοκίμιο 3, 'B Όψη



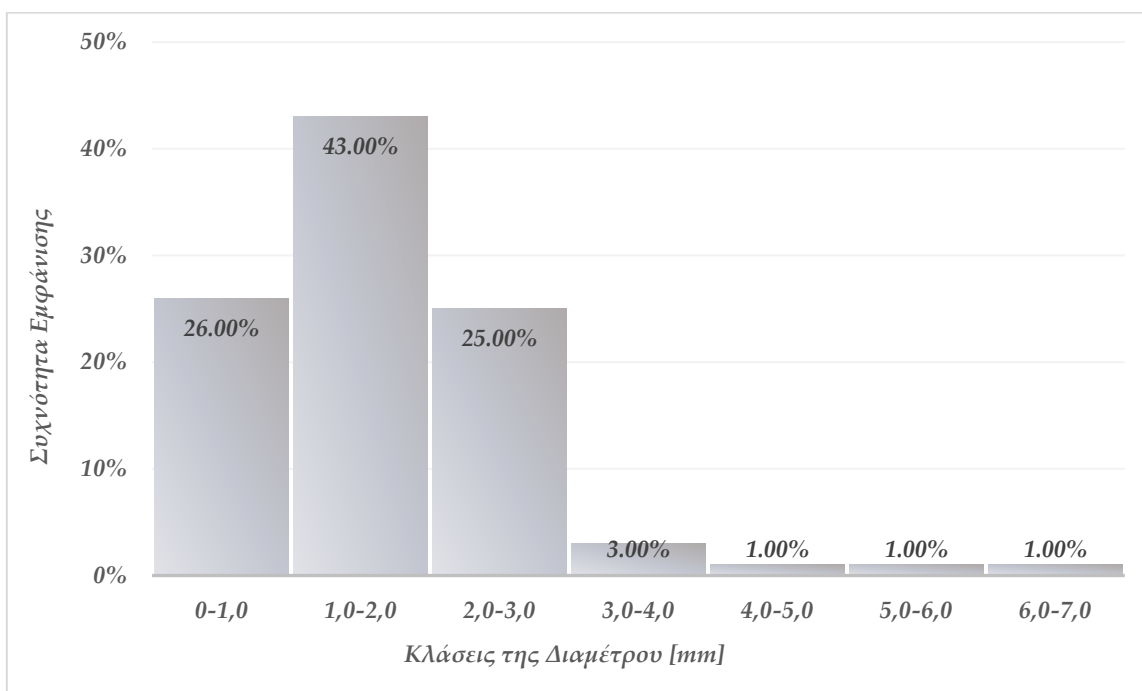
7.2.2 17 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 3 (0 % κ.β. Steel Flakes), 'B όψη

Πίνακας 7-17 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της 'B Όψης του Δοκιμίου 3 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	26	26,00%
2	1,0-2,0	43	43,00%
3	2,0-3,0	25	25,00%
4	3,0-4,0	3	3,00%
5	4,0-5,0	1	1,00%
6	5,0-6,0	1	1,00%
7	6,0-7,0	1	1,00%
	Σύνολο	100	100,00%

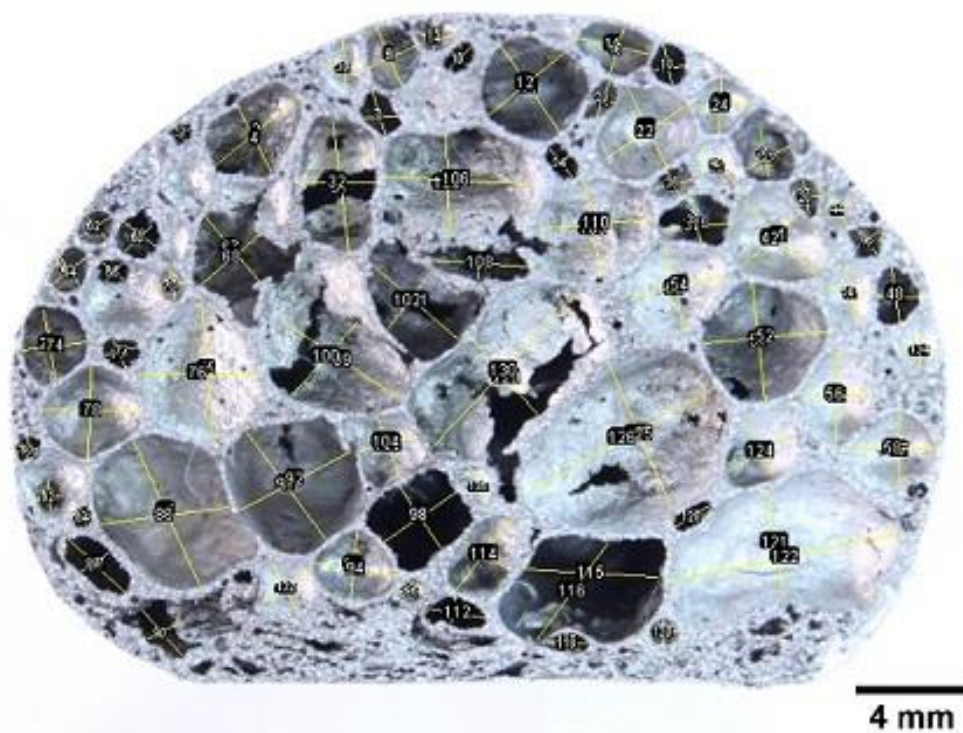


7-29 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-30 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 3, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

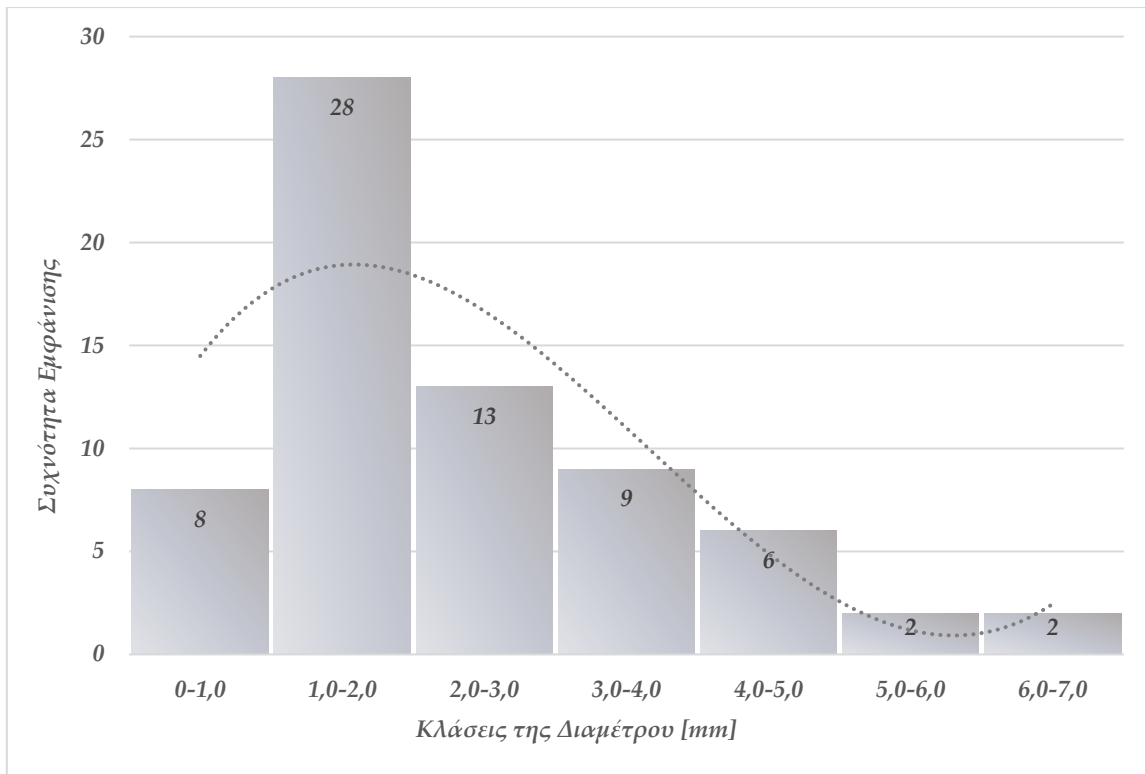
v. Δοκίμιο 5, Α Όψη



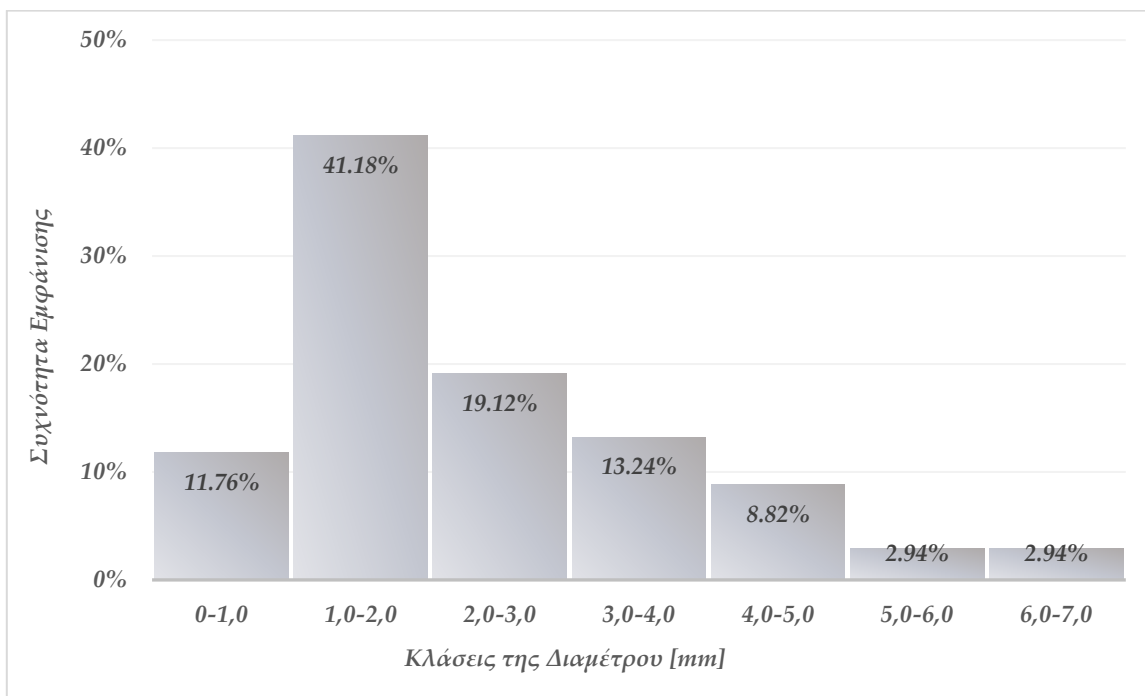
7.2.2 18 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 5 (2 % κ.β. Steel Flakes), Α όψη

Πίνακας 7-18 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 5 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	8	11,76%
2	1,0-2,0	28	41,18%
3	2,0-3,0	13	19,12%
4	3,0-4,0	9	13,24%
5	4,0-5,0	6	8,82%
6	5,0-6,0	2	2,94%
7	6,0-7,0	2	2,94%
	Σύνολο	68	100,00%

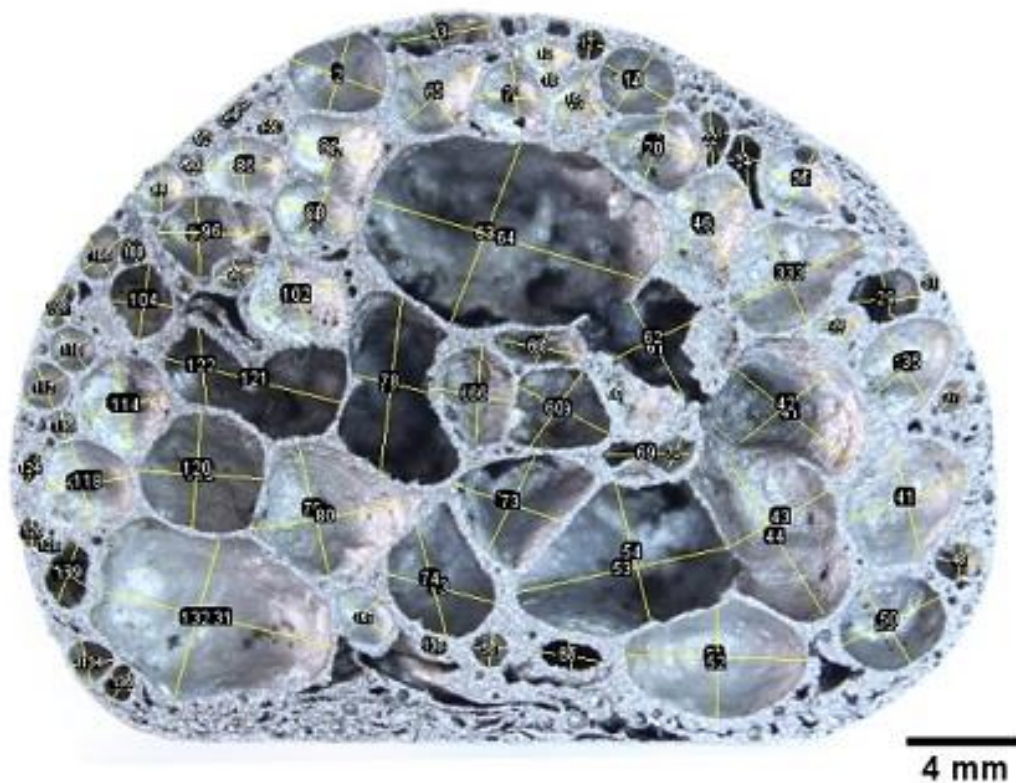


7-31 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-32 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

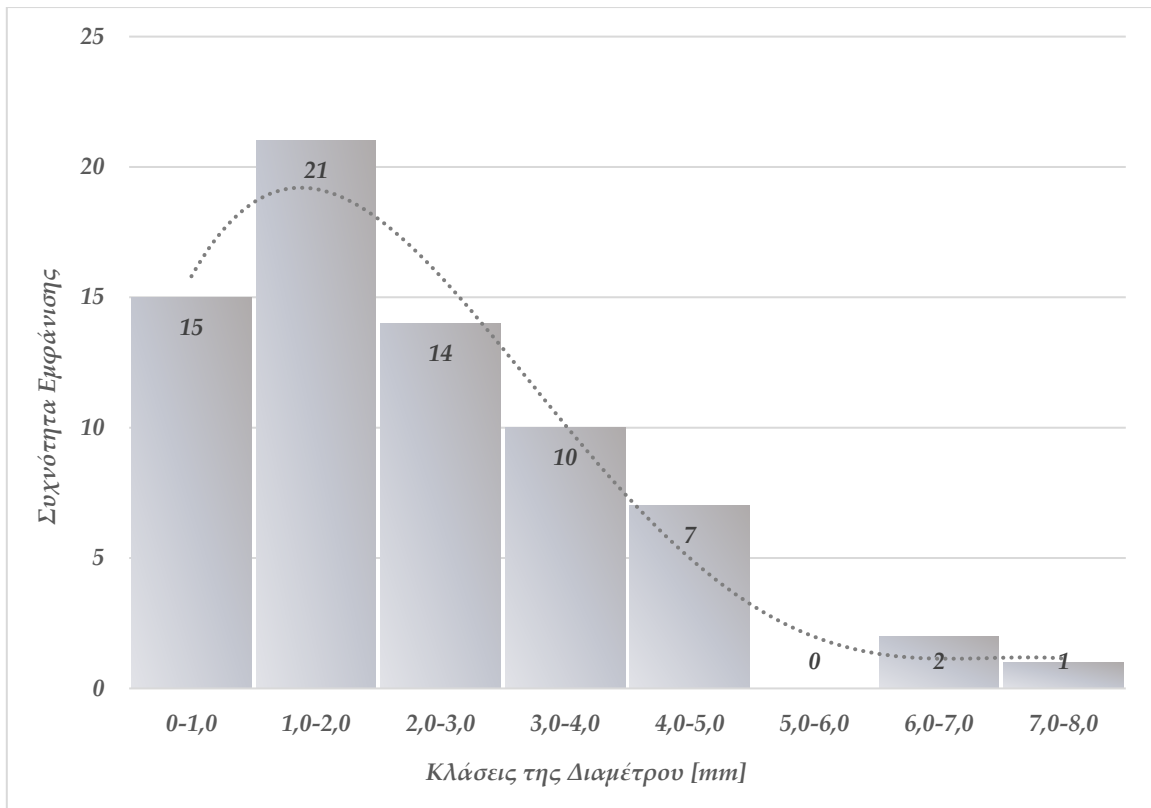
vi. Δοκίμιο 5, Β Όψη



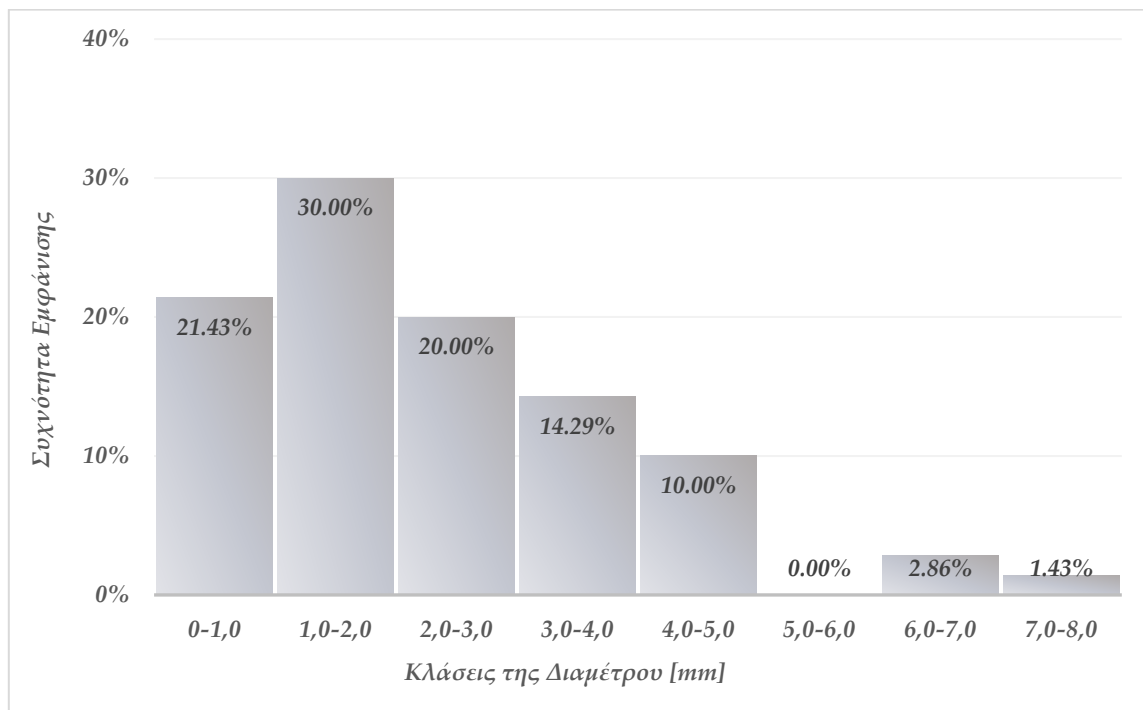
7.2.2 19 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 5 (2 % κ.β. Steel Flakes), Β όψη

Πίνακας 7-19 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 5 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	15	21,43%
2	1,0-2,0	21	30,00%
3	2,0-3,0	14	20,00%
4	3,0-4,0	10	14,29%
5	4,0-5,0	7	10,00%
6	5,0-6,0	0	0,00%
7	6,0-7,0	2	2,86%
8	7,0-8,0	1	1,43%



7-33 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-34 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 5, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

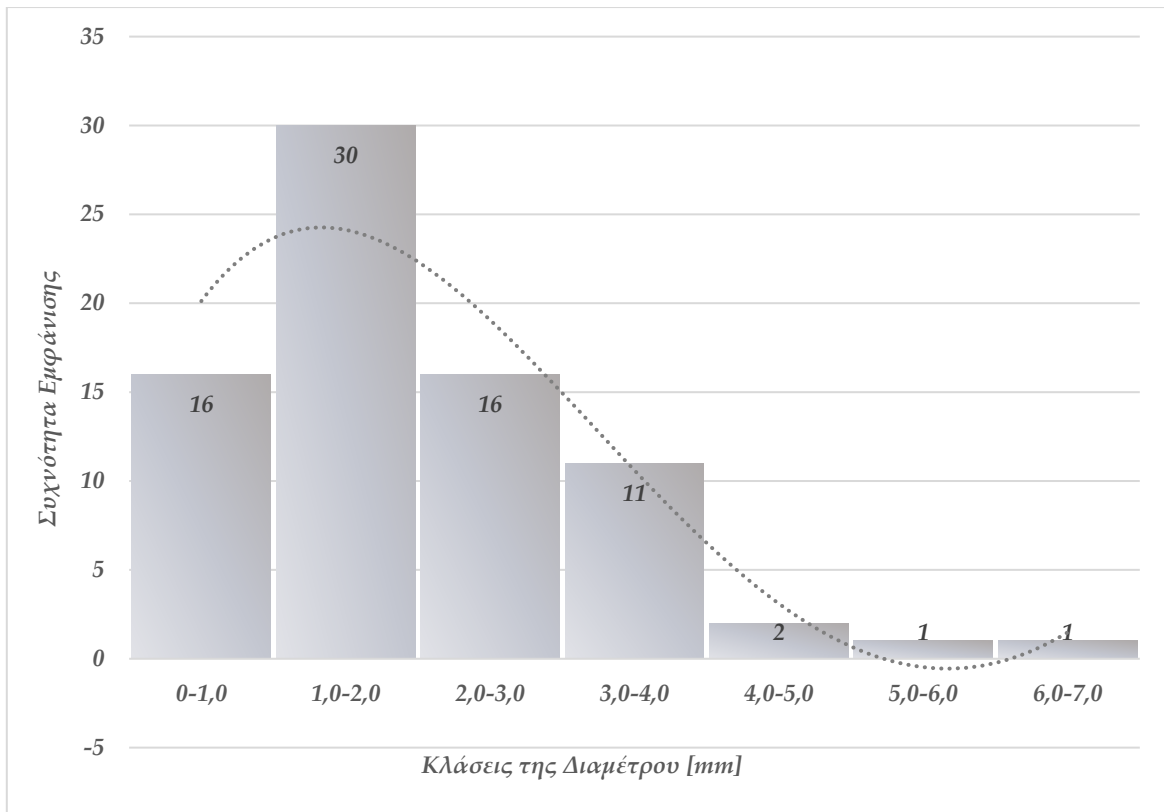
vii. Δοκίμιο 6, Α όψη



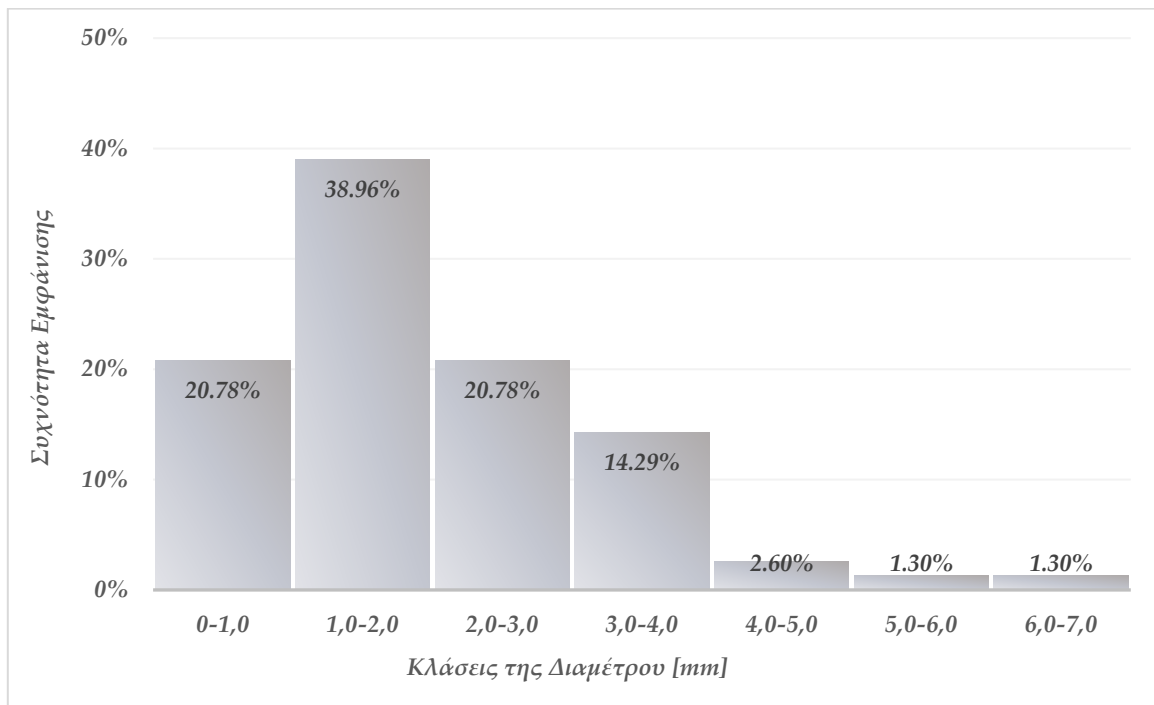
7.2.2 20 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 6 (2 % κ.β. Steel Flakes), Α όψη

Πίνακας 7-20 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκίμιου 6 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	16	20,78%
2	1,0-2,0	30	38,96%
3	2,0-3,0	16	20,78%
4	3,0-4,0	11	14,29%
5	4,0-5,0	2	2,60%
6	5,0-6,0	1	1,30%
7	6,0-7,0	1	1,30%
Σύνολο		77	100,00%

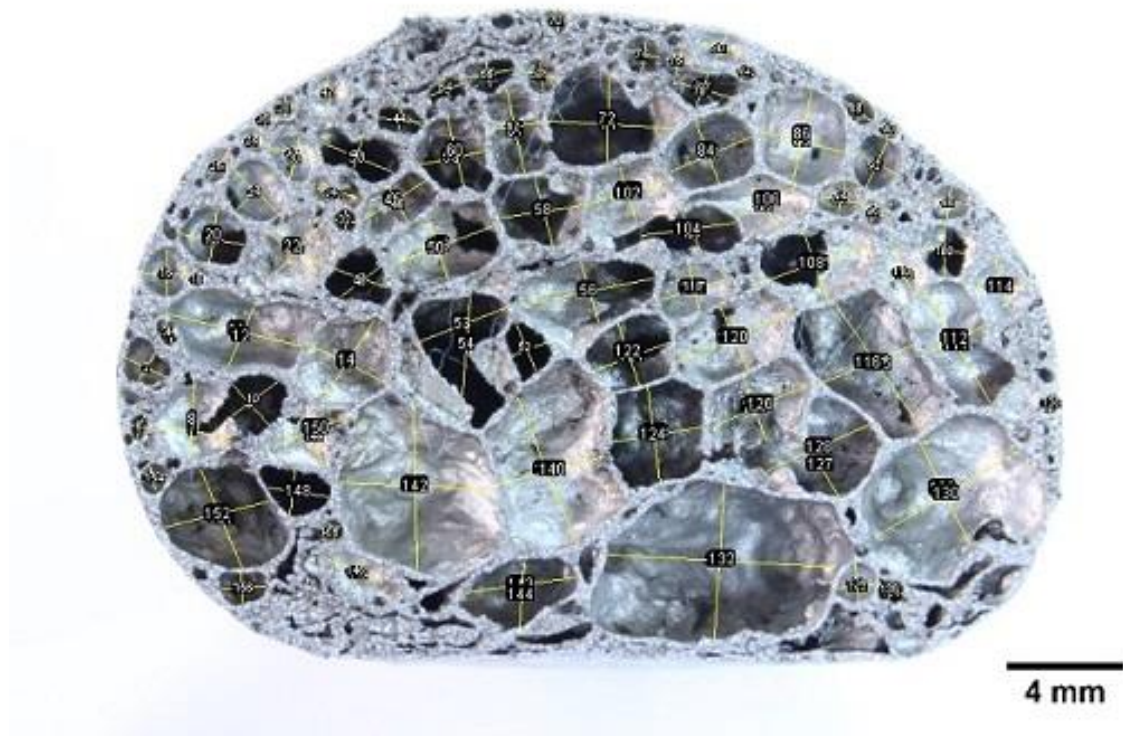


7-35 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-36 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

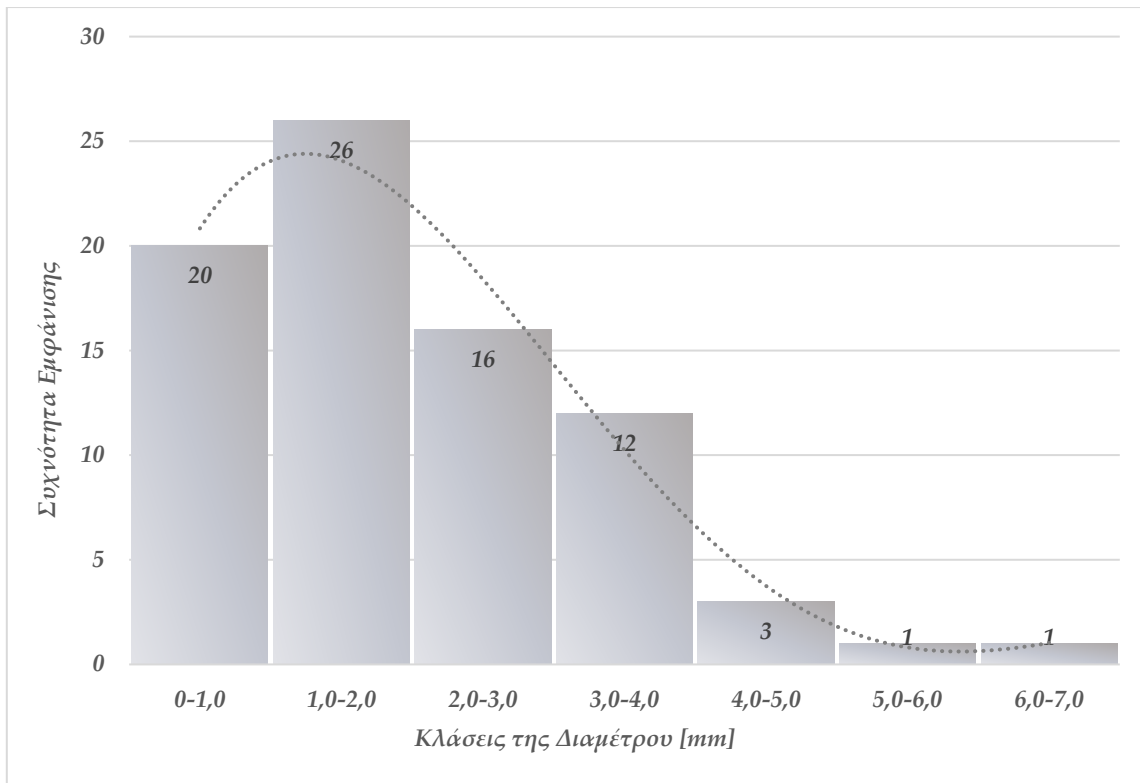
viii. Δοκίμιο 6, 'B όψη



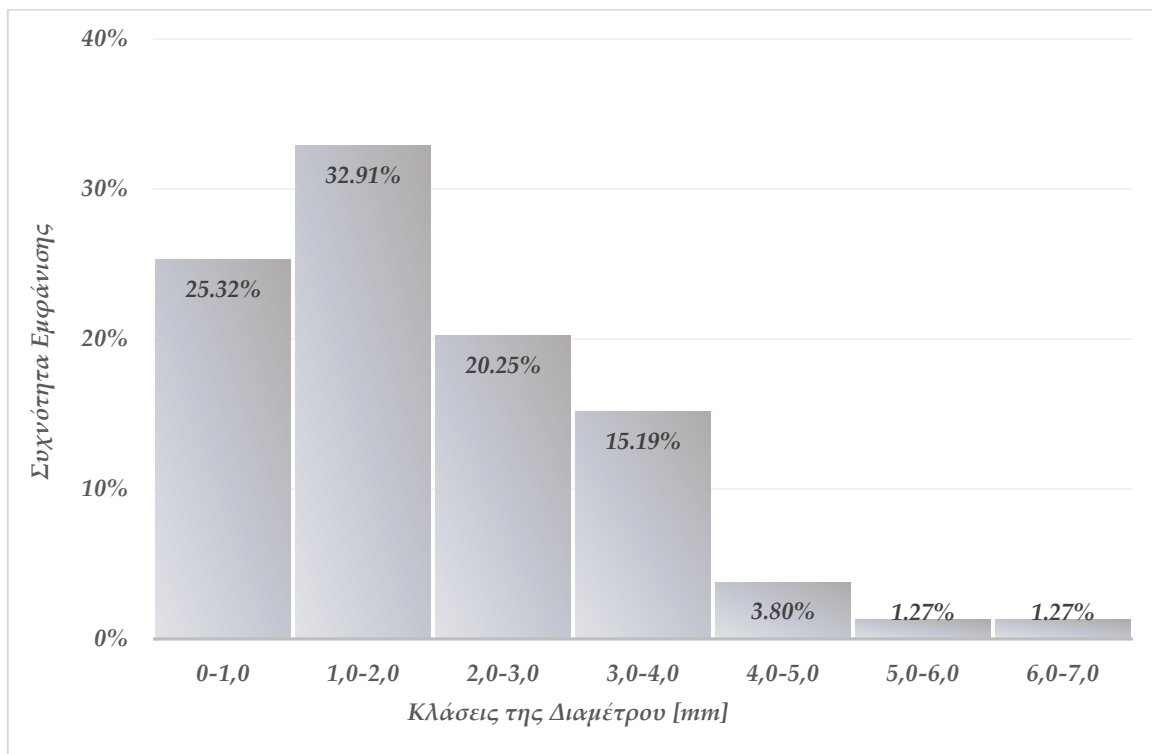
7.2.2 21 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 6 (2 % κ.β. Steel Flakes), 'B όψη

Πίνακας 7-21 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της 'B Όψης του Δοκιμίου 6 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	20	25,32%
2	1,0-2,0	26	32,91%
3	2,0-3,0	16	20,25%
4	3,0-4,0	12	15,19%
5	4,0-5,0	3	3,80%
6	5,0-6,0	1	1,27%
7	6,0-7,0	1	1,27%
	Σύνολο	79	100,00%



7-37 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-38 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 6, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

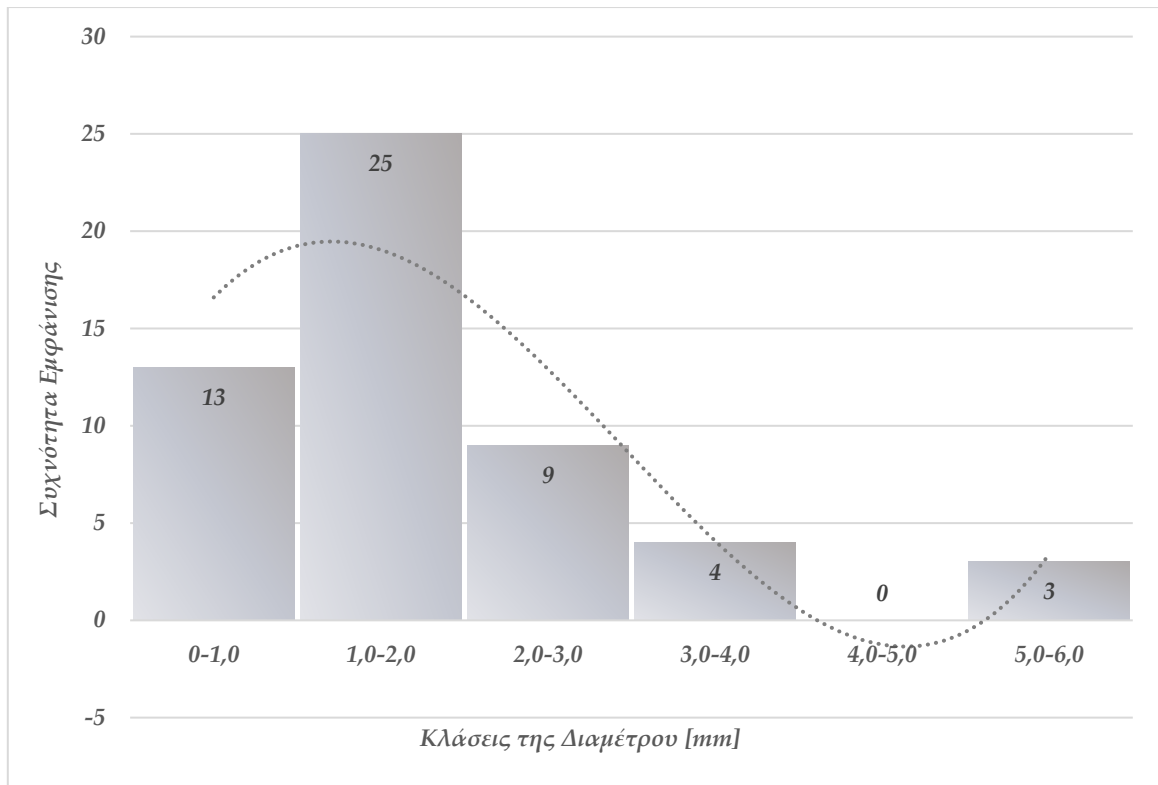
ix. Δοκίμιο 8, Α όψη



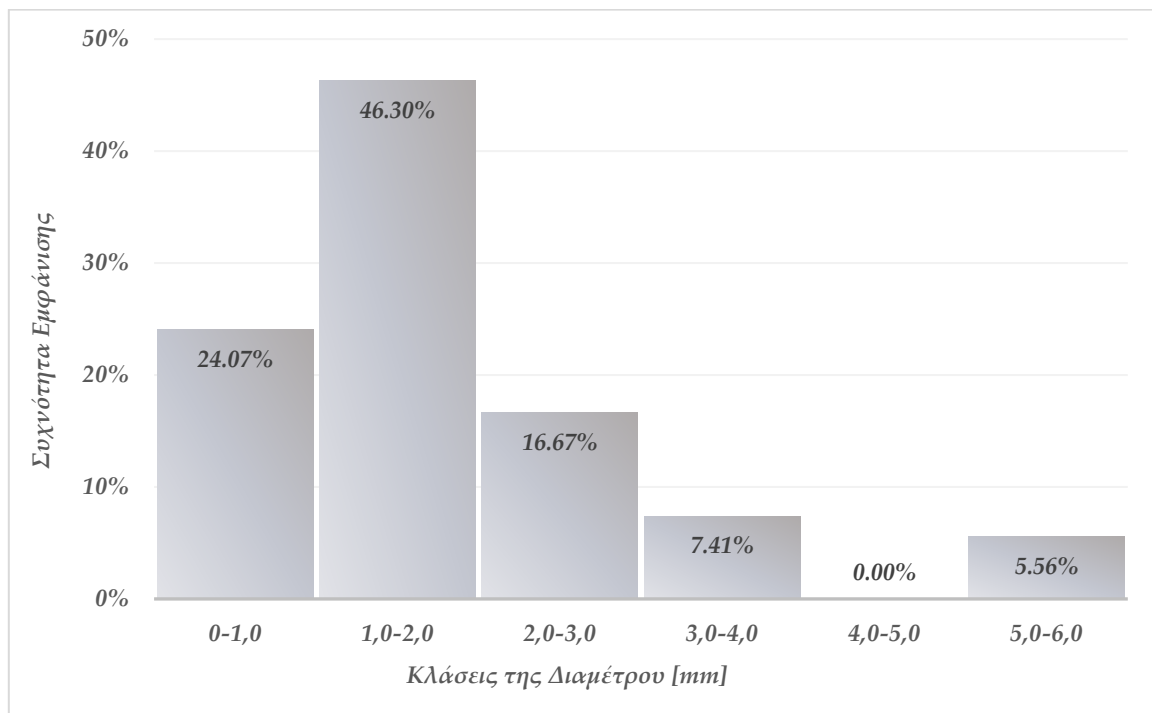
7.2.2 22 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 8 (5 % κ.β. Steel Flakes), Α όψη

Πίνακας 7-22 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 8 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	13	24,07%
2	1,0-2,0	25	46,30%
3	2,0-3,0	9	16,67%
4	3,0-4,0	4	7,41%
5	4,0-5,0	0	0,00%
6	5,0-6,0	3	5,56%
	Σύνολο	54	100,00%



7-39 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-40 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

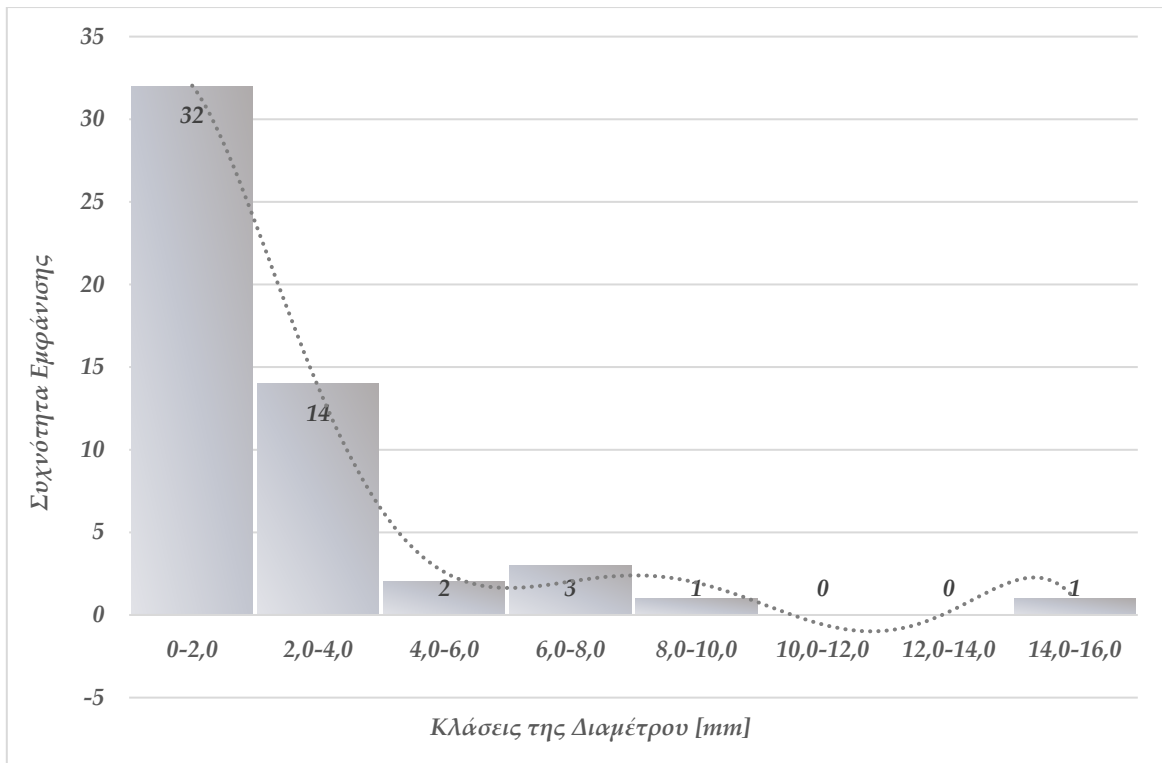
χ. Δοκίμιο 8, Β όψη



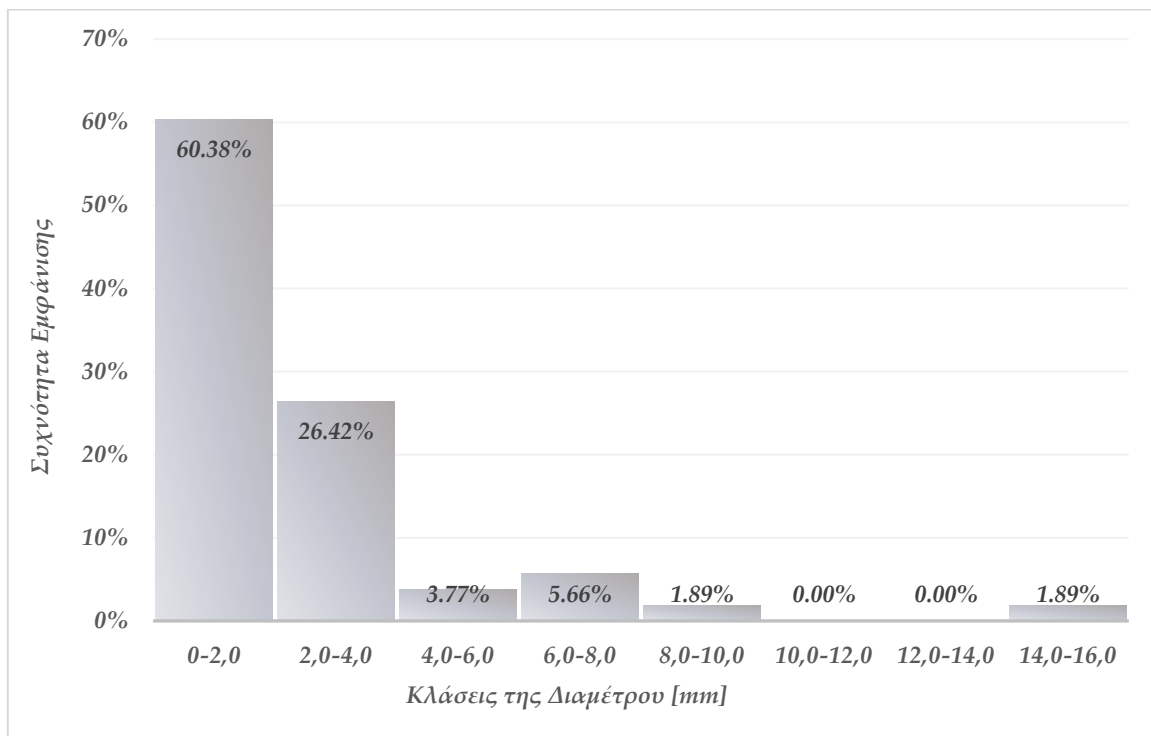
7.2.2 23 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 8 (5 % κ.β. Steel Flakes), Β όψη

Πίνακας 7-23 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκίμιου 8 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 2 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 2 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-2,0	32	60,38%
2	2,0-4,0	14	26,42%
3	4,0-6,0	2	3,77%
4	6,0-8,0	3	5,66%
5	8,0-10,0	1	1,89%
6	10,0-12,0	0	0,00%
7	12,0-14,0	0	0,00%
8	14,0-16,0	1	1,89%
Σύνολο		53	100,00%

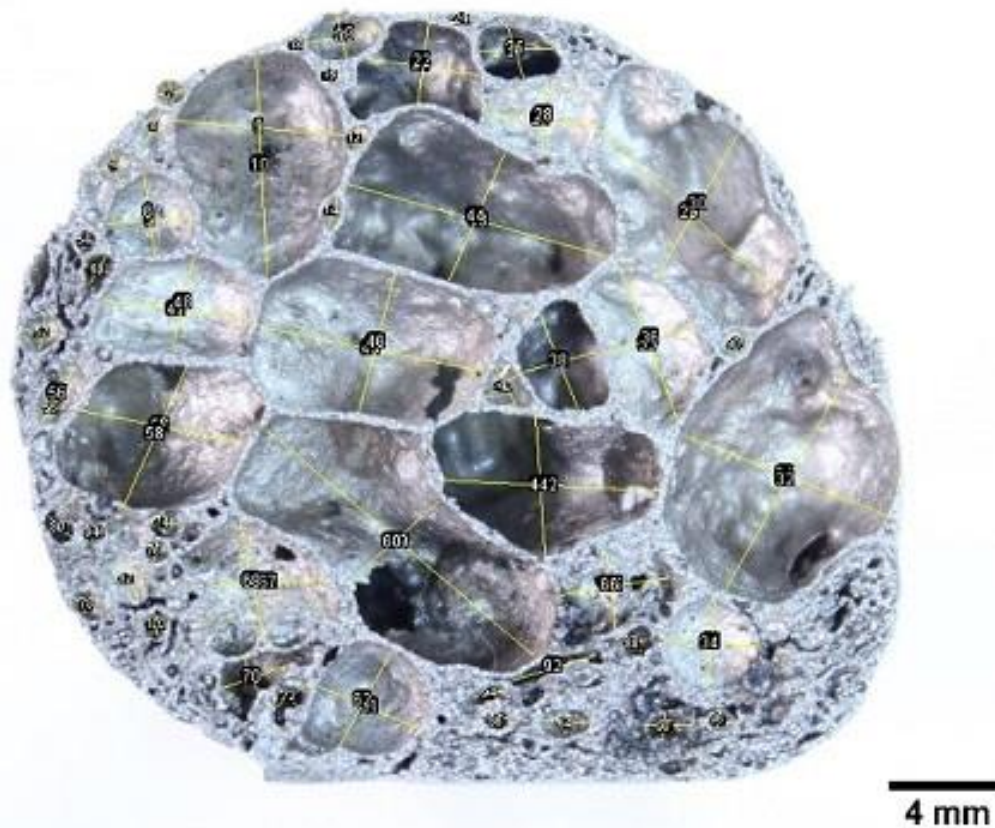


7-41 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 2 mm



7-42 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 8, στις κλάσεις πλάτους 2 mm

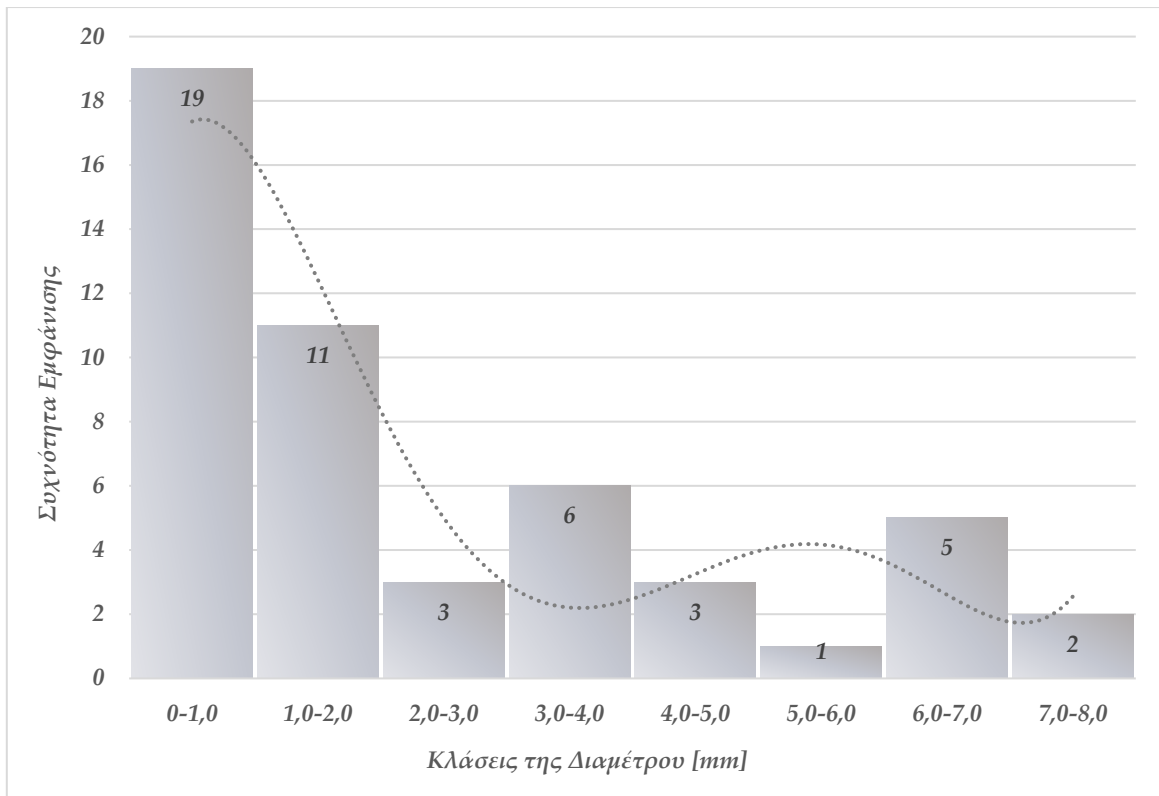
xi. Δοκίμιο 9, Α όψη



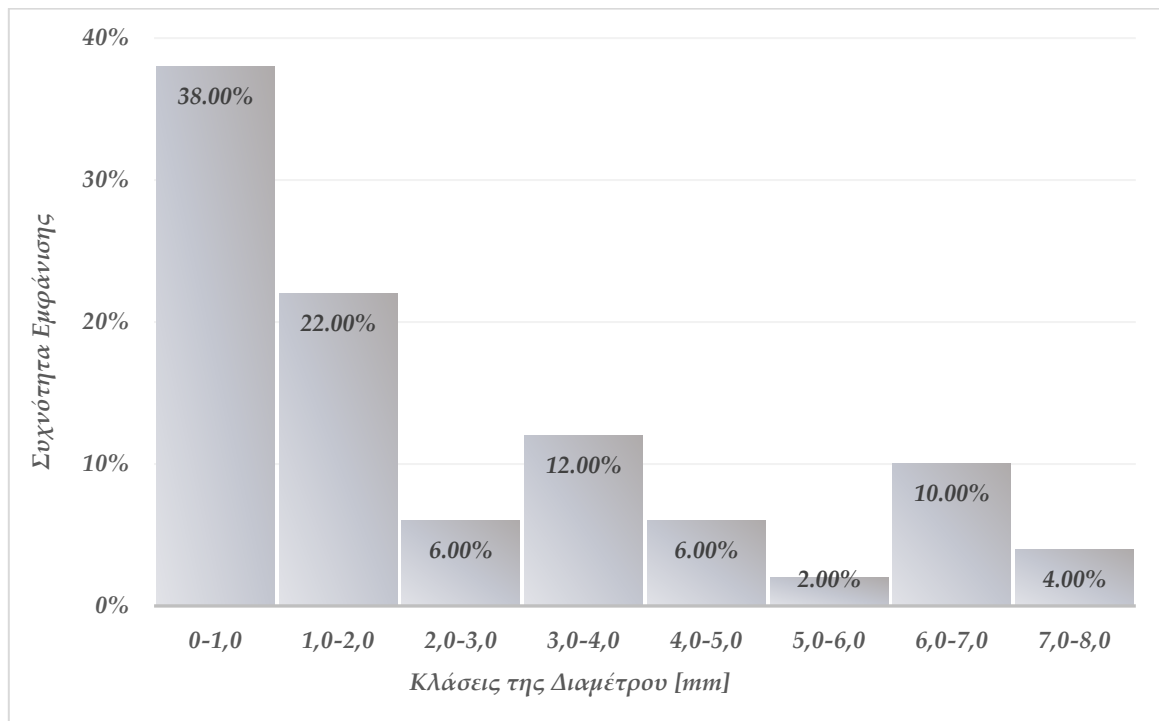
7.2.2 24 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 9 (5 % κ.β. Steel Flakes), Α όψη

Πίνακας 7-24 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 9 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

<i>a/a</i>	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	19	38,00%
2	1,0-2,0	11	22,00%
3	2,0-3,0	3	6,00%
4	3,0-4,0	6	12,00%
5	4,0-5,0	3	6,00%
6	5,0-6,0	1	2,00%
7	6,0-7,0	5	10,00%
8	7,0-8,0	2	4,00%
	Σύνολο	50	100,00%

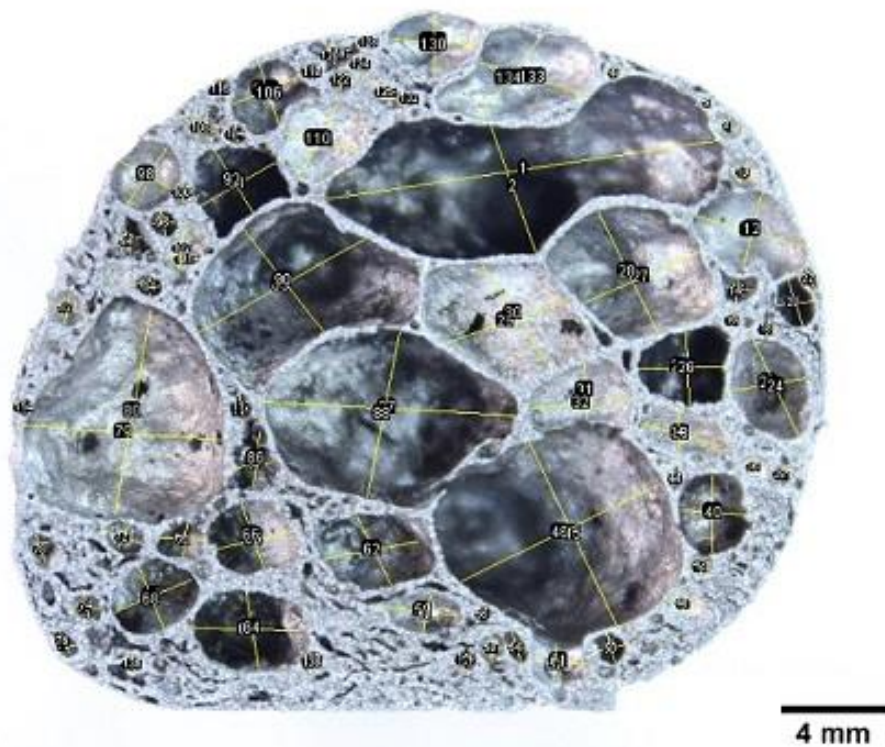


7-43 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-44 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Α Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

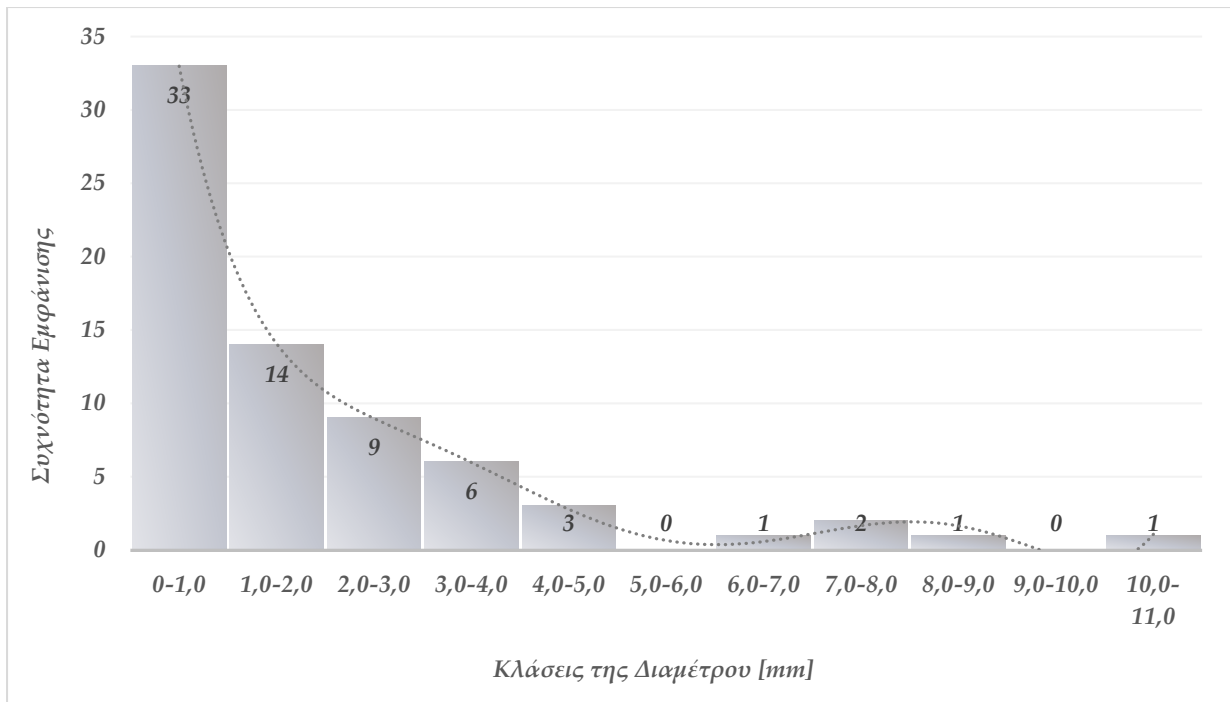
xii. Δοκίμιο 9, Β όψη



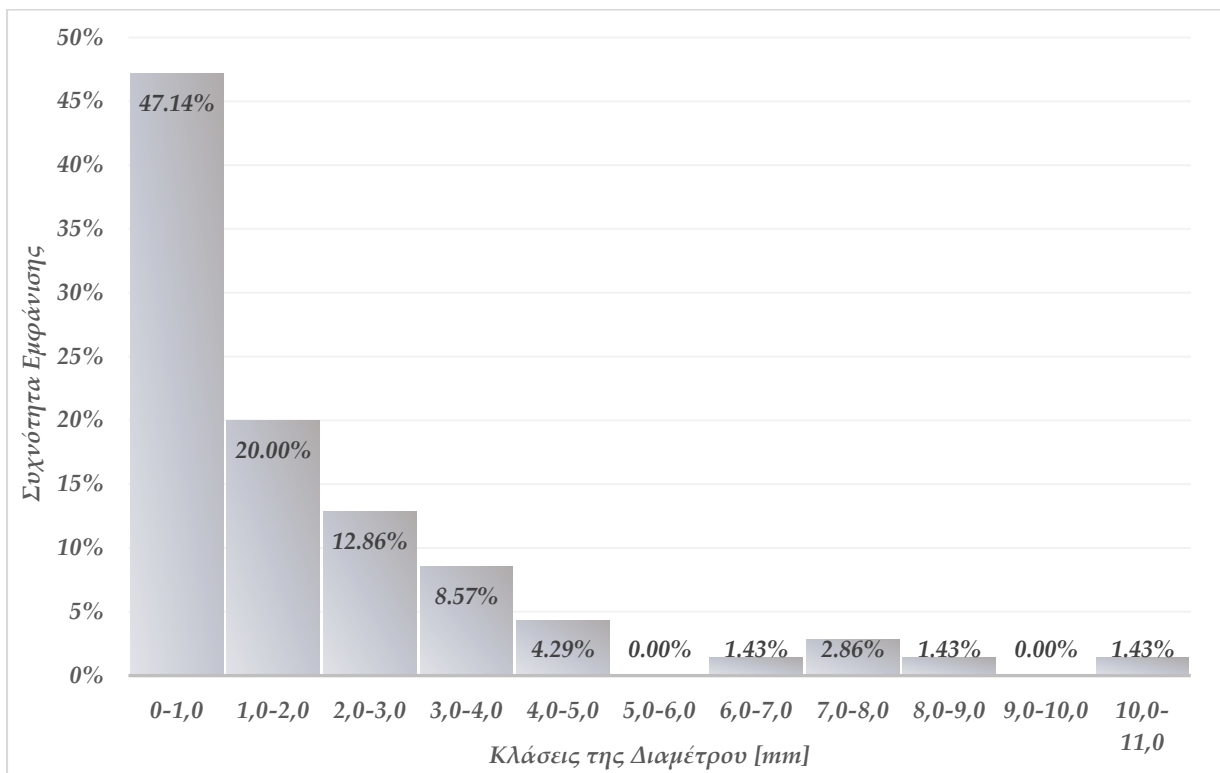
7.2.2 25 Καταμέτρηση πόρων και των διαμέτρων τους, Δοκίμιο 9 (5 % κ.β. Steel Flakes), Β όψη

Πίνακας 7-25 Συχνότητα Εμφάνισης και Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκίμιου 9 στις διάφορες κλάσεις (για πλάτος κλάσης 1 mm)

a/a	Κλάσεις της Διαμέτρου (για πλάτος κλασεως 1 mm) [mm]	Συχνότητα Εμφάνισης Διαμέτρων σε κάθε Κλάση	Σχετική Συχνότητα Εμφάνισης
1	0-1,0	33	47,14%
2	1,0-2,0	14	20,00%
3	2,0-3,0	9	12,86%
4	3,0-4,0	6	8,57%
5	4,0-5,0	3	4,29%
6	5,0-6,0	0	0,00%
7	6,0-7,0	1	1,43%
8	7,0-8,0	2	2,86%
9	8,0-9,0	1	1,43%
10	9,0-10,0	0	0,00%
11	10,0-11,0	1	1,43%
	Σύνολο	70	100,00%



7-45 Ιστόγραμμα Συχνότητας Εμφάνισης Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm



7-46 Ιστόγραμμα Σχετικής Συχνότητας Εμφάνισης των Διαμέτρων της Β Όψης του Δοκιμίου 9, στις κλάσεις πλάτους 1 mm

Από τα παραπάνω παίρνουμε για την αναλογία με μηδενική παρουσία σε νιφάδες χάλυβα, πλήθος πόρων 85 κατά μέσο όρο, εκ των οποίων το 85 % (± 10 %), είναι πόροι μέσης διαμέτρου 0-3 mm, ενώ μόλις το 15 % διασπείρεται σε 4 μεγαλύτερες κλάσεις (3-7 mm). Σε αυτή την αναλογία, το 40 % των πόρων τουλάχιστον, είναι μεταξύ 1-2 mm.

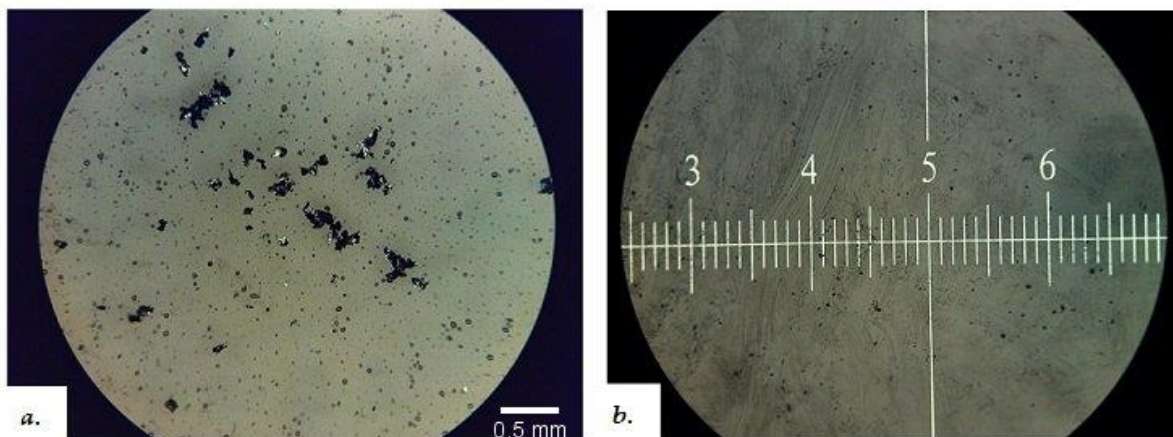
Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται στα δοκίμια της δεύτερης αναλογίας (2 %). Ωστόσο οι κύριες διαφορές που παρατηρούνται είναι πως ο μέσος όρος των πόρων σε αυτή τη περίπτωση είναι μειωμένος (5 πόροι κατά μέσο όρο), και σε αυτή τη περίπτωση οι πόροι κατά 90 % (± 5 %), έχουν μέση διάμετρο 0-4 mm, είναι δηλαδή διασπαρμένοι σε τέσσερις κλάσεις, αντί για τρεις που είναι οι αντίστοιχοι πόροι της προηγούμενης κατηγορίας.

Τέλος στην τρίτη αναλογία (5 %), ο μέσος όρος πόρων είναι μόλις 52, εκ των οποίων το 70 % (± 10 %), είναι πόροι μεγέθους 0-2 mm, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό, διασπείρεται ακανόνιστα σε μεγαλύτερες κλάσεις μεγέθους διαμέτρων. Έτσι σε ορισμένες περιπτώσεις συναντώνται και πόροι με αρκετά μεγάλο μέγεθος διαμέτρου (14-16 mm).

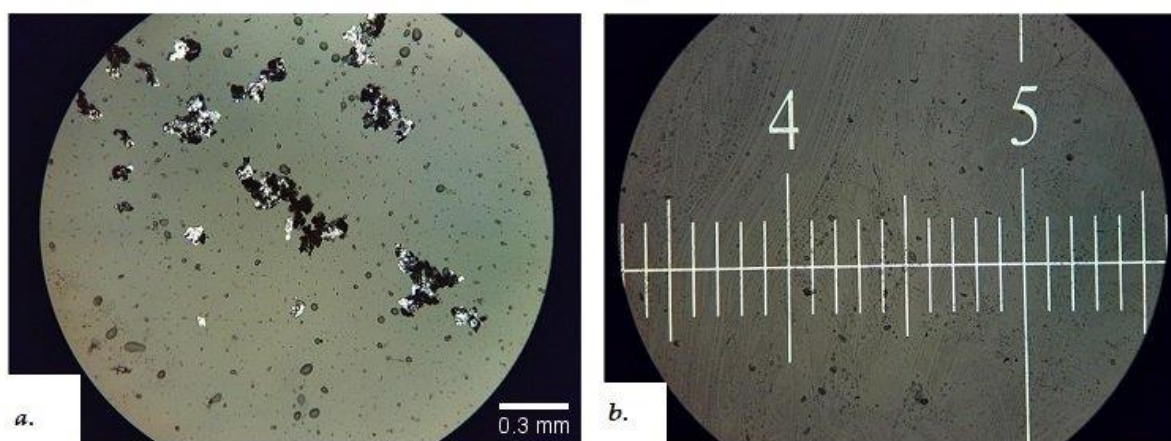
7.2.3 Παρατήρηση δοκιμίων στο οπτικό μικροσκόπιο

Στην παρούσα ενότητα παρατίθεται το φωτογραφικό υλικό που συλλέχτηκε από την παρατήρηση δοκιμίων στο οπτικό μικροσκόπιο. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, αφού πρώτα στιλβώθηκαν και γυαλίστηκαν οι επιφάνειες τους, είναι τα 2 ('B όψη), 5 (A όψη), 8 ('B όψη), 10 (A όψη), 11 ('B όψη) και 13 ('B όψη). Οι όψεις των παρενθέσεων αναφέρονται στις εικόνες των κομμένων δοκιμίων, της προηγούμενης παραγράφου.

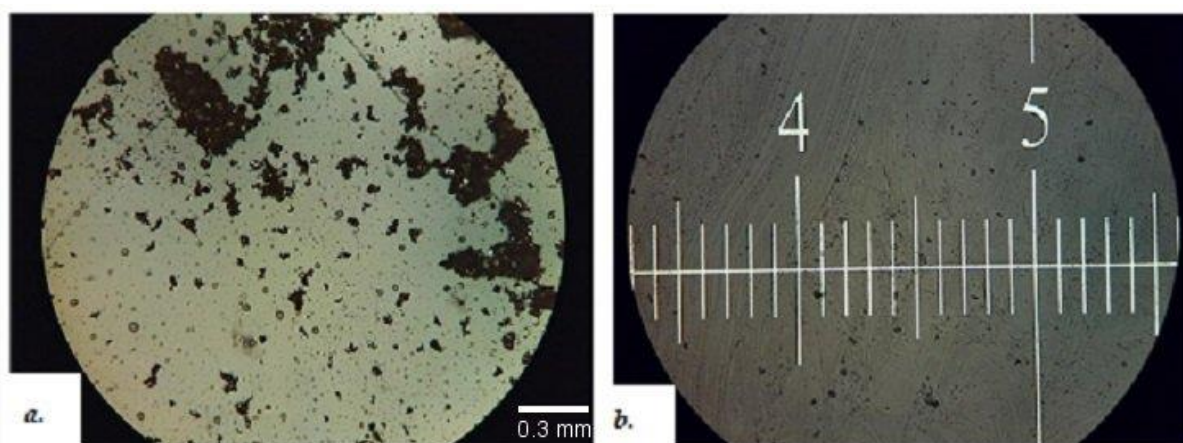
Αρχικά δίνονται οι εικόνες μεγέθυνσης των νιφάδων χάλυβα, και του αφριστικού παράγοντα (υδρίδιου του τιτανίου). Ακολουθούν οι εικόνες μεγέθυνσης των δοκιμίων. Για κάθε ένα από τα δοκίμια παρατίθεται μία εικόνα της όψης που χρησιμοποιήθηκε, στην οποία έχουν επισημανθεί τα σημεία τα οποία έχουν μεγεθυνθεί από το οπτικό μικροσκόπιο και οι αντίστοιχες φωτογραφίες που λήφθηκαν στις μεγεθύνσεις των σημείων αυτών.



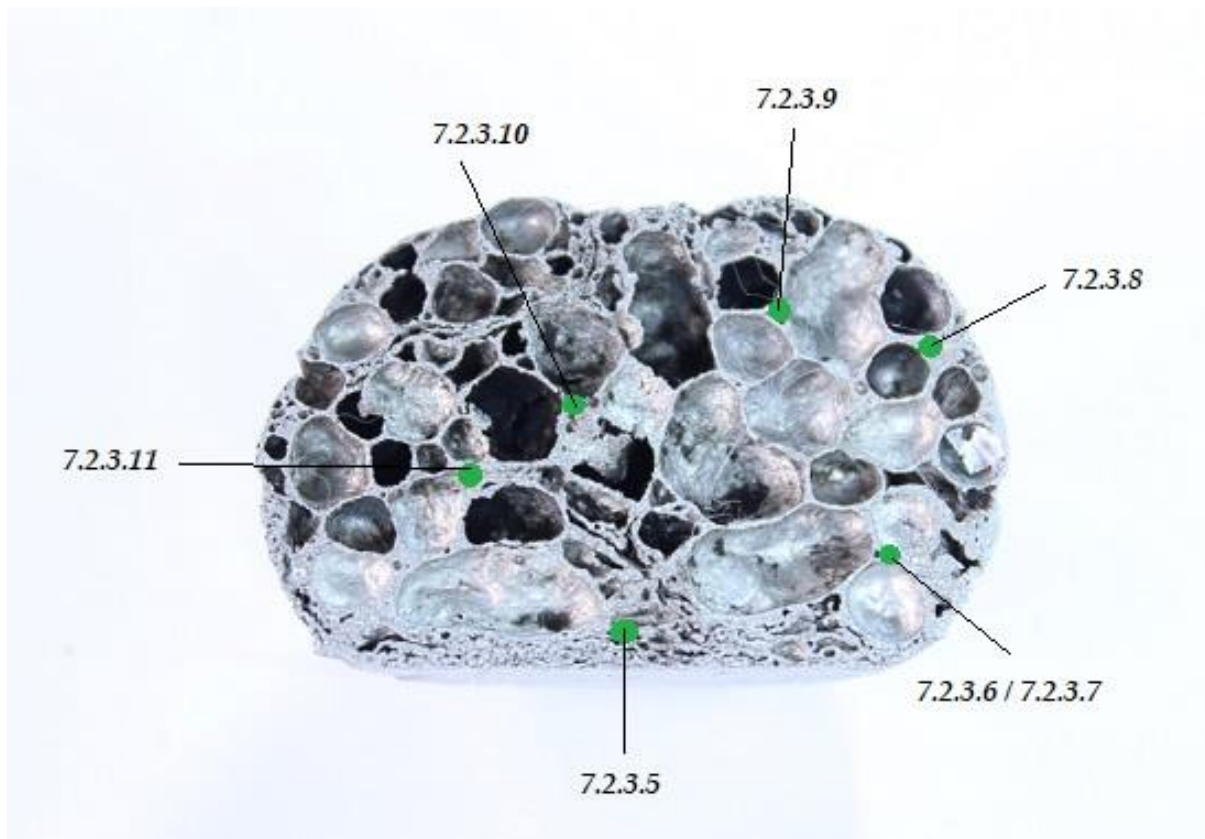
7.2.3 1 *a.* Νιφάδες χάλυβα σε μεγέθυνση (50x) *b.* κλίμακα μεγεθυμένη (50x)



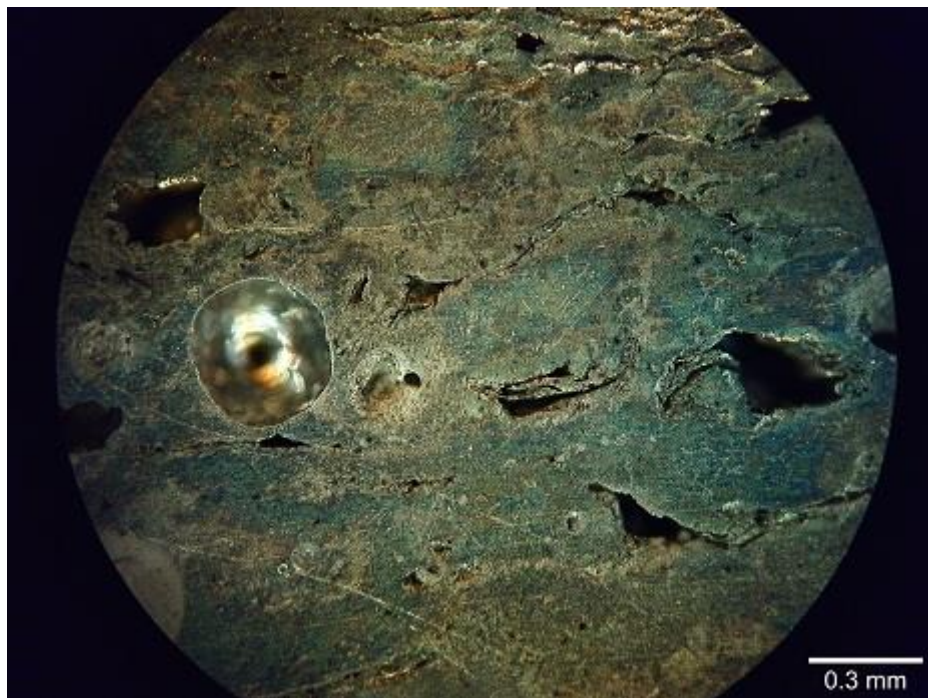
7.2.3 2 *a.* Νιφάδες χάλυβα σε μεγέθυνση (100x) *b.* κλίμακα μεγεθυμένη (100x)



7.2.3 3 *a.* Σκόνη TiH₂ σε μεγέθυνση (100x) *b.* κλίμακα μεγεθυμένη (100x)



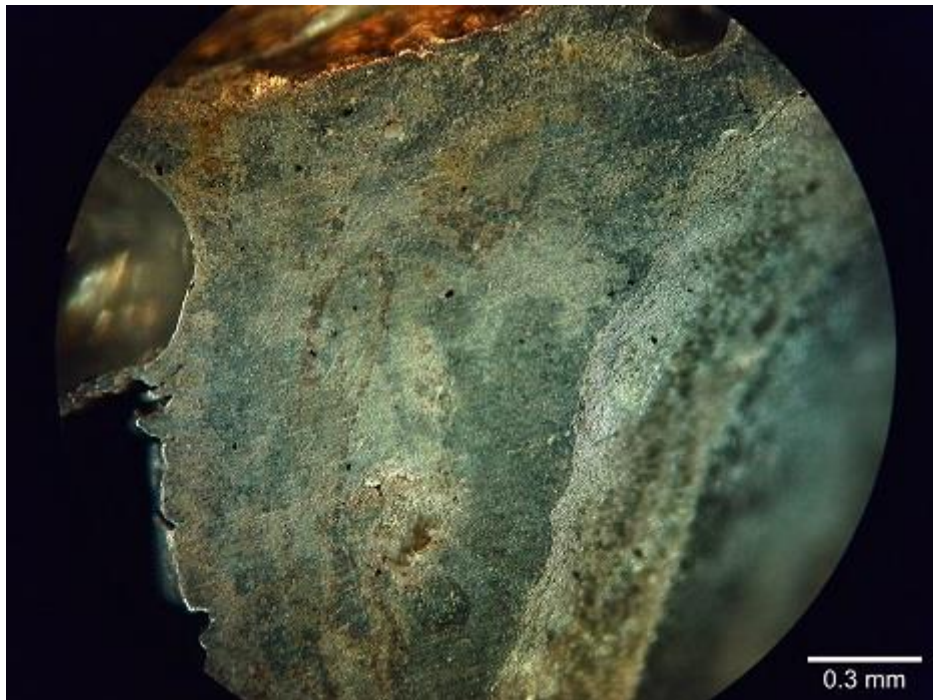
7.2.3 4 Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 2 (0 % κ.β. Steel Flakes), Β Οψη



7.2.3 5 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 2, Β Οψη



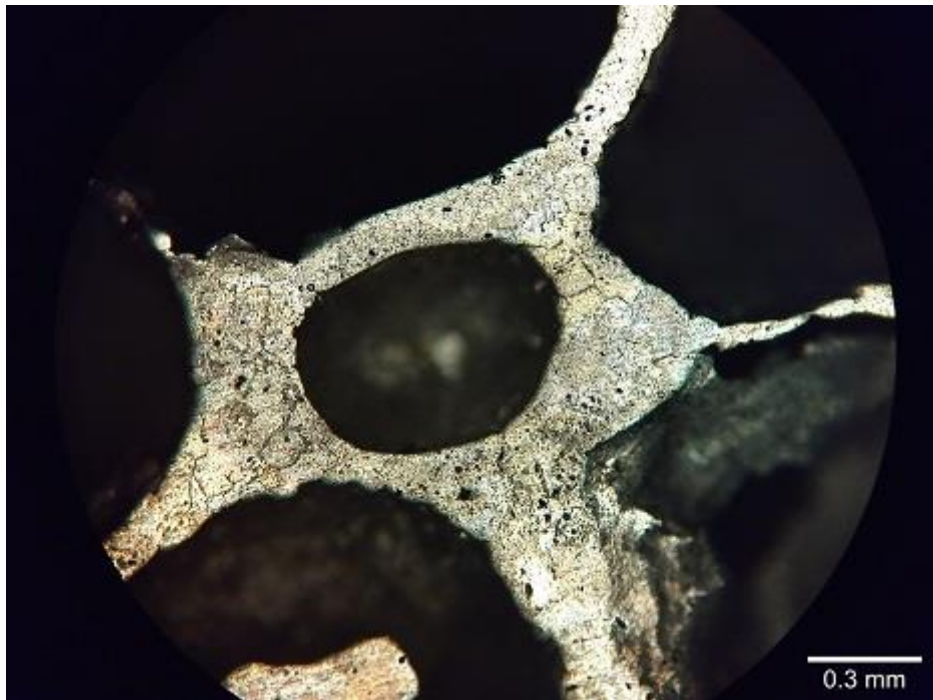
7.2.3 6 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Όψη



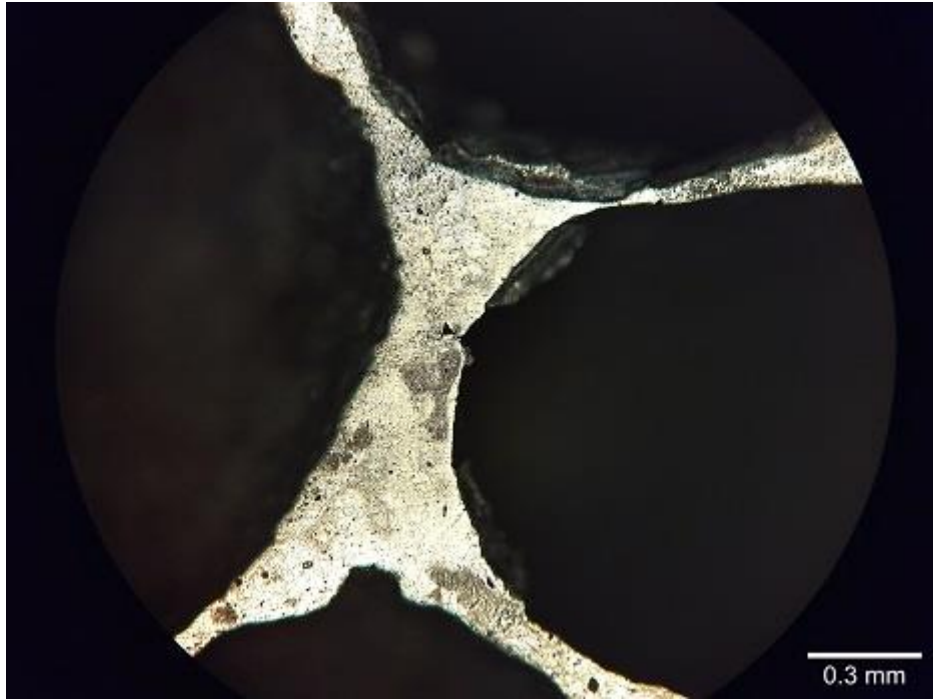
7.2.3 7 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 2, Β Όψη



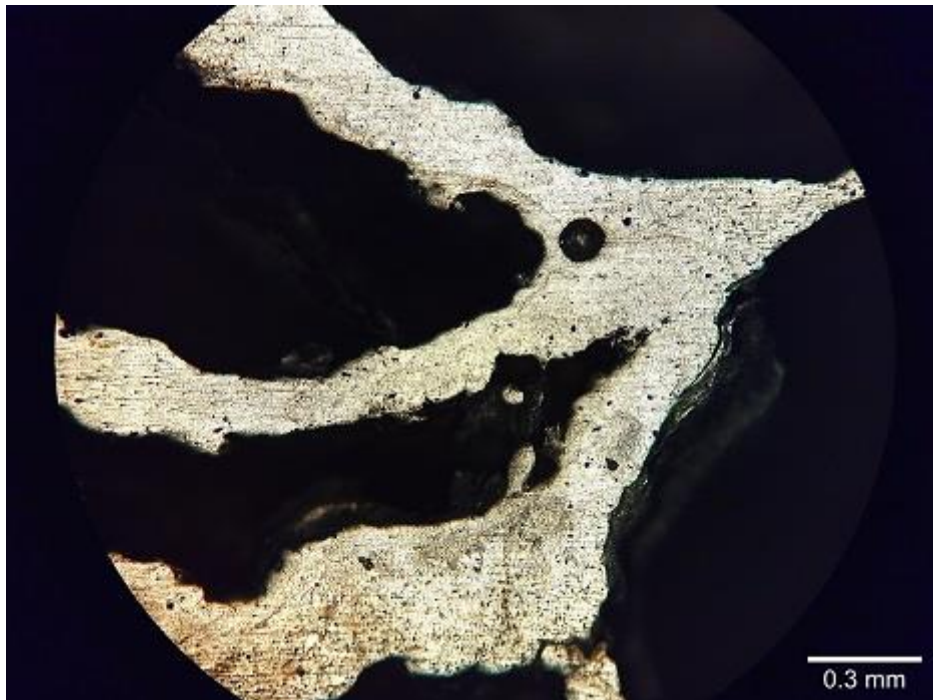
7.2.3 8 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Όψη



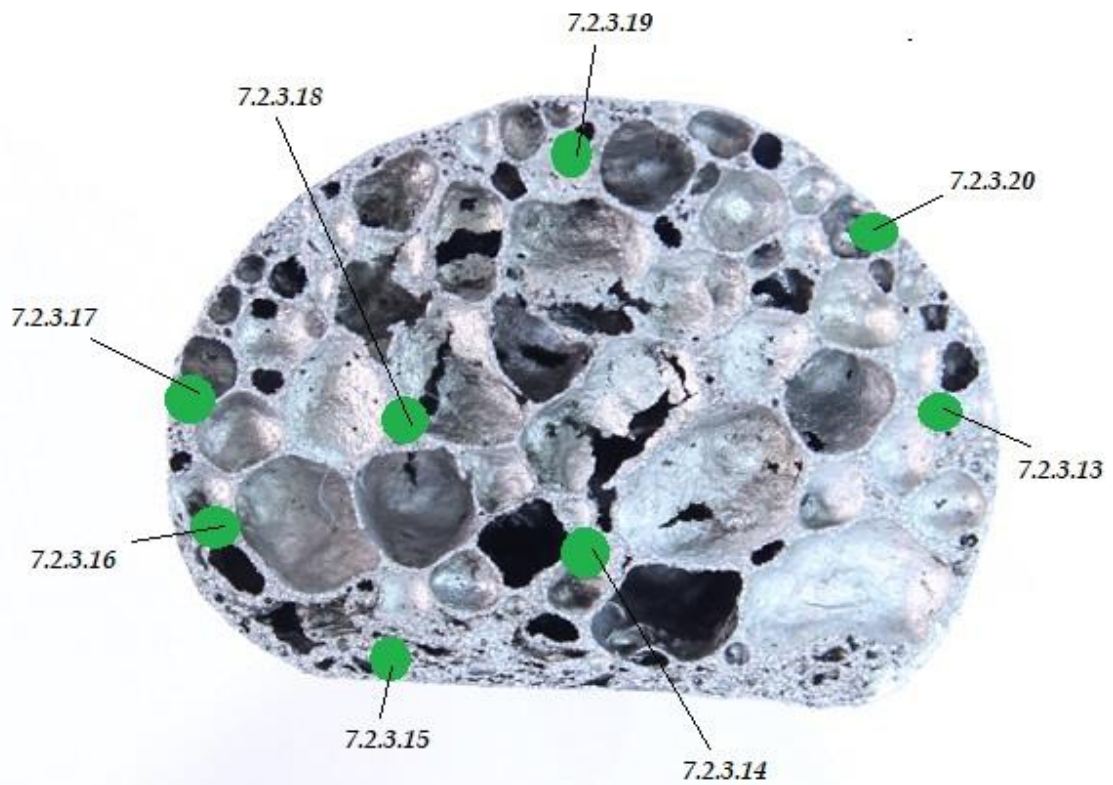
7.2.3 9 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Όψη



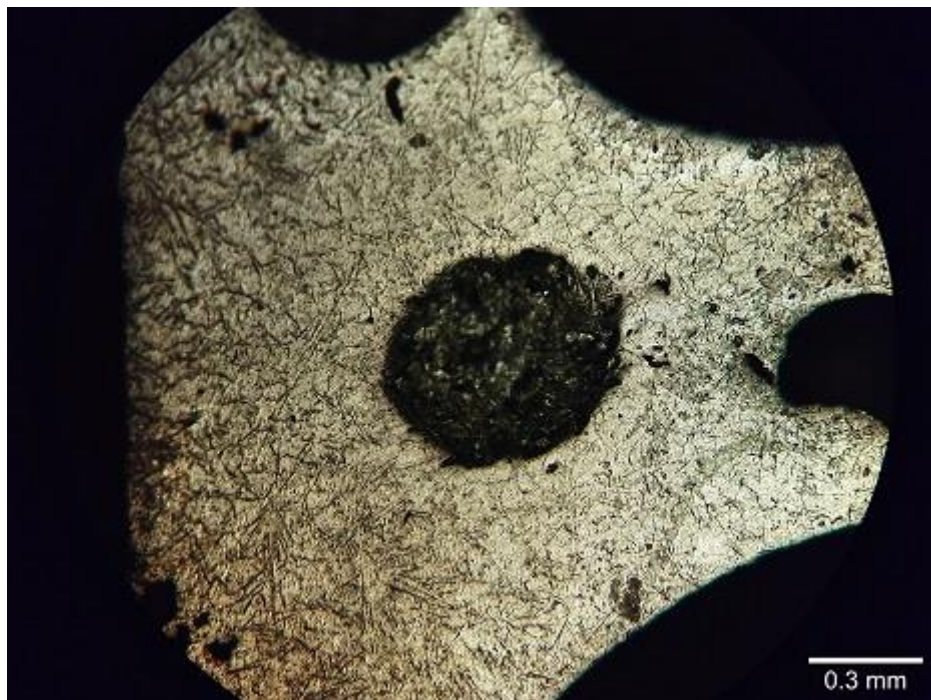
7.2.3 10 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Οψη



7.2.3 11 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 2, Β Οψη



7.2.3 12 Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 5 (2 % κ.β. Steel Flakes), Α Όψη



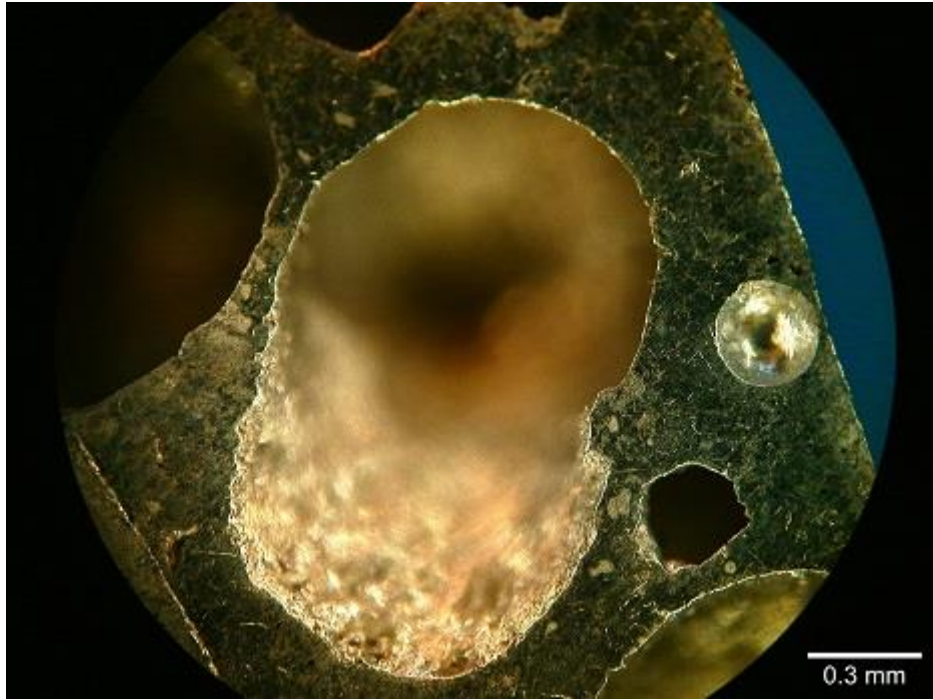
7.2.3 13 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη



7.2.3 14 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Οψη



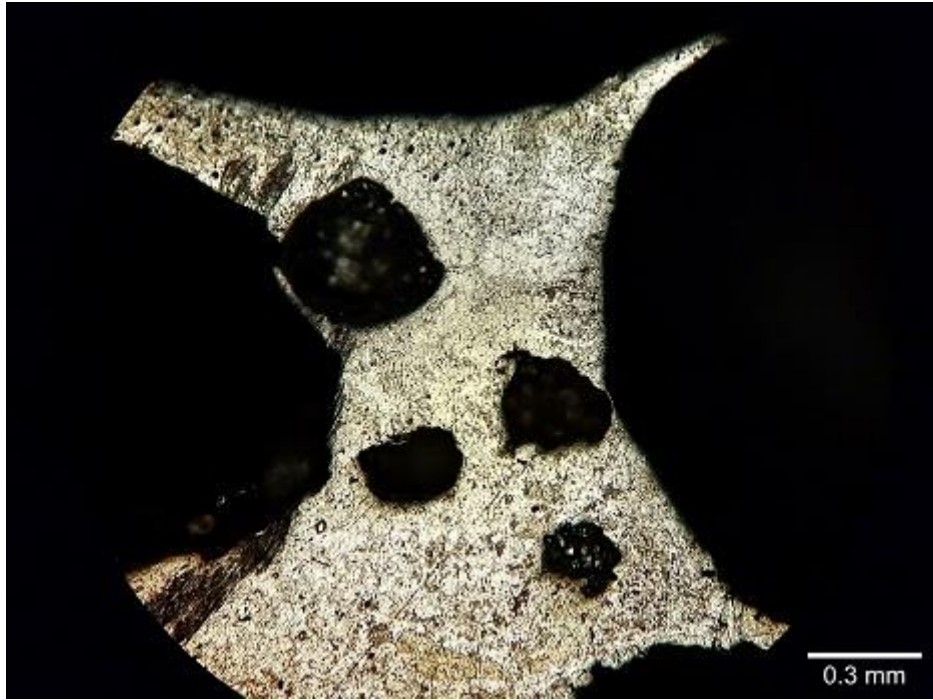
7.2.3 15 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Οψη



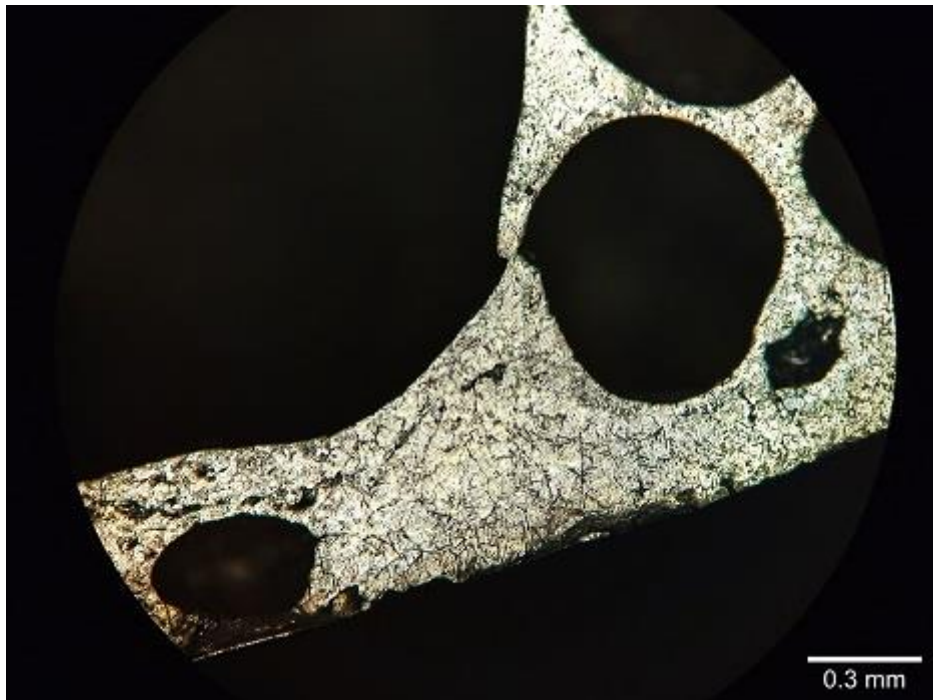
7.2.3 16 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 5, Α Οψη



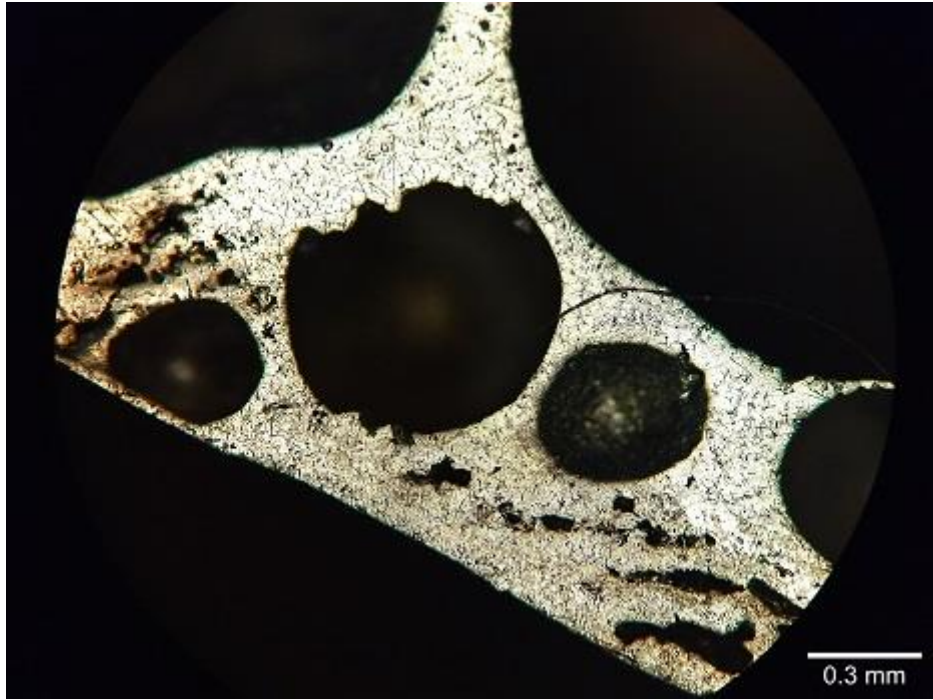
7.2.3 17 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Οψη



7.2.3 18 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Οψη



7.2.3 19 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Οψη



7.2.3 20 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 5, Α Όψη



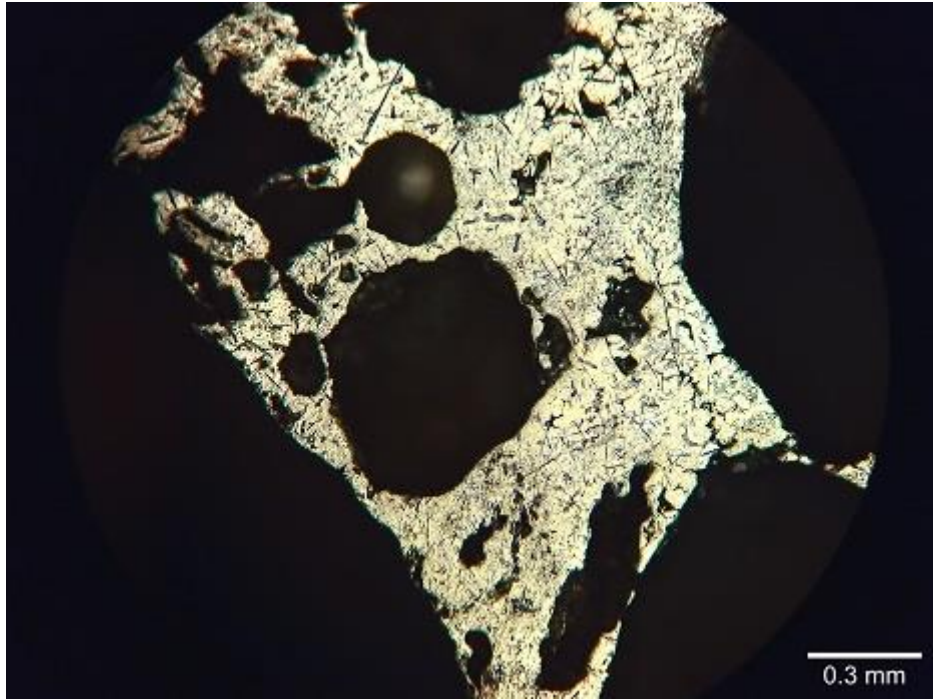
7.2.3 21 Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 8 (5 % κ.β. Steel Flakes), Β Όψη



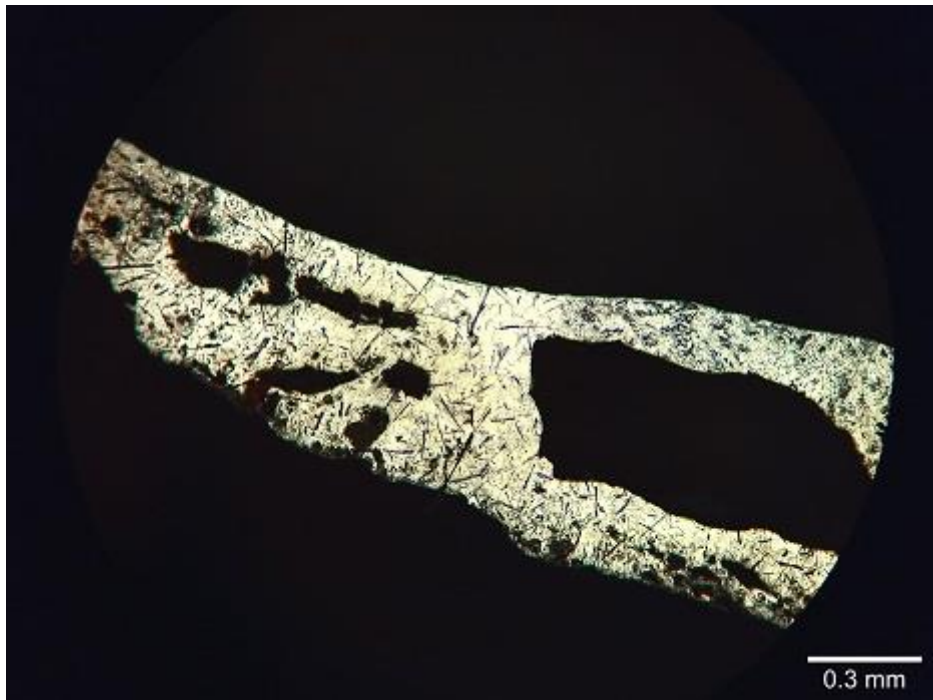
7.2.3 22 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Οψη



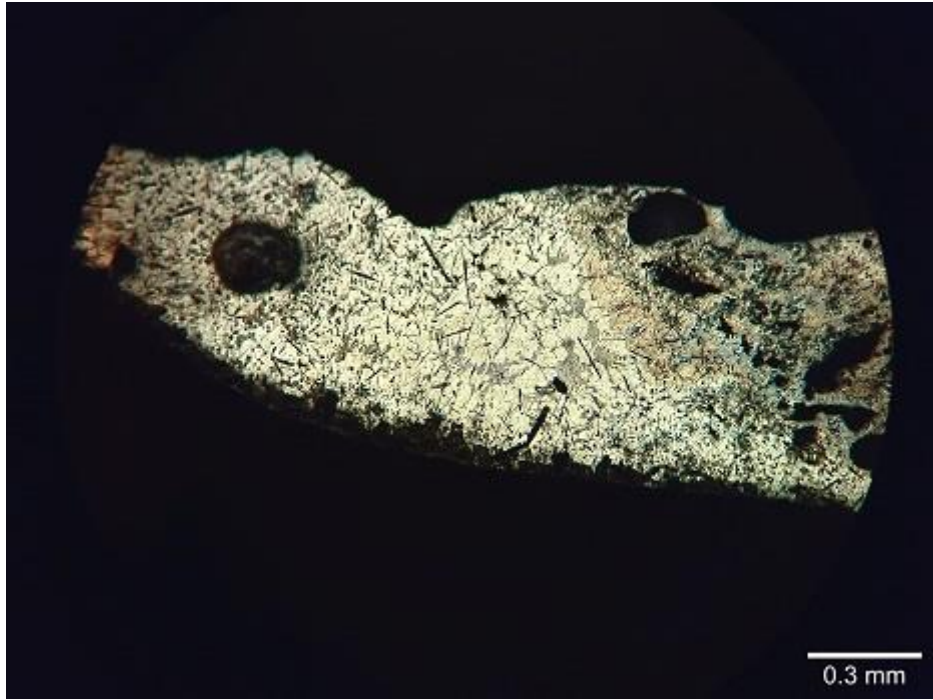
7.2.3 23 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Οψη



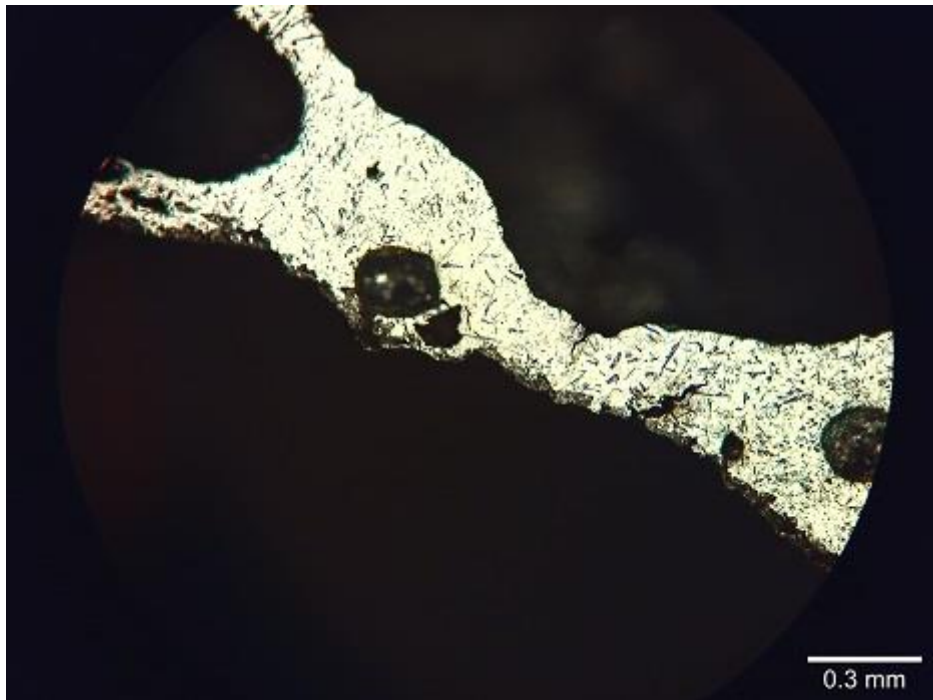
7.2.3 24 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Οψη



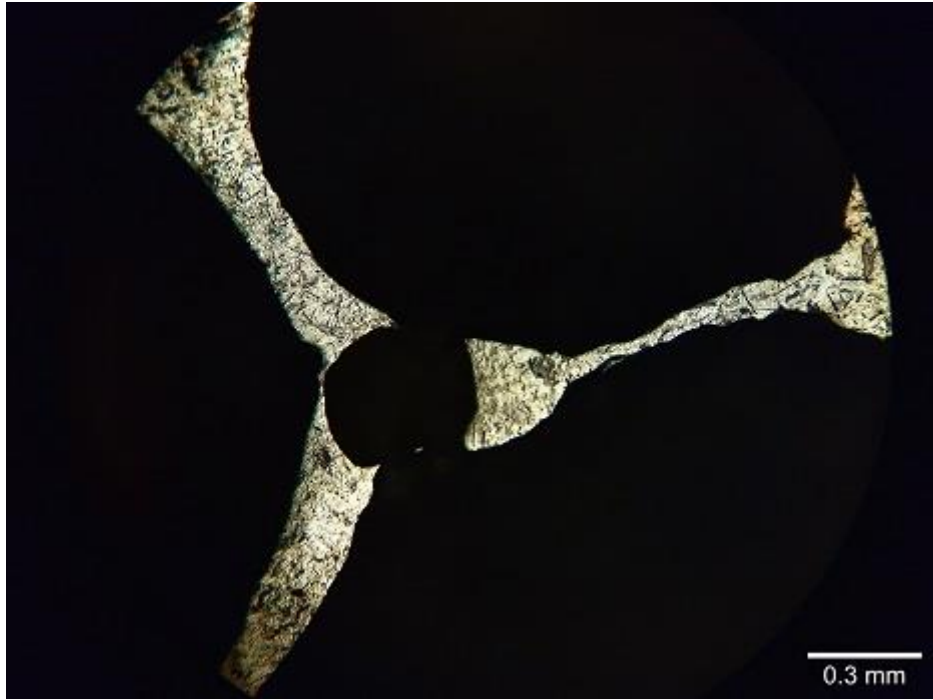
7.2.3 25 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Οψη



7.2.3 26 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Ξ Οψη



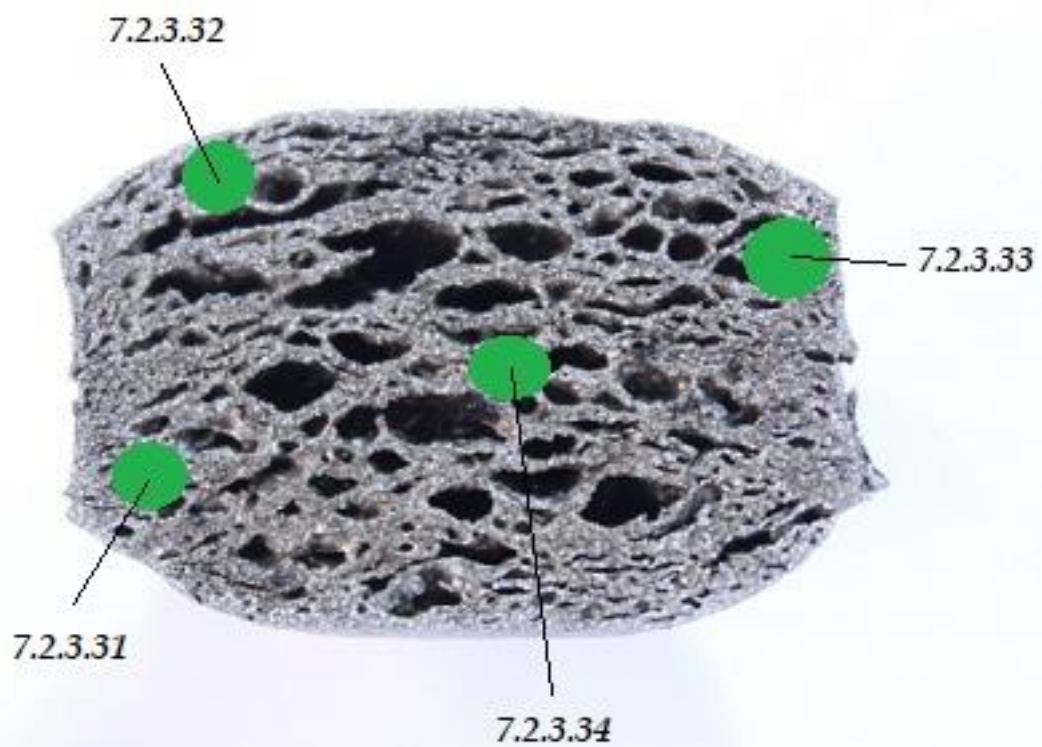
7.2.3 27 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Ξ Οψη



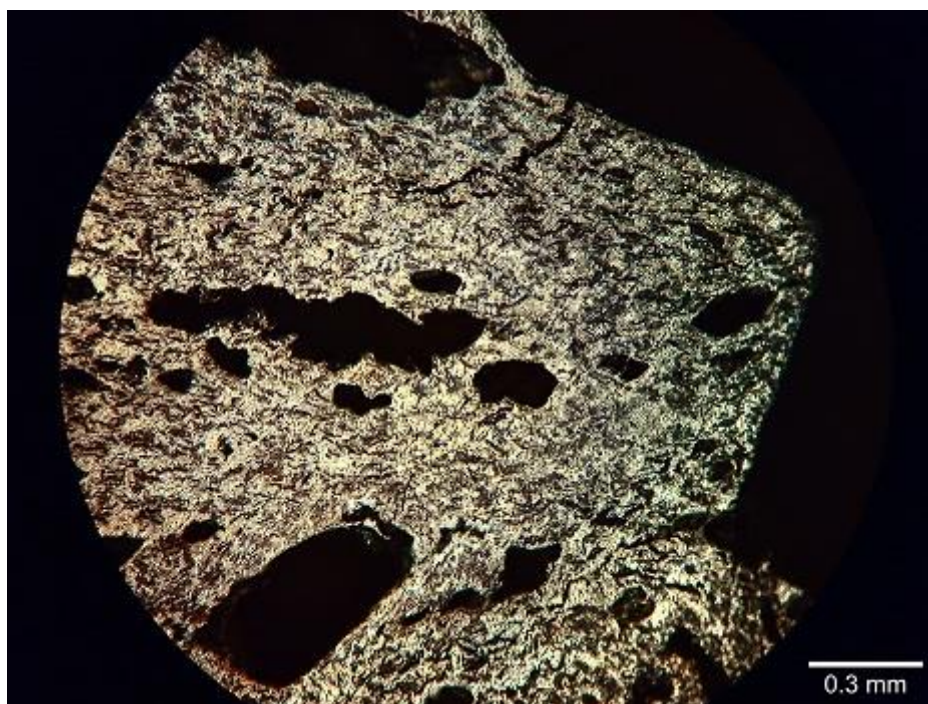
7.2.3 28 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Οψη



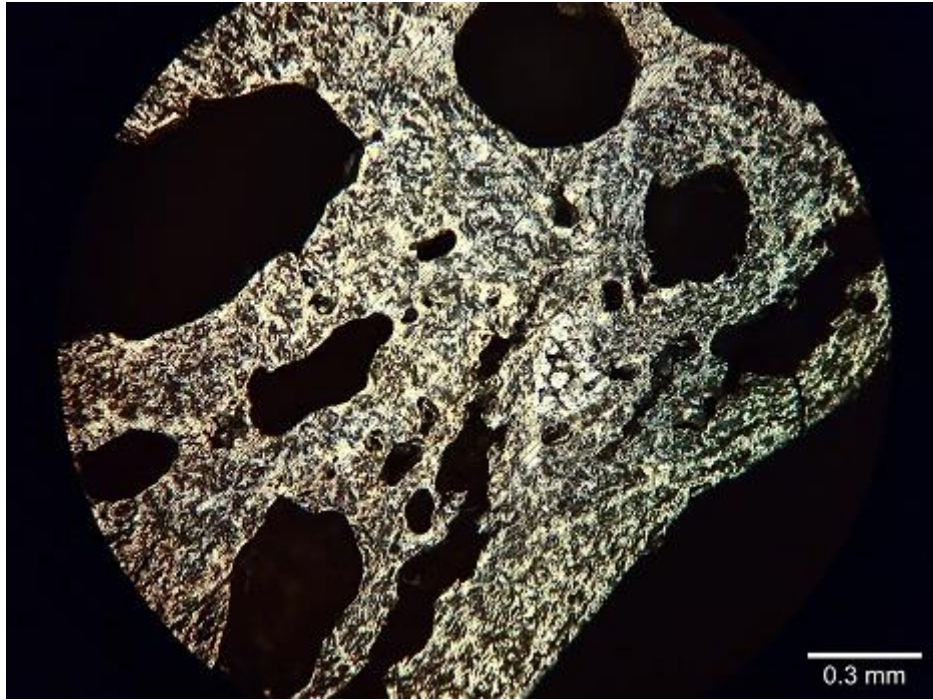
7.2.3 29 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (500x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 8, Β Οψη



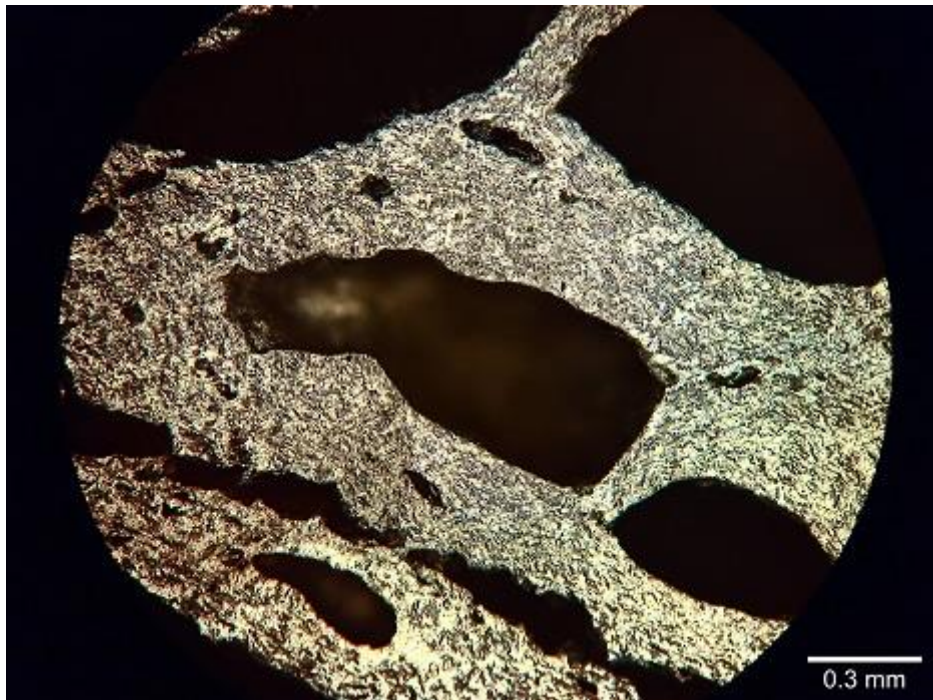
7.2.3 30 Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 10 (10 % κ.β. Steel Flakes), Α Οψη



7.2.3 31 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 10, Α Οψη



7.2.3 32 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 10, Α Οψη



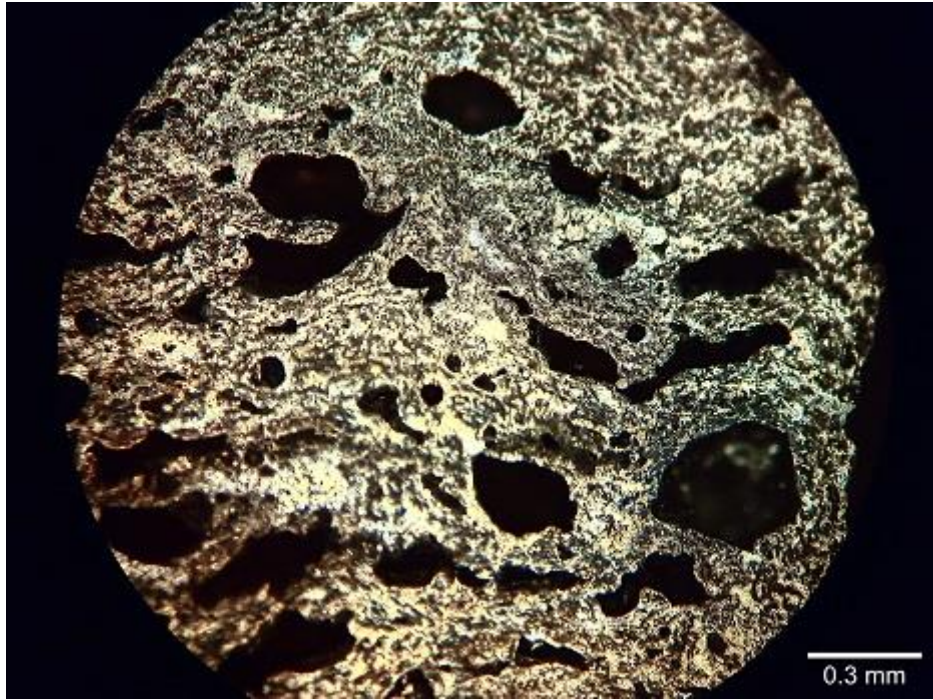
7.2.3 33 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 10, Α Οψη



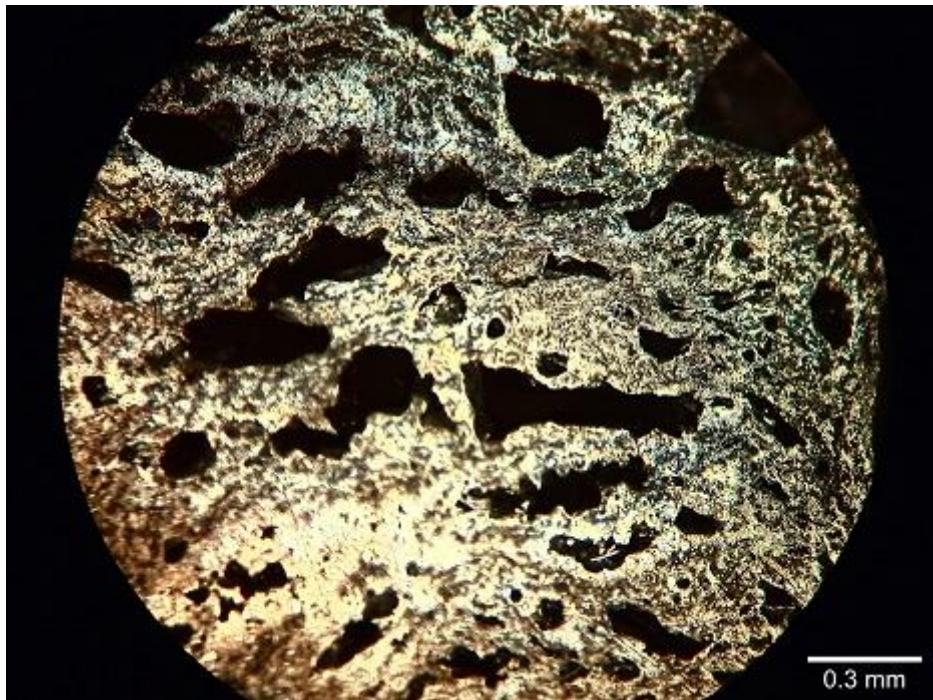
7.2.3 34 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 10, Α Όψη



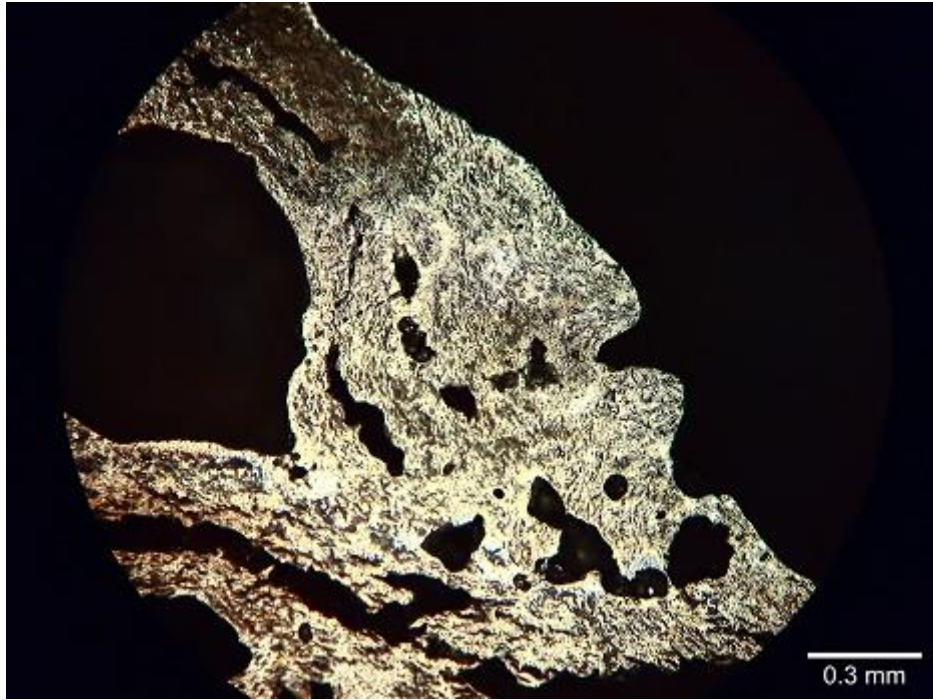
7.2.3 35 Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 11 (10 % κ.β. Steel Flakes), Β Όψη



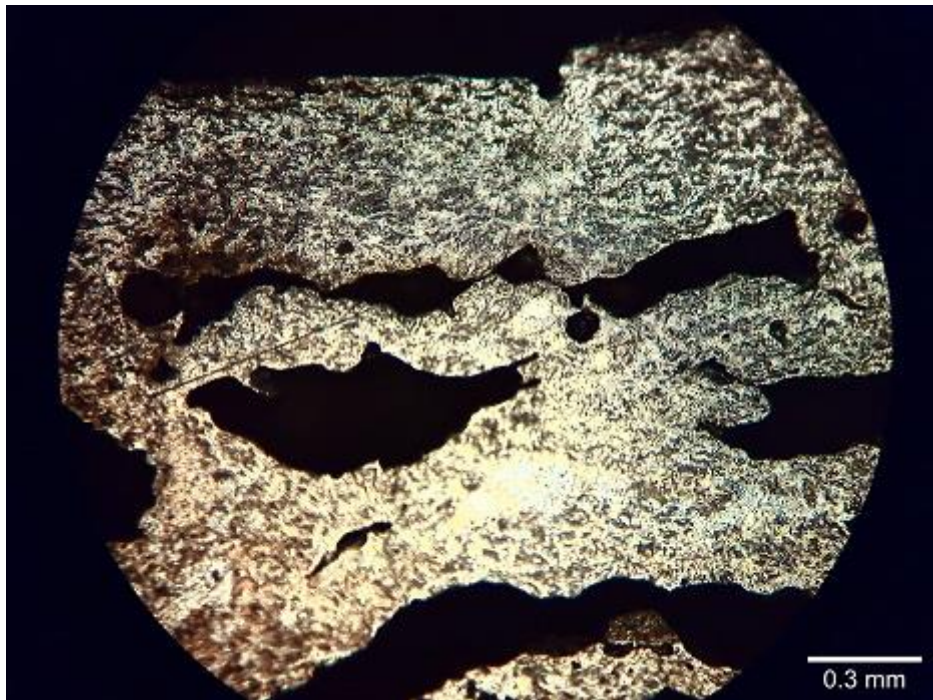
7.2.3 36 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη



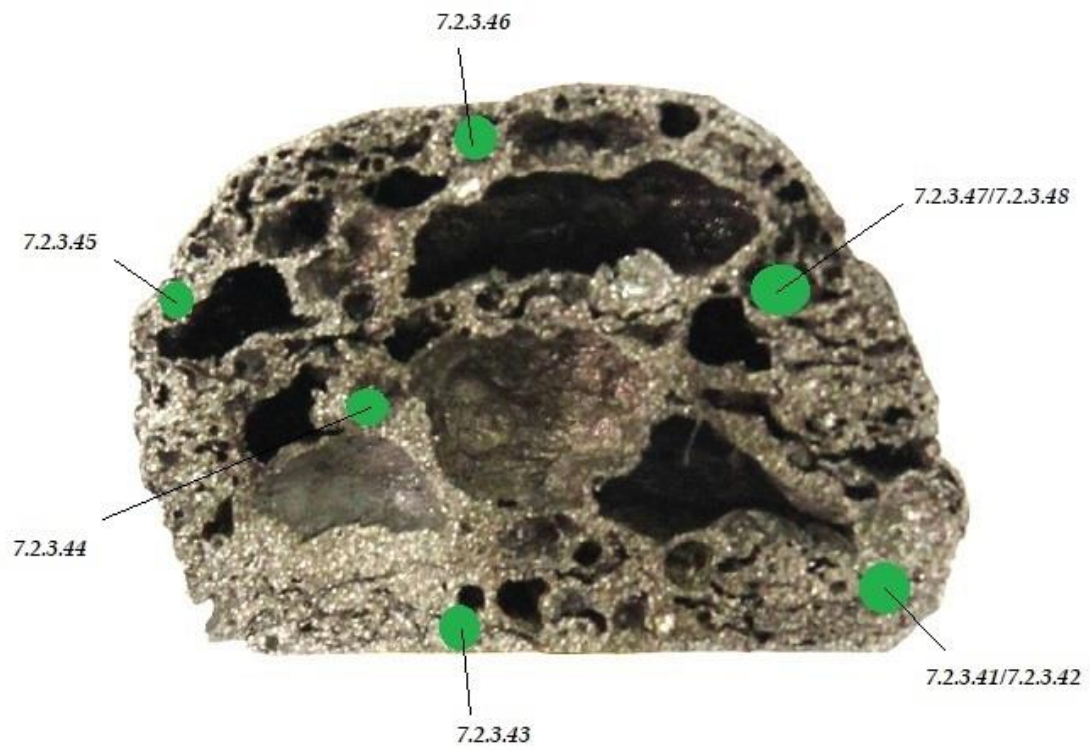
7.2.3 37 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη



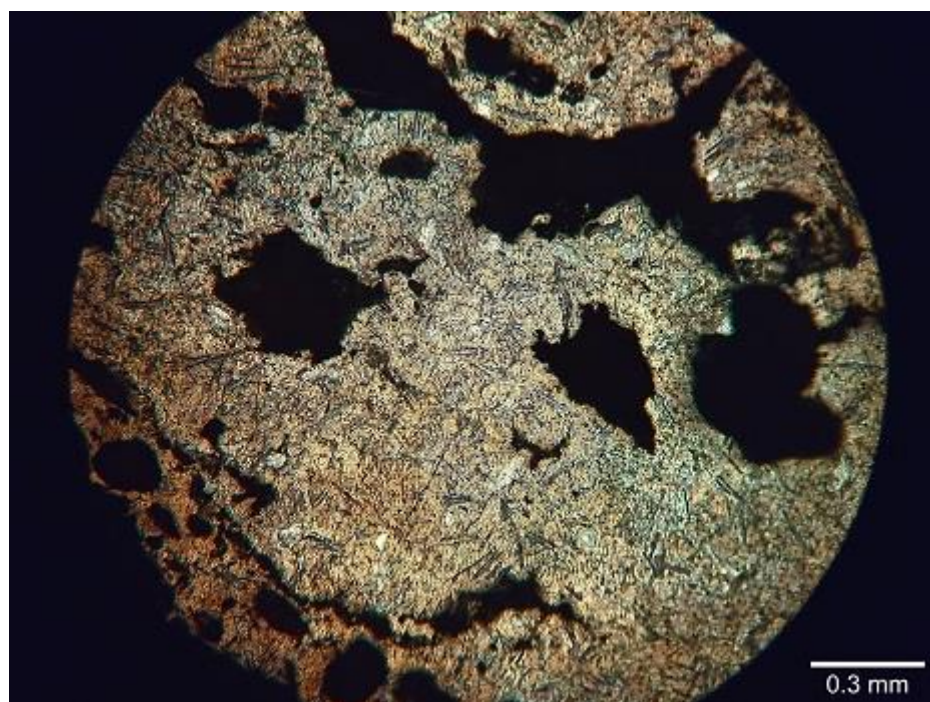
7.2.3 38 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη



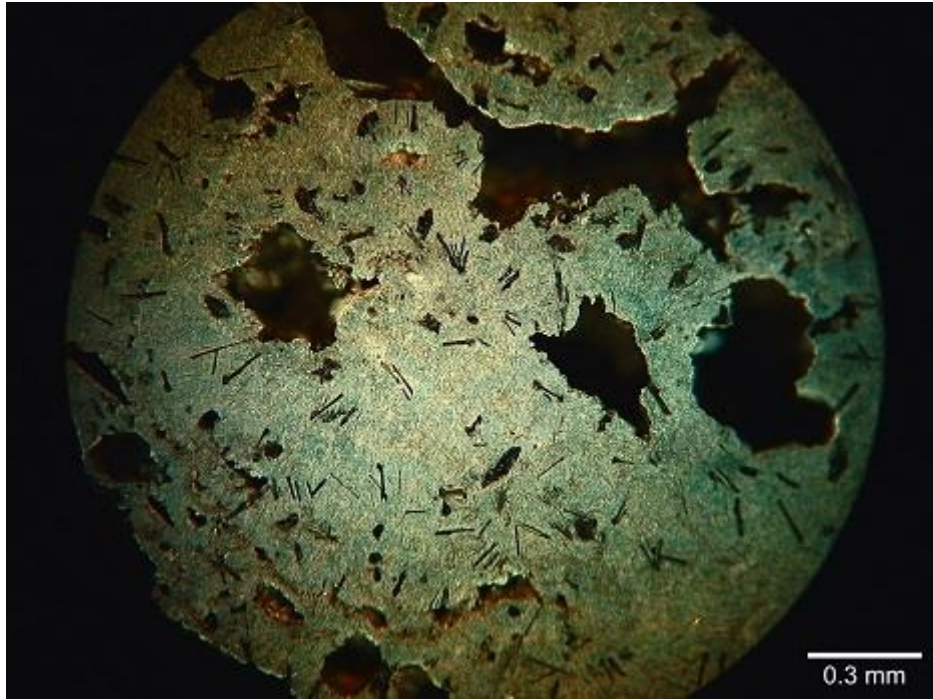
7.2.3 39 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 11, Β Όψη



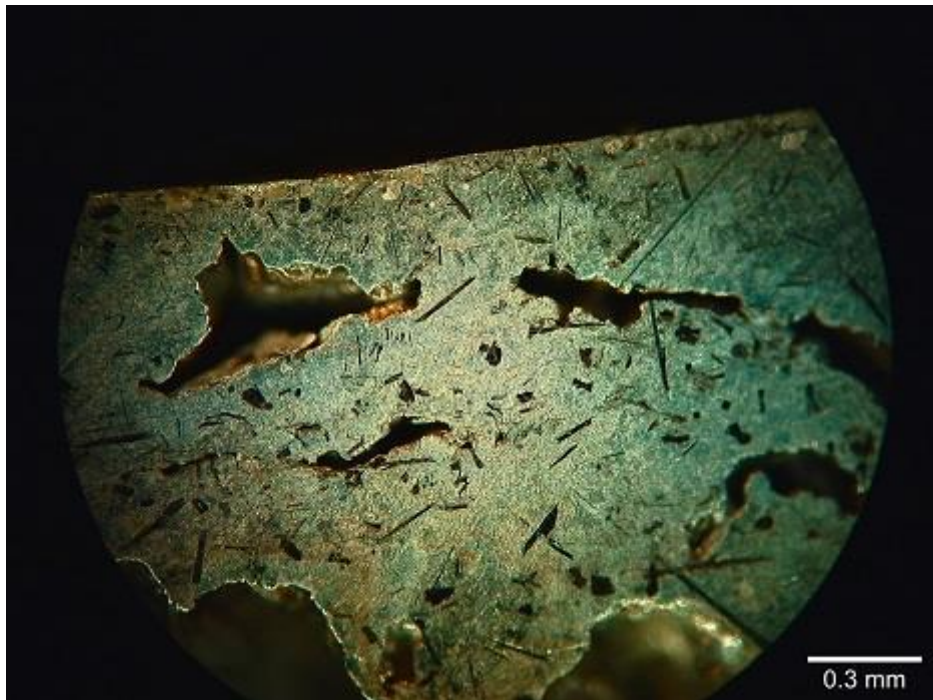
7.2.3 40 Σημεία μεγέθυνσης-λήψης στιγμιότυπων, Δοκίμιο 13 (8 % κ.β. Steel Flakes), Β Όψη



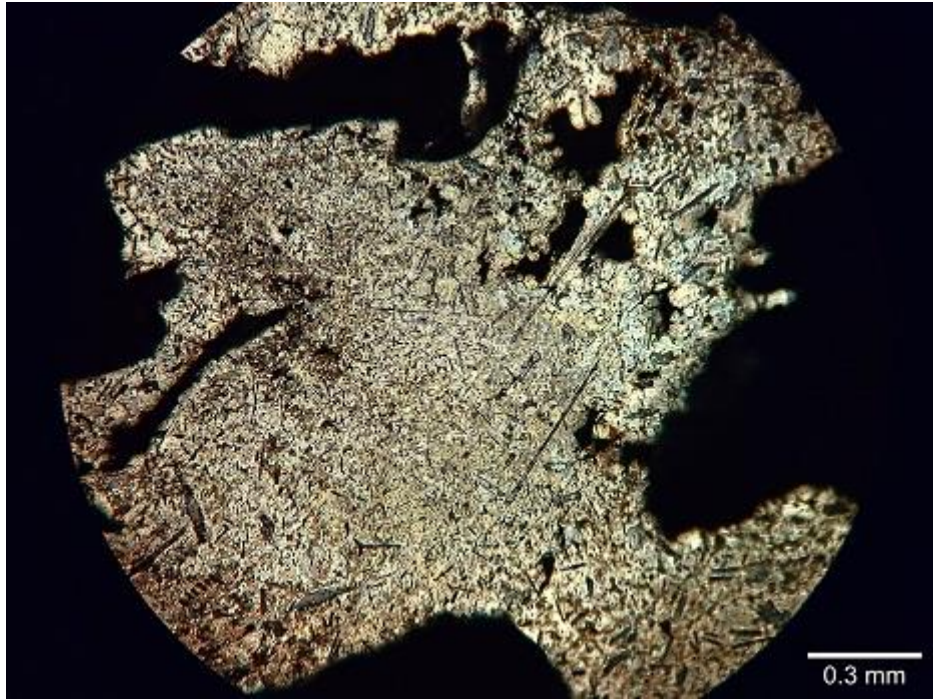
7.2.3 41 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, Β Όψη



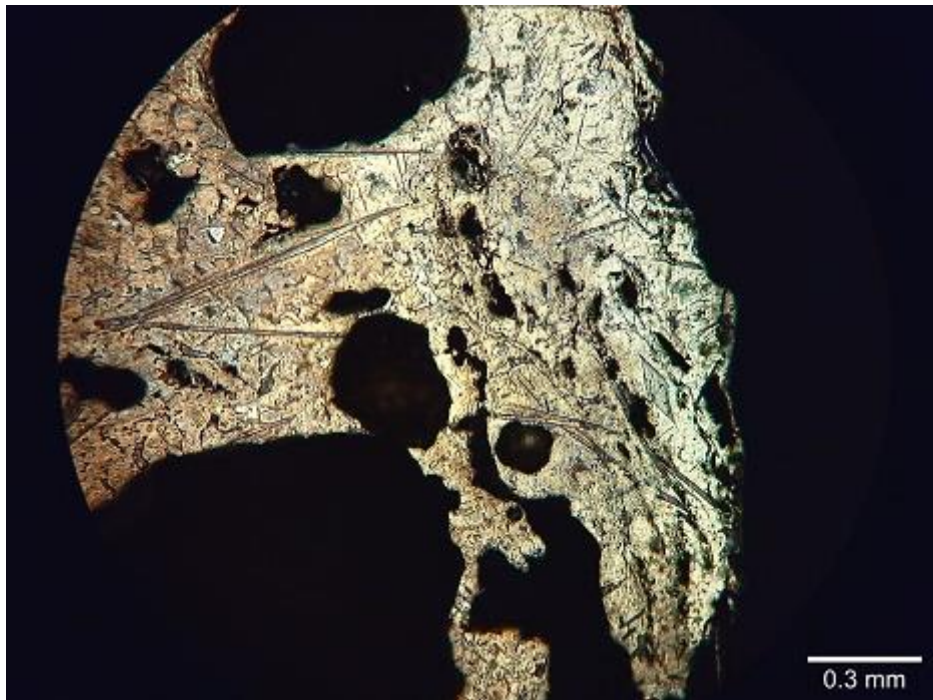
7.2.3 42 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 13, Β Όψη



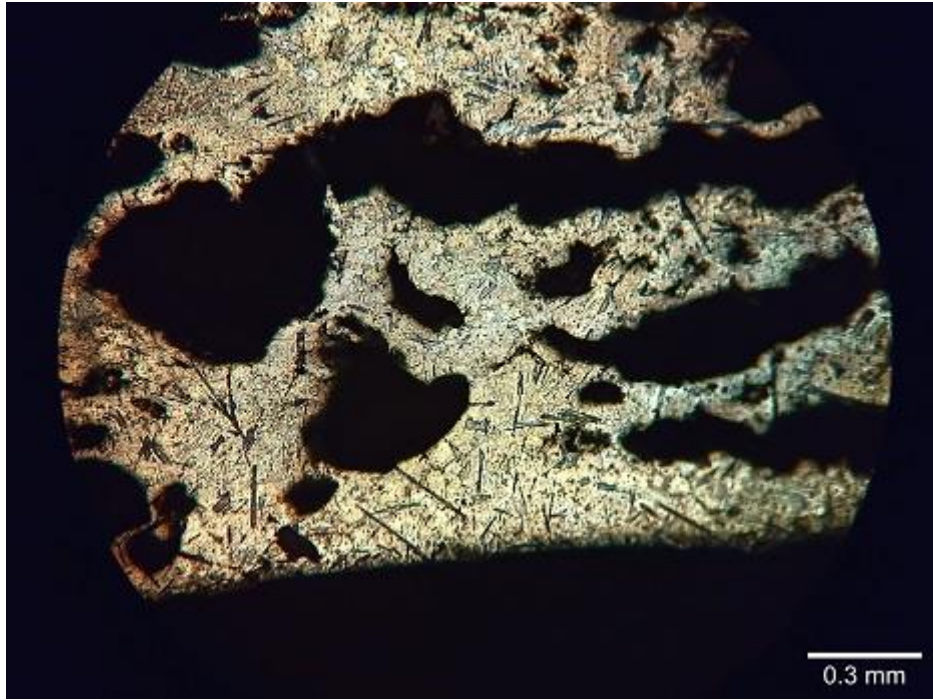
7.2.3 43 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 13, Β Όψη



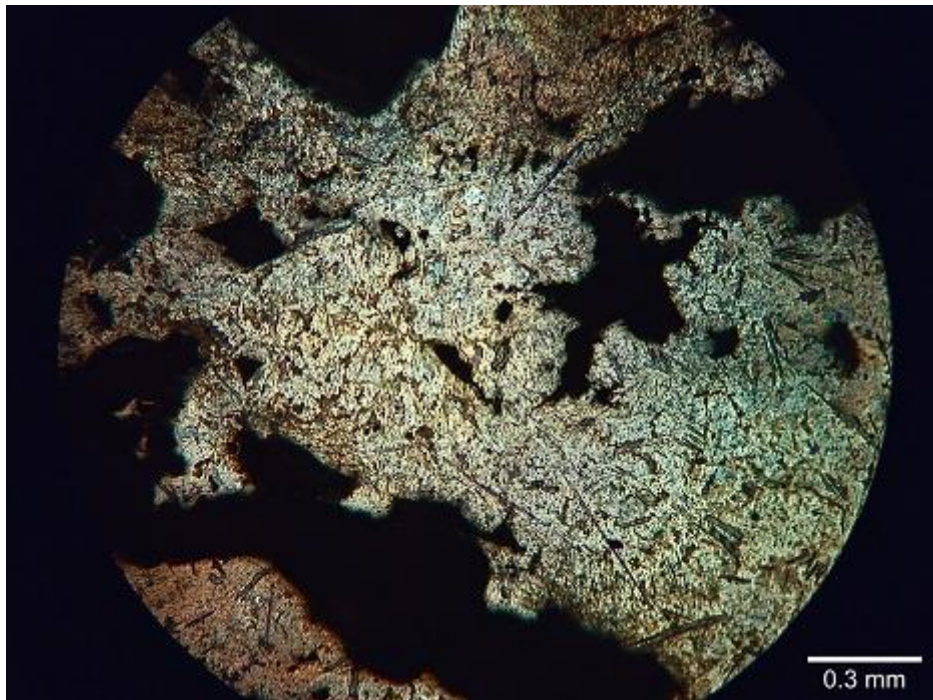
7.2.3 44 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, Β Όψη



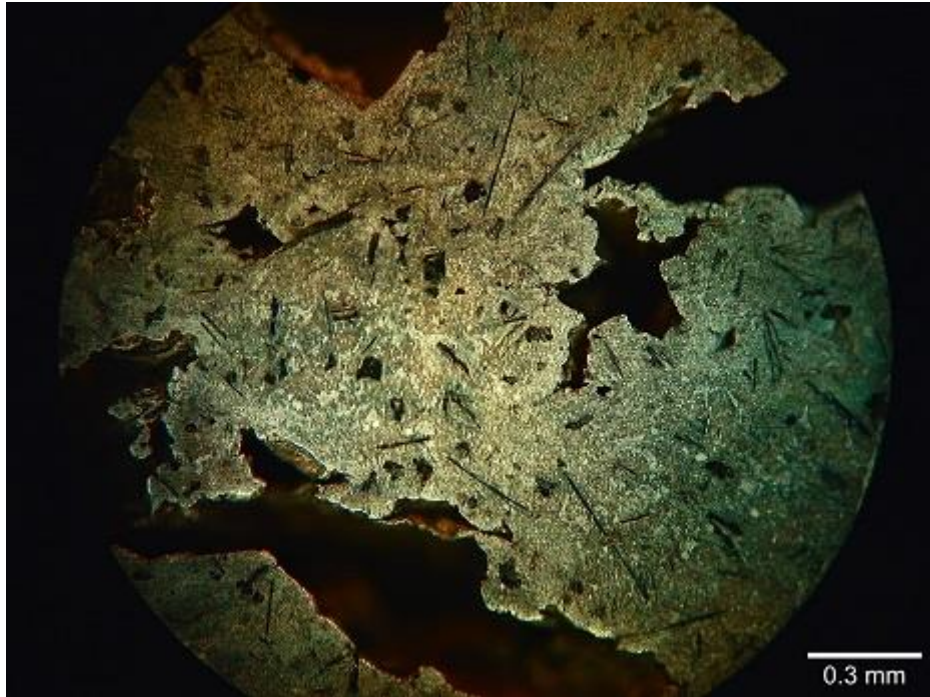
7.2.3 45 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, Β Όψη



7.2.3 46 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, Β Όψη



7.2.3 47 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Dark", Δοκίμιο 13, Β Όψη



7.2.3 48 Στιγμιότυπο σε μεγέθυνση (100x), Φίλτρο "Bright", Δοκίμιο 13, Β Οψη

Στις παραπάνω φωτογραφίες των δοκιμίων που περιέχουν νιφάδες χάλυβα, φαίνεται πως η διασπορά τους εντός του υπόλοιπου υλικού είναι καλή. Έτσι συναντώνται με την ίδια συχνότητα νιφάδες χάλυβα, τόσο στο μητρικό υλικό, όσο και στα τοιχώματα των κυψελίδων. Επίσης οι νιφάδες χάλυβα δεν προσανατολίζονται στους πόρους, τόσο στις χαμηλότερες όσο και στις υψηλότερες περιεκτικότητες.

Από την άλλη, στα δοκίμια με υψηλή περιεκτικότητα νιφάδων χάλυβα (8 και 10 % κ.β.), τα οποία μείνανε και περισσότερη ώρα εντός του επαγωγικού φούρνου, φαίνεται σαν να έχουν δημιουργηθεί διμεταλλικές φάσεις, εντός του μητρικού υλικού. Πιο χαρακτηριστικά, στο δοκίμιο με περιεκτικότητα 8 % σε νιφάδες χάλυβα, οι νιφάδες δείχνουν ότι έχουν μεγαλώσει σε μέγεθος. Αυτό πιθανότατα έγινε λόγω φαινομένων διάχυσης κατά την αφροποίηση, τα οποία οδήγησαν στην μετατροπή των νιφάδων χάλυβα σε διογκωμένα διμεταλλικά σωματίδια. Αυτό όμως είναι κάτι που θα μπορούσε να αποδειχθεί σε επόμενα πειράματα μέσω πειραμάτων σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Τέλος, από τις πιο πάνω εικόνες των δοκιμίων 2 (0 % κ.β περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα), 5 (2 %) και 8 (5 %), με την εφαρμογή Fiji, μετρήθηκε το πάχος των τοιχωμάτων, στο λεπτότερο σημείο τους και υπολογίστηκε το μέσο όρο για κάθε αναλογία (εικόνες 7.2.3 5 έως 7.2.3 29). Έτσι για το δοκίμιο 2 το μέσο πάχος

τοιχώματος στο λεπτότερο σημείο, είναι 0,117 mm. Για το δοκίμιο 5, το αντίστοιχο πάχος υπολογίστηκε 0,138 mm, και για το δοκίμιο 8, 0,149 mm. Συνεπώς στην περίπτωση προσθήκης νιφάδων χάλυβα κατά 2 % κ.β., παρατηρείται αύξηση στο μέσο πάχος των τοιχωμάτων κατά 15,2 %, και στο δοκίμιο με 5 % κ.β., η αύξηση είναι 21,5 %.

7.3 Συμπεράσματα

Στη παρούσα ενότητα συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, της προηγούμενης παραγράφου. Ενώ αυτά τα συμπεράσματα, έχουν ήδη αναφερθεί, εδώ γίνεται μια προσπάθεια να γενικευθούν, πάνω στη συμπεριφορά που εμφανίζουν παραγόμενοι μεταλλικοί αφροί με χρήση αφριστικού παράγοντα, και νιφάδων χάλυβα ως σταθεροποιητικού-ενισχυτικού παράγοντα, με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας.

Έτσι λοιπόν, από τη μελέτη της διαστολής του όγκου των δοκιμίων, αυτό που προέκυψε από τη διαδικασία, ήταν ότι σε μικρές περιεκτικότητες νιφάδων χάλυβα η αφροποίηση των δοκιμίων μοιάζει με αυτή των δοκιμίων χωρίς τη προσθήκη νιφάδων. Μάλιστα στη περιεκτικότητα 2 %, φαίνεται πως οι παραγόμενοι μεταλλικοί αφροί έχουν ενισχυθεί καθώς έχουν διασταλεί σε μεγαλύτερο βαθμό και σε ταχύτερο χρόνο (5 % επιπλέον διαστολή και ταχύτερα κατά 30 sec). Κατά τη μετάβαση στη περιεκτικότητα 5 % κ.β., η καμπύλη της διαστολής έχει πλησιάσει αρκετά την καμπύλη των δοκιμίων χωρίς την προσθήκη νιφάδων τόσο κατά τον άξονα του χρόνου, όσο και κατά τον άξονα της διόγκωσης. Από εκεί και έπειτα, όσο ανεβαίνουμε σε περιεκτικότητα, τόσο φαίνεται ότι “δυσκολεύεται” να πραγματοποιηθεί αφροποίηση, και στις πιο μεγάλες περιεκτικότητες τα δοκίμια διογκώνονται λίγο σε σχέση με τα δοκίμια χαμηλών περιεκτικότητων, χωρίς όμως να σχηματίζουν χαρακτηριστική κυψελοειδή δομή στο εσωτερικό τους. Το δοκίμιο περιεκτικότητας 8 % κ.β., φαίνεται πως αν και έχει μικρότερη διαστολή, αυτή επιτυγχάνεται γρηγορότερα. Αν αυξηθεί περισσότερο η περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα (10 % κ.β.), η διαστολή του όγκου είναι ακόμη μικρότερη, και χαμηλότερη του κατώτερου ορίου (60 %) που συναντώνται στους μεταλλικούς αφρούς που παρασκευάζονται με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και προσθήκη αφριστικού παράγοντα. Ωστόσο ενδιαφέρον στη συμπεριφορά των δοκιμίων με αυξημένη περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα, είναι το γεγονός πως στην μία περίπτωση (8 %) είναι πιο ομαλή η κατάρρευση, όπου παρότι αρχικά η

δομή του υλικού φαίνεται να καταρρέει, η κατάρρευση (το κομμάτι δηλαδή της καμπύλης με αρνητική κλίση μετά το μέγιστο σημείο αφροποίησης) είναι πιο ομαλή, και σταματάει νωρίτερα με αποτέλεσμα το δοκίμιο να διατηρεί το περισσότερο όγκο της μέγιστης διαστολής του, ενώ στην περίπτωση περιεκτικότητας 10 % κ.β., τα δοκίμια, ενώ έχουν διογκωθεί το λιγότερο σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις φαίνεται να μην καταρρέουν ποτέ και να διατηρούν διαστολή όγκου 40-55 %, (ακόμη και για το δοκίμιο που παρέμεινε στον επαγωγικό φούρνο έως και μιάμιση ώρα).

Αναφορικά με το πορώδες, παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε νιφάδες χάλυβα, τόσο μειώνεται το πλήθος των πόρων που δημιουργούνται, και τα μεγέθη αυτών των πόρων διαφέρουν έντονα. Υπάρχει δηλαδή ένα μεγάλο ποσοστό πόρων με πάρα πολύ μικρό μέγεθος, ενώ από την άλλη υπάρχει και ένα ποσοστό πόρων (μικρό βέβαια αυτή τη φορά) που καταλαμβάνουν πολύ μεγαλύτερο χώρο, και αποτελούν σημαντικό μέρος της διαστολής του όγκου των δοκιμίων. Έτσι η κατανομή του πορώδους σε αυτή τη περίπτωση είναι ακανόνιστη και δεν υπάρχει μια σχετική ομοιομορφία σε ολόκληρο το δοκίμιο. Όσο όμως μειώνεται η περιεκτικότητα κατά βάρος, των νιφάδων χάλυβα, τόσο το πορώδες αρχίζει να παρουσιάζει ομοιομορφία, και να συμπεριφέρεται παραπλήσια με τη συμπεριφορά των δοκιμίων χωρίς την προσθήκη νιφάδων. Στη περιεκτικότητα 2 % κ.β. παρατηρείται η καλύτερη ομοιομορφία των πόρων, το μέγεθος των οποίων κατανέμεται πιο ομοιόμορφα στο ίδιο εύρος διαστάσεων (0-8 mm) με αυτό των πόρων στα δοκίμια χωρίς νιφάδες χάλυβα.

Τέλος, σε μικροσκοπικό επίπεδο, οι νιφάδες χάλυβα, παρουσιάζουν πολύ καλή κατανομή στο μητρικό υλικό, χωρίς αυτές να προσανατολίζονται στους πόρους των δοκιμίων. Αυτό αποτελεί ένα θετικό αποτέλεσμα που λαμβάνεται, καθώς με αυτό το τρόπο εμποδίζεται και το φαινόμενο του «drainage», που είναι η ροή του υλικού προς τα κάτω, κατά της αφροποίησης των δοκιμίων, με την παράλληλη λέπτυνση των τοιχωμάτων των πόρων.^[152] Επίσης, η προσθήκη των νιφάδων ενισχύει τα τοιχώματα των κυψελίδων, τα οποία έχουν αυξημένο πάχος. Η υψηλή περιεκτικότητα των δοκιμίων σε νιφάδες χάλυβα, φαίνεται πως επηρεάζει στη δημιουργία δικτύματος διμεταλλικών φάσεων των νιφάδων, εντός του μητρικού υλικού, όσο περισσότερο παραμένουν και τα δοκίμια εντός του επαγωγικού φούρνου. Για να ειπωθεί όμως κάτι τέτοιο με βεβαιότητα, πρέπει να επέλθει περισσότερη έρευνα, με μελέτη των δοκιμίων και σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Συνοψίζοντας, η προσθήκη διαφορετικών αναλογιών νιφάδων χάλυβα σε μίγμα μεταλλικής σκόνης και αφριστικού παράγοντα, παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον

σε κάθε περίπτωση. Ενώ στις χαμηλότερες περιεκτικότητες με χρήση της μεθόδου της κονιομεταλλουργίας, φαίνεται πως λειτουργεί ως προσθήκη ενίσχυσης στο μίγμα των κόνεων, στις υψηλότερες περιεκτικότητες, παρουσιάζεται μία διαφορετική συμπεριφορά στην αφροποίηση και στην διόγκωση που δημιουργείται, που ωστόσο, τουλάχιστον φαινομενικά, τα δοκίμια δε καταρρέουν, έπειτα και από πολύ ώρα παραμονής τους εντός του επαγωγικού φούρνου.

7.4 Προτάσεις

Βάσει των όσων ειπώθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, είναι φανερό πως η παραγωγή μεταλλικών αφρών με προσθήκη σταθεροποιητικών και ενισχυτικών παραγόντων παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον για την βελτιστοποίηση των μεταλλικών αφρών και των ιδιοτήτων τους. Μάλιστα στη πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε εδώ, ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσθήκη νιφάδων χάλυβα τόσο σε μικρές όσο και σε μεγαλύτερες ποσότητες-περιεκτικότητες, και δημιουργείται ανάγκη για επιπλέον έρευνα σε κάθε περίπτωση.

Κατά συνέπεια, μία αρχική πρόταση για συνέχιση της παρούσας έρευνας, και διεξαγωγής περισσότερων συμπερασμάτων, αποτελεί η εκπόνηση μηχανικών δοκιμών όπου τα παραγόμενα δοκίμια όλων των αναλογιών, θα περάσουν από μια σειρά καταπονήσεων, και θα προκύψουν τα όρια αντοχών, και τα ποσοστά ενέργειας που μπορούν να απορροφηθούν σε κάθε αναλογία. Επίσης προτείνεται η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM with EDX), για μελέτη της μικροδομής των παραγόμενων μεταλλικών αφρών, προκειμένου να ληφθούν τα αποτελέσματα που αποδεικνύουν την ύπαρξη, ή μη, διμεταλλικής φάσης εντός του μητρικού υλικού. Πέρα όμως από τις μηχανικές δοκιμές, και τις πειραματικές μετρήσεις σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μπορούν να μετρηθούν και άλλα χαρακτηριστικά των δοκιμίων, όπως η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, η θερμική αγωγιμότητα και η ηχομονωτική τους ικανότητα.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης νιφάδων χάλυβα σε μίγμα μετάλλου και αφριστικού παράγοντα σταθερής αναλογίας. Ωστόσο η περιεκτικότητα του αφριστικού παράγοντα (και του μητρικού υλικού κατ' επέκταση) στα τελικά μίγματα από τα οποία προήλθαν τα δοκίμια, έβαινε διαρκώς μειούμενη, όσο αύξανε η αντίστοιχη των προστιθέμενων νιφάδων χάλυβα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 6-1 (σε περιεκτικότητα 2 % κ.β. νιφάδων χάλυβα, η περιεκτικότητα αφριστικού παράγοντα είναι 0,59 %, ενώ σε

περιεκτικότητα 10 % κ.β. σε νιφάδες χάλυβα, η αντίστοιχη του υδρίδιου του τιτανίου έγινε 0,54 %). Βιβλιογραφικά γνωρίζουμε πως προσθήκη αφριστικού παράγοντα γίνεται συνήθως σε περιεκτικότητα 0,4 % κ.β. με 0,6 % κ.β., ωστόσο μία διαφορετική προσέγγιση της πειραματικής διαδικασίας θα ήταν να δημιουργηθούν δοκίμια με σταθερή περιεκτικότητα σε αφριστικό παράγοντα, και διαφορετικές αναλογίες σε νιφάδες χάλυβα.

Από εκεί και έπειτα, η μελέτη της αφροποίησης με προσθήκη νιφάδων χάλυβα, μπορεί να ερευνηθεί περισσότερο με αναζήτηση, από την μία πλευρά, της αναλογίας που θα δώσει καλύτερα αποτελέσματα στη μέγιστη διόγκωση του μεταλλικού αφρού και στην ομοιομορφία των πόρων του. Συνεπώς κάτι τέτοιο, και βάσει όσων ειπώθηκαν και προηγουμένως, πρέπει να αναζητηθεί σε μικρότερες περιεκτικότητες νιφάδων χάλυβα, και να διεξαχθούν σειρές πειραμάτων με ενδιάμεσες αναλογίες αυτών που μελετήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία. Από την άλλη πλευρά, μπορεί να αναζητηθεί το όριο σε περιεκτικότητα νιφάδων, με το οποίο παράγεται προϊόν με τη μέγιστη δυνατή αφροποίηση, που όμως δεν έχει συμπεριφορά κατάρρευσης. Βέβαια, αναλόγως και των αποτελεσμάτων από τις μηχανικές δοκιμές, μπορούν να λάβουν μέρος διάφορα πειράματα με υψηλής περιεκτικότητας δοκίμια, καθώς τουλάχιστον σε ένα πρώτο επίπεδο, το γεγονός ότι φαίνονται να μην καταρρέουν μετά από μερική αφροποίηση, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Σε κάθε περίπτωση, οι μεταλλικοί αφροί αποτελούν πεδίο, έντονου ενδιαφέροντος, τόσο σε επίπεδο έρευνας, όσο και σε επίπεδο εφαρμογών. Οι δυνατότητες πειραματισμού που προσφέρονται είναι πολλές και αξίζει να μελετηθούν καθώς ο μεταλλικοί αφροί διαθέτουν σημαντικές ιδιότητες που μπορούν να βελτιώσουν πολλών τύπων εφαρμογές.

Βιβλιογραφία

1. Mavrouleas G. (2017, January 13). *Porous materials*. Retrieved from <http://dev.monotech.gr>
2. FoodPedia (2012, February 03). *Porous*. Retrieved from <http://www.foodbites.eu>
3. Ashby M. F., 1983, *The Mechanical Properties of Cellular Solids*, Metallurgical Transactions 14A., pp. 1755-1769.
4. Goodall R. and Mortensen A., 2013, *Porous Metals*, Chapter 26 of Physical Metallurgy-Fifth Edition, Elsevier, Amsterdam.
5. 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.
6. Yang B., Wang Y.Q., Zhou B.L., 1998, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol.27B, pp.635.
7. Banhart, J., 2001, *Manufacture Characterization and Application of cellular metals and metal foams*, Progress in Materials Science 46., pp. 559-632.
8. 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.
9. Laughlin D., Hono K., 2013, *Porous Metal*, Physical Metallurgy, 5th ed., Elsevier, Amsterdam.
10. ASM International Handbook Committee, 1988, ASM Handbook, *Powder Metal Technologies and Applications*, Volume 7, ASM International, Metals Park.
11. Degischer, B. Kriszt, 2002, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing Application*, Wiley-VCH, Germany.
12. Gibson L.J., Ashby M.F., 1997 *Cellular solids, structure and properties*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge University press.
13. Stergioudi F., 2011, *Production of porous materials and evaluation of their properties*, Doctoral dissertation, Thessaloniki: A.U.TH.
14. Catrin Kammer, 1999, *Aluminum foam*, EAA – European Aluminum Association, Goslar, Germany.
15. Banhart J. *Cellular metallic material*. Retrieved from <http://www.metalfoam.net/>
16. *Αφρός αλουμινίου*. Retrieved from <http://users.uoi.gr/>
17. Papadopoulos D.P., Omar H., Stergioudi F., Tsipas S.A., Michailidis N., 2011, *The use of dolomite as foaming agent and its effect on the microstructure of aluminum metal foams -*

- Comparison to titanium hydride, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 382, pp. 118-123.
18. 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.
 19. Παπαδόπουλος Δ., 2004, *Μεταλλικοί Αφροί, Στρατιωτική Επιθεώρηση*, Ιαν – Φεβ, σ. 140-154.
 20. Davies, G.J. and Zhen, S., 1983. *Metallic foams: their production, properties and applications*. *Journal of Materials Science* 18. pp. 1899-1911.
 21. Queheillalt, D.T., Choi, B.W., Schwartz, D.S. and Wadley, H.N.G., 2000. *Creep Expansion of Porous Ti-6Al-4V Sandwich Structures*. *Metallurgical Transactions* 31A. pp. 261-273.
 22. Duarte, I. and Banhart, J., 2000. *A Study of Aluminum Foam Formation – Kinetics and Microstructure*. *Acta Materialia* 48. pp. 2349-2362.
 23. Surace Rossella and De Filippis Luigi, 2010, *Investigation and Comparison of Aluminum Foams Manufactured by Different Techniques*, *Advanced Knowledge Application in Practice*, Institute of Industrial Technology and Automation, National Research Council, pp. 96-117.
 24. Fraunhofer – IFAM. Retrieved from <https://www.ifam.fraunhofer.de/>
 25. Knüwer M. and Weber M. In: *Proc. 1998 Powder Metallurgy World Congress*, Granada, Spain, 18-22 October, vol. 2, pp. 233.
 26. Tuchinskiy L. and Loutfy R., 1997, *Metal foams*. In: J. Banhart, M.F. Ashby and N.A. Fleck, Editors, *Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams*, Stanton, USA, 7-8 October, MIT Press Verlag, Bremen, p. 23.
 27. Tuchinskiy L. and Loutfy R., 1999, *Metal foams and porous metal structures*. In: J Banhart, M.F. Ashby and N.A. Fleck, Editors, *Int. Conf.*, Bremen, Germany, 14-16 June, MIT Press Verlag, Bremen, p. 189.
 28. Canada, Inco Ltd., (1998). *Product data sheet of "Incofoam"*. Retrieved from <https://www.incogroup.com/>
 29. Badiche X., Forest S., Guibert T., Bienvenu Y., Bartout J.D., Jenny P., Croset M. and Bernet H., 2000, *Materials Science and Engineering A289*, p. 176.
 30. Pickering S., 1998, *Metal Powder Report* 53, pp. 24.
 31. *Chemical Vapor Deposition*. Retrieved from <https://ultramet.com/>
 32. Kretz, R, Hombergsmeier, E., Eippner, K., 1999, *Manufacturing and testing of aluminium foam structural parts for passenger cars* *Funcionários by example of a rear intermediate panel*, *Metal Foams and Porous Metals Structures*, Verlag MIT Bremen, Bremen, Germany, pp. 23-26

33. Bunte J., von Busse A., Cordini P., 2003, *Future prospects for the industrial applications of laser*, Laser Zentrum, Hannover.
34. *Water Jet*. Retrieved from <https://ultramet.com/>
35. Gegerly V., Curran D. and Clyne T., 2001, *Drainage of metallic foams-modelling and experimental observations*, Int. Conf., Bremen, Germany, 18-20 June, MIT Press– Verlag, Bremen, pp. 105.
36. Simone A. and Gibson L., 1998, *The effects of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams*, Acta Mater. 11, pp. 3929-3935.
37. Jancek R., Kottar A. and Degischer H., 2003, *Cellular aluminium for passive crash protection*, Int. Conf., Berlin, Germany, 23-25 June, MIT Press–Verlag, Bremen, pp. 19.
38. Baumeister J., Banhart J. and Weber M., 1997. *Aluminum foams for transport industry*. Materials and Design 18. pp. 217-220.
39. Gibson L.J., 2000. *Properties and Applications of Metallic Foams*. Comprehensive Composite Materials, vol. 3.
40. Woods T. (2009, December 15). *Metallic Foam Reduces Airplane Noise*. Retrieved from <https://www.nasa.gov/>
41. Smith B.H., Szyniszewski S., Hajjar J.F., Schafer B.W. and Arwade S.R., 2012. *Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties*. Journal of Constructional Steel Research 71. pp. 1-10.
42. Zimmer Biomedical Dental (2014, January 07). *Trabecular Metal Dental Implant*. Retrieved from <https://www.dentistryiq.com>
43. Ejlali Az., Ejlali, Ar., Hooman, K. and Gurgenci, H., 2009. *Application of high porosity metal foams as air-cooled heat exchangers to high heat removal systems*. International Communications in Heat and Mass Transfer 36. pp. 674-679.
44. Bianchi E., Heidig T., Visconti C.G., Groppi G., Freund, H. and Tronconi, E., 2013, *Heat transfer properties of metal foam supports for structured catalysts: Wall heat transfer*. Catalysis Today. Article in Press.
45. Timmer J. (2013, April 19). *This new micro-battery is interesting, but not as good as the hype*. Retrieved from <https://arstechnica.com/>
46. Chen S., Bourham M., Rabiei A., 2015, *Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams*. Radiation Physics and Chemistry, Volume 117, Pages 12-22.
47. (2015, July 20). *Metal foams found to excel in shielding X-rays, gamma rays, neutron radiation*. Retrieved from <http://www.kurzweilai.net/>
48. Fraunhofer – IFAM. *Cellular metallic materials*. Retrieved from <https://www.ifam.fraunhofer.de/>

49. Mancin Simone, Zilio Claudio, Diani Andrea, Rossetto Luisa, 2013, *Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 62, pp. 112–123.
50. Azzi Wassim Elias, 2004, *A Systematic Study on the Mechanical and Thermal Properties of Open Cell Metal Foams for Aerospace Applications*, Mechanical Engineering, North Carolina State University.
51. Bart-Smith H., Bastawros A.F., Mumm D.R., Evans A.G., Sypeck D.J, H.N.G. Wadley, 1998, *Compressive Deformation and Yielding in Cellular Al Alloys Determined Using X-Ray Tomography and Surface Strain Mapping*, Acta Materialia, Volume 46, Issue 10, pp. 3583–3592.
52. *Defect analysis (inclusions, impurities, pores, cracks): X-ray tomography*. Retrieved from <http://www.umms.sav.sk>
53. Shashikant V. Raut, V. S. Kanthale, and B. S. Kothavale, 2016, *Review on Application of Aluminum Foam in Sound Absorption Technology*. International Journal of Current Engineering and Technology, pages 178-181
54. Boomsma K., Poulidakos D., Ventikos Y., 2003, *Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 24, Issue 6, pp. 825–834.
55. Banhart J.; Seeliger H.W., 2008 *Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications*. Adv. Eng. Mater., 10, 793–802.
56. Lehmhus D., Busse M., Herrmann A.S., Kayvantash K., 2013 *Structural Materials and Processes in Transportation*, 1st ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
57. Duarte I., Teixeira-Dias F., Graça A., Ferreira A.J.M. 2010, *Failure Modes and Influence of the Quasi-static Deformation Rate on the Mechanical Behavior of Sandwich Panels with Aluminum Foam Cores*. Mech. Adv. Mater. Struct., 17, 335–342.
58. Duarte I., Vesenjajk M., Krstulovi'c-Opara L., Anžel I., Ferreira J.M.F. 2015, *Manufacturing and bending behavior of in situ foam-filled aluminium alloy tubes*. Mater. Des., 66, 532–544.
59. Nia A.A., Hamedani J.H. 2010, *Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries*. Thin Walled Struct., 48, 946–954.
60. Duarte I., Vesenjajk M., Krstulovi'c-Opara L. 2015, *Static and dynamic axial crush performance of in-situ foam-filled tubes*. Compos. Struct., 124, 128–139.
61. Zhou J., Gao Z., Cuitino A.M., Soboyejo W.O. 2004, *Effects of heat treatment on the compressive deformation behavior of open cell aluminum foams*. Mater. Sci. Eng. A, 386, 118–128.

62. Yamada Y., Shimojima K., Sakaguchi Y., Mabuchi M., Nakamura M., Asahina T. 2000, *Effects of heat treatment on compressive properties of AZ91 Mg and SG91A Al foams with open-cell structure*. Mater. Sci. Eng. A, 280, 225–228.
63. Campana F., Pilone D. 2009, *Effect of heat treatments on the mechanical behavior of aluminium alloy foams*. Scr. Mater., 60, 679–82.
64. Lehmhus D., Banhart J. 2003, *Properties of heat-treated aluminium foams*. Mater. Sci. Eng. A, 349, 98–110.
65. Xia X.C., Chen X.W., Zhang Z., Chen X., Zhao W.M., Liao B., Hur B. 2013, *Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell Mg alloy foam*. J. Magnes. Alloy., 1, 330–335.
66. Jiang B., Wang Z., Zhao N. 2007, *Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open-cell aluminum foams*. Scr. Mater., 56, 169–172.
67. Everett R. 1991, *Metal Matrix Composites: Processing and Interfaces*. Elsevier: San Diego, CA, USA.
68. Clyne T.W., Whithers P.J. 1993, *Metal Matrix Composites*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
69. Casati R., Vedani M. 2014, *Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles; A Review*. Metals, 4, 65–83.
70. Tjong S. 2013, *Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets*. Mater. Sci. Eng. Rep., 74, 281–350.
71. Harris P. 2004, *Carbon nanotube composites*. Int. Mater. Rev., 49, 31–43.
72. Agarwal A., Bakshi S., Lahiri D. 2011, *Carbon Nanotubes-Reinforced Metal Matrix Composites*. Taylor and Francis Group: Boca Raton, FL, USA.
73. Thostenson E.T., Ren Z., Chou T.-W. 2001, *Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review*. Compos. Sci. Technol., 61, 1899–1912.
74. Jin I., Kenny L.D., Sang H. 1991, *Lightweight Foamed Metal and Its Production*. International Patent Application WO91/03578, 21 March.
75. Kaptay G., Banhart J., Ashby M.F., Fleck N.A., Eds. 1999, *Interfacial Criteria for ceramic stabilized metallic foams*. In Proceedings of the 1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam199). MIT Verlag: Bremen, Germany, pp. 141–146.
76. Thomas M., Kenny L.D. 1994, *Production of Particle-Stabilized Metal Foams*. PCT Patent WO 94/017218, 21 January.
77. Zeppelin F., Hirscher M., Stanzick H., Banhart J. 2003, *Desorption of hydrogen from blowing agents used for foaming metals*. Compos. Sci. Technol., 63, 2293–2300.

78. Gui M.C., Wang D.B., Wu J.J., Yuan G.J., Li C.G. 2000, *Deformation and damping behaviors of foamed Al-Si-SiCp composite*. Mater. Sci. Eng. A, 286, 282–288.
79. Banhart J. 2013, *Light metal foams history of innovation and technological challenges*. Adv. Eng. Mater., 15, 82–111.
80. Alizadeh M., Mirzaei Aliabadi M. 2012, *Compressive properties and energy absorption behavior of Al-Al₂O₃ composite foam synthesized by space-holder technique*. Mater. Des., 35, 419–424.
81. Mahmutyazicioglu N., Albayrak O., Ipekoglu M. 2013, *Effects of alumina (Al₂O₃) addition on the cell structure and mechanical properties of 6061 foams*. J. Mater. Res., 28, 2509–2519.
82. Daoud A. 2009, *Compressive response and energy absorption of foamed A359-Al₂O₃ particle composites*. J. Alloy. Compd., 486, 597–605.
83. Elbir S., Yilmaz S., Toksoy A.K., Guden M., Hall I.W. 2003, *SiC-particulate aluminum composite foams Produced by powder compacts: Foaming and compression behavior*. J. Mater. Sci., 38, 4745–4755.
84. Esmaeelzadeh S., Simchi A., Lehmkus D. 2006, *Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi₇ foam*. Mater. Sci. Eng. A, 424, 290–299.
85. Guden M., Yuksel S. 2006, *SiC-particulate aluminum composite foams produced from powder compacts: Foaming and compression behavior*. J. Mater. Sci., 41, 4075–4084.
86. Luo Y., Yu S., Liu J., Zhu X., Luo Y. 2010, *Compressive property and energy absorption characteristic of open-cell. SiCp/AlSi₉Mg composite foams*. J. Alloy. Compd., 499, 227–230.
87. Luo Y., Yu S., Li W., Liu J., Wei M. 2008, *Compressive behavior of SiCp/AlSi₉Mg composite foams*. J. Alloy. Compd., 460, 294–298.
88. Yu S., Liu J., Luo Y. 2007, *Compressive behavior and damping property of ZA22/ SiCp composite foams*. Mater. Sci. Eng. A, 457, 325–328.
89. Yu S., Luo Y., Liu J. 2008, *Effects of strain rate and SiC particle on the compressive property of SiCp/AlSi₉Mg composite foams*. Mater. Sci. Eng. A, 487, 394–399.
90. Prakash O., Sang H., Embury J.D. 1995, *Structure and properties of Al-SiC foam*. Mater. Sci. Eng. A, 199, 195–203.
91. Liu J., Yu S., Zhu X., Wei M., Li S., Luo Y., Liu Y. 2009, *Correlation between ceramic additions and compressive properties of Zn-22 Al matrix composite foams*. J. Alloy. Compd., 476, 220–225.
92. Kennedy A.R., Asavavisitchai S. 2004, *Effects of TiB₂ particle addition on the expansion, structure and mechanical properties of PM Al foams*. Scr. Mater., 50, 115–119.

93. Zhao N.Q., Jiang B., Du X.W., Li J.J., Shi C.S., Zhao W.X. 2006, *Effect of Y₂O₃ on the mechanical properties of open-cell aluminium foams*. Mater. Lett., 60, 1665–1668.
94. Song Y.H., Tane M., Ide T., Seimiya Y., Hur B.Y., Nakajima H. 2010, *Fabrication of Al-3.7 Pct Si-0.18 Pct Mg Foam Strengthened by AlN Particle Dispersion and its Compressive Properties*. Metall. Mater. Trans. A, 41, 2104–2111.
95. Heim K., Vinod-Kumar G.S., García-Moreno F., Rack A., Banhart J. 2015, *Stabilization of aluminium foams and films by the joint action of dispersed particles and oxide film*. Acta Mater., 99, 313–324.
96. Banhart J. 2006, *Metal foams: Production and stability*. Adv. Eng. Mater., 8, 781–794.
97. Baumgärtner F., Duarte I., Banhart J. 2000, *Industrialization of powder compact foaming process*. Adv. Eng. Mater., 2, 168–174.
98. Duarte I., Oliveira M., Katsuyoshi K. Ed. 2012, *Chapter 3. Aluminium Alloy Foams: Production and Properties*. In Powder Metallurgy. InTech: Rijeka, Croatia, pp. 47–72.
99. Duarte I.M.A., Banhart J., Ferreira A.J.M., Santos M.J.G. 2006, *Foaming around fastening elements*. Mater. Sci. Forum, 514–516, 712–717.
100. Kadoi K., Nakae H. 2011, *Relationship between Foam Stabilization and Physical Properties of Particles on Aluminum Foam Production*. Mater. Trans., 52, 1912–1919.
101. Simone A.E., Gibson L.J. 1998, *Aluminum foams produced by liquid-state processes*. Acta Mater., 46, 3109–3123.
102. Babcsán N., Leitlmeier D., Banhart J. 2005, *Metal foams - High temperature colloids Part I. Ex situ analysis of metal foams*. Colloid. Surf. A Physicochem. Eng. Asp., 261, 123–130.
103. Markaki A.E., Clyne T.W. 2001, *The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams*. Acta Mater., 49, 1677–1686.
104. Amsterdam E., de Hosson J.T.M., Onck P.R. 2006, *Failure mechanisms of closed-cell aluminum foam under monotonic and cyclic loading*. Acta Mater., 54, 4465–447.
105. Gergely V., Clyne B. 2000, *The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors*. Adv. Eng. Mater., 2, 175–178.
106. Duarte I., Ferreira J.M.F. 2016, *Composite and Nanocomposite Metal Foams*. Materials.; 9:79 doi: 10.3390/ma9020079.
107. Prabhu B., Suryanarayana C., An L., Vaidyanathan R. 2006, *Synthesis and characterization of high-volume fraction Al-Al₂O₃ nanocomposite powders by high-energy milling*. Mater. Sci. Eng. A, 425, 192–200.
108. Du Y., Li A.B., Zhang X.X., Tan Z.B., Su R.Z., Pu F., Geng L. 2015, *Enhancement of the mechanical strength of aluminum foams by SiC nanoparticles*. Mater. Lett., 148, 79–81.

109. Duarte I., Ventura E., Olhero S., Ferreira J.M.F. 2015, *A novel approach to prepare aluminium-alloy foams reinforced by carbon-nanotubes*. Mater. Lett., 160, 162–166.
110. Duarte I., Ventura E., Olhero S., Ferreira J.M.F. 2015, *An effective approach to reinforced closed-cell Al-alloy foams with multiwalled carbon nanotubes*. Carbon, 95, 589–600.
111. Zhang Z., Ding J., Xia X., Sun X., Song K., Zhao W., Liao B. 2015, *Fabrication and characterization of closed-cell aluminium foams with different contents of multi-walled carbon nanotubes*. Mater. Des., 88, 359–365.
112. Wang J., Yang X., Zhang M., Li J., Shi C., Zhao N., Zou T. 2015, *A novel approach to obtain in-situ growth carbon nanotube reinforced aluminum foams with enhanced properties*. Mater. Lett., 161, 763–766.
113. George R., Kashyap K.T., Rahul R., Yamdagni S. 2005, *Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites*. Scr. Mater., 53, 1159–1163.
114. Dong Z., Keju J., Huihui Z. 2013, *Foam Metal-Carbon Nanotube Composite Material and Preparation Method Thereof*. Patent CN 103434207 A.
115. Wang Y., Chin Y-H., Gao Y., Aardahl C.L., Stewart T.L. 2006, *Carbon Nanotube-Containing Structures, Methods of Making, and Processes Using Same*. Patent US 7011760 B2.
116. Liu J., Yu S., Zhu X., Wei M., Li S., Luo Y., Liu Y. 2008, *Effect of Al₂O₃ short fiber on the compressive properties of Zn-22Al foams*. Mater. Lett., 62, 3636–3638.
117. Liu J., Yu S., Zhu X., Wei M., Li S., Luo Y., Liu Y. 2010, *Deformation and energy absorption characteristic of Al₂O₃/Zn-Al composite foams during compression*. J. Alloy. Compd., 506, 620–625.
118. *Cross section of stem of Peruvian Lily SEM*. Retrieved from <https://www.123rf.com>
119. *SEM photographs of leaf cross-sections of Catopsis species*. Retrieved from <https://www.researchgate.net>
120. Swift N., Hsiung B.K., Kennedy E., Tan K.T. 2016, *Dynamic impact testing of hedgehog spines using a dual-arm crash pendulum*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Volume 61, Pages 271-282.
121. *Closed Cell vs. Open Cell Foam*. Retrieved from <https://wriapplications.com/>
122. *Foamed Aluminium*. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/>
123. *Carbon fibers with steel hollow balls*. Retrieved from <https://live.pege.org/>
124. *Aluminium foam*. Retrieved from <https://commons.wikimedia.org/>
125. Banhart J. 2000, *Manufacturing Routes for Metallic Foams*. JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), DOI: 10.1007/s11837-000-0062-8.

126. Shapovalov V., Boyko L. 2004, *Gasar-A new Class of Porous Materials*. Advanced Engineering Materials, DOI: 10.1002/adem.200405148.
127. *Duocel aluminium foam*. Retrieved from <https://www.duocelfoam.com/>
128. Wadley H.N.G., Fleck N.A., Evans A.G. 2003, *Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures*. Composites Science and Technology, Volume 63, Issue 16, Pages 2331-2343.
129. Mahajan S.M., Jadhav G.A. 2015, *Aluminum Foaming for Lighter Structure*. International Journal of Computational Engineering Research (IJCER), Volume 05, Issue 01, Pages 70-74.
130. Sobczak J. 2003, *HIGH POROSITY MEDIA FOR TRANSPORTATION – SELECTED ASPECTS*. Journal of KONES Internal Combustion Engines, vol. 10, 3-4
131. Paserin V., Marcuson S., Shu J., Wilkinson D.S. 2004, *CVD Technique for Inco Nickel Foam Production*. Advanced Engineering Materials, DOI: 10.1002/adem.200405142.
132. *Duocel® Foam Energy Absorption*. Retrieved from <http://ergaerospace.com/>
133. Zhang B., Hu S., and Fan Z. 2018, *Anisotropic Compressive Behavior of Functionally Density Graded Aluminum Foam Prepared by Controlled Melt Foaming Process*. Materials 2018, 11(12), 2470; doi: 10.3390/ma11122470
134. Srivastava V.C., Sahoo K. L. 2007, *Processing, stabilization and applications of metallic foams*. Art of science. Materials Science-Poland, Vol. 25, No. 3, Pages 733-751.
135. *Super-light cogs made of aluminum foam*. Retrieved from <https://compassmag.3ds.com/>
136. Baldev R., Ranganathan S., Sankara Rao K.B., Matthew M.D., 2007, Shankar P. *Frontiers in the Design of Materials*. India, Universities Press (India) Limited.
137. *Varec Biogas 5200 Flame Check*. Retrieved from <https://varec-biogas.com/>
138. *Upper femur with simulated intramedullary rod insert fabricated from Ti-6Al-4V*. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/>
139. *Heat exchanger with big surface*. Retrieved from <https://live.pege.org/>
140. Cha-Lee M, Juwon K., Wonwook J., Dongyoung Ji., Simsoo P., and Jeongmin L. 2015, *Nanoparticle Filtration Characteristics of Advanced Metal Foam Media for a Spark Ignition Direct Injection Engine in Steady Engine Operating Conditions and Vehicle Test Modes*. Energies 2015, 8, pages 1865-1881.
141. *Aluminium foam sandwich*. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/>
142. Morkos B., Dochibhatla S. V.S., Summers J. 2018, *Effects of Metal Foam Porosity, Pore Size, and Ligament Geometry on Fluid Flow*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 10.

143. Han S., Xueting L., Hongbin Y., Xie GN. and Sunden B. 2018, *Enhanced Thermal Performance of Internal Y-Shaped Bifurcation Microchannel Heat Sinks with Metal Foams*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 10.
144. Ángel R. Álvarez Hernández. 2005, *Combined Flow and Heat Transfer Characterization of Open Cell Aluminium Foams*. University of Puerto Rico.
145. Kim S., Chung H.J., and Rhee KY. 2016, *Application of Image Processing to Predict Compressive Behavior of Aluminum Foam*. Archives of Metallurgy and Materials. Vol. 61, No 2, p. 635–640.
146. 11067 Aluminum powder, -325 mesh, 99.5% (metals basis), Product Specification. Retrieved from <https://www.alfa.com/>
147. 89183 Titanium (II) hydride, 99% (metals basis), Product Specification. Retrieved from <https://www.alfa.com/>
148. Stainless Steel flake, -150 mesh, 1.2 micron thick, Type 316-L, Product Overview. Retrieved from <https://www.alfa.com/>
149. Movavi Video Suite. Version 2018. <https://www.movavi.com/>
150. Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I. & Frise, E. et al. (2012), "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis", *Nature methods* **9(7)**: 676-682, PMID 22743772, doi:10.1038/nmeth.2019, <https://imagej.net/Fiji>.
151. Hunt, Christopher Vaira. 2009, *A method to reduce smearing in the milling of metal foam*. Graduate Theses and Dissertations. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/10614>
152. Kennedy, R., Asavivisithchai, S., 2004, *Effect of Ceramic Particle Additions on Foam Expansion and Stability in Compacted Al-TiH₂ Powder Precursors*. Advanced Engineering Materials, DOI: 10.1002/adem.200405145.