



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**ΔΙΑΤΜΗΣΙΑΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΑΚΟΛΟΥΘΕΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ**

Μανδηλαράς Άρης – Ιωάννης

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων Καθηγητής: *Δρ. Γ. Φούρλαρης*



ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**ΔΙΑΤΜΗΣΙΑΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΑΚΟΛΟΥΘΕΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ**

Μανδηλαράς Άρης – Ιωάννης
Διπλωματική Εργασία

Τριμελής Επιτροπή:

1. Γ. Φούρλαρης (Επιβλέπων)
2. Σ. Παπαευθυμίου
3. Ε. Χριστοφόρου

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την στήριξη και βοήθεια που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια της ζωής μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα αδέρφια, τους φίλους και τα κοντινά μου άτομα που με βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, να φτάσω εδώ που είμαι, όπως επίσης και με την ψυχολογική τους υποστήριξη κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον καθηγητή μου, Δρ. Γεώργιο Φούρλαρη, που μου έδωσε την ευκαιρία και τις γνώσεις για να εκπονήσω αυτήν την διπλωματική εργασία. Η βοήθεια και η συνεργασία του ήταν ανεκτίμητη, προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Σταύρο Δεληγιάννη, για την πολύ σημαντική βοήθεια του κατά τη διάρκεια των πειραματικών διεργασιών, καθώς και για τη μετέπειτα σημαντική συμβολή του για τη συγγραφή της εργασίας.

Φυσικά θα ήθελα να ευχαριστήσω και τις υποψήφιες διδάκτορες Βίκυ Οικονόμου και Μαρία Γεωργίου για τις δικές τους συνεισφορές.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Πέτρο Τσακιρίδη, για την βοήθεια του με τη μέθοδο εφελκυσμού και XRD και για την βοήθεια του σε άλλα πρακτικά ζητήματα ή απορίες που τυχόν είχα, και τον υπεύθυνο του εργαστηρίου Ιωάννη Χαρλαμπίτα για τη βοήθεια του σε διαφορά ζητήματα που προέκυψαν εντός του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, αλλά και για την καθοδήγηση του σε διαφορά λειτουργικά θέματα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η συσχέτιση της μικροδομής θερμικά επεξεργασμένων δοκιμίων κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V, με τις μηχανικές τους ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας (950 – 1150 °C) και του τρόπου βαφής στο κράμα Ti-6Al-4V.

Το υλικό που εξετάζεται αποτελεί ένα από τα πιο βασικά εμπορικά κράματα τιτανίου, κατηγορίας 5 (Grade 5). Το συγκεκριμένο μέταλλο έχει επιπρόσθετες κραματικές ουσίες αλουμινίου, περίπου 6%, και βαναδίου, περίπου 4%, και έχει δεχθεί θερμομηχανικές διεργασίες ανόπτησης και θερμής έλασης.

Στόχος της μελέτης ήταν, να πραγματοποιηθούν μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, με την επίδραση των παραπάνω κατεργασιών, και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα αυτών ώστε, να επιχειρηθεί η συσχέτιση της μικροδομής με τη μηχανική αντοχή του.

Η προετοιμασία των δοκιμίων, οι θερμικές κατεργασίες καθώς και οι μετρήσεις των μηχανικών του ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Για τις μετρήσεις της μηχανικής αντοχής έγιναν εφελκυσμοί, ενώ για τη μελέτη της μικροδομής και των φάσεων της, έγινε χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM) και της μεθόδου περίθλασης ακτίνων – X.

Οι παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν είναι σε συμφωνία με τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για το συγκεκριμένο κράμα. Με την θερμική επεξεργασία του κράματος και την ταχεία ψύξη του σε νερό από υψηλές θερμοκρασίες, η μικροδομή του μεταβάλλεται με αντίστοιχες μεταβολές στις μηχανικές του ιδιότητες. Η εμφάνιση μεγαλύτερης αντοχής του κράματος είναι εμφανείς, με ταυτόχρονη σημαντική μείωση της ολκιμότητας του.

ABSTRACT

The purpose of this study is to discover the correlation between the microstructure of heat treated titanium alloy Ti-6Al-4V, and its mechanical properties. Specifically, studying the effects of temperatures varying from 950 - 1150 °C and the rapid quenching of the Ti-6Al-4V alloy.

Grade 5 Ti-6Al-4V is considered the workhorse of commercial titanium alloys. This metal is alloyed with aluminum, about 6%, and vanadium, about 4%, with the original material having received thermomechanical processing of annealing and hot rolling.

This study is aimed to carry out measurements of the mechanical properties of this material in comparison with the effects of these heat treatments, with the purpose of assessing the results, thus linking the microstructure with the mechanical strength.

The preparation of the samples, heat treatments and measurements of the mechanical properties were held in the Metallurgy Laboratory of the School of Mining & Metallurgical Engineering at the National Technical University of Athens.

Tensile tests were done to measure the yield strength and ultimate yield strength. Use of the scanning electron microscope was made (Scanning Electron Microscopy - SEM) to study the microstructure, while the use of the X - ray diffraction method was made to analyze the phases of the material.

The observations and results that were obtained are in agreement with past studies performed on this alloy. By heat treating and rapid cooling this alloy in water, the microstructure transforms with corresponding changes in mechanical properties. Due to that, the alloy appears to have acquired more strength with a simultaneous drop in ductility.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	x
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xiii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	3
3.1 Γενικές μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων και δοκιμές ελέγχου.....	3
3.1.1 Δοκιμή Εφελκυσμού.....	3
3.1.2 Θραύση.....	6
3.2 Τιτάνιο και τα κράματα του.....	13
3.2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	13
3.2.2 Χαρακτηριστικά & ιδιότητες του Τιτανίου.....	16
3.2.3 Κρυσταλλογραφία του Τιτανίου.....	21
3.2.4 Ταξινόμηση κραμάτων του Τιτανίου.....	23
3.2.5 Μικροδομή κραμάτων Τιτανίου.....	33
3.2.6 Προφίλ Ιδιοτήτων των κλάσεων των κραμάτων του Τιτανίου.....	39
3.2.7 Μηχανικές Ιδιότητες Κραμάτων Τιτανίου.....	41
3.2.8 Εφαρμογές.....	45
3.3 Κράμα Ti-6Al-4V.....	48
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	52
4.1 Χαρακτηριστικά Υλικού.....	52
4.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	53
4.2.1 Κοπή.....	53
4.2.2 Θερμικές Κατεργασίες.....	54
4.2.3 Ονομασία και Διαχωρισμός των Δοκιμίων.....	57
4.2.4 Εγκιβωτισμός.....	57
4.2.5 Λείανση.....	58
4.2.6 Στίλβωση.....	58
4.2.7 Χημική Προσβολή.....	59
4.2.8 Παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο.....	59
4.2.9 Ανάλυση με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης – SEM.....	59

4.2.10	Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS, X-Ray Microanalysis)	62
4.2.11	Φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων Χ – XRD	63
4.2.12	Δοκιμή Εφελκυσμού.....	66
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	67
5.1	Μελέτη της Μικροδομής	67
5.1.1	Δοκίμια Αναφοράς AR(As Received) 1 και AR 2.....	67
5.1.2	Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία.	73
5.2	Μηχανικές Ιδιότητες	86
5.2.1	Δοκιμή Εφελκυσμού.....	86
6	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	93
6.1	Αποτελέσματα περίθλασης ακτίνων Χ.....	93
6.2	Αποτελέσματα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM)	94
6.3	Αποτελέσματα Εφελκυσμών.....	96
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	98
8	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	99
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	100

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3-1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για χάλυβα με διακριτό όριο διαρροής.	4
Εικόνα 3-2: Γενικές κατηγορίες θραύσης χαμηλής θερμοκρασίας: (α) Όλκιμη θραύση μαλακού χάλυβα AISI 1020. (β) ψαθυρή θραύση φαιού χυτοσιδήρου.	7
Εικόνα 3-3: (α) Θραυστογραφία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης όλκιμου φαιού χυτοσιδήρου που δείχνει ενδοκρυσταλλική επιφάνεια θραύσης. Άγνωστη μεγέθυνση. (β) Θραυστογραφία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης που δείχνει περικρυσταλλική επιφάνεια.	8
Εικόνα 3-4: (α) Ισχυρά όλκιμη θραύση κατά την οποία το δοκίμιο παρουσιάζει στένωση ("λαιμό") που φθάνει ως τη δημιουργία σημείου θραύσης. (β) Μέτρια όλκιμη θραύση μετά τον σχηματισμό μικρού βαθμού στένωσης ("λαιμού"). (γ) Ψαθυρή θραύση χωρίς καμία πλαστική παραμόρφωση. .	9
Εικόνα 3-5: Στάδια της θραύσης κυπέλλου-κώνου. (α) Αρχική στένωση. (β) Σχηματισμός μικρών κοιλοτήτων. (γ) Συνένωση κοιλοτήτων και σχηματισμός ρωγμής. (δ) Διάδοση ρωγμής. (ε) Τελική διατμητική θραύση σε γωνία 45° ως προς την διεύθυνση της τάσης.	10
Εικόνα 3-6: Αναπαράσταση της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης σε εφελκυσμό για ψαθυρά και όλκιμα υλικά, μέχρι θραύσης.	12
Εικόνα 3-7: Βλάβη από φωτιά λόγω τριβής κράματος τιτανίου με κράμα νικελίου σε κινητήρα αεροσκάφους.	18
Εικόνα 3-8: Πυκνότητα επιλεγμένων μετάλλων.	19
Εικόνα 3-9: Εξαγωνική μορφή μέγιστης πυκνότητας τιτανίου (α-Ti) & Χωροκεντρομένη μορφή τιτανίου (β-Ti).	21
Εικόνα 3-10: Σχηματική αναπαράσταση των τύπων διαγραμμάτων φάσης μεταξύ του τιτανίου και των στοιχείων κραμάτωσης.	25
Εικόνα 3-11: Τρισδιάστατο διάγραμμα φάσης ταξινόμησης κραμάτων τιτανίου.	26
Εικόνα 3-12: TTT διάγραμμα ενός τυπικού α+β κράματος τιτανίου.	31
Εικόνα 3-13: Διάγραμμα φάσεων του Ti-Al.	32
Εικόνα 3-14: Ψύξη δοκιμίου πάνω από το πεδίο της β-φάσης κράματος Ti-6Al-4V.	35
Εικόνα 3-15: Ισοαξονικές μικροδομές κράματος Ti-6Al-4V μέσω ανακρυστάλλωσης: a) λεπτοί ισοαξονικοί κρύσταλλοι, b) χονδροί ισοαξονικοί κρύσταλλοι, c, d) διφασικές μικροδομές (OM, TEM).	36
Εικόνα 3-16: Τριμερές διάγραμμα φάσεων Ti-6Al-4V. / Μικροδομές Ti-6Al-4V ύστερα από αργή ψύξη (50 °C/h) και ταχεία ψύξη σε νερό από τους 1050 °C, 800 °C και 650 °C.	37
Εικόνα 3-17: Ειδική αντοχή προς θερμοκρασία επιλεγμένων υλικών σε σχέση με τα κράματα και αργιλίδια του τιτανίου.	42
Εικόνα 3-18: Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων κραμάτων τιτανίου.	44
Εικόνα 3-19: (Συνέχεια) Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων κραμάτων τιτανίου.	44
Εικόνα 3-20 & Εικόνα 3-21: Ιατρικά τιτανιούχα εξαρτήματα.	45
Εικόνα 3-22 & Εικόνα 3-23: Εξαρτήματα αυτοκινητοβιομηχανίας κατασκευασμένα από τιτάνιο.	45
Εικόνα 3-24 & Εικόνα 3-25: Αεροσκάφη που περιέχουν εξαρτήματα κατασκευασμένα από κράματα τιτανίου.	46
Εικόνα 3-26 & Εικόνα 3-27: Θαλάσσια οχήματα που περιέχουν εξαρτήματα κατασκευασμένα από κράματα τιτανίου.	47
Εικόνα 3-28 & Εικόνα 3-29: Τιτανιούχα αντικείμενα καθημερινής χρήσης.	47
Εικόνα 4-1: Έλασμα κράματος Ti-6Al-4V.	52
Εικόνα 4-2: Μηχανή κοπής δοκιμίων, Struers Discotom.	54
Εικόνα 4-3: Δοκίμιο Αναφοράς.	55

Εικόνα 4-4: Δοκίμιο Θερμικής Κατεργασίας στους 950 °C/ 30 λεπτά/ Βαφή σε νερό.....	55
Εικόνα 4-5: Δοκίμιο Θερμικής Κατεργασίας στους 1050 °C/ 30 λεπτά/ Βαφή σε νερό.....	56
Εικόνα 4-6: Δοκίμιο Θερμικής Κατεργασίας στους 1150 °C/ 30 λεπτά/ Βαφή σε νερό.....	56
Εικόνα 4-7: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.....	60
Εικόνα 4-8: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο JEOLJSM-6380LV.....	63
Εικόνα 4-9: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του περιθλασίμετρου ακτινών X.....	64
Εικόνα 4-10: Περιθλασίμετρο D8 Focus Bruker.....	65
Εικόνα 4-11: Δοκίμιο Αναφοράς κράματος Ti-6Al-4V.....	66
Εικόνα 4-12: Μηχάνημα εφελκυσμού Instron 4482.....	66
Εικόνα 5-1: Διάγραμμα XRD δοκιμίων αναφοράς AR 1 & 2. Διακρίνονται οι κορυφές της εξαγωνικής α-φάσης και της χωροκεντρομένης κυβικής β-φάσης.....	68
Εικόνα 5-2: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου AR 1 με μεγέθυνση x500.....	69
Εικόνα 5-3: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου AR 1 με μεγέθυνση x1000.....	69
Εικόνα 5-4: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου AR 1 με μεγέθυνση x1000.....	70
Εικόνα 5-5: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου AR2 με μεγέθυνση x2000.....	70
Εικόνα 5-6: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου AR 2 με μεγέθυνση x2000.....	71
Πίνακας 5-1 & Εικόνα 5-7: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου AR 2.....	71
Πίνακας 5-2 & Εικόνα 5-8: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε αλουμίνιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο AR 2.....	72
Πίνακας 5-3 & Εικόνα 5-9: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε βανάδιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο AR 2.....	72
Εικόνα 5-10: Διάγραμμα XRD δοκιμίων 950 °C, 1050 °C, 1150 °C.....	74
Εικόνα 5-11: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x500.....	74
Εικόνα 5-12: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x1000.....	75
Εικόνα 5-13: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x1000.....	75
Εικόνα 5-14: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x1000.....	76
Πίνακας 5-4 & Εικόνα 5-15: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 950 °C... ..	76
Πίνακας 5-5 & Εικόνα 5-16: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε βανάδιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 950 °C.....	77
Πίνακας 5-6 & Εικόνα 5-17: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε αλουμίνιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 950 °C.....	77
Εικόνα 5-18: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x500.....	78
Εικόνα 5-19: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x500.....	79
Εικόνα 5-20: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x1000.....	79
Εικόνα 5-21: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x1000.....	80
Πίνακας 5-7 & Εικόνα 5-22: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 1050 °C..	80

Πίνακας 5-8 & Εικόνα 5-23: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1050 °C.	81
Πίνακας 5-9 & Εικόνα 5-24: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1050 °C.	81
Εικόνα 5-25: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x500.	82
Εικόνα 5-26: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x1000.	83
Εικόνα 5-27: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x1000.	83
Εικόνα 5-28: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x1000.	84
Πίνακας 5-10 & Εικόνα 5-29: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 1150 °C.	84
Πίνακας 5-11 & Εικόνα 5-30: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1150 °C.	85
Πίνακας 5-12 & Εικόνα 5-31: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1150 °C.	85
Εικόνα 5-32: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου αναφοράς.	86
Εικόνα 5-33: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου αναφοράς AR.	87
Εικόνα 5-34: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 950 °C.	88
Εικόνα 5-35: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου 950 °C.	89
Εικόνα 5-36: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1050 °C.	90
Εικόνα 5-37: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου 1050 °C.	90
Εικόνα 5-38: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1150 °C.	91
Εικόνα 5-39: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου 1150 °C.	92
Εικόνα 6-1: Συγκριτικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης όλων των δοκιμίων.	96

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Παραγωγή σπόγγου Τιτανίου σε μετρικούς τόνους	15
Πίνακας 3-2: Γενικά Χαρακτηριστικά Τιτανίου.	16
Πίνακας 3-3: Σύγκριση Τιτανίου με Σίδηρο, Νικέλιο & Αλουμίνιο.....	17
Πίνακας 3-4: Φυσικές Ιδιότητες τιτανίου.	20
Πίνακας 3-5: Σύστημα Ολίσθησης σε FCC, BCC, HCP.....	23
Πίνακας 3-6: Επιρροή της μικροδομής σε επιλεγμένες ιδιότητες των τιτανιούχων κραμάτων.	34
Πίνακας 3-7: Ιδιότητες α, α+β και β κραμάτων Τιτανίου.	39
Πίνακας 3-8: Ιδιότητες Ti-6Al-4V.....	51
Πίνακας 4-1: Χημική Σύσταση κ. β. % Ti-6Al-4V.....	52
Πίνακας 5-1 & Εικόνα 5-7: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου AR 2.	71
Πίνακας 5-2 & Εικόνα 5-8: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε αλουμίνιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο AR 2.	72
Πίνακας 5-3 & Εικόνα 5-9: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε βανάδιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο AR 2.	72
Πίνακας 5-4 & Εικόνα 5-15: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 950 °C. ...	76
Πίνακας 5-5 & Εικόνα 5-16: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε βανάδιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 950 °C.	77
Πίνακας 5-6 & Εικόνα 5-17: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε αλουμίνιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 950 °C.	77
Πίνακας 5-7 & Εικόνα 5-22: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 1050 °C. .	80
Πίνακας 5-8 & Εικόνα 5-23: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1050 °C.	81
Πίνακας 5-9 & Εικόνα 5-24: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1050 °C.	81
Πίνακας 5-10 & Εικόνα 5-29: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 1150 °C.	84
Πίνακας 5-11 & Εικόνα 5-30: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1150 °C.	85
Πίνακας 5-12 & Εικόνα 5-31: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1150 °C.	85

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τιτάνιο είναι μεταξύ των σχετικά καινούργιων μετάλλων που έχουν αποκτήσει εκτεταμένη και σημαντική βιομηχανική χρήση. Κράματα τιτανίου έχουν βρει εξειδικευμένη χρήση ακόμα και στον τομέα της αεροδιαστημικής, όπου οι απαιτήσεις των υλικών είναι πολύ υψηλές. Ο λόγος που έχουν πολλαπλασιαστεί οι χρήσεις του έτσι δραματικά, οφείλεται στο εξαιρετο μίγμα μεταξύ χαμηλής πυκνότητας του υλικού και της υψηλής αντοχής του, στην ανώτερη αντοχή στη διάβρωση, όπως επίσης και στην καλή αντοχή των τιτανιούχων κραμάτων στις υψηλές θερμοκρασίες.[2] Όλο αυτό το μείγμα ιδιοτήτων είναι αρκετά ελκυστικό για μια ποικιλία χρήσεων, όπως σε αεροσκάφη που απαιτούν υψηλή αντοχή σε συνδυασμό με χαμηλή πυκνότητα, κινητήρες αεροσκαφών όπου απαιτείται υψηλή αντοχή, χαμηλή πυκνότητα και καλή αντοχή στον ερπυσμό περίπου στους 550 °C, σε συσκευές βιοϊατρικής, που χρειάζεται να υπάρχει καλή αντοχή και αντίσταση στη διάβρωση από τα υλικά τα οποία αποτελούνται, και σε εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε χημικές βιομηχανίες, λόγω της απαίτησης καλής τους αντοχής στην διάβρωση.

Το γενικά υψηλό κόστος του τιτανίου, παρεμποδίζει την ευρεία χρήση του, όπως για παράδειγμα στις αυτοκινητοβιομηχανίες. Για να μειωθεί το πρόβλημα του κόστους, πρέπει το τιτάνιο και τα κράματα του να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου οι καλές ιδιότητες του να το κάνουν να υπερτερεί έναντι των άλλων ανταγωνιστικών υλικών. Αυτό απαιτεί μια καλύτερη κατανόηση των κραμάτων τιτανίου, σε σύγκριση με άλλα λιγότερο ακριβά υλικά, συμπεριλαμβανομένης της αλληλεπίδρασης μεταξύ του κόστους, των μεθόδων επεξεργασίας, και της απόδοσης.[3] Για τον λόγο αυτόν αυτή, η εργασία αποσκοπεί σε μια μικρή εμβάθυνση στη κατανόηση των κραμάτων τιτανίου.

2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας (950 – 1150 °C) και της βαφής στο κράμα Ti-6Al-4V, προκειμένου να υπολογισθούν οι μηχανικές του ιδιότητες με εφελκυσμό.
2. Ο πλήρης χαρακτηρισμός της μικροδομής του υλικού με χρήση τεχνικών της περίθλασης ακτίνων – X και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), με σκοπό τη συσχέτιση της μικροδομής του, με τις μηχανικές ιδιότητες του.

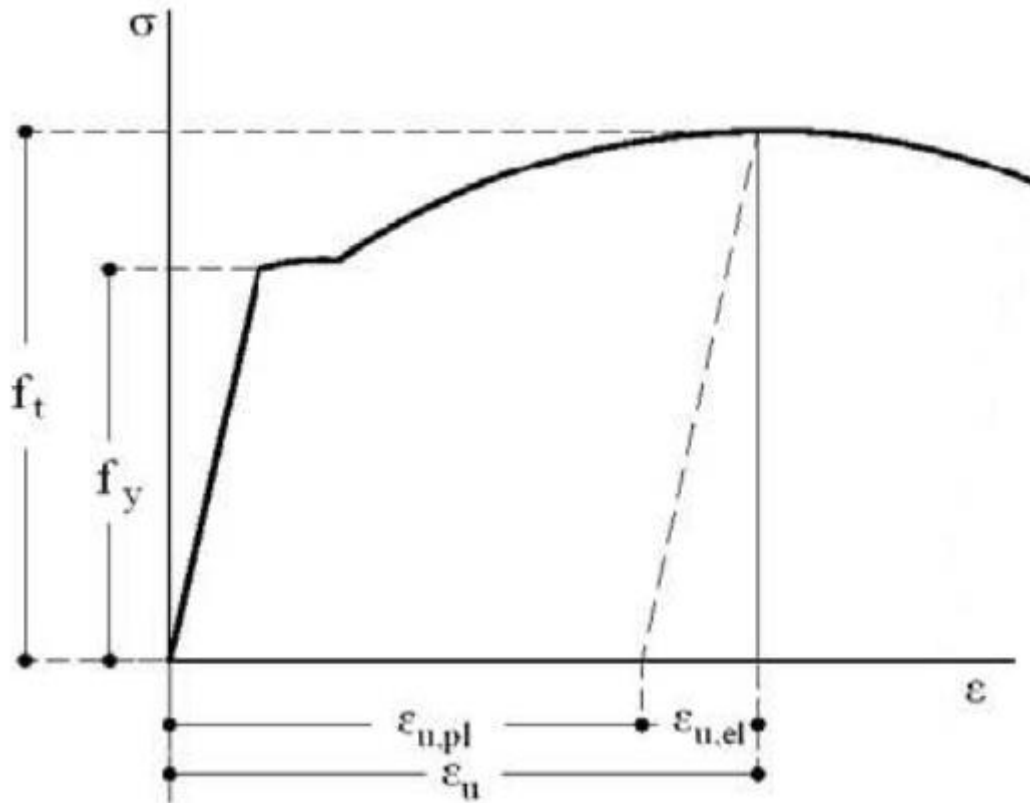
3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Γενικές μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων και δοκιμές ελέγχου

3.1.1 Δοκιμή Εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η σπουδαιότερη δοκιμή για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Η δοκιμή γίνεται με μια μηχανή που καταγράφει συνήθως τη δύναμη του εφελκυσμού που ασκείται πάνω στο δοκιμαζόμενο δοκίμιο, καθώς και την επιμήκυνση του δοκιμίου. Έτσι, αν F είναι η δύναμη και $\Delta l = l - l_0$ η επιμήκυνση του δοκιμίου, το καταγραφικό καταγράφει καμπύλη $F - \Delta l$. Το δοκίμιο είναι συνήθως μια ράβδος κυκλικής διατομής ή ένα έλασμα με τυποποιημένες διαστάσεις, που διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Η επιμήκυνση μετριέται πάνω στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δυο χαραγές αναφοράς που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου l_0 . Τα άκρα του δοκιμίου έχουν ισχυρότερη διατομή.

Αν s_0 είναι η αρχική διατομή του δοκιμίου και l_0 το αρχικό του μήκος, συνηθίζεται να ανάγεται η δύναμη F ανά μονάδα επιφάνειας, $\sigma = F/s_0$, οπότε παίρνουμε την τάση. Επίσης ανάγουμε την επιμήκυνση Δl στην μονάδα μήκους του δοκιμίου, $e = \Delta l/l_0$, οπότε παίρνουμε την ειδική επιμήκυνση, ή αλλιώς εν συντομία την παραμόρφωση. Οι καμπύλες $F - \Delta l$ και $\sigma - e$ έχουν ακριβώς την ίδια μορφή, καθώς τα s_0 και l_0 είναι δύο σταθεροί αριθμοί.



Εικόνα 3-1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για χάλυβα με διακριτό όριο διαρροής.

Στο διάγραμμα στην παραπάνω εικόνα διακρίνεται η ελαστική περιοχή, όπου η άρση της δύναμης επιτρέπει στο δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό του μήκος, και σε συνέχεια η πλαστική περιοχή, όπου οι παραμορφώσεις είναι μόνιμες. Οι δύο περιοχές χωρίζονται από το όριο ελαστικότητας ή διαρροής.

Όριο αναλογίας είναι η οριακή τάση, πάνω από την οποία η παραμόρφωση παύει να είναι ανάλογη προς την αντίστοιχη τάση, το οποίο συμβολίζεται με R_a . Στην περιοχή του ορίου αναλογίας ισχύει ο νόμος του Hooke:

$$\sigma = E \cdot e \quad (3.1)$$

Το E είναι χαρακτηριστική σταθερά του υλικού, το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young. Η ελαστική περιοχή όπου έχουμε γραμμική σχέση μεταξύ του σ και του e είναι σε πολλά υλικά πολύ περιορισμένη, όπως στην περίπτωση του χυτοσιδήρου, που έχει ασήμαντο όριο αναλογίας. Η ακρίβεια του ορίου αναλογίας εξαρτάται από την ευαισθησία

του δυναμόμετρου που χρησιμοποιούμε. Το όριο αναλογίας δεν έχει στην πραγματικότητα καμία σχέση με το όριο ελαστικότητας, απ' το οποίο γενικά διαφέρει. Το όριο ελαστικότητας είναι η μέγιστη τάση στην οποία μπορεί να υποβληθεί ένα υλικό χωρίς να υποστεί μόνιμη παραμόρφωση. Για να είναι η μέτρηση του ορίου ελαστικότητας ανεξάρτητη από την ευαισθησία του οργάνου που χρησιμοποιούμε, ορίζουμε σαν όριο ελαστικότητας την τάση που προκαλεί μόνιμη παραμόρφωση ίση προς 0.0001% ή, κατ' άλλους, ίση προς 0.03%. Η παραμόρφωση αυτή σημειώνεται σαν δείκτης.

Το σημείο διαρροής είναι η τάση για την οποία έχουμε σημαντική παραμόρφωση χωρίς μεγαλύτερη αύξηση της τάσης. Σε ορισμένα υλικά, το φαινόμενο της διαρροής του υλικού φαίνεται αρκετά παράδοξο, γιατί το δοκίμιο συνεχίζει να παραμορφώνεται χωρίς αύξηση του φορτίου. Μερικές φορές μάλιστα, το φορτίο μειώνεται μέχρι 30%. Σε ορισμένα υλικά το σημείο διαρροής είναι πολύ χαρακτηριστικό πάνω στην καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης και ο προσδιορισμός του δεν θέτει κανένα πρόβλημα. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, που δεν είναι τόσο φανερό, είναι προτιμητέο να οριστεί ένα συμβατικό σημείο διαρροής, όπως η τάση για την οποία έχουμε 0.1, 0.2 ή 0.5%.

Το μέτρο ελαστικότητας είναι ο λόγος τάση/παραμόρφωση = E και αποδίδει την ευκολία (ή δυσκολία) με την οποία παραμορφώνεται ένα υλικό μέσα στην ελαστική περιοχή (παραμορφωσιμότητα). Πρέπει να τονιστεί ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι φυσική και όχι μηχανική ιδιότητα και επομένως δεν μεταβάλλεται ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες. Επίσης το όριο ελαστικότητας δεν είναι ευαίσθητο σε μεταβολές της χημικής σύνθεσης του κράματος σε αρκετά ευρέα όρια, ούτε στη μικρογραφική μορφή του μετάλλου.

Το όριο θραύσης είναι η μέγιστη τάση του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης. Επειδή κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός, κάθε επιμήκυνση συνοδεύεται από μείωση της διατομής του δοκιμίου. Κατά την επιμήκυνση, η συνολική αντοχή του δοκιμίου επηρεάζεται από δύο ανταγωνιστικά φαινόμενα: Το πρώτο είναι η ενδοτράχυνση που προκύπτει από την πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου και η οποία αυξάνει την αντοχή. Το δεύτερο είναι η μείωση της διατομής που ελαττώνει την αντοχή. Έτσι στο πρώτο τμήμα της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης η ενδοτράχυνση επικρατεί, στη συνέχεια αποκτά ιδιαίτερη σημασία η μείωση της διατομής, ώστε το φορτίο παρουσιάζει μέγιστο σημείο Z . Στο σημείο αυτό επέρχεται πλαστική αστάθεια, δηλαδή η επιμήκυνση και η μείωση της διατομής που την συνοδεύει παύει να διανέμεται ομοιόμορφα

σ' όλο το μήκος του δοκιμίου και σχηματίζεται λαιμός σε κάποιο σημείο. Σαν συνέπεια, το φορτίο μειώνεται αρκετά γρήγορα μέχρι τη θραύση.

Η ολκιμότητα ενός μετάλλου είναι η ικανότητα του να παραμορφώνεται πλαστικά ανεξάρτητα από το μέγεθος των δυνάμεων που χρειάστηκαν για να προκληθεί η μόνιμη αυτή παραμόρφωση. Στη δοκιμή εφελκυσμού η ολκιμότητα μετριέται με δύο μεγέθη:

1. Την παραμένουσα επιμήκυνση μετά από τη θραύση, εκφρασμένη σαν ποσοστό του αρχικού μήκους του δοκιμίου (elongation) $A (\%) = \frac{l_m + l_0}{l_0} * 100$, όπου l_m = το μήκος του δοκιμίου μετά από τη θραύση. **(3.2)**
2. Τη μείωση της διατομής του δοκιμίου στο σημείο που έσπασε (reduction of area). $Z (\%) = \frac{s_m + s_0}{s_0} * 100$, όπου s_m = το μήκος του δοκιμίου μετά από τη θραύση. **(3.3)**

Τα μεγέθη A και Z δεν χρησιμοποιούνται άμεσα στη σχεδίαση μιας κατασκευής, αλλά είναι ενδεικτικά της ικανότητας ενός υλικού να προειδοποιεί πριν από τη θραύση του με ορατές παραμορφώσεις, και απ' αυτή την άποψη αποτελούν ένα απόθεμα ασφάλειας. Επίσης πρέπει να ειπωθεί ότι τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται πολύ από τον τύπο του δοκιμίου που χρησιμοποιείται, και επομένως δεν έχουν νόημα αν δεν αναφέρεται τουλάχιστον το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου l_0 ή η σχέση l_0 / d_0 . Παρατηρείται ότι όσο το μήκος του δοκιμίου είναι μικρότερο, τόσο η παραμόρφωση κατανέμεται πιο ομοιόμορφα σε όλο το μήκος, δηλαδή το μήκος του “λαιμού” είναι μεγαλύτερο. Η ομοιομορφία με την οποία κατανέμεται η επιμήκυνση πάνω σε ένα δοκίμιο μετά από τη θραύση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη φύση του υλικού. Στα πολύ λεπτόκοκκα μέταλλα όλη η παραμόρφωση εντοπίζεται στην περιοχή της θραύσης, ενώ στα άκρα του ωφέλιμου μήκους η παραμόρφωση είναι ασήμαντη. Σε μέταλλα με χονδρότερους κόκκους, η παραμόρφωση γίνεται πιο ομοιόμορφα σε όλο το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου. Σε υλικά με ακόμα χονδρότερους κόκκους, υπάρχει σχεδόν ομοιόμορφη παραμόρφωση σ' όλο το μήκος του δοκιμίου, πράγμα που είναι γνωστό από τη μεγάλη ελατότητα του υλικού.[11]

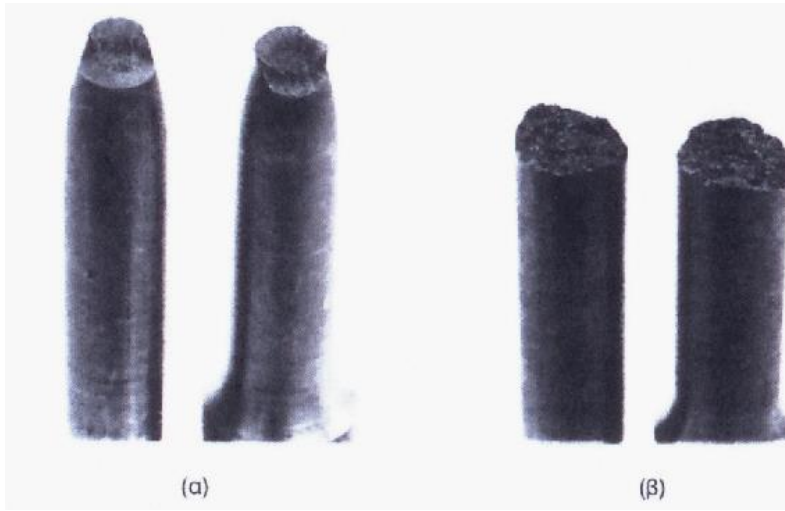
3.1.2 Θραύση

Αναλόγως του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της θραύσης, η εφελκυστική θραύση χαμηλής θερμοκρασίας (ΕΘΧΘ) χωρίζεται σε δυο πολύ βασικά είδη:

- την ψαθυρή θραύση,

– και την όλκιμη θραύση.

Η αναγνώριση των βασικών αυτών κατηγοριών θραύσης (όλκιμης και ψαθυρής) γίνεται από τη μακροσκοπική παρατήρηση των επιφανειών θραύσης και τη μεταβολή της διατομής τους. Στην περίπτωση της όλκιμης θραύσης, η ελάττωση της διατομής στην περιοχή θραύσης είναι σημαντική λόγω πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται, ενώ αντιθέτως, στην ψαθυρή θραύση, η ελάττωση της διατομής είναι από μηδενική ως αμελητέα (εικόνα 3-2β).

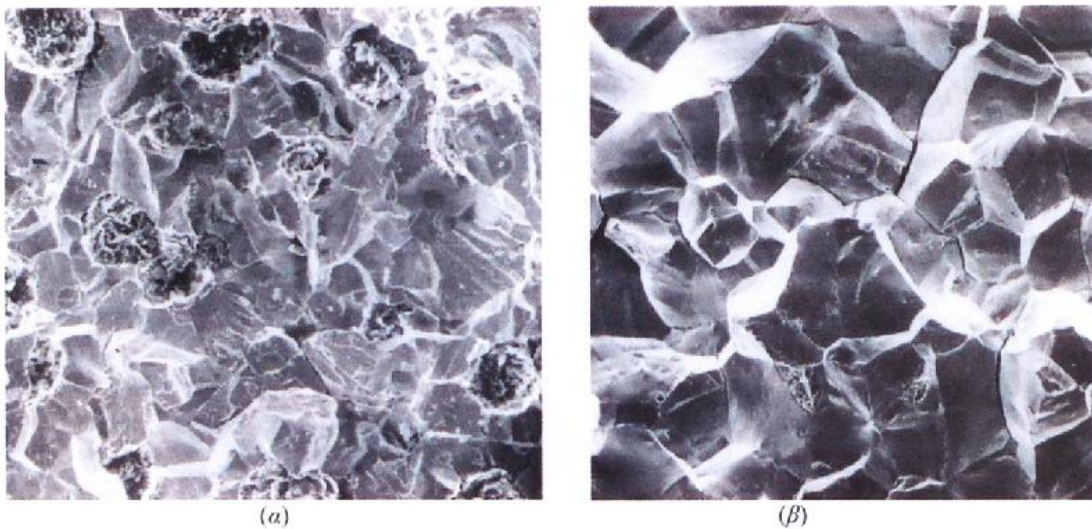


Εικόνα 3-2: Γενικές κατηγορίες θραύσης χαμηλής θερμοκρασίας: (α) Όλκιμη θραύση μαλακού χάλυβα AISI 1020. (β) ψαθυρή θραύση φαιού χυτοσιδήρου.

Η ψαθυρή θραύση πραγματοποιείται χωρίς καμία αισθητή παραμόρφωση και με γρήγορη διάδοση της ρωγμής. Η διεύθυνση κίνησης της ρωγμής είναι σχεδόν κάθετη στη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης και επιφέρει μια σχετικά επίπεδη επιφάνεια θραύσης. Οι επιφάνειες θραύσης υλικών που αστόχησαν με ψαθυρό τρόπο, παρουσιάζουν τα δικά τους διακριτά χαρακτηριστικά, χωρίς κανένα ίχνος πλαστικής παραμόρφωσης.

Άλλες ψαθυρές επιφάνειες θραύσης περιλαμβάνουν γραμμές ή αυλακώσεις που απλώνονται ακτινωτά με ένα σχήμα που προσομοιάζει αυτό του ανεμιστήρα ή βεντάλιας. Συχνά και τα δύο αυτά αποτυπώματα είναι αρκετά τραχεία, ώστε να φαίνονται με γυμνό μάτι. Στα πολύ σκληρά και λεπτόκοκκα μέταλλα, δεν παρουσιάζονται ευδιάκριτα σχέδια στις επιφάνειες θραύσης. Οι ψαθυρές θραύσεις στα άμορφα υλικά επιφέρουν μια σχετικά γυαλιστερή και λεία επιφάνεια.

Στα περισσότερα ψαθυρά κρυσταλλικά υλικά η διάδοση ρωγμών αντιστοιχεί στο διαδοχικό και επαναλαμβανόμενο σπάσιμο ατομικών δεσμών κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σχισμός και αυτός ο τύπος θραύσης ονομάζεται ενδοκοκκώδης, διότι οι ρωγμές θραύσης διέρχονται δια μέσω των κόκκων. Μακροσκοπικά οι επιφάνειες θραύσης μπορεί να έχουν σπυρωτή ή πολυεδρική υφή ως αποτέλεσμα των αλλαγών στο προσανατολισμό των επιπέδων σχισμού από κόκκο σε κόκκο. Το χαρακτηριστικό αυτό γίνεται περισσότερο φανερό στη φωτογραφία ηλεκτρονική μικροσκοπίας σάρωσης που απεικονίζεται στην εικόνα 3-3α.

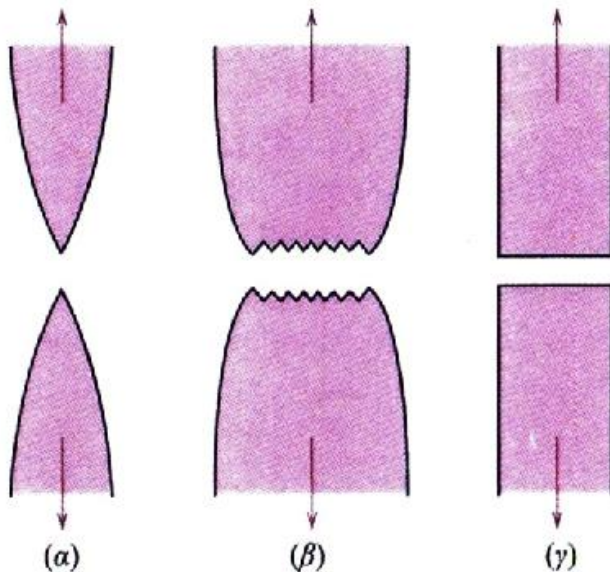


Εικόνα 3-3: (α) Θραυστογραφία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης όλκιμου φαιού χυτοσιδήρου που δείχνει ενδοκρυσταλλική επιφάνεια θραύσης. Άγνωστη μεγέθυνση. (β) Θραυστογραφία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης που δείχνει περικρυσταλλική επιφάνεια.

Σε ορισμένα κράματα η διάδοση των ρωγμών γίνεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων, η θραύση που επέρχεται κατά αυτό τον τρόπο αποτελείται περικρυσταλλική. Το σχήμα 3-3β είναι μια φωτογραφία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης που δείχνει μια χαρακτηριστική περικρυσταλλική θραύση, στην οποία η τρισδιάστατη φύση των κόκκων είναι ορατή. Αυτός ο τύπος της θραύσης συνήθως επέρχεται ως συνέπεια της εμφάνισης διαδικασιών εξασθένησης ή ψαθυροποίησης των περιοχών των ορίων των κόκκων.

Οι επιφάνειες όλκιμης θραύσης παρουσιάζουν τα δικά τους χαρακτηριστικά γνωρίσματα, τόσο σε μακροσκοπικό όσο και σε μικροσκοπικό επίπεδο. Το σχήμα 3-4α δείχνει μια

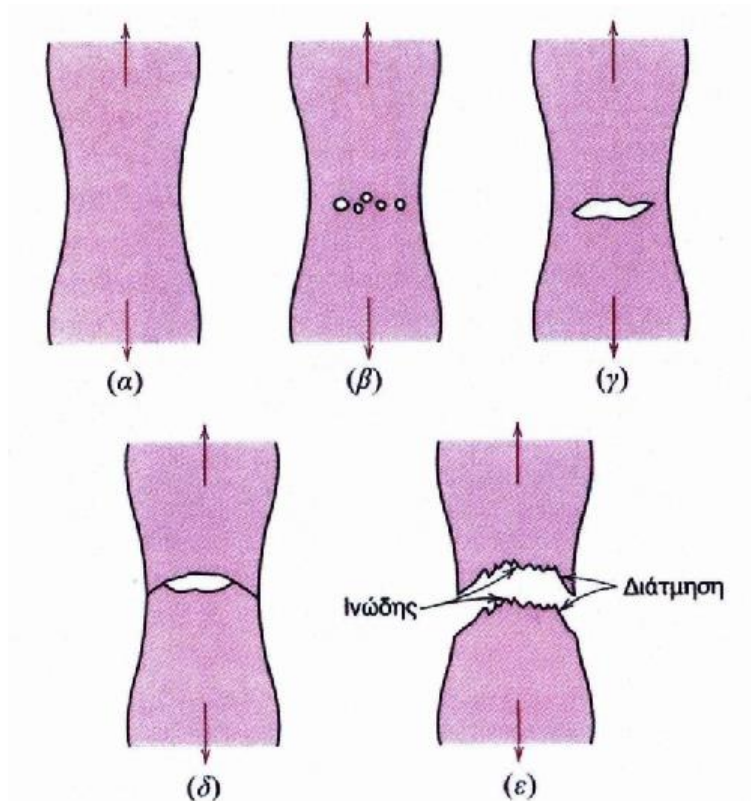
σηματική αναπαράσταση δύο χαρακτηριστικών μακροσκοπικών μετώπων θραύσης. Η διαμόρφωση που απεικονίζεται στο σχήμα απαντάται στα ιδιαίτερα μαλακά μέταλλα όπως ο καθαρός χρυσός και ο μόλυβδος σε θερμοκρασία δωματίου, και σε άλλα μέταλλα, πολυμερή και ανόργανους υάλους σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα πολύ όλκιμα υλικά σχηματίζουν "λαιμό" (στένωση) που φθάνει ως τη δημιουργία σημείου θραύσης, επιδεικνύοντας ουσιαστικά 100% μείωση εμβαδού επιφάνειας.



Εικόνα 3-4: (α) Ισχυρά όλκιμη θραύση κατά την οποία το δοκίμιο παρουσιάζει στένωση ("λαιμό") που φθάνει ως τη δημιουργία σημείου θραύσης. (β) Μέτρια όλκιμη θραύση μετά τον σχηματισμό μικρού βαθμού στένωσης ("λαιμού"). (γ) Ψαθυρή θραύση χωρίς καμία πλαστική παραμόρφωση.

Η πιο συνηθισμένη μορφή μετώπων θραύσης από εφελκυσμό σε όλκιμα υλικά είναι αυτή που αναπαριστά το σχήμα 3-4β, της θραύσης που έχει προηγηθεί αυτής ένας μετρίου μεγέθους σχηματισμός λαιμού. Η διαδικασία της θραύσης εμφανίζεται κατά κανόνα σε διάφορα στάδια στην εικόνα 3-5. Πρώτον, μετά την έναρξη δημιουργίας λαιμού, μικρές κοιλότητες, ή μικροκενά, σχηματίζονται στο εσωτερικό της καθέτου διατομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-5β. Κατόπιν, καθώς η παραμόρφωση συνεχίζεται, αυτά τα μικροκενά μεγαλώνονται, πλησιάζουν και συνενώνονται σχηματίζοντας μια ελλειπτική ρωγμή, η οποία έχει το μεγάλο άξονα της κάθετο στην διεύθυνση της τάσης. Η ρωγμή συνεχίζει να μεγαλώνει σε διεύθυνση παράλληλη προς το μεγάλο άξονα της μέσω της διαδικασίας συνένωσης των μικροκενών (εικόνα 3-5γ). Τελικά, η θραύση επέρχεται λόγω της γρήγορης διάδοσης μιας ρωγμής γύρω από την εξωτερική περίμετρο του "λαιμού" (εικόνα 3-5δ), μέσω

διατμητικής παραμόρφωσης σε γωνία περίπου 45° με τον άξονα εφελκυσμού-αυτή είναι η γωνία κατά την οποία η διατμητική τάση γίνεται μέγιστη. Μερικές φορές μια θραύση με αυτό το χαρακτηριστικό περίγραμμα αποκαλείται θραύση τύπου κυπέλλου-κόνου, λόγω του ότι μια από τις επιφάνειες σύζευξης έχει τη μορφή κυπέλλου και η άλλη ομοιάζει με κώνο. Σε ένα θραυσμένο δοκίμιο αυτού του είδους, το κεντρικό εσωτερικό τμήμα της επιφάνειας έχει ακανόνιστη ινώδη μορφή, που είναι ενδεικτική της πλαστικής παραμόρφωσης.



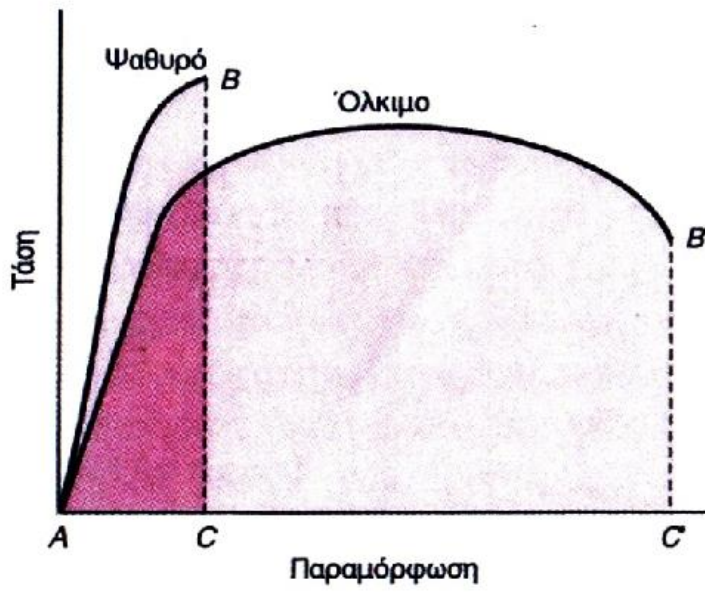
Εικόνα 3-5: Στάδια της θραύσης κυπέλλου-κόνου. (α) Αρχική στένωση. (β) Σχηματισμός μικρών κοιλοτήτων. (γ) Συνένωση κοιλοτήτων και σχηματισμός ρωγμής. (δ) Διάδοση ρωγμής. (ε) Τελική διατμητική θραύση σε γωνία 45° ως προς την διεύθυνση της τάσης.

Πολύ περισσότερο λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το μηχανισμό θραύσης αποκτώνται με μικροσκοπική εξέταση χρησιμοποιώντας συνήθως ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Μελέτες αυτού του είδους ονομάζονται θραυστογραφικές. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης προτιμάται για θραυστογραφική εξέταση, καθώς έχει πολύ καλύτερη διακριτική ικανότητα και βάθος πεδίου, απ' ό,τι η οπτική μικροσκοπία. Αυτές οι προδιαγραφές είναι απαραίτητες για να αποκαλύψουν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης.

Κατά την εξέταση της κεντρικής περιοχής μιας επιφάνειας θραύσης με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης υψηλής μεγέθυνσης, βρίσκεται ότι αυτή αποτελείται από μεγάλο αριθμό σφαιρικών "μικρό-κοιλοτήτων". Η δομή αυτή είναι χαρακτηριστική θραύσης που προκαλείται από μονοαξονική εφελκυστική αστοχία. Κάθε μικρό-κοιλότητα είναι το μισό ενός μικροκενού που σχηματίστηκε και στη συνέχεια διαχωρίστηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θραύσης. Μικρό-κοιλότητες σχηματίζονται επίσης στα χείλη του κατά 45ο διατμητικού επιπέδου της θραύσης κυπέλου-κώνου. Ωστόσο, αυτά επιμηκύνονται ή αποκτούν σχήμα C. Αυτό το παραβολικό σχήμα μπορεί να είναι ενδεικτικό διατμητικής αστοχίας. Ακόμη είναι δυνατό να υπάρχουν και άλλα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης. Οι θραυστογραφίες παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες στην ανάλυση των θραύσεων, όπως ο τύπος της θραύσης, η κατάσταση της τάσης και η θέση έναρξης της ρωγμής.

Τέλος στην εικόνα 3-6 παρουσιάζονται δύο είδη καμπυλών εφελκυσμού που αντιστοιχούν στα δύο κύρια είδη δυνατής συμπεριφοράς των υλικών σε εφελκυσμό:

- Συμπεριφορά ψαθυρού υλικού: Δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, διότι η θραύση επέρχεται πριν την παραμόρφωση και παρατηρείται στον φαιό χυτοσίδηρο, σε χάλυβες μετά από βαφή και χωρίς ανόπτηση κ.λπ.
- Συμπεριφορά όλκιμου υλικού: Η μόνιμη παραμόρφωση που πραγματοποιείται, συνοδεύεται συνήθως από σκλήρυνση του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζει την πλειονότητα των μετάλλων και των κραμάτων.[7]



Εικόνα 3-6: Αναπαράσταση της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης σε εφελκυσμό για ψαθυρά και όλκιμα υλικά, μέχρι θραύσης.

3.2 Τιτάνιο και τα κράματα του

3.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη επαφή με το τιτάνιο έγινε το 1791 στην Κορνούαλη από τον Άγγλο πάστορα, γεωλόγο και χημικό William Gregor. Ανέλυσε την μαγνητική άμμο του τοπικού ποταμού στην περιοχή Μανακάν στην Κορνούαλη και απομόνωσε μια μαύρη άμμο, η οποία είναι σήμερα γνωστή ως ιλμενίτης. Αφαιρώντας τον σίδηρο με μαγνήτη και με κατεργασία της άμμου με υδροχλωρικό οξύ κατάφερε να παράγει ένα ακάθαρτο οξείδιο ενός καινούργιου, για την εποχή τότε, στοιχείου. Το στοιχείο αυτό το ονόμασε μεναχίτη. Τέσσερα χρόνια αργότερα, το 1795, ο Γερμανός χημικός και φαρμακοποιός Martin Heinrich Klaproth ερευνούσε ένα κόκκινο ορυκτό, το οποίο ήταν γνωστό ως Schörl και προερχόταν από την Ουγγαρία.[1, 18] Το ορυκτό αυτό είναι μια μορφή ρουτιλίου (TiO_2) που ο Klaproth συνειδητοποίησε ότι ήταν το οξείδιο ενός προηγουμένως αγνώστου στοιχείου, το οποίο και ονόμασε τιτάνιο. Όταν έμαθε για την ανακάλυψη του Gregor, ερεύνησε τον μεναχίτη και επιβεβαίωσε ότι το άγνωστο μέταλλο που περιείχε η άμμος ήταν και αυτό τιτάνιο. Ο Klaproth βασίστηκε στην Ελληνική μυθολογία για την ονομασία του τιτανίου. Οι τιτάνες ήταν τα παιδιά του Ουρανού και της Γαίας, το μίσος όμως του Ουρανού για τα παιδιά του, τον οδήγησε στην αιχμαλώτιση τους στον φλοιό της Γης, όπως είναι “αιχμαλωτισμένο” και το δύσκολο προς εξαγωγή μέταλλο του τιτανίου.[1, 18]

Ακάθαρτο τιτάνιο παρασκευάστηκε από τους Nilson και Pettersson το 1887, στην καθαρή του μορφή ωστόσο, εμφανίστηκε μετά από αρκετά χρόνια, το 1910, από τον Αμερικάνο μεταλλουργό Matthew Albert Hunter.[1, 19] Αυτό έγινε εφικτό αφού κατάφερε να θερμάνει τετραχλωρίδιο του τιτανίου ($TiCl_4$) με νάτριο (N) μέσα σε ένα χαλύβδινο δοχείο πίεσεως, στους $700-800^\circ C$. [9] Εκείνος όμως που κατάφερε να καταστήσει την παραγωγή του τιτανίου εμπορική ονομάζεται Wilhelm Justin Kroll. Το 1932 παρήγαγε σημαντικές ποσότητες τιτανίου συνδυάζοντας τετραχλωρίδιο του τιτανίου ($TiCl_4$) με ασβέστιο (Ca). Έπειτα, στην αρχή του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου, ο Kroll κατέφυγε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, και απέδειξε ότι θα μπορούσε να παραχθεί εμπορικά τιτάνιο με τη αναγωγή του τετραχλωριδίου του τιτανίου ($TiCl_4$) με μαγνήσιο (Mg). Έτσι δημιουργήθηκε η μέθοδος Kroll, η οποία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Η εταιρεία DuPont είναι αυτή που πρώτη παρήγαγε εμπορεύσιμο τιτάνιο το 1948.[1]

Ενδιαφέρον για τις ιδιότητες του τιτανίου εμφανίστηκε μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και αρχές του 1950. Οι Ηνωμένες Πολιτείες τις Αμερικής ασχολήθηκαν με αρκετά προγράμματα για την παραγωγή μεγάλης ποσότητας σπόγγου τιτανίου, όπως και το Ηνωμένο Βασίλειο στην Ευρώπη, που έγινε η κύρια ευρωπαϊκή χώρα παραγωγής σπόγγου τιτανίου. Στην Γαλλία έγιναν προσπάθειες παραγωγής σπόγγου, αλλά διακόπηκαν το 1963 και στην Ιαπωνία η παραγωγή σπόγγου ξεκίνησε το 1952. Η Σοβιετική Ένωση ξεκίνησε την παραγωγή της το 1954 και από το 1979 και μετά έγινε η χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή σπόγγου τιτανίου.

Η κραμάτωση του Τιτανίου αναπτύχθηκε ραγδαία περίπου το 1950 στις ΗΠΑ, με κύριο αίτιο την αναγνώριση της χρησιμότητας της προσθήκης αλουμινίου για σκλήρυνση του μετάλλου. Αυτό οδήγησε με προσθήκες κασιτέρου στην δημιουργία του άλφα κράματος Ti-5Al-2.5Sn για χρήση σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών. Η προσθήκη μολυβδαινίου ως βήτα σταθεροποιητή αποτέλεσε στην δημιουργία του άλφα-βήτα κράματος Ti-7Al-4Mo για εφαρμογές που απαιτούσαν υψηλή αντοχή. Σημαντική ανακάλυψη αποτέλεσε η εμφάνιση του κράματος Ti-6Al-4V στις ΗΠΑ το 1954, το οποίο έγινε σύντομα το πιο σημαντικό άλφα-βήτα κράμα και το οποίο συνδυάζει εξαιρετες ιδιότητες με ευκολότερη παραγωγή. Σήμερα το κράμα Ti-6Al-4V είναι αυτό με την πιο ευρεία χρήση. Στο Ηνωμένο Βασίλειο πείρε μια διαφορετική τροπή η ανάπτυξη κραμάτων τιτανίου, καθώς εστίασαν στην δημιουργία κραμάτων για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες για κινητήρες αεροσκαφών. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία του κράματος Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si, το 1956, που ήταν η πρώτη φορά που προστέθηκε πυρίτιο σαν κραματική προσθήκη για τη βελτίωση της αντοχής ερπυσμού. Το πρώτο βήτα κράμα τιτανίου Ti-13V-11Cr-3Al αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ στα μέσα του 1950 ως κράμα φύλλο. Στις αρχές του 1960, αυτό το γηρασμένο κράμα-φύλλο υψηλής αντοχής χρησιμοποιήθηκε στο θρυλικό αεροσκάφος SR-71.[3]

Πίνακας 3-1: Παραγωγή σπόγγου Τιτανίου σε μετρικούς τόνους.

	<i>ΗΠΑ</i>	<i>Ιαπωνία</i>	<i>Ηνωμένο Βασίλειο</i>	<i>Σοβιετική Ένωση</i>	<i>Κίνα</i>	<i>Συνολικά</i>
<i>1979</i>	20800	16200	2200	39000	1800	80000
<i>1980</i>	25400	23200	1800	42600	1800	94800
<i>1982</i>	27600	27900	1400	44400	2300	103000
<i>1984</i>	30400	34000	5000	47200	2700	119300
<i>1987</i>	25400	23100	5000	49900	2700	106100
<i>1990</i>	30400	28800	5000	52200	2700	119100

Σήμερα, πάνω από 100 κράματα τιτανίου είναι γνωστά, από τα οποία μόνο τα 20 με 30 έχουν εμπορική χρήση. Από αυτά, το κλασσικό κράμα Ti-6Al-4V καλύπτει πάνω από τη μίση χρήση τιτανίου στο εμπόριο, ενώ ένα επιπλέον 20-30% αποτελείται από μη-κραματομένο τιτάνιο. Το τιτάνιο χρησιμοποιείται ευρύτατα στην αεροδιαστημική βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται περίπου το 80% παραγωγής τιτανίου, καθώς και στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στη πετροχημική βιομηχανία, σε στρατιωτικές βιομηχανίες, στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε μονάδες αφαλάτωσης, χαρτοπολτού, στη γεωργία καθώς επίσης θα πρέπει να αναφερθεί η σημαντική θέση που κατέχει στην ιατρική, για την κατασκευή ορθοπεδικών υλικών, καθώς και στην οδοντιατρική για την κατασκευή εμφυτευμάτων κτλ.[1, 4 ,9]

3.2.2 Χαρακτηριστικά & ιδιότητες του Τιτανίου

Το τιτάνιο είναι ένα γυαλιστερό μέταλλο με χρώμα άσπρο-αργυροειδές. Στον περιοδικό πίνακα συμβολίζεται με Ti και έχει ατομικό αριθμό 22.[19] Καθίσταται ως το 9^ο πιο άφθονο στοιχείο και το 4ο πιο άφθονο μέταλλο στην γη μετά το αλουμίνιο, τον σίδηρο και το μαγνήσιο και αποτελεί το 0.6% w/w στον στερεό φλοιό της γης. Είναι ένα ελαφρύ μέταλλο εξαιτίας της μικρής πυκνότητάς του, έχει υψηλή αντοχή στην διάβρωση, σχετικά υψηλή θερμοκρασία τήξης και υψηλή αντοχή έναντι του βάρους του, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιστάσεις υψηλών τάσεων και θερμοκρασιών. Σχηματίζει ανθεκτικά και ελαφρά κράματα με πολλά άλλα μέταλλα όπως το αλουμίνιο, τον κασσίτερο και το βανάδιο.[2, 3, 6]

Πίνακας 3-2: Γενικά Χαρακτηριστικά Τιτανίου.

Γενικά Χαρακτηριστικά

Όνομα, Σύμβολο, Ατομικός Αριθμός, Ατομικό Βάρος	Τιτάνιο, Ti, 22, 47.9
Χημική Σειρά	Μεταβατικό Μέταλλο
Ομάδα, Περίοδος, Τμήμα	4 ,4, d
Εμφάνιση	Άσπρο-Αργυρό χρώμα
Ατομικό Βάρος	47,876 gmol ⁻¹
Διάταξη Ηλεκτρονίων	[Ar] 3d ² 4s ²
Ηλεκτρόνια ανά Κυψελίδα	2, 8, 10, 2

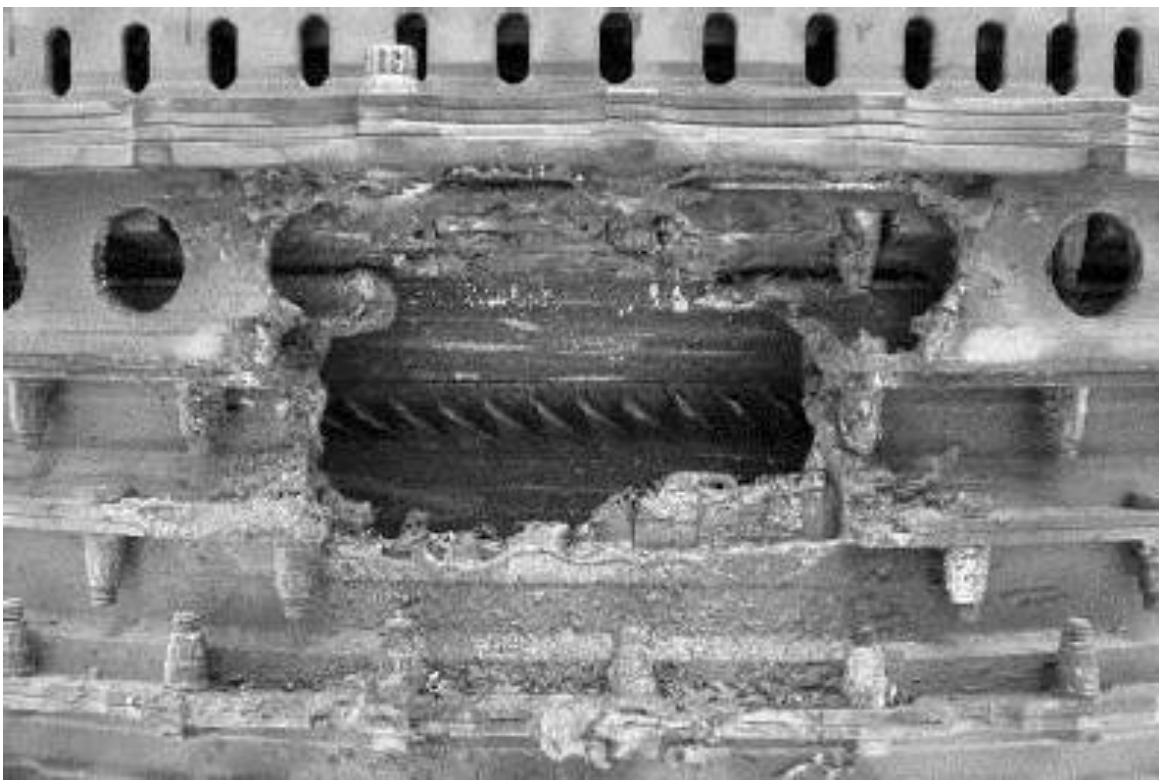
Η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, είναι ένας λόγος που χρησιμοποιείται αδρά σε χημικές βιομηχανίες. Η πολύ υψηλότερη θερμοκρασία τήξης του τιτανίου σε σύγκριση με του αλουμίνιου, που είναι κύριος του ανταγωνιστής στις κατασκευές όπου χρησιμοποιούνται ελαφρά μέταλλα, δίνει στο τιτάνιο ένα σαφές πλεονέκτημα σε εφαρμογές σε θερμοκρασίες άνω των 150 °C. Η υψηλή αντιδραστικότητα του τιτανίου με το οξυγόνο

περιορίζει την χρήση του τιτανίου και των κραμάτων του σε θερμοκρασίες περίπου των 600°C και άνω. Ξεπερνώντας αυτή τη θερμοκρασία, η διάχυση του οξυγόνου μέσα από το στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια του μετάλλου γίνεται πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα την υπερβολική ανάπτυξη του στρώματος οξειδίου και την ευθραυστότητα του γειτονικού πλούσιου σε οξυγόνο στρώματος του κράματος του τιτανίου.[3]

Πίνακας 3-3: Σύγκριση Τιτανίου με Σίδηρο, Νικέλιο & Αλουμίνιο.

	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>
Σημείο Τήξης (°C)	1670	1538	1455	660
Αλλοτροπικός Μετασχηματισμός (°C)	$\beta \overline{882} \alpha$	$\gamma \overline{912} \alpha$	-	-
Κρυσταλλική δομή	bcc→hex	fcc→bcc	fcc	fcc
Μέτρο Ελαστικότητας	115	215	200	72
Τάση διαρροής	1000	1000	1000	500
Πυκνότητα	4.5	7.9	8.9	2.7
Συγκριτική Αντοχή στη Διάβρωση	Πολύ Υψηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή
Συγκριτική Αντίδραση με το Οξυγόνο	Πολύ Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή
Συγκριτική Τιμή Μετάλλου	Πολύ Υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια

Ως μέταλλο είναι αρκετά διαμορφώσιμο σε θερμοκρασίες άνω των 760°C, αλλά όπως αναφέρθηκε, λόγω της έντονης αντίδρασης του με το οξυγόνο στις υψηλές θερμοκρασίες, πρέπει να επεξεργάζεται σε συνθήκες κενού ή υπό την προστασία αδρανών αερίων. Αντίστοιχα όμως το τιτάνιο έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα $21.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, συγκριτικά με τη θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα που είναι περίπου $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Εξαιτίας της ιδιότητας αυτής το τιτάνιο χρήζει δύσκολης μηχανουργικής κατεργασίας καθιστώντας το μέταλλο αυτό αρκετά δύσκολο για κατεργασία. Σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου ή κενού μπορεί επίσης να γίνει συγκόλληση τιτανίου με δέσμη ηλεκτρονίων, μια τεχνική η οποία δρα πολύ καλά με το μέταλλο αυτό. Το τιτάνιο μπορεί όμως να πιάσει φωτιά και να δημιουργήσει σοβαρές βλάβες σε περιπτώσεις όπου τρίβεται με άλλα μέταλλα σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτός είναι και ο λόγος που η χρήση του περιορίζεται σε δριμεία περιβάλλοντα μέσα σε κινητήρα αεροσκαφών, σε περιοχές όπου η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τους 400°C.[4, 6, 9]

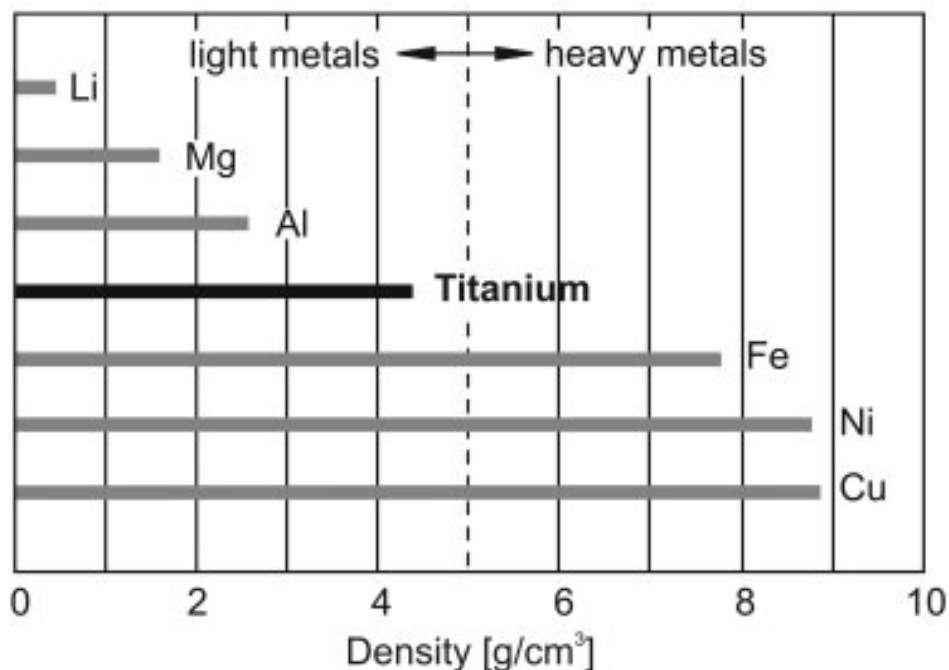


Εικόνα 3-7: Βλάβη από φωτιά λόγω τριβής κράματος τιτανίου με κράμα νικελίου σε κινητήρα αεροσκάφους.

Η χρήση του τιτανίου είναι περιορισμένη σε εμπορικές εφαρμογές, καθώς είναι δύσκολη η εξαγωγή του από το ρουτίλιο, ένα σύνηθες ορυκτό από το οποίο εξάγεται το τιτάνιο. Επίσης σπάνια βρίσκεται σε υψηλές περιεκτικότητες και ποτέ σε καθαρή μορφή. Η διαδικασία

δημιουργίας τιτανίου πρέπει να ελέγχεται εξονυχιστικά, έτσι ώστε να υπάρχει η αποφυγή μόλυνσης του μετάλλου. Για τον λόγο αυτό το τιτάνιο είναι ένα αρκετά ακριβό υλικό, ιδιαίτερα σε σχέση με τον χάλυβα και το αλουμίνιο και είναι κατάλληλο σε περιπτώσεις όπου οι εξαισιες ιδιότητές του είναι απαραίτητες. Θα μπορούσε λόγω των ιδιοτήτων του να αντικαταστήσει διάφορα κράματα και μέταλλα, όμως το μεγάλο κόστος του καθιστά κάτι τέτοιο αδύνατο. Για παράδειγμα, η τιμή του θα έπρεπε να πέσει τουλάχιστον 30% ώστε να γίνει μεγαλύτερη χρήση του στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η παγκόσμια παραγωγή τιτανίου είναι αρκετά μικρή, και ανέρχεται στις εκατοντάδες χιλιάδες τόνους, σε σχέση με τον χάλυβα ο οποίος έχει παραγωγή που ανέρχεται στους 750 εκατομμύρια τόνους ετήσια.[4, 6]

Το τιτάνιο απαιτεί τρία στάδια επεξεργασίας για την παραγωγή του. Πρώτα μετατρέπεται από ορυκτό σε σπόγγο, ένα πορώδες μέταλλο, και ύστερα ο σπόγγος τήκεται σε έναν κλίβανου ηλεκτρικού τόξου για την δημιουργία πληνθωμάτων. Η τήξη πρέπει να πραγματοποιηθεί σε κενό ή παρουσία αδρανών αερίων για να αποτραπεί η διαλυτοποίηση αερίων μέσα στο τηγμένο μέταλλο. Στο τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας, τα πληνθώματα μετατρέπονται σε πρωτογενή προϊόντα, όπως πρίσματα, για την παραγωγή των τελικών σχημάτων.[6]

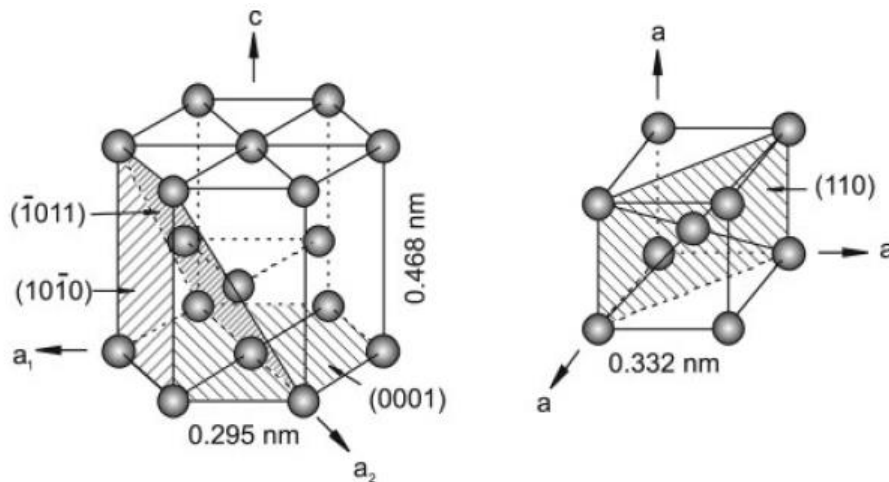


Εικόνα 3-8: Πυκνότητα επιλεγμένων μετάλλων.

Πίνακας 3-4: Φυσικές Ιδιότητες τιτανίου.

<i>Φυσικές Ιδιότητες</i>	
<i>Φάση</i>	Στερεό
<i>Κρυσταλλική Δομή:</i>	
<i>α-hcp</i>	$c = 4.6832 \pm 0.0004 \text{ \AA}$
	$a = 2.9504 \pm 0.0004 \text{ \AA}$
	$c/a = 1.5873$
<i>β-bcc</i>	$a = 3.28 \pm 0.003 \text{ \AA}$
<i>Πυκνότητα</i>	$4.54 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$
<i>Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στους 20°C</i>	$8.4 \times 10^{-6} \text{ cm/cm/K}$
<i>Ειδική Θερμότητα</i>	0.125 Cal/K/g
<i>Θερμοκρασία Μετατροπής α-φάσης σε β-φάση</i>	882°C (1155.5 K)
<i>Λανθάνουσα Θερμότητα Μετασχηματισμού</i>	1050 Cal/mole
<i>Θερμότητα Τήξης</i>	5020 Cal/mole
<i>Σημείο Τήξης</i>	1668°C (1941 K)
<i>Θερμότητα Εξάτμισης</i>	112.500 Cal/mole
<i>Σημείο Βρασμού</i>	3260°C (3533 K)
<i>Ηλεκτρική Αντίσταση:</i>	
<i>Υψηλή Καθαρότητα</i>	42 $\mu\Omega$ -cm
<i>Εμπορική Καθαρότητα</i>	55 $\mu\Omega$ -cm
<i>Μέτρο Ελαστικότητας</i>	$11.6 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$

Το τιτάνιο συναντιέται σε δύο κρυσταλλικές δομές, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα: την εξαγωνική μέγιστης πυκνότητας (α -Ti) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και την χωροκεντρομένη κυβικού πλέγματος δομή (β -Ti), η οποία σχηματίζεται περίπου στη θερμοκρασία των 882°C και είναι σταθερή μέχρι και τη θερμοκρασία τήξης. Το τιτάνιο συναντιέται στη φύση ως μίγμα πέντε σταθερών ισotόπων του, τα οποία είναι: Ti-46 (8%), Ti-47 (7.3), Ti-48 (73.8), Ti-49 (5.5%) και το Ti-50 (5.4%). Είναι επίσης γνωστός και ένας σημαντικός αριθμός τεχνητών ραδιοϊσοτόπων του.[9]



Εικόνα 3-9: Εξαγωνική μορφή μέγιστης πυκνότητας τιτανίου (α -Ti) & Χωροκεντρομένη μορφή τιτανίου (β -Ti).

3.2.3 Κρυσταλλογραφία του Τιτανίου

Το Τιτάνιο, όπως διάφορα άλλα μέταλλα, για παράδειγμα το Ασβέστιο (Ca), ο Σίδηρος (Fe), το Κοβάλτιο (Co), το Ζιρκόνιο (Zr), το Πυρίτιο (Sn), το Δημήτριο (Ce) και το Χάφνιο (Hf), μπορούν να κρυσταλλωθούν σε διάφορες κρυσταλλικές δομές. Ωστόσο κάθε κρυσταλλική δομή μπορεί να υπάρξει σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Ο πλήρης μετασχηματισμός μια κρυσταλλικής δομής σε μια άλλη ονομάζεται αλλοτροπικός μετασχηματισμός, και η αντίστοιχη θερμοκρασία μετασχηματισμού ονομάζεται θερμοκρασία μετάπτωσης. Το καθαρό τιτάνιο, καθώς και η πλειοψηφία των κραμάτων του, κρυσταλλώνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες σε ένα τροποποιημένο εξαγωνικής ιδανικής δομής σύστημα, το οποίο ονομάζεται α τιτάνιο. Σε υψηλότερη θερμοκρασία, σχηματίζεται η σταθερή

χωροκεντρομένη δομή που ονομάζεται β τιτάνιο. Ο αλλοτροπικός αυτός μετασχηματισμός γίνεται στους 882 ± 2 °C και είναι σταθερός μέχρι το σημείο τήξης, στους 1668 °C. Η ακριβής θερμοκρασία μετασχηματισμού επηρεάζεται έντονα από τα στοιχεία παρεμβολής και αντικατάστασης και ως εκ τούτου από την καθαρότητα του μετάλλου. Η εξαγωνική δομή της α-φάσης φαίνεται στην εικόνα 3-9, η οποία αναφέρει επίσης τις τιμές των παραμέτρων του πλέγματος στην θερμοκρασία δωματίου που είναι αντίστοιχα a (0.295nm) και c (0.468nm). Το αποτέλεσμα του κλάσματος c/a για το καθαρό τιτάνιο είναι 1.587, το οποίο είναι μικρότερο από την ιδανική αναλογία 1.633 για την εξαγωνική δομή μέγιστης πυκνότητας. Για αυτόν τον λόγο αναφέρεται παραπάνω ότι η κρυστάλλωση του α-τιτανίου γίνεται σε ιδανική για το μέταλλο εξαγωνική μορφή. Στην εικόνα 3-9 φαίνεται αντίστοιχα η χωροκεντρομένη κρυσταλλική δομή του β-τιτανίου. Η ύπαρξη των δύο διαφορετικών κρυσταλλικών δομών και η αντίστοιχη αλλοτροπική θερμοκρασία μετασχηματισμού παίζουν κύριο ρόλο στις διάφορες ιδιότητες που κατέχει το τιτάνιο και τα κράματά του.[1, 12]

Τόσο η πλαστική παραμόρφωση, όσο και η διάχυση, είναι στενά συνδεδεμένες με την κρυσταλλική δομή του μετάλλου. Μέταλλα όπως το τιτάνιο, όταν περιέχουν την α-φάση που είναι εξαγωνικής δομής, ενώ έχουν υψηλή αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση, δεν αντέχουν πολύ όταν αρχίζουν πλέον να παραμορφώνονται, με αποτέλεσμα την ψαθυρή τους φύση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα περισσότερα υλικά, όπως και το τιτάνιο, είναι πολυκρυσταλλικά, πράγμα που σημαίνει ότι αποτελούνται από πολλούς τυχαία προσανατολισμένους μικρούς κρυστάλλους ή κόκκους, των οποίων τα αντίστοιχα όρια συμπίπτουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι μόνο ορισμένοι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι ευνοϊκά, έτσι ώστε να επιτρέπουν το ξεκίνημα της ολίσθησης, ενώ αντιθέτως γειτονικοί κόκκοι να μην έχουν τον κατάλληλο προσανατολισμό και άρα η τάση που απαιτείται για το ξεκίνημα της πλαστικής ροής, να είναι αυξημένη στα πολυκρυσταλλικά υλικά. Έχει αποδειχθεί ότι τουλάχιστον πέντε ανεξάρτητα συστήματα ολίσθησης πρέπει να λειτουργούν ταυτόχρονα έτσι ώστε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό να παρουσιάζει ολκιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι κάποια πολυκρυσταλλικά μέταλλα, ιδιαίτερα αυτά που βασίζονται στην εξαγωνική δομή, όπως το τιτάνιο, να μην έχουν επαρκή συστήματα ολίσθησης για να υποβληθούν σε σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Σε αντίθεση, χωροκεντρομένες κρυσταλλικές δομές, όπως η β-φάση στο τιτάνιο, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ολκιμότητα από τις εξαγωνικές. Αυτό παρατηρείται και από τον παρακάτω πίνακα 3-5.[1, 5, 6]

Πίνακας 3-5: Σύστημα Ολίσθησής σε FCC, BCC, HCP.

<i>Μέταλλα</i>	<i>Επίπεδο Ολίσθησης</i>	<i>Κατεύθυνση Ολίσθησης</i>	<i>Αριθμός Συστημάτων Ολίσθησης</i>
<i>Εδροκεντρωμένη Κρυσταλλική Δομή</i>			
<i>Co, Al, Ni, Ag, Au</i>	(111)	$[1\bar{1}0]$	12
<i>Χωροκεντρομένη Κρυσταλλική Δομή</i>			
<i>α-Fe, W, Mo</i>	(110)	$[1\bar{1}1]$	12
<i>α-Fe, W</i>	(211)	$[1\bar{1}1]$	12
<i>α-Fe, K</i>	(321)	$[1\bar{1}1]$	24
<i>Εξαγωνική Κρυσταλλική Δομή</i>			
<i>Cd, Zn, Mg, Ti, Be</i>	(0001)	$[11\bar{2}0]$	3
<i>Ti, Mg, Zr</i>	(10 $\bar{1}0$)	$[11\bar{2}0]$	3
<i>Ti, Mg</i>	(10 $\bar{1}1$)	$[11\bar{2}0]$	6

3.2.4 Ταξινόμηση κραμάτων του Τιτανίου

Δεδομένου ότι το τιτάνιο είναι ένα μέταλλο μετάπτωσης, με μια μη συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα ηλεκτρονίων, έχει την δυνατότητα σχηματισμού στερεών διαλυμάτων με διάφορα στοιχεία, τα οποία δεν ξεπερνάνε την ατομική ακτίνα του κατά 0.85 έως 1.15, δηλαδή $\pm 20\%$. Στοιχεία τέτοια είναι ο άνθρακας, το οξυγόνο κτλ. που έχουν ατομική ακτίνα μικρότερη από 0.59 από αυτή του τιτανίου, καταλαμβάνουν ενδιάμεσες θέσεις και έχουν υψηλή διαλυτότητα στο τιτάνιο. Η ευκολία με την οποία οι διαλυτές ουσίες διαλύονται στο τιτάνιο, καθιστούν δύσκολο τον σχεδιασμό κραμάτων καθίζησής. Το βόριο έχει παρόμοια αλλά μεγαλύτερη ακτίνα από τον άνθρακα, το οξυγόνο, το άζωτο και το υδρογόνο, και για

αυτόν το λόγο είναι πιθανή η κατακρήμνιση του στο τιτάνιο. Κατακρήμνιση χαλκού είναι επίσης πιθανή σε κατάλληλα κράματα.[2, 4]

Τα κραματικά στοιχεία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως των επιπτώσεών τους στην σταθερότητα της α και β φάσης. Συνολικά υπάρχουν τριών ειδών κραματικά στοιχεία: οι α-σταθεροποιητές, οι β-σταθεροποιητές και ουδέτερα στοιχεία, τα οποία επηρεάζουν μηδαμινά το κράμα μειώνοντας λίγο την θερμοκρασία στην οποία μπορεί να εμφανιστεί η β-φάση. Φυσικά, εκτός των κραματικών στοιχείων τα οποία εντάσσονται στην δημιουργία του κράματος, υπάρχουν και μη-μεταλλικά στοιχεία, τα οποία εμφανίζονται σαν ακαθαρσίες και είναι της τάξεως των 100 ppm. Γενικά οι α-σταθεροποιητές οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας αλλοτροπικού μετασχηματισμού, ενώ οι β-σταθεροποιητές προκαλούν μείωση της θερμοκρασίας μετασχηματισμού.[1]

Ως εκ τούτου, το αλουμίνιο (Al), το οξυγόνο (O), το άζωτο (N) και το γάλλιο (Ga) είναι όλα α-σταθεροποιητές. Οι α-σταθεροποιητές, εκτός από την επέκταση σε υψηλότερες θερμοκρασίες της α-φάσης, σχηματίζουν και την διπλή φάση α+β. Το αλουμίνιο είναι ο κύριος α-σταθεροποιητής εμπορικής σημασίας και αποτελεί συστατικό των περισσότερων εμπορικών κραμάτων του τιτανίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι το μοναδικό κοινό μέταλλο που αυξάνει την θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού, και έχει επίσης την δυνατότητα μεγάλης διαλυτότητας και στις δύο φάσεις, άλφα και βήτα, του τιτανίου.[3, 4] Η περιεκτικότητα σε αλουμίνιο περιορίζεται συνήθως στο 7% ή σε 9% σύμφωνα με την εξίσωση (3.4) στα εμπορικά τιτανιούχα κράματα, με σκοπό την αποφυγή κατακρήμνισης της Ti₃Al φάσης.[2] Η ισοδυναμία αλουμινίου υπολογίζεται από το κριτήριο του Rosenberg:

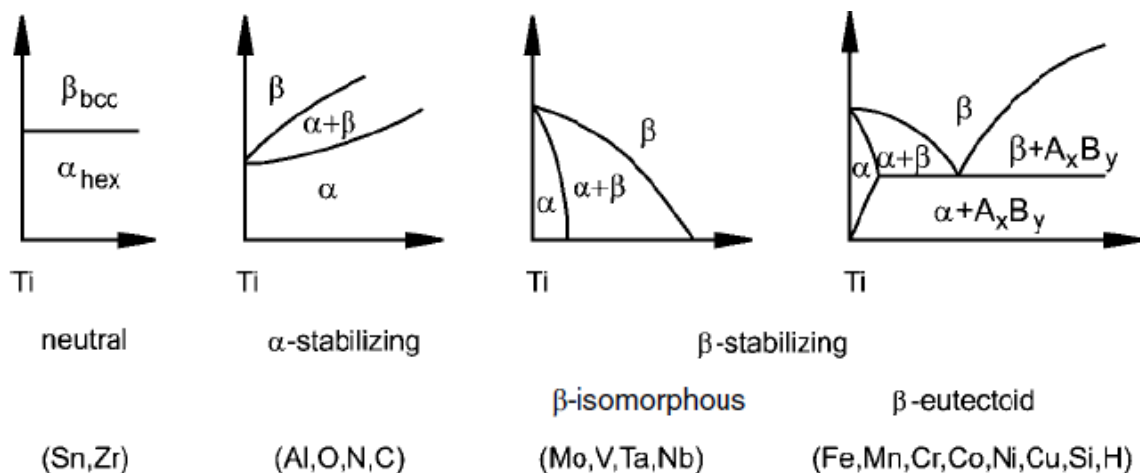
$$\text{Al} + \text{Sn}/3 + \text{Zr}/6 + 10(\text{O} + \text{C} + 2\text{N}) < 9\% \quad (3.4)$$

Το μολυβδαίνιο (Mo), το βανάδιο (V), το βολφράμιο (W) και το ταντάλιο (Ta) είναι όλα στοιχεία που κατατάσσονται στην ομάδα των β-σταθεροποιητών και ονομάζονται ισόμορφοι β-σταθεροποιητές. Ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn), ο σίδηρος (Fe), το νικέλιο (Ni), το κοβάλτιο (Co) και το υδρογόνο (H) ονομάζονται ευτηκτοειδείς β-σταθεροποιητές, καθώς προκαλούν ευτηκτοειδή μετασχηματισμό. Η αντίδραση αυτή είναι συχνά αργή, εφόσον εμπλέκονται στο πλέγμα στοιχεία αντικατάστασης και τελικώς καταστέλλεται. Το μολυβδαίνιο και το βανάδιο έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στην σταθεροποίηση της β φάσης και αποτελούν συχνά κραματικά στοιχεία στα κράματα του τιτανίου. Το βολφράμιο

σπάνια προστίθεται εξαιτίας της υψηλής του πυκνότητας. Ο χαλκός σχηματίζει $TiCu_2$ το οποίο καθιστά τα κράματα ικανά για γήρανση και θερμή επεξεργασία. Τέτοια κράματα παρατηρούνται συνήθως ως φύλλα. Ο χαλκός προστίθεται συνήθως σε συγκεντρώσεις λιγότερο του 2.5 wt% σε εμπορικά κράματα.[2, 4, 12]

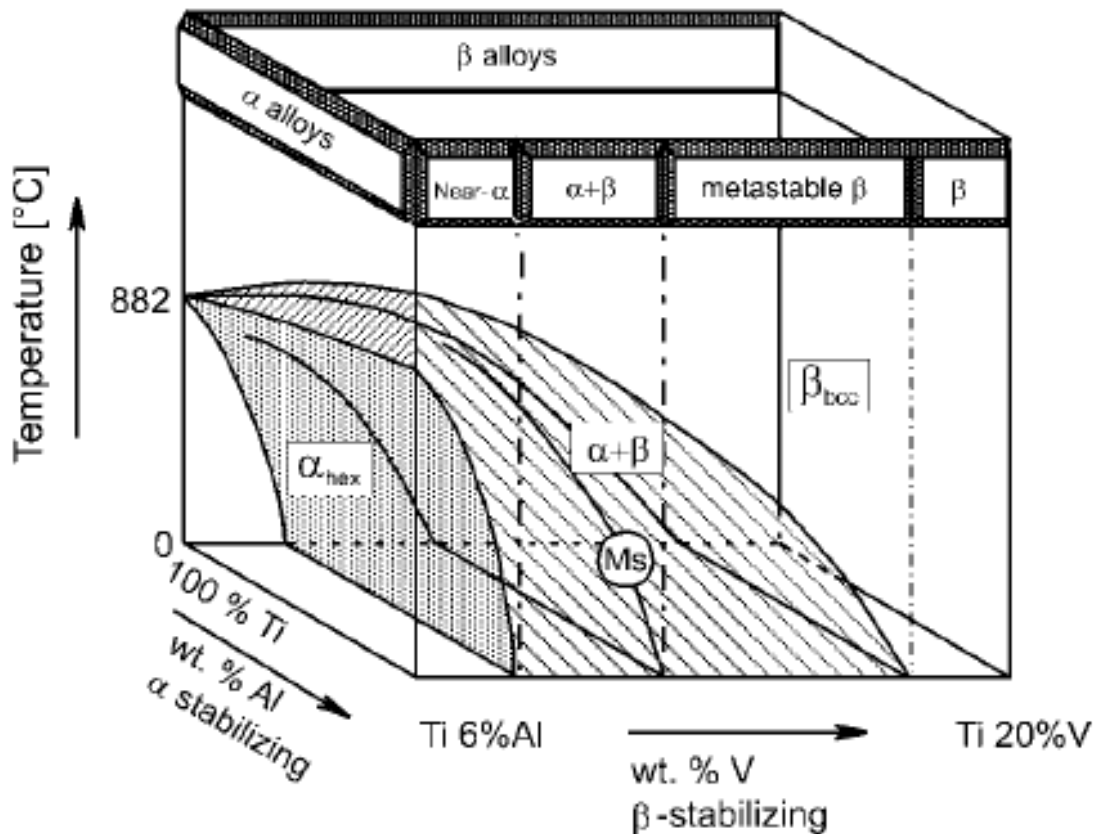
Το ζirkόνιο, το πυρίτιο και ο κασσίτερος θεωρούνται ουδέτερα στοιχεία, καθώς δεν έχουν σχεδόν καμία επιρροή στο α/β όριο του διαγράμματος φάσεως. Βέβαια όσον αφορά την αντοχή του κράματος, δεν θεωρούνται ουδέτερα, καθώς ενισχύουν την α -φάση. Επίσης τα άτομα του πυριτίου τείνουν να διαχέονται στο πλέγμα και να παρεμποδίζουν αποτελεσματικά μετακινήσεις διαταραχών, με αποτέλεσμα την βελτίωση της αντοχής σε ερπυσμό, ενώ το ζirkόνιο τείνει να ομογενοποιεί λεπτά πυριτιούχα κατακρημνίσματα.[1, 3]

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται διάφορες μορφές από τα διαγράμματα φάσεων σε ισορροπία μεταξύ τιτανίου και των στοιχείων ανάμιξης του. Επομένως είναι εφικτό τα κράματα του τιτανίου να έχουν μια μεγάλη γκάμα συνθέσεων. Προσθήκη στοιχείων α και β -σταθεροποιητών στο τιτάνιο εμφανίζουν περιοχές στο αντίστοιχο διάγραμμα φάσεων ισορροπίας, όπου οι φάσεις α και β μπορούν να συνυπάρξουν.



Εικόνα 3-10: Σχηματική αναπαράσταση των τύπων διαγραμμάτων φάσης μεταξύ του τιτανίου και των στοιχείων κράματωσης.

Αναλόγως με τις κραματικές προσθήκες και τις παρούσες φάσεις στην μικροδομή του τιτανίου, τα κράματά του κατηγοριοποιούνται ως α , $\alpha+\beta$ και β κράματα. Αυτά μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε near- α κράματα και μετασταθή κράματα β . Αυτό σχηματικά σκιαγραφείται σε ένα τρισδιάστατο διάγραμμα φάσης, το οποίο αποτελείται από δύο διαγράμματα φάσεων, ενός με α -σταθεροποιητικά στοιχεία και ενός με β -σταθεροποιητικά στοιχεία.[1]



Εικόνα 3-11: Τρισδιάστατο διάγραμμα φάσης ταξινόμησης κραμάτων τιτανίου.

α-Κράματα

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι τα α-κράματα αποτελούνται από εμπορικό καθαρό τιτάνιο ή και κραματικά στοιχεία, τα οποία σταθεροποιούν την α-φάση ή είναι ουδέτερα. Γενικά τα α-κράματα χαρακτηρίζονται από την σταθερότητά τους και τις καλές ιδιότητες τους στις υψηλές θερμοκρασίες, εξαιτίας της καλής αντοχής τους στον ερπυσμό. Δεδομένου όμως ότι καμία ασταθής φάση δεν παραμένει μετά την ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, καμία σημαντική τροποποίηση, από την άποψη της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων, δεν είναι δυνατή χρησιμοποιώντας θερμικές επεξεργασίες. Επίσης τα α-κράματα παρουσιάζουν ικανοποιητικό επίπεδο μηχανικής αντοχής, υψηλή ελαστικότητα, αντοχή στη θραύση και χαμηλή ικανότητα σφυρηλάτησης, το οποίο οφείλεται στην εξαγωνική τους κρυσταλλική δομή.

Το οξυγόνο χρησιμοποιείται ως κραματική προσθήκη στα εμπορικά μέταλλα καθαρού τιτανίου και σχηματίζει στερεά διαλύματα παρεμβολής, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής τους, αλλά με ταυτόχρονη πτώση της ολκιμότητάς τους. Καθένα είδος τέτοιου μετάλλου ξεχωρίζει, καθώς παρουσιάζει διαφορετικά επίπεδα οξυγόνου. Προκειμένου τα

εμπορικά μέταλλα καθαρού τιτανίου να φτάσουν υψηλά επίπεδα αντοχής, μόνο το οξυγόνο προστίθεται ως κραματική προσθήκη, ενώ στοιχεία όπως ο άνθρακας και ο σίδηρος θεωρούνται ακαθαρσίες, που εισέρχονται στο κράμα μέσω της διαδικασίας παρασκευής του.[1, 2, 4, 9]

Near-α Κράματα

Εν συνεχεία, αν μικρό-ελάχιστες ποσότητες β-σταθεροποιητών προστεθούν στα α-κράματα, τότε αυτά ονομάζονται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, near-α κράματα. Η παρουσία σε μικρό βαθμό της β-φάσης στα α-κράματα είναι πλεονεκτική, καθώς δημιουργούν ευνοϊκότερες συνθήκες κατά τη διάρκεια της θερμής επεξεργασίας και της σφυρηλάτησης, βελτιώνεται η αντοχή του κράματος και παρουσιάζουν έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ της αντίστασης ερπυσμού των α-κραμάτων και της υψηλής αντοχής των α+β κραμάτων. Παραδείγματος χάρη το α-κράμα Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo περιέχει 1% Mo, που είναι β-σταθεροποιητής, και λίγο Sn και Zr, ουδέτερα στοιχεία, που προσδίδουν όμως παραπάνω αντοχή στο κράμα. Άλλο ένα near-α κράμα που έχει αναπτυχθεί με καλές ιδιότητες σε αυξημένες θερμοκρασίες($T < 590$ °C) είναι το Ti-6Al-4Sn-3.5Zr-0.5Mo-0.35Si-0.7Nb-0.06C. Το νιόβιο έχει προστεθεί για την παραπάνω οξειδωτική αντίσταση που προσδίδει στο κράμα και ο άνθρακας για να επιτρέψει ένα μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος όπου το κράμα μπορεί να έχει την διφασική φύση της α και β-φάσης, με σκοπό να διευκολύνει τις θερμομηχανικές επεξεργασίες που μπορεί να υποστεί. Το συγκεκριμένο κράμα χρησιμοποιείται για την παρασκευή δίσκων για κινητήρες αεροσκαφών και έχει αντικαταστήσει δίσκους κατασκευασμένους από τα βαρύτερα νικελούχα υπερκράματα. Η τελική μικροδομή του κράματος αποτελείται από ισοαξονικούς μητρικούς α-κρυστάλλους και Windmanstätten α-πλάκες διαχωριζόμενες μεταξύ τους από την β-φάση.[2,4]

Διφασικά α-β κράματα

Τα διφασικά α-β κράματα κατέχουν υψηλή αντοχή και διαμορφωσιμότητα και είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη ομάδα κραμάτων τιτανίου. Αυτά τα κράματα περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα β-σταθεροποιητών, περίπου 4-6%. Όταν γίνεται θερμική επεξεργασία, μπορούν να αναπτύξουν ένα μεγάλο εύρος μικροδομών και μηχανικών ιδιοτήτων. Αν η ποσότητα των β-σταθεροποιητικών στοιχείων που προστίθενται στο κράμα

γίνει μεγαλύτερη, σε επίπεδο που πλέον η β-φάση δεν μετασηματίζεται σε μαρτενσίτικη δομή κατά την γρήγορη βαφή του κράματος, το κράμα τότε περιέχει ακόμα τις δύο φάσεις, άλφα και βήτα, και ονομάζεται μετασταθές κράμα-β. Πρέπει να αναφερθεί ότι αυτά τα κράματα μπορούν ακόμα να περιέχουν την α-φάση σε βαθμό μεγαλύτερο του 50%. Παράδειγμα α-β κράματος είναι το Ti-6Al-4V. Το αλουμίνιο μειώνει την πυκνότητα του κράματος, σταθεροποιεί και προσδίδει παραπάνω αντοχή στην α-φάση, ενώ ταυτόχρονα το βανάδιο βοηθάει στην ύπαρξη μεγαλύτερης ποσότητας της όλκιμης β-φάσης, που είναι χρήσιμη για θερμές επεξεργασίες. Αυτό το κράμα, στο οποίο αναλογεί περίπου η μίση παραγωγή της συνολικής παραγωγής τιτανίου, είναι τόσο δημοφιλές εξαιτίας της αντοχής του, 1100 MPa, της αντοχής του στον ερπυσμό στους 300 °C, της αντοχής του στην κόπωση και της εύκολης χυτευσιμότητας του. Η β-φάση όμως, που είναι χωροκεντρομένης κρυσταλλικής δομής, παρουσιάζει το πρόβλημα, όπως και στον φερριτικό σίδηρο, ότι σε ορισμένη θερμοκρασία μεταβάλλεται από όλκιμη σε ψαθυρή.[2 ,4]

Μετασταθή β-κράματα

Τα μετασταθή β-κράματα περιέχουν 10-15% β-σταθεροποιητές και η β-φάση βρίσκεται σε μετασταθείσα κατάσταση σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η μετασταθείσα β-φάση μπορεί να υποστεί γήρανση για να δημιουργήσει πολύ μικρούς Windmanstätten άλφα κρυστάλλους μέσα στη μήτρα της εμπλουτισμένης β-φάσης. Αυτά τα κράματα έχουν υψηλή αντοχή, σκληρότητα, εξίσια δυνατότητα παραπάνω σκλήρυνσης και επεξεργασιμότητα σε μια ευρεία θερμοκρασιακή περιοχή. Επιπλέον περιέχουν μικρή ποσότητα α-σταθεροποιητικών στοιχείων ως ενισχυτικούς παράγοντες. Τα βήτα και μετασταθή βήτα-κράματα προσφέρουν αυξημένη αντοχή στην θραύση σε σχέση με τα α+β. Τα κράματα αυτά βρίσκουν αυξανόμενη χρήση στις αεροναυπηγικές κατασκευές.[2]

Πυρίμαχα τιτανιούχα κράματα

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι το τιτάνιο, όταν τρίβεται με άλλα μέταλλα σε υψηλές θερμοκρασίες, δημιουργεί βλάβες λόγω της φωτιάς που δημιουργείται από την τριβή σε αεροκινητήρες, ή σε τιτανιούχους εναλλάκτες θερμότητας, που χρησιμοποιούνται σε χημικές βιομηχανίες. Έτσι η προσθήκη χρωμίου σε συγκεντρώσεις που ξεπερνάνε το 10% κατά βάρος, βοηθάει στην βελτιστοποίηση της πυριμαχικότητας των τιτανιούχων

κραμάτων. Το κράμα Ti-35V-15Cr wt% έχει αρκετό χρώμιο, που το καθιστά αρκετά πυρίμαχο, ώστε να αντέξει σε περιβάλλον αεροκινητήρα σε θερμοκρασίες μέχρι και 510 °C. Το χρώμιο βρέθηκε ότι δεν είναι αποτελεσματικό σε κράματα Ti-Cr όπου δεν ενθαρρύνει την ανάπτυξη ενός συνεχόμενου προστατευτικού φιλμ οξειδίου. Τα κράματα αυτά ονομάζονται πυρίμαχα β-κράματα.[4]

β-Κράματα

Πολύ μεγάλη προσθήκη, 30%, β-σταθεροποιητών, έχει ως αποτέλεσμα την συγκράτηση της β-φάσης ως σταθερή φάση σε θερμοκρασία δωματίου. Τα β-κράματα μοιάζουν με τα πυρίμαχα μέταλλα στο γεγονός ότι έχουν υψηλή πυκνότητα και κακή ολκιμότητα και χρησιμοποιούνται σε υψηλά ειδικευμένες εφαρμογές, που απαιτούν μεγάλη πυριμαχικότητα και αντοχή στη διάβρωση.[4]

Αργιλίδια του Τιτανίου

Πέρα από τα κράματα που έχουν αναφερθεί, έχουν αναπτυχθεί και τα λεγόμενα στερεά διαλύματα παρεμβολής, με ονομασία, αργιλίδια του τιτανίου, τα οποία έχουν ωφέλιμες τιμές αντοχής και ολκιμότητας. Αυτά τα κράματα βασίζονται στις διαμεταλλικές ενώσεις Ti_3Al (α_2) και $TiAl$ (γ). Εκείνα που βασίζονται στην Ti_3Al ένωση συνήθως περιέχουν μεγάλες προσθήκες νιοβίου (Nb) και επιπλέον β-σταθεροποιητές (10-25 at.% - 20-45 wt.%). Αποτελούνται από την β-φάση η την B2 φάση, με σκοπό την βελτίωση της ολκιμότητας τους. Η διαμεταλλική ένωση $TiAl$ είναι επίσης κραματωμένη με β-σταθεροποιητές, όπως το νιόβιο (Nb), το βανάδιο (V), το μαγγάνιο (Mn) και το χρώμιο (Cr) σε περιορισμένες ποσότητες. Επίσης κράματα, τα οποία είναι βασισμένα σε ενώσεις όπως η ορθορομβική φάση Ti_2AlNb (O-φάση), είναι υπό αξιολόγηση. Γενικώς συνηθίζεται τα αργιλίδια του τιτανίου να είναι διφασικά κράματα α - α_2 , διφασικά κράματα γ - $TiAl$, όπως επίσης υπάρχει και η ύπαρξη του διφασικού κράματος α_2 - γ , ή κραμάτων με περισσότερες από δύο φάσεις, αναλόγως τις κραματικές προσθήκες που περιέχουν. Τα κράματα αυτά κατέχουν εξαιρετικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες και καλή οξειδωτική αντοχή, αλλά η ολκιμότητα και η αντοχή τους σε θραύση είναι φτωχή. Για τον λόγο αυτό η χρησιμότητα τους σε συμβατικές εφαρμογές είναι μειωμένη. Συμβατικά κράματα τιτανίου χρησιμοποιούν μια πολύ στενή σύνθεση από α -σταθεροποιητές, όπως ορίζεται από το κριτήριο του Rosenberg, με

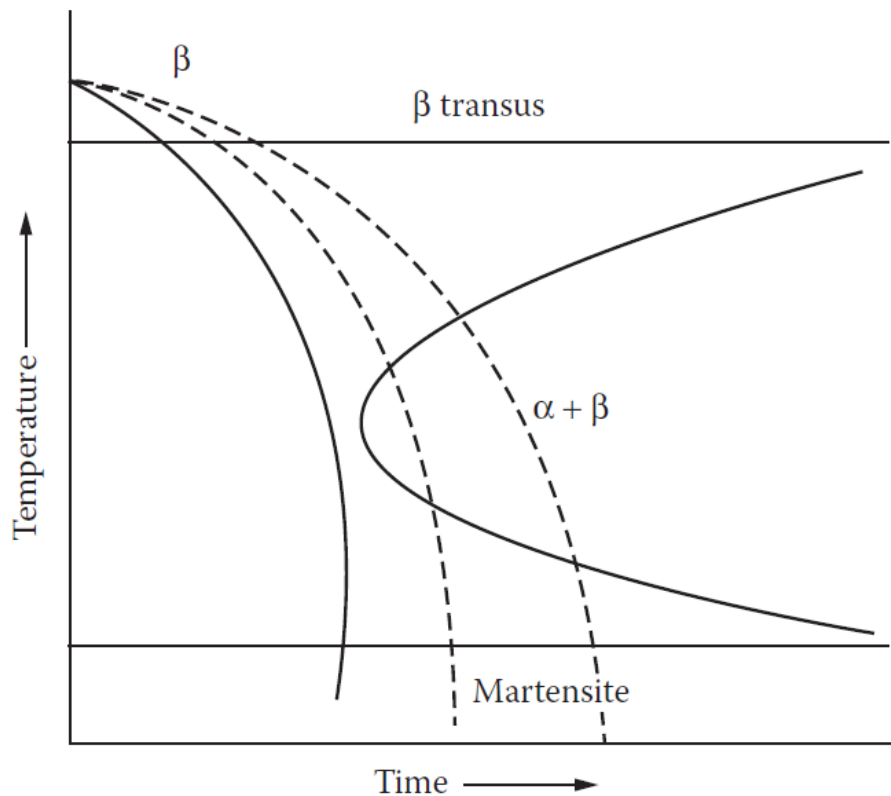
αποτέλεσμα αυτό να είναι αρκετά περιοριστικό για την ανάπτυξη τιτανιούχων κραμάτων. Βέβαια αυτή η κατάσταση μπορεί να αλλάξει στην περίπτωση που αυτά τα στερεά διαλύματα παρεμβολής, Ti_3Al (α_2) και $TiAl$ (γ), βρουν εμπορικές εφαρμογές, και τότε το φάσμα των διαθέσιμων τιτανιούχων κραμάτων μπορεί να υποστεί σημαντική επέκταση.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί, ότι υπάρχει και μια περαιτέρω διαμεταλλική φάση με τεχνικό ενδιαφέρον, που ονομάζεται τ -φάση και ανήκει στην κυβική οικογένεια $L1_2$. Αυτή η φάση εμφανίζεται όταν στοιχεία όπως το βανάδιο (V), το χρώμιο (Cr), το μαγγάνιο (Mn), ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co), το νικέλιο (Ni), ο χαλκός (Cu) και ο κασσίτερος (Zn) αντικαθιστούν περίπου 10% του αλουμινίου σε κράματα $TiAl_3$ με υψηλή περιεκτικότητα σε αλουμίνιο.[1, 4]

Βαφή β-φάσης

Πολύ σημαντικό ρόλο στα κράματα τιτανίου κατέχει η βαφή κραμάτων που περιέχουν τη β-φάση. Σε υψηλές ταχύτητες βαφής που ξεκινάνε πάνω από την θερμοκρασία μαρτενσιτικής εκκίνησης, η χωροκεντρομένη β-φάση μετασχηματίζεται πλήρως στην εξαγωνική α-φάση με μη-διαχυσιακό(στρατιωτικό) μετασχηματισμό, με αποτέλεσμα μιας εναπομένουσας λεπτής σαν πλάκα ή ίνα μορφής με μαρτενσιτική δομή.[4, 13] Αυτός ο μετασχηματισμός αυξάνει τη δυσθραυστότητα, όμως παρατηρείται αυξημένη αντοχή σε σχέση με το α-τιτάνιο. Μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω στην α' εξαγωνική μαρτενσιτική δομή και στην ορθορομβική α'' μαρτενσιτική δομή, με την τελευταία να παρατηρείται σε βαφές με θερμοκρασίες χαμηλότερες από 900 °C, καθώς και με την παρουσία μεγαλύτερης ποσότητας β-σταθεροποιητών. Η ορθορομβική α'' μαρτενσιτική δομή χαρακτηρίζεται από καλή παραμορφωσιμότητα. Η εξαγωνική α' μαρτενσιτική δομή είναι υπερκορεσμένη σε β-σταθεροποιητές, και έχει μια παρόμοια σχέση προσανατολισμού των κόκκων, όπως η σχέση της β-φάσης με την α-φάση.[1, 3] Αυτή η μικροδομή, ως εκ τούτου, χαρακτηρίζεται από μια πολύ λεπτή καλαθό – υφαντή (basket weave) δομή με βελονοειδή χαρακτήρα εξαιτίας του μη-διαχυσιακού σχηματισμού πυρήνων. Επίσης, λόγω του ότι δεν υπάρχει διάχυση μεγάλων αποστάσεων, δεν υπάρχει κατά συνέπεια αλλαγή σύστασης μεταξύ προϊόντων φάσεων και μητρικού υλικού.[13] Αντιθέτως οι α' και α'' -φάσεις μπορούν να μετασχηματιστούν σε λεπτή β-φάση, εφόσον το κράμα υποστεί γήρανση, το οποίο οδηγεί σε χρήσιμη προσαύξηση αντοχής, όμως σε ορισμένα κράματα αυτό είναι αιτία σχηματισμού διαμεταλλικών πυριτιδιακών φάσεων.[2]

Σε κράματα περιεκτικότητας μεγάλης ποσότητας β-σταθεροποιητών που υπόκεινται σε ταχεία ψύξη, η μετασταθείσα β-φάση μπορεί να διατηρηθεί εντελώς. Αντιθέτως, σε αργές ψύξεις, η α-φάση μπορεί να κατακρημνιστεί στα όρια των κόκκων όπως και στο εσωτερικό τους, με την ποσότητα της α-φάσης να είναι συνάρτηση του ρυθμού ψύξης και β-σταθεροποιητών.[2]

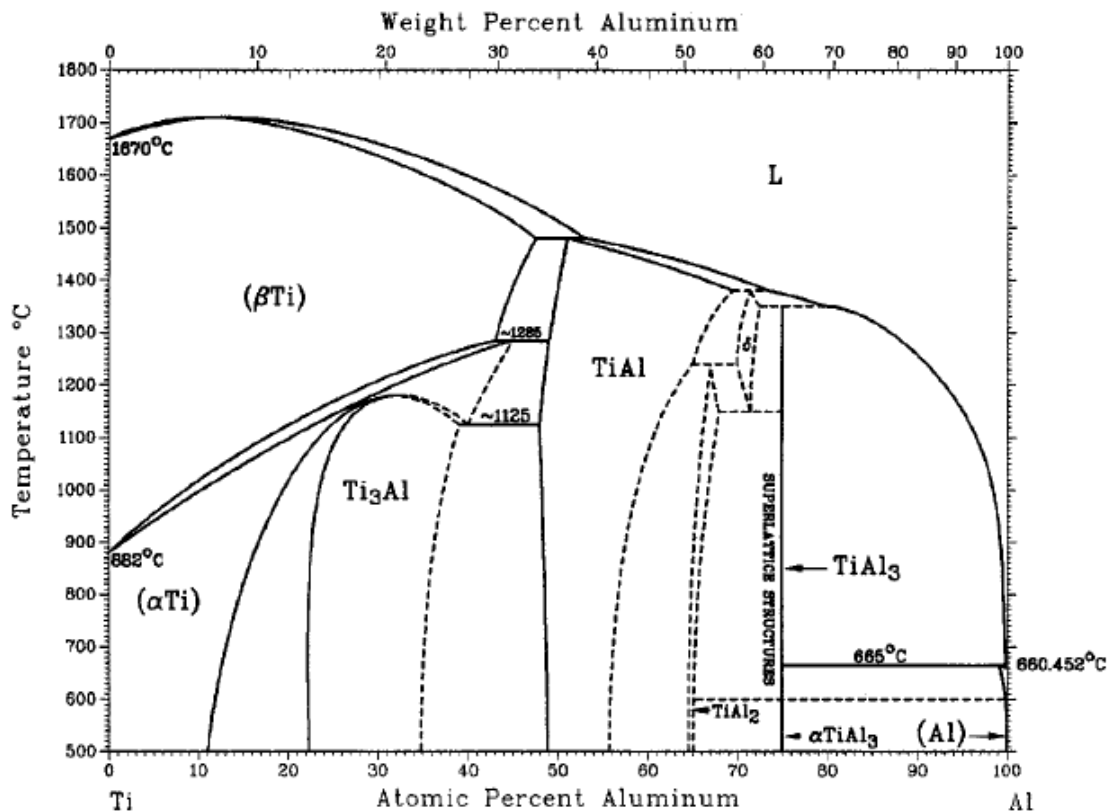


Εικόνα 3-12: TTT διάγραμμα ενός τυπικού α+β κράματος τιτανίου.

Σε ορισμένες συνθέσεις, διαμορφώνεται η μετασταθείσα ω-φάση, η οποία μετασχηματίζεται και αυτή από την β-φάση κατά την βαφή της από κράματα που είναι βασισμένα στο τιτάνιο (Ti), ζirkόνιο (Zr) και χάλφνιο (Hf). Η ω-φάση δημιουργείται και αυτή με μη-διαχυσιακό μετασχηματισμό και δημιουργεί πολύ μικρά κατακρημνίσματα της τάξεως των 2-5 nm.

Η μετασταθείσα β-φάση αποσυντίθεται κατά την επακόλουθη γήρανση με αποτέλεσμα την κατακρήμνιση της και δημιουργίας λεπτόκοκκης α-φάσης. Η γήρανση οδηγεί σε σημαντική προσ αύξηση της αντοχής, ενώ η ολκιμότητα μειώνεται. Όμως ο συνδυασμός της αντοχής και της ολκιμότητας σε αυτά τα κράματα μπορεί να βελτιστοποιηθεί διαλέγοντας την κατάλληλη θερμοκρασία και διάρκεια της γήρανσης. Δύο ακόμα αντιδράσεις αποσύνθεσης

όμως της μετασταθείσας β-φάσης μπορεί να συμβούν σε χαμηλές θερμοκρασίες: εμφάνιση της ω-φάσης και μια αντίδραση διαχωρισμού της ω-φάσης σε $\beta_1 + \beta_2$ σε πλουσιότερα κράματα. Η συγκρότηση της ω-φάσης επομένως είναι ανεπιθύμητη, γιατί η παρουσία της μπορεί να καταστήσει το κράμα αρκετά ψαθυρό και άρα να οδηγήσει σε αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων και επομένως πρέπει να αποφεύγεται ελέγχοντας την διαδικασία της γήρανσης. Ο διαχωρισμός της β-φάσεως δεν έχει τύχει μεγάλης προσοχής καθώς δεν εμφανίζεται στα εμπορικά κράματα. Τόσο η αντίδραση της ω-φάσης, όσο και ο διαχωρισμός της β-φάσης, μπορεί να επηρεάσει την μορφολογία και τον μετασχηματισμό της α-φάσης σε κάποια κράματα, εφόσον η α-φάση μπορεί να μετασχηματιστεί έμμεσα είτε από την ω-φάση είτε την β_1 -φάση.[2]



Εικόνα 3-13: Διάγραμμα φάσεων του Ti-Al.

Το παραπάνω διάγραμμα θεωρείτε το πιο σημαντικό και κατά κύριο λόγο διερευνημένο διάγραμμα φάσης του συστήματος Ti-Al, καθώς το αλουμίνιο είναι από τις πιο σημαντικές κραματικές προσθήκες στο τιτάνιο. Το διάγραμμα αναφέρεται εξίσου και στις φάσεις TiAl₂ και TiAl₃, οι οποίες όμως γενικά δεν πολυχρησιμοποιούνται, λόγω του ότι είναι πολύ ψαθυρές. [1]

3.2.5 Μικροδομή κραμάτων Τιτανίου

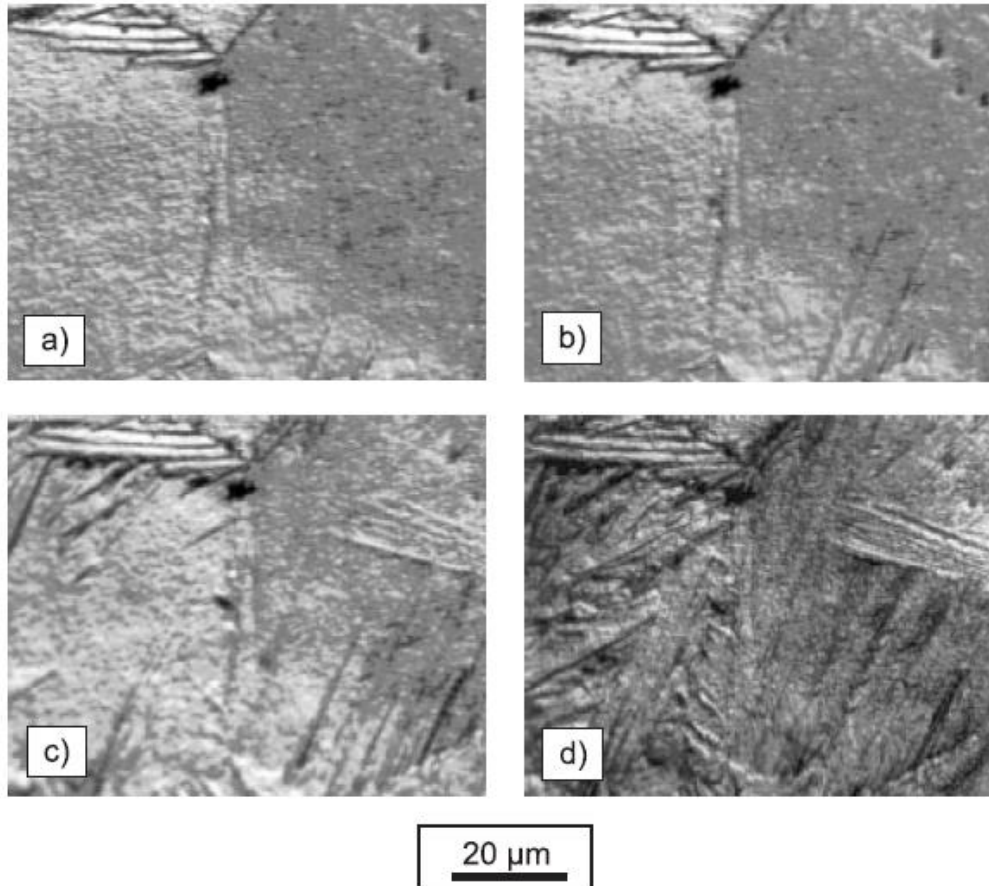
Είναι κατανοητό ότι η μικροδομή είναι ουσιαστικής σημασίας, καθώς καθορίζει τις ιδιότητες των τιτανιούχων κραμάτων. Η μικροδομή των συμβατικών κραμάτων τιτανίου εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και την διευθέτηση των δύο φάσεων, άλφα και βήτα. Οι δύο ακραίες περιπτώσεις διευθέτησης των φάσεων είναι η φολιδωτή μικροδομή (lamellar microstructure), η οποία δημιουργείται από την ψύξη της β-φάσης, και η ισοαξονική μικροδομή (equiaxed microstructure), η οποία είναι αποτέλεσμα ανακρυστάλλωσης του κράματος. Και οι δύο τύποι μικροδομών μπορούν να αποτελούνται από λεπτούς ή χονδρόκοκκους κρυστάλλους, ανεξαρτήτως των φάσεων τους. Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει ποιοτικά πώς το μέγεθος των λεπτόκοκκων και χοντρόκοκκων κρυστάλλων, όπως και η διευθέτηση των φολιδωτών και ισοαξονικών μικροδομών, επηρεάζουν κάποιες επιλεγμένες μηχανικές ιδιότητες.

Πίνακας 3-6: Επιρροή της μικροδομής σε επιλεγμένες ιδιότητες των τιτανιούχων κραμάτων.

Λεπτόκοκκοι Κρύσταλλοι	Χονδρόκοκκοι Κρύσταλλοι	Ιδιότητα	Φολιδωτή Μικροδομή	Ισοαξονική Μικροδομή
Καμία Επιρροή	Καμία Επιρροή	Μέτρο Ελαστικότητας	Καμία Επιρροή	Καλή/Κακή Επιρροή αναλόγως τη σύσταση.
Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή	Αντοχή	Κακή Επιρροή	Καλή Επιρροή
Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή	Ολκιμότητα	Κακή Επιρροή	Καλή Επιρροή
Κακή Επιρροή	Καλή Επιρροή	Δυσθραυστότητα	Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή
Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή	Έναρξη Ρωγμάτωσης λόγω Κόπωσης	Κακή Επιρροή	Καλή Επιρροή
Κακή Επιρροή	Καλή Επιρροή	Διάδοση Ρωγμών Κόπωσης	Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή
Κακή Επιρροή	Καλή Επιρροή	Αντοχή στον Ερπυσμό	Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή
Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή	Υπερπλαστικότητα	Κακή Επιρροή	Καλή Επιρροή
Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή	Συμπεριφορά στη Διάβρωση	Καλή Επιρροή	Κακή Επιρροή

Γενικώς, οι διάφορες μικροδομές δημιουργούνται από θερμομηχανικές κατεργασίες, όπως θερμικές επεξεργασίες, παραμόρφωση, γήρανση και ανόπτηση για αφαίρεση των διαταραχών και των τάσεων που παραμένουν. Κεντρικό σημείο των θερμομηχανικών κατεργασιών είναι η αλλοτροπική θερμοκρασία, T_B , αφού διαχωρίζει το πεδίο της μονοφασικής β-φάσης από το πεδίο της διφασικής α+β. Οι φολιδωτές μικροδομές είναι

αποτέλεσμα αργής ψύξης, που ξεκινάει πάνω από την αλλοτροπική θερμοκρασία. Μόλις η θερμοκρασία μειωθεί κάτω της αλλοτροπικής θερμοκρασίας, η α -φάση φυτρώνει στα όρια των κόκκων και ύστερα μετασχηματίζεται ως φολίδες στην θέση των προγενέστερων β -κόκκων. Παράδειγμα τέτοιας μικροδομής φαίνεται στο κράμα Ti-6Al-4V, εικόνα 3-14, κατά τη διάρκεια μικροσκοπίας σε υψηλές θερμοκρασίες.

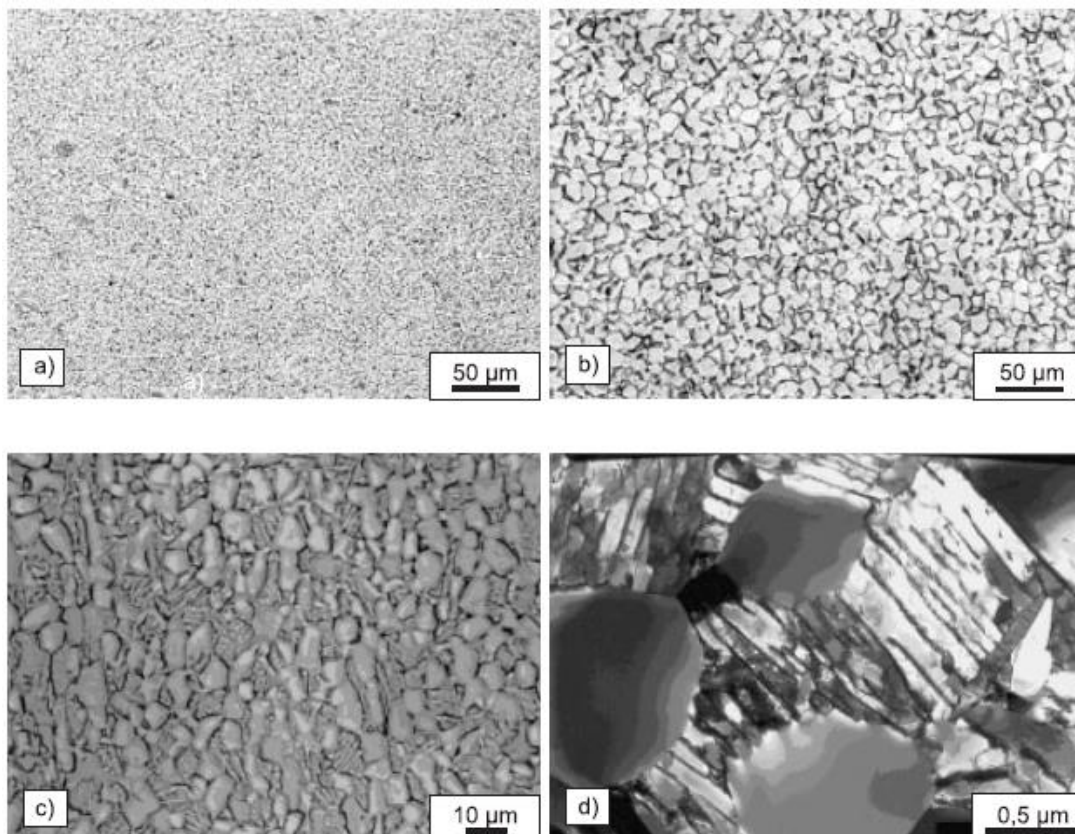


Εικόνα 3-14: Ψύξη δοκιμίου πάνω από το πεδίο της β -φάσης κράματος Ti-6Al-4V.

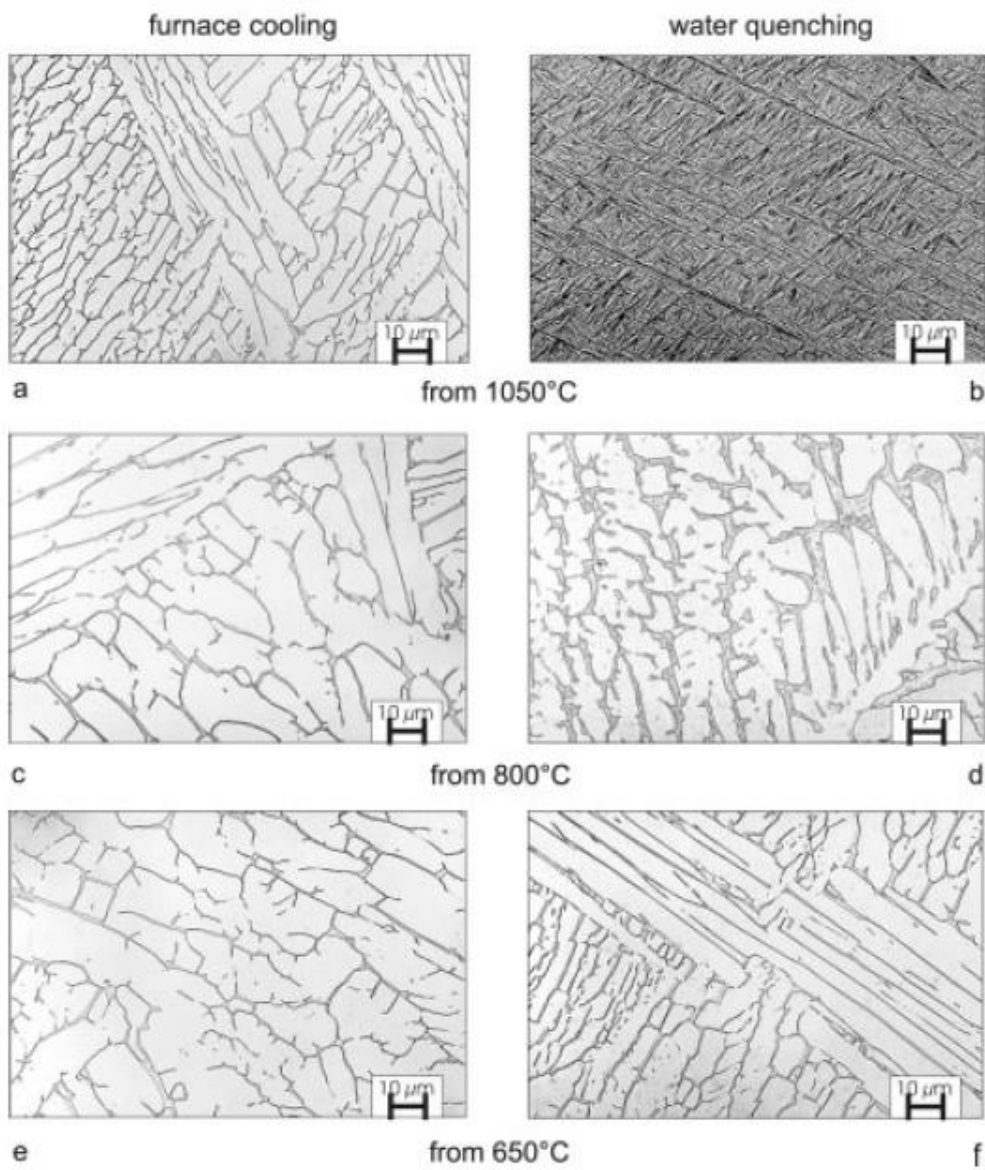
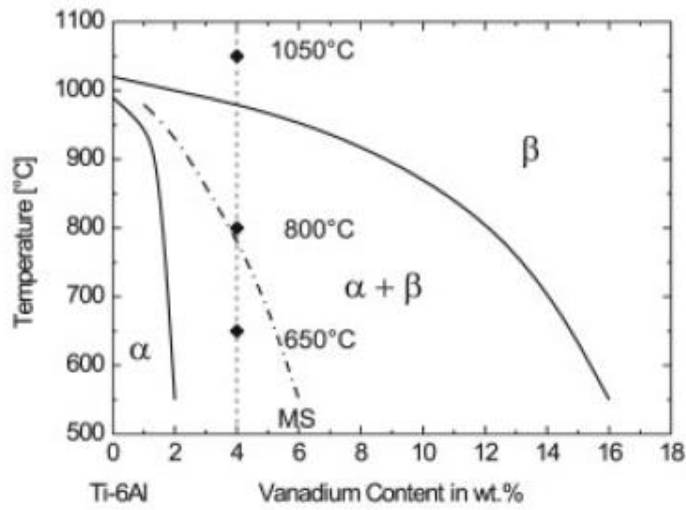
Η μορφή της φολιδωτής μικροδομής εξαρτάται από την ταχύτητα ψύξης του δοκιμίου, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό είτε λεπτόκοκκων είτε χονδρόκοκκων κρυστάλλων. Όταν η ψύξη ξεκινάει πάνω από την αλλοτροπική θερμοκρασία και προχωράει με αργούς ρυθμούς, οδηγεί στον σχηματισμό καθαρών φολιδωτών μικροδομών. Ταχεία ψύξη οδηγεί στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό της β -φάσης, με αποτέλεσμα μια πολύ λεπτή βελονοειδής μικροδομή. Σε αντίθεση με την γνωστή μαρτενσιτική μικροδομή που εμφανίζεται στους χάλυβες, η οποία οδηγεί σε ισχυρή παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος και σε σημαντική αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής, παρατηρούνται σχετικά μέτρια

αποτελέσματα σκλήρυνσης στα κράματα του τιτανίου, όταν υφίστανται μαρτενσιτικούς μετασχηματισμούς.

Οι χημικές συνθέσεις των α και β -φάσεων μεταβάλλονται στο διαφασικό πεδίο με την μείωση της θερμοκρασίας κάτω από συνθήκες ισορροπίας. Το βανάδιο (V) είναι ισχυρός σταθεροποιητής της β -φάσης και επομένως της επιτρέπει να υφίσταται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, λόγω του ότι μειώνει την θερμοκρασία αλλοτροπικού σχηματισμού. Οι μεταλλογραφικές εικόνες όλων των δοκιμών που έχουν υποστεί αργή ψύξη, εμφανίζουν την β -φάση ως μια μικρή ραφή γύρω από την χονδρόκοκκη φολιδωτή α -φάση. Σε ταχείες ψύξεις που ξεκινάνε πάνω από την θερμοκρασία εκκίνησης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (MS) και διασχίζουν το πεδίο της $\alpha+\beta$ φάσης, η β -φάση μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Η θερμοκρασία εκκίνησης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ποικίλλει ανά κράμα, δεδομένου ότι εξαρτάται από την αρχική μικροδομή και την ομοιογένεια της. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, το κλάσμα όγκου της β -φάσης μειώνεται περαιτέρω και δεν μετασχηματίζεται πλέον σε μαρτενσίτη σε θερμοκρασίες κάτω της MS. (Εικόνα 3-16)



Εικόνα 3-15: Ισοαξονικές μικροδομές κράματος Ti-6Al-4V μέσω ανακρυστάλλωσης: a) λεπτοί ισοαξονικοί κρύσταλλοι, b) χονδροί ισοαξονικοί κρύσταλλοι, c, d) διαφασικές μικροδομές (OM, TEM).



Εικόνα 3-16: Τριμερές διάγραμμα φάσεων Ti-6Al-4V. / Μικροδομές Ti-6Al-4V ύστερα από αργή ψύξη (50 °C/h) και ταχεία ψύξη σε νερό από τους 1050 °C, 800 °C και 650 °C.

Σε αντίθεση με τις φολιδωτές μικροδομές, οι ισοαξονικές μικροδομές είναι το αποτέλεσμα διαδικασίας ανακρυστάλλωσης. Ως εκ τούτου, το κράμα πρέπει πρώτα να υποστεί αρκετή παραμόρφωση στο διφασικό πεδίο $\alpha+\beta$, ώστε να επιτύχει αρκετή ψυχρή επεξεργασία στο υλικό. Κατά την επακόλουθη θερμική επεξεργασία στερεού διαλύματος σε θερμοκρασίες κοντά στο διφασικό πεδίο $\alpha+\beta$, δημιουργείται μια ανακρυσταλλωμένη και ισοαξονική μικροδομή. Εκτεταμένη διάρκεια ανόπτησης καθιστά όλο και περισσότερους τους χονδρόκοκκους κρυστάλλους κατά τη δημιουργία της ισοαξονικής μικροδομής. Η θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας στερεού διαλύματος καθορίζει το κλάσμα όγκου της μητρικής α -φάσης. Θερμική επεξεργασία στερεού διαλύματος λίγο κάτω της β -θερμοκρασίας μετάπτωσης, καταλήγει σε διφασικές μικροδομές, οι οποίες αποτελούνται από εν μέρει ισοαξονική (μητρική) α -φάση μέσα στο φολιδωτό πλέγμα της $\alpha+\beta$ φάσεως. Οι διφασικές μικροδομές μπορούν να θεωρηθούν σαν ένας συνδυασμός φολιδωτής και ισοαξονικής μικροδομής. (Εικόνα 3-15)

Οι ποικίλες μικροδομές επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την μηχανική συμπεριφορά των τιτανιούχων κραμάτων. Λεπτόκοκκες μικροδομές αυξάνουν την αντοχή, όπως επίσης την ολκιμότητα. Επιπλέον, επιβραδύνουν την ρωγμάτωση των φύτρων (crack nucleation) και αποτελούν προϋπόθεση για επιτυχημένη υπερπλαστική παραμόρφωση. Χονδρόκοκκες μικροδομές, από την άλλη, είναι περισσότερο ανθεκτικές στον ερπυσμό, στην κόπωση και στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης. Ισοαξονικές μικροδομές συνήθως έχουν υψηλή ολκιμότητα και αντοχή σε κόπωση και είναι προτιμητέες στην περίπτωση υπερπλαστικών παραμορφώσεων. Αντιθέτως οι φολιδωτές μικροδομές παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε θραύση και ανώτερη αντοχή σε ανάπτυξη ρωγμών από ερπυσμό ή κόπωση. Εφόσον οι διφασικές μικροδομές συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των φολιδωτών και ισοαξονικών μικροδομών, παρουσιάζουν ένα καλά ισορροπημένο προφίλ ιδιοτήτων.[1]

3.2.6 Προφίλ Ιδιοτήτων των κλάσεων των κραμάτων του Τιτανίου

Πίνακας 3-7: Ιδιότητες α, α+β και β κραμάτων Τιτανίου.

	<i>α</i>	<i>α+β</i>	<i>β</i>
<i>Πυκνότητα</i>	+	+	-
<i>Αντοχή</i>	-	+	++
<i>Ολκιμότητα</i>	-/+	+	+/-
<i>Δυσθραυστότητα</i>	+	-/+	+/-
<i>Αντοχή στον ερπυσμό</i>	+	+/-	-
<i>Συμπεριφορά στη Διάβρωση</i>	++	+	+/-
<i>Συμπεριφορά στην Οξειδωση</i>	++	+/-	-
<i>Συγκολλησιμότητα</i>	+	+/-	-
<i>Ψυχρή Κατεργασία</i>	--	-	-/+

Οι ιδιότητες των τιτανιούχων κραμάτων χαρακτηρίζονται κυρίως από τη διάταξη, το κλάσμα όγκου, καθώς και τις επιμέρους ιδιότητες των δύο φάσεων α και β. Σε σύγκριση με την χωροκεντρομένη κυβική β-φάση, η εξαγωνική α-φάση είναι πυκνότερη, έχει ανισοτροπική κρυσταλλική δομή και χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω ιδιότητες:

- υψηλότερη αντοχή σε πλαστικές παραμορφώσεις
- μειωμένη ολκιμότητα
- ανισοτροπικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες
- διαχυσιακό ρυθμό, ο οποίος είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερος

- υψηλότερη αντοχή στον ερπυσμό

Στον πίνακα 3-7 παρατίθενται οι βασικές φυσικές, μηχανικές και τεχνολογικές διαφορές μεταξύ των τριών κραματικών κλάσεων.

Εφόσον το πιο σημαντικό α -σταθεροποιητικό στοιχείο, το αλουμίνιο, έχει μόνο το μισό ειδικό βάρος του τιτανίου, τα α -κράματα έχουν μικρότερη πυκνότητα από τα β -κράματα, δεδομένου ότι τα τελευταία έχουν κραματικές προσθήκες βαρέων στοιχείων, όπως το μολυβδαίνιο (Mo) και το βανάδιο (V).

Συνήθως τα α -κράματα, που αποτελούνται από μια κυρίως φάση, επιδεικνύουν μέτρια αντοχή. Όμως τα διφασικά $\alpha+\beta$ κράματα και τα μετασταθή β -κράματα μπορούν να φτάσουν σε υψηλά και πολύ υψηλά επίπεδα σκλήρυνσης αντίστοιχα. Τα πολύ υψηλά επίπεδα αντοχής των μετασταθών β -κραμάτων όμως έχουν ως αντίκτυπο την χαμηλή ολκιμότητα τους. Εάν δεν υποστούν σκλήρυνση από γήρανση, παρουσιάζουν σχετικά καλή ολκιμότητα παρόμοια με αυτή των α και διφασικών $\alpha+\beta$ κραμάτων. Επιπλέον, η ολκιμότητα συνδέεται στενά με τη μικροδομή.

Αφού η δυσθραυστότητα των τιτανιούχων κραμάτων εξαρτάται έντονα από τη μικροδομή και τις συνθήκες γήρανσης, δεν υπάρχει καμία σταθερή συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών κραμάτων. Συγκεκριμένα, χονδρόκοκκοι κρύσταλλοι με φολιδωτή μικροδομή παρουσιάζουν υψηλότερη δυσθραυστότητα από τους λεπτόκοκκους κρυστάλλους με ισοαξονική μικροδομή. Η μεγάλη αντοχή των φολιδωτών μικροδομών εξηγείται από την ικανότητα αυτών των δομών να εκτρέπουν την διάδοση ρωγμών κατά μήκος διαφορετικά προσανατολισμένων φολιδωτών κόκκων. Αυτό προξενεί ένα προφίλ πρόχειρου μετώπου ρωγμών, το οποίο καταναλώνει επιπλέον ενέργεια για τη διάδοση ρωγμών.

Η σχετικά περιορισμένη ικανότητα των ατόμων να διαχέονται και των κρυστάλλων να παραμορφώνονται σε εξαγωνικά πλέγματα, είναι η κυριότερη αιτία για την ανώτερη συμπεριφορά της α -φάσης στον ερπυσμό. Με αυξανόμενο κλάσμα όγκου της β -φάσης, η συμπεριφορά των τιτανιούχων κραμάτων στον ερπυσμό επιδεινώνεται. Υψηλή αντοχή στον ερπυσμό παρατηρείται και στις διφασικές μικροδομές με ασυνεχή παρεμβολή της β -φάσης. Αυτό κυρίως ισχύει για τις φολιδωτές μικροδομές και τις διφασικές (bimodal) δομές.

Η υψηλή συγγένεια του τιτανίου με το οξυγόνο σημαίνει ότι, ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου, μια πολύ λεπτή και πυκνή στρώση διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου και είναι ο λόγος που τα τιτανιούχα κράματα φημίζονται

για την υψηλή διαβρωτική τους ικανότητα. Μεταξύ των κραματικών κλάσεων, τα α -κράματα είναι πιο σταθερά από τα β .

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η μέγιστη θερμοκρασία που μπορούν τα κράματα τιτανίου να λειτουργήσουν δεν περιορίζεται κυρίως από ανεπαρκή αντοχή, αλλά από την κακή τους οξειδωτική συμπεριφορά. Ένα μειονέκτημα των κραμάτων τιτανίου, που μπορεί να προκαλέσει την ευθραυστότητα του κράματος, είναι η μεγάλη αντιδραστικότητα με το οξυγόνο και το υδρογόνο από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Εν τούτοις, συγκόλληση των κραμάτων αυτών πρέπει να γίνεται είτε σε κενό, είτε υπό την προστασία αδρανών αερίων. Τα α και $\alpha+\beta$ κράματα μπορούν να υποστούν ευκολότερα συγκόλληση σε σχέση με τα β -κράματα, ιδίως όταν τα τελευταία έχουν υποστεί γήρανση προκειμένου να αποκτήσουν υψηλά επίπεδα αντοχής.

Η πιο περιορισμένη δυνατότητα παραμόρφωσης και η δυνατότητα υψηλότερης σκληρότητας της α -φάσης υποδηλώνει ότι τα α και $\alpha+\beta$ κράματα μπορούν να παραμορφωθούν μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία παραμόρφωσης μειώνεται όσο αυξάνει το κλάσμα όγκου της β -φάσης. Κάποια μετασταθή β -κράματα μπορούν να διαμορφωθούν ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου. Η υπερπλαστική παραμόρφωση απαιτεί λεπτόκοκκη ισοαξονική μικροδομή ενσωματωμένη στη β -φάση.[1]

3.2.7 Μηχανικές Ιδιότητες Κραμάτων Τιτανίου

Η βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων και ιδιαίτερα των τιτανιούχων κραμάτων, γίνεται κυρίως με δύο διαδικασίες: Προσθήκη κραματικών στοιχείων και επεξεργασία των κραμάτων. Τελευταία, μια τρίτη διαδικασία που έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία είναι η παραγωγή σύνθετων υλικών, όμως δεν θα δοθεί σημασία στη διαδικασία αυτή σε αυτήν εδώ την εργασία.

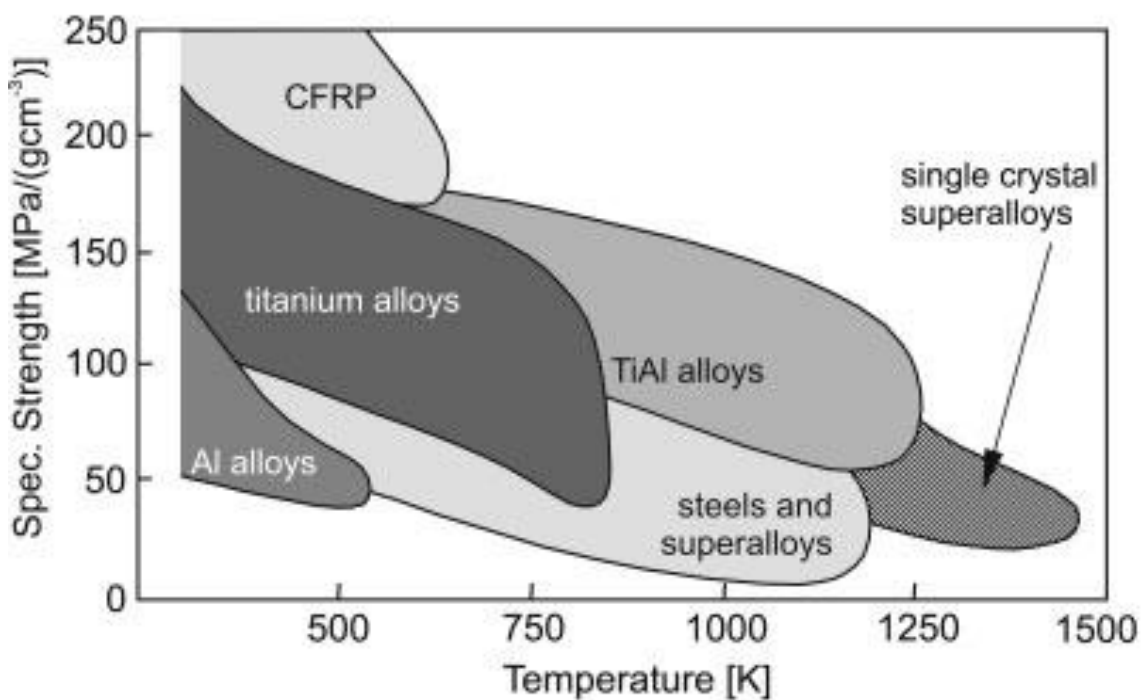
Η κραμάτωση βάζει την βάση για αύξηση της αντοχής, (π.χ. σκλήρυνση από στερεό διάλυμα, σκλήρυνση από γήρανση), επιτρέπει την δημιουργία διατεταγμένων δομών (π.χ. οι διαμεταλλικές ενώσεις των αργιλιδίων του τιτανίου), προσδιορίζει τις περισσότερες φυσικές ιδιότητες (π.χ. πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, συντελεστή θερμικής διαστολής) και ελέγχει σε μεγάλο βαθμό την χημική αντοχή του υλικού (π.χ. διάβρωση, οξείδωση).

Η επεξεργασία των κραμάτων επιτρέπει την προσεχτική στάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού. Αναλόγως των ιδιοτήτων που απαιτούνται για την τελική εφαρμογή του υλικού,

διαφορετικές μικροδομές μπορούν να δημιουργηθούν στα κράματα τιτανίου μέσω θερμομηχανικών επεξεργασιών για την βελτιστοποίηση της αντοχής (σκλήρυνση από στερεό διάλυμα, σκλήρυνση από διάχυση, σκλήρυνση από εκλέπτυνση των κόκκων, σκλήρυνση από τη σύσταση), της ολκιμότητας, της σκληρότητας, της υπερπλαστικότητας, της αντοχής στη διάβρωση, της αντοχής στον ερπυσμό κτλ. Οι τεχνικές επεξεργασίας ταχείας στερεοποίησης και κραμάτωσης επεκτείνουν το φάσμα των πιθανών κραματικών συνθέσεων.

Αντοχή

Από όλα τα μεταλλικά υλικά, μόνο οι χάλυβες υψηλότερης αντοχής έχουν υψηλότερη ειδική αντοχή από τα τιτανιούχα κράματα.



Εικόνα 3-17: Ειδική αντοχή προς θερμοκρασία επιλεγμένων υλικών σε σχέση με τα κράματα και αργιλίδια του τιτανίου.

Οι τιμές των ορίων διαρροής των συμβατικών κραμάτων τιτανίου διακυμαίνονται μεταξύ 800 και 1200 MPa, με την β-μετασταθείσα φάση να παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές. Οι κραματικές προσθήκες δεν χρησιμοποιούνται συνήθως μόνες τους για να αυξήσουν την αντοχή των τιτανιούχων κραμάτων. Το β-κράμα TIMETAL 125 (Ti-6V-6Mo-6Fe-3Al) ωστόσο αναπτύχθηκε ειδικά για εφαρμογές σύνδεσης που απαιτούν υψηλή αντοχή. Μια διπλή διαδικασία γήρανσης οδηγεί σε πολύ μικρά κατακρημνίσματα στο β-πλέγμα, με αποτέλεσμα αυτό το κράμα να μπορεί να υποστεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης μέχρι να

αποκτήσει πολύ υψηλή τιμή διαρροής και εφελκυστικής αντοχής σε επίπεδο των 1590 MPa και 1620 MPa, αντίστοιχα, και να εξακολουθεί να έχει αποδεκτή επιμήκυνση σε θραύση της τάξεως του 6%.

Αυξημένη αντοχή από διαδικασίες επεξεργασίας φαίνεται στο κράμα που περιέχει την διαμεταλλική ένωση Ti_3Al , με ονομασία “Super-Alpha-2” (Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo (at. %)). Με ειδική θερμομηχανική κατεργασία, δηλαδή με την βέλτιστη παραμόρφωση του κράματος, θερμική κατεργασία στερεού διαλύματος και γήρανση, είναι δυνατόν να αυξηθεί η αντοχή σε εφελκυσμό από περίπου τα 1100 MPa της αρχικής κατάστασης σε 1800 MPa. Αρχικά το κράμα παραμορφώθηκε, σε θερμοκρασίες κάτω των 1000 °C, το οποίο μετασχηματίζει την όπως παραλήφθηκε μικροδομή σε λεπτόκοκκη ισοαξονική μικροδομή με περίπου 60% της μητρική α_2 φάσης. Μεταγενέστερη θερμική επεξεργασία στερεού διαλύματος κοντά αλλά κάτω της β -θερμοκρασίας μετάπτωσης, ακολουθούμενη από βαφή σε νερό, οδηγεί σε λεπτόκοκκη μητρική α_2 -φάση στο πλέγμα της διατεταγμένης κυβικής B2 φάσης. Η πολύ υψηλή αντοχή είναι αποτέλεσμα της τελικής διαδικασίας γήρανσης στους 700 °C, εφόσον μια πολύ λεπτοκρυσταλλική O-φάση κατακρημνίζεται από την υπερκορεσμένη B2-φάση. Τα υψηλά επίπεδα αντοχής που επιτυγχάνονται, είναι μεταξύ των υψηλότερων επιπέδων που έχουν ποτέ αναφερθεί σε συμβατικά κράματα τιτανίου. [1]

Ελαστικότητα

Ο συντελεστής ελαστικότητας αντιστοιχεί στην ακαμψία ενός υλικού και συνδέεται με τον τρόπο που αναπτύσσονται οι δυνάμεις μεταξύ των ατόμων και οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με τις αποστάσεις μεταξύ των ατόμων των στοιχείων στη κρυσταλλική δομή. Μια σύγκριση μεταξύ των δύο κρυσταλλικών δομών του τιτανίου έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η εξαγωνική δομή μέγιστης πυκνότητας (hcp) παρουσιάζει υψηλότερες τιμές συντελεστή ελαστικότητας από την χωροκεντρομένη δομή κυβικού πλέγματος (bcc). Συνεπώς, η προσθήκη στοιχείων σταθεροποιητών τύπου β επιτρέπει την σταθεροποίηση τη φάσης β και έτσι την επίτευξη χαμηλού συντελεστή ελαστικότητας στα κράματα. Έτσι, ενώ το καθαρό τιτάριο παρουσιάζει συντελεστές ελαστικότητας με τιμές κοντά στα 105 GPa, το κράμα του Ti-6Al-4V τύπου $\alpha + \beta$ παρουσιάζει τιμές μεταξύ 101 και 110 GPa. Κράματα τιτανίου τύπου β μπορεί να παρουσιάσουν πολύ χαμηλές τιμές, γύρω στα 55 GPa.[9]

Alloy	Chemical Composition [wt. %]	T_p [$^{\circ}$ C]	Developer	Year	Hardness [HV]	E [GPa]	YS [MPa]	TS [MPa]	%El	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}]
<i>a</i> Titanium Alloys										
high purity Ti	99.98 Ti	882			100	100–145	140	235	50	
Grade 1	(cp-Ti: 0.2Fe, 0.18O)	890	miscellaneous		120		170–310	>240	24	
Grade 4	(cp-Ti: 0.5Fe-0.40O)	950	miscellaneous		260	100–120	480–655	>550	15	
Grade 6	(Ti-5Al-2.5Sn)	1040	miscellaneous	1953	300	109	827	861	15	70
<i>Near-a</i> Titanium Alloys										
Ti-6-2-4-2-S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si	995	RMI, USA	1970	340	114	990	1010	13	70
TIMETAL 1100	Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.4Si	1010	Timet, USA	1988		112	900–950	1010–1050	10–16	60–75
TIMTETAL 685	Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si	1020	IMI, UK	1969		120	850–910	990–1020	6–11	68
TIMETAL 834	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.5Mo-0.7Nb-0.35Si-0.06C	1045	IMI, UK	1984	350	120	910	1030	6–12	45
<i>a+β</i> Titanium Alloys										
Ti-6-4	Ti-6Al-4V	995	miscellaneous	1954	300–400	110–140	800–1100	900–1200	13–16	33–110
Ti-6-6-2	Ti-6Al-6V-2Sn	945	miscellaneous		300–400	110–117	950–1050	1000–1100	10–19	30–70
Ti-6-2-2-2-2	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si					110–120	1000–1200	1100–1300	8–15	65–110
Ti-6-2-4-6	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	940	Pratt & Whitney, USA		330–400	114	1000–1100	1100–1200	13–16	30–60
Ti-17	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	890	GE, USA	1968	400	112	1050	1100–1250	8–15	30–80

Εικόνα 3-18: Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων κραμάτων τιτανίου.

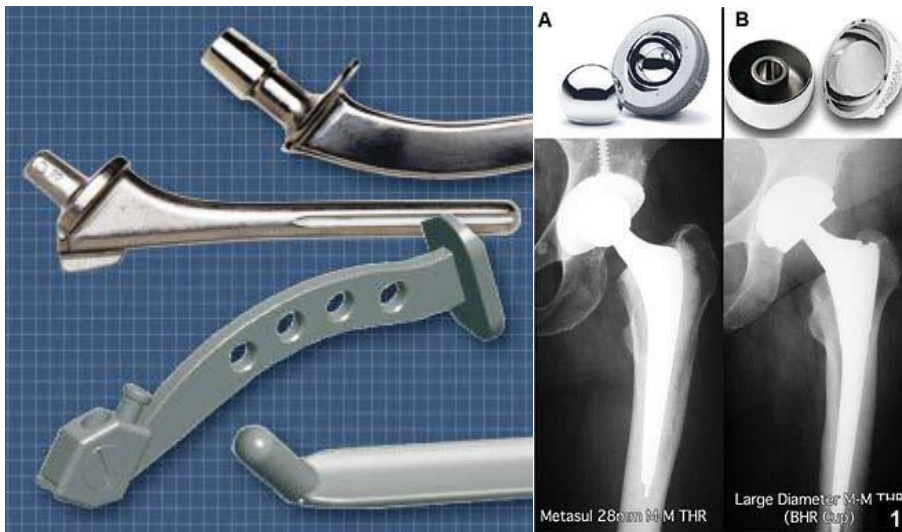
Alloy	Chemical Composition [wt. %]	T_p [$^{\circ}$ C]	Developer	Year	Hardness [HV]	E [GPa]	YS [MPa]	TS [MPa]	%El	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}]
<i>Metastable β</i> Titanium Alloys										
SP 700	Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe	900	NKK, J	1989	300–500	110	900	960	8–20	60–90
Beta III	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	760	Colt/Crucible, USA	1960	250–450	83–103	800–1200	900–1300	8–20	50–100
Beta C	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	795	RMI, USA	1969	300–450	86–115	800–1200	900–1300	6–16	50–90
Ti-10-2-3	Ti-10V-2Fe-3Al	800	Timet, USA	1976	300–470	110	1000–1200	1000–1400	6–16	30–100
Ti-15-3	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	760	Timet, USA	1981	300–450	80–100	800–1000	800–1100	10–20	40–100

Εικόνα 3-19: (Συνέχεια) Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων κραμάτων τιτανίου.

3.2.8 Εφαρμογές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρήση του τιτανίου και των κραμάτων του γίνεται σε μια ευρεία γκάμα βιομηχανιών και πεδίων και μερικά από αυτά είναι τα παρακάτω.

Ιατρική: Το τιτάνιο και τα κράματα του χρησιμοποιούνται στην ορθοπεδική κατασκευή εξαρτημάτων όπως χειρουργικά σύρματα, κοχλίες και περικόχλια, πλάκες και ενδομυελικές ράβδους για την αποκατάσταση σπασμένων οστών, και στη βιοϊατρική για την κατασκευή τμημάτων, τα οποία αντικαθιστούν προβληματικές αρθρώσεις π.χ. άρθρωση γονάτου ή γοφού.[9]



Εικόνα 3-20 & Εικόνα 3-21: Ιατρικά τιτανιούχα εξαρτήματα.

Αυτοκινητοβιομηχανία: Κατασκευάζονται ελατήρια βαλβίδων, βαλβίδες κινητήρων, διωστήρες, έμβολα, στροβιλοσυμπιεστές, τμήματα σε εξατμίσεις κλπ.[9]



Εικόνα 3-22 & Εικόνα 3-23: Εξαρτήματα αυτοκινητοβιομηχανίας κατασκευασμένα από τιτάνιο.

Αεροναυπηγική: Η αεροδιαστημική βιομηχανία είναι η μεγαλύτερη ενιαία αγορά για τα προϊόντα τιτανίου και αυτό οφείλεται κυρίως στην εξαιρετική αναλογία δύναμης προς βάρος, στην αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία και στην αντοχή στη διάβρωση. Η πιο σημαντική εφαρμογή του τιτανίου είναι σε κινητήρες τζετ, με εκτεταμένη χρήση στο τμήμα του συμπιεστή για την κατασκευή πτερυγίων, κατευθυντήριων πτερυγίων, πλακών κλπ. Επίσης χρησιμοποιείται και σε τμήματα των αεροσκαφών που υπόκεινται σε θερμοκρασίες μέχρι 1100 °F. Το τιτάνιο μπορεί να αποτελέσει το 20%-30% του συνολικού βάρους σε ένα αεροπορικό κινητήρα. Τέλος, το τιτάνιο χρησιμοποιείται και σε κρίσιμα δομικά στοιχεία των αεροσκαφών όπως σκελετούς αεροσκαφών, στο σύστημα προσγείωσης, σε σωληνώσεις κ.α. Η χρήση του είναι ευρέως διαδεδομένη στα περισσότερα εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη. Το τιτάνιο χρησιμοποιείται επίσης σε διαστημικά σκάφη.[9]



Εικόνα 3-24 & Εικόνα 3-25: Αεροσκάφη που περιέχουν εξαρτήματα κατασκευασμένα από κράματα τιτανίου.

Ναυπηγική: Λόγω της μεγάλης αντοχής του στη διάβρωση που προκαλεί το θαλασσινό νερό, το τιτάνιο χρησιμοποιείται για την κατασκευή ατράκτων για την κίνηση της προπέλας, εναλλακτών θερμότητας, μονάδων αφαλάτωσης, για την παρασκευή περιβλημάτων σε διάφορες κατασκευές που βρίσκονται μέσα σε ωκεανούς κ.α. Η πρώην Σοβιετική Ένωση είχε αναπτύξει τεχνικές για την κατασκευή υποβρυχίων σε μεγάλο βαθμό από τιτάνιο.[9]



Εικόνα 3-26 & Εικόνα 3-27: Θαλάσσια οχήματα που περιέχουν εξαρτήματα κατασκευασμένα από κράματα τιτανίου.

Χημική βιομηχανία: Το τιτάνιο χρησιμοποιείται στην χημική βιομηχανία σε μορφή διοξειδίου του τιτανίου(TiO_2) για την παρασκευή πολλών προϊόντων ευρείας χρήσης όπως χρώματα, χαρτί, πλαστικά, τσιμέντο για έντονη λευκότητα , οδοντόκρεμες και πολλά άλλα.
[9]

Καθημερινότητα: Χρησιμοποιείται για την κατασκευή κάθε λογής αντικειμένων, όπως λ.χ. κοσμήματα, σκεύη μαγειρικής, ρολόγια και πολλά άλλα.[9]



Εικόνα 3-28 & Εικόνα 3-29: Τιτανιούχα αντικείμενα καθημερινής χρήσης.

3.3 Κράμα Ti-6Al-4V

Ενώ μέχρι στιγμής έχουν αναφερθεί διάφορα τιτανιούχα κράματα, η παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί μόνο στο κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, το συγκεκριμένο κράμα είναι το πιο ευραίως διαδεμένο εμπορικό κράμα τιτανίου στην αγορά. Είναι ένα διφασικό α+β κράμα με το αλουμίνιο να δρά ως α-σταθεροποιητής και αντίστοιχα το βανάδιο ως β-σταθεροποιητής. Κατά συνέπεια, η μικροδομή του συγκεκριμένου κράματος σε ισορροπία, σε θερμοκρασία δωματίου, αποτελείται κυρίως από την α-φάση και μια μικρή ποσότητα της β-φάσης. Η αλλοτροπική θερμοκρασία του Ti-6Al-4V είναι περίπου 980 °C.[14] Ανάλογα με τις θερμικές κατεργασίες που έχει υποστεί το κράμα, παρουσιάζει και τις αντίστοιχες μικροδομές. Κατά την διάρκεια ταχείων ψύξεων, η β-φάση μετασηματιάζεται στην μαρτενσιτική α'-φάση. Αυτή μπορεί ύστερα να μετασηματιστεί στην διφασική α+β, αφού το κράμα ανοπτηθεί σε μετρίες προς υψηλές θερμοκρασίες. Σε ψύξεις από υψηλές θερμοκρασίες με εμφύσηση αέρα, η α-φάση σχηματίζει Windmanstätten πλακίδια ή την καλαθό-υφαντή βελονοειδή α-φάση. Η Windmanstätten α-φάση έχει διαφορετικές μορφολογίες αναλόγως τον ρυθμό ψύξης, οι οποίες μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένα πλακίδια ως και η καλαθό-υφαντή δομή. Η τελευταία θεωρείται ότι είναι μια λεπτή μορφή της Windmanstätten μορφολογίας, όπου αποικίες α-πλακών σχηματίζουν συγκεκριμένες κατευθύνσεις η μία με την άλλη.[10]

Λόγω της υψηλής του αντοχής το κράμα Ti-6Al-4V μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κρουγενικές θερμοκρασίες μέχρι και σε θερμοκρασίες των 427 °C, ενώ συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στην ανοπτημένη του μορφή ή ύστερα από επεξεργασία στερεού διαλύματος και γήρανσης. Η παραγωγή του γίνεται αρχικά με τήξη σε κάμινο με τόξο σε κενό (Vacuum arc (VAR)), τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam (EB)) και τήξη σε κάμινο με τόξο πλάσματος (plasma arc hearth melting (PAM)). Ο καθαρισμός του πετυγχάνεται με εκ νέου τήξη σε κάμινο με τόξο κενού.[16] Η χρήση του Ti-6Al-4V γίνεται κυρίως σε περιπτώσεις όπου υψηλή αντόχη, χαμηλό βάρος και αντόχη στη διάβρωση είναι απαραίτητες. Κάποιες από τις πολλές εφαρμογές που το κράμα αυτό έχει χρησιμοποιηθεί συμπεριλαμβάνουν εξαρτήματα στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών, δομικά εξαρτήματα αεροσκαφών, συνδετήρες αεροσκαφών, εξαρτήματα αυτοκινήτων υψηλών επιδόσεων, θαλάσσιες εφαρμογές, ιατρικές συσκευές και αθλητικό εξοπλισμό.[17]

Τα πλεονεκτήματα χρήσης του Ti-6Al-4V είναι τα ακόλουθα:

- Καλή αντίσταση στη διάβρωση σε εφαρμογές με θαλασσινό νερό
- Μικρή πυκνότητα με υψηλή αντοχή κατά αναλογία βάρους
- Μικρό μέτρο ελαστικότητας
- Χαμηλή θερμική διαστολή
- Παραμαγνητικό
- Καλή αντοχή στην κόπωση
- Καλές μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες

Όπως παρατηρείται και στα υπόλοιπα κράματα τιτανίου, στο κράμα Ti-6Al-4V, η αντοχή στη διάβρωση οφείλεται στην παρουσία της λεπτής οξειδωμένης επιφάνειας που το καλύπτει λόγω της έκθεσης του στο οξυγόνο. Λόγω της καλής αντοχής του στην διάβρωση μέσα σε θαλασσινό νερό, αποτελεί καλή επιλογή η χρήση του σε θαλάσσιες και υποθαλάσσιες συνθήκες, όπου η διάβρωση του θαλασσινού νερού και το βάρος αποτελούν λόγο ανησυχίας. Ενώ η αντοχή του στην διάβρωση είναι αρκετά καλή, μπορεί να παρουσιάσει αρκετά προβλήματα σε περιβάλλοντα τα οποία σπάνε το προστατευτικό φιλμ οξειδίου που το περιβάλλει, όπως σε περιβάλλοντα τα οποία περιέχουν υδροφθορικό (HF), υδροχλωρικό (HCL), θειικό και φωσφορικό οξύ. Το κράμα αυτό αντέχει όμως στην παρουσία καθαρών υδρογοναθρακών, καθώς και στην παρουσία χλωριωμένων και φθοριωμένων υδρογοναθρακών, υπό την προϋπόθεση ότι το νερό δεν έχει προκαλέσει την δημιουργία μικρών ποσοτήτων υδροχλωρικού και υδροφθορικού οξέως.[16]

Συχνά το κράμα Ti-6Al-4V υποβάλλεται σε θερμικές κατεργασίες όπως ανόπτηση για την βελτιστοποίηση των μηχανικών του ιδιοτήτων. Ανόπτηση στους 927 – 1038 °C πραγματοποιείται όπου είναι επιθυμητή υψηλή σκληρότητα, καθώς και αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό και κόπωση. Βέβαια μπορούν να γίνουν διαφορετικές θερμικές κατεργασίες στο κράμα αυτό όπως:

1. Ανόπτηση στους 691 – 760 °C για $1/2$ με 2 ώρες και έπειτα βαφή με παραμονή του υλικού στον φούρνο ή στον αέρα.
2. Ανόπτηση για αφαίρεση παραμενουσών τάσεων στους 538 – 649 °C για μία με οκτώ ώρες και έπειτα βαφή με παραμονή του υλικού στον φούρνο ή στον αέρα.

3. Θερμική κατεργασία στερεού διαλύματος στους 913 – 954 °C για μία ώρα και βαφή σε νερό.
4. Θερμική κατεργασία γήρανσης στους 524 – 552 °C για τέσσερις με οκτώ ώρες και ψύξη στον αέρα.

Η τυπική σκληρότητα του Ti-6Al-4V στην ανοπτημένη μορφή είναι περίπου 278 – 312 HV, και περίπου 320 – 380 HV όταν έχει υποστεί θερμικές επεξεργασίες στερεού διαλύματος ή γήρανσης.[15]

Το κράμα Ti-6Al-4V μπορεί να υποστεί θερμομηχανική επεξεργασία με μεθόδους όπως θερμής έλασης, σφυρηλάτησης και πίεσης εν θερμώ. Τυπικά, η θερμομηχανική επεξεργασία πραγματοποιείται σε υψηλό θερμοκρασιακό επίπεδο, περίπου στους 870-980 °C. Η θερμομηχανική επεξεργασία ελασμάτων γίνεται συνήθως σε θερμοκρασίες περίπου των 650 °C. Στο Ti-6Al-4V έχει γίνει επιτυχής επεξεργασία υπερπλαστικής παραμόρφωσης σε θερμοκρασία των 850°C. Μπορεί επίσης να δεχθεί ψυχρή κατεργασία ολκής και διέλασης, αλλά γενικά η ψυχρή κατεργασία δεν πραγματοποιείται συχνά. Αυτή συνήθως χρησιμοποιείται για εξαρτήματα όπως στηρίγματα και κλιπάκια. Επίσης είναι δυνατή η συγκόλληση του με συμπληρωματικό Ti-6Al-4V ηλεκτρόδιο. Η συγκόλληση πρέπει να προστατεύεται με αδρανή αέρια, για να αποφευχθεί η οξειδωση της συγκολλημένης περιοχής και επομένως η ψαθυροποίηση της.[17]

Πρέπει επίσης να παρθούν ειδικές προφυλάξεις κατά τη διάρκεια θερμικής επεξεργασίας, σφυρηλάτησης, συγκόλλησης κτλ. καθώς το κράμα μπορεί να μολυνθεί με προσρόφιση υδρογόνου, κατά τη διαδικασία καθαρισμού του, ή από οξυγόνο. Αυτή η μόλυνση μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση της ολκιμότητας καθώς επίσης το κράμα να μη σχηματίσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.[15]

Πίνακας 3-8: Ιδιότητες Ti-6Al-4V.

Ιδιότητες Ti-6Al-4V	
Σκληρότητα Vickers	349 HV
Όριο θραύσης	950 MPa
Όριο διαρροής	880 MPa
Επιμήκυνση στο σημείο θραύσης	14 %
Μείωση περιοχής	36 %
Μέτρο Ελαστικότητας	113.8 GPa
Ειδική θερμότητα	0.5263 J/g-°C
Θερμική αγωγιμότητα	6.7 W/m-K
Σημείο τήξης	1604–1660 °C
Θερμοκρασία Solidus	1604°C
Θερμοκρασία Liquidus	1660 °C
Αλλοτροπική θερμοκρασία	980 °C

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

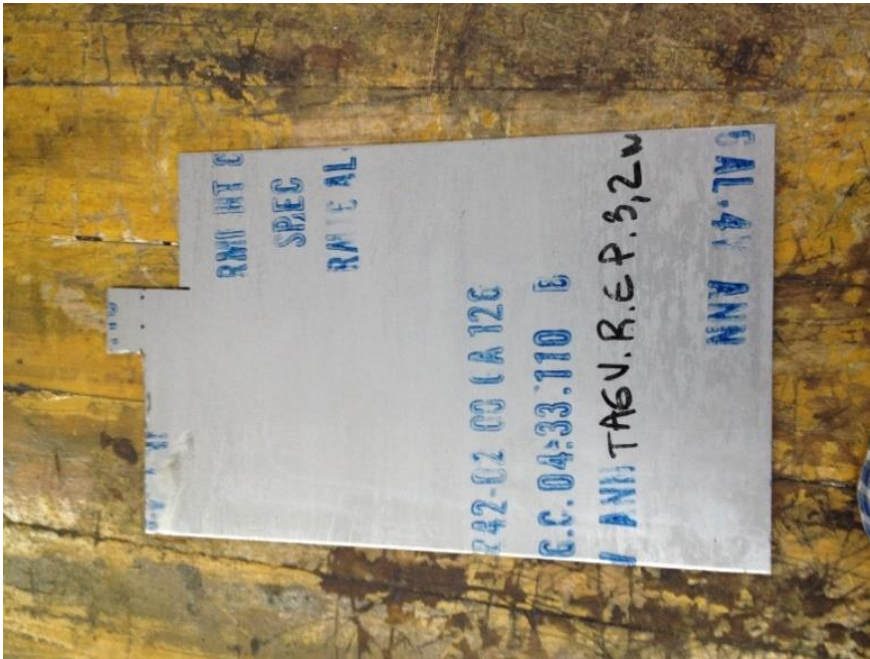
4.1 Χαρακτηριστικά Υλικού

Η εργασία αυτή εξετάζει δοκίμια του τιτανιούχου κράματος κατηγορίας 5, Ti-6Al-4V. Η χημική σύσταση του κράματος που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.[16]

Πίνακας 4-1: Χημική Σύσταση κ. β. % Ti-6Al-4V.

	O	N	C	H	Fe	Al	V	Ti	Mo	Others/ea.	Others/total
Ti-6Al-4V	0.2	0.05	0.1	0.0125	0.3	5.5-6.75	3.5-4.5	BAL	-	0.1	0.4

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν σε μορφή ελάσματος ορθογώνιου σχήματος, με διαστάσεις περίπου 21cm x 29.7cm και πάχος 0.3cm.



Εικόνα 4-1: Έλασμα κράματος Ti-6Al-4V.

4.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

4.2.1 Κοπή

Το προς εξέταση υλικό έχει πολλές φορές μέγεθος αρκετών εκατοστών, οπότε είναι δύσκολος ο χειρισμός του ή η τοποθέτηση του σε διάφορα όργανα όπως για παράδειγμα το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Σε άλλες περιπτώσεις απαιτείται η εξέταση πολλών διαφορετικών επιφανειών του κομματιού για να αποκαλυφθούν τυχόν διαφορές στη δομή κοντά στην εξωτερική επιφάνεια και στο κέντρο τους ή ένα αντικείμενο διέλασης λόγω του προσανατολισμού των κόκκων. Επίσης, από τον ίδιο αρχικό όγκο του υλικού απαιτείται συνήθως η κατασκευή πολλών δοκιμίων, ώστε το καθένα να εξεταστεί με διαφορετική τεχνική.

Για την αποκοπή δοκιμίων από το αρχικό κομμάτι χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Η πιο συνηθισμένες είναι η κοπή με κοπτικό τροχό ή με μηχανικό πριόνι. Η επιλογή του τροχού ή του πριονιού γίνεται με βάση τη σκληρότητα του υλικού και άλλους παράγοντες όπως η επιθυμητή ακρίβεια της κοπής και η επιθυμητή ποιότητα της επιφάνειας κοπής. Συνήθως, σε ένα πρώτο στάδιο, η κοπή γίνεται με πριόνι, γιατί στο μηχανικό πριόνι μπορούμε να κόψουμε μεγαλύτερα τεμάχια. Στο δεύτερο στάδιο, για μεγαλύτερη ακρίβεια, η κοπή γίνεται με τροχό. Για την κοπή των δοκιμίων, σε ένα αρχικό στάδιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές όπως κοπή με λέιζερ, με πλάσμα ή νερό.[11]

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στις αρχικές θερμικές κατεργασίες κόπηκαν από το έλασμα όπως φαίνεται στην εικόνα 4-1, σε ορθογώνια δοκίμια διάστασης περίπου 1,7cm x 1cm x 0.3cm. Οι κοπές πραγματοποιήθηκαν με χρήση δισκοτόμου, τύπου Struers Discotom.

Τα δοκίμια εφελκυσμού δόθηκαν κομμένα και είχαν ύψος 19,2 cm και πάχος 3,15 mm περίπου.



Εικόνα 4-2: Μηχανή κοπής δοκιμίων, Struers Discotom.

4.2.2 Θερμικές Κατεργασίες

Αφού έγινε η κοπή των δοκιμίων, ακολούθησε η θερμική τους κατεργασία εκτός φυσικά των δοκιμίων αναφοράς. Τα δοκίμια εισχώρησαν στον φούρνο, ύστερα από προθέρμανση του στην κατάλληλη θερμοκρασία και παραμονή του σε αυτή για 15 λεπτά προκειμένου να μην υπάρχουν διακυμάνσεις θερμότητας στο εσωτερικό του. Η πρώτη ομάδα δοκιμίων θερμάνθηκε στους 950 °C για μισή ώρα και έπειτα βάφτηκε προσεκτικά μέσα σε νερό. Αντίστοιχα η δεύτερη ομάδα δοκιμίων θερμάνθηκε στους 1050 °C για μισή ώρα με εν συνεχεία βαφή της σε νερό, με την τελευταία ομάδα να θερμαίνεται στους 1150 °C και να βάφεται και αυτή σε νερό.

Οι εικόνες που παρατίθενται παρακάτω απεικονίζουν την μορφή των δοκιμίων στην αρχική τους δομή και ύστερα από την θερμική τους επεξεργασία. Στα δοκίμια που πραγματοποιήθηκε θερμική επεξεργασία παρατηρήθηκε μια πολύ μικρή αύξηση του

πάχους, γύρω στα 10 mm, εξαιτίας μάλλον του στρώματος οξειδίου που είχε δημιουργηθεί στην επιφάνεια τους.



Εικόνα 4-3: Δοκίμιο Αναφοράς.



Εικόνα 4-4: Δοκίμιο Θερμικής Κατεργασίας στους 950 °C/ 30 λεπτά/ Βαφή σε νερό.



Εικόνα 4-5: Δοκίμιο Θερμικής Κατεργασίας στους 1050 °C/ 30 λεπτά/ Βαφή σε νερό.



Εικόνα 4-6: Δοκίμιο Θερμικής Κατεργασίας στους 1150 °C/ 30 λεπτά/ Βαφή σε νερό.

4.2.3 Ονομασία και Διαχωρισμός των Δοκιμίων

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων για μεταλλογραφική μελέτη, πραγματοποιήθηκε η ονομασία τους, καθώς επίσης και ο διαχωρισμός τους με σκοπό να αποφευχθεί η σύγχυση μεταξύ αυτών. Τα δοκίμια αναφοράς συμβολίστηκαν ως AR (As Received), τα δοκίμια που προορίζονταν για SEM και XRD συμβολίστηκαν 950 °C/1050 °C /1150°C και τα δοκίμια εφελκυσμού λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας τους ως 950 °C/1, 950 °C/2 και ούτω καθεξής.

4.2.4 Εγκιβωτισμός

Το στάδιο αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο. Συνήθως τα δοκίμια εγκιβωτίζονται όταν είναι πολύ μικρά ή έχουν έντονα ανομοιόμορφο σχήμα ώστε να είναι πιο εύκολη η συγκράτηση τους στα επόμενα στάδια. Επίσης, εγκιβωτίζονται για καλύτερη διατήρηση των άκρων των δοκιμίων και για να εμποδιστεί η αποκόλληση επιφανειακών επιστρωμάτων ή προϊόντων διάβρωσης. Ο εγκιβωτισμός γίνεται είτε με ειδικές μεταλλικές διατάξεις συγκράτησης, οι οποίες όμως χρησιμοποιούνται μόνο για τη συγκράτηση των δοκιμίων κατά τη λείανση και τη στίλβωση, είτε με διαφόρων ειδών ρητίνες. Οι ρητίνες χωρίζονται σε ρητίνες θερμού και ψυχρού εγκιβωτισμού, ανάλογα με το αν απαιτούν ή όχι θέρμανση για να χυτευτούν. Πριν τον εγκιβωτισμό σε ρητίνη πρέπει η επιφάνεια του δοκιμίου να καθαρίζεται από ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη πρόσφυση μεταξύ του μεταλλικού δοκιμίου και της ρητίνης.[11]

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, εγκιβωτίστηκαν σε μικρά καλούπια χωρητικότητας 60ml. Για το κάθε καλούπι-δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε 15ml ρητίνης και 9 σταγόνες σκληρυντή για την ταχύτερη και αποτελεσματικότερη στερεοποίηση της ρητίνης. Η αναλογία ρητίνης προς σκληρυντή είναι 10ml ρητίνης προς 6 σταγόνες σκληρυντή.

Αφού τοποθετήσουμε την βάση του δοκιμίου μέσα στο καλούπι, τοποθετούμε πάνω το δοκίμιο και εν συνεχεία προσθέτουμε στο καλούπι το μείγμα ρητίνης – σκληρυντή. Το μείγμα κατά την παρασκευή του, απαιτεί καλή ανάμειξη, έτσι ώστε να μη δημιουργηθούν ανεπιθύμητες φυσαλίδες στο εσωτερικό του. Στη βάση των τοιχωμάτων του καλουπιού έχει τοποθετηθεί βαζελίνη για την εύκολη εξαγωγή του δοκιμίου από αυτό.

4.2.5 Λείανση

Το στάδιο αυτό προηγείται πάντοτε της στίλβωσης και κατ' αυτό απομακρύνεται το επιφανειακό στρώμα του υλικού που έχει παραμορφωθεί ή έχει υποστεί διάφορες ζημιές κατά την κοπή ή τη λειτουργία του κομματιού. Η απομάκρυνση του υλικού γίνεται μηχανικά, με εκτριβή του με ένα σκληρό μέσο. Ο πιο διαδομένος τρόπος λείανσης των δοκιμίων είναι με χαρτιά καρβιδίων του πυριτίου (SiC). Τα χαρτιά αυτά χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό, ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα μέγεθος κόκκου του λειαντικού μέσου ανά τετραγωνικό χιλιοστό, το grit.[11]

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε λείανση με χαρτιά 220, 400, 800, 1200 και 2000 grit για τα δοκίμια που θα εξετάζονταν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και στο περιθλασίμετρο ακτινών X (XRD). Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου ήταν στα 200rpm καθ' όλη την διάρκεια της λείανσης. Σε κάθε νέο χαρτί, το δοκίμιο περιστρεφόταν κατά 90° για τον έλεγχο απαλοιφής των γραμμών της προηγούμενης κάθε φορά κοκκομετρίας.

4.2.6 Στίλβωση

Η στίλβωση γίνεται είτε μηχανικά είτε ηλεκτρολυτικά.

Η μηχανική στίλβωση γίνεται πάνω σε κατάλληλα υφάσματα στα οποία απλώνεται διαμαντόπαστα ή πάστα οξειδίων (π.χ. αλούμινας). Η στίλβωση μπορεί να γίνει και με ηλεκτρολυτικό τρόπο και τότε ονομάζεται ηλεκτροστίλβωση και χρησιμοποιείται κυρίως για μέταλλα και κράματα που στίλβώνονται δύσκολα με τις συμβατικές μεθόδους.[11]

Τα δοκίμια υπέστησαν στίλβωση με πανιά, και διαμαντόπαστα Metadi BUEHLER. Στο 1^ο στάδιο χρησιμοποιήθηκε διαμαντόπαστα με μέγεθος κόκκου 6μm και στο 2^ο στάδιο με μέγεθος κόκκου 1μm. Το κάθε στάδιο διήρκεσε τόσο όσο να εξαφανιστούν οι γραμμές της λείανσης. Ύστερα από κάθε στίλβωση τα μεταλλικά δοκίμια καθαρίστηκαν με νερό και βαμβάκι, έπειτα με οινόπνευμα και εν τέλει με θερμό αέρα υπό γωνία.

Τα στάδια αυτά, λείανση και στίλβωση, αποσκοπούν στη μείωση της επιφανειακής τραχύτητας του δοκιμίου, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της δομής του μετά από την προσβολή του με κατάλληλο αντιδραστήριο.

4.2.7 Χημική Προσβολή

Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο για να αποκαλυφθεί η δομή του εξεταζόμενου υλικού με μικροσκοπικές μεθόδους, μιας και η απρόσβλητη επιφάνεια μπορεί να δώσει λίγες σχετικά πληροφορίες. Αντίθετα, δεν είναι απαραίτητο για να μελετηθεί η δομή με άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα με περίθλαση με ακτίνες Χ. Η χημική προσβολή είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική αποκάλυψης των χαρακτηριστικών της δομής μεταλλικών δοκιμίων και βασίζεται στην εκλεκτική διάλυση των μικρογραφικών συστατικών ανάλογα με τα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά τους.[11]

Χημική προσβολή πραγματοποιήθηκε μόνο στα δοκίμια που επρόκειτο να παρατηρηθούν με οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Η χημική προσβολή των δοκιμίων έγινε με την εμβάπτιση τους στο αντιδραστήριο KROLL, για κατάλληλο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να υπάρξει θόλωση του δοκιμίου, η οποία είναι ένδειξη επιτυχημένης προσβολής. Αφού γίνει η εμβάπτιση γίνεται καθαρισμός των δοκιμίων με νερό και βαμβάκι, έπειτα με οινόπνευμα και εν τέλει με θερμό αέρα υπό γωνία.

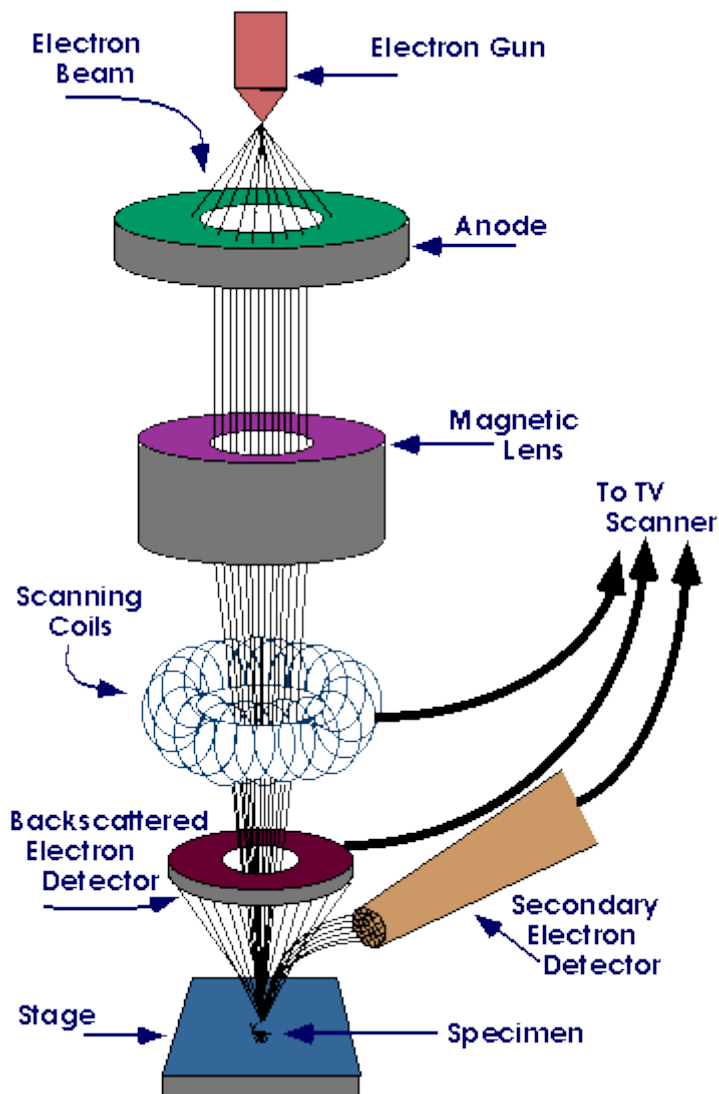
4.2.8 Παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο

Το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την παρατήρηση των μεταβολών της μικροδομής των δοκιμίων, που αναμένονταν να προκύψουν από τις θερμικές κατεργασίες. Κρίθηκε όμως ανεπαρκής, διότι οι δομές αυτές ήταν εξαιρετικά λεπτομερείς. Ακόμη έγινε χρήση του οπτικού μικροσκοπίου με σκοπό την παρατήρηση και τον έλεγχο των δοκιμίων όταν υπέστησαν χημική προσβολή, έτσι ώστε να παρατηρηθούν στην συνέχεια στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Olympus BX41M.

4.2.9 Ανάλυση με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης – SEM

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Η λειτουργία του SEM στηρίζεται στην αλληλεπίδραση του προς εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων σε αυτό. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται κυρίως από το

σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το θάλαμο που τοποθετείται το δείγμα, την αντλία κενού και το σύστημα ανιχνευτών και παρουσίασης.



Εικόνα 4-7: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Τα ηλεκτρόνια παράγονται από ένα σύρμα βολφραμίου (κάθοδος) και επιταχύνονται προς την άνοδο, στην οποία εφαρμόζεται ένα δυναμικό 1- 30KV. Η άνοδος δημιουργεί ισχυρές ελκτικές δυνάμεις στα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να τα επιταχύνει και να τα κατευθύνει. Η παραγόμενη δέσμη ηλεκτρονίων έχει τυπικά ενέργεια από μερικές εκατοντάδες eV μέχρι περίπου 50KeV και εστιάζεται από ένα σύστημα φακών εστίασης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με κατάλληλα διαφράγματα. Αμέσως μετά, αυτή η εστιασμένη δέσμη περνά μέσα από ζεύγη πηνίων σάρωσης, τα οποία την εκτρέπουν οριζόντια και κάθετα έτσι ώστε να σαρώνουν μια τετραγωνική περιοχή της επιφάνειας του δείγματος. Τα πηνία αυτά είναι τοποθετημένα σε δύο ζεύγη γύρω από τη δέσμη, με το ένα ζεύγος να ελέγχει την κίνηση της

δέσμης στην κατεύθυνση X και το άλλο την κίνησή της στην κατεύθυνση Y . Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα καθορίζει το μαγνητικό πεδίο και άρα την εκτροπή της δέσμης, ώστε αυτή να στέλνεται στο σωστό σημείο. Τα ίδια τα πηνία ελέγχονται με την γεννήτρια σάρωσης, η οποία με τη σειρά της συνδέεται με τον έλεγχο μεγέθυνσης και την οθόνη. Η δέσμη των ηλεκτρονίων προσπίπτει στο δείγμα και το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια του δείγματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων του υλικού, και μπορεί να είναι:

- Δευτερογενή ηλεκτρόνια
- Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια
- Ηλεκτρόνια Auger
- Ακτίνες- X

Τα σήματα των δευτερογενών και των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, κυρίως, ενισχύονται και δημιουργούν ένα οπτικό σήμα. Έτσι είναι δυνατή η μεγεθυμένη απεικόνιση σε μια οθόνη, της επιφάνειας του δείγματος που σαρώνει η δέσμη των ηλεκτρονίων. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια προκύπτουν από την ανελαστική σύγκρουση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα του δοκιμίου (συγκεκριμένα σε βάθος 10nm). Έχουν ενέργεια 50eV και δίνουν πληροφορίες κυρίως για την τοπογραφία της επιφάνειας του δοκιμίου. Η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και τις επιφανειακές ανωμαλίες του δείγματος. Τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια έχουν ενέργεια από 5 έως 50KeV. Προκύπτουν από την ελαστική σύγκρουση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων του δοκιμίου, που βρίσκονται σε βάθος 100nm. Η ένταση του παραγόμενου σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και από τον ατομικό αριθμό των στοιχείων. Δίνουν μια εικόνα κατανομής των στοιχείων (οι φωτεινές περιοχές αντιστοιχούν σε βαρέα στοιχεία, ενώ οι πιο σκουρόχρωμες σε ελαφρά). Τα ηλεκτρόνια Auger προέρχονται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των υποστοιβάδων των επιφανειακών ατόμων (σε βάθος 1nm). Το φάσμα που προκύπτει είναι κατάλληλο για στοιχειακές χημικές αναλύσεις της επιφάνειας του υλικού. Οι χαρακτηριστικές ακτίνες X , παράγονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του δείγματος. Όταν φεύγει ένα ηλεκτρόνιο από εσωτερική στοιβάδα, τότε ένα ηλεκτρόνιο από υψηλότερη ενεργειακή στοιβάδα καλύπτει το κενό πέφτοντας στην χαμηλότερη στοιβάδα και εκπέμποντας την

διαφορά ενεργείας σαν ακτίνες X. Η ενέργεια αυτών των ακτινών είναι χαρακτηριστική της μετάπτωσης και κατά συνέπεια του ατόμου. Το βάθος πεδίου του SEM και η διακριτική του ικανότητα είναι πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με το οπτικό μικροσκόπιο. Το SEM, μπορεί να φτάσει σε μεγεθύνσεις της τάξης x10000-30000. Επίσης τα δοκίμια δε χρειάζεται να έχουν τόσο καλή επιπεδότητα όσο στο οπτικό μικροσκόπιο, έτσι μετά από κοπή, λείανση και χημική προσβολή είναι δυνατόν να παρατηρηθούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η χημική προσβολή είναι απαραίτητη έτσι ώστε να είναι πιο έντονη η τοπογραφία της επιφάνειας και η ένταση του σήματος που προέρχεται από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια να είναι αυξημένη. Κατά τη χρήση του SEM, η στήλη πρέπει να βρίσκεται υπό κενό για να μπορεί να παραχθεί και να διατηρηθεί σταθερή η δέσμη των ηλεκτρονίων. Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης υπάρχει και η δυνατότητα χημικής στοιχειακής ανάλυσης (EDS). Η ανάλυση EDS είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται για να προσδιοριστεί η χημική σύνθεση μιας μεγάλης ή μιας μικρή περιοχής του δείγματος. Κατά την παρατήρηση ενός δοκιμίου στο SEM η δέσμη των ηλεκτρονίων που προσπίπτει πάνω στο δείγμα έχει σαν αποτέλεσμα και την παραγωγή ακτίνων X, όπως προαναφέρθηκε. Οι ακτίνες X παράγονται από το επιφανειακό στρώμα του δοκιμίου και συγκεκριμένα μέχρι βάθος 1μm. Η ανάλυση αυτής της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας οδηγεί σε στοιχειακή χημική ανάλυση της επιφάνειας.[11]

Στο εργαστήριο, το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου JEOL JSM-6380LV και ο τύπος της στήλης Oxford Instruments INCA x – sight. Οι συνθήκες λειτουργίας του παραπάνω μικροσκοπίου για τα μεταλλικά δοκίμια ήταν:

- Accelerating voltage: 20 kV
- Working distance: 15 mm (απόσταση φακού – δείγματος)
- Spot size: 50

4.2.10 Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS, X-Ray Microanalysis)

Κατά την εξέταση της μικροδομής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, πραγματοποιήθηκαν ποσοτικές αναλύσεις από κατάλληλο προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS). Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση συμμετοχής κυρίαρχων χημικών στοιχείων.



Εικόνα 4-8: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο JEOLJSM-6380LV

4.2.11 Φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων X – XRD

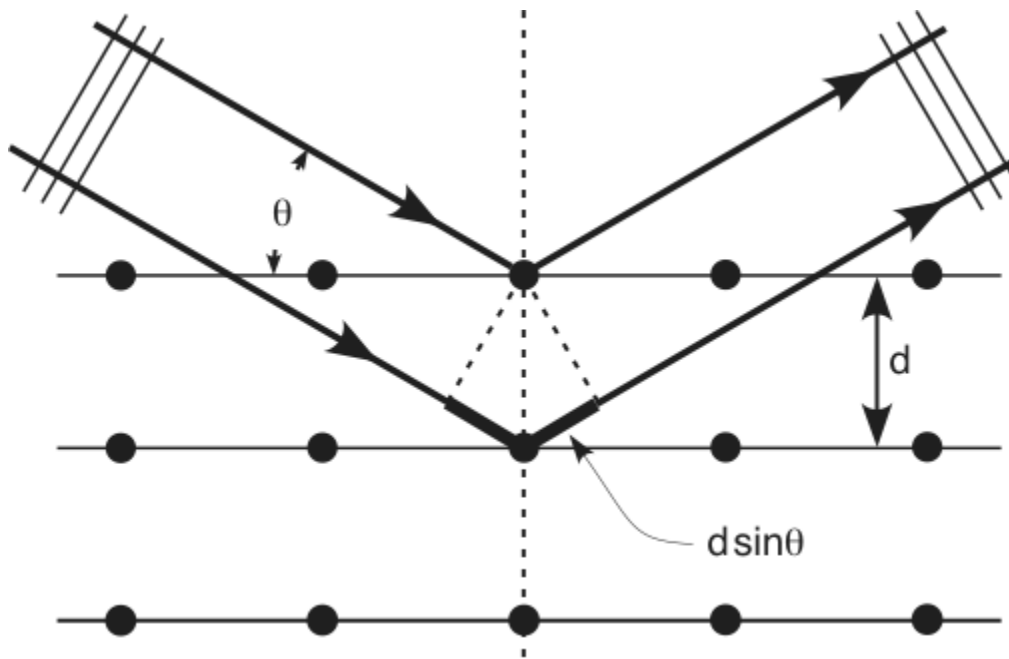
Η τεχνική της περίθλασης των ακτίνων – X χρησιμοποιείται ευρέως για την ταυτοποίηση μιας κρυσταλλικής ουσίας. Οι ακτίνες X είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκη κύματος πολύ μικρά, από 0.01 έως 0.25 nm. Η μέθοδος βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων – X γνωστού μήκους κύματος λ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος του εξεταζόμενου δείγματος και στη συνέχεια τον προσδιορισμό των εσωτερικών διαστημάτων d των επιπέδων του πλέγματος, τα οποία είναι χαρακτηριστικά της κάθε φάσης. Για τον υπολογισμό του d , καταγράφεται η ένταση της περιθλώμενης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη γωνία 2θ , όπου θ η γωνία πρόσπτωσης. Από την εξίσωση του νόμου του Bragg υπολογίζεται το d για τα διάφορα κρυσταλλικά επίπεδα (hkl) . Στη συνέχεια με τη βοήθεια κατάλληλης βάσης δεδομένων και από προσωπική εμπειρία και αξιολόγηση, προσδιορίζεται το είδος των φάσεων του υπό εξέταση υλικού. Σύμφωνα με το νόμο του Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad (4.1)$$

όπου:

- n = ένας ακέραιος αριθμός

- λ = το μήκος κύματος της ακτινοβολίας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας των ακτίνων X
- d = η απόσταση μεταξύ των ατομικών επιπέδων στον κρύσταλλο



Εικόνα 4-9: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του περιθλασίμετρου ακτίνων X.

Η πειραματική διάταξη του XRD αποτελείται από τα εξής:

- Πηγή εκπομπής ακτίνων – X. Η πηγή εκπομπής είναι μία λυχνία που λειτουργεί σε κενό. Ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την άνοδο (μέταλλο Cu, Co, Cr, Fe, Mo, Ag) προς την κάθοδο που αποτελείται από W εκπέμποντας ακτίνες X. Μπροστά από την λυχνία υπάρχει φίλτρο, ώστε η εκπεμπόμενη ακτινοβολία να έχει αυστηρά καθορισμένο μήκος κύματος (μονοχρωματική)
- Γωνιόμετρο. Κατευθύνει την ανακλώμενη ακτινοβολία προς τον αισθητήρα καθώς το δείγμα σαρώνεται στις γωνίες 2θ από 0° ως 90° .

Ο αισθητήρας είναι ένας κρύσταλλος NaI ενεργοποιημένος με θάλλιο. Η απορρόφηση της περιθλόμενης ακτινοβολίας X προκαλεί την εκπομπή ενός φωτονίου στο ορατό φάσμα που ανιχνεύεται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή και μετράτε η ένταση του.[11]



Εικόνα 4-10: Περιθλασίμετρο D8 Focus Bruker.

Στο εργαστήριο τα μεταλλικά δοκίμια εξετάστηκαν με περιθλασίμετρο ακτίνων – X τύπου D8 Focus Bruker με τις ακόλουθες λειτουργίες: ακτινοβολία (λάμπα παραγωγής ακτίνων X) Cu με $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$, ένταση ρεύματος 40 mA και τάση 40 kV. Η ταυτοποίηση των φάσεων, έγινε με βάση τις χαρακτηριστικές τους ανακλάσεις. Η σάρωση πραγματοποιήθηκε με εφαρμοζόμενη γωνία 2θ από 30° έως 100° με βήμα $0.02^\circ/\text{sec}$.

4.2.12 Δοκιμή Εφελκυσμού

Το μηχάνημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον εφελκυσμό των δοκιμών είναι το Instron 4482, το οποίο φαίνεται παρακάτω. Σε αυτό πραγματοποιήθηκαν 10 δοκιμές εφελκυσμού, όπου ένα από τα δοκίμια ήταν δοκίμιο αναφοράς (AR), ενώ όλα τα υπόλοιπα ήταν χωρισμένα ανά τριάδες και είχαν υποστεί την ανάλογη θερμική επεξεργασία. Η εμφάνιση των δοκιμών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4-11: Δοκίμιο Αναφοράς κράματος Ti-6Al-4V.



Εικόνα 4-12: Μηχάνημα εφελκυσμού Instron 4482.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Μελέτη της Μικροδομής

5.1.1 Δοκίμια Αναφοράς AR(As Received) 1 και AR 2

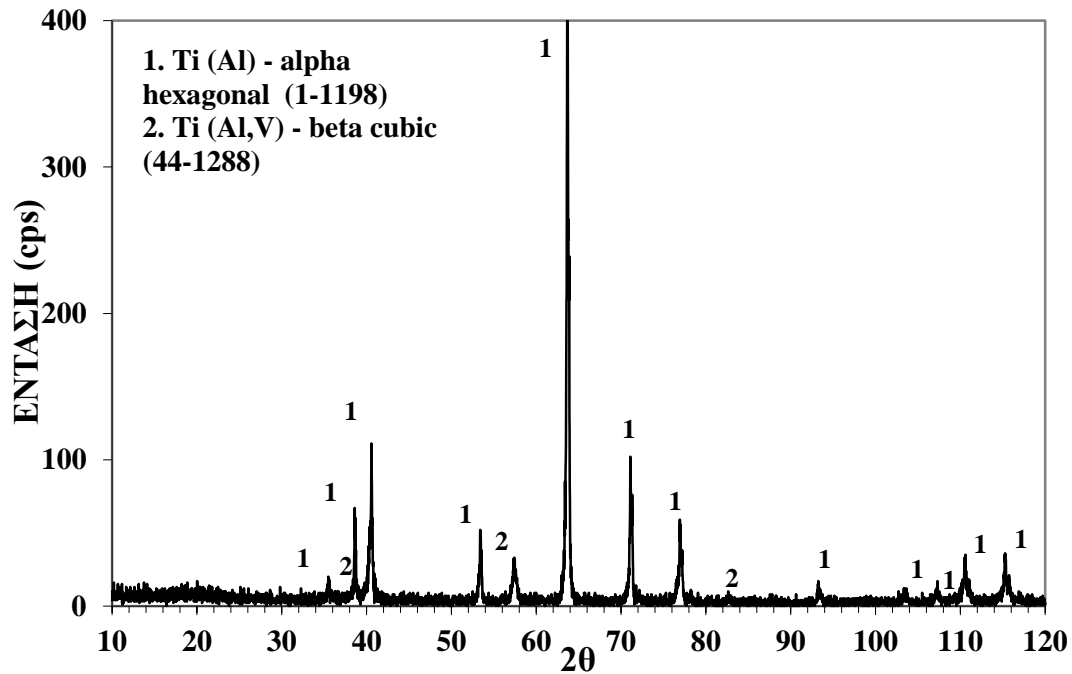
Τα δοκίμια αναφοράς AR 1 και AR 2, δεν υπέστησαν καμία θερμική κατεργασία, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Βεβαίως το αρχικό υλικό από το οποίο πάρθηκαν όλα τα δοκίμια, είχε υποστεί θερμομηχανικές επεξεργασίες ανόπτησης και θερμής έλασης από τον παραγωγό του.

Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες μικροδομών των δύο δοκιμίων αναφοράς, όπου μπορεί να παρατηρηθεί η μικροδομή του α-β κράματος Ti-6Al-4V. Η μικροδομή φαίνεται να έχει ομοιόμορφη ανάπτυξη ισοαξονικών-φολιδωτών κόκκων, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν ανακρυσταλλωθεί οι κόκκοι λόγω ανόπτησης. Φυσικά το μέγεθος και η ποσότητα των ανακρυσταλλωμένων κόκκων εξαρτάται από την διάρκεια της καθ' αυτής διαδικασίας. Επίσης από την μορφή των κόκκων παρατηρείται η θερμή έλαση που έχει γίνει στο έλασμα. Επιπρόσθετα, στις φωτογραφίες που έχουν ληφθεί με Οπισθοσκεδαζόμενα Ηλεκτρόνια(BES), είναι φανερό το ανάγλυφο του υλικού, καθώς με την σκοτεινή αντίθεση απεικονίζονται τα σημεία που περιέχουν μεγάλο ποσοστό αλουμινίου, και με την φωτεινή αντίθεση τα σημεία με αυξημένη ποσότητα βαναδίου. Ο λόγος που το βανάδιο δημιουργεί την φωτεινή αντίθεση στο πλέγμα του τιτανίου σε σχέση με το αλουμίνιο, είναι επειδή είναι το βαρύτερο στοιχείο από το τρία. Γενικά στο σύνολο των εικόνων της μικροδομής παρατηρείται η β-φάση ως λεπτή ραφή γύρω από τους κόκκους της α-φάσης.

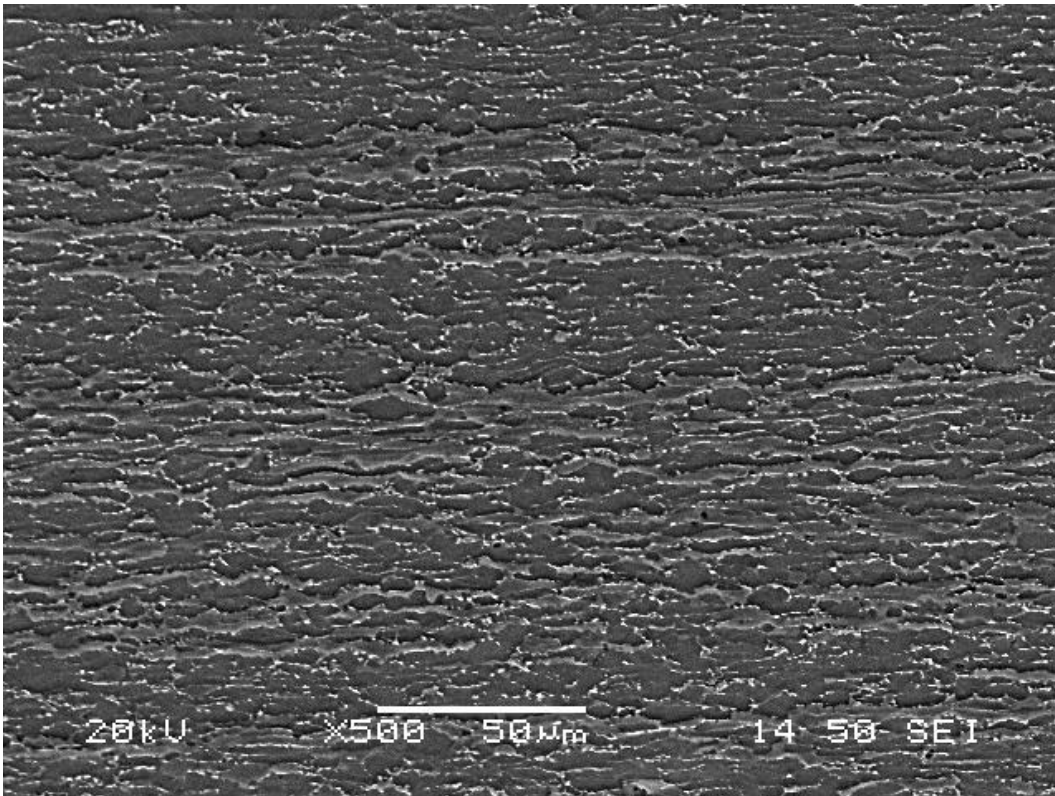
Από ανάλυση με την τεχνική EDS, παρατηρούμε την γενική ύπαρξη υψηλών ποσοτήτων αλουμινίου, που λειτουργεί ως α-σταθεροποιητής, στο γενικό πλέγμα του κράματος, ενώ αντίστοιχα, το βανάδιο, ο β-σταθεροποιητής του κράματος, παρατηρείται σε αυξημένα ποσοστά κυρίως σε σημειακές μετρήσεις.

Τέλος παρατίθεται και η γραφική απεικόνιση της εξέτασης των δοκιμίων AR 1 και AR 2 με το περιθλασίμετρο ακτίνων – X, όπου ταυτοποιούνται οι δύο φάσεις που περιέχονται στο

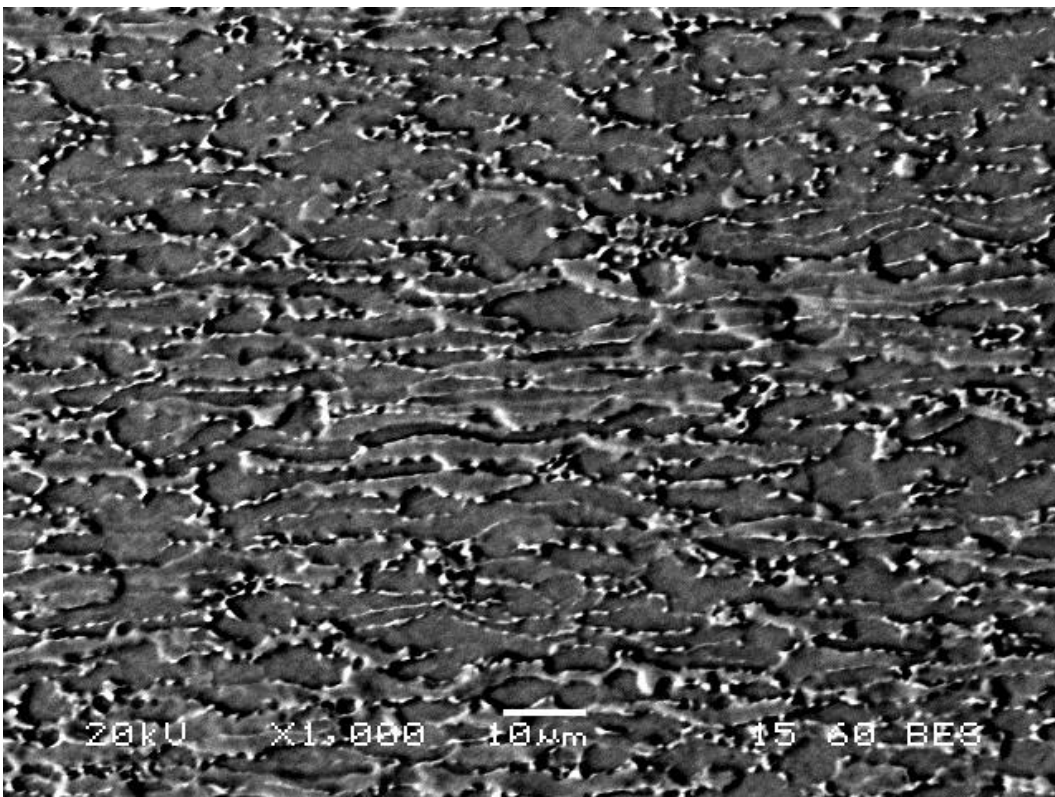
κράμα, καθιστώντας το ως διφασικό υλικό: Η άλφα εξαγωνική φάση καθώς και η βήτα χωροκεντρομένη κυβική φάση.



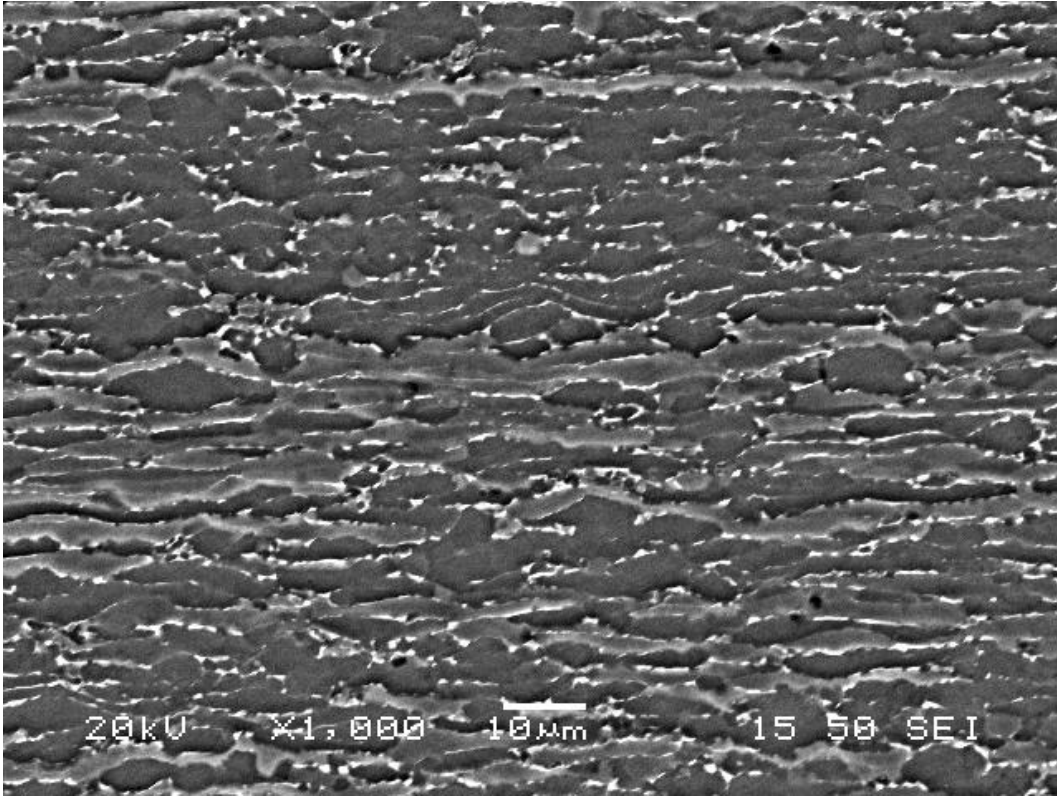
Εικόνα 5-1: Διάγραμμα XRD δοκιμίων αναφοράς AR 1 & 2. Διακρίνονται οι κορυφές της εξαγωνικής α-φάσης και της χωροκεντρομένης κυβικής β-φάσης.



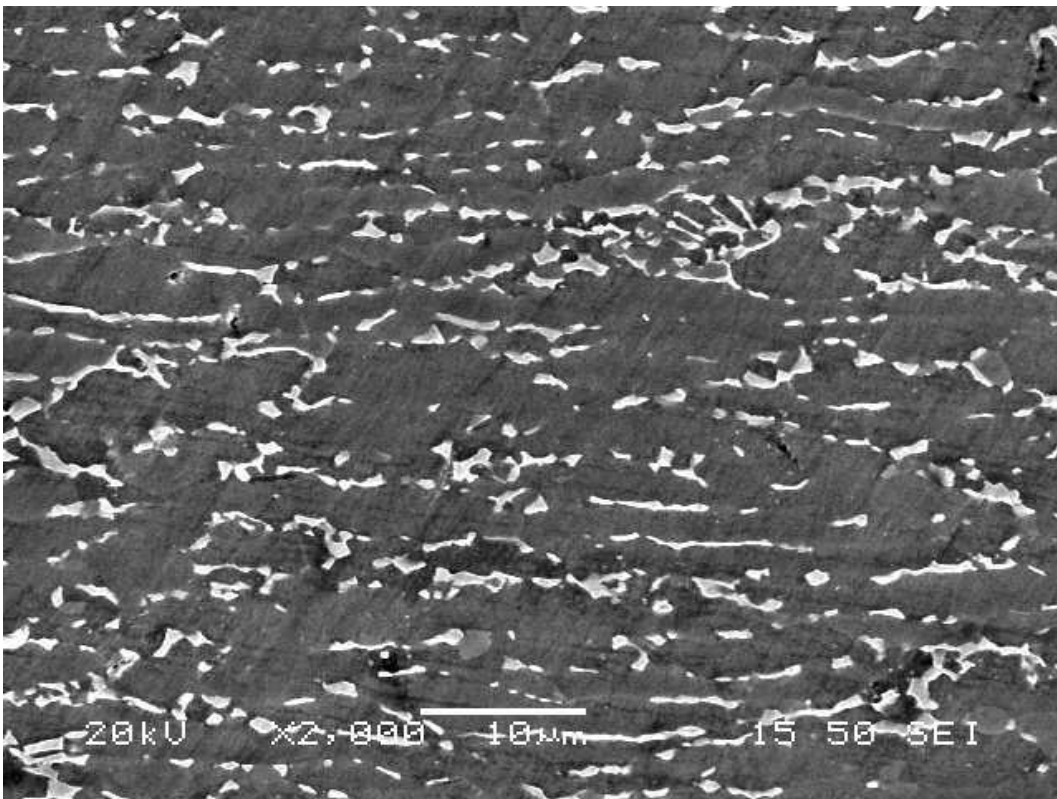
Εικόνα 5-2: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου AR 1 με μεγέθυνση x500.



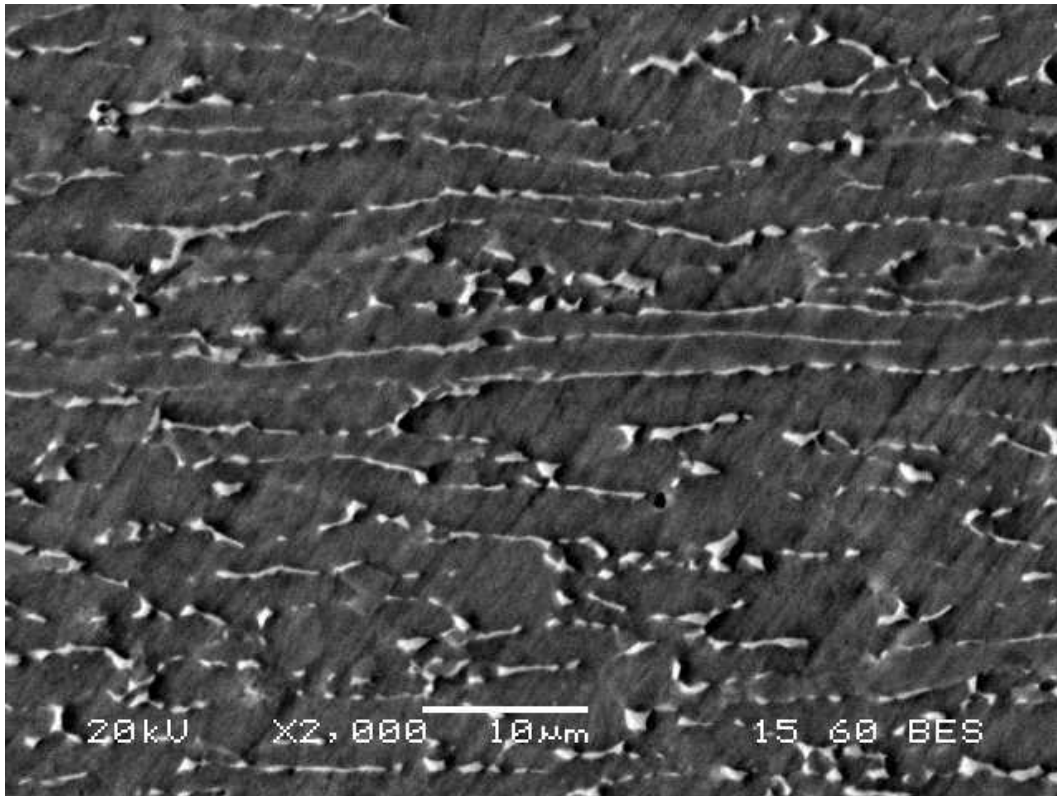
Εικόνα 5-3: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου AR 1 με μεγέθυνση x1000.



Εικόνα 5-4: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου AR 1 με μεγέθυνση x1000.

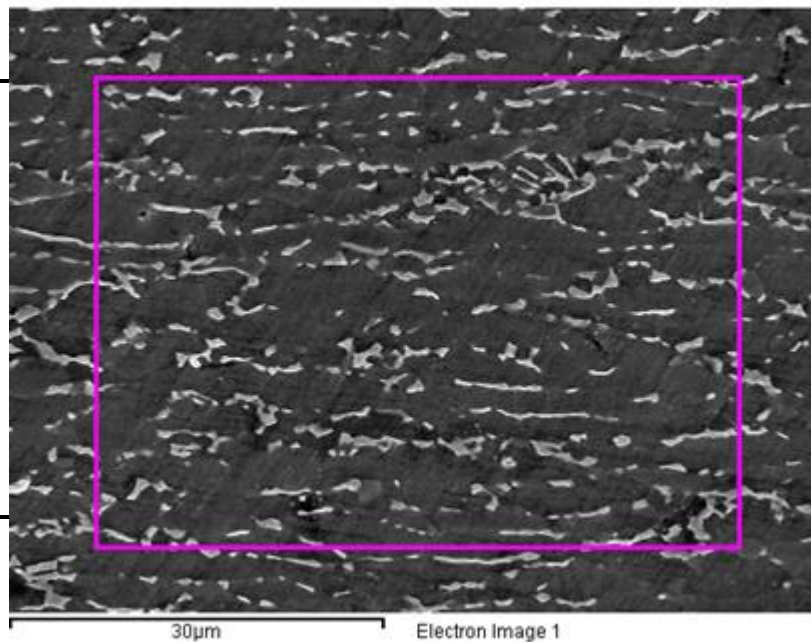


Εικόνα 5-5: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου AR2 με μεγέθυνση x2000.



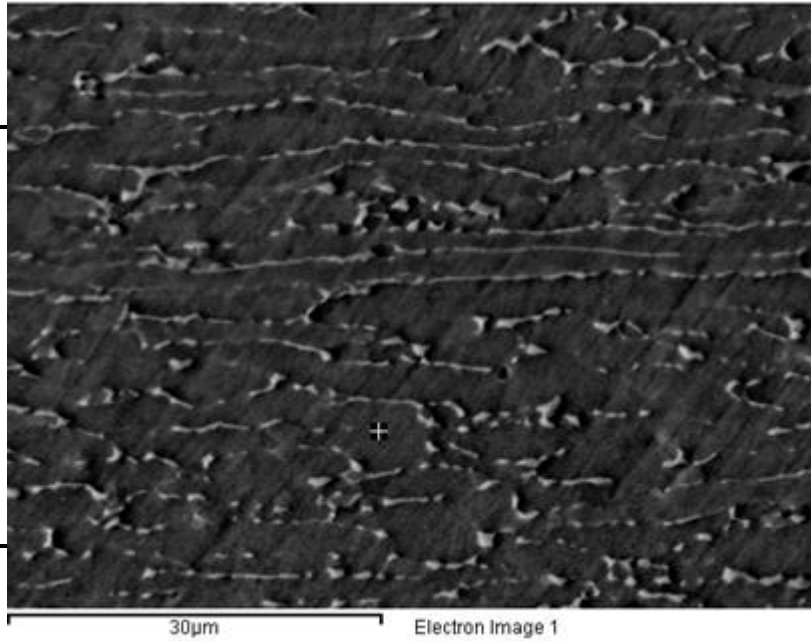
Εικόνα 5-6: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου AR 2 με μεγέθυνση x2000.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	5.62	9.58
Ti K	90.43	86.85
V K	3.95	3.57
Totals	100.00	



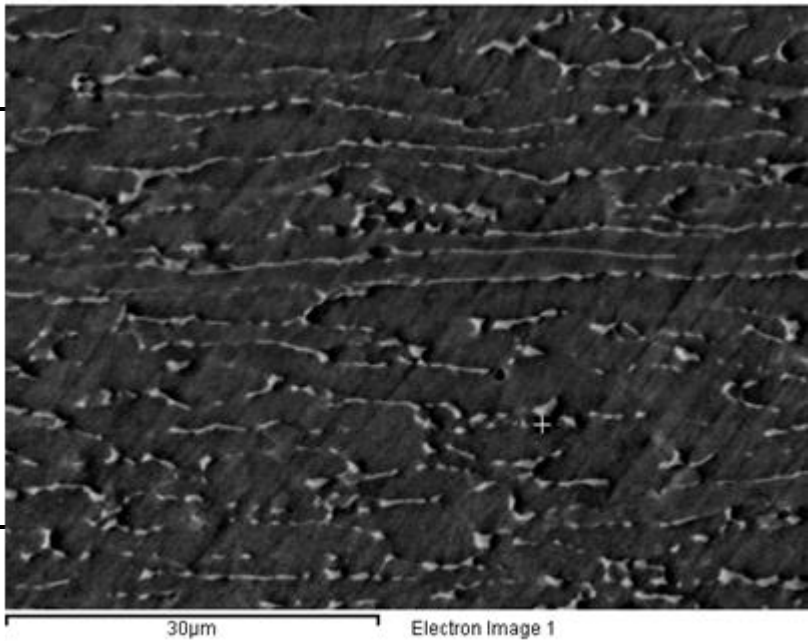
Πίνακας 5-1 & Εικόνα 5-7: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου AR 2.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	6.03	10.25
Ti K	90.40	86.54
V K	3.56	3.21
Totals	100.00	



Πίνακας 5-2 & Εικόνα 5-8: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε αλουμίνιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο AR 2.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.58	7.88
Ti K	89.38	86.61
V K	6.04	5.50
Totals	100.00	

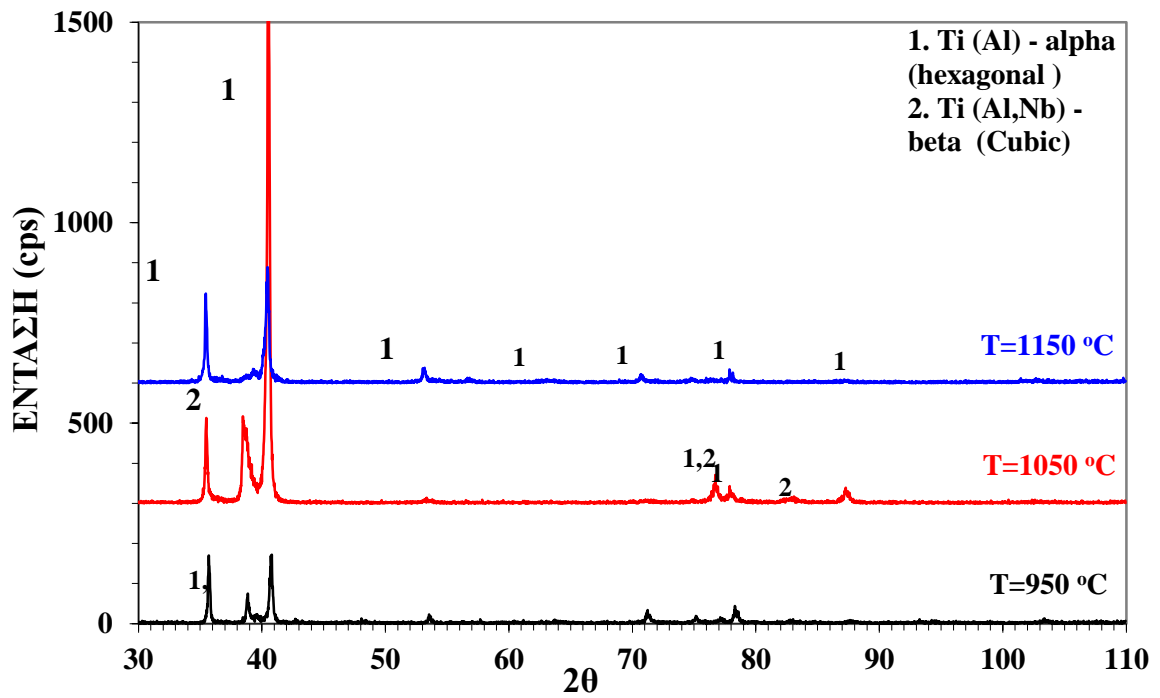


Πίνακας 5-3 & Εικόνα 5-9: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε βανάδιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο AR 2.

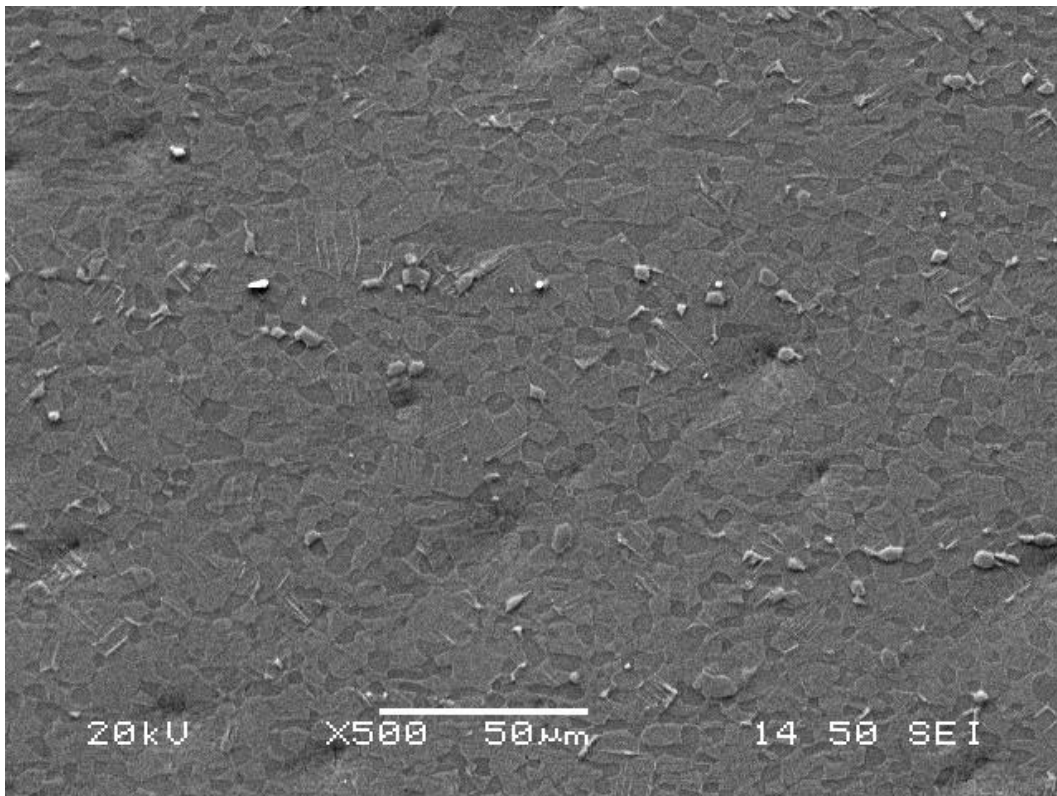
5.1.2 Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία.

5.1.2.1 Δοκίμιο που υποβλήθηκε στους 950 °C– 30 λεπτά – Βαφή σε νερό.

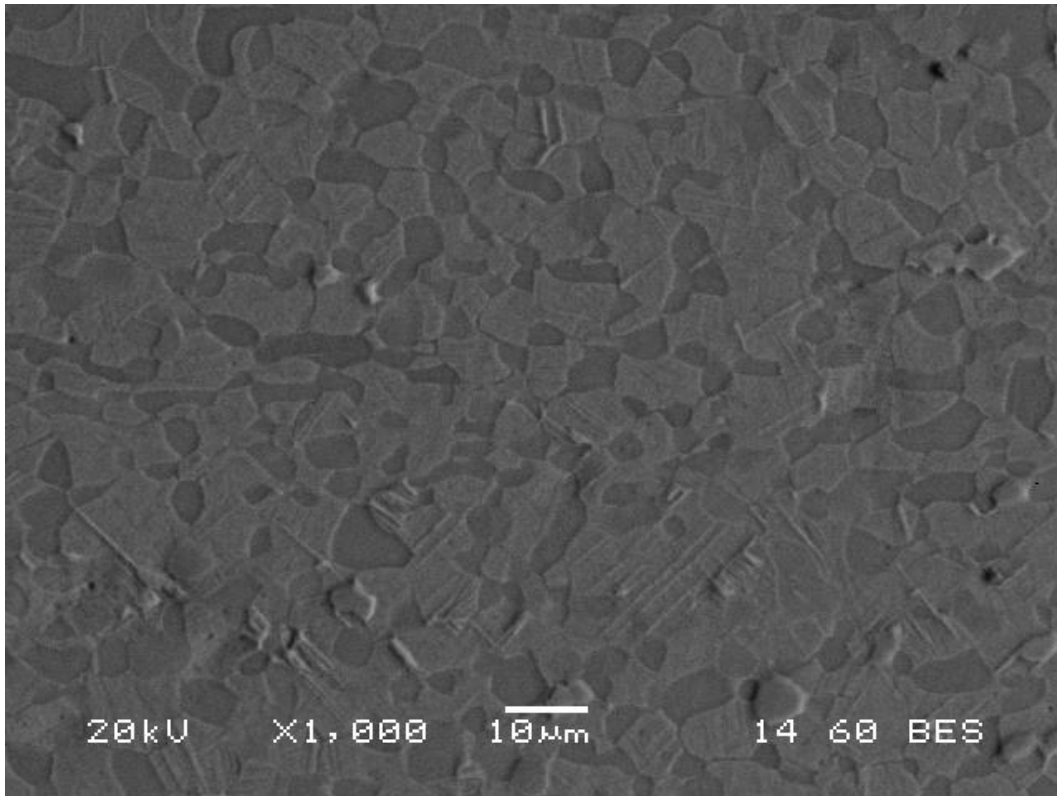
Από το παρακάτω γράφημα που πραγματοποιήθηκε με το περιθλασίμετρο ακτίνων – X στο δοκίμιο των 950 °C, μπορεί να διαπιστωθεί η διφασική φύση του κράματος. Η περιεχόμενη εξαγωνική φάση άλφα, καθώς και η περιεχόμενη χωροκεντρομένη κυβική β-φάση αποτελούν τις δύο βασικές φάσεις του κράματος. Το δοκίμιο αυτό διαφέρει βέβαια από τα δοκίμια αναφοράς στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια της βαφής του, ένα ποσοστό της β-φάσης αρχίζει να μετασχηματίζεται στην μαρτενσιτική εξαγωνική α'-φάση. Επομένως στη μήτρα του κράματος περιέχεται η εναπομένουσα β-φάση, η οποία δεν πρόλαβε να μετασχηματιστεί, η α'-μαρτενσιτική φάση, καθώς και η παραμένουσα πρωταρχική α-φάση. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στις μικρογραφικές εικόνες, όπου φαίνονται έντονα μικροί βελονοειδής κρύσταλλοι της μαρτενσιτικής α'-φάσης. Επιπλέον παρουσιάζεται η χαρακτηριστική λεπτόκοκκη δομή εξαιτίας της γρήγορης ψύξης που υπέστη το υλικό. Η β-φάση δεν διακρίνεται τόσο εύκολα, όπως στο δοκίμιο αναφοράς, λόγω της λεπτοκρυσταλλικότητας του υλικού, στις εικόνες με δευτερογενή ηλεκτρόνια, ενώ αντιθέτως στις εικόνες με οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι αρκετά εύκολο να παρατηρηθεί ο διαχωρισμός των φάσεων.



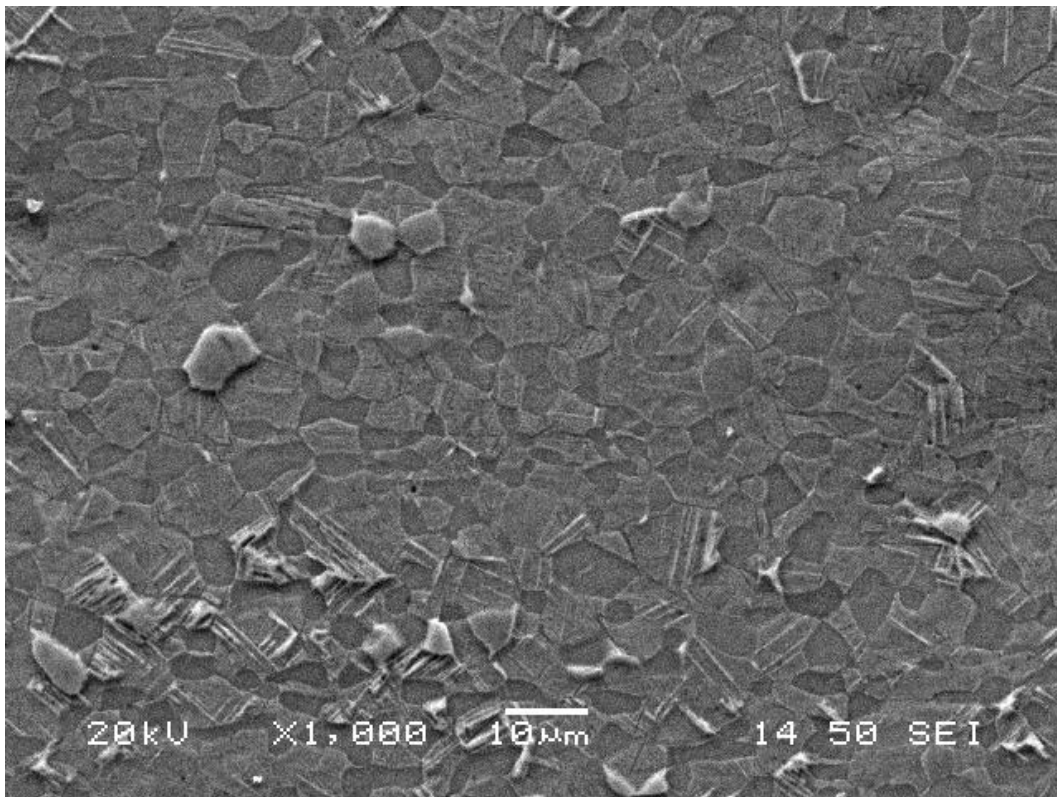
Εικόνα 5-10: Διάγραμμα XRD δοκιμίων 950 °C, 1050 °C, 1150 °C.



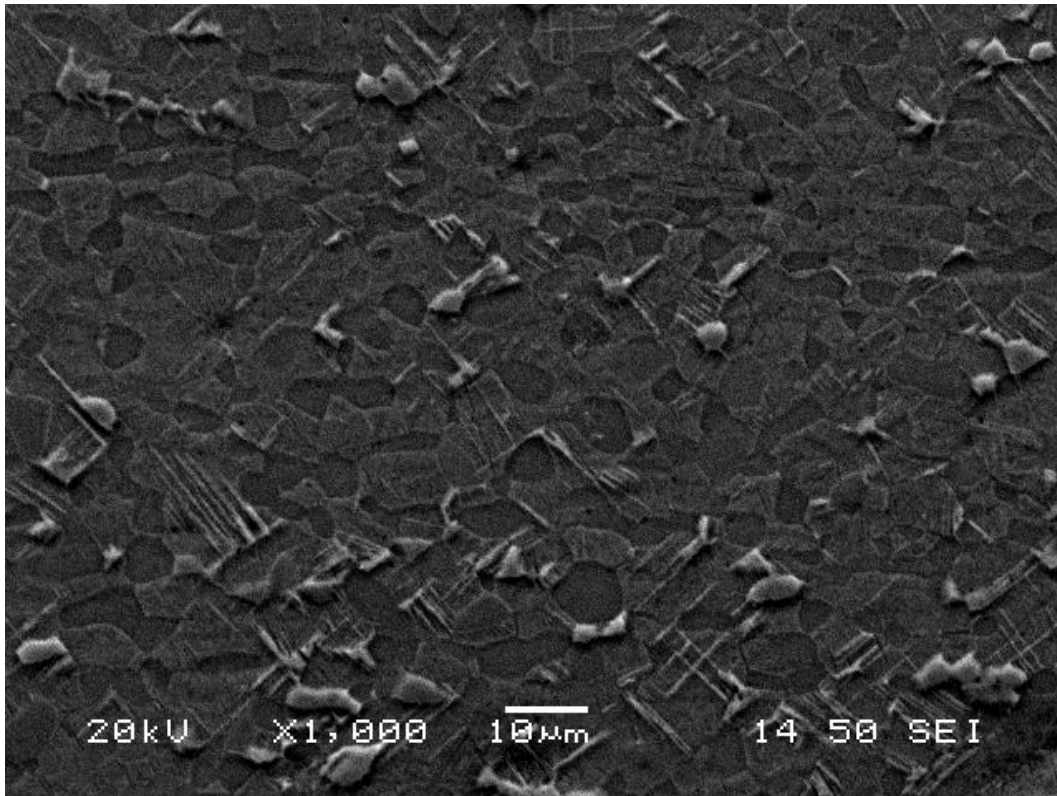
Εικόνα 5-11: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x500.



Εικόνα 5-12: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x1000.

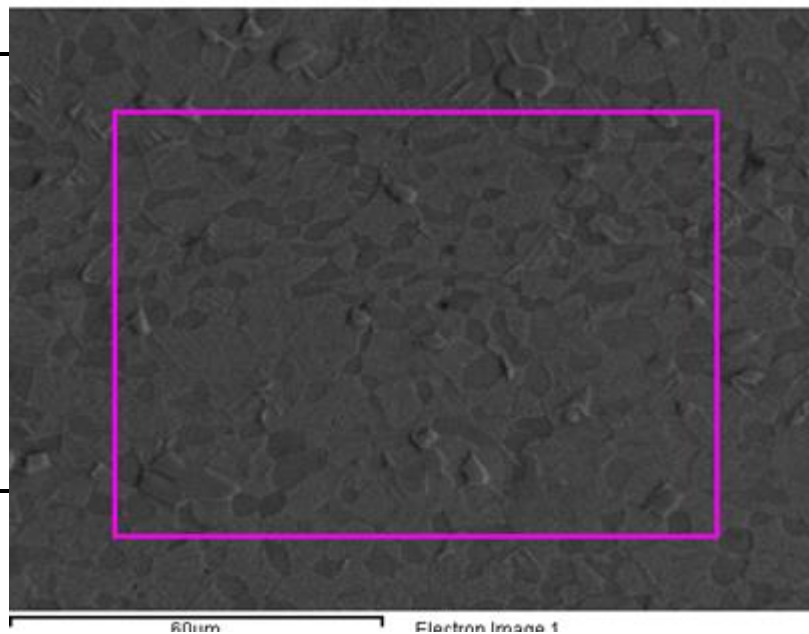


Εικόνα 5-13: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x1000.



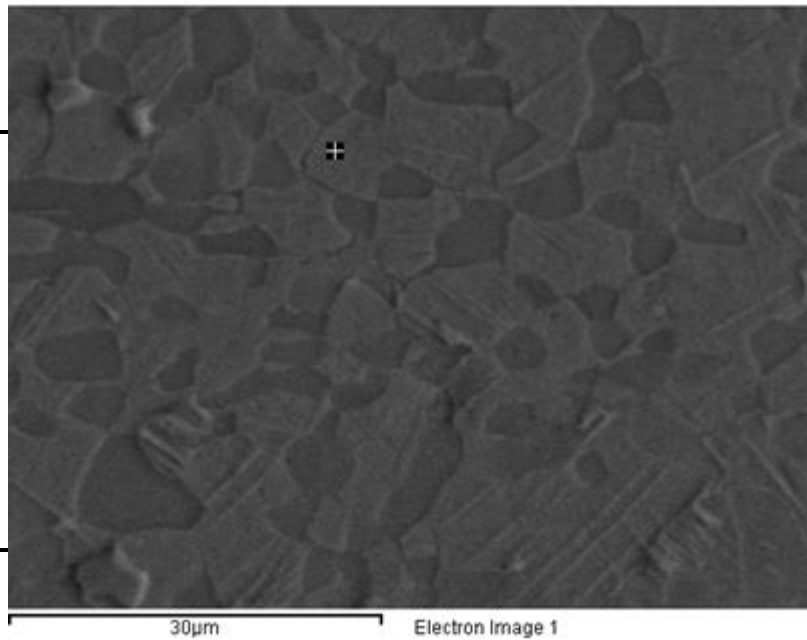
Εικόνα 5-14: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 950 °C με μεγέθυνση x1000.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.92	8.43
Ti K	91.23	88.07
V K	3.85	3.50
Totals	100.00	



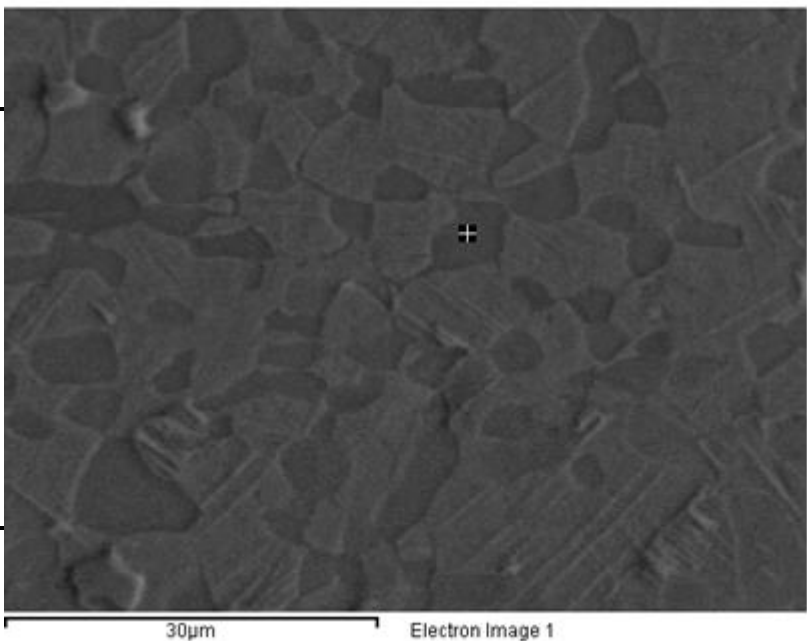
Πίνακας 5-4 & Εικόνα 5-15: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 950 °C.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.96	8.50
Ti K	90.33	87.22
V K	4.71	4.28
Totals	100.00	



Πίνακας 5-5 & Εικόνα 5-16: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε βανάδιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 950 °C.

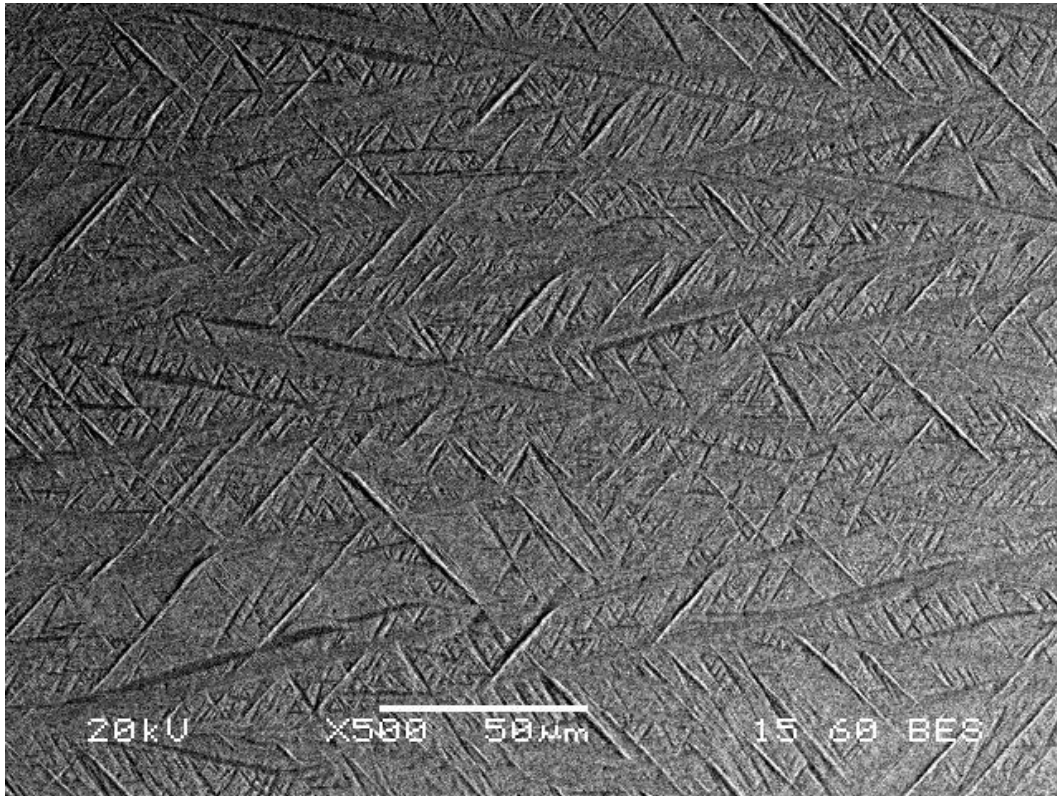
Element	Weight %	Atomic %
Al K	5.80	9.87
Ti K	92.33	88.45
V K	1.87	1.68
Totals	100.00	



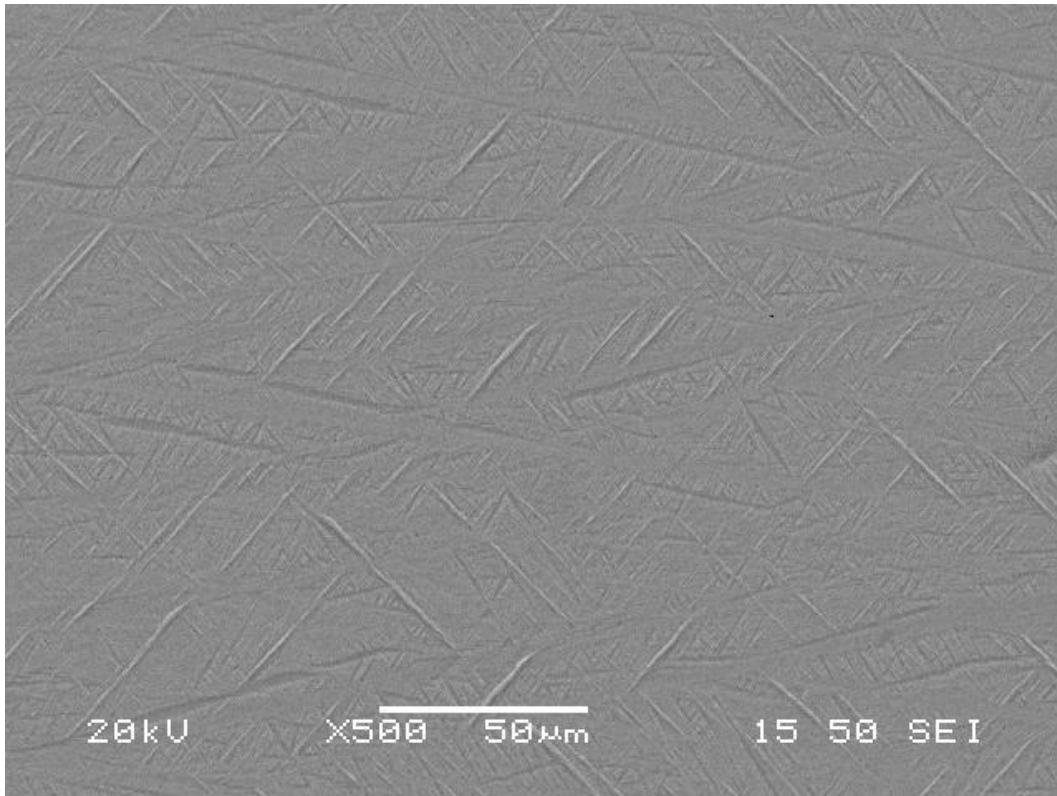
Πίνακας 5-6 & Εικόνα 5-17: Σημειακή μικροανάλυση (EDS). Είναι ορατό το υψηλό ποσοστό σε αλουμίνιο στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 950 °C.

5.1.2.2 Δοκίμιο που υποβλήθηκε στους 1050 °C– 30 λεπτά – Βαφή σε νερό.

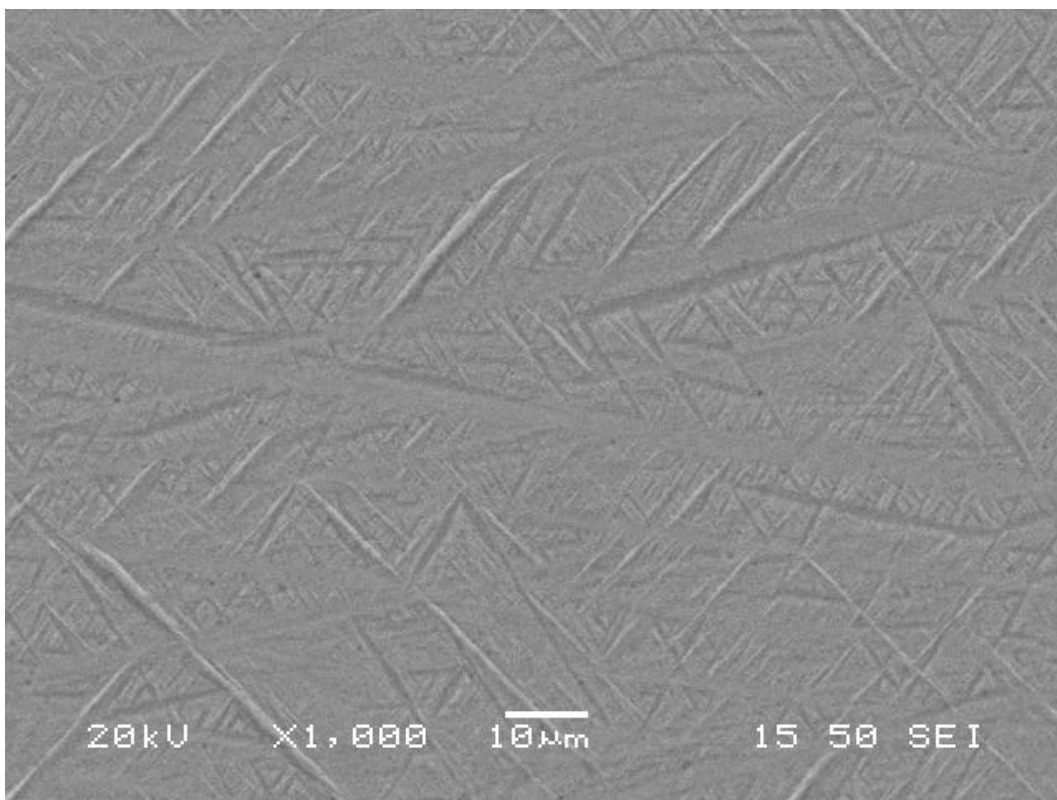
Παρατηρούμε εξίσου την παρουσία των δύο φάσεων από το γράφημα του XRD(εικόνα 5-10). Πλέον παρατηρείται έντονα ο μετασχηματισμός της β-φάσεως, στην μαρτενσιτική α'-φάση, λόγω της τυπικής καλαθό-ύφαντης δομής με βελονοειδή χαρακτήρα. Η πρωταρχική α-φάση, που υπήρχε στο δοκίμιο των 950 °C δεν υπάρχει πλέον. Γενικά από τις φωτογραφίες της μικροδομής δεν είναι εύκολος ο διαχωρισμός των κόκκων, όπως για παράδειγμα με τα την προηγούμενη θερμική επεξεργασία ή με τα δοκίμια αναφοράς, καθώς την μήτρα διασχίζουν οι λεπτές βελόνες της μαρτενσιτικής α'-φάσης, που έχουν πάρει την θέση της β-φάσης έπειτα από τον μετασχηματισμό της. Επίσης με τις μετρήσεις του EDS παρατηρείται μια ανακατανομή του βαναδίου και του αλουμινίου στην μήτρα του υλικού, που δεν ήταν τόσο αισθητή στην προηγούμενη θερμική κατεργασία ή στα δοκίμια αναφοράς.



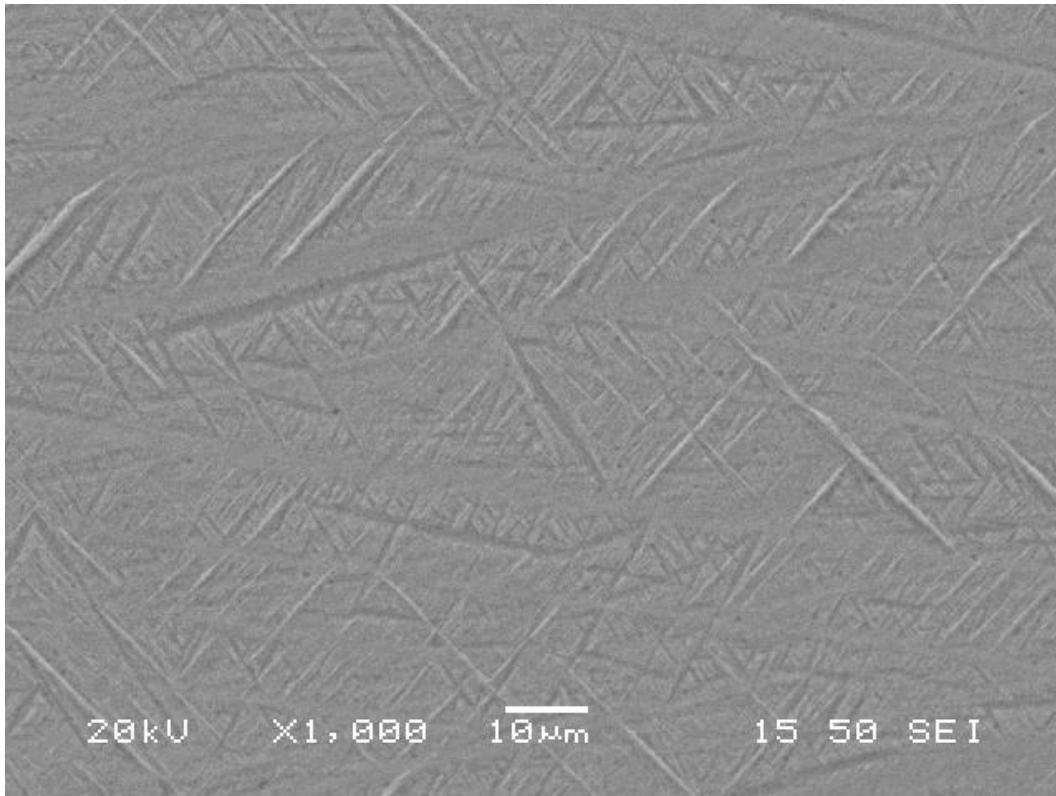
Εικόνα 5-18: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x500.



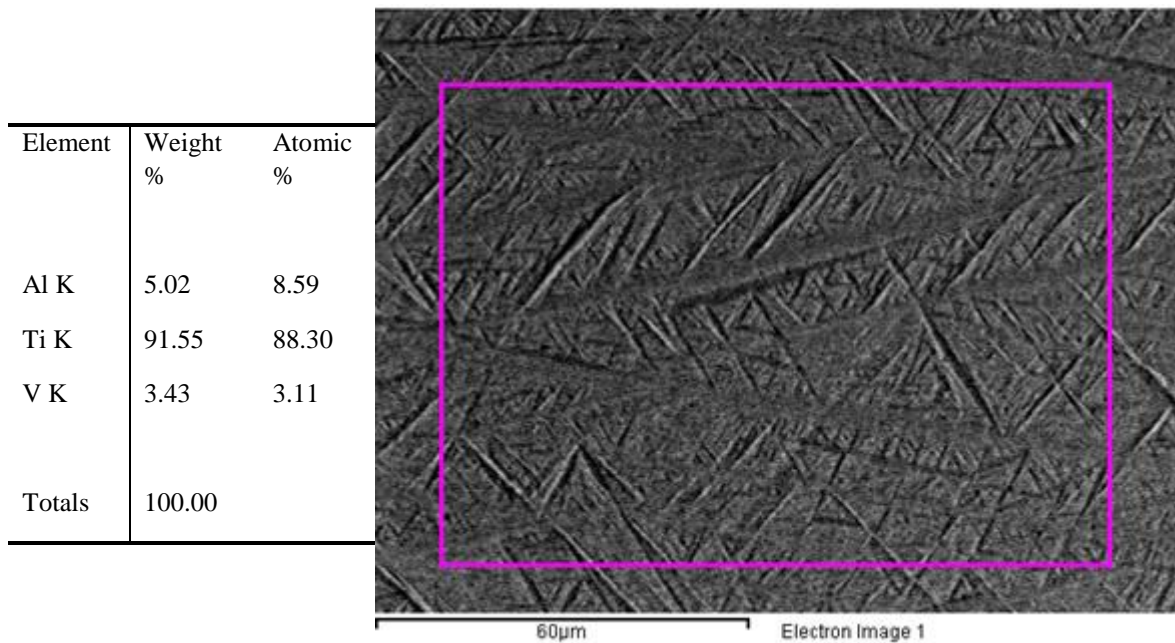
Εικόνα 5-19: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x500.



Εικόνα 5-20: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x1000.

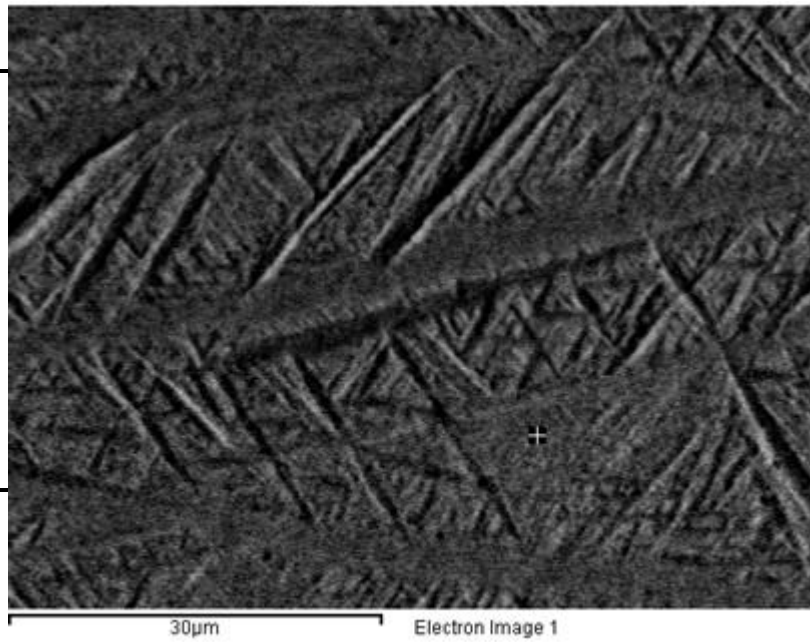


Εικόνα 5-21: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1050 °C με μεγέθυνση x1000.



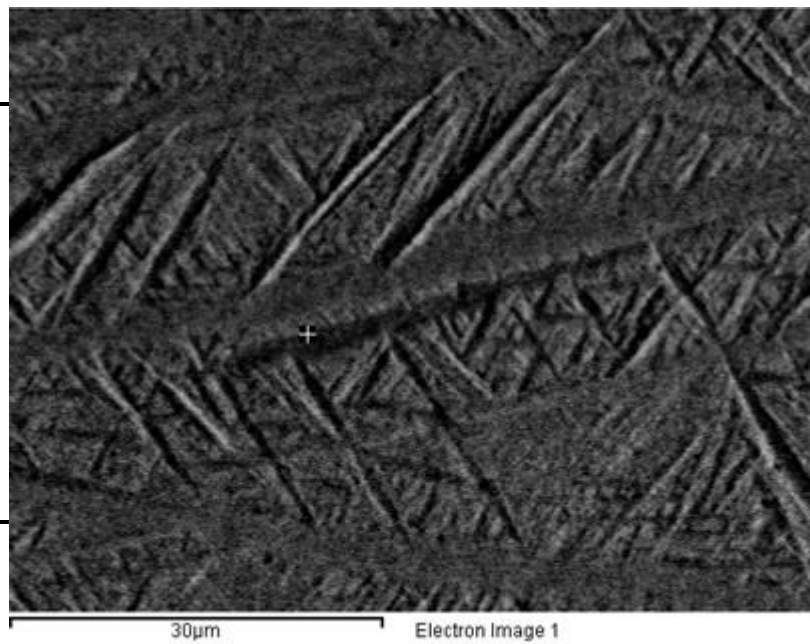
Πίνακας 5-7 & Εικόνα 5-22: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 1050 °C.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.98	8.54
Ti K	91.24	88.03
V K	3.78	3.43
Totals	100.00	



Πίνακας 5-8 & Εικόνα 5-23: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1050 °C.

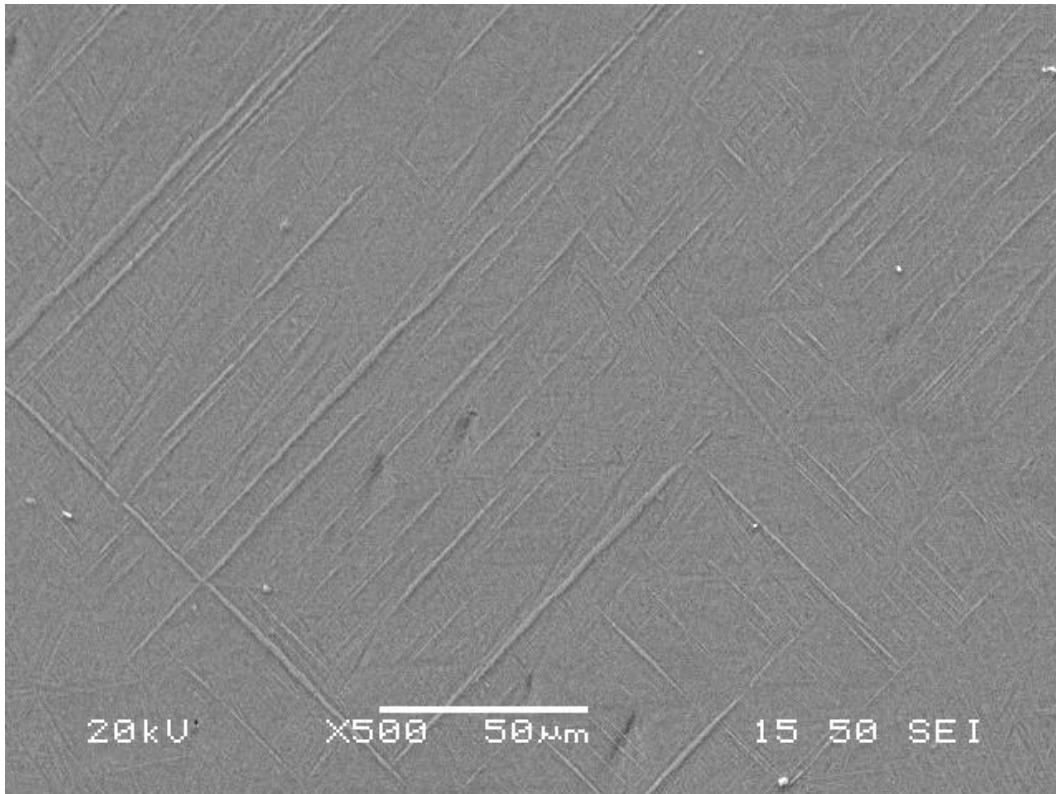
Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.70	8.06
Ti K	91.99	88.93
V K	3.32	3.02
Totals	100.00	



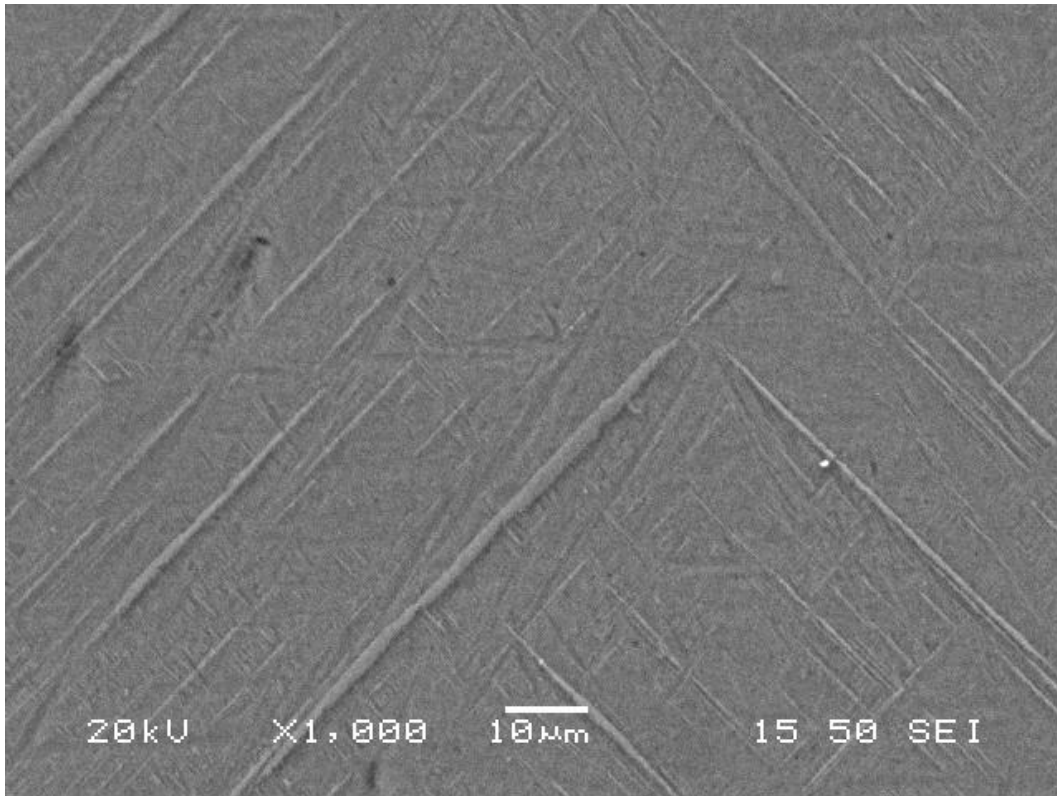
Πίνακας 5-9 & Εικόνα 5-24: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1050 °C.

5.1.2.3 Δοκίμιο που υποβλήθηκε στους 1150 °C– 30 λεπτά – Βαφή σε νερό.

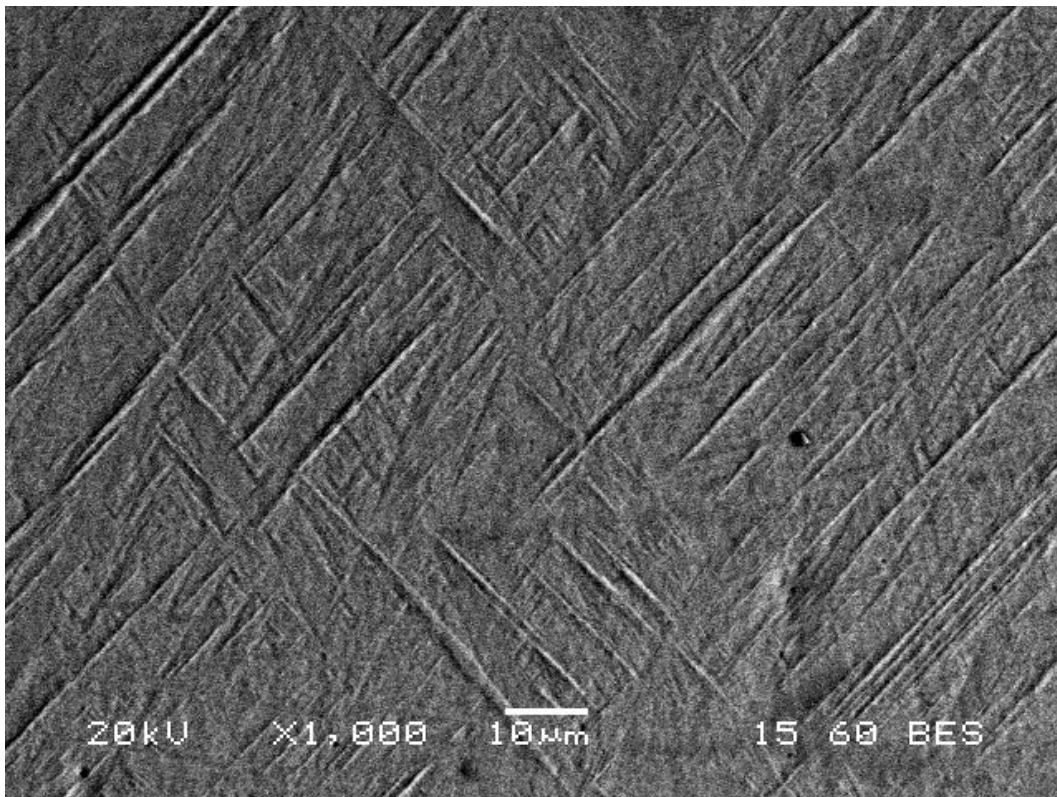
Σε σχέση με το δοκίμιο των 1050 °C, η κατάσταση δεν έχει μετατραπεί πολύ. Η β-φάση συνεχίζει να μετατρέπεται στην μαρτενσιτική α'-φάση, η βελονοειδής λεπτή μορφή συνεχίζει να είναι κυρίαρχη στη μήτρα του υλικού και το γράφημα του XRD(εικόνα 5-10) συνεχίζει να παρουσιάζει την διφασική μορφή του κράματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι βελονοειδείς κρύσταλλοι παρουσιάζονται ελαφρά πιο μακρόστενοι σε σχέση με τους βελονοειδείς κρυστάλλους του δοκιμίου των 1050 °C.



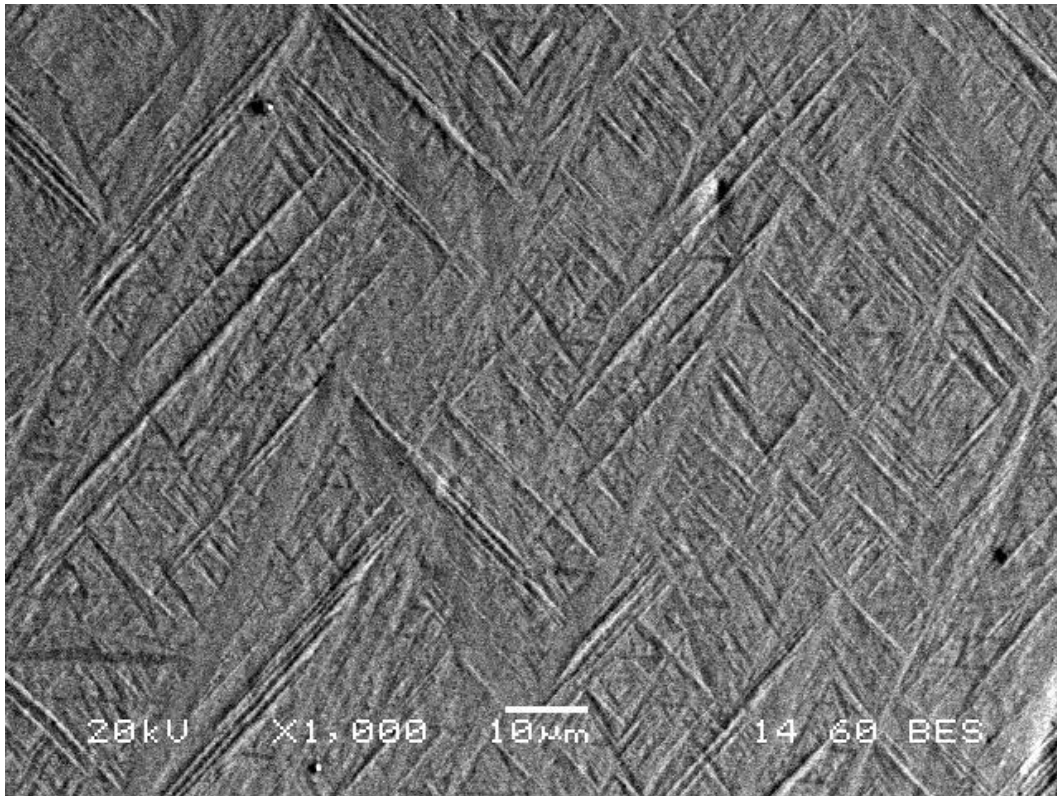
Εικόνα 5-25: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x500.



Εικόνα 5-26: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x1000.

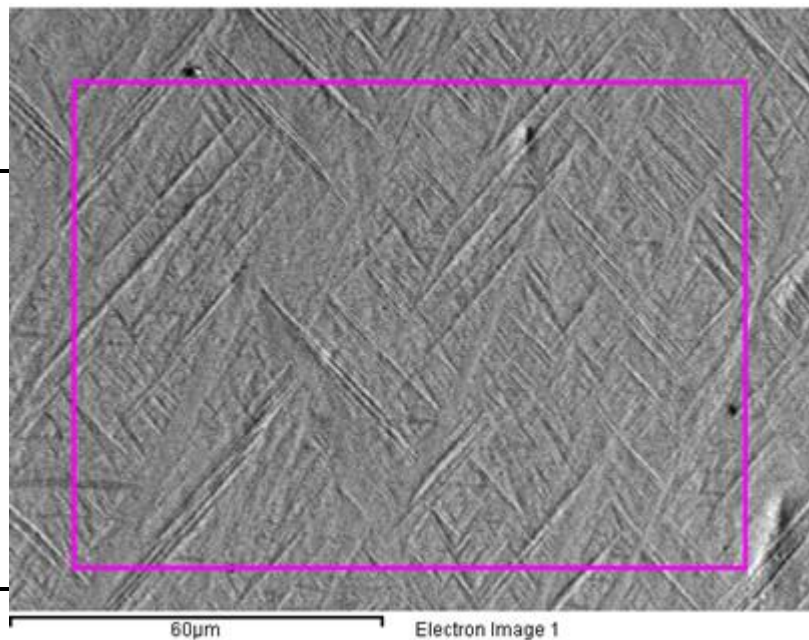


Εικόνα 5-27: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x1000.



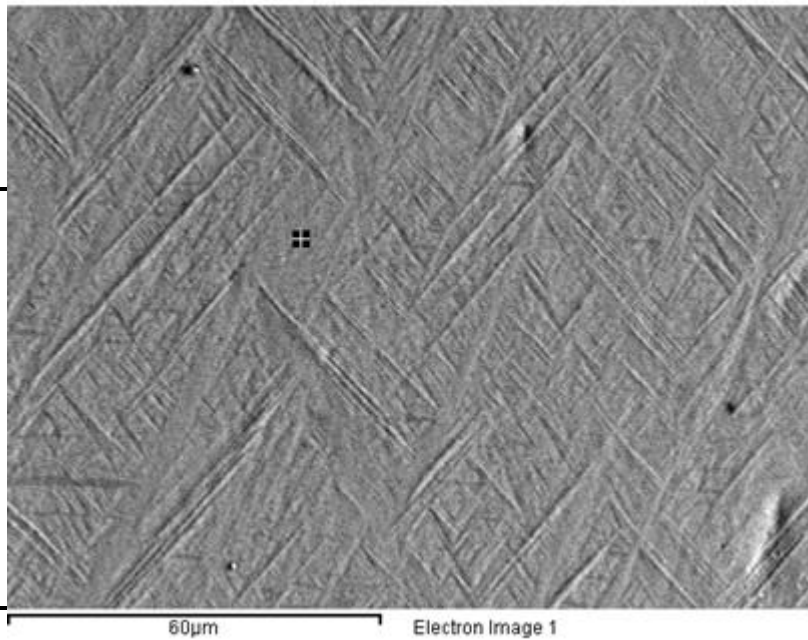
Εικόνα 5-28: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) της μικροδομής του δοκιμίου 1150 °C με μεγέθυνση x1000.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.08	7.04
Ti K	91.92	89.30
V K	4.01	3.66
Totals	100.00	



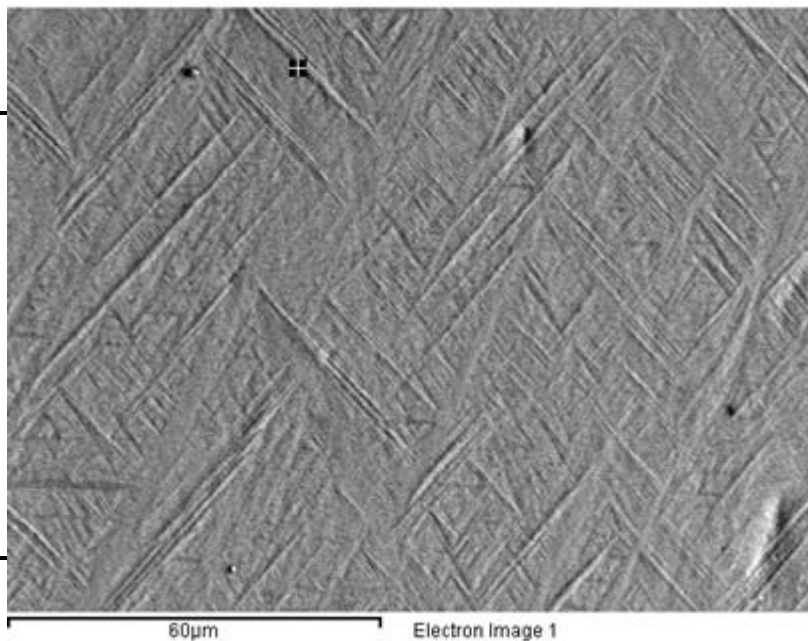
Πίνακας 5-10 & Εικόνα 5-29: Μικροανάλυση EDS στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 1150 °C.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.34	7.47
Ti K	91.55	88.78
V K	4.11	3.75
Totals	100.00	



Πίνακας 5-11 & Εικόνα 5-30: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1150 °C.

Element	Weight %	Atomic %
Al K	4.25	7.32
Ti K	91.69	88.97
V K	4.06	3.70
Totals	100.00	



Πίνακας 5-12 & Εικόνα 5-31: Σημειακή μικροανάλυση (EDS) στο πλέγμα του τιτανίου στο δοκίμιο 1150 °C.

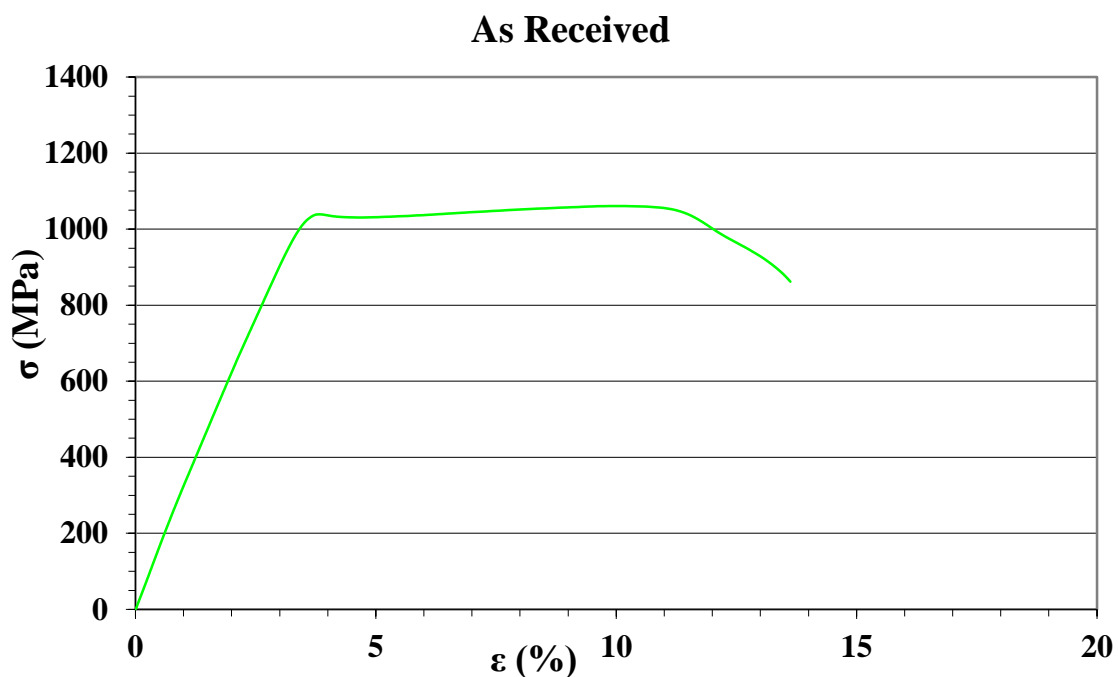
5.2 Μηχανικές Ιδιότητες

Για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος Ti-6Al-4V, δοκίμια του υλικού αυτού υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό. Ο στόχος της διαδικασίας αυτής είναι εύρεση των διαφορών που προκαλούν οι θερμικές κατεργασίες στο κράμα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και της μεθόδου αυτής.

5.2.1 Δοκιμή Εφελκυσμού

5.2.1.1 Δοκίμιο Αναφοράς (As Received)

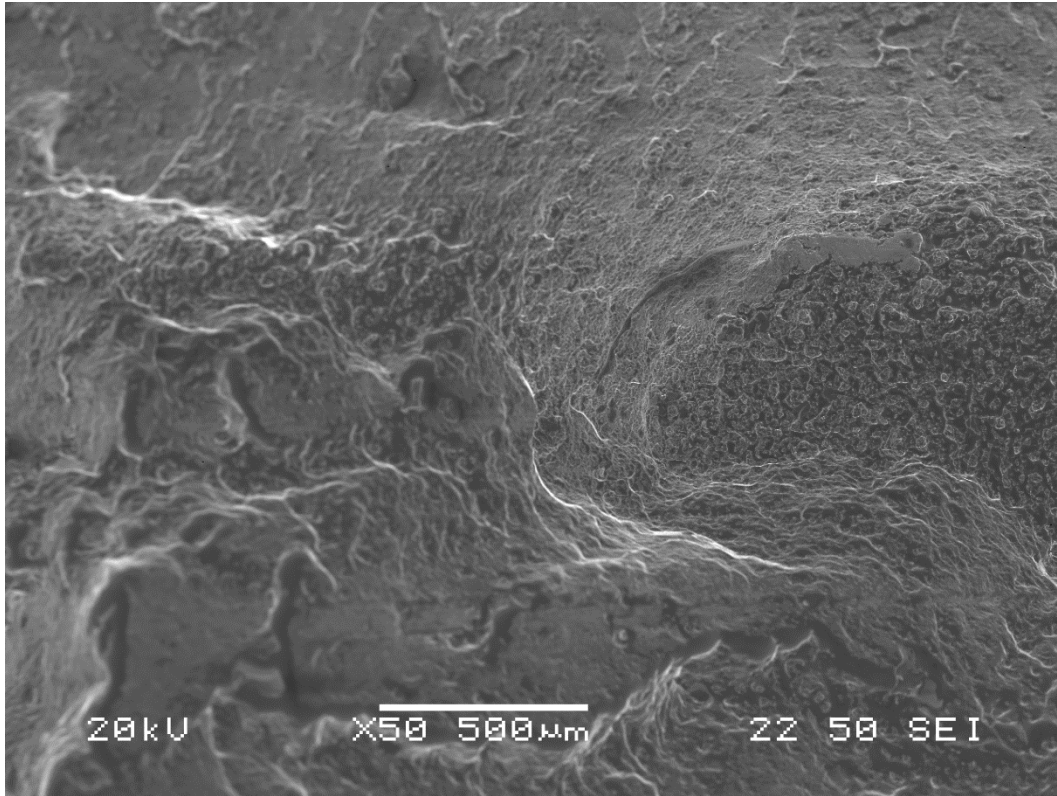
Η δοκιμή εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκε στο δοκίμιο αναφοράς είναι η παρακάτω.



Εικόνα 5-32: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου αναφοράς.

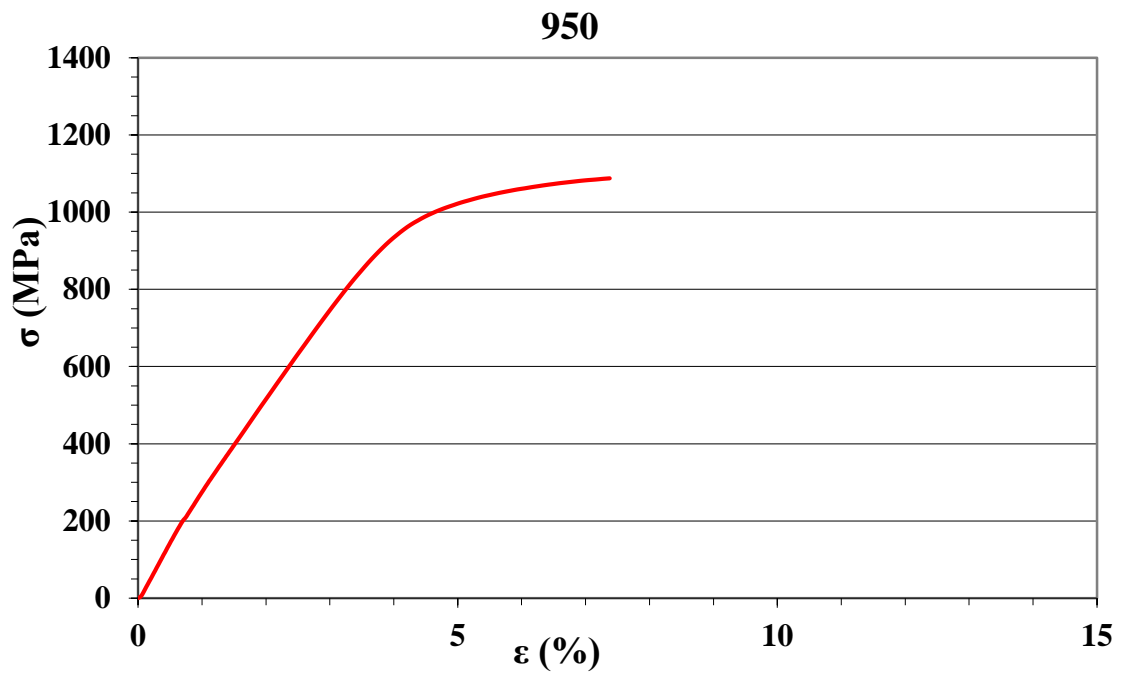
Από το διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα η ελαστική περιοχή, το όριο διαρροής, περίπου στα 1040 MPa, η πλαστική περιοχή, καθώς και το όριο θραύσης, που υπολογίζεται περίπου στα 1050 MPa. Η επιμήκυνση υπολογίζεται περίπου στο 13.5%.

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτική εικόνα μικρογραφίας της θραυστιγενούς επιφάνειας του δοκιμίου αναφοράς. Είναι δυνατόν να παρατηρηθούν στην παρακάτω εικόνα τα τυπικά λακκάκια/κοιλότητες(dimple rupture), οι οποίες δημιουργούνται σε μια όλκιμη θραύση.



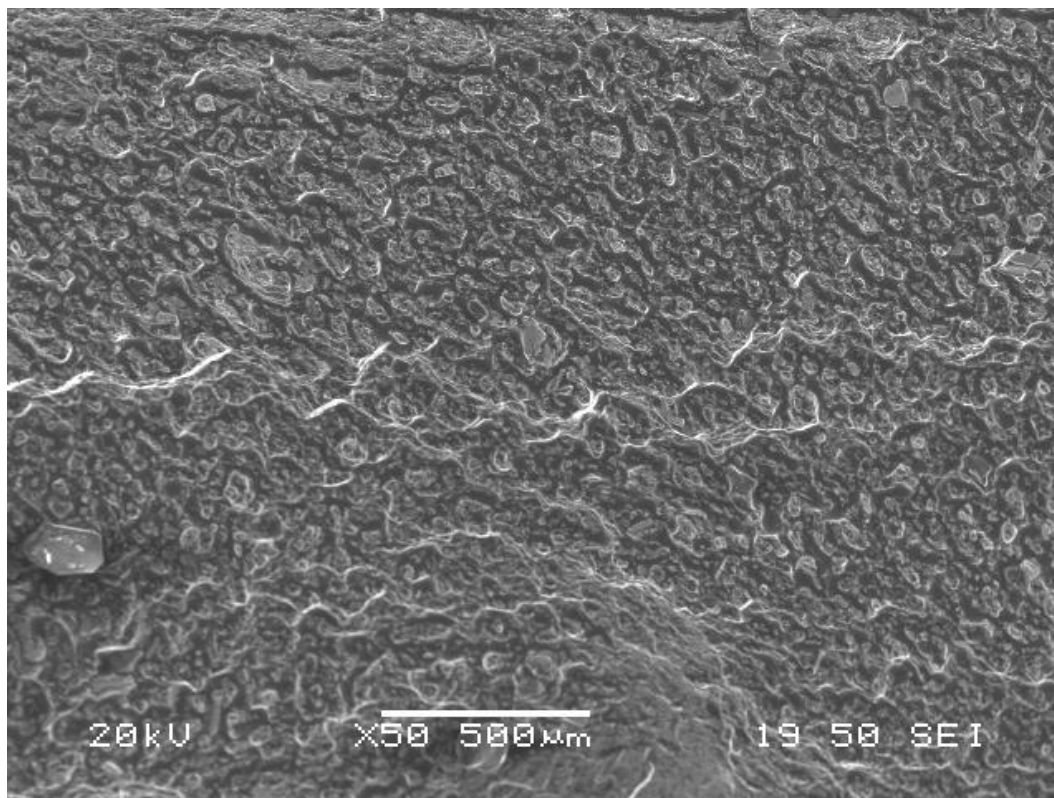
Εικόνα 5-33: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου αναφοράς AR.

5.2.1.2 Δοκίμιο 950 °C



Εικόνα 5-34: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 950 °C.

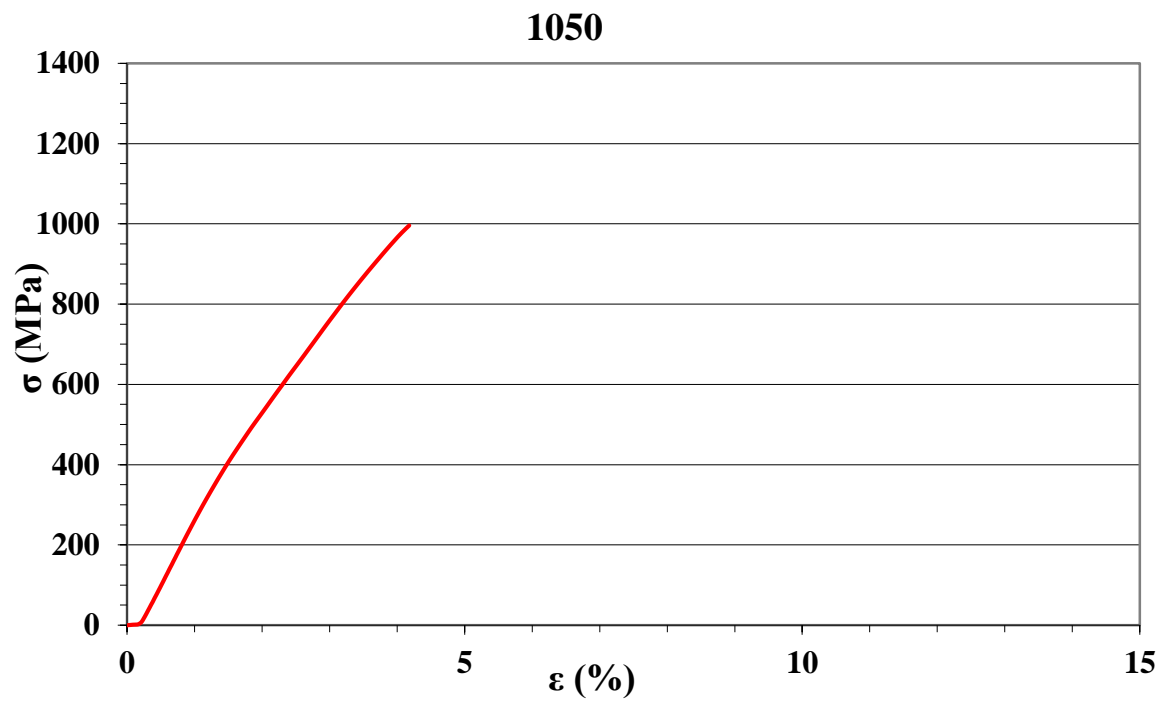
Στο δοκίμιο των 950 °C, που υπέστη εφελκυσμό, παρατηρείται από το διάγραμμα μια συνολική επιμήκυνση της τάξεως του 7%. Το όριο διαρροής υπολογίζεται περίπου στα 960 MPa και το όριο θραύσης στα 1090 MPa.



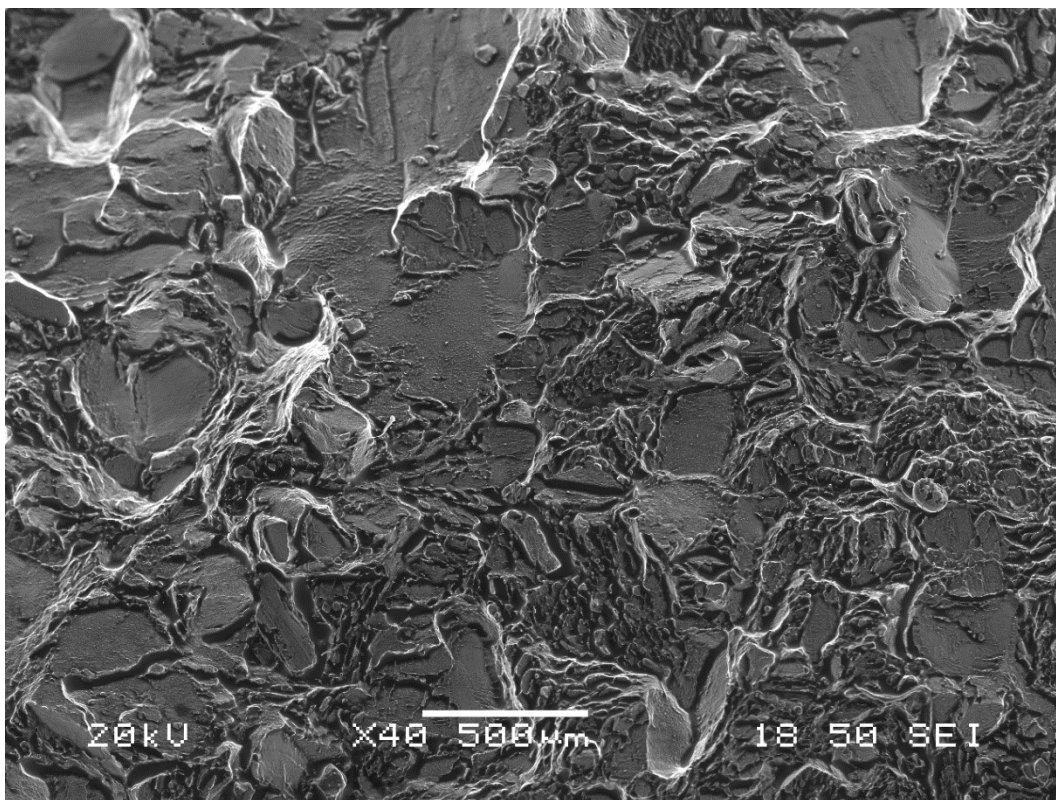
Εικόνα 5-35: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου 950 °C.

Από την εικόνα θραυστογραφίας 5-35, μπορεί να παρατηρηθεί στο δοκίμιο των 950 °C η ύπαρξη των μικρό-κοιλοτήτων εξαιτίας όλκιμης θραύσης, καθώς επίσης μάλλον και κάποια σημεία που φαίνεται να έχουν θραυτεί υπό μορφή σχισμών(cleavage).

5.2.1.3 Δοκίμιο 1050 °C



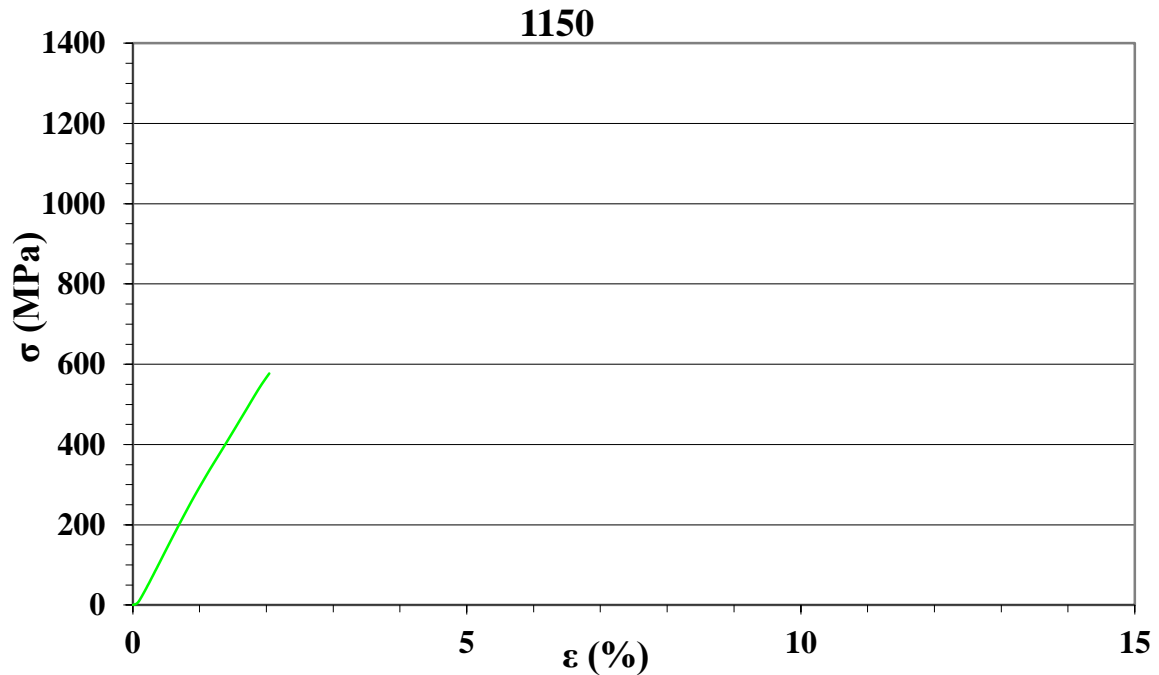
Εικόνα 5-36: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1050 °C.



Εικόνα 5-37: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου 1050 °C.

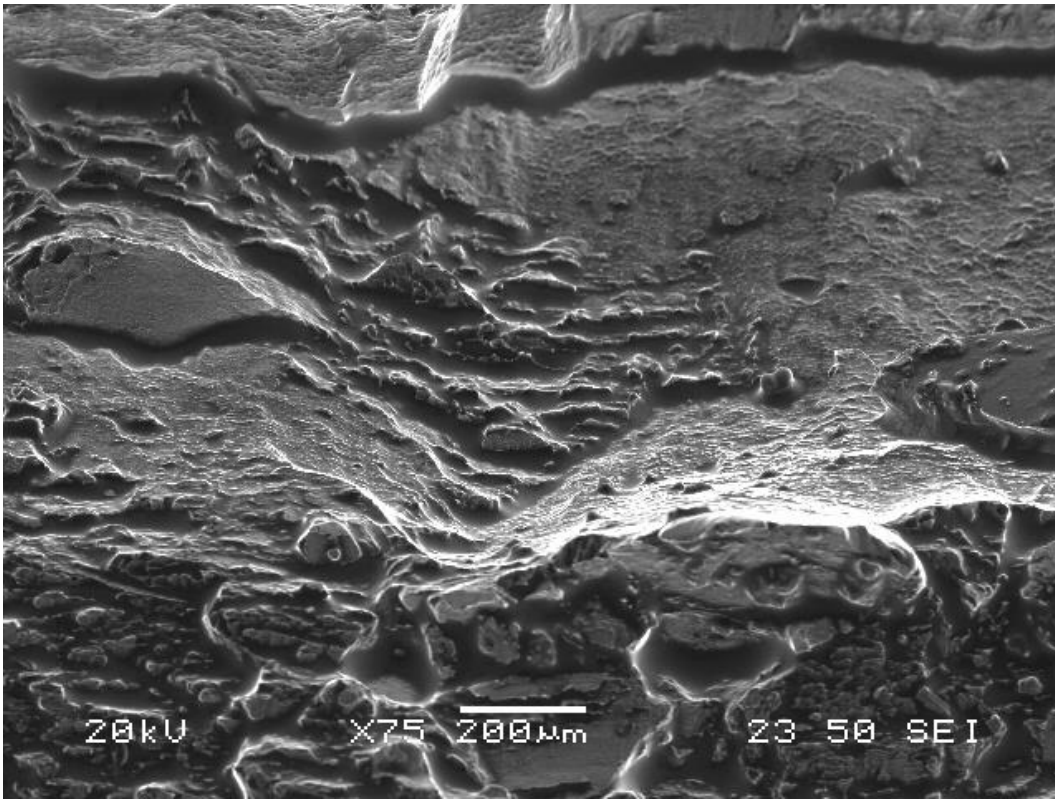
Από το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στο δοκίμιο των 1050 °C φαίνεται η επιμήκυνση να είναι περίπου στο 4%. Το όριο θραύσης υπολογίζεται στα 995 MPa και σχεδόν μηδαμινή ολκιμότητα. Στην εικόνα 5-37 είναι εμφανές το φαινόμενο ψαθυρής θραύσης, καθώς οι κόκκοι που έχουν υποστεί θραύση παρουσιάζονται υπό μορφή σχισμών.

5.2.1.4 Δοκίμιο 1150 °C



Εικόνα 5-38: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1150 °C.

Το δοκίμιο που υπέστη βαφή στους 1150 °C, παρουσιάζει επιμήκυνση της τάξεως του 2%, όριο θραύσης 580 MPa και μηδαμινή ολκιμότητα, όπως και το δοκίμιο των 1050 °C. Η παρακάτω εικόνα θραυστογραφίας 5-39, παρουσιάζει όμοια, αλλά και δριμύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την εικόνα 5-37, με κόκκους που παρουσιάζονται υπό μορφή σχισμών.



Εικόνα 5-39: Ενδεικτική εικόνα θραυστογραφίας από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης του δοκιμίου 1150 °C.

6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το υλικό πάνω στο οποίο βασίζεται η παρούσα εργασία, υπέστη διάφορες κατεργασίες προκειμένου να εξεταστούν οι μηχανικές ιδιότητες του με εφελκυσμό, ύστερα από θερμοκρασιακές επεξεργασίες. Η διαδικασία κοπής, καθώς και η εξέταση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, αποτελούν ένα από τα αρκετά στάδια προετοιμασίας και εξέτασης του υλικού. Κάθε αποτέλεσμα που λήφθηκε και αναφέρθηκε συμβάλλει όλο και περισσότερο στην κατανόηση των γεγονότων που πήραν μέρος όχι μόνο στην μικροδομή του υλικού, αλλά επίσης και κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής διαδικασίας.

Σημαντικό ρόλο επίσης έχει η γνώση και κατανόηση της δομής των δοκιμίων του τιτανιούχου κράματος Ti-6Al-4V. Αυτή χαρακτηρίζεται κυρίως από δύο βασικές φάσεις, την β-φάση και την α-φάση. Η β-φάση και α-φάση συνυπάρχουν ταυτόχρονα κατά κύριο λόγο στο συγκεκριμένο κράμα και επομένως το καθιστούν ως ένα διφασικό α+β κράμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη στο πλέγμα του τιτανίου, κραματικών προσθηκών αλουμινίου και βαναδίου, όπου το πρώτο λειτουργεί ως α-σταθεροποιητής και το δεύτερο ως β-σταθεροποιητής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός κράματος που σε θερμοκρασίες κάτω της αλλοτροπικής θερμοκρασίας, μπορούν αυτές οι δύο φάσεις να συνυπάρχουν ταυτόχρονα στο πλέγμα του τιτανίου. Εξίσου μπορεί να εμφανιστεί η εξαγωνική μαρτενσιτική α'-φάση στο κράμα εξαιτίας γρήγορης ψύξης του κράματος, που πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της αλλοτροπικής θερμοκρασίας. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται έντονα στα δοκίμια που υπέστησαν βαφή από υψηλές θερμοκρασίες, όπως τα δοκίμια των 1050 °C και των 1150 °C και ως έναν βαθμό στα δοκίμια των 950 °C.

6.1 Αποτελέσματα περίθλασης ακτίνων X

Ο ρόλος της περιθλασιμετρίας ακτίνων X είναι αρκετά σημαντικός, καθώς επιτρέπει την ταυτοποίηση των φάσεων, οι οποίες υπάρχουν μέσα στα δοκίμια τα οποία εξετάστηκαν. Όλα τα δοκίμια τα οποία εξεταστήκαν, είτε τα αναφοράς είτε αυτά που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία, παρουσίασαν όμοια αποτελέσματα ως προς τις φάσεις που εμφανίζονται σε αυτά. Οι δύο κύριες φάσεις που παρατηρούνται είναι οι αναμενόμενες άλφα εξαγωνική φάση, καθώς και η βήτα κυβική φάση. Γεγονός είναι ότι ενώ παρουσιάζονται όμοιες φάσεις σε κάθε δοκίμιο, παρατηρείται μια διακύμανση στην ένταση των κορυφών, αναλόγως βέβαια με την εκάστοτε θερμική επεξεργασία που έχει υποβληθεί αυτό. Λόγω ότι στα

θερμικά επηρεασμένα δοκίμια οι κορυφές έχουν μικρή ένταση είναι δυνατόν να ειπωθεί ότι θα παρουσιάζουν και λεπτούς κρυστάλλους, πράγμα που ήταν αναμενόμενο. Επιπλέον, το δοκίμιο αναφοράς παρουσιάζει έναν μεγαλύτερο αριθμό κορυφών, ασχέτως της εντάσεως των κορυφών, σε σχέση με τα δοκίμια που είχαν υποστεί θερμική επεξεργασία. Όμως οι λιγότερες κορυφές που παρατηρούνται στα θερμικά επεξεργασμένα δοκίμια είναι παρόμοιας θέσης, αν όχι έντασης, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Με τις πληροφορίες που δίνονται μόνο από το XRD δεν είναι δυνατόν να ξεχωριστεί η εξαγωνική α -φάση από την εξαγωνική α' -φάση στο συγκεκριμένο υλικό, εφόσον ο μετασχηματισμός της α' -φάσης δεν οδηγεί σε αλλαγή της σύστασης στο υλικό, για τον λόγο αυτό η περίθλαση ακτίνων X πρέπει να χρησιμοποιηθεί παράλληλα και με άλλες μεθόδους για την εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων.

6.2 Αποτελέσματα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM)

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) αποτέλεσε βασική μέθοδος προς την ανάλυση και σύγκριση των δοκιμίων του κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V. Σε όλα τα δοκίμια πάρθηκαν οι κατάλληλες μικρογραφίες προκειμένου να γίνει πλήρης αναγνώριση όλων των φάσεων που βρίσκονται σε αυτά. Τα όρια των φάσεων στα δοκίμια αναφοράς καθώς και στο δοκίμιο που είχε υποστεί βαφή στους 950 °C είναι αρκετά ευδιάκριτα, με σχετικά εύκολο διαχωρισμό των φάσεων τους. Στις μικροδομές των δοκιμίων που βάφτηκαν στους 1050 °C και 1150 °C παρατηρείται πολύ έντονα η καλαθό-υφαντή (basket-weave) λεπτή βελονοειδής μικροδομή που διασκορπίζεται στο πλέγμα του κράματος, αίτιο της α' -φάσης. Στα δοκίμια αναφοράς επίσης φαίνεται η μικρή λεπτή “ραφή” που έχει δημιουργηθεί από την β -φάση, γύρω από τους κόκκους της α -φάσης. Είναι αρκετά διακριτή και η θερμή έλαση που έχει υποστεί το υλικό από την μορφολογία των κόκκων. Στο δοκίμιο των 950 °C παρατηρείται έντονα ο λεπτοκρυσταλλικός σχηματισμός που οφείλεται στην γρήγορη βαφή του δοκιμίου. Η γρήγορη όμως αυτή βαφή είχε ως σημαντικό αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρής ποσότητας της μαρτενσιτικής α' -φάσης στο δοκίμιο, εφόσον μπορούν να παρατηρηθούν μικροί βελονοειδή κόκκοι στην μήτρα του υλικού. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η βαφή του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία εκκίνησης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, αλλά κάτω της αλλοτροπικής θερμοκρασίας του κράματος, με αποτέλεσμα τον μετασχηματισμό ορισμένης ποσότητας της β -φάσης σε μαρτενσιτική α' -φάση. Επομένως το δοκίμιο των 950 °C εμφανίζει στη μικροδομή του

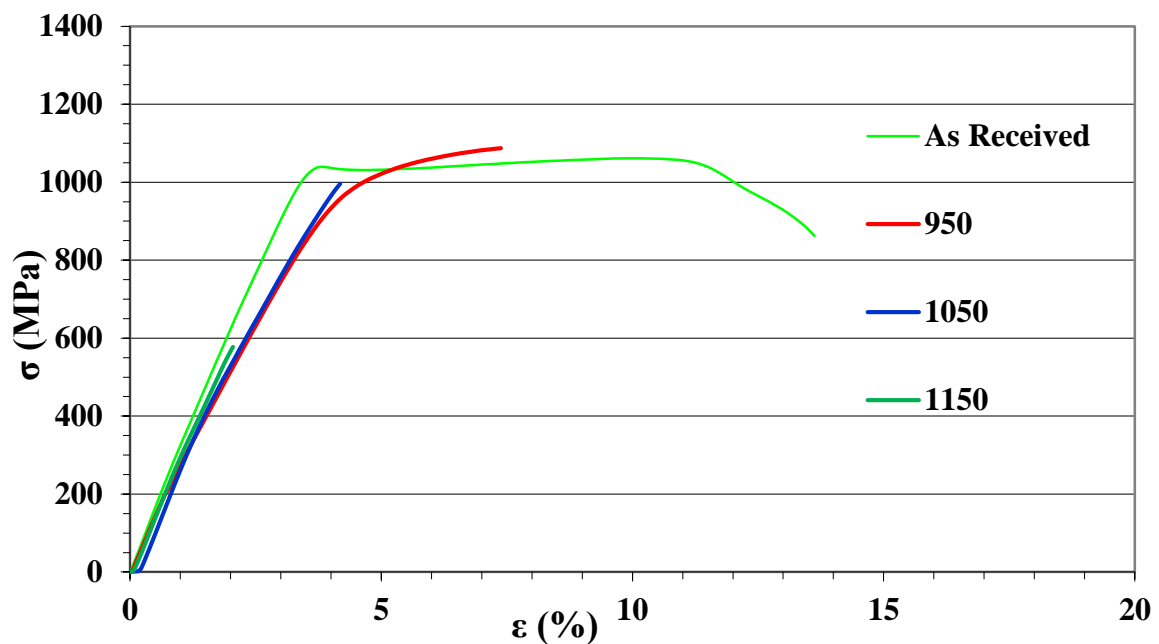
μητρική α και β -φάση και μετασχηματισμένη μαρτενσιτική α' -φάση(Εικόνα 5-14). Σε αντίθεση με το δοκίμιο των 950 °C, τα αλλά δύο δοκίμια, στα οποία πραγματοποιήθηκε βαφή από υψηλότερη θερμοκρασία, δεν παρουσιάζουν στην μικροδομή τους απλά σημειακά σημεία με βελονοειδής λεπτούς κόκκους, αλλά η μαρτενσιτική α' -φάση είναι αισθητή σε μεγάλο βαθμό στη μήτρα του υλικού, εξαιτίας για άλλη μια φορά του γρήγορου ρυθμού βαφής που υπέστησαν. Στους 1050 °C και 1150 °C, η $\alpha+\beta$ φάση που είχε αρχικά το υλικό, έχει μετασχηματιστεί πλήρως στην β -φάση και πλέον, εάν το δοκίμιο υποστεί ταχεία ψύξη, όπως και έγινε και στα δύο αυτά δοκίμια, καθώς η ψύξη αυτή ξεκινάει πάνω από την θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού και πάνω από την θερμοκρασία μαρτενσιτικής εκκίνησης, προκαλεί τον μετασχηματισμό της β -φάσης στην μαρτενσιτική α' -φάση. Τα δοκίμια αυτά παρουσιάζουν εν τέλει στην μικροδομή τους μετασχηματισμένη $\alpha+\beta$ φάση με μεγάλη ποσότητα μαρτενσιτικής α' -φάσης. Η διαφορά θερμοκρασίας των 100 °C σε αυτά τα δύο δοκίμια αποτελεί και τον λόγο που οι μαρτενσιτικές βελόνες που παρατηρούνται είναι λίγο μεγαλύτερες και λίγο περισσότερες σε αριθμό. Προφανώς η μορφολογία της α' -φάσης δεν είναι καθόλου όμοια με αυτήν της $\alpha+\beta$ φάσης, καθώς ο μη-διαχυσιακός(στρατιωτικός) μετασχηματισμός της, προκαλεί αλλαγή σχήματος από την ομογενή παραμόρφωση, όμως μπορεί να παρατηρηθεί μια δεδομένη σχέση προσανατολισμού μεταξύ αυτής της φάσης όπως της β -φάσης προς την α -φάση(Εικόνα 5-19 & 5-28).

Από τις εικόνες με οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια φαίνεται η διαφορά των κόκκων που περιέχουν μεγάλο ποσοστό βαναδίου, καθώς είναι οι κόκκοι υψηλότερης αντίθεσης, από αυτούς που περιέχουν κυρίως μεγάλο ποσοστό αλουμινίου, που είναι χαμηλότερης αντίθεσης. Επίσης οι βελονοειδείς λεπτοί κόκκοι φαίνονται και αυτοί να έχουν υψηλότερη αντίθεση και με την βοήθεια της τεχνικής του EDS παρατηρείται και αυξημένη ποσότητα βαναδίου σε αυτούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μαρτενσιτική α' -φάση είναι υπερκορεσμένη σε βανάδιο. Γενικά η τεχνική του EDS χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτική ανάλυση χημικών στοιχείων στο υλικό. Τα στοιχεία που αναγνωρίστηκαν είναι το τιτάνιο (Ti), το αλουμίνιο (Al) και το βανάδιο (V). Άλλα στοιχεία κάτω του 1% κ.β. δεν αναγνωρίζονται με την τεχνική αυτή. Σε τοπικές μικροαναλύσεις, σε κόκκους των δοκιμίων υπήρχε αυξημένη ποσότητα σε αλουμίνιο και μικρή σε βανάδιο ή λίγη μικρότερη ποσότητα σε αλουμίνιο απ' ότι συνήθως και αυξημένη αρκετά σε βανάδιο. Με τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) μπορούν να αναγνωριστούν όλες οι φάσεις

που έχουν αναπτυχθεί επαρκώς στη μικροδομή των δοκιμίων του τιτανιούχου κράματος Ti-6Al-4V.

6.3 Αποτελέσματα Εφελκυσμών

Για να χαρακτηριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων του κράματος Ti-6Al-4V, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυσμούς, προκειμένου να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για αυτά.



Εικόνα 6-1: Συγκριτικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης όλων των δοκιμίων.

Το δοκίμιο αναφοράς παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού με όριο διαρροής στα 1040 MPa και όριο θραύσης στα 1050 MPa. Πρέπει επίσης να αναφερθεί η συνολική επιμήκυνση του στο 13.5%. Τα δοκίμια των 950 °C ενώ φαίνεται να έχουν σχετικά όμοια επιμήκυνση στην ελαστική περιοχή με το δοκίμιο αναφοράς, με λίγο μικρότερο όριο διαρροής, περίπου στα 960 MPa, η πλαστική τους περιοχή είναι αισθητά πολύ μικρότερη, με το όριο θραύσης να υπολογίζεται περίπου στα 1090 MPa. Παρατηρείται βέβαια μια μικρή αύξηση στο όριο θραύσης των δοκιμίων των 950 °C σε σχέση με αυτό του δοκιμίου αναφοράς. Η διαφορά αυτή των μηχανικών ιδιοτήτων οφείλεται στις μικροδομές των δοκιμίων, καθώς στα δοκίμια των 950 °C η παρουσία μικρής ποσότητας μαρτενσιτικής α' -φάσης και η απουσία ανόπτησης και θερμής έλασης να μεν

προσδίδει αυξημένη αντοχή αλλά αντίστοιχα θυσιάζεται αισθητά η ολκιμότητα του μετάλλου. Εν συνεχεία, παρατηρείται ότι τα δοκίμια των 1050 °C είναι ιδιαίτερα ψαθυρά κατά την διαδικασία του εφελκυσμού. Ενώ παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή, δεν παρουσιάζουν καθόλου ολκιμότητα και ως εκ τούτου μικρή επιμήκυνση. Γενικώς, το φαινόμενο αυτό δεν είναι παράξενο με την παρουσία της α'-φάσης στο κράμα σε τόσο μεγάλο βαθμό. Ναι μεν του προσδίδει αυξημένη αντοχή, από την άλλη όμως του αφαιρεί σχεδόν όλη την ολκιμότητα. Βέβαια λόγω της ποσότητας της α'-φάσης, θα περιμέναμε το όριο θραύσης να είναι κάπως υψηλότερο από αυτά του δοκιμίου αναφοράς και των δοκιμίων των 950 °C.

Στα δοκίμια των 1150 °C παρατηρείται κατά πολύ πτώση της αντοχής, ενώ θα έπρεπε να ισχύει το αντίθετο, βέβαια πάλι με μεγάλη πτώση της ολκιμότητας. Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν για αυτό το δοκίμιο δεν είναι ιδιαίτερα ασφαλή, λόγω του μικρού αριθμού δοκιμίων, για τον λόγο αυτόν χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Από τη μελέτη του μητρικού υλικού, παρατηρούνται πολύ καλές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων, με πολύ καλή ολκιμότητα, υψηλό όριο διαρροής (1040 MPa) και θραύσης (1050 MPa) καθώς και πολύ ικανοποιητική επιμήκυνση (13.5%). Εξού και ο λόγος που είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο εμπορικό κράμα τιτανίου.
- Διερευνήθηκε η επίδραση των θερμικών κατεργασιών στη μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος Ti-6Al-4V, στις θερμοκρασίες των 950 °C, 1050 °C και 1150 °C με ίδιους χρόνους παραμονής και βαφής για κάθε δοκίμιο. Από αυτή τη μελέτη προέκυψε πως οι θερμοκρασίες αυτές, σε συνδυασμό με γρήγορο ρυθμό ψύξης, εμφανίζουν την λεπτοκρυσταλλική εξαγωνική μαρτενσιτική α'-φάση στη μικροδομή του κράματος από τον μετασχηματισμό της β-φάσης. Το κλάσμα όγκου της α'-φάσης είναι ανάλογο της θερμοκρασίας από την οποία πραγματοποιήθηκε η βαφή, με όλο και μεγαλύτερη εμφάνιση της όσο αυξάνει η θερμοκρασία βαφής. Ενώ δεν δημιουργεί αλλαγές στη σύσταση του υλικού και στον προσανατολισμό των κόκκων, παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία στο πλέγμα του μετάλλου. Διακρίνεται σημειακά η ύπαρξη της α'-φάσης στη μήτρα των δοκιμίων που η βαφή τους έγινε από τους 950 °C, ενώ αντιθέτως στα δοκίμια που η βαφή πραγματοποιήθηκε από τους 1050 °C και 1150 °C παρουσιάζουν κατά κόρον την α'-φάση με τη συνηθισμένη καλαθό-υφαντή (basket-weave) δομή και βελονοειδή χαρακτήρα.
- Ο εφελκυσμός των δοκιμίων με τις αντίστοιχες θερμικές κατεργασίες παρουσιάζει μια ικανοποιητική εικόνα των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Τα δοκίμια των 1050 °C και 1150 °C χαρακτηρίζονται ως τελείως ψαθυρά με πολύ χαμηλές τιμές επιμήκυνσης, 4% και 2%, ορίων θραύσης, 995 MPa και 580 MPa, και απουσία ολκιμότητας. Τα δοκίμια των 950 °C παρουσιάζουν μια μέτρια επιμήκυνση της τάξεως του 7%, μικρότερο όριο διαρροής από το μητρικό υλικό και περιορισμένη ολκιμότητα, με μόνη διαφορά την κατοχή του μεγαλύτερου ορίου θραύσης από όλα τα δοκίμια στα 1090 MPa.
- Τα δοκίμια, εν τέλει, που έχουν υποστεί θερμοκρασιακή κατεργασία στους 1050 °C και 1150 °C και μετά υποβλήθηκαν σε ταχεία βαφή σε νερό, λόγω της ψαθυρότητας τους, παρουσιάζουν σχεδόν μηδαμινά πλεονεκτήματα, σε σχέση με το αρχικό υλικό και τα δοκίμια των 950 °C.

8 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

- ❖ Επιλογή διαφορετικών θερμοκρασιών, χρόνων παραμονής και τρόπων βαφής για εκτενέστερη μελέτη του υλικού.
- ❖ Πραγματοποίηση διαφορετικών θερμοκρασιακών κατεργασιών, όπως ανόπτηση και γήρανση, και στα ήδη υπάρχοντα δοκίμια και σε μεταγενέστερα για εξέταση της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων τους.
- ❖ Πραγματοποίηση διαφορετικών μηχανικών κατεργασιών, όπως ψυχρής και θερμής έλασης σε όλα τα δοκίμια.
- ❖ Πραγματοποίηση της μεθόδου σκληρομέτρησης, για τον προσδιορισμό της σκληρότητας των δοκιμίων.
- ❖ Χρήση διαφορετικών μεθόδων για τη μελέτη της μικροδομής, όπως το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM) για την πλήρη διάκριση μεταξύ των φάσεων του υλικού, αλλά και την κατανόηση των μετασχηματισμών του. Επίσης χρήση της τεχνικής του EBSD στην ανάλυση των δοκιμίων θα βοηθούσε στην καλύτερη χαρτογράφηση των διαφόρων φάσεων.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. C. Leyens and M. Peters. Titanium and Titanium Alloys, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003
2. Vydehi Arun Joshi, TITANIUM ALLOYS An Atlas of Structures and Fracture Feature, Taylor & Francis Group, LLC, 2006
3. Gerd Lutjering James C. Williams , Titanium , Springer 2nd edition , 2002
4. Materials Science & Metallurgy Part II Course C9, Alloys, by H. K. D. H. Bhadeshia, Its Alloys
5. An introduction to materials engineering and science: for chemical and materials engineers by Brian S. Mitchell, 2004
6. Metallurgy Fundamentals – Ferrous and Nonferrous – D.A.Brandt and J.C.Warner, 2005
7. Αντωνακάκη Βαΐα: “Κραματικές επικαλύψεις σε χαλκό”, Αθήνα 2010
8. Σταύρος Δεληγιάννης: “Σχέση μικροδομής και πλαστικής εν ψυχρώ παραμόρφωσης σε χονδρόσυρμα χάλυβα”, Αθήνα 2013
9. Γιαννακόπουλος Δ. Ιωάννης: “Κατασκευή κεφαλών εμφυτευμάτων μηριαίου οστού από κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V και αριθμητική προσομοίωση της κατεργασίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ”, Αθήνα 2010
10. Corinne Charles: Modelling microstructure evolution of weld deposited Ti-6Al-4V, Sweden 2008
11. Γ. Δ. Παπαδημητρίου: “ Γενική Μεταλλογνωσία 1”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π
12. Γ. Δ. Παπαδημητρίου: “ Μεταλλογνωσία 2 Τα Κράματα”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π
13. Γ. Φούρλαρης: “ Μετασχηματισμοί Φάσεων”, Αθήνα 2011
14. Ηλεκτρονική Διεύθυνση: www.aerospacemetals.com
15. Ηλεκτρονική Διεύθυνση: www.atimetals.com
16. Ηλεκτρονική Διεύθυνση: www.offshore-europe.co.uk
17. Ηλεκτρονική Διεύθυνση: www.carttech.com

18. Ηλεκτρονική Διεύθυνση: www.rsc.org

19. Ηλεκτρονική Διεύθυνση: www.lanl.gov