

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ



Παρίσης Αντώνιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος

Αθήνα, 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κατά τη μελέτη όλων των υλικών, σημαντικό ρόλο παίζει και η μελέτη της κατεργασιμότητάς τους, δηλαδή της ικανότητάς τους να μορφοποιούνται και να μετασχηματίζονται από την αρχική ακατέργαστη μορφή τους σε επιθυμητές μορφές. Η μελέτη αυτή σχετίζεται με πολλούς παράγοντες. Έτσι, κατά την εξέταση της κατεργασιμότητας ενός υλικού, είναι επιθυμητό να ευρεθούν όλοι οι μηχανισμοί που σχετίζονται με την κατεργασία αλλά και όλα τα μεγέθη τα οποία αποτελούν αντικείμενο εξέτασης, όπως είναι οι δυνάμεις κοπής και οι αναπτυσσόμενες τάσεις. Επιπλέον όμως, σημασία έχει να ευρεθούν και οι ιδανικές συνθήκες κοπής, προκειμένου να μπορεί να γίνει η όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση της κατεργασιμότητας του υλικού.

Το τιτάνιο είναι ένα πολύ σημαντικό υλικό, το οποίο χαρακτηρίζεται από πολύ σημαντικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Το τιτάνιο και η κατεργασιμότητα του είναι το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

Ο στόχος της εργασίας είναι να μελετηθεί η κατεργασιμότητα του τιτανίου σε σχέση με τις ιδιότητες του υλικού και να ληφθεί μία γενική εικόνα των συνθηκών που σχετίζονται με την κατεργασία του. Επιπλέον, γίνεται μία προσπάθεια να αναλυθούν συγκεκριμένες μελέτες που έχουν γίνει επάνω σε κράματα τιτανίου και να εξαχθούν βασικά συμπεράσματα σε σχέση με τις ιδανικές συνθήκες κοπής του τιτανίου.

ABSTRACT

When it comes to study the variety of the materials, the study of their workability is an important parameter we have to take into account. This means that we have to study the ability of the materials to be molded and transformed into various forms. This study is related to many factors. Thus, when considering the workability of a material, it is desirable to find all the mechanisms associated with the treatment and also all the parameters that are under consideration, such as cutting forces and stresses. In addition, however, it is necessary to find the optimal cutting conditions in order to be able to make the best possible exploitation of the workability of the material.

Titanium is a very important material which is characterized by very important properties and is used in many industrial applications. Titanium and its machinability is the subject of the present work.

The aim of this thesis is to study the machinability of titanium with respect to the properties of the material and to obtain an overview of the conditions related to the its treatment. In addition, an attempt is made to analyze specific studies that have been done up in titanium alloys and draw basic conclusions with respect to the ideal cutting conditions of titanium.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	10
2.1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	10
2.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	12
2.3. ΤΟ ΤΙΤΑΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ.....	15
2.3.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	18
2.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	21
3. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	22
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	22
3.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	24
3.3. ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	24
3.3.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ.....	26
3.3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ.....	27
3.3.3. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ.....	28
3.3.4. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ.....	28
3.4. ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ.....	29
4. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	30
4.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	36
4.2. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	39
4.3. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ.....	42
4.4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΟΠΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ.....	47
4.5. ΥΓΡΟ ΚΟΠΗΣ.....	51
4.6. ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	53
4.7. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	56
5. ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ.....	58
5.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ Ti-Al-4V ΚΑΙ Ti555.3.....	58
5.1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΚΡΑΜΑΤΩΝ.....	59
5.1.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	62

5.1.3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	64
5.1.4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69
5.2.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	70
5.2.1.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	71
5.2.2.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	72
5.2.3.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
5.3.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ.....	80
5.3.1.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	81
5.3.2.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	83
5.3.3.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υλικό τιτάνιο είναι ένα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα υλικά σε πολλές εφαρμογές της βιομηχανίας. Είναι ένα υλικό με πολλά υποσχόμενες ιδιότητες και πολλά σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η υψηλή αντοχή του και η ικανοποιητική αντίσταση που παρουσιάζει σε διάβρωση. Αυτές οι ιδιότητές του το καθιστούν ένα από τα πιο χρήσιμα υλικά σε πολλές εξειδικευμένες εφαρμογές, κυρίως σε τομείς όπως η αεροπορική βιομηχανία, η βιοτεχνολογία κ.ά..

Κατά την επεξεργασία και τη μετέπειτα χρήση ενός οποιουδήποτε υλικού, έχει πολύ μεγάλη σημασία η πλήρης κατανόηση όλων των ιδιοτήτων του, δηλαδή των φυσικών, χημικών αλλά και μηχανικών ιδιοτήτων του. Η κατανόηση όλων των χαρακτηριστικών ενός υλικού δίνει τη δυνατότητα να επιλεγεί τόσο η κατάλληλη εφαρμογή του όσο και η κατάλληλη μέθοδος για τη μορφοποίηση του.

Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται, ένα υλικό υποβάλλεται σε συγκεκριμένη κατεργασία, προκειμένου να πάρει την επιθυμητή μορφή. Προκειμένου ένα υλικό να φτάσει στην επιθυμητή μορφή, πρέπει πρώτα να γίνει ένας έλεγχος της κατεργασιμότητάς του, της ικανότητάς του δηλαδή να υποστεί μηχανουργική επεξεργασία με τέτοιο τρόπο που να επιφέρει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά στο τελικό προϊόν και να μην υποβαθμίζει τις ιδιότητές του.

Η μελέτη της κατεργασιμότητας οποιουδήποτε υλικού σχετίζεται με την κατανόηση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, με τη μελέτη της μορφής του αποβλίττου που παράγεται σε κάθε περίπτωση αλλά και την εξέταση διαφόρων βασικών παραμέτρων της κοπής. Επιπλέον, η μελέτη της κατεργασιμότητας αφορά την εύρεση των κατάλληλων συνθηκών κάτω από τις οποίες θα πρέπει να γίνει η επεξεργασία του κάθε υλικού, προκειμένου να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Επομένως, κατά τη μελέτη αυτή πρέπει να ευρεθούν και οι κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας σε κάθε περίπτωση, όπως για παράδειγμα το κατάλληλο κοπτικό εργαλείο και το κατάλληλο υγρό κοπής.

Με τη μελέτη όλων αυτών των παραμέτρων είναι δυνατή η κατά το μέγιστο καλύτερη εκμετάλλευση της κατεργασιμότητας του κάθε υλικού, προκειμένου να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι ιδιότητές του.

Στη συγκεκριμένη εργασία, γίνεται μία προσπάθεια μελέτης της κατεργασιμότητας του τιτανίου. Το τιτάνιο γενικώς χαρακτηρίζεται από μικρή κατεργασιμότητα, λόγω

κάποιων εγγενών ιδιοτήτων του ίδιου του υλικού. Οι βασικότερες από αυτές είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του υλικού, η οποία επιφέρει την αύξηση της αποδιδόμενης θερμότητας και την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, καθώς και η υψηλή χημική δραστικότητα του υλικού, η οποία προκαλεί τη χημική αντίδρασή του με το εκάστοτε κοπτικό εργαλείο και τη συγκόλληση του υλικού του τεμαχίου επάνω στο εργαλείο.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του τιτανίου, η ιστορία του και οι βασικές ιδιότητές του. Χαρακτηριστικό είναι ότι το τιτάνιο συνήθως χρησιμοποιείται υπό τη μορφή κραμάτων, επομένως γίνεται μία προσπάθεια περιγραφής αυτής της ιδιότητάς του.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κατεργασιών και οι βασικοί συντελεστές της κοπής, προκειμένου να περιγραφούν βασικές έννοιες οι οποίες είναι χρήσιμες στη συνέχεια.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται διεξοδικά η κατεργασιμότητα του τιτανίου. Αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά του από άποψη κατεργασιμότητας και όλα τα συναφή στοιχεία που σχετίζονται με την κατεργασία του. Γίνεται μία σημαντική προσπάθεια να συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία που αφορούν την επεξεργασία του τιτανίου σύμφωνα με έρευνα που έχει γίνει.

Στο Κεφάλαιο 5 κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθούν μεμονωμένα σημαντικές εργασίες που έχουν γίνει επάνω στην κατεργασιμότητα του τιτανίου. Με βάση αυτές τις εργασίες είναι δυνατό τόσο να εξαχθούν διάφορα συμπεράσματα σε σχέση με την κατεργασία του τιτανίου, μέσω σύγκρισης διαφόρων περιπτώσεων που εξετάζονται πειραματικά, αλλά και να ευρεθούν τελικά και οι καταλληλότερες συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η κατεργασία του τιτανίου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία λοιπόν γίνεται μία προσπάθεια τόσο να εκτιμηθεί η κατεργασιμότητα του τιτανίου και να δικαιολογηθεί με βάση τις ιδιότητές του, όσο και να περιγραφούν σημαντικά χαρακτηριστικά του όσον αφορά την κατεργασία του, μέσω αναφοράς σε συγκεκριμένες πειραματικές δοκιμές που έχουν γίνει στις οποίες γίνεται σύγκριση διαφόρων υλικών μεταξύ τους αλλά και διαφόρων παραμέτρων κοπής. Πέρα όμως από τη μελέτη της κατεργασιμότητας του τιτανίου και τη σύγκριση διαφόρων παραμέτρων μεταξύ τους, γίνεται μία παράλληλη προσπάθεια να εξαχθούν βασικά συμπεράσματα για τη επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων προκειμένου να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε στο έπακρο τις ιδιότητες

και την κατεργασιμότητα του τιτανίου, παρά το γεγονός ότι αυτή δεν είναι αρκετά υψηλή.

2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Το τιτάνιο είναι ένα γυαλιστερό μέταλλο, με χρώμα άσπρο-αργυροειδές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Το υλικό τιτάνιο [1]

2.1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Το τιτάνιο πρωτοανακαλύφτηκε σαν κράμα το 1791 στην Κορνουάλλη από έναν άγγλο κληρικό, τον William Gregor. Η πραγματική αναγνώριση του οξειδίου έγινε λίγα χρόνια αργότερα από έναν Γερμανό χημικό, τον M.H. Klaproth το 1795. Ο Klaproth ήταν αυτός που έδωσε στο μεταλλικό συστατικό του οξειδίου το όνομα τιτάνιο, το οποίο προέρχεται από το ελληνικό μυθολογικό όνομα «Τιτάν», δηλαδή τους γίγαντες της ελληνικής μυθολογίας. [2]

Το καθαρό μεταλλικό τιτάνιο (καθαρότητας 99%) παρήχθη για πρώτη φορά είτε το 1906 ή το 1910 από τον M.A. Hunter στο Rensselaer Polytechnic Institute (Troy, New York, U.S.) σε συνεργασία με τη General Electric Company. Οι ερευνητές αυτοί πίστευαν ότι το τιτάνιο είχε σημείο τήξης στους 6000° C (10800° F) και θεωρούσαν ότι είναι ο ιδανικός υποψήφιος για χρήση σε λάμπες πυρακτώσεως. Ωστόσο, όταν ο Hunter κατασκεύασε ένα υλικό το οποίο είχε σημείο τήξης κοντά στους 1800° C (3300° F), η προσπάθεια αυτή εγκαταλείφθηκε. Ωστόσο, ο Hunter επεσήμανε ότι το συγκεκριμένο υλικό χαρακτηριζόταν από αρκετή ολκιμότητα και η μέθοδος που

χρησιμοποιούσε για την παραγωγή του μέσω αντίδρασης τετραχλωριδίου του τιτανίου ($TiCl_4$) με νάτριο υπό κενό δέχτηκε αργότερα αρκετή δημοσιότητα και είναι πλέον γνωστή ως μέθοδος Hunter. [2]

Τιτάνιο υψηλής ολκιμότητας και μεγάλης καθαρότητας παρήχθη το 1925 από τους Ολλανδούς επιστήμονες A.E. van Arkel και J.H. de Boer, οι οποίοι ανακάλυψαν την ιωδική μέθοδο. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την αντίδραση με ιώδιο και τη μετατροπή των σχηματιζόμενων ατμών πάνω από ένα πυρακτωμένο νημάτιο σε καθαρό μέταλλο. [2]

Το 1932, ο William J. Kroll από το Λουξεμβούργο παρήγαγε σημαντικές ποσότητες όλκιμου τιτανίου συνδυάζοντας $TiCl_4$ με ασβέστιο. Μέχρι το 1938 ο Kroll είχε παράγει 20 κιλά τιτανίου και ήταν πλέον πεπεισμένος ότι διέθετε εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής και αντίστασης σε διάβρωση. Στην αρχή του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου έφυγε από την Ευρώπη και συνέχισε την εργασία του στις Ηνωμένες Πολιτείες στην Union Carbide Company και στη συνέχεια στο U.S. Bureau of Mines. Μέχρι εκείνη τη στιγμή, είχε πλέον αλλάξει τον αναγωγικό παράγοντα από το ασβέστιο στο μεταλλικό μαγνήσιο. Ο Kroll σήμερα αναγνωρίζεται ως ο πατέρας της σύγχρονης βιομηχανίας τιτανίου και η μέθοδος Kroll είναι η βάση για τη σύγχρονη παραγωγή τιτανίου. [2]

Μία μελέτη της αμερικανικής Πολεμικής Αεροπορίας που διεξήχθη το 1946 απέδειξε ότι τα κράματα τιτανίου είναι υλικά με πολύ μεγάλη σημασία, καθώς είναι μέγιστη ανάγκη η εύρεση υλικών με υψηλούς λόγους δύναμης/βάρους για την κατασκευή των κινητήρων των αεροσκαφών και η ανάγκη αυτή δεν καλύπτεται αποδοτικά με χρήση χάλυβα ή αλουμινίου. Ως εκ τούτου, το αμερικανικό Υπουργείο Άμυνας παρείχε σημαντικά κίνητρα για να ξεκινήσει η βιομηχανία παραγωγής τιτανίου το 1950. Παρόμοια βιομηχανική ικανότητα εμφανίστηκε στην Ιαπωνία, την Ε.Σ.Σ.Δ. και την Αγγλία. Ύστερα από αυτή την ώθηση που δόθηκε την αεροδιαστημική βιομηχανία, η άμεση διαθεσιμότητα του τιτανίου οδήγησε στην εμφάνιση ευκαιριών για νέες εφαρμογές σε άλλες αγορές, όπως είναι η χημική επεξεργασία, η ιατρική, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η επεξεργασία αποβλήτων. [2]

2.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Το τιτάνιο είναι το 9ο πιο άφθονο στοιχείο και αποτελεί περίπου το 0.6% w/w του στερεού φλοιού της Γης. Βρίσκεται σχεδόν σε όλα τα έμβια όντα, τα πετρώματα, τα υδατικά συστήματα και τα εδάφη. Αφθονότερα από το Ti είναι κατά φθίνουσα σειρά τα χημικά στοιχεία: οξυγόνο, πυρίτιο, αργίλιο, σίδηρος, ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο, κάλιο. [3]

Εμφανίζεται στη φύση πάντα ενωμένο και στα ορυκτά του υπάρχει συνήθως οξυγόνο αλλά και αλκαλιμέταλλα, μέταλλα αλκαλικών γαιών, σίδηρος, μαγγάνιο, χαλκός, πυρίτιο κ.ά.. Τα κυριότερα ορυκτά από τα οποία και εξάγεται είναι το ρουτίλιο (TiO_2) και ο ιλμενίτης ($Fe^{++}TiO_3$) που είναι πολύ διεσπαρμένα σε όλη τη Γη. Επίσης εξάγεται και από το λευκόξενο. Επιπλέον, σκουριά (scrap) υψηλής περιεκτικότητας σε TiO_2 (75% έως 85%) παράγεται από τον ιλμενίτη στον Καναδά, τη Νορβηγία και τη Δημοκρατία της Νοτίου Αφρικής. Από τα άλλα ορυκτά του τιτανίου λίγα έχουν βιομηχανικό ενδιαφέρον και τα κυριότερα είναι ο μπρουκίτης και ο ανατάσης και τα δύο με την ίδια χημική σύσταση, οξείδιο του τιτανίου (IV), TiO_2 , αλλά διαφορετικά συστήματα κρυστάλλωσης, ο περοβσκίτης $CaTiO_3$, ο τιτανίτης $CaTiSiO_5$ κ.ά.. Οι κυριότερες χώρες παραγωγής ιλμενίτη από ορυχεία είναι η Αυστραλία, η Νότια Αφρική, η Κίνα και ο Καναδάς. Ρουτίλιο από ορυχεία εξορύσσεται κυρίως στην Αυστραλία, στη Νότια Αφρική, στη Σιέρα Λεόνε και στην Ουκρανία. Σπογγώδες τιτάνιο παρήγαγαν κυρίως η Κίνα, η Ιαπωνία, η Ρωσία και το Καζακστάν, ενώ λευκή χρωστική παράγουν κυρίως οι Η.Π.Α. και η Κίνα. [3]

Το χημικό του σύμβολο είναι Ti και ανήκει στην ομάδα 4 του περιοδικού πίνακα, στην περίοδο 4, στο d-block και στην 1η κύρια σειρά των στοιχείων μετάπτωσης. Ο ατομικός αριθμός του είναι 22 και η σχετική ατομική μάζα του 47.867. Είναι ανθεκτικό, όλκιμο μέταλλο μικρής πυκνότητας. Είναι ελαφρύ και ταυτόχρονα ισχυρό μέταλλο και ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό του είναι ο υψηλός λόγος αντοχής/βάρους. Όταν είναι καθαρό, χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλή όλκιμότητα. Οι βασικές ιδιότητες του τιτανίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. [4]

Πίνακας 2.1: Γενικές ιδιότητες τιτανίου

ΟΝΟΜΑ, ΣΥΜΒΟΛΟ, ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ	ΤΙΤΑΝΙΟ, Ti, 22
ΧΗΜΙΚΗ ΣΕΙΡΑ	ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΛΛΟ
ΟΜΑΔΑ, ΠΕΡΙΟΔΟΣ, ΤΜΗΜΑ	4, 4, d
ΕΜΦΑΝΙΣΗ	ΑΣΠΡΟ – ΑΡΓΥΡΟ ΧΡΩΜΑ
ΑΤΟΜΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	47.867 g mol ⁻¹
ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ	[Ar] 3d ² 4s ²
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΑΝΑ ΚΥΨΕΛΙΔΑ	2, 8, 10, 2
ΟΝΟΜΑ, ΣΥΜΒΟΛΟ, ΑΤΟΜΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ	ΤΙΤΑΝΙΟ, Ti, 22

Έχει θερμοκρασία τήξης 1668° C και θερμοκρασία βρασμού 3287° C. Η υψηλή θερμοκρασία τήξης του το καθιστά κατάλληλο ως πυρίμαχο υλικό. Οι εμπορικές κατηγορίες του τιτανίου, οι οποίες έχουν καθαρότητα σε ποσοστό 99.2%, παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην επιμήκυνση, η οποία προσεγγίζει τα 63000 psi, αντοχή που ισοδυναμεί με αυτή των κραμάτων του χάλυβα. Επίσης, το τιτάνιο είναι 60% βαρύτερο από το αλουμίνιο, αλλά δύο φορές ισχυρότερο από το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο κράμα αλουμινίου 6061-T6. Ορισμένα κράματα τιτανίου παρουσιάζουν αντοχή στην επιμήκυνση που ξεπερνά τα 200000 psi (1.4 GPa). Ωστόσο, το τιτάνιο χάνει την αντοχή του όταν θερμανθεί πάνω από τους 430° C. Οι βασικότερες φυσικές ιδιότητες του τιτανίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. [5]

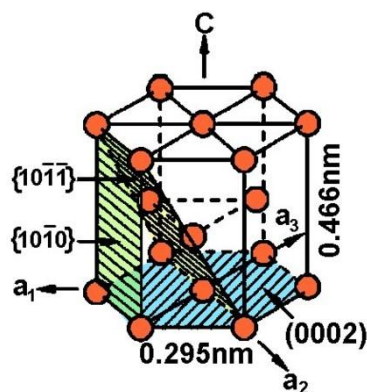
Λόγω της υψηλής ειδικής αντοχής του, το καθαρό τιτάνιο Ti αποτελεί έναν εξαιρετικό υποψήφιο για μηχανολογικές εφαρμογές που απαιτούν ελαφριά δομικά στοιχεία. Μία από τις διαθέσιμες μεθόδους για την αύξηση της αντοχής και της ολκιμότητας είναι με εκλέπτυνση των κόκκων του υλικού μέσω έντονης πλαστικής παραμόρφωσης (SPD Severe Plastic Deformation). Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να δημιουργηθεί μία εξαιρετικά λεπτόκοκκη μικροδομή που είναι δυνατό να οδηγήσει σε αυξημένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τιτανίου και των κραμάτων του. [5]

Το τιτάνιο το συναντάμε σε δύο κρυσταλλικές δομές, την εξαγωνική μέγιστης πυκνότητας (α-Ti) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη χωροκεντρωμένη κυβικού πλέγματος δομή (β-Ti). Ο αλλοτροπικός μετασχηματισμός του καθαρού τιτανίου

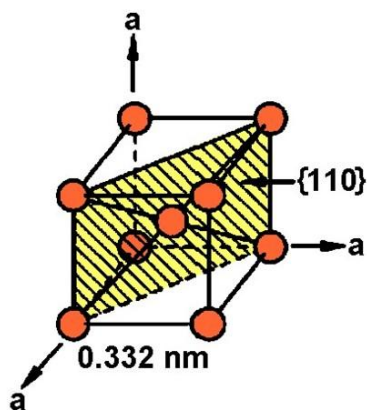
λαμβάνει χώρα στους 882° C. Οι κρυσταλλικές δομές του τιτανίου παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.2 και 2.3. [6]

Πίνακας 2.2: Φυσικές ιδιότητες τιτανίου

ΦΑΣΗ	ΣΤΕΡΕΟ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	4.506 g·cm ⁻³
ΠΙΕΣΗ ΥΓΡΟΥ	4.11 g·cm ⁻³
ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ	1941 K (1668° C, 3034° F)
ΣΗΜΕΙΟ ΒΡΑΣΜΟΥ	3560 K (3287° C, 5949° C)
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΤΗΞΗΣ	14.15 kJ·mol ⁻¹
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ	425 kJ·mol ⁻¹
ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	(25° C) 25.060 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΟ
ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	(20° C) 0.420 μΩ·m
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	(300 K) 21.9 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ	(25° C) 8.6 μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΗΧΟΥ	(r.t.) 5090 m·s ⁻¹
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	116 GPa
ΜΕΤΡΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	44 GPa
ΛΟΓΟΣ Poisson	0.32
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ Mohs	6.0
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ Vickers	970 MPa
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ Brinell	716 MPa



Σχήμα 2.2: Κρυσταλλική δομή α-Ti [6]



Σχήμα 2.3: Κρυσταλλική δομή b-Ti [6]

Το τιτάνιο στη φύση εμφανίζεται ως μίγμα 5 σταθερών ισοτόπων, των ^{46}Ti , ^{47}Ti , ^{48}Ti , ^{49}Ti και ^{50}Ti σε ποσοστά 7.95%, 7.75%, 74.45%, 5.51% και 5.34% αντίστοιχα. Στις ενώσεις του παρουσιάζεται με δύο κυρίως αριθμούς οξείδωσης, +4 και +3. [3]

Όσον αφορά στις χημικές ιδιότητες του τιτανίου, η πιο σημαντική ιδιότητα είναι η άριστη αντίσταση που εμφανίζει σε διάβρωση. Είναι σχεδόν τόσο ανθεκτικό όσο και ο λευκόχρυσος και αντιστέκεται τόσο στην οξείδωση από υγρά και αέρια χλωρίου, αλλά και στην οξείδωση που προκαλεί το θαλασσινό νερό. Το καθαρό τιτάνιο δεν είναι διαλυτό στο νερό αλλά είναι διαλυτό σε συγκέντρωση οξέων. Όταν καίγεται στον ατμοσφαιρικό αέρα σε θερμοκρασίες άνω των 610°C , παράγεται το διοξείδιο του τιτανίου. Επιπλέον, είναι ένα από τα λίγα στοιχεία που καίγονται σε καθαρό αέριο αζώτου στους 800°C , παράγοντας νιτρίδιο του τιτανίου. Επίσης, είναι ανθεκτικό στην αραίωση με θειικό και υδροχλωρικό οξύ, μαζί με αέριο χλωρίου, χλωρίδια και πολλά οργανικά οξέα. Δεν προσβάλλεται από τις βάσεις. Είναι παραμαγνητικό και παρουσιάζει χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. [6]

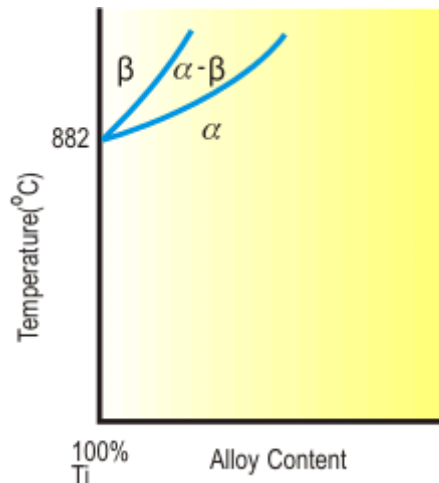
2.3. ΤΟ ΤΙΤΑΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ

Όπως είδαμε και προηγουμένως, το τιτάνιο το συναντάμε σε δύο κρυσταλλικές δομές, την εξαγωνική μέγιστης πυκνότητας (a-Ti) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη χωροκεντρωμένη κυβικού πλέγματος δομή (b-Ti). Ο αλλοτροπικός μετασχηματισμός του καθαρού τιτανίου λαμβάνει χώρα στους 882°C . [6]

Το τιτάνιο είναι ένα στοιχείο μετάπτωσης και η εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων του είναι μη συμπληρωμένη επομένως μπορεί να σχηματίσει στερεά

διαλύματα με διάφορα στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία κραμάτωσης μπορούν να μεταβάλλουν τη θερμοκρασία του αλλοτροπικού μετασχηματισμού από την α-φάση στη β-φάση. Τα στοιχεία κραμάτωσης διακρίνονται στους α-σταθεροποιητές, τους β-σταθεροποιητές και τα ουδέτερα στοιχεία. Τα στοιχεία κραμάτωσης στα κράματα τιτανίου έχουν την τάση να σταθεροποιούν είτε την α-φάση, είτε την αλλοτροπική β-φάση, αλλάζοντας τη θερμοκρασία μετασχηματισμού, καθώς και το σχήμα και το μέγεθος του πεδίου α-β. [7]

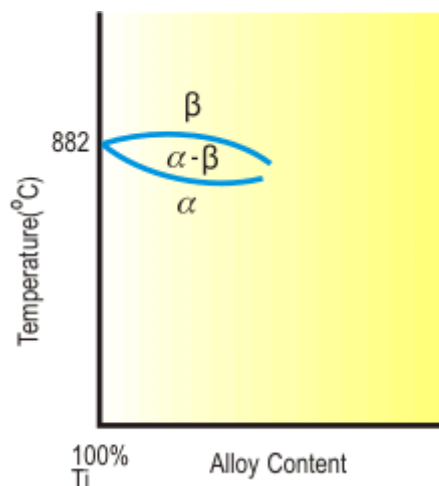
Στοιχεία που αυξάνουν τη θερμοκρασία μετασχηματισμού είναι οι α-σταθεροποιητές και συγκεκριμένα το αλουμίνιο (Al), το οξυγόνο (O), το άζωτο (N) και ο άνθρακας (C), με το αλουμίνιο να είναι ένα πολύ αποδοτικό α-ενισχυτικό στοιχείο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε θερμοκρασίες που αυξάνονται πάνω από τους 550° C. Το οξυγόνο, το άζωτο και ο άνθρακας θεωρούνται ακαθαρσίες σε εμπορικά κράματα. Ωστόσο, το οξυγόνο χρησιμοποιείται ως ενισχυτικός παράγοντας για να παρέχονται διάφορες ποιότητες εμπορικού καθαρού τιτανίου προσφέροντας διάφορους συνδυασμούς δύναμης και κατεργασιμότητας. Η δράση των α-σταθεροποιητών φαίνεται στο Σχήμα 2.4. [7]



Σχήμα 2.4: Επίδραση των α-σταθεροποιητών στη θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού [7]

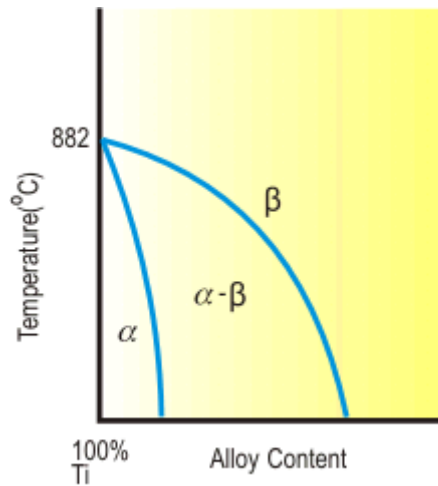
Από την άλλη, αν και η προσθήκη κασσιτέρου (Sn) ή ζirkονίου (Zr) επίσης ενισχύει την α-φάση, ωστόσο τα στοιχεία αυτά έχουν ελάχιστη επίδραση στη θερμοκρασία μετασχηματισμού και αυτό διότι εμφανίζουν υψηλή διαλυτότητα τόσο στην α-φάση όσο και στη β-φάση και είναι γνωστά ως «ουδέτερα στοιχεία». Γενικά,

τα ουδέτερα στοιχεία είναι στοιχεία κραμάτωσης που δεν επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στη θερμοκρασία του αλλοτροπικού μετασχηματισμού. Η δράση τους φαίνεται στο Σχήμα 2.5. [7]

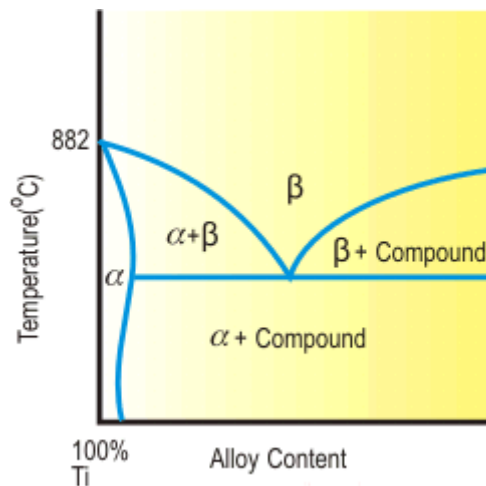


Σχήμα 2.5: Επίδραση των ουδέτερων στοιχείων στη θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού [7]

Στοιχεία που προκαλούν μείωση στη θερμοκρασία μετασχηματισμού είναι οι β-σταθεροποιητές, οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν 2 τύπους, τους ευτηκτικούς β-σταθεροποιητές και τους ισόμορφους β-σταθεροποιητές. Οι πιο σημαντικοί ισόμορφοι β-σταθεροποιητές είναι το μολυβδαίνιο (Mo), το βανάδιο (V) και το νιόβιο (Nb). Τα στοιχεία αυτά είναι αμοιβαίως διαλυτά με το β-τιτάνιο αυξάνοντας την προσθήκη της διαλυμένης ουσίας προοδευτικά και μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το μετασχηματισμό από τη β στην α φάση στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι ευτηκτικοί β-σταθεροποιητές εμφανίζουν περιορισμένη διαλυτότητα στο β-τιτάνιο και σχηματίζουν διαμεταλλικές ενώσεις μέσω ευτηκτικής αποσύνθεσης της β-φάσης. Τα δύο πιο σημαντικά παραδείγματα τέτοιων στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε εμπορικά κράματα είναι ο χαλκός (Cu) και το πυρίτιο (Si). Η δράση των β-σταθεροποιητών παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.6 και 2.7. [7]



Σχήμα 2.6: Επίδραση των ισόμορφων β-σταθεροποιητών στη θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού [7]



Σχήμα 2.7: Επίδραση των ευτηκτικών β-σταθεροποιητών στη θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού [7]

2.3.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Τα κράματα τιτανίου μπορούν να χωριστούν σε 4 βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τα βασικά μεταλλουργικά τους χαρακτηριστικά, στα: α-κράματα, κράματα παρόμοια με τα α, α-β κράματα και β-κράματα. [7]

Τα α-κράματα περιλαμβάνουν α-σταθεροποιητές, μερικές φορές σε συνδυασμό με ουδέτερα στοιχεία και επομένως χαρακτηρίζονται από μικροδομή α-φάσης. Ένα τέτοιο α-κράμα μίας φάσης είναι το Ti 5-2^{1/2} (Ti-5Al-2^{1/2}Sn), το οποίο είναι εμπορικά διαθέσιμο και είναι το μοναδικό της κατηγορίας του που επιβιώνει έναντι του

εμπορικά καθαρού τιτανίου. Το κράμα αυτό έχει εξαιρετικές εφελκυστικές ιδιότητες και σταθερότητα έναντι ερπυσμού σε θερμοκρασία δωματίου και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες μέχρι τους 300° C. Τα α-κράματα χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε διάβρωση και κρυογονικές εφαρμογές. ([8], [9])

Τα κράματα που είναι παρόμοια με τα α αποτελούνται από α-σταθεροποιητές σε μεγάλο βαθμό και πολύ λίγο από β-σταθεροποιητές. Χαρακτηρίζονται από μικροδομή που αποτελείται από α-φάση και πολύ μικρές ποσότητες β-φάσης. Τα Ti 8-1-1 (Ti-8Al-1Mo-1V) και IMI 685 (Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si) είναι παραδείγματα τέτοιων κραμάτων. Συμπεριφέρονται περισσότερο ως α-κράματα και έχουν την ικανότητα να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες μεταξύ 400° C και 520° C. ([8], [9])

Τα α-β-κράματα περιλαμβάνουν προσθήκες τόσο α-σταθεροποιητών όσο και β-σταθεροποιητών και χαρακτηρίζονται από μικροδομές που αποτελούνται από μίξη α-φάσεων και β-φάσεων. Τα Ti 6-4 (Ti-6Al-4V, γνωστό ως IMI 318) και IMI 550 (Ti-4Al-2Sn-4Mo-0.5Si) είναι τα πιο γνωστά κράματα αυτής της κατηγορίας. Μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία με υψηλά επίπεδα αντοχής και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες μεταξύ 350° C και 400° C. ([8], [9])

Τέλος, τα β-κράματα περιλαμβάνουν υψηλές ποσότητες β-σταθεροποιητών και χαρακτηρίζονται από υψηλή εμβαπτότητα και υψηλή κατεργασιμότητα, όπως επίσης και από υψηλή πυκνότητα. Βασικά, αυτά τα κράματα προσφέρουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με αυτή των α-β-κραμάτων, αλλά οι ιδιότητές τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες είναι κατώτερες από αυτές των α-β-κραμάτων. ([8], [9])

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε εφαρμογές αεροστροβίλων, τα πιο σημαντικά κράματα είναι αυτά της δεύτερης και της τρίτης κατηγορίας. Το Ti-6Al-4V είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κράμα τιτανίου και αντιστοιχεί σε ποσοστό άνω του 45% της συνολικής παραγωγής τιτανίου. Ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει σημαντικές ιδιότητες του Ti-6Al-4V και του χάλυβα AISI 1045, για λόγους σύγκρισης. [10]

Πίνακας 2.3: Σύγκριση ιδιοτήτων του Ti-6Al-4V και του χάλυβα AISI 1045 [10]

Material	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Modulus of elasticity tension (GPa)
Ti6Al4V annealed bar	895	825	10	20	110
Ti6Al4V solution treated and aged bar	1035	965	8	20	-
AISI 1045 cold drawn	625	530	12	35	207
Material	Hardness (HV)	Density (g/cm³)	Specific heat at 20-100° C (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)	
Ti6Al4V annealed bar	340	4.43	580	7.3	
Ti6Al4V solution treated and aged bar	360	-	-	7.5	
AISI 1045 cold drawn	179	7.84	486	50.7	

Όπως γίνεται αντιληπτό από όλα τα παραπάνω, ο αλλοτροπικός μετασχηματισμός που υφίσταται το τιτάνιο είναι υπεύθυνος για την ποικιλία των διαφορετικών μικροδομών με τις οποίες εμφανίζεται.

2.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Το τιτάνιο δεν είναι τοξικό μέταλλο. Η ευρεία χρήση του σε ιατρικές εφαρμογές αλλά και πολλές μελέτες αποδεικνύουν ότι είναι αδρανές και βιοσυμβατό τόσο για τους ανθρώπους όσο και για τα ζώα. Η χρήση του τιτανίου στην ιατρική βασίστηκε στην βιοσυμβατότητά του με το ανθρώπινο σώμα, αφού χρησιμοποιείται σαν υλικό μοσχευμάτων (ορθοπεδική, οδοντιατρική) αλλά και στην αντοχή του στη διάβρωση (από σωματικά υγρά). Έχει παρατηρηθεί όμως ότι ορισμένες ενώσεις του αλλά και το ίδιο το μέταλλο, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στον ανθρώπινο οργανισμό. [3]

Το τιτάνιο, επειδή συνδυάζει μικρό βάρος και ανθεκτικότητα στη διάβρωση, χρησιμοποιείται σε πολλά προϊόντα καθημερινής χρήσης όπως τρυπάνια, κοπικά εργαλεία, ποδήλατα, μπαστούνια του γκολφ, ρολόγια χειρός, φορητοί υπολογιστές, κοσμήματα, κινητά τηλέφωνα. Σχηματίζει ανθεκτικά και ελαφρά κράματα με πολλά άλλα μέταλλα όπως με το σίδηρο, το αργίλιο, το βανάδιο, το μολυβδαίνιο κ.ά.. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροδιαστημική βιομηχανία για την κατασκευή κινητήρων, πυραύλων και διαστημικών οχημάτων. Επίσης χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές, στην πετροχημική βιομηχανία, σε μονάδες αφαλάτωσης και χαρτοπολλτού, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη γεωργία, στην ιατρική για την κατασκευή ορθοπεδικών υλικών, στην οδοντιατρική για την κατασκευή εμφυτευμάτων κλπ.. [3]

Μόνο το 5% της ετήσιας παγκόσμιας παραγωγής ορυκτών τιτανίου προορίζεται για παραγωγή μεταλλικού Ti. Το υπόλοιπο 95% χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή λευκής χρωστικής ουσίας με τύπο TiO₂. Λόγω της εξαιρετικής λευκότητας και του υψηλού δείκτη διάθλασης, το TiO₂ είναι η κυρίαρχη λευκή χρωστική ουσία για βαφές, χαρτί, πλαστικές ύλες, καουτσούκ, οδοντόπαστες, τρόφιμα και διάφορα άλλα υλικά. [3]

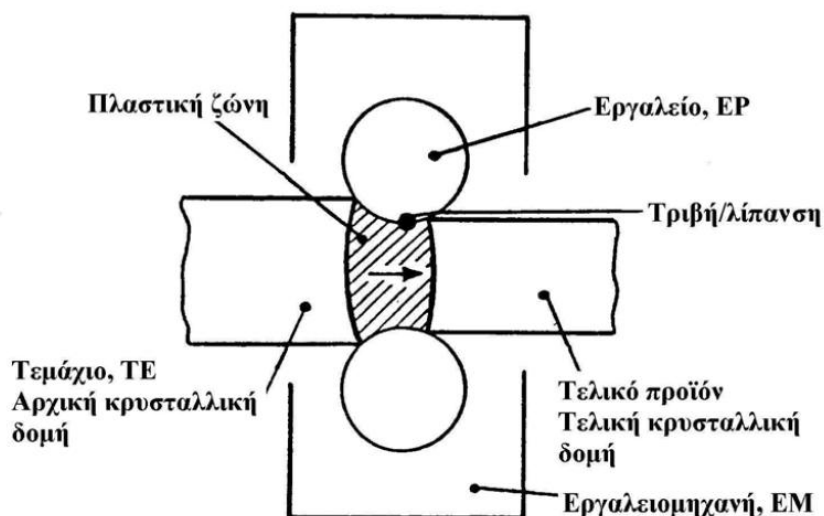
3. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Κατεργασία (process) είναι η διαδικασία μορφοποίησης των υλικών που εκμεταλλεύεται την ιδιότητά τους να παραμορφώνονται πλαστικά, δηλαδή να επιδέχονται μόνιμες μεγάλες παραμορφώσεις. Η κατεργασία συνδυάζει κατάλληλα τις συνθήκες φόρτισης, θερμοκρασίας και ταχύτητας για βέλτιστο αποτέλεσμα.

Οι βασικές παράμετροι που λαμβάνουν μέρος σε μια κατεργασία και αλληλοεπηρεάζονται είναι (Σχήμα 3.1):

- Το προς κατεργασία τεμάχιο, TE.
- Το εργαλείο, EP, που διαμορφώνει το TE.
- Οι συνθήκες στη διεπιφάνεια TE/EP, δηλαδή λίπανση και τριβολογικά χαρακτηριστικά.
- Η ζώνη παραμόρφωσης ή πλαστική ζώνη, όπου επιτελείται η πλαστική παραμόρφωση του TE.
- Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός, δηλαδή η εργαλειομηχανή, EM και ο υπόλοιπος εξοπλισμός.
- Το τελικό προϊόν με κρυσταλλική δομή διαφορετική από αυτή του αρχικού TE.
- Το περιβάλλον. [11]



Σχήμα 3.1: Τυπική σχηματική παράσταση μιας κατεργασίας [11]

Όσον αφορά σε κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους, απαιτείται περαιτέρω εξέταση των χαρακτηριστικών της κάθε μίας. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το τεμάχιο, σημαντικό ρόλο παίζει η κατεργασιμότητα του υλικού του, δηλαδή ο βαθμός δυσκολίας της μορφοποίησης του. Επιπλέον, σημασία έχει η αρχική γεωμετρία και οι συνθήκες επιφανείας του, οι αρχικές συνθήκες του υλικού του, δηλαδή η σύσταση, η θερμοκρασία και η μικροδομή του, οι θερμικές και φυσικές ιδιότητες του υλικού του και οι επιδράσεις των μεταβολών σε μικροδομή και σύσταση στην κατεργασιμότητα.

Όσον αφορά το εργαλείο, σημαντικά στοιχεία είναι η γεωμετρία του, οι επιφανειακές συνθήκες, το υλικό του εργαλείου, η θερμοκρασία της κατεργασίας και η στιβαρότητα και η ακρίβειά του.

Οι σημαντικότερες συνθήκες της διεπιφάνειας τεμαχίου/εργαλείου είναι ο τύπος του λιπαντικού και οι θερμοκρασιακές συνθήκες, η μονωτική δράση και τα χαρακτηριστικά απόψυξης του στρώματος λιπαντικού, τα τριβολογικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την εφαρμογή και την απομάκρυνση του λιπαντικού.

Όσον αφορά την πλαστική ζώνη, ιδιαίτερη μελέτη απαιτεί η μηχανική της παραμόρφωσης σε συνδυασμό με το εφαρμοζόμενο θεωρητικό μοντέλο ανάλυσης, καθώς και η πλαστική ροή, οι ταχύτητες, οι ταχύτητες παραμόρφωσης και οι παραμορφώσεις, δηλαδή οι κινηματικές συνθήκες. Επιπλέον, πολύ σημαντικοί παράγοντες είναι η εντατική κατάσταση, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες τάσεις κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, καθώς και οι θερμοκρασίες, δηλαδή η παραγόμενη θερμότητα και η θερμορροή.

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού είναι η ικανότητα φορτίου και ισχύος της εργαλειομηχανής, η στιβαρότητα και η ακρίβεια οδήγησης της εργαλειομηχανής, καθώς και η ταχύτητα και η παραγωγικότητα.

Όσον αφορά στο τελικό προϊόν, οι παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν είναι η γεωμετρία του, η διαστατική και γεωμετρική ακρίβεια, η ποιότητα επιφάνειας και η μικροδομή, σε συνδυασμό με τις μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες.

Τέλος, με τον όρο περιβάλλον, εννοείται τόσο το περιβάλλον κατεργασίας, δηλαδή το ανθρώπινο δυναμικό και ο εξοπλισμός εξυπηρέτησης της κατεργασίας, καθώς και το φυσικό περιβάλλον, όπως η μόλυνση από απόβλητα, η ηχορύπανση και τα μέτρα προστασίας. [11]

3.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Μία βασική ταξινόμηση των κατεργασιών γίνεται κατά DIN ως εξής:

- Αρχέγονες κατεργασίες, όπου το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά τη μορφοποίηση. Τέτοιες κατεργασίες είναι η χύτευση και η κονιομεταλλουργία.
- Διαμορφώσεις, των οποίων το βασικό χαρακτηριστικό είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού. Διακρίνονται σε κατεργασίες του συμπαγούς υλικού, όπως είναι η σφυρηλάτηση, η έλαση, η διέλαση και η ολκή και σε κατεργασίες διαμόρφωσης του επίπεδου ελάσματος, όπως είναι η κάμψη, η απότμηση και η βαθεία κοίλανση.
- Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού, όπου η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού. Τέτοιες κατεργασίες είναι η τórνευση, η διάτρηση, το φρεζάρισμα και η λείανση.
- Επιφανειακές κατεργασίες, οι οποίες δεν επιφέρουν αλλαγή σχήματος στο τεμάχιο, αλλά μεταβολή στις ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας για ενίσχυση και προστασία. Διακρίνονται σε θερμικές, θερμοχημικές και επικαλύψεις.
- Κατεργασίες σύνδεσης. Διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις και κοχλιώσεις).

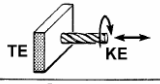
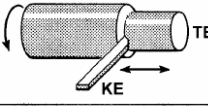
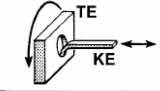
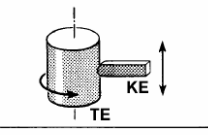
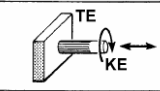
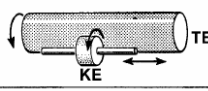

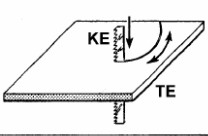
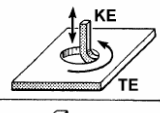
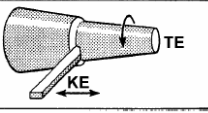
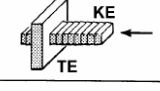
Στα Σχήματα 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται οι βασικότερες συμβατικές κατεργασίες επίπεδων και κυλινδρικών επιφανειών. [11]

3.3. ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ

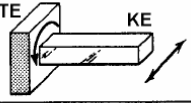
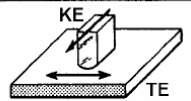
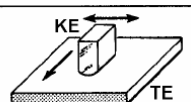
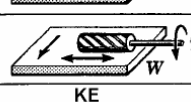
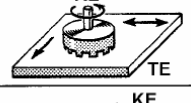
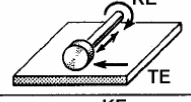
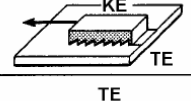
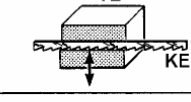
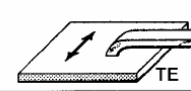
Οι βασικοί συντελεστές που παίζουν σημαντικό ρόλο στην κοπή είναι (Σχήμα 3.4):

- Κατεργαζόμενο τεμάχιο (TE).
- Κοπτικό εργαλείο (KE).
- Απόβλιττο (το αφαιρούμενο υλικό).

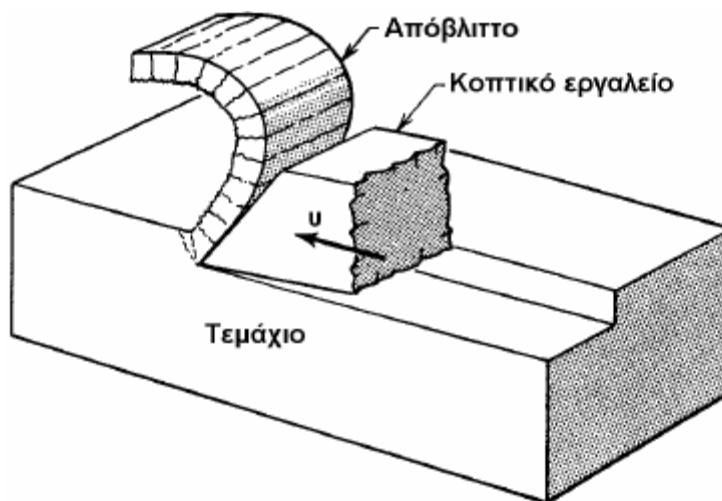
Το κοπτικό εργαλείο κινείται σε σχέση προς το τεμάχιο σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα v , ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το απόβλιττο που κινείται επί του κοπτικού εργαλείου μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του. [11]

ΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
	Διάτρηση		Τόρνευση
	Boring		Τόρνευση
	Γλύφανση		Λείανση
	Λείανση		Πριόνισμα
	Boring		Τόρνευση
	Broaching		

Σχήμα 3.2: Κατεργασίες κυλινδρικών επιφανειών [11]

ΚΙΝΗΣΕΙΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ
	Τόρνευση
	Πλάνισμα
	Φρεζάρισμα
	Φρεζάρισμα
	Φρεζάρισμα
	Λείανση
	Broaching
	Πριόνισμα
	Φρεζάρισμα

Σχήμα 3.3: Κατεργασίες επίπεδων επιφανειών [11]



Σχήμα 3.4: Οι βασικοί συντελεστές της κοπής [11]

3.3.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

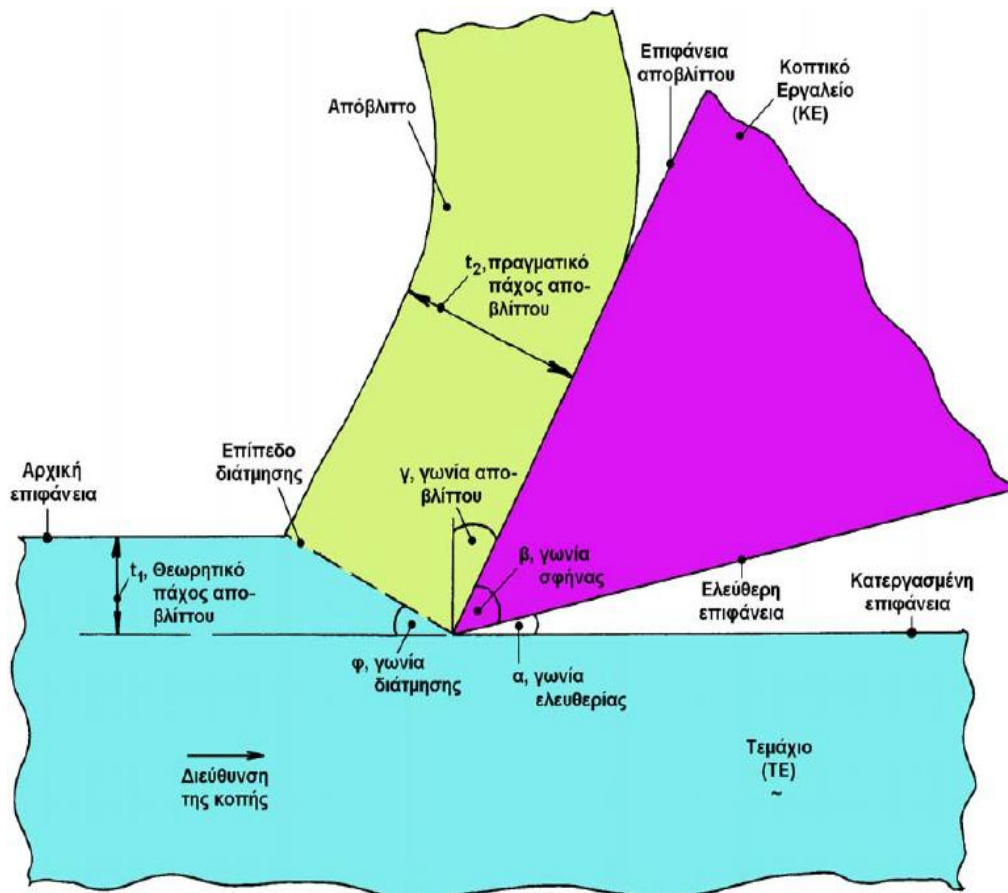
Το κοπτικό εργαλείο προσομοιάζεται με σφήνα ευθύγραμμης ακμής που κινείται ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο έτσι, ώστε να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πάχους και με την αντίστοιχη κάθε φορά μορφή αποβλίττου.

Διακρίνουμε τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου (Σχήμα 3.5):

- Επιφάνεια αποβλίττου: Είναι η επιφάνεια της σφήνας, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιττο κατά την κίνησή του.
- Ελεύθερη επιφάνεια: Είναι η επιφάνεια της σφήνας που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.
- Κόψη: Είναι η ακμή της σφήνας που προκύπτει ως τομή των δύο παραπάνω επιφανειών.
- Γωνία αποβλίττου, γ : Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίττου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του ΚΕ. Μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.
- Γωνία ελευθερίας, α : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του ΚΕ και την κατεργασμένη επιφάνεια.
- Γωνία σφήνας, β : Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια αποβλίττου.

Ισχύει :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ. [11]$$



Σχήμα 3.5: Οι βασικές έννοιες της κοπής [11]

3.3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ

Τα βασικά χαρακτηριστικά του αποβλίττου είναι:

- Θεωρητικό πάχος αποβλίττου, t_1 : Είναι το αφαιρούμενο πάχος υλικού.
- Πραγματικό πάχος αποβλίττου, t_2 : Είναι η μέση τιμή του πάχους που έχει το απόβλιττο μετά την κοπή.
- Πλάτος αποβλίττου, b
- Θεωρητική διατομή αποβλίττου, $A_1 = b \cdot t_1$
- Πραγματική διατομή αποβλίττου, $A_2 = b \cdot t_2$ [11]

3.3.3. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ

Τα κυριότερα κινηματικά στοιχεία της κοπής είναι:

- Πρωτεύουσα ή κύρια κίνηση: Παρέχεται από την εργαλειομηχανή στο τεμάχιο ή στο κοπτικό εργαλείο και εξασφαλίζει τοπική σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο με αποτέλεσμα ή την προσέγγισή τους ή την αφαίρεση υλικού στη θέση αυτή. Κατά την κίνηση αυτή απορροφάται το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος κοπής.
- Δευτερεύουσα ή κίνηση πρόωσης: Παρέχεται από την εργαλειομηχανή στο τεμάχιο ή στο κοπτικό εργαλείο κατά τρόπο συνεχή ή διακοπτόμενο και σε συνδυασμό με την κύρια κίνηση αποδίδει την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου σε ορισμένο μήκος αυτού. Η κίνηση αυτή απορροφά μικρό ποσοστό της ισχύος κοπής. [11]

3.3.4. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ

Οι τρεις βασικές συνθήκες κοπής είναι:

- Βάθος κοπής, a : Είναι το βάθος στο οποίο εισχωρεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στο υλικό του τεμαχίου και μετράται σε mm.
- Ταχύτητα κοπής, v : Είναι η στιγμιαία σχετική ταχύτητα της κόψης του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά την πρωτεύουσα κίνηση και συνήθως μετράται σε m/min.
- Πρόωση, s : Είναι η σχετική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο ανά περιστροφή του κοπτικού εργαλείου ή του τεμαχίου και μετράται σε mm/rev. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα πρόωσης v_v , η οποία είναι η στιγμιαία σχετική ταχύτητα της κόψης του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης, μετράται σε m/min και δίνεται από τη σχέση $v_v = s \cdot n$, όπου n είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου. [11]

3.4. ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ

Ο μηχανισμός σχηματισμού του αποβλίττου είναι πολύ σημαντικός στις κατεργασίες, καθώς από αυτόν εξαρτώνται πολλά βασικά μεγέθη της κοπής, όπως είναι:

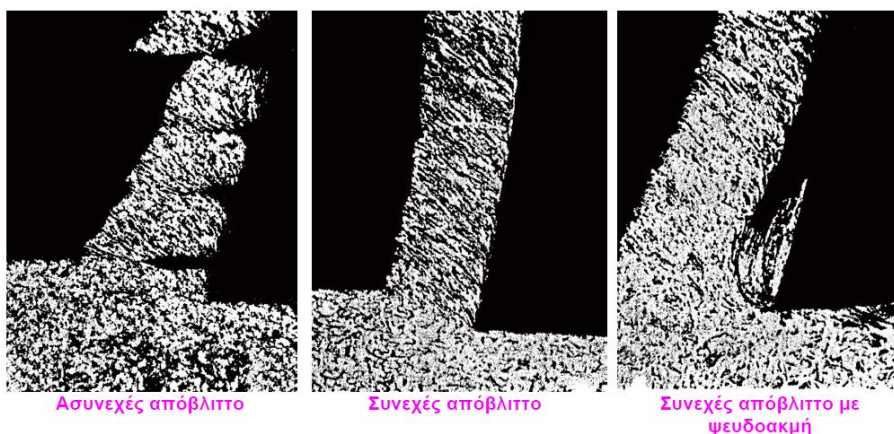
- Οι δυνάμεις κοπής
- Η ισχύς κοπής
- Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας
- Η φθορά και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου
- Η απρόσκοπτη διεξαγωγή της κοπής
- Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος Εργαλειομηχανή – Κοπτικό Εργαλείο – Τεμάχιο

Αντίστροφα, ο μηχανισμός σχηματισμού του αποβλίττου εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Υλικό τεμαχίου
- Υλικό και γεωμετρία κοπτικού εργαλείου
- Συνθήκες κοπής
- Δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος Εργαλειομηχανή – Κοπτικό Εργαλείο – Τεμάχιο

Θεωρείται ότι υπάρχουν 3 είδη αποβλίττων (Σχήμα 3.6):

- Συνεχές απόβλιττο
- Ασυνεχές απόβλιττο
- Συνεχές απόβλιττο με ψευδοακμή [11]



Σχήμα 3.6: Είδη αποβλίττων [11]

4. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Το τιτάνιο Ti και τα κράματά του χρησιμοποιούνται εκτενώς σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς εμφανίζουν έναν εξαιρετικό συνδυασμό κάποιων βασικών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες αυτές είναι η υψηλή ειδική αντοχή (λόγος αντοχής – βάρους), η οποία διατηρείται με αύξηση της θερμοκρασίας, η σημαντική αντοχή σε θραύση και η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση. Οι προηγούμενες ιδιότητες καθιστούν το τιτάνιο και τα κράματά του ιδανικά για χρήση σε αεροναυπηγικές εφαρμογές. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται ευρέως και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές, αναφέροντας ενδεικτικά τη δύλιση πετρελαίου, τη χημική βιομηχανία, τις χειρουργικές εμφυτεύσεις, τη βιομηχανία χάρτου, τη βιομηχανία ελέγχου της ρύπανσης και πυρηνικών αποβλήτων, τη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων, καθώς επίσης και ηλεκτροχημικές εφαρμογές (συμπεριλαμβανομένης της καθοδικής προστασίας και της εξορυκτικής μεταλλουργίας) και ναυπηγικές εφαρμογές. Για τους παραπάνω λόγους, το τιτάνιο έχει καθιερωθεί ως βασικό υλικό για μηχανολογικές εφαρμογές, καθώς διατίθεται σε μία πληθώρα κραμάτων και σε πολλές κατεργασμένες μορφές, όπως για παράδειγμα σε μορφή μπιγέτας, ράβδου, ελάσματος, λεπτού ελάσματος, λεπτής λωρίδας, κυαθίου, σύρματος, κλπ..

Παρά την αυξημένη χρήση και παραγωγή του τιτανίου και των κραμάτων του, χαρακτηρίζονται από αυξημένο κόστος συγκριτικά με πολλά άλλα μέταλλα, λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας εξόρυξης, της δυσκολίας τήξης, καθώς και προβλημάτων που υπεισέρχονται κατά την κατασκευή και την κατεργασία. Προκειμένου να μειωθεί το κόστος της κατεργασίας του τιτανίου χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις μέθοδοι που κάνουν χρήση του υλικού σε καθαρή μορφή, όπως είναι η χύτευση, η σφυρηλάτηση και η κονιομεταλλουργία. Ωστόσο, η μεγάλη πλειοψηφία των εξαρτημάτων τιτανίου κατασκευάζεται με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Σχεδόν όλες οι κατηγορίες μηχανικών κατεργασιών χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εξαρτημάτων τιτανίου κυρίως για την αεροναυπηγική, αναφέροντας κυρίως την τórνευση, το φρεζάρισμα, τη διάτρηση και τη λείανση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την κατασκευή στροβιλοκινητήρων η τórνευση και η διάτρηση είναι οι βασικές μέθοδοι κατεργασίας που χρησιμοποιούνται, ενώ για την κατασκευή του πλαισίου ενός αεροσκάφους, το μετωπικό φρεζάρισμα και η διάτρηση

του τιτανίου και των κραμάτων του είναι από τις πιο απαραίτητες μεθόδους κατεργασίας.

Η κατεργασιμότητα του τιτανίου και των κραμάτων του γενικά θεωρείται ότι είναι μικρή, εκτός αν η κατεργασία γίνεται σε πολύ χαμηλές ταχύτητες. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορες εγγενείς ιδιότητες του υλικού. Το τιτάνιο ως υλικό χαρακτηρίζεται από έντονη χημική δραστικότητα και για το λόγο αυτό έχει μία τάση να συγκολλάται στο εργαλείο κοπής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Κάτι τέτοιο μπορεί συνεπώς να οδηγήσει σε υποβάθμιση και πρόωρη καταστροφή του εργαλείου. Επιπλέον, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του τιτανίου οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια του τεμαχίου και του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, γεγονός που επίσης επηρεάζει αρνητικά τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι το τιτάνιο διατηρεί την υψηλή αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες και επίσης χαρακτηρίζεται από μικρό μέτρο ελαστικότητας, δυσχεραίνουν ακόμη περισσότερο την κατεργασιμότητά του. [12]

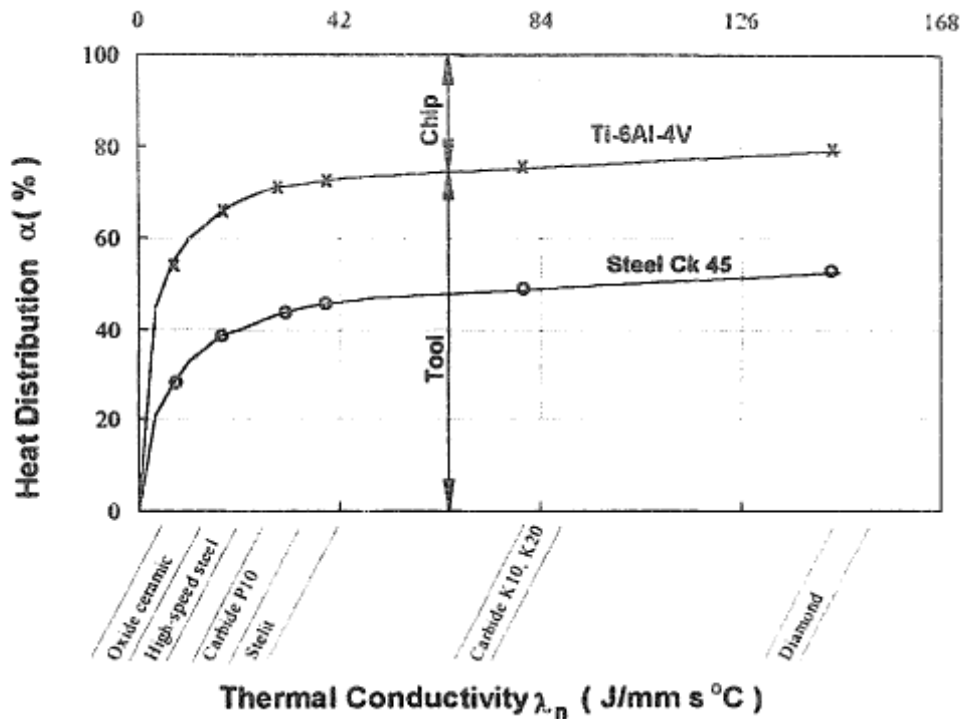
Χαρακτηριστικά, το 1955 ο Siekmann [12] επεσήμανε ότι «η μηχανική κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του θα είναι πάντα ένα πρόβλημα, ανεξάρτητα από το ποιες τεχνικές εφαρμόζονται για να μετατρέψουν αυτό το μέταλλο σε κατεργασμένα τεμάχια». Η χαμηλή κατεργασιμότητα του τιτανίου και των κραμάτων του έχει οδηγήσει πολλές μεγάλες εταιρίες να επενδύσουν υψηλά χρηματικά ποσά στην ανάπτυξη τεχνικών, οι οποίες θα οδηγήσουν σε ελαχιστοποίηση του κόστους κατεργασίας του τιτανίου και των κραμάτων του. Εάν στην ανάπτυξη τέτοιων τεχνικών ληφθούν σοβαρά υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά του τιτανίου και των κραμάτων του, τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως, τότε λογικοί ρυθμοί παραγωγής και εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας μπορούν να επιτευχθούν με χρήση συμβατικών μεθόδων κατεργασίας. [12]

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα προηγούμενα, γίνεται αντιληπτό ότι η πρόοδος στην κατεργασία των κραμάτων του τιτανίου δεν συμβαδίζει με την αντίστοιχη πρόοδο άλλων υλικών, λόγω της υψηλής αντοχής που παρουσιάζουν σε υψηλές θερμοκρασίες, την πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και την υψηλή χημική δραστικότητα. Ως εκ τούτου, η επιτυχία στην κατεργασία των κραμάτων του τιτανίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντιμετώπιση των κυριότερων προβλημάτων που συνδέονται με τις προηγούμενες εγγενείς ιδιότητες των υλικών αυτών.

Σημαντικές πληροφορίες είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία ([8]-[10], [12]) σχετικά με τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη μηχανική κατεργασία των κραμάτων τιτανίου. Ωστόσο, πολλές παρανοήσεις και αντικρουόμενα στοιχεία πολλές φορές εμφανίζονται σε διάφορες εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί με αντικείμενο την κατεργασία του τιτανίου. Στη συνέχεια, αναλύονται εκτενέστερα τα προβλήματα που σχετίζονται με τις συγκεκριμένες ιδιότητες του τιτανίου που προκαλούν τη μειωμένη κατεργασιμότητά του και γίνεται μία προσπάθεια να αποκτήσουμε μια γενική εικόνα των βασικών παραμέτρων της κατεργασίας του τιτανίου και των κραμάτων του.

Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ([13], [14]) ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας των κραμάτων τιτανίου, υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούνται και το γεγονός ότι αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζονται κυρίως κοντά στην κόψη του κοπτικού εργαλείου, οδηγεί στην ταχεία μείωση της αντοχής του κοπτικού εργαλείου, που πολύ συχνά παρατηρείται. Χαρακτηριστικά, από το Σχήμα 4.1 προκύπτει ότι ένα μεγάλο ποσοστό, της τάξης του 80%, της συνολικά παραγόμενης θερμότητας κατά την κατεργασία του κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V άγεται από το κοπτικό εργαλείο, καθώς δεν μπορεί να αφαιρεθεί με την απομάκρυνση του αποβλίττου από το τεμάχιο, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των κραμάτων τιτανίου, που ισούται περίπου με το 1/6 της θερμικής αγωγιμότητας των χαλύβων. Από την άλλη, ένα ποσοστό της τάξης του 50% της συνολικά παραγόμενης θερμότητας απορροφάται από το κοπτικό εργαλείο κατά την κατεργασία χαλύβδινων τεμαχίων. [13]

Έρευνα που έχει γίνει σχετικά με την κατανομή της θερμοκρασίας κοπής ([15], [16]), έχει δείξει ότι οι βαθμώσεις της θερμοκρασίας είναι πολύ πιο απότομες και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη πολύ μικρότερη και πολύ πιο κοντά στην κοπτική ακμή όταν γίνεται κατεργασία κραμάτων τιτανίου και αυτό συμβαίνει λόγω των λεπτότερων αποβλίττων που παράγονται (και ως εκ τούτου του μικρού μήκους επαφής ανάμεσα στο απόβλιττο και το εργαλείο), καθώς επίσης και λόγω της παρουσίας μίας πολύ λεπτής ζώνης ροής ανάμεσα στο απόβλιττο και το κοπτικό εργαλείο (περίπου 8 μm συγκρινόμενο με 50 μm που εμφανίζεται κατά την κατεργασία σιδήρου κάτω από τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας). Τα προηγούμενα έχουν ως συνέπεια να εμφανίζονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες έως και 1100°C στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. ([15], [16])



Σχήμα 4.1: Σύγκριση κατανομής της εκλυόμενης θερμότητας κατά τη μηχανουργική κατεργασία τιτανίου και χάλυβα [14]

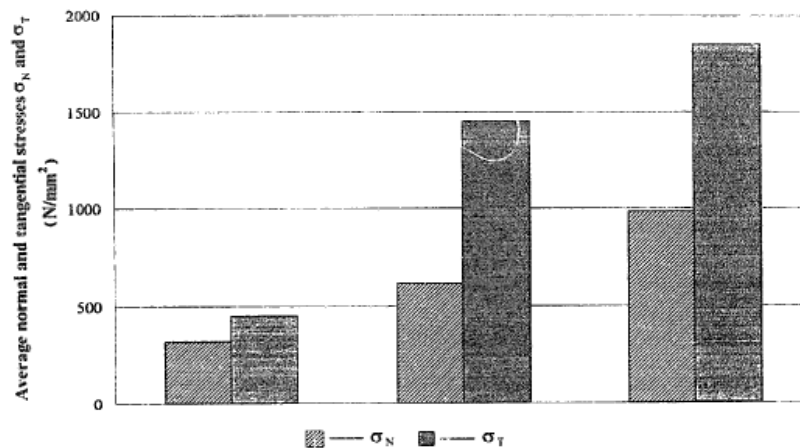
Όσον αφορά στις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, πειράματα έχουν δείξει ότι αυτές είναι παρόμοιες ως προς την τάξη μεγέθους με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία χάλυβων [8]. Επομένως, η κατανάλωση ισχύος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας είναι περίπου η ίδια ή και χαμηλότερη, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1. Ωστόσο, οι μηχανικές τάσεις που εμφανίζονται στην περιοχή της κοπτικής ακμής είναι πολύ μεγαλύτερες κατά την κατεργασία των κραμάτων του τιτανίου. Ενδεικτικά αναφέρεται πως από πειράματα έχει προκύψει ότι κατά την κατεργασία του κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V εμφανίζονται υψηλότερες μηχανικές τάσεις στο εργαλείο σε σχέση με τις τάσεις που εμφανίζονται κατά την κατεργασία του Nimonic 105, που είναι ένα κράμα με βάση το νικέλιο, και περίπου 3 με 4 φορές υψηλότερες τάσεις σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται κατά την κατεργασία χάλυβα Ck 53N. [14]

Τα προηγούμενα φαίνονται αναλυτικά στο Σχήμα 4.2. Στο συγκεκριμένο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι ορθές και διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται για κάθε ένα από τα τρία υλικά και σε κάθε περίπτωση φαίνεται το χρησιμοποιούμενο υλικό, η ταχύτητα κοπής και η γεωμετρία του εργαλείου. Αυτό είναι πολύ πιθανό να οφείλεται

στην ασυνήθιστα μικρή επιφάνεια επαφής ανάμεσα στο απόβλιπτο και το εργαλείο (που είναι περίπου το 1/3 της αντίστοιχης επιφάνειας επαφής για κατεργασία χάλυβα με ίδια ταχύτητα πρόωσης και ίδιο βάθος κοπής) και μερικώς να οφείλεται και στην υψηλή αντίσταση σε παραμόρφωση σε αυξανόμενες θερμοκρασίες που εμφανίζουν τα κράματα τιτανίου, η οποία μειώνεται αισθητά μόνο σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 800° C. [14]

Πίνακας 4.1: Μέσος όρος των απαιτήσεων σε μονάδες ισχύος για τórνευση, διάτρηση και φρεζάρισμα (σε ιπποδύναμη ανά κυβική ίντσα ανά λεπτό) για διάφορα υλικά [8]

Material	Hardness Rc or Bhn (3000 Kg)	Turning with HSS and carbide tools	Drilling with HSS drills	Milling with HSS and carbide tools
Steels	35-40 Rc	1.4	1.4	1.5
Titanium alloys	250-375	1.2	1.1	1.1
Nickel based alloys	200-360	2.5	2.0	2.0



Work material:	Steel Ck53N	Nimonic 105	Ti-6Al-4V
Tool material:	Carbide P10	Carbide K10	Carbide K20
Cutting speed:	v=100 m/min	v=30 m/min	v=40 m/min
Tool geometry:	$\frac{\gamma}{6^\circ} \left \frac{\alpha}{18^\circ} \right \left \frac{\lambda}{0^\circ} \right \left \frac{\chi}{90^\circ} \right \left \frac{\varepsilon}{85^\circ} \right $	$\frac{\gamma}{15^\circ} \left \frac{\alpha}{8^\circ} \right \left \frac{\lambda}{10^\circ} \right \left \frac{\chi}{170^\circ} \right \left \frac{\varepsilon}{90^\circ} \right $	$\frac{\gamma}{0^\circ} \left \frac{\alpha}{8^\circ} \right \left \frac{\lambda}{-4^\circ} \right \left \frac{\chi}{75^\circ} \right \left \frac{\varepsilon}{90^\circ} \right $
Nose radius:	r = 0.5 mm. Chip cross-section: a x s = 1.5 x 0.25 mm ²		

Σχήμα 4.2: Ορθές και διατμητικές τάσεις κατά την κατεργασία 3 διαφορετικών υλικών [14]

Οι αυτοδιεγχειρόμενες ταλαντώσεις είναι ένα επιπλέον βασικό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, ειδικότερα σε κατεργασίες φινιρίσματος. Η κυριότερη αιτία για την εμφάνιση ταλαντώσεων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας των κραμάτων τιτανίου είναι το χαμηλό μέτρο ελαστικότητάς τους. Όταν υπόκειται σε κατεργασίες κοπής, το τιτάνιο οδηγεί σε διπλάσιες ταλαντώσεις του εργαλείου κοπής σε σχέση με τον ανθρακούχο χάλυβα, γεγονός που οδηγεί σε πρόωρη μείωση της αντοχής του εργαλείου, σε υψηλούς κραδασμούς και σε αυξημένη θερμοκρασία κοπής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Αυτές οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται μπορεί εν μέρει να οφείλονται και στις υψηλές δυναμικές δυνάμεις κοπής που κάνουν την εμφάνιση τους κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του τιτανίου, οι οποίες μπορεί να ξεπερνάνε το 30% των αντίστοιχων στατικών δυνάμεων λόγω της «αδιαβατικής ή καταστροφικής θερμοπλαστικής παραμόρφωσης» με την οποία δημιουργούνται τα απόβλιττα των κραμάτων τιτανίου. ([17], [18], [19])

Πέρα από τις υψηλές θερμοκρασίες κοπής, τις υψηλές μηχανικές τάσεις και τις έντονες δυναμικές φορτίσεις που εμφανίζονται κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου, τα οποία οδηγούν σε πλαστική παραμόρφωση ή/και σε αστοχία του εργαλείου κοπής, τα κοπτικά εργαλεία επηρεάζονται επίσης σε μεγάλο βαθμό και από τη χημική δραστηριότητα του τιτανίου. Συγκεκριμένα, το τιτάνιο και τα κράματά του αντιδρούν χημικά με όλα σχεδόν τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα κοπτικά εργαλεία σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 500° C, λόγω της πολύ έντονης χημικής δραστηριότητας που τα χαρακτηρίζει. Η τάση που έχουν τα απόβλιττα να συγκολλούνται επάνω στο κοπτικό εργαλείο με πίεση, οδηγεί σε καταστροφή του κοπτικού εργαλείου, η οποία γίνεται όλο και πιο έντονη όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. [12]

Όλα τα προηγούμενα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τιτανίου και των κραμάτων του, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι απαιτείται να γίνεται προσεκτική μελέτη όλων των κριτηρίων για τη σωστή επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στο εργαλείο κοπής κατά τη μηχανουργική κατεργασία τους. Επομένως, όλα τα προηγούμενα προβλήματα που αφορούν την κατεργασία του τιτανίου μπορούν εν μέρει να αντιμετωπιστούν κάνοντας χρήση στιβαρών μηχανών, κατάλληλων εργαλείων κοπής και κατάλληλων συνθηκών κοπής, ελαχιστοποιώντας τις πιέσεις κατά την κοπή, παρέχοντας ικανοποιητική ροή ψυκτικού υγρού και σχεδιάζοντας ειδικά εργαλεία ή εξειδικευμένες μη συμβατικές κατεργασίες κοπής.

4.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

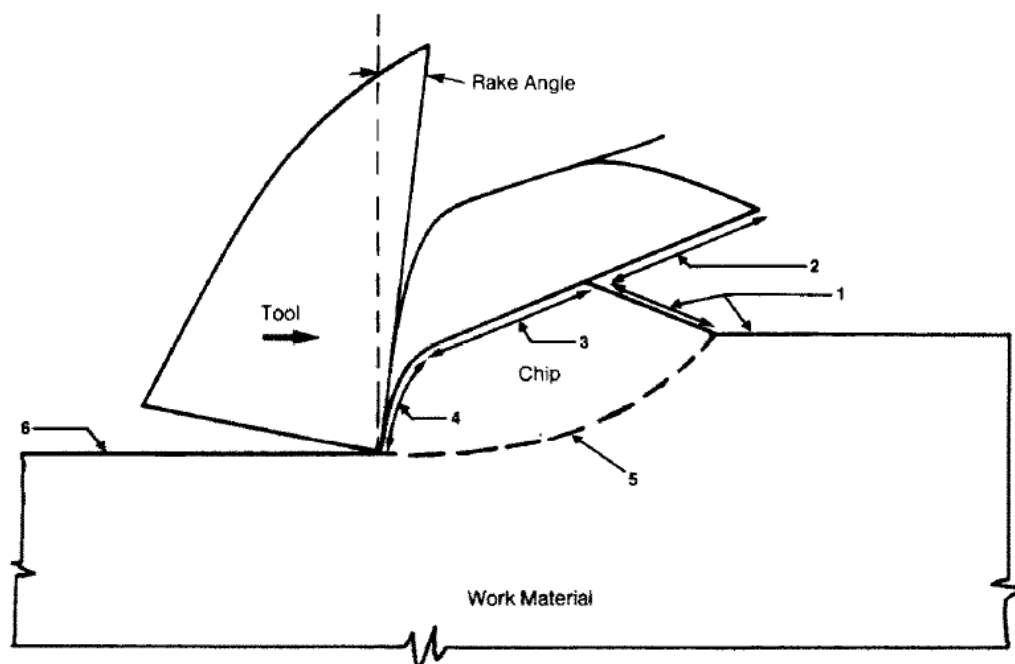
Όσον αφορά στο μηχανισμό του σχηματισμού αποβλίττου κατά την κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του, έχει βρεθεί ότι δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ταχύτητα κοπής. Ωστόσο, η ταχύτητα κοπής φαίνεται να επηρεάζει τις λεπτομέρειες της κατεργασίας, όπως είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εργαλείο κοπής και ο μηχανισμός φθοράς του εργαλείου. [17]

Ο μηχανισμός σχηματισμού του αποβλίττου συνίσταται συνολικά από 2 στάδια. Το ένα στάδιο περιλαμβάνει πλαστική αστάθεια και τοπικές παραμορφώσεις σε μία στενή περιοχή της πρωτεύουσας ζώνης παραμόρφωσης (ζώνη διάτμησης), τα οποία οδηγούν σε καταστροφική αστοχία λόγω διάτμησης κατά μήκος μιας επιφάνειας διάτμησης. Αυτή η επιφάνεια δημιουργείται από την κοπτική ακμή σχεδόν παράλληλα στο διάνυσμα της ταχύτητας κοπής σταδιακά σχηματίζει μια καμπύλη με τα κοίλα προς τα πάνω μέχρι να συναντήσει την ακατέργαστη επιφάνεια. [17]

Το άλλο στάδιο περιλαμβάνει τη σταδιακή δημιουργία του αποβλίττου με αμελητέα παραμόρφωση του τεμαχίου καθώς το κοπτικό εργαλείο κινείται. Η αρχική επαφή ανάμεσα στο απόβλιττο που σχηματίζεται και την επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου γίνεται στην κοπτική ακμή και είναι μικρής διάρκειας. Η επιφάνεια αυξάνεται καθώς προχωράει η κατεργασία του τεμαχίου. Δεν παρατηρείται σχεδόν καθόλου σχετική κίνηση ανάμεσα στην επιφάνεια του αποβλίττου και την επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου μέχρι το πέρας της κατεργασίας. Η σταδιακή αύξηση του αποβλίττου σπρώχνει το μέχρι πρότινος σχηματισμένο τμήμα του αποβλίττου. Η επαφή ανάμεσα στο σχηματισμένο απόβλιττο και αυτό που είχε σχηματιστεί πριν από αυτό μετατοπίζεται σταδιακά, αρχίζοντας από την κατεργασμένη επιφάνεια και σταδιακά προχωρώντας κατά μήκος της επιφάνειας αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου καθώς η κατεργασία προχωράει. Καθώς συνεχίζεται η ανάπτυξη του αποβλίττου, ο σχηματισμός των τάσεων στην πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης προκαλεί έντονη διάτμηση ανάμεσα στα τμήματα του σχηματιζόμενου αποβλίττου. Οι πολύ έντονες συγκεντρωμένες ζώνες διάτμησης που παρατηρούνται ανάμεσα στα τμήματα του αποβλίττου κατά την κατεργασία του τιτανίου, σχηματίζονται σε αυτό ακριβώς το στάδιο. Αυτό γίνεται σε όλες τις

ταχύτητες κοπής. Στη συνέχεια, καθώς η ταχύτητα κοπής αυξάνεται, αυτή η έντονη παραμόρφωση δημιουργείται τόσο ραγδαία, έτσι που η επιφάνεια επαφής ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε τμήματα του αποβλίττου σταδιακά μειώνεται μέχρι ένα στάδιο, όπου τα ανεξάρτητα τμήματα του αποβλίττου αποχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους. [17]

Τα προηγούμενα χαρακτηριστικά του μηχανισμού σχηματισμού του αποβλίττου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3. Ο αριθμός 1 αναφέρεται στις ακατέργαστες επιφάνειες, ο αριθμός 2 σε τμήμα της επιφάνειας που έχει υποστεί αστοχία λόγω διάτμησης και έχει αποχωριστεί από το επόμενο τμήμα του αποβλίττου λόγω της έντονης διάτμησης, ο αριθμός 3 στην έντονη ζώνη διάτμησης που δημιουργείται από την καταστροφική διάτμηση κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του αποβλίττου, ο αριθμός 4 σε επιφάνεια του αποβλίττου που βρίσκεται σε επαφή με το κοπτικό εργαλείο και υπόκειται σε έντονη διάτμηση, ο αριθμός 5 στην έντονη τοπική παραμόρφωση στην πρωτεύουσα ζώνη διάτμησης και ο αριθμός 6 στην κατεργασμένη επιφάνεια. [17]



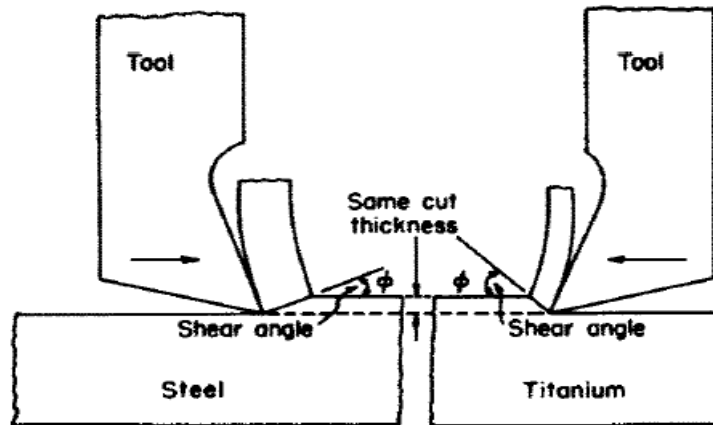
Σχήμα 4.3: Μηχανισμός σχηματισμού αποβλίττου κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου [17]

Αναφορικά με την πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης (ζώνη διάτμησης), το Σχήμα 4.4 παρουσιάζει συγκριτικά μοντέλα του μηχανισμού σχηματισμού του αποβλίττου

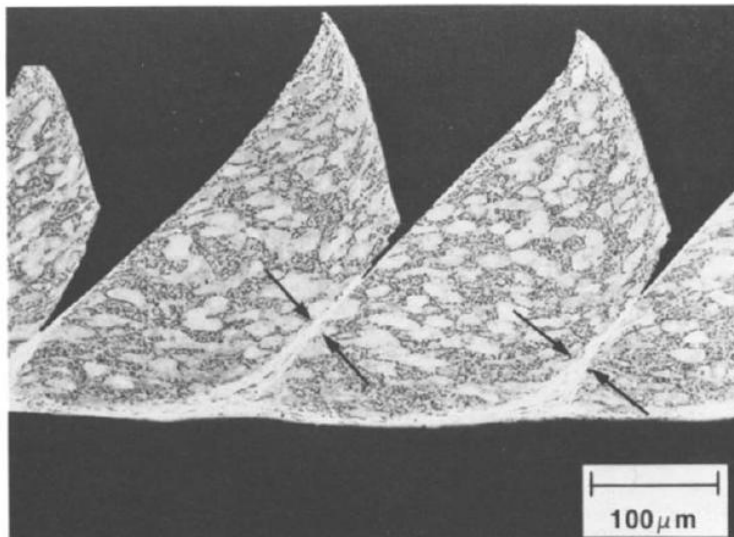
κατά την κατεργασία χάλυβα και τιτανίου. Από το Σχήμα 4.4 φαίνεται πως για το ίδιο απαραμόρφωτο πάχος αποβλίττου t , το ονομαστικό πάχος του αποβλίττου t_c είναι μικρότερο για το τιτάνιο σε σχέση με το χάλυβα. Το γεγονός αυτό, αν και αληθεύει, δεν οφείλεται στην υψηλή γωνία διάτμησης, όπως υποστηρίζουν αρκετοί ερευνητές, αλλά στο γεγονός ότι ο σχηματισμός ενός τμήματος του αποβλίττου συνοδεύεται από μικρή παραμόρφωση. ([17], [18])

Επίσης, είναι λίγο παραπλανητικό να αναπαρίσταται ο μηχανισμός σχηματισμού του αποβλίττου κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου, κάνοντας χρήση του συμβατικού μοντέλου σχηματισμού συνεχούς αποβλίττου, όταν στην πραγματικότητα ο σχηματισμός του αποβλίττου γίνεται με ασυνεχή τρόπο, με το πάχος του αποβλίττου να μεταβάλλεται με περιοδικό ασύμμετρο τρόπο και με την παρουσία έντονης τοπικής διάτμησης σε μεγάλες επιφάνειες του υλικού, όπου η παραμόρφωση είναι πολύ μικρή. Κάτι τέτοιο φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.5, όπου διακρίνονται οι ζώνες διάτμησης ανάμεσα σε δύο τμήματα του αποβλίττου, δηλαδή σε αυτό που έχει προηγηθεί ο σχηματισμός του και σε αυτό που αναπτύσσεται. [17]

Η έντονη διάτμηση της επιφάνειας του αποβλίττου κοντά στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου, όπως παρατηρείται κατά την κατεργασία του τιτανίου, δεν οφείλεται στη συμβατική δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του μηχανισμού σχηματισμού του αποβλίττου με συνεχή τρόπο, όπου το απόβλιττο κινείται επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου υπό συνθήκες ισχυρής τριβής. Στην πραγματικότητα, οφείλεται στην έντονη διάτμηση σε μία στενή ζώνη που σχηματίζεται κατά την ανάπτυξη του αποβλίττου ανάμεσα σε δύο διαδοχικά τμήματα του αποβλίττου. Καθώς αυτό συμβαίνει, το πιο πρόσφατο τμήμα του αποβλίττου που έχει σχηματιστεί ολισθαίνει επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου. Επομένως, δεν παρατηρείται το φαινόμενο να «κολλάει» το απόβλιττο επάνω στην επιφάνεια του εργαλείου ούτε να υπάρχει έντονη διάτμηση ανάμεσα στο απόβλιττο και το εργαλείο. Επομένως, η ονομαζόμενη δευτερογενής διάτμηση του αποβλίττου στην επιφάνεια του εργαλείου, η οποία είναι πολύ σημαντική κατά το μηχανισμό σχηματισμού συνεχούς αποβλίττου, εμφανίζεται να είναι ασήμαντη και μπορεί να αγνοηθεί στην περίπτωση της κατεργασίας κραμάτων τιτανίου. [17]



Σχήμα 4.4: Σύγκριση μηχανισμού σχηματισμού του αποβλίττου κατά την κατεργασία χάλυβα και τιτανίου [17]



Σχήμα 4.5: Μικρογραφία του σχηματιζόμενου αποβλίττου κατά την κατεργασία Ti-6Al-4V. Ανάμεσα στα βέλη παρατηρούνται οι ζώνες διάτμησης που σχηματίζονται ανάμεσα στο τμήμα του αποβλίττου που έχει προηγηθεί ο σχηματισμός του και στο τμήμα του αποβλίττου που ακολουθεί ο σχηματισμός του. [17]

4.2. ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Η ύπαρξη σημαντικών βελτιώσεων στο ρυθμό με τον οποίο τεμάχια υπόκεινται σε μηχανουργικές κατεργασίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη και εφαρμογή καινούριων υλικών στα εργαλεία. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων

δεκαετιών, έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη των υλικών των κοπτικών εργαλείων, συμπεριλαμβανομένων των επικαλυμμένων καρβιδίων, των κεραμικών, του κυβικού βοριονιτρίτη (CBN) και του πολυκρυσταλλικού διαμαντιού (PCD). Τα προηγούμενα έχουν βρει σημαντικές εφαρμογές στην κατεργασία χυτοσιδήρων, χαλύβων και υψηλής θερμοκρασίας κραμάτων, όπως είναι τα κράματα με βάση το νικέλιο. Ωστόσο, καμία από αυτές τις νεότερες εξελίξεις όσον αφορά στα υλικά των κοπτικών εργαλείων, δεν έχει βρει επιτυχημένη εφαρμογή στη βελτίωση της κατεργασιμότητας των κραμάτων τιτανίου, λόγω των υψίστης σημασίας ιδιοτήτων που απαιτούν τα συγκεκριμένα κράματα για τα εργαλεία κοπής. Αυτές οι σημαντικές ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα εργαλεία κοπής που προορίζονται για την κατεργασία κραμάτων τιτανίου είναι:

- Υψηλή σκληρότητα, προκειμένου να μπορούν να αντισταθούν στις υψηλές τάσεις που εμφανίζονται
- Καλή θερμική αγωγιμότητα, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται τα θερμικά σοκ και οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας
- Ικανοποιητική χημική αδράνεια, προκειμένου να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα αντίδρασης με το τιτάνιο
- Ανθεκτικότητα και αντοχή σε κόπωση, προκειμένου να αντέχουν κατά τη διάρκεια σχηματισμού και κατάτμησης του αποβλίττου
- Υψηλή αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση. [20]

Τα κοπτικά εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου (WC/Co) έχουν αποδείξει την υπεροχή τους σε όλες σχεδόν τις μηχανουργικές κατεργασίες των κραμάτων του τιτανίου, ενώ οι κατεργασίες ασυνεχούς κοπής, όπως είναι το περιφερειακό φρεζάρισμα και το πλάνισμα, αλλά επίσης και η διάτρηση και η γλείφανση εκτελούνται πολύ αποδοτικά με ταχυχάλυβες. Ο Freeman [20] υποστήριξε ότι τα εργαλεία από καρβίδιο του βολφραμίου (WC/Co) παρουσιάζουν την καλύτερη εφαρμογή ανεξάρτητα από το ποιος μηχανισμός φθοράς υπερισχύει στην κατεργασία των κραμάτων τιτανίου. Έχει βρεθεί ότι οι καλύτερες ποιότητες σε κατεργασίες κοπής είναι οι C-2, σύμφωνα με το πρότυπο ISO K20 [21]. Οι Dearnley, Gearson και Aucote [22], επιβεβαίωσαν ότι οι K ποιότητες καρβιδίων είναι οι καλύτερες, αφού είχαν διεξάγει πολλά πειράματα τόννευσης Ti-6Al-4V με διάφορα υλικά κοπτικού εργαλείου. Συγκεκριμένα, η πρότασή τους ήταν ότι τα συγκεκριμένα WC/Co κράματα με μία περιεκτικότητα της τάξης του 6% κατά βάρος για το κοβάλτιο και

ένα μέτριο μέγεθος κόκκου του βολφραμίου (περίπου 0.8 έως 1.4 μm) δίνουν τη βέλτιστη απόδοση. Μία ακόμη πρόταση είναι ότι κοπτικά εργαλεία που είναι κατασκευασμένα από τα συγκεκριμένα καρβίδια και επιπλέον έχουν υποστεί εμφύτευση είτε ατόμων χλωρίου είτε ατόμων ινδίου, είναι πολύ αποτελεσματικά στη μηχανική κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του. [23]

Από την άλλη, έχει αποδειχτεί ότι σκληρομέταλλα που κάνουν χρήση διαφόρων ποιοτήτων χάλυβα (P ποιότητες σύμφωνα με το πρότυπο ISO), δεν είναι κατάλληλα για την κατεργασία τιτανίου και των κραμάτων του λόγω του μεγαλύτερου ρυθμού φθοράς των αναμεμιγμένων κόκκων από τους οποίους αποτελούνται, σε σχέση με τους κόκκους WC αλλά και λόγω των θερμικών τους ιδιοτήτων. Όλα τα εργαλεία που εξετάστηκαν με τέτοια καρβίδια και διάφορες επικαλύψεις όπως TiC, TiCN, TiN-TiC, Al_2O_3 -TiC, TiN-Ti(C,N)-TiC, Al_2O_3 , HfN και TiB_2 , επίσης εμφανίζουν υψηλότερους ρυθμούς φθοράς σε σχέση με τα απλά καρβίδια του βολφραμίου WC/Co. ([14], [15]) Οι Ezugwu και Pashby [24] έχουν ωστόσο αναφέρει ότι μία ένωση πολύ λεπτόκοκκου TiN/χάλυβα με μία επικάλυψη ενός στρώματος TiN (με χρήση της τεχνικής PVD) μπορεί να παρουσιάσει εξαιρετική απόδοση κατά το μετωπικό φρεζάρισμα κράματος τιτανίου.

Γενικής χρήσης ταχυχάλυβες (όπως τα M1, M2, M7 και M10) είναι συχνά κατάλληλοι στην κατεργασία τιτανίου. Ωστόσο, τα καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται με κραματωμένους χάλυβες (όπως είναι οι M33, M40 και M42).

Όσον αφορά στα κεραμικά, παρά το γεγονός ότι έχουν βελτιωθεί αρκετά ως προς την ποιότητά τους και έχουν βρει πολλές εφαρμογές στην κατεργασία υλικών με χαμηλή κατεργασιμότητα, αναφέροντας ειδικά τα κράματα υψηλών θερμοκρασιών, όπως είναι τα κράματα με βάση το νικέλιο, ωστόσο δεν έχουν ακόμη αντικαταστήσει τα καρβίδια του βολφραμίου και τους ταχυχάλυβες, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζει η πλειοψηφία τους, της μικρής αντοχής σε θραύση και της αντίδρασής τους με το τιτάνιο. [15]

Τέλος, ο κυβικός βοριονιτρίτης CBN και το πολυκρυσταλλικό διαμάντι PCD, που είναι υλικά εξαιρετικής αντοχής, παρουσιάζουν επίσης ικανοποιητική εφαρμογή στην κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του, αλλά δεν χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του υψηλού κόστους τους. [15]

4.3. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Αρκετές μελέτες ([15], [20], [22]) έχουν διεξαχθεί με αντικείμενο τους τρόπους αστοχίας και τους μηχανισμούς φθοράς των εργαλείων όταν αυτά χρησιμοποιούνται για την κατεργασία τιτανίου και κραμάτων του. Τα κοπτικά εργαλεία αντιμετωπίζουν σοβαρά θερμικά και μηχανικά σοκ όταν χρησιμοποιούνται στην κατεργασία κραμάτων τιτανίου, με τις υψηλές θερμοκρασίες και τις υψηλές τάσεις κοπής που αναπτύσσονται επάνω ή/και κοντά στην επιφάνεια κοπής να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό φθοράς και κατ' επέκταση τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Οι κυριότεροι τρόποι αστοχίας των κοπτικών εργαλείων κατά την κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του είναι η ανάπτυξη πεδίου φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια, η ανάπτυξη φθοράς κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίττου, η απολέπιση στην περιοχή γύρω από την κόψη, οι μικροθραύσεις και η τοπική θραύση της κόψης του κοπτικού εργαλείου και η πλαστική παραμόρφωση της ακής του κοπτικού εργαλείου. Η εμφάνισή τους προέρχεται από έναν συνδυασμό παραγόντων όπως είναι η υψηλή θερμοκρασία, οι υψηλές τάσεις κοπής, η έντονη χημική δραστηριότητα του τιτανίου, η διαδικασία σχηματισμού των αποβλίττων που υπόκεινται σε διάτμηση, κλπ..

Διαφορετικά υλικά εργαλείων εμφανίζουν διαφορετικές αντιδράσεις σε διαφορετικούς μηχανισμούς φθοράς κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Λόγω της ταχείας ελάττωσης της σκληρότητάς τους καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και ξεπερνάει τους 600° C, τα εργαλεία ταχυχάλυβα υπόκεινται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση η οποία επιταχύνει το ρυθμό φθοράς τους. Η πλαστική παραμόρφωση μπορεί επίσης να συμβάλλει ιδιαίτερα και στο μηχανισμό φθοράς κοπτικών εργαλείων από άλλα υλικά κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, ιδίως στις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας, λόγω της εμφάνισης υψηλών θλιπτικών τάσεων και της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών κοντά στην κόψη. ([14], [15])

Ο Freeman [20] διεξήγαγε μια μελέτη για τη διάρκεια ζωής εργαλείων από σκληρομέταλλα με καρβίδια διαφορετικά από αυτό του βολφραμίου αλλά και εργαλείων από σκληρομέταλλα με ποιότητα WC/Co, κατά την κατεργασία δύο εμπορικά διαθέσιμων κραμάτων τιτανίου (ενός α-β κράματος και ενός β κράματος) και συμπέρανε την εμφάνιση πλαστικής παραμόρφωσης, ιδιαίτερα σε υψηλές

ταχύτητες κοπής. Επιπλέον, διαπίστωσε τη δημιουργία φθοράς κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίττου. Οι δύο προηγούμενοι παράγοντες ήταν με τη σειρά τους βασικές αιτίες για την εμφάνιση επιπλέον μηχανισμών φθοράς. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση διαπιστώθηκε ότι τα σκληρομέταλλα άλλων ποιοτήτων είναι κατώτερα από τα σκληρομέταλλα WC/Co και αυτό συμβαίνει λόγω της παρουσίας αναμεμιγμένων κόκκων καρβιδίων (όπως TiC και TaC) στην πρώτη περίπτωση. Ο μηχανισμός φθοράς ενεργεί πιο έντονα στην περίπτωση που υπάρχουν αναμεμιγμένοι κόκκοι καρβιδίων και επομένως τα εργαλεία που περιέχουν αναμεμιγμένα καρβίδια φθείρονται ταχύτερα λόγω διάχυσης σε σχέση με τα εργαλεία WC/Co και αυτό συμβαίνει λόγω του ότι αυτά τα αναμεμιγμένα καρβίδια αντιδρούν ευκολότερα με το τιτάνιο.

Σύμφωνα με τους Dearnley et al. ([15],[22]) που διεξήγαγαν παρόμοιες μελέτες, η φθορά στην επιφάνεια αποβλίττου και στην ελεύθερη επιφάνεια όλων των κοπτικών εργαλείων κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου προήλθε από μηχανισμούς διάλυσης-διάχυσης και τριβή. Ο μηχανισμός φθοράς με διάλυση-διάχυση κυριαρχεί στην επιφάνεια αποβλίττου σε όλα τα μη επικαλυμμένα σκληρομέταλλα και τα κεραμικά, εκτός από τα sialon, στα οποία επικρατεί ο μηχανισμός φθοράς με τριβή. Στην ελεύθερη επιφάνεια, ο μηχανισμός φθοράς με τριβή ελέγχει τους ρυθμούς φθοράς των κεραμικών και των σκληρομετάλλων χωρίς καρβίδιο του βολφραμίου, ενώ κυριαρχεί λιγότερο στις ελεύθερες επιφάνειες των εργαλείων από WC/Co, κάτι που πιθανώς οφείλεται στην αυξημένη σκληρότητα των κραμάτων WC/Co σε σχέση με τις υπόλοιπες ποιότητες σκληρομετάλλων. Για αυτή την κατηγορία εργαλείων, η φθορά μέσω διάλυσης-διάχυσης ελέγχει το ρυθμό φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας. Οι επικαλύψεις TiN, TiC, Al₂O₃ και HfN, τόσο στην επιφάνεια αποβλίττου όσο και στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου, φθείρονται πιο γρήγορα σε σχέση με τα μη επικαλυμμένα WC/Co είτε με μηχανισμό φθοράς διάλυσης-διάχυσης είτε με μηχανισμό φθοράς τριβής. Οι επικαλύψεις TiB₂ είναι σχετικά πιο ανθεκτικές σε σχέση με άλλες, όπως είναι για παράδειγμα τα εργαλεία CBN.

Οι Hartung και Kramer [25] πρότειναν ότι η παρουσία μιας «ζώνης ροής» στη διεπιφάνεια αποβλίττου-εργαλείου θα ελαχιστοποιήσει τη μεταξύ τους ολίσθηση και με τον τρόπο αυτό θα αυξήσει την αντοχή του εργαλείου σε φθορά. Εάν σχηματιστεί μία τέτοια ζώνη ροής, η φθορά θα περιοριστεί από το ρυθμό διάχυσης των συστατικών του εργαλείου μέσω αυτού του επιπέδου. Αυτή η διαδικασία φθοράς θεωρείται ότι θα συμβεί με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με αυτή που προκαλείται από

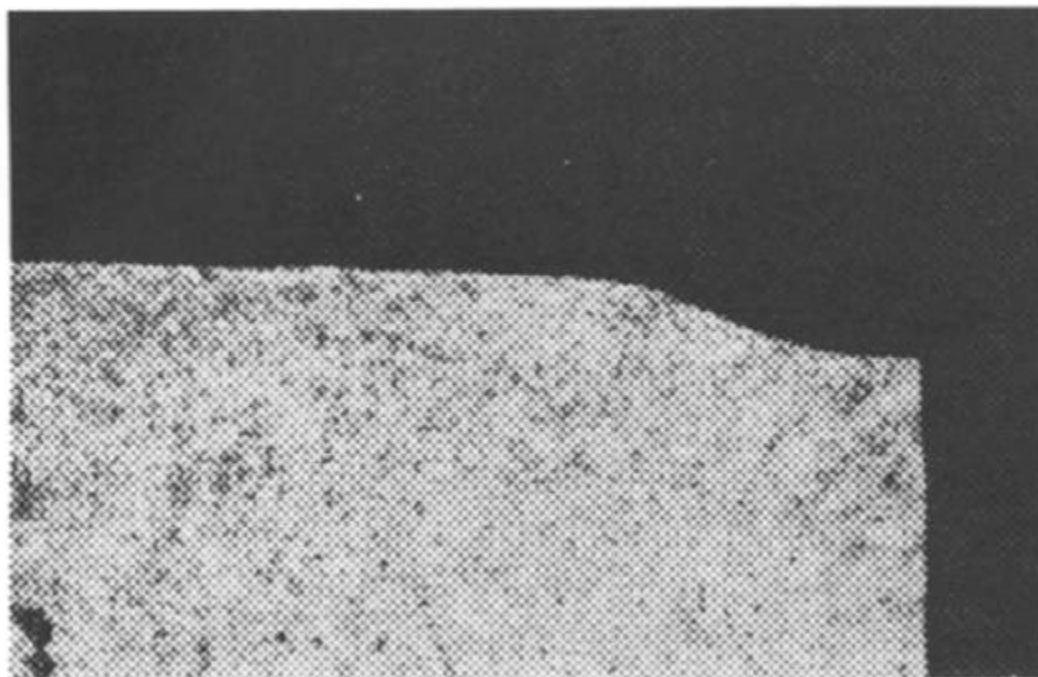
τη φυσική κίνηση του αποβλίττου κάτω από συνθήκες ολίσθησης (π.χ. μέσω τριβής). Ωστόσο, τριβή έχει εντοπιστεί σε διάφορες μηχανουργικές κατεργασίες όταν υπάρχει μία τέτοια ζώνη ροής. Με αυτό το σκεπτικό, έχει βρεθεί ότι τα σκληρομέταλλα ποιότητας WC/Co και το πολυκρυσταλλικό διαμάντι είναι τα καλύτερα υλικά για κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία τιτανίου και αυτό διότι σε αυτά τα υλικά δημιουργείται ένα σταθερό στρώμα αντίδρασης ανάμεσα στο απόβλιττο και το κοπτικό εργαλείο. Ο άνθρακας είτε από τα σκληρομέταλλα ποιότητας WC/Co είτε από το πολυκρυσταλλικό διαμάντι αντιδράει με το τεμάχιο προς σχηματισμό TiC. Αυτό λοιπόν το στρώμα αντίδρασης παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση σε παραμορφώσεις στη θερμοκρασία κοπής και προσκολλάται έντονα τόσο με το απόβλιττο όσο και με το εργαλείο. Μέσω αυτού του στρώματος, περιορίζεται η μαζική μεταφορά των συστατικών του εργαλείου από την επιφάνεια του εργαλείου και με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο ρυθμός φθοράς. Κάτι τέτοιο βέβαια έρχεται σε αντίθεση με το γεγονός ότι καρβίδια του τιτανίου που σχηματίζονται με χημική εναπόθεση ατμών στην κεφαλή του εργαλείου δεν είναι αποδοτικά στη μείωση της φθοράς. [25]

Επιπλέον αναφορές που έχουν γίνει σχετικά με τη φθορά των κοπτικών εργαλείων είναι ότι η πλαστική παραμόρφωση και η ανάπτυξη ρωγμών μέσω θερμικού σοκ είναι οι κυρίαρχοι τρόποι αστοχίας κατά την κατεργασία τιτανίου σε υψηλές ταχύτητες με σκληρομέταλλα και κεραμικά εργαλεία, ενώ ο μηχανισμός φθοράς με σχηματισμό κρατήρων συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με τη χημική σύνθεση του εργαλείου. [25]

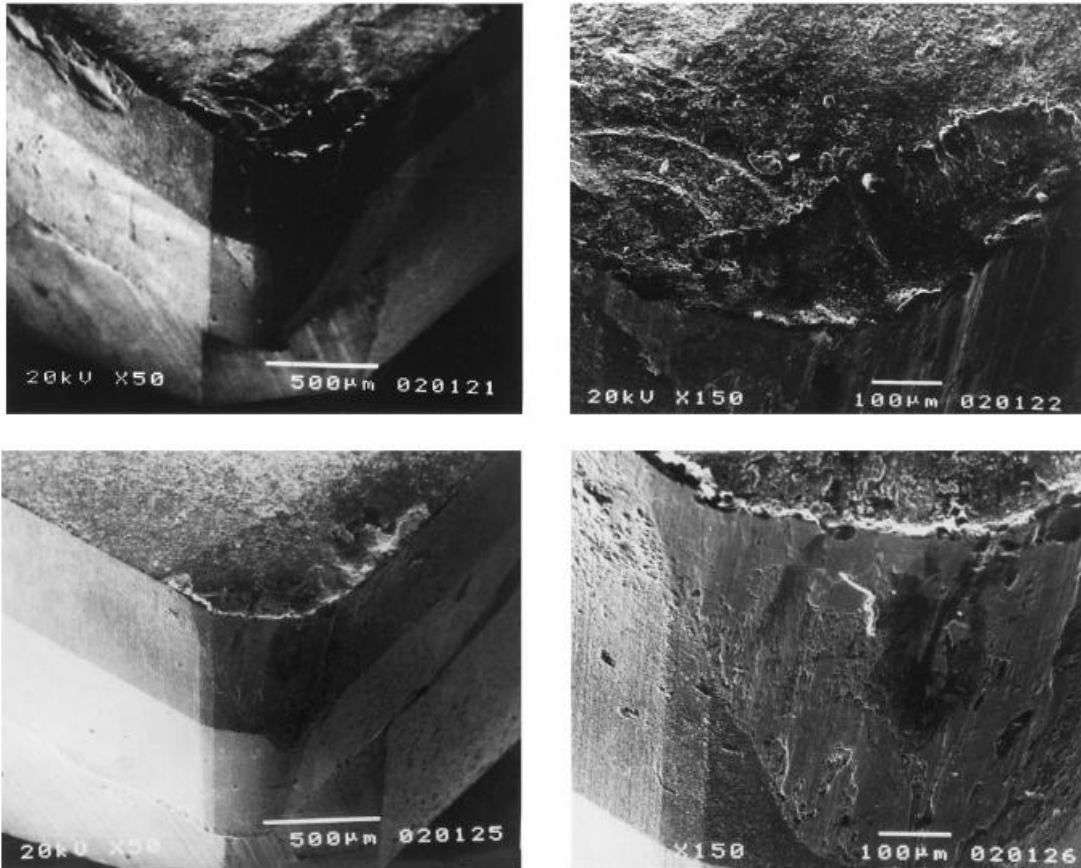
Στο φρεζάρισμα του τιτανίου με εργαλεία WC/Co με επικαλύψεις, η απολέπιση είναι ο κύριος τρόπος αστοχίας των εργαλείων. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι το αποτέλεσμα συνδυασμού υψηλής θερμοκρασίας και υψηλών θερμικών και μηχανικών τάσεων, καθώς επίσης και αποτέλεσμα του σχηματισμού συγκολλητών δεσμών του υλικού από το τεμάχιο επάνω στις επιφάνειες του εργαλείου. Σύμφωνα με τους Ezugwu και Machado [21], πριν την εμφάνιση της απολέπισης, προηγείται φθορά στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου η οποία συμβάλλει στην ενίσχυση των κρίσιμων συνθηκών οι οποίες προκαλούν την αρχική εμφάνιση της απολέπισης του εργαλείου. Οι Min και Youzhen [26] ισχυρίστηκαν ότι στην περιοχή της επιφάνειας του εργαλείου σχηματίζεται ένα στρώμα πλούσιο σε καρβίδια, ενώ στην περιοχή κάτω από την επιφάνεια του εργαλείου σχηματίζεται ένα στρώμα φτωχό σε καρβίδια λόγω διάχυσης ανάμεσα στο εργαλείο και το τεμάχιο. Αυτή η ανακατανομή του άνθρακα οδηγεί σε αποδυνάμωση της επιφάνειας και σε υψηλή ευαισθησία του

εργαλείου, που με τη σειρά τους βοηθούν στην απολέπιση και την αύξηση του ρυθμού αστοχίας του εργαλείου. Οι Bhattacharyya et al. [27] βρήκαν πως σε υψηλές ταχύτητες κοπής, η υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται επιτρέπει την ύπαρξη χημικών αντιδράσεων ανάμεσα στο τεμάχιο και τις στρώσεις επικάλυψης του εργαλείου, επομένως τα στρώματα αυτά γρήγορα απομακρύνονται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υπόστρωμα του κοπτικού εργαλείου να δρα ως κόψη, σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.

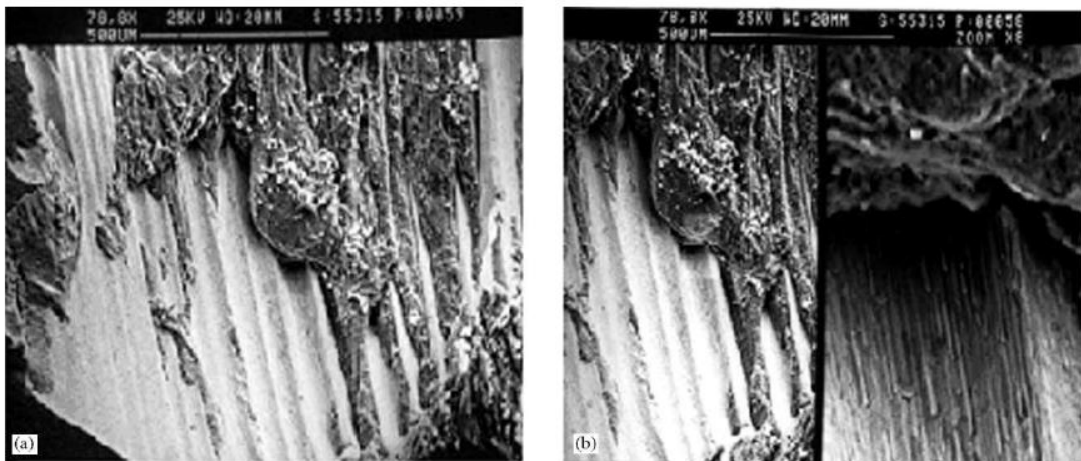
Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται χαρακτηριστικά η φθορά ενός κοπτικού εργαλείου στην επιφάνεια αποβλίττου κατά την κατεργασία ενός κράματος τιτανίου. Παρατηρούμε ότι δεν πρόκειται για την κλασική φθορά κρατήρα που εμφανίζεται κατά την κατεργασία άλλων υλικών, όπου το μέγιστο βάθος του κρατήρα συμβαίνει μακριά από την κόψη, αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση το μέγιστο βάθος εμφανίζεται εκεί που ήταν η ακμή του κοπτικού εργαλείου. Αντίστοιχα παραδείγματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.7 και 4.8.



Σχήμα 4.6: Φθορά κοπτικού εργαλείου κατά την κατεργασία κράματος τιτανίου [28]



Σχήμα 4.7: Φθορά κοπτικού εργαλείου CBN κατά την κατεργασία κράματος τιτανίου [28]



Σχήμα 4.8: Φθορά κοπτικού εργαλείου από επικαλυμμένο καρβίδιο κατά την κατεργασία κράματος τιτανίου [28]

4.4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΟΠΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Μέσω πειραματικών δοκιμών, έχουν προκύψει πολλές πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους κοπής μιας μεγάλης ποικιλίας κραμάτων τιτανίου. Ένα παράδειγμα τυπικών παραμέτρων κοπής που συχνά χρησιμοποιούνται για την κατεργασία του κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V για την κατασκευή στοιχείων κινητήρων αεροσκαφών (όπως είναι οι δίσκοι του ανεμιστήρα, τα διαχωριστικά, οι άξονες και οι δακτύλιοι στεγανότητας) παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2. [8]

- **ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ**

Η ταχύτητα κοπής έχει την πιο σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου. Αυτή η επίδραση μπορεί να φανεί από το Σχήμα 4.9 [8], το οποίο παρουσιάζει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για ένα δεδομένο κοπτικό εργαλείο για σταθερή ταχύτητα πρόωσης και βάθος κοπής. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου είναι υπερβολικά μικρή σε υψηλές ταχύτητες κοπής αλλά βελτιώνεται δραματικά καθώς η ταχύτητα κοπής μειώνεται. [29]

- **ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ**

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου είναι η ταχύτητα πρόωσης. Συχνά η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου δεν μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό από μεταβολές στη ταχύτητα πρόωσης, ωστόσο στην κατεργασία κραμάτων τιτανίου, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από αλλαγές στην ταχύτητα πρόωσης, κάτι που είναι εμφανές και από το Σχήμα 4.9. Σύμφωνα με τον Chandler [30], η κατεργασία σε υψηλές ταχύτητες πρόωσης είναι πιο κατάλληλη προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγικότητα.

- ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ

Κατά την κατεργασία τιτανίου, η επίδραση του βάθους κοπής στη διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι απαραίτητο επίσης να μελετηθεί. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10, το οποίο απεικονίζει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για δεδομένο βάθος κοπής, αύξηση του βάθους κοπής από τα 0.75 mm στα 3 mm μειώνει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου από τα 46 min στα 14 min σε ταχύτητα κοπής 60 m/min, για την τόννευση Ti-5Al-2Sn με κοπτικό εργαλείο C-2 (883) Carbide. [30]

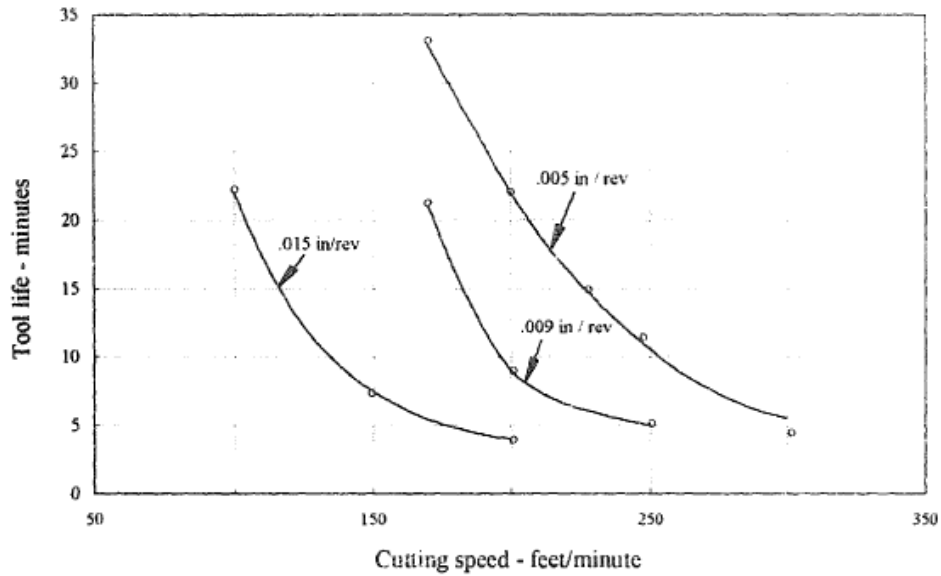
- ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Επιπλέον, κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, η γεωμετρία του εργαλείου έχει πολύ μεγάλη επίδραση στη διάρκεια ζωής του. Οι Komanduri και Reed [31] πρότειναν ότι μία νέα γεωμετρία εργαλείου, που συνίσταται από μία μεγάλη γωνία ελευθερίας (από 10° έως 15°) και μία αρκετά αρνητική γωνία αποβλίττου (από -10° έως -150°), αυξάνει τη διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου WC/Co σε πολύ μεγάλο βαθμό, σε σχέση με την τυπική γεωμετρία εργαλείου (με γωνία αποβλίττου -5° και γωνία ελευθερίας 5°). Αυτό οφείλεται στις εγγενείς ιδιότητες του τιτανίου, όπως είναι η χημική αντίδρασή του με το κοπτικό εργαλείο, καθώς επίσης και το μέτρο ελαστικότητας. Με βάση αυτές τις ιδιότητες αποδεικνύεται ότι μία γεωμετρία όπως η προηγούμενη με μεγάλη γωνία ελευθερίας και αρκετά αρνητική γωνία αποβλίττου είναι πιο αποδοτική και βοηθά στην καλύτερη εκμετάλλευση της κατεργασιμότητας του τιτανίου, σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιείται μία πιο κλασική γεωμετρία εργαλείου, όπως σε άλλα κοινά μέταλλα.

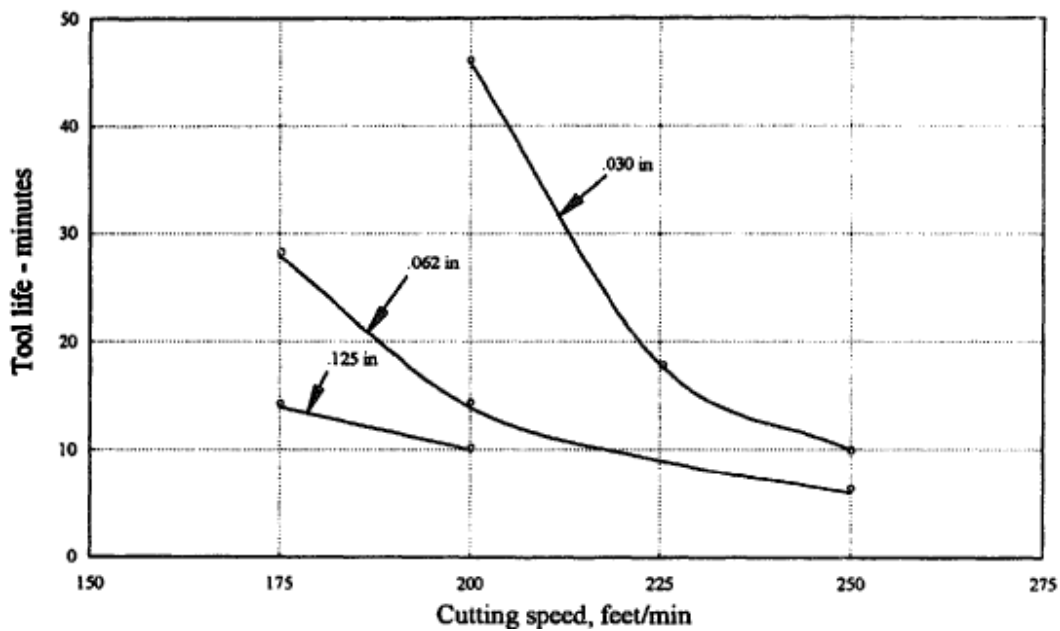
Πίνακας 4.2: Τυπικές παράμετροι της κατεργασίας Ti-6Al-4V για την κατασκευή στοιχείων κινητήρων αεροσκαφών [8]

Operation	Tool materials	Cutting speed (in./min)	Feed rate	Depth of cut (in.)
Turning (rough)	C-2	150	0.010 in./rev.	0.250
Turning (finish)	C-2	200	0.006-0.008 in./rev.	0.010-0.030
Turning (finish)	C-2	300	0.006-0.008 in./rev.	0.010-0.030
End mill (3/4-1' dia.)	M42 HSS	60	0.003 in./tooth	0.125 ¹
End mill (3/4-1' dia.)	C-10	200	0.005 in./tooth	0.150-0.200 ¹
Drill (1/4-1/2' dia.)	M42 HSS	30	0.005 in./rev.	
Drill (1/4-1/2' dia.)	C-2	40	0.004 in./rev.	
Ream	M42 HSS	20	0.010 in./rev.	
Ream	C-2	35	0.010 in./rev.	
Tap	M7 HSS	15	-	
Broach	M3 HSS	12	0.003 in./tooth max.	
Spline shape	M42 HSS	12	0.012 in. ² /stroke	

1: Αξονικό βάθος. Το ακτινικό βάθος ισούται με πάνω από τα 2/3 της διαμέτρου κοπής.



Σχήμα 4.9: Επίδραση της ταχύτητας κοπής και της πρόωσης στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου κατά την τόνρευση Ti-6Al-4V με κοπτικό εργαλείο C-2 (883) Carbide [30]



Σχήμα 4.10: Επίδραση της ταχύτητας κοπής και του βάθους κοπής στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου κατά την τόνρευση Ti-5Al-2Sn με κοπτικό εργαλείο C-2 (883) Carbide [30]

4.5. ΥΓΡΟ ΚΟΠΗΣ

Η υψηλή θερμοκρασία και οι υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται στην κόψη του κοπτικού εργαλείου είναι τα βασικότερα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Για να ελαχιστοποιηθούν αυτά τα προβλήματα, είναι απαραίτητο να γίνεται χρήση ενός υγρού κοπής σε όλες τις περιπτώσεις. Το υγρό κοπής δε λειτουργεί μόνο ως ψυκτικό μέσο αλλά επίσης λειτουργεί και ως λιπαντικό, μειώνοντας τις θερμοκρασίες στο εργαλείο και ελαχιστοποιώντας τις δυνάμεις κοπής και τη συγκόλληση του αποβλίττου, που είναι τα συχνά προβλήματα κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Η σωστή επιλογή του υγρού κοπής έχει πολύ σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Άφθονη και αδιάκοπη ροή του ψυκτικού μπορεί επίσης να προσφέρει ικανοποιητική απομάκρυνση των αποβλίττων, ελαχιστοποίηση των θερμικών σοκ των εργαλείων φρεζαρίσματος καθώς επίσης και να εμποδίσει την ανάφλεξη των αποβλίττων, ειδικά κατά τη λείανση του τιτανίου. Επιπλέον, η τροφοδοσία του ψυκτικού μέσου με υψηλή πίεση μπορεί να οδηγήσει σε μικρά, ασυνεχή και εύκολα διασπώμενα απόβλιττα, σε αντίθεση με τα μεγάλα συνεχή απόβλιττα που δημιουργούνται κατά την κατεργασία με μία συμβατική παροχή του ψυκτικού μέσου. ([8], [30], [32])

Οι Catt και Milwain [33] πρότειναν ότι η χρήση ενός γαλακτώματος ελαίου με παροχή υψηλής πίεσης δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ αυτά που αποτελούνται από φωσφορικά άλατα δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα, λόγω των πολύ καλών ψυκτικών τους ιδιοτήτων και των εξαιρετικών αντί-συγκολλητικών ιδιοτήτων τους με χρήση κατάλληλου λιπαντικού. Ωστόσο, προβλήματα δημιουργούνται λόγω της δραστηριότητας του υγρού, η οποία προκαλεί διάβρωση στο κοπτικό εργαλείο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ενώσεις του χλωρίου χρησιμοποιούνται λόγω της αναμφισβήτητης υπεροχής τους σε συγκεκριμένες κατεργασίες, όπως είναι η λείανση. Επιπλέον, έχει βρεθεί ότι ενώσεις του θείου όταν χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή πτερυγίων στροβίλου από κράματα του τιτανίου, δημιουργούν πρόβλημα στα πτερύγια. Από την άλλη, υγρά κοπής που αποτελούνται από χλωριωμένους υδρογονάνθρακες είναι επίσης αποδοτικά, αλλά έχουν απομακρυνθεί λόγω της τοξικότητάς τους. [33]

Οι Konig και Schroder [32] από την άλλη πρότειναν ότι η εφαρμογή ψυκτικών θα μπορούσε να καταστείλει τη δημιουργία ψευδοκόψης που γενικά παρατηρείται κατά ο μετωπικό φρεζάρισμα του τιτανίου με εργαλεία HSS και εργαλεία καρβιδίων. Επιπλέον, δοκιμές των Konig και Schroder [32] έδειξαν ότι η χρήση ψυκτικών ως συμπυκνώματα, γαλακτώματα ή διαλύματα σε μία βάση ορυκτελαίου ή μη ή σε μία βάση συνθετική χρησιμοποιώντας ψεκασμό υγρού ή ψεκασμό μέσω ψύξης, προκαλεί περισσότερη φθορά ακόμα και από την ξηρά κοπή. Παρομοίως, άλλα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από το Air Force Materials Laboratory [29] έδειξαν ότι υγρά κοπής που περιέχουν ενώσεις του χλωρίου δεν παρέχουν πάντα υψηλότερη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Σύμφωνα με τα πειράματα αυτά, για συγκεκριμένα κράματα τιτανίου και συγκεκριμένες κατεργασίες, προτιμάται η ξηρά κοπή, κάτι που συμφωνεί με τις παρατηρήσεις των Konig και Schroder [32]. Τα υγρά κοπής που είναι πολύ πλούσια σε ενώσεις χλωρίου μπορούν ωστόσο να χρησιμοποιηθούν σε άλλες κατεργασίες, όπως είναι η διάτρηση.

Σύμφωνα με τον Chandler [30], υγρά κοπής με βάση το νερό είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τα έλαια. Ο Chandler [30] βρήκε ότι ένα ασθενές διάλυμα αναστολέα σκουριάς ή/και νερού – λαδιού (5-10%) είναι το πιο ιδανικό υγρό κοπής για κατεργασίες υψηλής ταχύτητας. Από την άλλη, οι κατεργασίες χαμηλής ταχύτητας και οι πιο πολύπλοκες κατεργασίες μπορεί να απαιτούν έλαια με ενώσεις χλωρίου ή ενώσεις θείου, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι δυνάμεις τριβής και η τάση του τιτανίου να συγκολλάται στο κοπτικό εργαλείο. Ο Chandler [30] υπογράμμισε ότι τα υγρά κοπής με ενώσεις χλωρίου πρέπει να χρησιμοποιούνται με μεγάλη προσοχή λόγω της πιθανότητας να προκαλέσουν ανάπτυξη τάσεων και ρωγμών από διάβρωση.

Μία σειρά πειραμάτων [34] επάνω στο ζήτημα των υγρών κοπής με ενώσεις χλωρίου πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία. Βρέθηκε ότι η κατεργασία του τιτανίου με λιπαντικό που αποτελείται από ενώσεις χλωρίου οδηγούσε στο σχηματισμό επιφανειακών στρωμάτων πάχους ίσου ή μικρότερου από 150 μm με περιεκτικότητα σε ενώσεις χλωρίου ίση με το πολύ 3% κ.ό.. Παρόμοιες επιφανειακές στρώσεις πάχους 100 – 150 μm και με περιεκτικότητα 1.5% κ.ό. δημιουργούνταν κατή την κατεργασία τιτανίου με χρήση απιονισμένου νερού. Τα συγκεκριμένα πειράματα λοιπόν κατέληξαν στο ότι η απαγόρευση των λιπαντικών που αποτελούνται από ενώσεις χλωρίου για την κατεργασία τιτανίου δεν είναι δικαιολογημένη.

4.6. ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

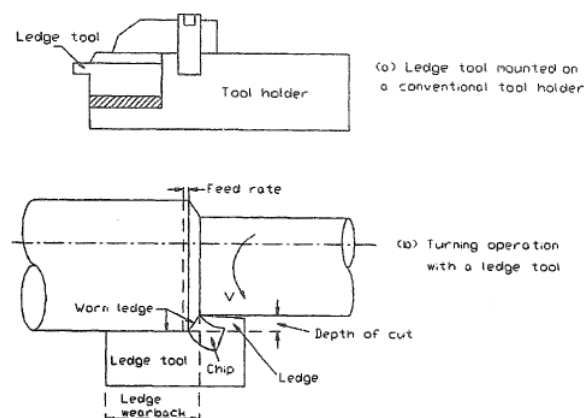
Όσον αφορά στο τιτάνιο και τα κράματά του, η αδυναμία να σημειωθεί βελτίωση στην απόδοση των εργαλείων κοπής με την ανάπτυξη νέων υλικών για τα εργαλεία κοπής, έχει αποδειχτεί πολύ απογοητευτική. Παρομοίως, πολύ μικρή βελτίωση στην παραγωγικότητα έχει επιτευχθεί με τη διερεύνηση νέων συνδυασμών των τιμών της ταχύτητας κοπής, της πρόωσης και του βάθους κοπής. Ωστόσο, η βελτίωση της παραγωγικότητας και η αύξηση της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων έχουν επιτευχθεί με την ανάπτυξη ειδικών τεχνικών κατεργασίας οι οποίες περιλαμβάνουν ειδικά σχεδιασμένα εργαλεία.

Η πρώτη κατηγορία εργαλείων που χρησιμοποιείται στην κατεργασία του τιτανίου χαρακτηρίζεται από λεπτή κόψη και ένα επιπλέον στέλεχος, το οποίο προεξέχει της κόψης κατά μήκος ίσο με το επιθυμητό βάθος κοπής, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Τα εργαλεία αυτά που έχουν αναπτυχθεί από τη General Electric Company [35] παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι εμφανίζουν μειωμένη ανάπτυξη πεδίου φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια κατά την κατεργασία. Καθώς προχωράει η κατεργασία, η ανάπτυξη του πεδίου φθοράς φτάνει στη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια δρα το μεγαλύτερο στέλεχος χωρίς περαιτέρω ανάπτυξη του πεδίου φθοράς, λόγω περιορισμού της ελεύθερης επιφάνειας. Με τον τρόπο αυτό, τα εργαλεία λειτουργούν για μεγαλύτερο διάστημα, καθώς η διάρκεια ζωής του εργαλείου δεν περιορίζεται από την έκταση του πεδίου φθοράς στην κόψη. Λόγω της περιορισμένης γεωμετρίας τους, τα συγκεκριμένα εργαλεία εφαρμόζονται μόνο σε συγκεκριμένες κατεργασίες, όπως είναι η τόννευση, η διάτρηση, το μετωπικό και το περιφερειακό φρεζάρισμα. [35]

Δεύτερη κατηγορία εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του είναι περιστροφικά εργαλεία στη μορφή κυκλικών δίσκων που περιστρέφονται γύρω από τον κύριο άξονά τους σε συνδυασμό με την κύρια κίνησή τους και την πρόωσή τους. Τα εργαλεία αυτά φαίνονται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.12. Έχει αποδειχτεί ότι τα συγκεκριμένα περιστροφικά εργαλεία βοηθούν στη μείωση των θερμοκρασιών κοπής κατά αρκετές εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.13 το οποίο παρουσιάζει χαρακτηριστικές καμπύλες ταχύτητας κοπής – θερμοκρασίας κοπής με χρήση ενός συμβατικού εργαλείου κοπής

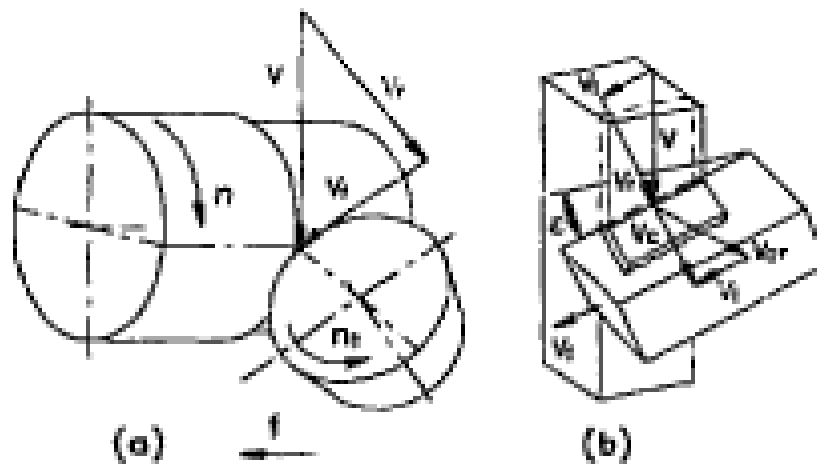
και ενός εργαλείου περιστροφικής κοπής κατά την κατεργασία Ti-6Al-4V. Οι βελτιώσεις της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων είναι σημαντικές κατά την κατεργασία υλικών με μικρή κατεργασιμότητα χρησιμοποιώντας περιστροφικά εργαλεία, λόγω στην υψηλή αντίσταση σε φθορά που εμφανίζουν τα συγκεκριμένα εργαλεία, και η οποία οφείλεται σε κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η συνεχής μετατόπιση της ακμής κοπής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και οι μειωμένες θερμοκρασίες κοπής τις οποίες προκαλούν. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.14, όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη του πεδίου φθοράς συναρτήσει του χρόνου της κατεργασίας για ένα συμβατικό εργαλείο κοπής και ένα εργαλείο περιστροφικής κοπής. [36] Οι Komanduri et al. [35] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η διάρκεια ζωής των εργαλείων είναι σχεδόν 7 φορές μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών εργαλείων κοπής κατά την κατεργασία Ti-6Al-4V με περιστροφικά εργαλεία σε πολύ υψηλές ταχύτητες πρόωσης (μεγαλύτερες από 1 mm/rev) και επιτυγχάνεται χωρίς να επηρεάζεται καθόλου η ποιότητα της επιφάνειας και η σταθερότητα της κατεργασίας. Καθώς η κόψη είναι κυκλική, τα περιστροφικά εργαλεία μπορούν να οδηγήσουν σε μία πολύ καλή ποιότητα της επιφάνειας, υπό την προϋπόθεση ότι το εργαλείο ως συναρμολογημένο σύνολο είναι σταθερό.

Παρά το γεγονός ότι η βελτίωση της διάρκειας ζωής των εργαλείων που επιτυγχάνεται με χρήση περιστροφικής κοπής είναι πολύ σημαντική, πολύ λίγες είναι οι βιομηχανικές εφαρμογές τους που έχουν αναφερθεί. Οι λόγοι που συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι η χαμηλή αποδοτικότητά τους στην κατεργασία πολύπλοκων επιφανειών και η απαίτηση για την ύπαρξη στιβαρών μηχανών ή μικρού φορτίου. ([35], [36])

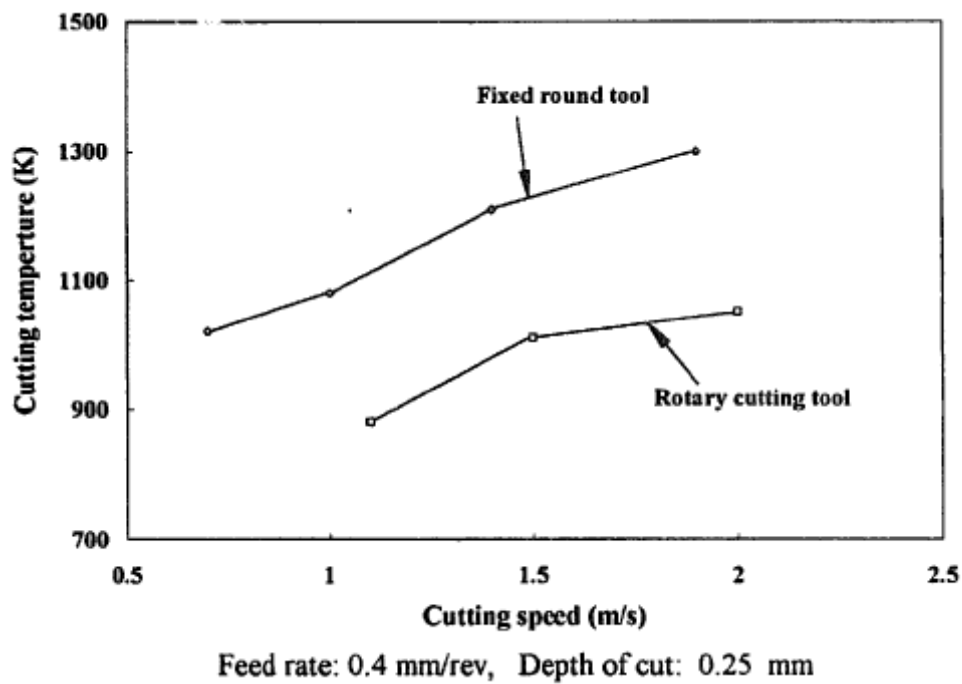


Σχήμα 4.11: Ειδική κατηγορία εργαλείων για κατεργασία τιτανίου και κραμάτων του

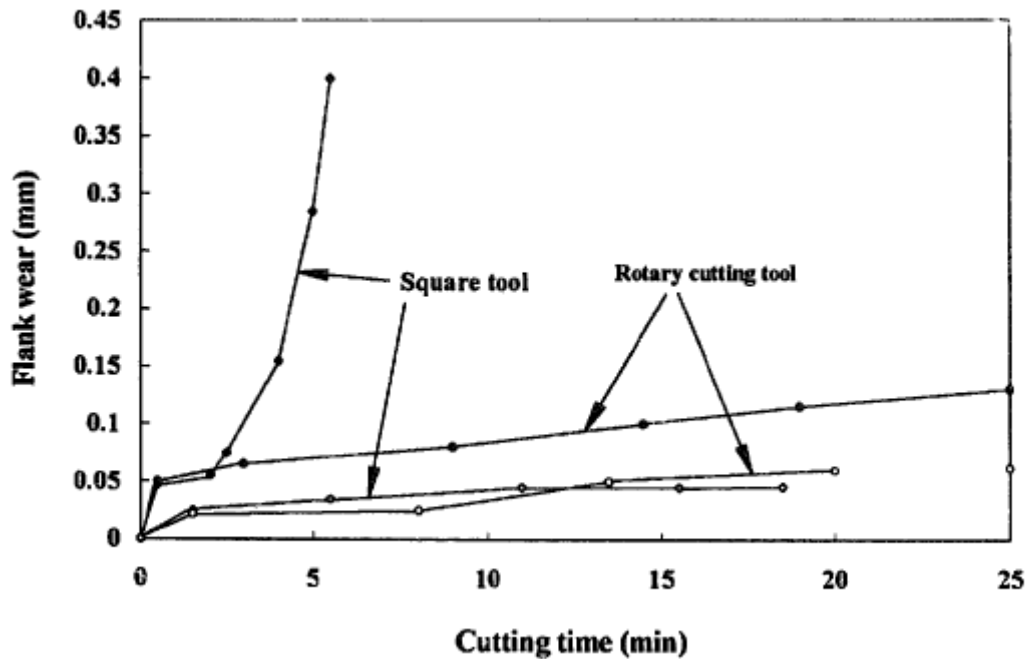
[35]



Σχήμα 4.12: Περιστροφικά εργαλεία για την κατεργασία τιτανίου και κραμάτων του [36]



Σχήμα 4.13: Χαρακτηριστικές καμπύλες ταχύτητας κοπής – θερμοκρασίας κοπής με χρήση ενός συμβατικού εργαλείου κοπής και ενός εργαλείου περιστροφικής κοπής κατά την κατεργασία Ti-6Al-4V [36]



Σχήμα 4.14: Εξέλιξη του πεδίου φθοράς συναρτήσει του χρόνου της κατεργασίας για ένα συμβατικό εργαλείο κοπής και ένα εργαλείο περιστροφικής κοπής [36]

4.7. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Το τιτάνιο γενικώς χρησιμοποιείται ως ένα υλικό για την κατασκευή εξαρτημάτων που απαιτούν μεγάλη αξιοπιστία και επομένως είναι απαραίτητο να διατηρείται καλή ποιότητα επιφάνειας. Ωστόσο, η επιφάνεια των κραμάτων τιτανίου εύκολα φθείρεται κατά τη διάρκεια της κοπής και της λείανσης λόγω της χαμηλής κατεργασιμότητάς τους, με τη φθορά να εμφανίζεται με τη μορφή μικρορωγμών, ψευδοκοπής, πλαστικής παραμόρφωσης, θερμικά επηρεασμένων ζωνών και παραμενουσών τάσεων. Συγκεκριμένες μελέτες όσον αφορά τις παραμέτρους που σχετίζονται με την ποιότητα της επιφάνειας (όπως είναι η μικροσκληρότητα, η τραχύτητα της επιφάνειας και οι παραμένουσες τάσεις) έχουν διεξαχθεί. [37]

Κατά την κατεργασία τιτανίου με απότομο τρόπο, όπως για παράδειγμα με ένα πολύ αμβλύ εργαλείο, υπάρχει η πιθανότητα να παραχθεί ένα υπερθερμασμένο στρώμα, το οποίο μπορεί να χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ή μικρότερη σκληρότητα σε σχέση με τα υλικά βάσης. Ωστόσο, τόσο κατά τη διάρκεια τόσο μιας απότομης όσο και μιας ήπιας κατεργασίας των κραμάτων τιτανίου, εμφανίζονται θλιπτικές παραμένουσες τάσεις, των οποίων οι τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα με

τις συνθήκες κατεργασίας (όπως είναι η ταχύτητα κοπής). Κατά τη λείανση, εάν αυτή γίνεται με απότομο τρόπο, παράγονται πολύ υψηλές εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια, ενώ αν γίνεται με ήπιο τρόπο, τότε παράγονται χρήσιμες, ήπιες, θλιπτικές τάσεις. Επιπλέον, στις απότομες κατεργασίες, οι επιφάνειες υποφέρουν και από παραμόρφωση και μικρορωγμές, τα οποία συνεισφέρουν με τη σειρά τους τόσο στη μείωση της αντοχής σε κόπωση όσο και της αντοχής σε τάσεις από διάβρωση, σε συνδυασμό με τις παραμένουσες τάσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. [8]

5. ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

Έχοντας περιγράψει τα βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν την κατεργασιμότητα του τιτανίου και των κραμάτων του, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η μελέτη διαφόρων περιπτώσεων που σχετίζονται με την κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Στη συνέχεια λοιπόν περιγράφονται συγκεκριμένες μελέτες που έχουν διεξαχθεί από διάφορους ερευνητές, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν συγκεκριμένες περιπτώσεις κατεργασίας του τιτανίου. Στην πρώτη γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης δύο διαφορετικών κραμάτων τιτανίου, προκειμένου να αποδειχτεί πώς και κατά πόσο η διαφορετική δομή δύο κραμάτων τιτανίου είναι αρκετή να επιφέρει σημαντικές διαφορές στις συνθήκες κατεργασίας τους και στα αναπτυσσόμενα μεγέθη. Στη δεύτερη συγκρίνονται διαφορετικά κοπτικά εργαλεία κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας αναφορικά με το κοπτικό εργαλείο. Στην Τρίτη συγκρίνονται διαφορετικές μέθοδοι λίπανσης κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, προκειμένου να μελετηθεί η επίδρασή τους στο τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας. Με αυτές τις 3 μελέτες θεωρούμε ότι καλύπτονται ορισμένες από τις βασικότερες παραμέτρους που σχετίζονται με την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου.

5.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ Ti-Al-4V ΚΑΙ Ti555.3

Αρχικά, περιγράφεται μία μελέτη που διεξήχθη από τους Arrazola et al., στην οποία γίνεται σύγκριση της κατεργασιμότητας ανάμεσα σε δύο διαφορετικά κράματα τιτανίου, προκειμένου να διαπιστωθεί η σημασία της διαφορετικής σύστασης των κραμάτων στην τελική κατεργασιμότητα του υλικού. Συγκεκριμένα, τα κράματα τα οποία εξετάζονται είναι το Ti-6Al-4V και το Ti555.3. [38]

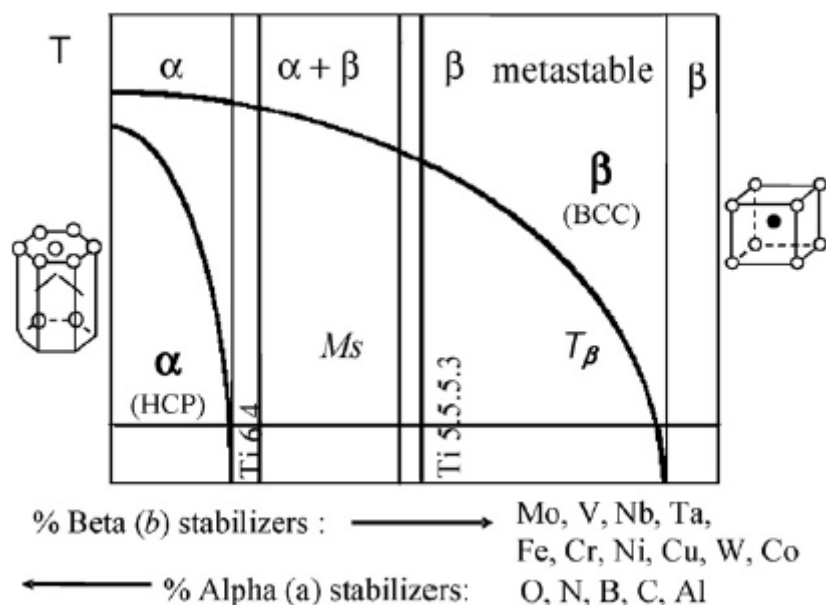
Το Ti-6Al-4V είναι το πιο συνηθισμένο κράμα τιτανίου, το οποίο ανήκει στην ομάδα κραμάτων α-β και αντιστοιχεί σε ποσοστό μεγαλύτερο του 45% της συνολικής παραγωγής κραμάτων τιτανίου. Ωστόσο, προκειμένου να εξοικονομηθεί βάρος, όλο και περισσότερα νέα κράματα αναπτύσσονται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι

ιδιότητες και οι εφαρμογές νέων β-κραμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται από εταιρίες αεροδιαστημικής διότι παρουσιάζουν έναν άριστο συνδυασμό αντοχής σε θραύση, υψηλής αντοχής, απλούστερης κατεργασίας και μεγαλύτερης σκληρότητας. Ένα από τα πιο πρόσφατα ανεπτυγμένα κράματα είναι το Ti555.3, το οποίο μπορεί να υποστεί θερμική επεξεργασία με υψηλές αντοχές, με τις μικρότερες τιμές αντοχής σε εφελκυσμό να ξεπερνούν τα 1200 MPa. Αυτή η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό καθιστά το συγκεκριμένο κράμα ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για απαιτητικές εφαρμογές, σε σχέση με τα παραδοσιακά κράματα τιτανίου, όπως είναι το Ti555.3. [38]

Στη συγκεκριμένη μελέτη, γίνεται μία προσπάθεια υπολογισμού της κατεργασιμότητας των δύο κραμάτων τιτανίου, προκειμένου να εκτιμηθεί η σημασία της διαφορετικής σύστασης των δύο κραμάτων στην κατεργασιμότητά τους και να διαπιστωθεί το κατά πόσο μπορεί να διαφέρει η κατεργασιμότητα των κραμάτων τιτανίου όχι μόνο σε σχέση με άλλα υλικά αλλά και ανάμεσα στα διαφορετικά κράματα. [38]

5.1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΚΡΑΜΑΤΩΝ

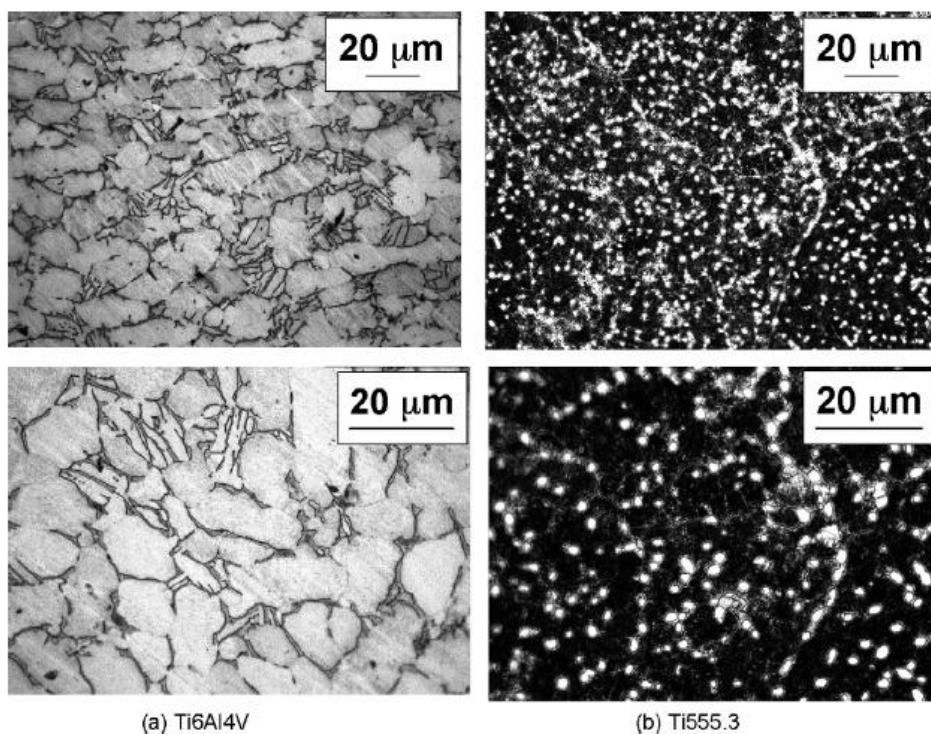
Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα φάσεων των κραμάτων τιτανίου, όπου διακρίνεται η ταξινόμηση των κραμάτων στις κατηγορίες που ήδη έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2. Στο συγκεκριμένο Σχήμα 5.1 παρατηρούμε και τη θέση των δύο κραμάτων που εξετάζονται στη συγκεκριμένη μελέτη στο διάγραμμα φάσεων. Τα δύο κράματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στη μικροδομή τους, όσον αφορά στο μέγεθος και τη μορφολογία των διαφόρων φάσεων από τις οποίες συνίστανται όσο επίσης και στο μέγεθος των κόκκων τους. Το κράμα Ti555.3 έχει μία μετασταθή β-δομή και ανήκει στην οικογένεια των σχεδόν β-κραμάτων. Αυτό το χαρακτηριστικό του οφείλεται στην παρουσία β-σταθεροποιητών όπως είναι τα στοιχεία Mo, V, Fe, Cr κ.ά.. [38]



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα φάσεων των κραμάτων τιτανίου, όπου παρουσιάζεται και η θέση των κραμάτων Ti-6Al-4V και Ti555.3 [38]

Η διαφορετική μικροδομή των δύο κραμάτων παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5.2. Συγκεκριμένα, στο κράμα Ti-6Al-4V κυριαρχεί κατά 80% η α-φάση, ενώ στο κράμα Ti555.3 περιέχεται κατά 20% η α-φάση, σε συνδυασμό με την α-β-φάση. [38]

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται αναλυτικά τόσο η χημική σύσταση των δύο κραμάτων, όσο και το ποσοστό των διαφορετικών σταθεροποιητών που καθορίζουν κάθε φάση, αλλά και οι μηχανικές ιδιότητες των δύο κραμάτων. Ο λόγος που στο συγκεκριμένο Πίνακα 5.1 αναφέρονται και οι τιμές των ισοδύναμων παραμέτρων Al και Mo, είναι ότι με βάση τις συγκεκριμένες τιμές μπορούν να ταξινομηθούν τα κράματα τιτανίου. Η ισοδύναμη τιμή του Al υποδεικνύει την ικανότητα του εκάστοτε κράματος να αποκτήσει μια δεδομένη σκληρότητα, ενώ η αντίστοιχη τιμή του Mo υποδεικνύει την ικανότητα του κράματος να αποκτήσει δεδομένη αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) και σκληρότητα σε μακροπρόθεσμο στάδιο. Το σχεδόν β-κράμα Ti555.3 χαρακτηρίζεται από ισοδύναμη τιμή του Mo περίπου 8 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του κράματος Ti-6Al-4V και αυτό το γεγονός μπορεί να εξηγήσει τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες του πρώτου κράματος σε σχέση με το παραδοσιακό δεύτερο κράμα. Κατ' επέκταση, αυτό μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην κατεργασιμότητα των δύο κραμάτων. [38]



Σχήμα 5.2: Διαφορετική μικροδομή των κραμάτων Ti-6Al-4V και Ti555.3 [38]

Πίνακας 5.1: Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Ti-6Al-4V και Ti555.3 [38]

Table 1 - Chemical composition in weight percent, Al and Mo equivalent values, and mechanical properties for the two Ti alloys															
Titanium alloy	Chemical composition (%)							Al equiv value ^a (%)	Mo equiv value ^b (%)	Transus beta (°C)	TYS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Hard.HB ±5	Tensile strength, 400 °C (MPa)
	Al	Mo	V	Fe	Cr	Sn	Zr								
Ti6Al4V	6	-	4	-	-	-	-	7	2.5	995	900	1000	18	241	550
Ti555.3	5	5	5	0.3	3	-	-	5	19	860	1050	1200	10	270	860

^a Al equiv. weight value (%) = $Al + Sn/3 + Zr/6 + 10(O^2 + N^2)$.

^b Mo equiv. weight Value (%) = $Mo + 2V/3 + Nb/3 + 3(Fe + Cr)$.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, αναμένεται να εντοπίζονται μεγαλύτερες δυσκολίες κατά την κατεργασία του κράματος Ti555.3 σε σχέση με το κράμα Ti-6Al-4V, λόγω των εξής παραγόντων: 1) των διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων, και κυρίως της σκληρότητας και της αντοχής σε εφελκυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες, περίπου στους 400° C, 2) της διαφοράς στη μικροδομή των δύο κραμάτων με το

μεταβλητό μέγεθος της α -φάσης και 3) της διαφορετικής μορφολογίας της β -φάσης ανάμεσα στα δύο κράματα. [38]

5.1.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα πειράματα στη συγκεκριμένη μελέτη διεξήχθησαν σε τόρνο CNC (Σχήμα 5.3). Οι διάμετροι των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν κυμαίνονταν από 150 έως 400 mm. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ανομοιογένειες στα κατεργασμένα δοκίμια, η κατεργασία στο πάχος του υλικού, το οποίο κυμαινόταν από 10 έως 20 mm, γινόταν στην εξωτερική του διάμετρο. Στα δοκίμια από κράμα Ti-6Al-4V είχε προηγηθεί βαφή και ανόπτηση ενώ στα δοκίμια από κράμα Ti555.3 είχε προηγηθεί επεξεργασία με διάλυμα και γήρανση πριν τις πειραματικές δοκιμές. [38]



Σχήμα 5.3: Τόρνος για την κατεργασία των δοκιμίων από κράμα τιτανίου [38]

Προκειμένου να γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων υπάρχουν πολλές μέθοδοι. Στη συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιείται η σχέση ανάμεσα στη φθορά του εργαλείου και την ταχύτητα κοπής. Αυτό γίνεται, προκειμένου να εκτιμηθεί σε κάθε περίπτωση κράματος η μέγιστη ταχύτητα κοπής, δηλαδή η ταχύτητα κοπής στην οποία προκύπτει ραγδαία φθορά εργαλείου. [38]

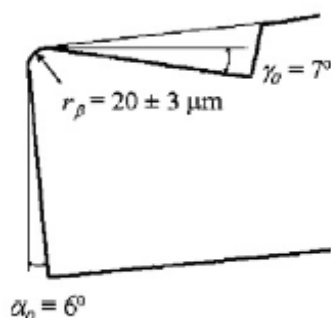
Σύμφωνα με τους Kahles et al. [8] η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγές στην πρόωση f κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Στη συγκεκριμένη μελέτη, τόσο η πρόωση f όσο και το βάθος κοπής a_p ήταν σταθερά σε όλες τις πειραματικές δοκιμές και συγκεκριμένα η πρόωση f ήταν 0.1 mm, ενώ το βάθος κοπής ήταν 2 mm. Μόνο η ταχύτητα κοπής λοιπόν μεταβαλλόταν σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδρασή της στην πειραματική διαδικασία. Σύμφωνα με τους Yang και Liu [39], κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου, ο

συνδυασμός δύο παραγόντων, δηλαδή της μικρής επιφάνειας επαφής και της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, οδηγεί σε πολύ υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες κοπής, επομένως η ταχύτητα κοπής πρέπει να είναι χαμηλή προκειμένου να αποφευχθεί πολύ μικρή διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Επομένως, στις πειραματικές δοκιμές, η ταχύτητα κοπής μεταβαλλόταν από 40 mm/min μέχρι 90 mm/min για το κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V και από 40 mm/min μέχρι 60 mm/min για το κράμα τιτανίου Ti555.3. Υψηλότερες ταχύτητες οδηγούσαν σε μεγαλύτερη φθορά εργαλείου σε μικρότερες χρονικές περιόδους.

Τα κριτήρια που εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων βασίζονται στο πρότυπο ISO3685, σύμφωνα με το οποίο το πέρας της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου επέρχεται όταν η μέση τιμή του πεδίου φθοράς (VB) φτάνει τα 0.3 mm για διάρκεια κατεργασίας ίση με 15 min. [38]

Όσον αφορά στις συνθήκες της κατεργασίας, εφαρμόστηκε μία συμβατική μέθοδος ψύξης και το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν από σκληρομέταλλο ποιότητας K15. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αφορούν το κοπτικό εργαλείο είναι (Σχήμα 5.4):

- Ακτίνα κόψης $r_e = 0.8 \text{ mm}$
- Καμπυλότητα κόψης $r_\beta = 20 \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$
- Γωνία αποβλίττου $\gamma = 7^\circ$
- Γωνία κόψης $\kappa_r = 95^\circ$
- Γωνία κλίσης κόψης $\lambda_s = -6^\circ$. [38]



Σχήμα 5.4: Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου [38]

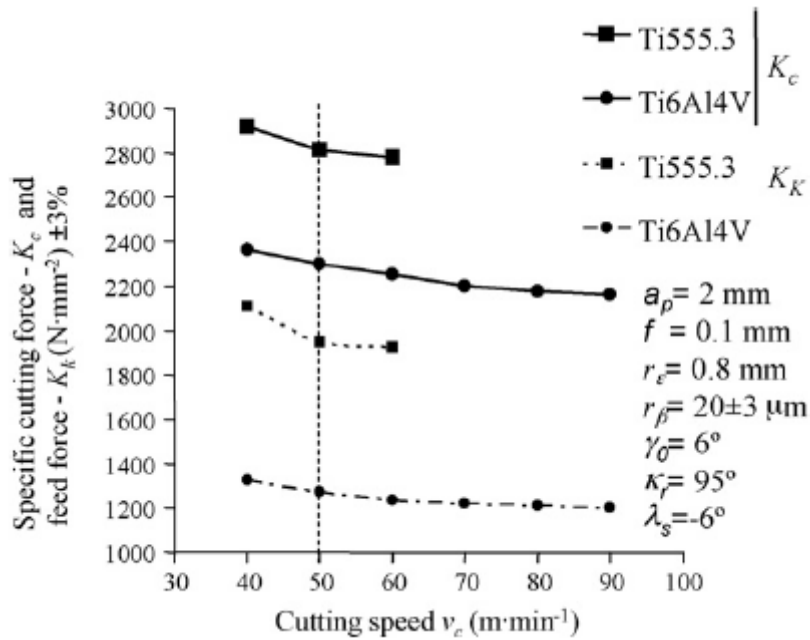
5.1.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Προκειμένου να συγκριθεί η κατεργασιμότητα των κραμάτων Ti-6Al-4V και Ti555.3, με το πέρας της κατεργασίας μετρήθηκαν και αναλύθηκαν οι εξής παράμετροι: 1) η ειδική δύναμη κοπής και η ειδική δύναμη πρόωσης, 2) η φθορά του εργαλείου, 3) η μορφολογία του αποβλίττου και 4) η επιφάνεια του αποβλίττου και η κόψη του εργαλείου μετά την κατεργασία. [38]

Ξεκινώντας από την ειδική δύναμη κοπής K_c και την ειδική δύναμη πρόωσης K_k , στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες μεταβολής των μεγεθών αυτών συναρτήσει του χρησιμοποιούμενου εργαλείου και της ταχύτητας κοπής v_c . Παρατηρούμε ότι η ειδική δύναμη κοπής K_c και η ειδική δύναμη πρόωσης K_k συμβαδίζουν με τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων, καθώς φαίνεται ότι μεγαλύτερες τιμές των μεγεθών αυτών αντιστοιχούν στο κράμα Ti555.3 και μικρότερες στο Ti-6Al-4V. Μάλιστα, η πιο έντονη διαφορά ανάμεσα στα δύο κράματα εντοπίζεται αν συγκρίνουμε την ειδική δύναμη πρόωσης K_k . [38]

Σύμφωνα με τους Arrazola et al. [40], το συγκεκριμένο μέγεθος σχετίζεται με την αναπτυσσόμενη τριβή στην επιφάνεια αποβλίττου και επομένως δείχνει το ποσό της παραγόμενης θερμότητας κατά την επαφή εργαλείου – αποβλίττου. Επομένως, υψηλότερες θερμοκρασίες αναμένονται κατά την κατεργασία του κράματος Ti555.3 σε σχέση με το Ti-6Al-4V, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

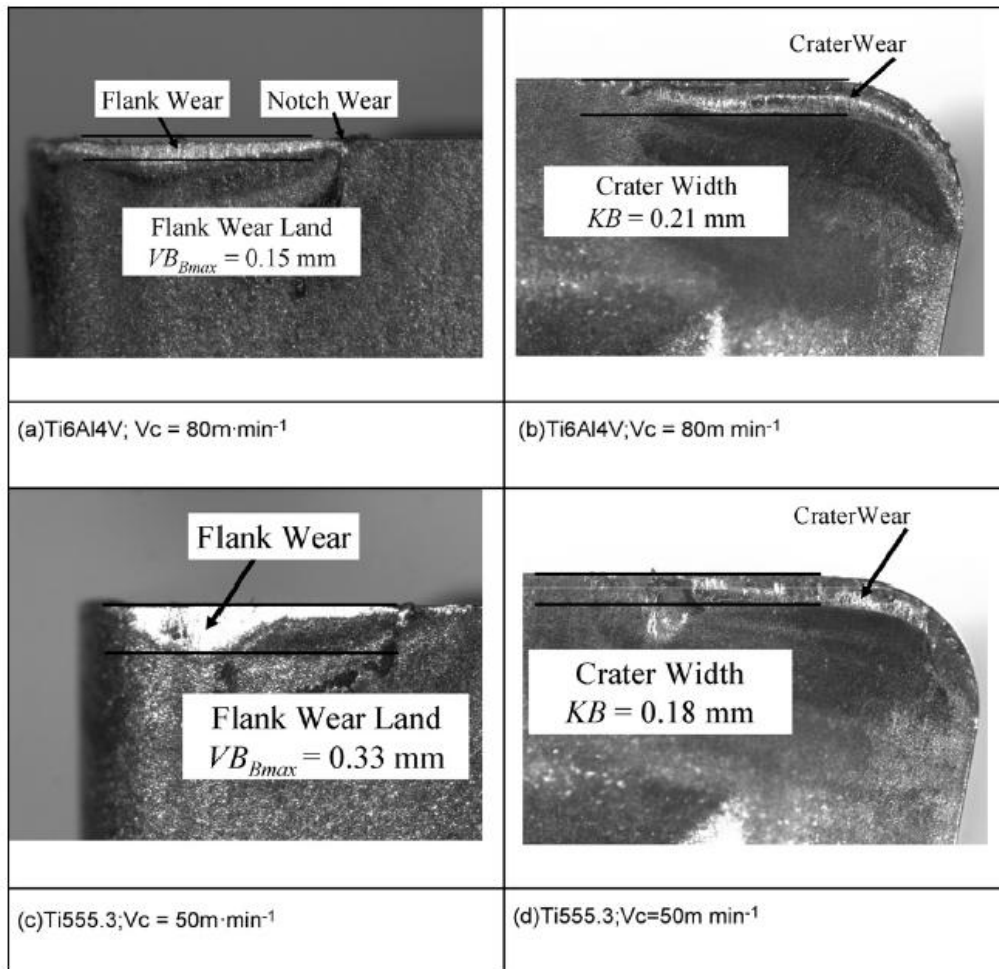
Και για τα δύο κράματα τιτανίου, παρατηρούμε ότι και ειδική δύναμη κοπής K_c και η ειδική δύναμη πρόωσης K_k μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής, λόγω της μείωσης του πάχους του αποβλίττου και των τάσεων στο τεμάχιο, που οφείλονται στις υψηλές θερμοκρασίες που παράγονται στην επιφάνεια κοπής.



Σχήμα 5.5: Μεταβολή της ειδικής δύναμης κοπής K_c και της ειδικής δύναμης πρόωσης K_k συναρτήσει της ταχύτητας κοπής v_c και του κράματος τιτανίου [38]

Προχωρώντας στη φθορά του κοπτικού εργαλείου, σύμφωνα με τους Dearnley και Grearson [22], κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, στο κοπτικό εργαλείο εμφανίζεται τόσο ανάπτυξη πεδίου φθοράς όσο και φθορά κρατήρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ελήφθη υπ' όψιν μόνο η ανάπτυξη πεδίου φθοράς και όχι η φθορά κρατήρα στο κοπτικό εργαλείο ως κριτήριο για την εύρεση της διάρκειας ζωής του, καθώς πρόκειται για τη μορφή αστοχίας που πάντα εμφανίζεται και είναι η πιο εύκολα μετρήσιμη κατά την κατεργασία.

Σύμφωνα με τους Ikuta et al. [41], κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου παρατηρείται συγκόλληση του αποβλίττου επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου. Σύμφωνα με τους Min και Youzhen [42], όταν παρατηρείται συγκόλληση του αποβλίττου επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου, η διάχυση είναι ο πιο συνηθισμένος μηχανισμός φθοράς των κοπτικών εργαλείων κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου. Αυτό οδηγεί σε φθορά κρατήρα και αποδυνάμωση της κόπης του κοπτικού εργαλείου. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται η ανάπτυξη πεδίου φθοράς και η φθορά κρατήρα του κοπτικού εργαλείου για κάθε κράμα τιτανίου σε συγκεκριμένη ταχύτητα κοπής.

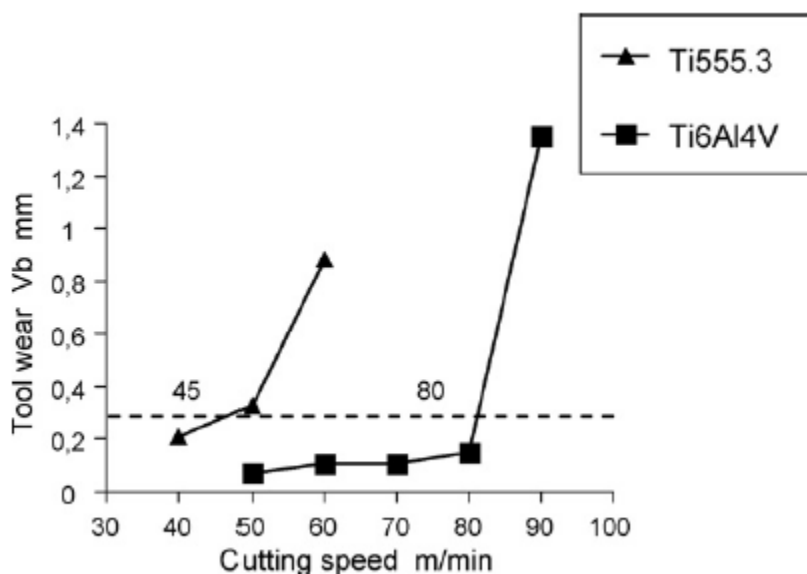


Σχήμα 5.6: Ανάπτυξη πεδίου φθοράς και φθορά κρατήρα για τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου για χρονική διάρκεια κατεργασίας $T = 15 \text{ min}$ [38]

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η μεταβολή του πεδίου φθοράς με την ταχύτητα κοπής για διάρκεια κατεργασίας $T = 15 \text{ min}$ (τιμή που ανταποκρίνεται σε αυτή που χρησιμοποιείται συνήθως στη βιομηχανία). Για κάθε κράμα, καθορίζεται μία μέγιστη τιμή της ταχύτητας κοπής $v_{c,max}$, η οποία είναι η ανώτερη τιμή της ταχύτητας επάνω από την οποία μία μικρή αύξηση στην ταχύτητα κοπής οδηγεί σε ραγδαία φθορά του κοπτικού εργαλείου. Παρατηρούμε ότι αυτή η μέγιστη τιμή της ταχύτητας κοπής είναι 80 m/min και 45 m/min για τα κράματα Ti555.3 και Ti-6Al-4V αντίστοιχα και καθορίζεται για μέγιστη τιμή του πεδίου φθοράς ίση με $VB_{max} = 0.3 \text{ mm}$. [38]

Η εύρεση αυτής της μέγιστης ταχύτητας κοπής είναι σημαντική για την ταξινόμηση των κραμάτων τιτανίου σύμφωνα με την τιμή αυτή και είναι ενδεικτική της κατεργασιμότητάς τους. Επιπλέον, είναι ενδεικτική της αποβολής υλικού που

επιτυγχάνεται για κάθε κράμα. Τέλος, σχετίζεται και με τις μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η σκληρότητα και η αντοχή σε εφελκυσμό, με τη χημική σύσταση, καθώς και με την ειδική δύναμη κοπής και την ειδική δύναμη πρόωσης των κραμάτων που υφίστανται κατεργασία. [38]

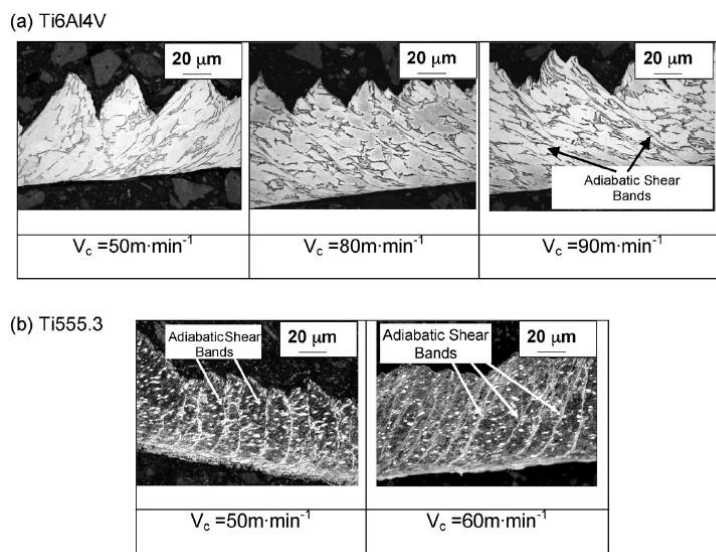


Σχήμα 5.7: Μεταβολή του πεδίου φθοράς συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για χρονική διάρκεια κατεργασίας $T = 15$ min για τα δύο κράματα τιτανίου [38]

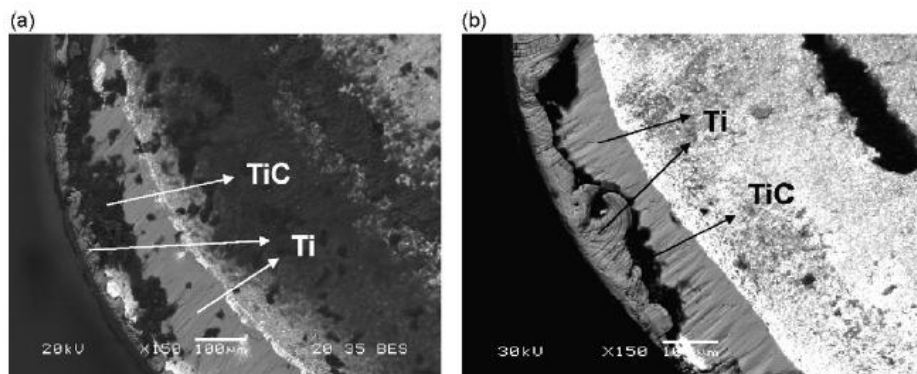
Προχωρώντας στην ανάλυση της μορφολογίας του αποβλίττου, σημαντικές διαφορές έχουν εντοπιστεί ανάμεσα στα δύο κράματα. Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η μορφολογία του αποβλίττου για τα δύο κράματα για χρονική διάρκεια κατεργασίας $T=15$ min. Η βασική διαφορά ανάμεσα στα δύο κράματα είναι ότι στο Ti-6Al-4V σε χαμηλές ταχύτητες δεν εμφανίζονται αδιαβατικές ζώνες διάτμησης, οι οποίες εμφανίζονται μόνο στην υψηλότερη τιμή της ταχύτητας κοπής σε μικρό βαθμό. Αντιθέτως, στο κράμα Ti555.3, εμφανίζονται στενές αδιαβατικές ζώνες διάτμησης σε όλες τις ταχύτητες κοπής. Αυτές οι αδιαβατικές ζώνες διάτμησης οδηγούν σε υψηλές διακυμάνσεις στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη φθορά εργαλείου. [38]

Όσον αφορά στη συγκόλληση του αποβλίττου επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου, αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.9 για τα δύο κράματα τιτανίου. Με παρατηρήσεις που έγιναν με SEM, διαπιστώθηκε ότι στο συγκολλημένο υλικό βρίσκεται καρβίδιο του τιτανίου και άνθρακας, που οφείλεται στη διάχυση άνθρακα στη διεπιφάνεια

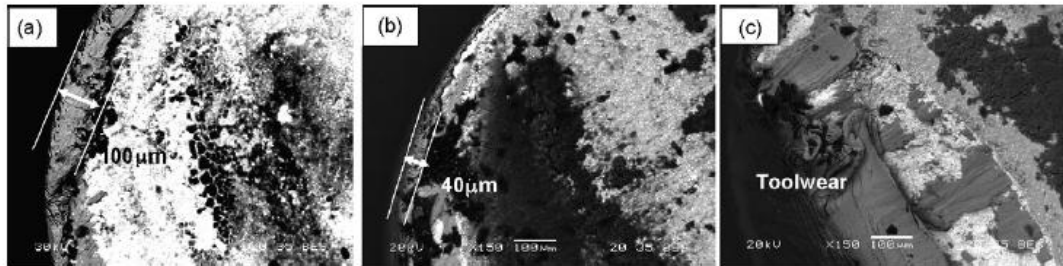
εργαλείου – αποβλίττου. Μία σημαντική παρατήρηση που πρέπει να γίνει ότι κατά την κατεργασία του κράματος Ti-6Al-4V σε χαμηλές ταχύτητες αναπτύσσεται ένα προστατευτικό στρώμα και η φθορά του εργαλείου μειώνεται σημαντικά με την εμφάνιση αυτού του στρώματος καθώς εμποδίζεται η συγκόλληση του αποβλίττου επάνω στο εργαλείο καθώς και ο ρυθμός διάχυσης των συστατικών του κοπτικού εργαλείου. Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, αυτό το προστατευτικό στρώμα εξαφανίζεται και ξεκινάει η ραγδαία φθορά του κοπτικού εργαλείου. Το προστατευτικό αυτό στρώμα και η μείωσή του με την αύξηση της ταχύτητας κοπής φαίνεται στο Σχήμα 5.10. [38]



Σχήμα 5.8: Μορφολογία του αποβλίττου για τα δύο κράμα τιτανίου για διάρκεια κατεργασίας $T = 15 \text{ min}$ [38]



Σχήμα 5.9: Συγκόλληση του αποβλίττου επάνω στην επιφάνεια αποβλίττου για το Ti-6Al-4V σε ταχύτητα κοπής 80 m/min (a) και το Ti555.3 σε ταχύτητα κοπής 50 m/min για διάρκεια κατεργασίας $T = 15 \text{ min}$ [38]



Σχήμα 5.10: Ανάπτυξη προστατευτικού στρώματος κατά την κατεργασία του κράματος Ti-6Al-4V για ταχύτητα κοπής (a) 50 mm/min, (b) 80 mm/min και (c) 90 mm/min [38]

5.1.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η κατεργασιμότητα και ο ρυθμός κατεργασιμότητας παρουσιάζουν πιο μεγάλες τιμές για το Ti-6Al-4V σε σχέση με το Ti555.3. Συγκρίνοντας τη μέγιστη ταχύτητα κοπής για τα δύο κράματα, προκύπτει ότι η κατεργασιμότητα του δεύτερου είναι σχεδόν το 56% του πρώτου.
2. Παρατηρείται να υπάρχει μια σημαντική συσχέτιση της κατεργασιμότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού προς κατεργασία (όπως είναι η σκληρότητα και η αντοχή σε εφελκυσμό), της χημικής σύστασης, καθώς και της μορφολογίας του αποβλίττου, της ειδικής δύναμης κοπής και της ειδικής δύναμης πρόωσης.
3. Σε όλες τις ταχύτητες κοπής, παρατηρούνται υψηλότερες τιμές της ειδικής δύναμης κοπής και της ειδικής δύναμης πρόωσης για το κράμα Ti555.3. Συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα στα δύο κράματα εντοπίζονται για την ειδική δύναμη πρόωσης.
4. Η παρουσία αδιαβατικών ζωνών διάτμησης στο απόβλιττο του κράματος Ti555.3 οδηγεί σε αύξηση των διακυμάνσεων στις μηχανικές και θερμικές φορτίσεις στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου, γεγονός που συνεπάγεται την αύξηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου μέσω μηχανισμού διάχυσης.
5. Παρατηρήσεις με μικροσκόπιο SEM έδειξαν την παρουσία καρβιδίου του τιτανίου στο συγκολλημένο υλικό στο κοπτικό εργαλείο και για τα δύο κράματα. Η παρουσία άνθρακα στο συγκολλημένο υλικό υποδεικνύει ότι το φαινόμενο της διάχυσης άνθρακα από το εργαλείο στο υλικό του τεμαχίου συμβαίνει στη διεπιφάνεια εργαλείου – αποβλίττου.

6. Κατά την κατεργασία του κράματος Ti-6Al-4V δημιουργείται ένα προστατευτικό στρώμα στο συγκολλημένο υλικό που βρίσκεται επάνω στο κοπτικό εργαλείο. Το μέγεθος του στρώματος αυτού παρουσιάζει μείωση με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Όσο υπάρχει αυτό το προστατευτικό στρώμα, εμποδίζεται η φθορά του κοπτικού εργαλείου, όταν όμως αυτό εξαφανιστεί, επέρχεται ραγδαία φθορά.

5.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Ως γνωστόν, τα κράματα τιτανίου έχουν πολύ μικρή κατεργασιμότητα. Η φθορά του κοπτικού εργαλείου προχωράει με πολύ γρήγορους ρυθμούς λόγω των υψηλών θερμοκρασιών κοπής και της έντονης συγκόλλησης ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Τα προηγούμενα οφείλονται στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και την υψηλή χημική δραστηριότητα των κραμάτων τιτανίου. Οι περισσότερες πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί με αντικείμενο την κατεργασιμότητα των κραμάτων τιτανίου, υποστηρίζουν ότι το ιδανικό είναι να χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία WC/Co με ταχύτητες κοπής κάτω του 1 m/sec. [43]

Προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες ταχύτητες κοπής, είναι απαραίτητο να μειωθεί το ποσό της εκλυόμενης θερμότητας. Στη συγκεκριμένη εργασία, έγινε μια προσπάθεια να εξεταστεί αυτή η περίπτωση, χρησιμοποιώντας για την κατεργασία κραμάτων τιτανίου ως κοπτικό εργαλείο διαμάντι, το οποίο χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Σε συνδυασμό με αυτό το κοπτικό εργαλείο, χρησιμοποιήθηκε άφθονη τροφοδοσία με υδατοδιαλυτό ψυκτικό υγρό. Στη συνέχεια, τα βασικά χαρακτηριστικά κοπής, όπως η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, η τραχύτητα της επιφάνειας και οι παραμένουσες τάσεις εξετάστηκαν. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν παρόμοιες δοκιμές και με άλλα υλικά κοπτικών εργαλείων, όπως σκληρομέταλλα, κεραμομεταλλικά και κεραμικά εργαλεία. [43]

5.2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν πειράματα τόννευσης και οι συνθήκες της κατεργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Πειραματικές συνθήκες της κατεργασίας [43]

Tools tested	Carbide(K10), Cermet(TiN), Ceramic(Al ₂ O ₃), Coated(TiC), CBN, Sintered diamond, Natural diamond
Cutting speed	Varied from 0.5 to 5.0 m/s
Depth of cut	0.5 mm
Feed	0.1 mm/rev
Tool geometries	Throw away type : -5,-5,5,5,15,15,0.8 Natural diamond : Included angle 90° Rake angle +10°, -10° Corner radius 0.5 mm
Cutting fluid	Soluble type

Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν εργαλείο από σκληρομέταλλο, εργαλείο TiN, κεραμικό εργαλείο με καθαρό οξείδιο του αλουμινίου, εργαλείο TiC, εργαλείο CBN, εργαλείο πορώδους διαμαντιού και εργαλείο από φυσικό διαμάντι. Το υγρό κοπής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας υδατοδιαλυτός τύπος ψυκτικού υγρού με ποσοστό διάλυσης 1:40. Η ροή του υγρού κοπής στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου γινόταν με ρυθμό 3 lt/min. [43]

Όσον αφορά στα υλικά των τεμαχίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το κράμα Ti-6Al-4V, που όπως έχουμε δει είναι α-β-κράμα και το Ti-5Al-2.5Sn, που είναι α-κράμα και το βασικό χαρακτηριστικό του είναι η αντίσταση που παρουσιάζει σε ερυσμό και οξειδωση. Στους Πίνακες 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες των δύο κραμάτων. [43]

Πίνακας 5.3: Χημική σύσταση των δύο κραμάτων [43]

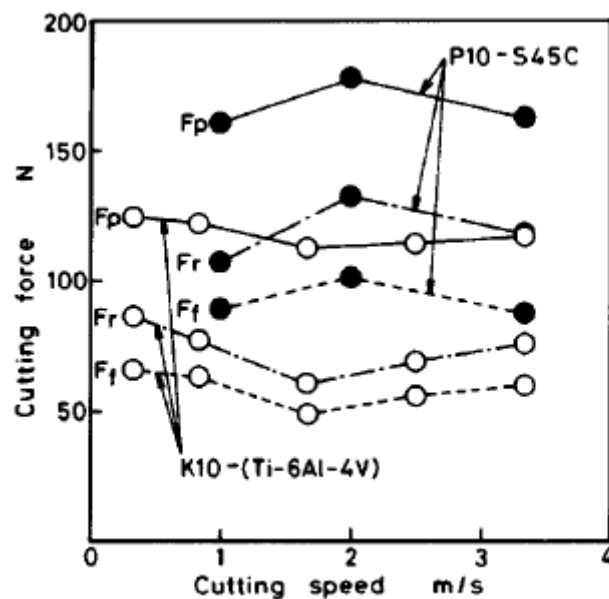
Work materials	Chemical compositions (%)							
	C	Fe	N	O	H	Al	V	Sn
Ti-6Al-4V	-	0.216	0.0024	0.160	0.0033	6.28	4.27	-
Ti-5Al-2.5Sn	0.005	0.314	0.0026	0.150	0.0078	5.09	-	2.61

Πίνακας 5.4: Μηχανικές ιδιότητες των δύο κραμάτων [43]

Work materials	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (H _B)
Ti-6Al-4V	911.4	999.6	12	32	292
Ti-5Al-2.5Sn	895.7	948.6	13	34	289

5.2.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζονται οι δυνάμεις κοπής που αναπτύχθηκαν κατά την κατεργασία του κράματος Ti-6Al-4V με κοπτικό εργαλείο από σκληρομέταλλο K10 σε ένα εύρος ταχυτήτων κοπής από 0.33 έως 3.33 m/sec, για βάθος κοπής 0.5 mm και πρόωση 0.1 mm/rev. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες δυνάμεις κοπής που αναπτύχθηκαν κατά την κατεργασία ενός ανθρακούχου χάλυβα με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.45%. [43]

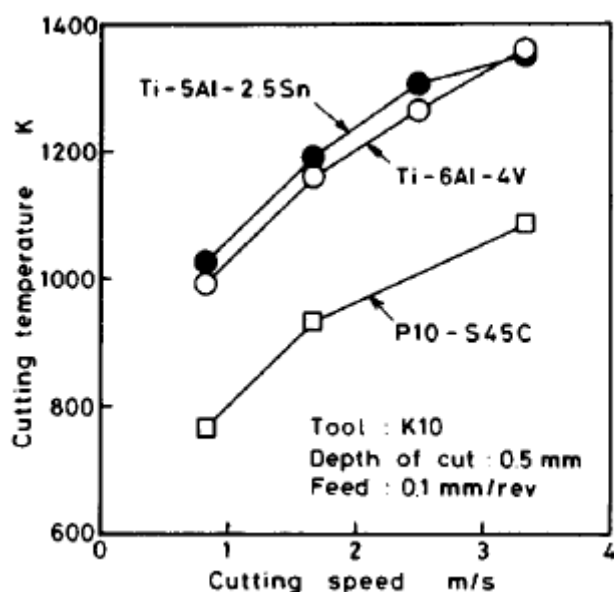


Σχήμα 5.11: Δυνάμεις κοπής του κράματος Ti-6Al-4V και του χάλυβα S45C [43]

Παρατηρούμε ότι όσον αφορά το κράμα του τιτανίου, η δύναμη κοπής παραμένει σχεδόν σταθερή σε όλο το εύρος των ταχυτήτων κοπής και είναι περίπου η μισή σε σχέση με αυτή που αντιστοιχεί στο χάλυβα. Όσον αφορά το κράμα Ti-5Al-2.5Sn, και αυτό παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το προηγούμενο. Όσον αφορά λοιπόν τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, η κατεργασιμότητα των κραμάτων τιτανίου φαίνεται να είναι λογική. [43]

Προχωρώντας στη μελέτη της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας κοπής συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για τα δύο κράματα τιτανίου κατά την κατεργασία τους με κοπτικό εργαλείο από σκληρομέταλλο K10. Το βάθος κοπής είναι και σε αυτή την περίπτωση 0.5 mm και η πρόωση 0.1 mm/rev. Και στο

συγκεκριμένο διάγραμμα, παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας κοπής συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για τον ανθρακούχο χάλυβα S45C. [43]



Σχήμα 5.12: Θερμοκρασία κοπής των κραμάτων Ti-6Al-4V και Ti-5Al-2.5Sn και του χάλυβα S45C [43]

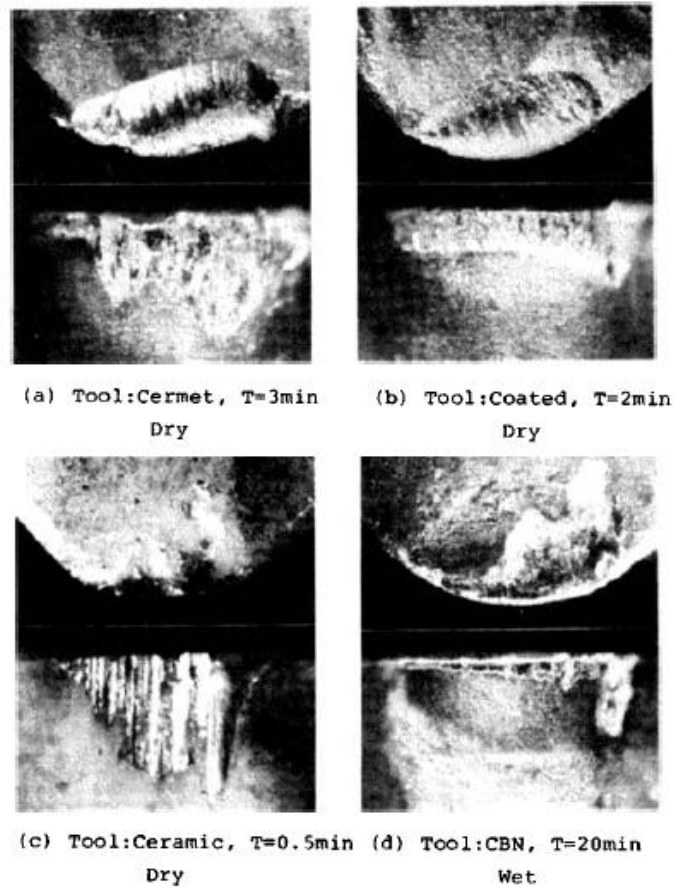
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το Σχήμα 5.12, η θερμοκρασία κοπής για το κράμα Ti-6Al-4V είναι μεγαλύτερη από 1000 K ακόμη και σε χαμηλές ταχύτητες κοπής της τάξης του 1m/sec, ενώ φτάνει στα 1350 K για ταχύτητα κοπής 3.33 m/sec, τιμή που είναι σχεδόν 250 K υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη που αφορά το χάλυβα. Λαμβάνοντας τώρα υπ' όψιν τις σχετικά χαμηλές δυνάμεις κοπής κατά την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου, αυτή η υψηλή θερμοκρασία κοπής φαίνεται να οφείλεται στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και τη χαμηλή πυκνότητα των κραμάτων τιτανίου, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5, όπου φαίνονται οι φυσικές ιδιότητες διαφόρων υλικών. [43]

Πίνακας 5.5: Φυσικές ιδιότητες διαφόρων υλικών [43]

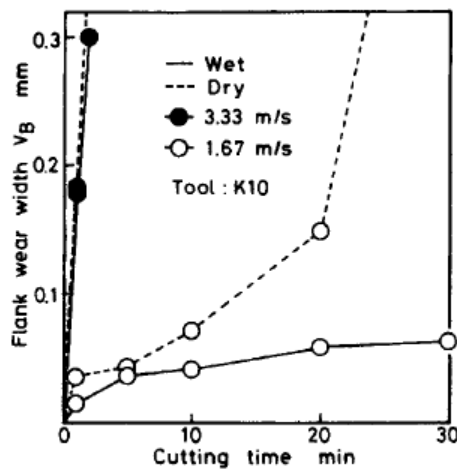
Characteristics	Ti-6Al-4V	Stainless steel	Carbon steel
Melting point (K)	1813-1923	1673-1703	1500
Density ($\times 10^3 \text{Kg/m}^3$)	4.42	8.02	7.83
Young's modulus (MPa)	113,190	198,940	205,800
Modulus of rigidity (MPa)	44,100	-	-
Poisson's ratio	0.3-0.33	0.3	0.3
Specific heat (KJ/(Kg·K))	0.56	0.50	0.46
Thermal conductivity (W/(m·K))	7.54	16.34	53.5

Όσον αφορά στη φθορά των κοπτικών εργαλείων κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, ξεκινάμε από την περιγραφή των 4 πρώτων από τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου και συγκεκριμένα του κεραμομεταλλικού, του επικαλυμμένου TiC, του κεραμικού και του CBN. Και τα 4 αυτά υλικά αποδεικνύονται ακατάλληλα για την κατεργασία των κραμάτων τιτανίου λόγω της χημικής αντίδρασης ανάμεσα στο κράμα του τιτανίου και στο υλικό του εργαλείου και της συγκόλλησης που αυτή συνεπάγεται. Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί φθοράς των υλικών αυτών για ταχύτητα κοπής 1.67 m/sec, πρόωση 0.1 mm/rev και βάθος κοπής 0.5 mm. [43]

Από την άλλη, στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου από σκληρομέταλλο K10 κατά την κατεργασία του Ti-6Al-4V σε σχετικά υψηλές ταχύτητες για βάθος κοπής 0.5 mm και πρόωση 0.1 mm/rev. Σε ξηρά κοπή, η φθορά εξαπλώνεται ραγδαία μετά από διάρκεια κοπής ίση με 5 min σε ταχύτητα 1.67 m/sec, ενώ με χρήση ψυκτικού υγρού, ο ρυθμός της φθοράς είναι μικρός και το πλάτος του πεδίου φθοράς είναι σχεδόν 0.06 mm μετά από 30 min κοπής. Όμως, σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, της τάξης των 3.33 m/sec, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου γίνεται εξαιρετικά μικρή, κάτι που αποδεικνύει ότι το ψυκτικό υγρό δεν είναι πλέον αποδοτικό λόγω των υψηλών θερμοκρασιών κοπής που αναπτύσσονται. [43]



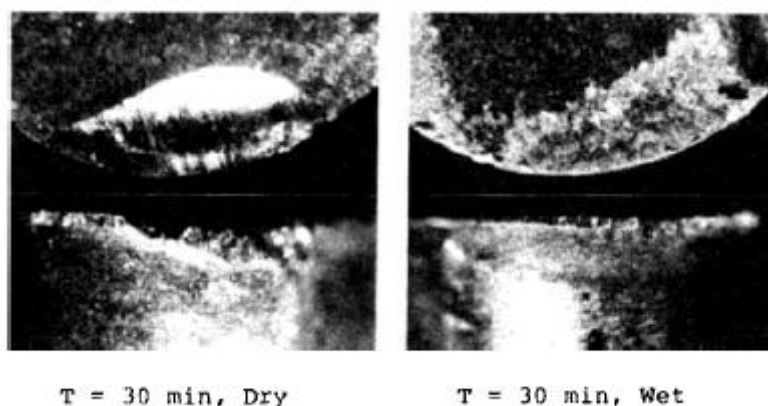
Σχήμα 5.13: Φθορά κοπτικών εργαλείων από κεραμομεταλλικό υλικό, επικαλυμμένο TiC, κεραμικό υλικό και CBN [43]



Σχήμα 5.14: Πεδίο φθοράς του κοπτικού εργαλείου K10 ως προς τη διάρκεια της κατεργασίας σε ξηρά και υγρή κοπή [43]

Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται αντίστοιχα η μορφή της φθοράς για το σκληρομέταλλο K10 σε ταχύτητα 1.67 m/sec. Όπως φαίνεται στη συγκεκριμένη εικόνα, το εργαλείο

παρουσιάζει πολύ έντονη φθορά κρατήρα σε ξηρά κοπή. Ωστόσο, στη υγρή κοπή, η αντίστοιχη φθορά είναι πολύ μικρή. [43]

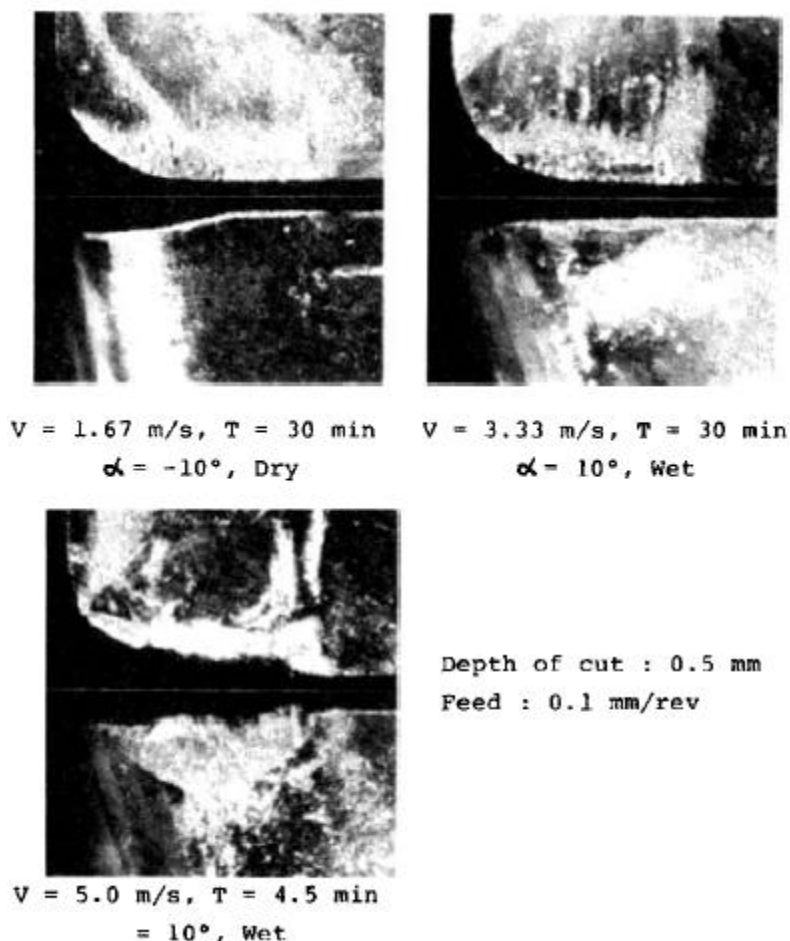


Σχήμα 5.15: Φθορά κοπτικού εργαλείου K10 σε ξηρά και υγρή κοπή [43]

Όσον αφορά στο κοπτικό εργαλείο από διαμάντι, αποδεικνύεται ότι παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά σε ταχύτητα κοπής 1.67 m/sec σε ξηρά κοπή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16. Αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμική αγωγιμότητα του υλικού αυτού, που είναι περίπου 2000 W/mK, τιμή που είναι περίπου 25 φορές μεγαλύτερη από αυτή του υλικού K10, καθώς επίσης και στη μικρότερη χημική δραστηριότητα του υλικού. Με την εφαρμογή ψυκτικού υγρού, η φθορά είναι πιο ήπια ακόμη και σε ταχύτητες της τάξης των 3.33 m/sec. Το πλάτος του πεδίου φθοράς αποδεικνύεται να είναι μόνο 0.02 mm ύστερα από 30 min κατεργασίας. Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, της τάξης των 5 m/sec, η φθορά του εργαλείου προχωράει ραγδαία, ακόμη και με τη χρήση ψυκτικού υγρού. Φαίνεται λοιπόν ότι το ανώτερο όριο για χρήση του διαμαντιού σε υγρά κοπή είναι σχεδόν τα 3.33 m/sec. Στην περίπτωση πορώδους διαμαντιού, του οποίου η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρότερη, αυτό παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το υλικό από σκληρομέταλλο. [43]

Στο Σχήμα 5.16 φαίνεται η φθορά του εργαλείου από διαμάντι σε όλες τις προηγούμενες ταχύτητες κοπής κατά την κατεργασία Ti-6Al-4V για βάθος κοπής 0.5 mm και πρόωση 0.1 mm/rev. Από την άλλη, στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου από διαμάντι κατά την κατεργασία του Ti-6Al-4V για βάθος κοπής 0.5 mm και πρόωση 0.1 mm/rev και στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου από διαμάντι κατά την κατεργασία του Ti-5Al-2.5Sn σε σχετικά υψηλές ταχύτητες για βάθος κοπής 0.5 mm

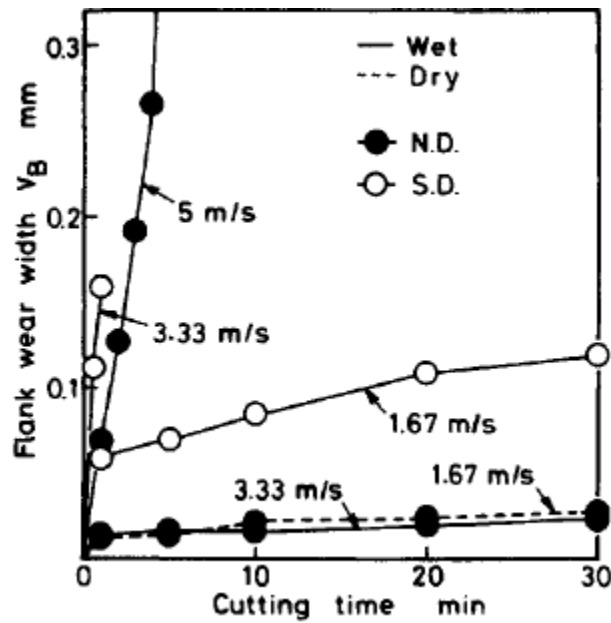
και πρόωση 0.1 mm/rev. Παρατηρούμε ότι οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, αλλά στην περίπτωση του Ti-5Al-2.5Sn, το ανώτερο όριο της ταχύτητας κοπής είναι μικρότερο σε σχέση με το Ti-6Al-4V. [43]



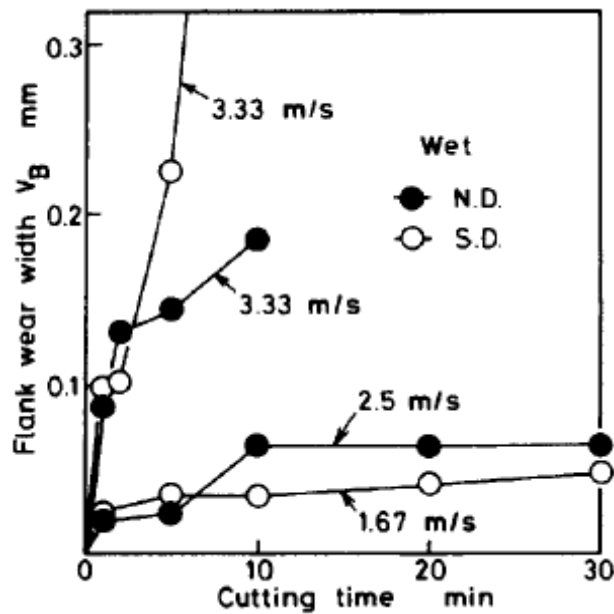
Σχήμα 5.16: Φθορά κοπτικού εργαλείου από διαμάντι σε ξηρά και υγρή κοπή [43]

Προχωρώντας στην ανάλυση των επιφανειακών χαρακτηριστικών, στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η μέγιστη επιφανειακή τραχύτητα κατά την κατεργασία Ti-6Al-4V με χρήση κοπτικού εργαλείου K10 και εργαλείο από διαμάντι για βάθος κοπής 0.5 mm και πρόωση 0.1 mm/rev. Όπως φαίνεται, η επιφανειακή τραχύτητα παραμένει σχεδόν σταθερή για όλες τις ταχύτητες κοπής και για τα δύο υλικά. Επιπλέον, η μεταβολή της είναι πολύ μικρή είτε πρόκειται για ξηρά είτε για υγρή κοπή. Για το υλικό από σκληρομέταλλο, η τιμή της τραχύτητας φτάνει τα 6 μm και είναι σχεδόν 3.8 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή, που είναι 1.6 μm . Για το διαμάντι, η τιμή της τραχύτητας φτάνει τα 4 μm και είναι σχεδόν 1.6 φορές

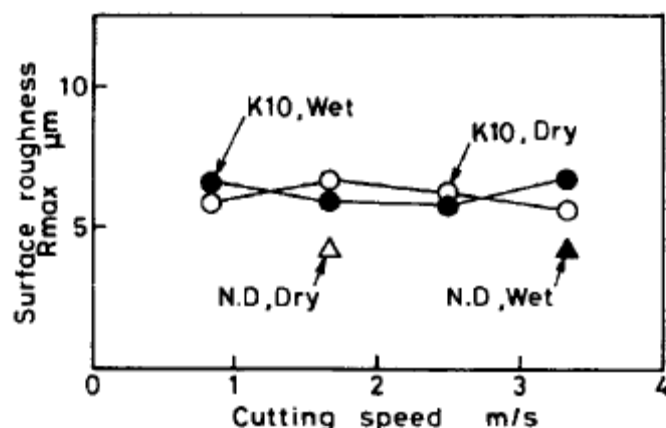
μεγαλύτερη σε σχέση με τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή, που είναι 2.5 μm . Αυτό οφείλεται στη μικρότερη χημική δραστηριότητα του δεύτερου υλικού. [43]



Σχήμα 5.17: Πεδίο φθοράς του κοπτικού εργαλείου από διαμάντι (φυσικό και κοκκώδες) ως προς τη διάρκεια της κατεργασίας σε ξηρά και υγρή κοπή Ti-6Al-4V [43]



Σχήμα 5.18: Πεδίο φθοράς του κοπτικού εργαλείου από διαμάντι (φυσικό και κοκκώδες) ως προς τη διάρκεια της κατεργασίας σε ξηρά και υγρή κοπή Ti-5Al-2.5Sn [43]



Σχήμα 5.19: Επιφανειακή τραχύτητα Ti-6Al-4V ύστερα από κατεργασία με εργαλείο K10 και εργαλείο από διαμάντι [43]

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι παραμένουσες επιφανειακές τάσεις σε διάφορες συνθήκες κοπής. Φαίνεται ότι οι παραμένουσες τάσεις στα κράματα τιτανίου είναι θλιπτικές και οι τιμές διαφέρουν ανάλογα με τις συνθήκες κοπής. Συγκεκριμένα, οι παραμένουσες τάσεις αυξάνονται με αύξηση της ταχύτητας κοπής και είναι μεγαλύτερες στη ξηρά κοπή σε σχέση με την υγρή κοπή. Με χρήση διαμαντιού, οι παραμένουσες τάσεις είναι μικρότερες σε σχέση με χρήση υλικού από σκληρομέταλλο. Επίσης, οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερες στη διεύθυνση κοπής σε σχέση με τη διεύθυνση πρόωσης. [43]

Πίνακας 5.6: Παραμένουσες επιφανειακές τάσεις (MPa) κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου [43]

Tools tested	Cutting speed	Cutting direction		Feeding direction	
		Wet	Dry	Wet	Dry
Carbide (K10)	0.67 m/s	-364.6	-399.8	-263.6	-282.2
	1.67 m/s	-409.6	-444.9	-258.7	-241.1
Natural diamond	1.67 m/s	-	-308.7	-	-258.7
	2.50 m/s	-352.7	-	-164.6	-

5.2.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η δύναμη κοπής ενός κράματος τιτανίου είναι περίπου μισή σε σχέση με αυτή ενός ανθρακούχου χάλυβα (0.45% C).

2. Η θερμοκρασία κοπής ενός κράματος τιτανίου είναι περίπου 250 K υψηλότερη από αυτή ενός ανθρακούχου χάλυβα (0.45% C). Η υψηλότερη θερμοκρασία κοπής οφείλεται στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και τη χαμηλή πυκνότητα των κραμάτων τιτανίου.

3. Το φυσικό διαμάντι παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά στην κατεργασία κραμάτων τιτανίου και η ταχύτητα κοπής μπορεί να αυξηθεί στα 3.33 m/sec με χρήση ψυκτικού υγρού.

4. Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας των κραμάτων τιτανίου είναι καλύτερη με χρήση φυσικού διαμαντιού σε σχέση με τα υπόλοιπα εργαλεία.

5. Οι παραμένουσες επιφανειακές τάσεις των κραμάτων τιτανίου είναι θλιπτικές και μπορεί να βοηθούν στην αντοχή τους.

5.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

Είναι πλέον γνωστό το γεγονός ότι τα κράματα τιτανίου χαρακτηρίζονται από μικρή κατεργασιμότητα. Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που συνοδεύει την κατεργασία τους είναι η ταχεία φθορά των κοπτικών εργαλείων, η οποία οφείλεται στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων τιτανίου, η οποία προκαλεί την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην κόψη κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και την έντονη συγκόλληση του υλικού του τεμαχίου επάνω στο κοπτικό εργαλείο. [44]

Ένας συνηθισμένος τρόπος για να βελτιωθεί η κατεργασιμότητα των κραμάτων τιτανίου είναι με χρήση ενός ψυκτικού υγρού. Τα υγρά κοπής χρησιμοποιούνται προκειμένου να ψύχουν και να λιπαίνουν τη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου – τεμαχίου και τη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου – αποβλίττου. Επιπλέον, βοηθούν στην αύξηση της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων και τη βελτίωση της κατεργασμένης επιφάνειας. Ωστόσο, τα υγρά κοπής είναι ακριβά και παρουσιάζουν δυσκολία στην ανακύκλωσή τους. Επιπλέον, επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον εργασίας και είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο. Επομένως, προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι δυσάρεστες λεπτομέρειες που συνοδεύουν τη χρήση των ψυκτικών υγρών, είναι απαραίτητο να βρεθούν άλλοι τρόποι προκειμένου να επιτυγχάνεται η επιθυμητή κατεργασία με χρήση ελάχιστης ή και μηδαμινής

ποσότητας υγρών κοπής. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, οι εναλλακτικές στρατηγικές είναι με χρήση ελάχιστης ποσότητας λιπαντικών (Minimal Quantities of Lubricants MQL) και με χρήση ξηράς κοπής (Dry Cutting DC). [44]

Στη συγκεκριμένη μελέτη, γίνεται μία προσπάθεια προσδιορισμού της επίδρασης των διαφορετικών μεθόδων παροχής υγρού κοπής στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής κράματος Ti-6Al-4V. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με βάση το πρότυπο ορθογωνικής κοπής προκειμένου να προσδιοριστούν οι συνθήκες τριβής για τις διάφορες μεθόδους. Στη συνέχεια, μέσω αυτών των συνθηκών τριβής και προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων FEM, προσδιορίστηκαν οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής για κάθε μία μέθοδο. [44]

5.3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

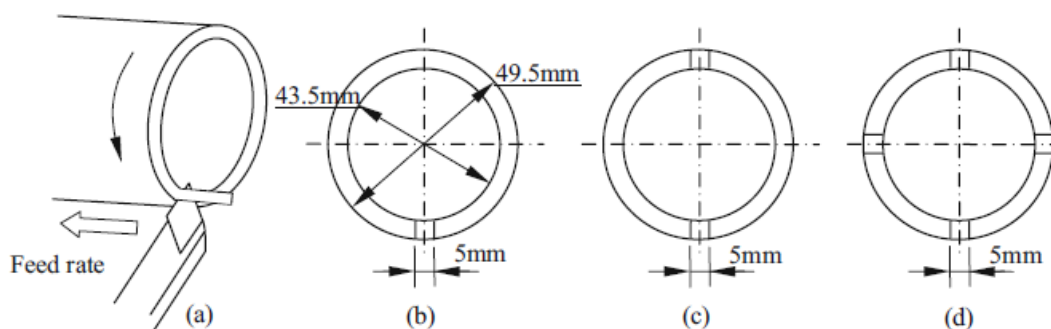
Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό τεμαχίου είναι το α-β-κράμα Ti-6Al-4V με ιδιότητες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν σωλήνες με εσωτερική διάμετρο 43.5 mm και εξωτερική διάμετρο 49.5 mm. Προκειμένου να εξεταστεί και η περίπτωση διακοπτόμενης κοπής, αξονικές σχισμές πλάτους 5 mm κατασκευάστηκαν στις κυλινδρικές τους επιφάνειες. Δοκιμάστηκαν περιπτώσεις μίας, δύο ή τεσσάρων σχισμών. Ο αριθμός των σχισμών σε συνδυασμό με την περιστροφική ταχύτητα της ατράκτου καθόριζαν τη συχνότητα της διακοπής. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 5.20. [44]

Το υλικό του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές ήταν μη επικαλυμμένο WC/Co (H1) με ιδιότητες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8, όπου παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες ιδιότητες άλλων υλικών για συγκριτικούς λόγους. Ο λόγος που το συγκεκριμένο υλικό είναι καταλληλότερο για διακοπτόμενη κατεργασία κραμάτων τιτανίου, συγκριτικά με τα άλλα υλικά είναι ότι χαρακτηρίζεται από υψηλότερη αντοχή σε θραύση και υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον, είναι αρκετά πιο φθηνό σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. [44]

Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν σε τόρνο με ισχύ 10 kW και μέγιστη περιστροφική ταχύτητα 2500 rpm. Οι συνθήκες κοπής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9. Οι μέθοδοι που εξετάζονται στις συγκεκριμένες δοκιμές είναι η ξηρά κοπή, η άφθονη παροχή ψυκτικού υγρού (FC) και η μέθοδος MQL. [44]

Πίνακας 5.7: Μηχανικές ιδιότητες του κράματος Ti-6Al-4V [44]

Tensile strength	Yield strength	Poisson's ratio	Modulus elasticity	Hardness (HRC)
993 MPa	830 MPa	0.342	114 GPa	HRC-36



Σχήμα 5.20: Μορφή δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την τόνρευση [44]

Πίνακας 5.8: Ιδιότητες διαφόρων υλικών εργαλείων [44]

Materials	HV (GPa)	TRS (GPa)	k (W/m K)	ν	E (GPa)	KIC (MPa/m)
CBN	35-40	1.40	100-130	0.2-0.22	600-800	3.5-6.7
HI (5% Co)	16.05	2.06	109	0.22	646	10.9
Ceramic (Si3N4)	21.58	0.793	29	0.26	338	6.2

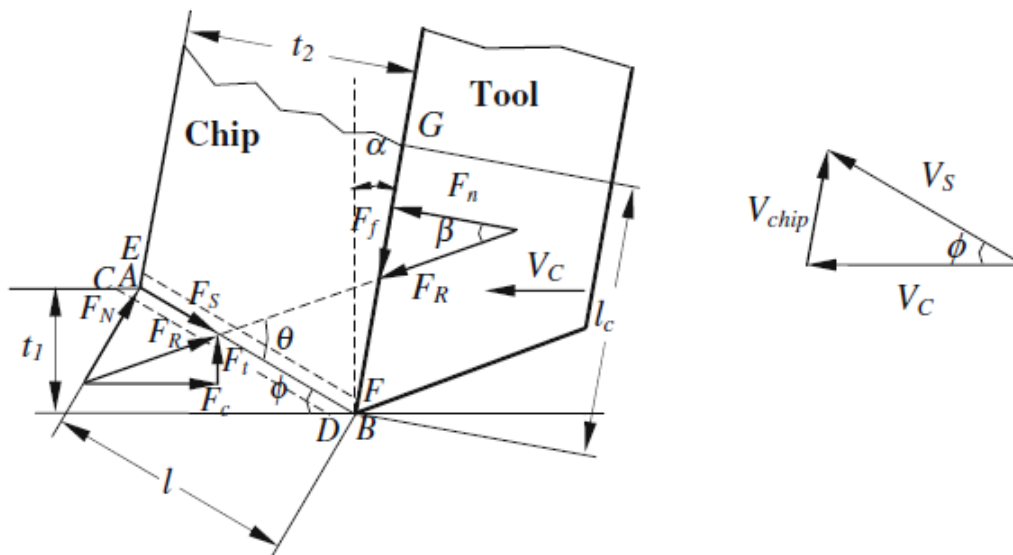
Πίνακας 5.9: Συνθήκες κοπής [44]

Condition	
Cutting speed (m/min)	60, 75, 90, 105, 120
Feed rate (mm/r)	0.10, 0.15
Clearance angle (degrees)	5
Rake angle(degrees)	-5
Cooling method	Dry, FC, MQL

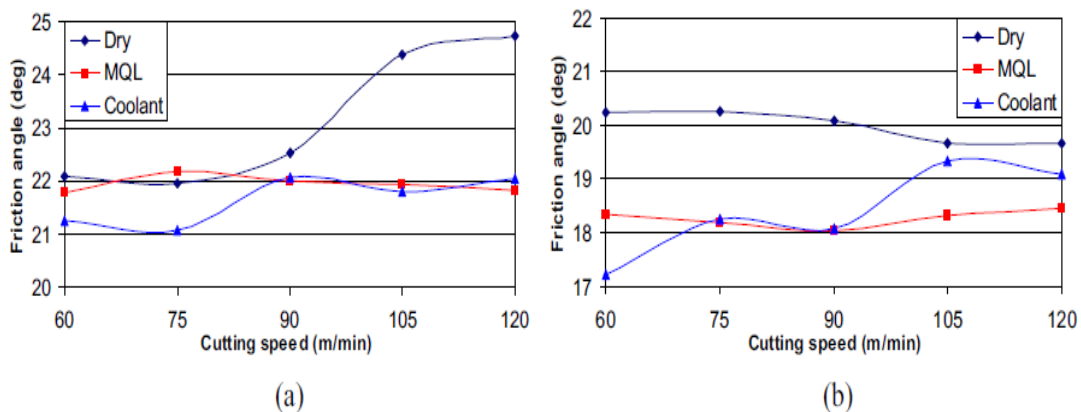
5.3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ξεκινώντας από την ανάλυση των δυνάμεων κοπής, ο υπολογισμός τους βασίζεται στο μοντέλο του επιπέδου διάτμησης, σύμφωνα με το Σχήμα 5.21.

Έχοντας μετρήσει τις δυνάμεις κοπής κατά τη συνεχή ορθογωνική τόννευση του κράματος Ti-6Al-4V και συγκεκριμένα τη δύναμη F_c κατά τη διεύθυνση της κοπής και τη δύναμη F_t κατά τη διεύθυνση της πρόωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21, μπορούν στη συνέχεια να υπολογιστούν οι γωνίες σφήνας, όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.22. Οι γωνίες αυτές υπολογίζονται για πρόωση 0.10 και 0.15 mm/rev και για τις 3 διαφορετικές μεθόδους λίπανσης που εξετάζονται. [44]



Σχήμα 5.21: Μοντέλο επιπέδου διάτμησης [44]

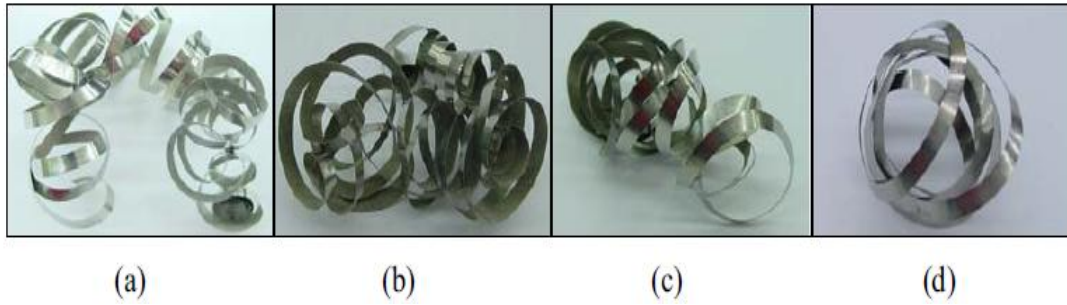


Σχήμα 5.22: Γωνίες σφήνας κατά τη συνεχή κοπή (a) σε πρόωση 0.10 mm/rev και (b) σε πρόωση 0.15 mm/rev [44]

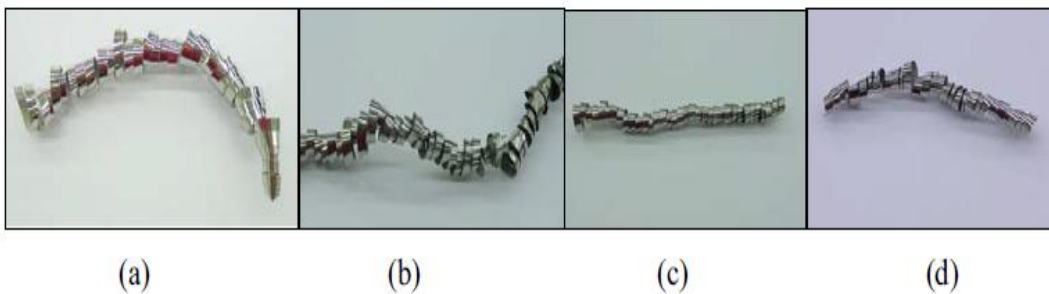
Έχει βρεθεί ότι οι δυνάμεις F_t κατά την ξηρά κοπή είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με τις μεθόδους MQL και FC σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής. Αυτές οι υψηλότερες δυνάμεις στις υψηλές ταχύτητες κοπής κατά την ξηρά κοπή δικαιολογούν τις αυξημένες γωνίες σφήνας, όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.22. Όσον αφορά στις άλλες δύο μεθόδους, οι γωνίες έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές για όλες τις συνθήκες κοπής. Αυτό αποδεικνύει ότι σε χαμηλές ταχύτητες πρόωσης, οι μέθοδοι MQL και FC παρέχουν την ίδια ικανότητα λίπανσης και ψύξης. Καθώς στις χαμηλές ταχύτητες πρόωσης, μικρότερο ποσό θερμότητας παράγεται, αυτές οι δύο μέθοδοι είναι αρκετά αποδοτικές στο να ψύξουν το εργαλείο και να λιπάνουν τη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου / αποβλίττου. [44]

Σε υψηλότερες ταχύτητες πρόωσης, μεγαλύτερος όγκος υλικού αφαιρείται από το τεμάχιο στον ίδιο χρόνο κατεργασίας και συνεπώς το κοπτικό εργαλείο δέχεται μεγαλύτερες φορτίσεις. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, είναι ακόμη πιο εμφανής η ανικανότητα της ξηράς κοπής να παρέχει ικανοποιητική λίπανση και ψύξη. Για όλες τις συνθήκες κοπής, οι γωνίες που δημιουργούνται με τις μεθόδους MQL και FC είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με αυτές που δημιουργούνται με την ξηρά κοπή. Ο λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι ότι η ανεπαρκής λίπανση κατά την ξηρά κοπή οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες στην περιοχή της κοπής και αυτές οι θερμοκρασίες επηρεάζουν τις φυσικές ιδιότητες του εργαλείου και οδηγούν σε αύξηση των δυνάμεων κοπής σε σχέση με τις δύο άλλες μεθόδους λίπανσης. Επιπλέον, σε ταχύτητα κοπής μεγαλύτερη των 90 m/min, οι γωνίες που προκύπτουν με τη μέθοδο MQL είναι μικρότερες σε σχέση με τη μέθοδο FC, επομένως η πρώτη μέθοδος φαίνεται να είναι πιο αποδοτική σε σχέση με τη δεύτερη. Επιπλέον, σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, η πρώτη μέθοδος αποδεικνύεται να έχει και καλύτερη δυνατότητα λίπανσης, πέρα από ψυκτική δυνατότητα. Αυτές οι μικρότερες γωνίες τελικά επιτρέπουν να διαφεύγουν πιο εύκολα τα απόβλιττα από την επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού εργαλείου. [44]

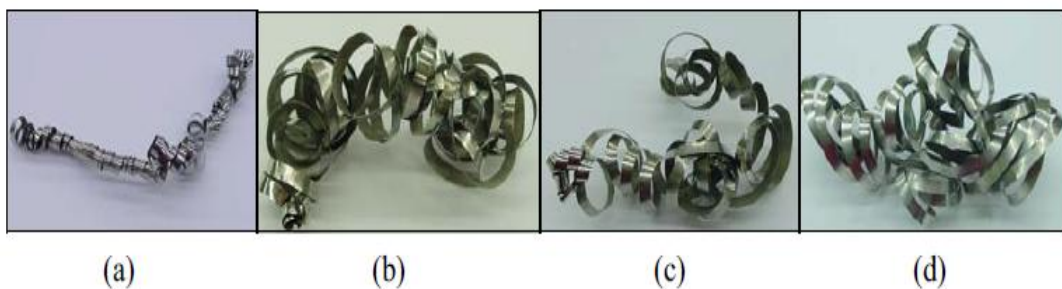
Προχωρώντας στην ανάλυση της μορφολογίας των αποβλίττων, στα Σχήματα 5.23, 5.24 και 5.25 παρουσιάζεται η μορφολογία για τις διαφορετικές μεθόδους λίπανσης σε διάφορες ταχύτητες κοπής.



Σχήμα 5.23: Μορφολογία αποβλίττου κατά την ξηρά κοπή σε ταχύτητα πρόωσης 0.10 mm/rev και ταχύτητα κοπής (a) 75 m/min, (b) 90 m/min, (c) 105 m/min και (d) 120 m/min [44]



Σχήμα 5.24: Μορφολογία αποβλίττου κατά την κοπή με τη μέθοδο MQL σε ταχύτητα πρόωσης 0.10 mm/rev και ταχύτητα κοπής (a) 60 m/min, (b) 75 m/min, (c) 90 m/min και (d) 105 m/min [44]

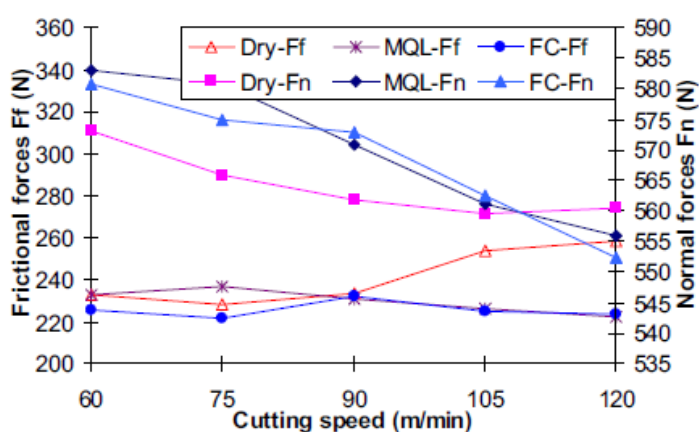


Σχήμα 5.25: Μορφολογία αποβλίττου κατά την κοπή με τη μέθοδο FC σε ταχύτητα πρόωσης 0.10 mm/rev και ταχύτητα κοπής (a) 60 m/min, (b) 75 m/min, (c) 105 m/min και (d) 120 m/min [44]

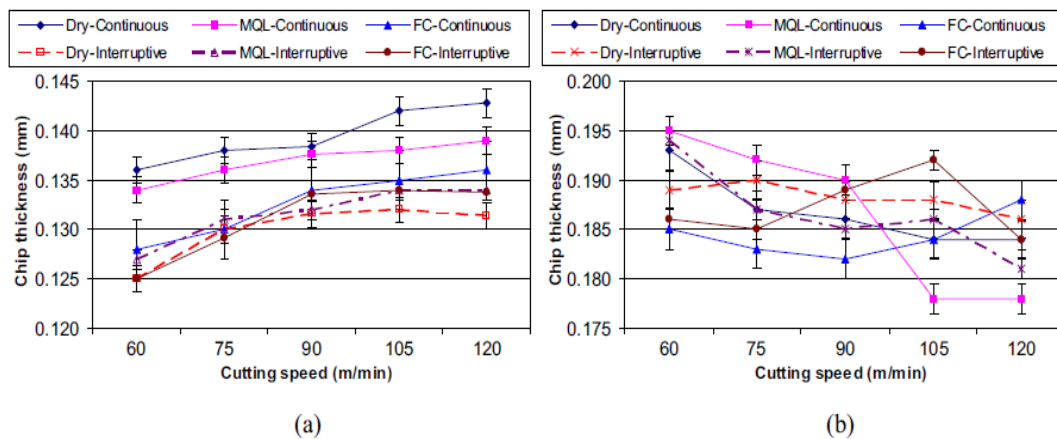
Στο Σχήμα 5.26 παρουσιάζονται οι δυνάμεις F_f και F_n σε σχέση με την ταχύτητα κοπής για όλες τις μεθόδους λίπανσης. Παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις F_n σε χαμηλές ταχύτητες κοπής είναι μεγαλύτερες για τη μέθοδο MQL σε σχέση με τις άλλες δύο

μεθόδους. Αυτές οι διαφορές στις δυνάμεις επηρεάζουν και την τελική μορφή του αποβλίττου. [44]

Στο Σχήμα 5.27 τώρα αποτυπώνεται το πάχος του αποβλίττου για τις 3 μεθόδους λίπανσης τόσο για συνεχή όσο και για διακοπτόμενη κοπή. Το πάχος του αποβλίττου, για δεδομένο συνδυασμό κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου, εξαρτάται από την ταχύτητα κοπής και τη θερμοκρασία κοπής. Σε χαμηλή ταχύτητα πρόωσης, το πάχος του αποβλίττου είναι μικρότερο. Πέρα από τις ικανότητες ψύξης και λίπανσης, τα υγρά κοπής χρησιμοποιούνται και για την απομάκρυνση των αποβλίττων από την περιοχή της κοπής. Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, τα απόβλιττα παρουσιάζουν δυσκολία στην παραμόρφωση και ως εκ τούτου αυξάνεται το πάχος τους. Σε συνθήκες ξηράς κοπής και της μεθόδου MQL, το πάχος του αποβλίττου σταδιακά μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής σε πρόωση 0.15 mm/rev. Αυτό συμβαίνει καθώς σε υψηλές ταχύτητες πρόωσης περισσότερη θερμότητα παράγεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με αύξηση της ταχύτητας κοπής για ίδια περίοδο κατεργασίας. Επομένως, αυτή η αύξηση της θερμότητας βοηθά τα απόβλιττα να παραμορφώνονται πιο εύκολα, κάτι που οδηγεί σε μείωση του πάχους του αποβλίττου με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Ωστόσο, δεν μπορεί να εξαχθεί ένα γενικό συμπέρασμα για την επίδραση της μεθόδου FC στο πάχος του αποβλίττου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην απρόβλεπτη λιπαντική ικανότητα που παρέχει η μέθοδος αυτή ειδικά κατά τη συνεχή κοπή, σε υψηλές κατεργασίες κοπής. [44]



Σχήμα 5.26: Δυνάμεις F_f και F_n συναρτήσει της ταχύτητας κοπής για όλες τις μεθόδους λίπανσης για πρόωση 0.10 mm/rev [44]

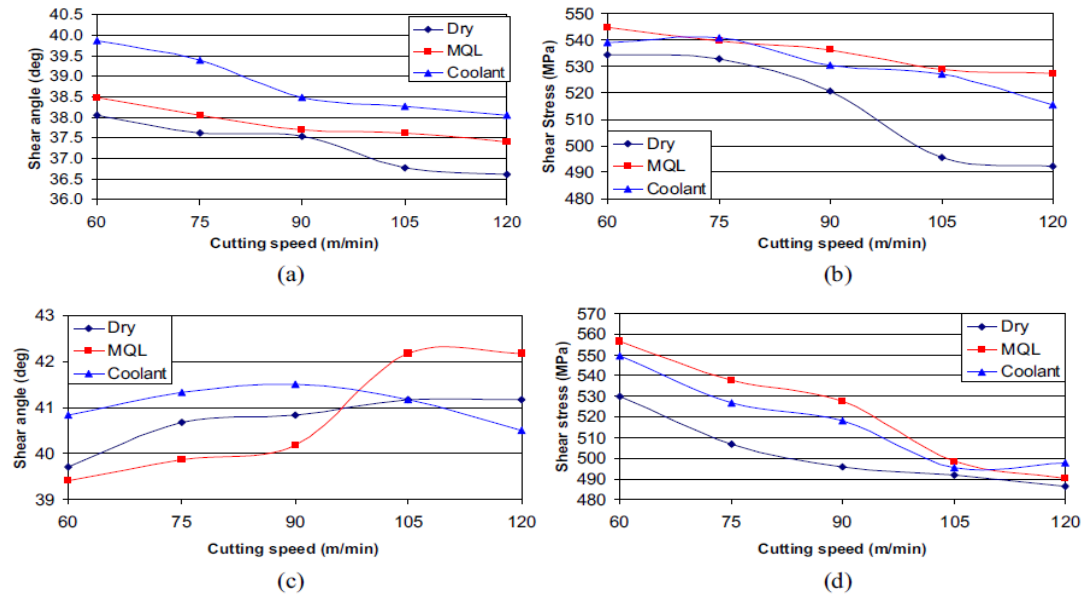


Σχήμα 5.27: Πάχος αποβλίττου συναρτήσει ταχύτητας κοπής για 3 μεθόδους λίπανσης για συνεχή και διακοπτόμενη κοπή για πρόωση (a) 0.10 και (b) 0.15 mm/rev [44]

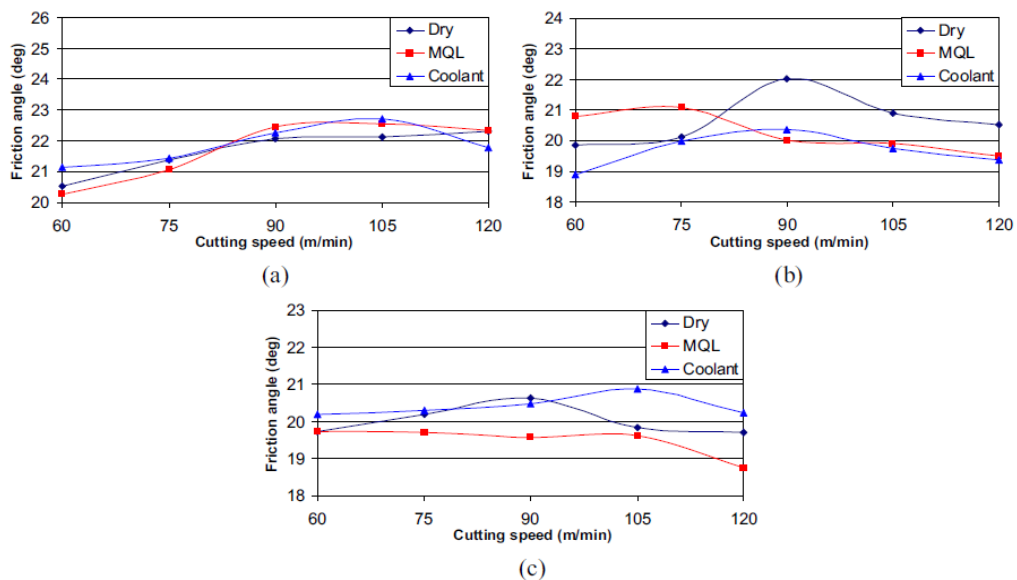
Στο Σχήμα 5.28 παρουσιάζονται οι γωνίες διάτμησης και οι τάσεις διάτμησης για συνεχή κοπή για τις δύο ταχύτητες πρόωσης. Στη μικρότερη ταχύτητα πρόωσης, οι γωνίες διάτμησης μειώνονται με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του πάχους του αποβλίττου με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Ωστόσο, στη μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης και για τις μεθόδους ξηράς κοπής και MQL, η γωνία αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Αυτό οφείλεται στη μείωση του πάχους του αποβλίττου με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Ωστόσο, με τη μέθοδο FC, η γωνία πρώτα αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας κοπής και στη συνέχεια μειώνεται με μείωσή της. Αυτό οφείλεται στην απρόβλεπτη συμπεριφορά αυτής της μεθόδου. Επιπλέον, κατά τη μέθοδο ξηράς κοπής, οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, καθώς η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την ξηρά κοπή, βοηθά στην ευκολότερη απομάκρυνση του υλικού. [44]

Προχωρώντας στην περιγραφή της διακοπτόμενης κοπής, στο Σχήμα 5.29 παρουσιάζονται οι γωνίες σφήνας για διάφορες ταχύτητες πρόωσης και μία ή δύο σχισμές του εργαλείου. Στη διακοπτόμενη κοπή και σε ξηρά κοπή, η γωνία για μία σχισμή του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερη σε σχέση με τη συνεχή κοπή για τις ίδιες συνθήκες κοπής. Στη διακοπτόμενη κοπή, με τη χαμηλή ταχύτητα πρόωσης, η μέθοδος FC δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Επομένως, η μέθοδος αυτή δεν είναι τόσο αποδοτική σε διακοπτόμενη κοπή με εργαλείο μίας σχισμής όσο είναι στη συνεχή κοπή. Σε υψηλότερη ταχύτητα πρόωσης, η γωνία για ταχύτητα κοπής μεγαλύτερη των 90 m/min είναι μεγαλύτερη

στην ξηρά κοπή σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Σε υψηλή ταχύτητα πρόωσης και υψηλές ταχύτητες κοπής, οι δύο τελευταίες μέθοδοι παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Όταν οι σχισμές γίνονται δύο, στην υψηλή ταχύτητα πρόωσης, η γωνία γίνεται μεγαλύτερη για τη μέθοδο FC σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. [44]

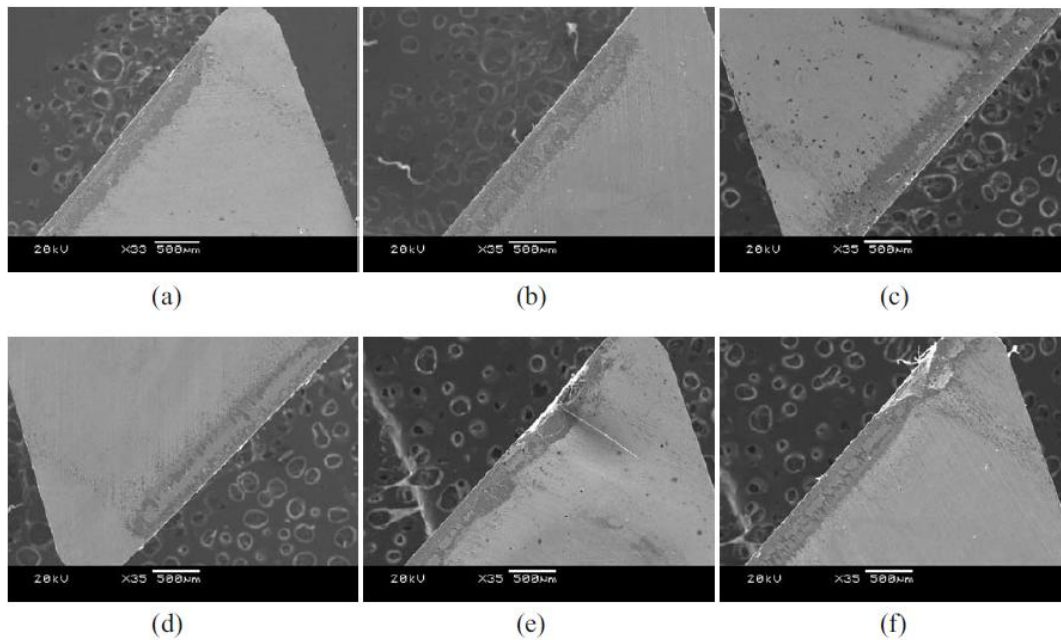


Σχήμα 5.28: Γωνίες διάτμησης και τάσεις διάτμησης για συνεχή κοπή με τις 3 μεθόδους λίπανσης και ταχύτητες πρόωσης (a) (b) 0.10 mm/rev και (c) (d) 0.15 mm/rev [44]

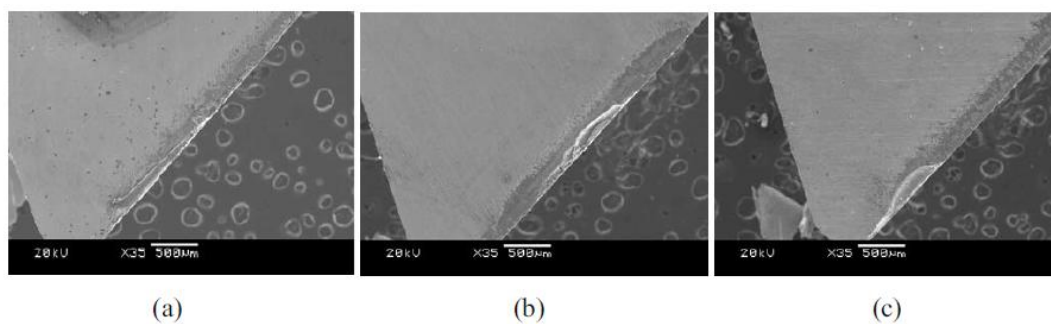


Σχήμα 5.29: Γωνία σφήνας για διακοπτόμενη κοπή για (a) ταχύτητα πρόωσης 0.10 mm/rev, 1 σχισμή, (b) ταχύτητα πρόωσης 0.15 mm/rev, 1 σχισμή, (c) ταχύτητα πρόωσης 0.15 mm/rev, 2 σχισμές [44]

Στα Σχήματα 5.30 και 5.31 παρουσιάζονται οι επιφάνειες αποβλίττου που ελήφθησαν με μικροσκόπιο SEM σε διάφορες συνθήκες κοπής.

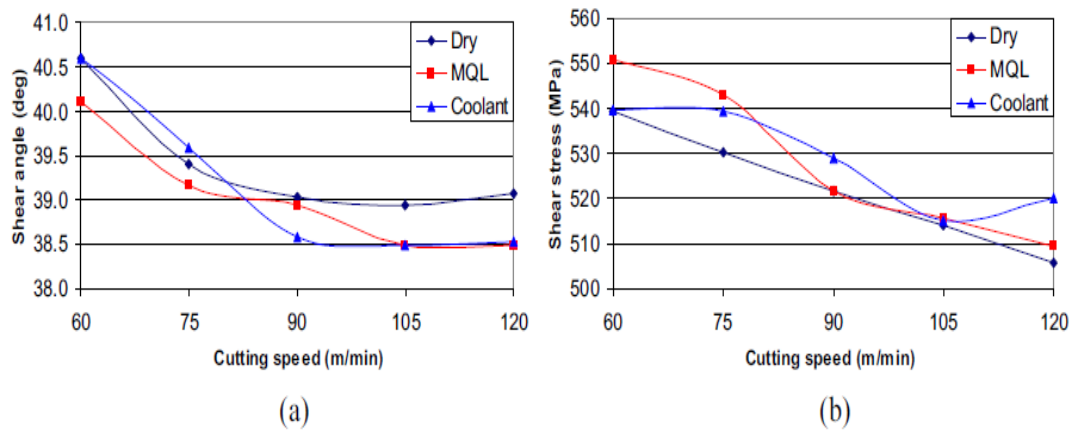


Σχήμα 5.30: Επιφάνειες αποβλίττου για τη διακοπόμενη κοπή με 2 σχισμές και ταχύτητα πρόωσης 0.15 mm/rev και (a) ταχύτητα κοπής 60 m/min και DC, (b) ταχύτητα κοπής 90 m/min και DC, (c) ταχύτητα κοπής 75 m/min και MQL, (d) ταχύτητα κοπής 105 m/min και MQL, (e) ταχύτητα κοπής 75 m/min και FC και (f) ταχύτητα κοπής 9 m/min και FC [44]

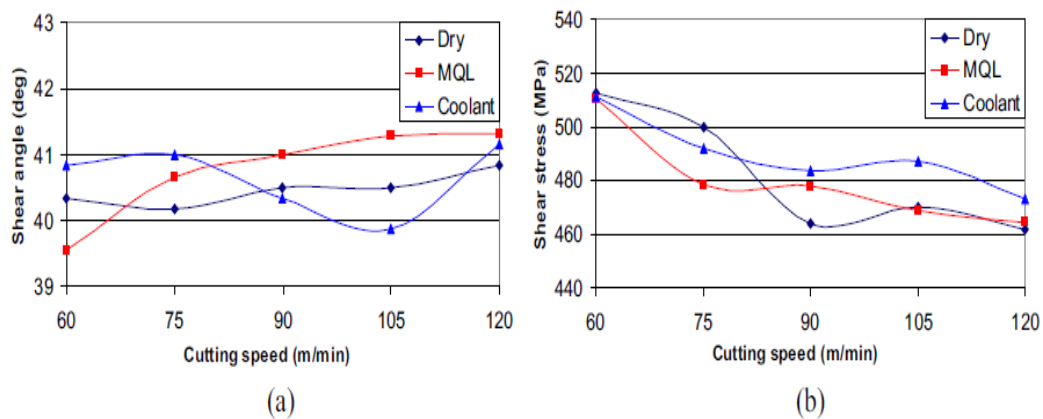


Σχήμα 5.31: Επιφάνειες αποβλίττου για τη διακοπόμενη κοπή με 4 σχισμές και ταχύτητα πρόωσης 0.15 mm/rev και (a) ταχύτητα κοπής 75 m/min και MQL, (b) ταχύτητα κοπής 90 m/min και MQL και (c) ταχύτητα κοπής 12 m/min και MWL [44]

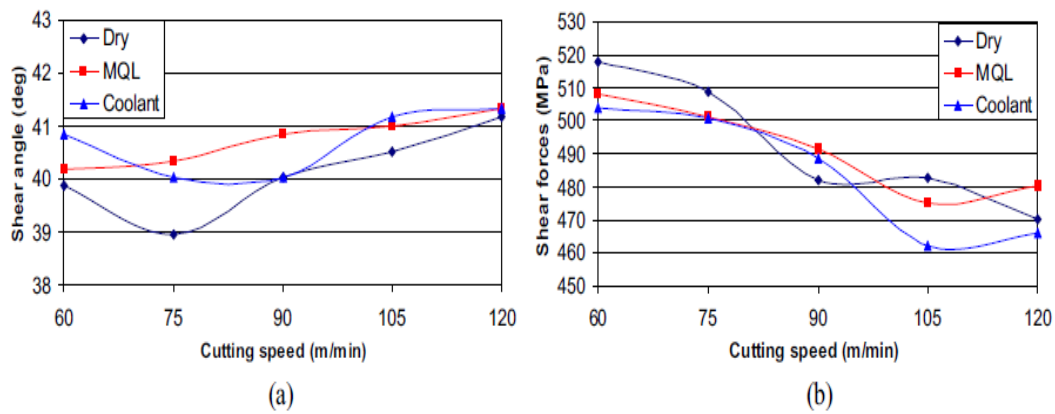
Στα Σχήματα 5.32, 5.33 και 5.34 παρουσιάζονται οι γωνίες διάτμησης και οι τάσεις διάτμησης για διακοπτόμενη κοπή σε διάφορες συνθήκες. Στη χαμηλή ταχύτητα πρόωσης, τόσο η γωνία όσο και οι τάσεις μειώνονται με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Στην υψηλότερη ταχύτητα κοπής, για μία σχισμή, η γωνία τείνει να αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας κοπής για τις μεθόδους ξηράς κοπής και MQL, όμως δεν βγαίνει κάποιο γενικό συμπέρασμα για τη μέθοδο FC. Για δύο σχισμές και ταχύτητα μεγαλύτερη από 60 m/min, η γωνία αυξάνεται με την ταχύτητα κοπής, ενώ για τις μεθόδους ξηράς κοπής και MQL, η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή της μίας σχισμής. Σε όλες τις περιπτώσεις διακοπτόμενης κοπής, οι τάσεις τείνουν να μειώνονται με αύξηση της ταχύτητας κοπής. [44]



Σχήμα 5.32: Γωνίες διάτμησης και τάσεις διάτμησης για διακοπτόμενη κοπή με τις 3 μεθόδους λίπανσης για 1 σχισμή και ταχύτητα πρόωσης 0.10 mm/rev [44]

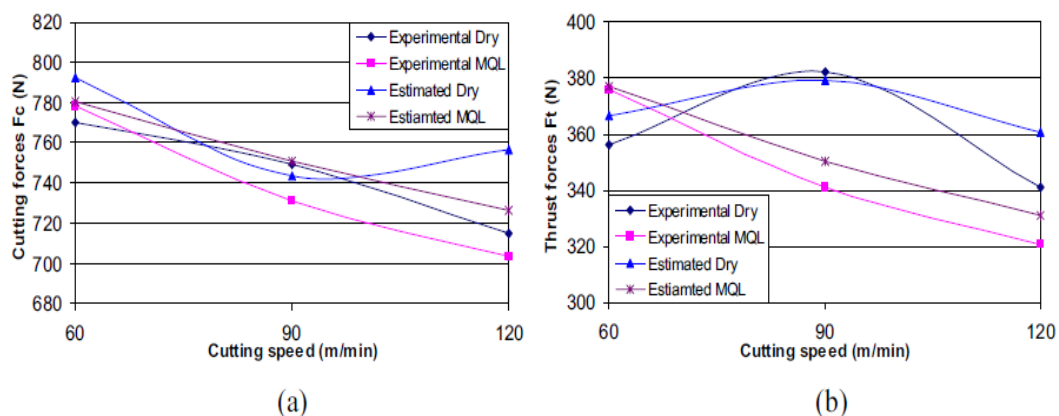


Σχήμα 5.33: Γωνίες διάτμησης και τάσεις διάτμησης για διακοπτόμενη κοπή με τις 3 μεθόδους λίπανσης για 1 σχισμή και ταχύτητα πρόωσης 0.15 mm/rev [44]



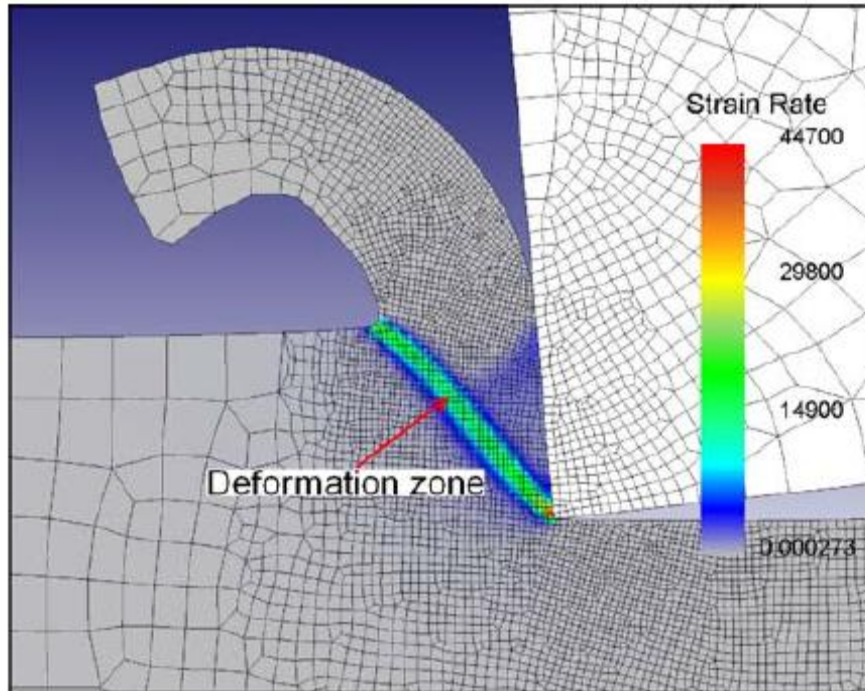
Σχήμα 5.34: Γωνίες διάτμησης και τάσεις διάτμησης για διακοπτόμενη κοπή με τις 3 μεθόδους λίπανσης για 2 σχισμές και ταχύτητα πρόωσης 0.15 mm/rev [44]

Στο Σχήμα 5.35 παρουσιάζονται οι θεωρητικά αναμενόμενες και οι πειραματικές τιμές των δυνάμεων κοπής για διακοπτόμενη κοπή με μία σχισμή.



Σχήμα 5.35: Θεωρητικά αναμενόμενες και πειραματικές τιμές των δυνάμεων κοπής για διακοπτόμενη κοπή μίας σχισμής και ταχύτητα πρόωσης 0.10 mm/rev [44]

Τέλος, στο Σχήμα 5.36 παρουσιάζεται η ζώνη παραμόρφωσης κατά την κατεργασία του Ti-6Al-4V, όπως δίνεται από προσομοίωση με FEM.



Σχήμα 5.36: Ζώνη παραμόρφωσης κατά την κατεργασία Ti-6Al-4V [44]

5.3.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Κατά τη συνεχή κοπή, η μέθοδος της ξηράς κοπής φαίνεται να είναι αποδοτική μόνο σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και χαμηλές ταχύτητες πρόωσης. Οι μέθοδοι MQL και FC έχουν παρόμοια ψυκτική και λιπαντική ικανότητα. Σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής και ταχύτητες πρόωσης, η μέθοδος MQL φαίνεται να είναι πιο αποδοτική από την FC, λόγω της καλύτερης ικανότητας λίπανσης.
2. Κατά τη διακοπτόμενη κοπή, η μέθοδος MQL είναι πιο αποδοτική από την ξηρά κοπή και την FC, κυρίως όταν βρισκόμαστε στην περίπτωση των δύο σχισμών. Επομένως, η μέθοδος MQL είναι μία πιο οικονομική και εναλλακτική μέθοδος λίπανσης από την FC.
3. Τα κοπτικά εργαλεία H1 είναι κατάλληλα για διακοπτόμενη κοπή μίας και δύο σχισμών. Για τις τέσσερις σχισμές, φθείρονται πιο γρήγορα λόγω της υψηλότερης συχνότητας στη θερμική και μηχανική φόρτιση.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν την κατεργασία του τιτανίου και τις διάφορες παραμέτρους που τη συνοδεύουν, συνοψίζονται στη συνέχεια:

1. Το τιτάνιο και τα κράματά του θεωρούνται υλικά με μικρή κατεργασιμότητα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας κοπής και των υψηλών τάσεων επάνω ή/και κοντά στην κόψη του κοπτικού εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η υψηλή θερμοκρασία κοπής οφείλεται στην υψηλή θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, στα λεπτά απόβλιττα που δημιουργούνται, σε μία λεπτή δευτερεύουσα ζώνη, στο μικρό μήκος επαφής ανάμεσα στο απόβλιττο και το κοπτικό εργαλείο και στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του μετάλλου. Από την άλλη, οι υψηλές τάσεις οφείλονται στη μικρή επιφάνεια επαφής και στη σκληρότητα που διατηρεί το τιτάνιο ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες.
2. Τα εργαλεία σκληρομετάλλων WC/Co θεωρούνται από την πλευρά του υλικού τους ως τα πιο κατάλληλα εργαλεία που είναι εμπορικά διαθέσιμα για την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, κυρίως σε συνεχείς κατεργασίες. Οι ποιότητες καρβιδίων C-2 (σύμφωνα με το πρότυπο ISO K20), θεωρούνται οι καλύτερες ποιότητες. Επιπλέον, κάποια εργαλεία ταχυχαλύβων θεωρούνται πολύ κατάλληλα για κάποιες διακοπτόμενες κατεργασίες, ωστόσο είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων υλικών για την κατεργασία του τιτανίου και των κραμάτων του.
3. Τα κοπτικά εργαλεία έρχονται αντιμέτωπα με υψηλές θερμικές και μηχανικές φορτίσεις κατά τη κατεργασία κραμάτων τιτανίου, γεγονός που οφείλεται στις υψηλές τάσεις και τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην κόψη του κοπτικού εργαλείου, οι οποίες επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό το ρυθμό φθοράς και κατ' επέκταση τη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων. Η ανάπτυξη πεδίου φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια, η ανάπτυξη φθοράς κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίττου, η απολέπιση στην περιοχή γύρω από την κόψη, οι μικροθραύσεις και η τοπική θραύση της κόψης του κοπτικού εργαλείου και η πλαστική παραμόρφωση της ακής του κοπτικού εργαλείου είναι οι βασικοί τρόποι αστοχίας των κοπτικών εργαλείων κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Οι δύο πρώτοι τρόποι αστοχίας, που είναι το

πεδίο φθοράς και η φθορά κρατήρα οφείλονται κυρίως σε μηχανισμούς διάλυσης-διάχυσης, τριβής και πλαστικής παραμόρφωσης, ανάλογα με τις συνθήκες κοπής και το κοπτικό εργαλείο, ενώ οι υπόλοιποι τρόποι αστοχίας οφείλονται κυρίως στην ανάπτυξη ρωγμών ή/και σε χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα.

4. Ένας βασικός κανόνας κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου είναι πρέπει να χρησιμοποιηθεί υγρό κοπής. Η σωστή χρήση των ψυκτικών κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μπορεί να επεκτείνει κατά πολύ τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Υγρά κοπής που χαρακτηρίζονται από υψηλή χημική δραστηριότητα μεταφέρουν τη θερμότητα πολύ αποδοτικά και συνεισφέρουν στη μείωση των δυνάμεων κοπής ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο.
5. Οι μέθοδοι κατεργασίας που χρησιμοποιούνται για το τιτάνιο είναι βασικά οι ίδιες με αυτές που ξεκίνησαν να εφαρμόζονται από τότε που το τιτάνιο άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Ωστόσο, κάποιες ειδικές τεχνικές κατεργασίας (όπως είναι η χρήση κοπτικών εργαλείων με ειδική μορφή, π.χ. τα εργαλεία περιστροφικής κοπής, καθώς και άλλες μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας) μπορούν να θεωρηθούν ως εναλλακτικές μέθοδοι για την αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης του μετάλλου κατά την παραγωγή εξαρτημάτων από τιτάνιο, δεδομένου ότι αυτό επιτρέπεται από τη μορφή των εξαρτημάτων.
6. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να επιδειχθεί προκειμένου να αποφευχθεί η υποβάθμιση της ποιότητας της επιφάνειας κατά την κατεργασία του τιτανίου, κυρίως κατά τη λείανση, καθώς η υποβάθμιση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μία δραματική απώλεια της μηχανικής συμπεριφοράς, με τη μορφή για παράδειγμα κόπωσης. Γενικώς, οι ήπιες θλιπτικές παραμένουσες τάσεις που παράγονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας δίνουν εξαιρετικές ιδιότητες έναντι της κόπωσης, ενώ από την άλλη η καταστροφή της επιφάνειας και οι εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις οδηγούν σε δραματική μείωση της απόδοσης.
7. Παρατηρείται να υπάρχει μια σημαντική συσχέτιση της κατεργασιμότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού προς κατεργασία (όπως είναι η σκληρότητα και η αντοχή σε εφελκυσμό), της χημικής σύστασης, καθώς και της μορφολογίας του αποβλίττου, της ειδικής δύναμης κοπής και της ειδικής

δύναμης πρόωσης. Επομένως, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στην κατεργασιμότητα ακόμη και ανάμεσα σε δύο κράματα τιτανίου.

8. Τα κράματα τιτανίου εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στην κατεργασιμότητά τους σε σχέση με άλλα υλικά, τόσο ως προς τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής και τα υπόλοιπα μεγέθη, αλλά και ως προς την ποιότητα του τελικού προϊόντος που κατασκευάζεται.
9. Κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, έχει πολύ μεγάλη σημασία η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου λίπανσης και ψύξης, η οποία επηρεάζει την κατεργασιμότητά τους και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://www.images-of-elements.com>
- [2] <http://www.britannica.com>
- [3] <http://www.wikipedia.org>
- [4] <http://www.rsc.org>
- [5] <http://www.webelements.com>
- [6] <http://www.web-o-rama.net>
- [7] <http://www.azom.com>
- [8] J.F. Kahles, M. Field, D. Eylon, F.H. Froes, J. Met (1985). 'Machining of titanium alloys'. Jom 37, pp. 27-35.
- [9] J.B. Borradile, R.H. Jeal (1981). 'Titanium and titanium alloys'. Vols. 1-3.
- [10] A.R. Machado, J. Wallbank (1990). 'Machining of titanium and its alloys – a review'. Eng. Manuf. 204, pp. 53-60.
- [11] Δ. Μανωλάκος. Σημειώσεις μαθημάτων Κατεργασίες 1 και Κατεργασίες 2.
- [12] H.J. Siekmann (1955). 'How to machine titanium'. Tool Eng. 34, pp.78-82.
- [13] H.C. Child, A.F. Dalton (1968). ISI Special report 94, pp. 139-142.
- [14] W. Konig (1979). Proc. 47th Meeting of AGARD structural and materials panel, pp. 1.1-1.10.
- [15] P.A. Dearnley, A.N. Gearson (1986). 'Evaluation of principal wear mechanisms of cemented carbides and ceramics used for machining titanium alloy IMI 318'. Mater. Sci. Technol. 2, pp. 47-58.
- [16] N. Narutaki, A. Murakoshi, S. Motonishi (1983). 'Study on machining of titanium alloys'. Ann. CIRP 32, pp. 65-69.

- [17] R. Komanduri (1982). 'Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys'. *Wear* 76, pp. 15-34.
- [18] R. Komanduri, B.F. von Turkovich (1981). *Wear* 62, pp. 179-188.
- [19] N.H. Cook (1953). 'Machining and grinding of titanium'. *Proc. Symp.*, pp. 1-7.
- [20] R.M. Freeman (1974). PhD Thesis.
- [21] E.O. Ezugwu, A.R. Machado (1988). 'Behavior of materials in machining'. *Inst. Met.*, Paper 3.
- [22] P.A. Dearnley, A.N. Grearson, J. Aucote (1987). *High Tech. Ceram.* 38, pp. 2699-2712.
- [23] J.L. Waiter, D.W. Skelly (1993). *Wear* 170, pp. 79-92.
- [24] E.O. Ezugwu, I.R. Pashby (1991). 'Behavior of materials in machining'. *Proc. 2nd Int. Conf.*
- [25] P.D. Hartung, B.M. Kramer (1982). 'Tool wear in titanium machining'. *Ann. CIRP*, pp. 75-80.
- [26] M. Wang, Y.Z. Zhang (1988). *Mater Sci. Technol.* 4, pp. 548-553.
- [27] S.K. Bhattacharyya, I.R. Pashby, E.O. Ezugwu, A.R. Machado (1988). *Eng. Mater. Sci. Brazilian Conf.*, pp. 271-275.
- [28] F. Nabhani (2001). 'Machining of aerospace titanium alloys'. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 17, pp. 99-106.
- [29] N. Zlatin, M. Field (1975). USAF Technical report AFML-TR-75-12. Metcut Research Associates Inc.
- [30] H.E. Chandler (1978). *Metals Handbook*, pp. 845-852.
- [31] R. Komanduri, W.R. Reed (1983). 'Evaluation of carbide grades and a new cutting geometry for machining titanium alloys'. *Wear* 92, pp. 113-123.
- [32] W. Konig, K.H. Schroder (1980). *Titanium alloys*.

- [33] E.J. Catt, D. Milwain (1968). ISI Special report 94, pp. 143-150.
- [34] H. Simon, M. Thomas, K. Maier (1979). WT-Zeitschrift fur Industrielle Fertigung 69, pp. 79-82.
- [35] R. Komanduri, D.G. Flont, M. Lee (1984). General Electric Company, pp.15.
- [36] P. Chen, T. Hoshi (1991). Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng. 25, pp. 167-272.
- [37] N. Zlatin, M. Field (1973). 'Machinability parameters on new selective aerospace materials'. Metcut Research Associates, pp. 69-144.
- [38] P.J. Arrazola, A. Garay, L.M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, F. Le Maitre (2009). 'Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)'. Journal of Materials Processing Technology 209, pp. 2223-2230.
- [39] X. Yang, R.C. Liu (1999). 'Machining titanium and its alloys'. Machining Science and Technology 3, pp. 107-139.
- [40] P.J. Arrazola, F. Meslin, S. Marya (2005). 'Serrated chip prediction in numerical cutting models'. Proceedings of the CIRP Congress 8 WMMO, pp. 115-122.
- [41] A. Ikuta, K. Shinozaki, H. Masuda, Y. Tamame, H. Kuroki, Y. Fukaya (2002). 'Consideration of the adhesion mechanism of Ti alloys using cemented carbide during the cutting process'. Journal of Materials Processing 127, pp. 251-255.
- [42] W. Min, Z. Youzhen (1988). 'Diffusion wear in milling titanium alloys'. Materials and Science Technology 4, pp. 548-553.
- [43] N. Narutaki, A. Murakoshi. 'Study on machining of titanium alloys'.
- [44] Z.G. Wang, M. Rahman, Y.S. Wong, K.S. Neo, J. Sun, C.H. Tan, H. Onozuka (2009). 'Study on orthogonal turning of titanium alloys with different coolant supply strategies'. Int J Adv Manuf Technol 42, pp. 621-632.