



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ



**ΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ
ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συμβατικά υγρά κοπής που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού ανεβάζουν το κόστος κατεργασίας, μολύνουν το περιβάλλον και αποτελούν πλέον μια μη βιώσιμη επιλογή. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες που παράγονται κατά την διάρκεια των μηχανουργικών κατεργασιών έχουν ως αποτέλεσμα τον μειωμένο χρόνο ζωής των κοπτικών εργαλείων και τις μειωμένες μηχανικές αποδόσεις των κατεργασμένων τεμαχίων. Η έρευνα τα τελευταία χρόνια αναζητεί φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους ψύξης, με μειωμένους υγειονομικούς κινδύνους προς τους χειριστές, οι οποίες θα είναι ικανές να αυξήσουν την παραγωγικότητα της κοπής, να βελτιώσουν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών και να μειώσουν μακροπρόθεσμα το κόστος παραγωγής.

Η κρυογενική ψύξη, το περιβάλλον δηλαδή ακραία χαμηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνεται με την χρήση των κρυογενικών αερίων του υγρό αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα, αποτελεί μια καινοτόμα και βιώσιμη μέθοδο, ικανή να αντικαταστήσει πλήρως τις παραδοσιακές – συμβατικές μεθόδους ψύξης και λίπανσης. Ποικίλες έρευνες έχουν αποδείξει ότι η κρυογενική κατεργασία μειώνει την θερμοκρασία κοπής και τις φθορές στα κοπτικά εργαλεία ενώ προσφέρει καλύτερη ποιότητα τελικής επιφάνειας στα τεμάχια.

Η πλειονότητα των ερευνών που έχουν διεξαχθεί γύρω από την κρυογενική ψύξη αφορά σε δοκιμές τόννευσης σε κράματα τιτανίου και νικελίου, σε χάλυβες, κεραμικά υλικά και ελαστομερή. Αρκετές μελέτες έχουν επίσης επικεντρωθεί και σε άλλες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού όπως η διάτρηση και το φραιζάρισμα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία της κρυογενικής, είναι η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων κοπής, των κοπτικών εργαλείων καθώς και του τρόπου και ρυθμού παροχής του κρυογενικού ρευστού στην ζώνη κοπής.

Λέξεις κλειδιά : κρυογενική κατεργασία, τόννευση, φραιζάρισμα, διάτρηση, χρόνος ζωής κοπτικού, φθορά κοπτικού, σχηματισμός αποβλίττου, θερμοκρασία κοπής, δυνάμεις κοπής, τραχύτητα.

ABSTRACT

Conventional cutting fluids used in modern manufacturing processes increase machining costs, intrude an impact on environmental status while currently being a non-sustainable option. In addition, the high cutting temperatures not only reduce tool life but they also affect the mechanical performance of the machined parts. Over the last few years, research has been focused on environmentally friendly cooling methods for machining which eliminate health risks among operators, increase cutting productivity, improve the mechanical and physical properties of materials and reduce production cost in the long-run.

Cryogenic cooling, defined as the production of materials at very low temperatures achieved via the use of cryogenic gases such as liquid nitrogen and carbon dioxide, is an innovative and viable method which can completely replace all traditional - conventional cooling and lubrication methods completely. Evidence has shown that cryogenic machining reduces the cutting temperature and tool wear while yields better surface finish.

Most research on cryogenic cooling has focused on turning of titanium and nickel alloys, steels, ceramics and elastomers. Several studies have also investigated other manufacturing processes such as drilling and milling. The optimum results of cryogenic machining depend on the cutting parameters, tool material as well as the flow rate and mode of feeding the cryogenic fluid to the cutting zone.

Keywords : Cryogenic machining, turning, milling, drilling, tool life, tool wear, cutting temperatures, cutting forces, surface roughness, chip formation, conventional fluids

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών μου στην σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με την ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της:

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κ. Αριστομένη Αντωνιάδη Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του και τη συνεχή του υποστήριξη. Εκτός από έναν εξάίρετο καθηγητή, υπήρξε για εμένα ένας πολύ καλός και γενναιόδωρος άνθρωπος, με αμέριστη κατανόηση σε μία προσωπικά δύσκολη περίοδο.

Επιπλέον, ευχαριστώ την οικογένεια μου, τους γονείς μου Χρυσάνθη και Δημήτρη και τις αδερφές μου Ελένη και Μαρία για την αμέριστη αγάπη και υπομονή τους καθώς και τις προσωπικές θυσίες που έχουν κάνει, στηρίζοντας τις επιλογές μου. Θα ήθελα ωστόσο να αφιερώσω την εργασία αυτή στην Ελένη και στο μάθημα ζωής που έδωσε σε όλους μας και κυρίως σε εμένα, να μην εγκαταλείπω ποτέ τους στόχους μας και να ακολουθώ τα όνειρά μου.

Ακόμα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και συναδέλφους μου Πασχάλη και Ευγενία, για την βοήθεια τους, την συνεργασία και την ανταλλαγή εμπειριών, ιδεών και γνώσεων σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης και ιδιαίτερος τον κ. Άγγελο Μαρινάκη, για την άμεση ανταπόκρισή και συμβολή του στην προετοιμασία της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Σκοπός της εργασίας	10
1.2 Δομή της εργασίας	10
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ	12
2.1 Κρυογενική κατεργασία : ορισμός και πλεονεκτήματα	12
2.2 Υγρά κοπής	15
3. ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΨΥΞΗ	25
3.1 Υγρό άζωτο	25
3.2 Διοξείδιο του άνθρακα	26
3.3 Θερμικά χαρακτηριστικά κρυογενικής ψύξης	27
3.4 Υλοποίηση κρυογενικής κατεργασίας	29
3.5 Εργονομία κρυογενικής κατεργασίας	34
4.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	38
4.1 Σκληρότητα και αντοχή στις εφελκυστικές τάσεις	38
4.2 Καταπονήσεις	41
4.3 Ολκιμότητα	42
4.4 Βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας	43
4.5 Αντοχή στην διάβρωση	45
4.6 Χρόνος κόπωσης	46
4.7 Θερμική αγωγιμότητα	47
4.8 Σχηματοποίηση (Formability)	48
4.9 Γενική σύγκριση κρυογενικής ψύξης με τις συμβατικές μεθόδους	49
5.. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΨΥΞΗ	
5.1 Τόρνευση	51
5.2 Κρυογενική τόρνευση	53
5.3 Διάτρηση	77
5.4 Κρυογενική Διάτρηση	79
5.5 Φραιζάρισμα	86
5.6 Κρυογενικό φραιζάρισμα	87
6. ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΤΗΣ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	92
7. ΣΥΝΟΨΗ	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1:	Σημεία βρασμού για διάφορα κρυογενικά αέρια.
Πίνακας 2.2:	Είδος μεταλλουργικού υγρού για διάφορες κατεργασίες.
Πίνακας 2.3:	Αναλογία ανάμειξης γαλακτωμάτων.
Πίνακας 2.4:	Σύγκριση ελαίων κοπής με γαλακτώματα σε διάφορες παραμέτρους της κοπής.
Πίνακας 4.1:	Σύγκριση απόδοσης μεθόδων για διάφορους τρόπους ψύξης-λίπανσης.
Πίνακας 5.1:	Χρόνος ζωής κοπτικού για κάθε είδος ψύξης.
Πίνακας 5.2:	Παράμετροι κατεργασίας στο κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V.
Πίνακας 5.3:	Καταγραφή αποτελεσμάτων δοκιμών σε τόννευση.
Πίνακας 5.4:	Καταγραφή αποτελεσμάτων δοκιμών σε τόννευση σκληρού κράματος βολφραμίου με συμβατική και κρυογενική ψύξη.
Πίνακας 5.5:	Παράμετροι κοπής για το κράμα Nimonic 90.
Πίνακας 5.6:	Παράμετροι κοπής που χρησιμοποιήθηκαν για την διάτρηση του CFRP.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 2.1 : Συμβατική τórνευση με χρήση γαλακτώματος τύπου σαπουνέλαιο .
- Σχήμα 2.2: Μεταλλουργική κατεργασία υπό ξηρές συνθήκες με χρήση πεπιεσμένου αέρα.
- Σχήμα 2.3: Εκτόξευση σπρέι μείγματος λιπαντικού-αέρα κατά την MQL.
- Σχήμα 2.4: Εσωτερικός σχεδιασμός κοπτικού εργαλείου για παροχή μείγματος λιπαντικού-αέρα κατά την MQL.
- Σχήμα 2.5: Σύγκριση κατεργασίας MQL και κατεργασίας υπό ξηρές συνθήκες για την διάρκεια ζωής κοπτικού και επιφανειακής τραχύτητας σε τεμάχιο χάλυβα.
- Σχήμα 3.1: Διάγραμμα φάσης του LN_2 .
- Σχήμα 3.2: Διάγραμμα φάσης του CO_2 .
- Σχήμα 3.3 Διάταξη κρυογενικού συστήματος.
- Σχήμα 3.4 Εξωτερικός ψεκασμός CO_2 με ακροφύσιο σε κατεργασία διάτρησης.
- Σχήμα 3.5 Διανομή κρυογενικού ψυκτικού μέσω ακροφυσίου στην πρόσδεση του κοπτικού, σε κατεργασία τórνευσης.
- Σχήμα 3.6 Κανάλια για την εσωτερική ψύξη.
- Σχήμα 3.7 Κανάλια για την παροχή υγρού άζωτου μέσω του κοπτικού (εσωτερική ψύξη).
- Σχήμα 3.8: Κόστος παραγωγής για την κατεργασία κράματος Inconel 718 για κρυογενική κατεργασία σε σύγκριση με μία συμβατική με χρήση αέρα.
- Σχήμα 4.1: Μικροδομή πλάκας χάλυβα α)σε θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία έναρξης μετασχηματισμού μαρτενσίτη, β)σε θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία έναρξης μετασχηματισμού μαρτενσίτη, γ) κοντά στην τελική θερμοκρασία σχηματισμού μαρτενσίτη.
- Σχήμα 4.2: Σύγκριση προφίλ σκληρότητας σε επιφάνεια και σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια κατά την μηχανική κατεργασία κράματος τιτανίου, υπό ξηρή, MQL, χρήση λιπαντικού και κρυογενική ψύξη με ταχύτητα κοπής 150 m/min.
- Σχήμα 4.3: Γράφημα σύγκρισης σκληρότητας για διαφορετικούς τρόπους ψύξης, σε κατεργασία με κεραμικό κοπτικό εργαλείο, ταχύτητα κοπής $v_c=60$ m/min, $f=0.05$ mm/rev και βάθος κοπής $a_p=0.63$ mm.
- Σχήμα 4.4: Τιμές καταπονήσεων στο κράμα Inconel 718 μετά από διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.
- Σχήμα 4.5: Ποιότητα επιφάνειας κατεργασμένου κράματος X12CrNiWTiB16-13 σε συνθήκες ξηρής κατεργασίας και σε συνθήκες κατεργασίας υπό κρυογενικές συνθήκες.
- Σχήμα 4.6: Οι ταχύτητες κοπής επηρεάζουν τα αποτελέσματα σχετικά με την ποιότητα επιφάνειας του κατεργασμένου μετάλλου σε διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας και για διαφορετικές δυνάμεις κοπής.
- Σχήμα 4.7: Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για διάφορα μέταλλα σε διαφορετικές θερμοκρασίες.
- Σχήμα 4.8: Διαφορετικοί τρόποι κατά την σχηματοποίηση μετάλλων σε συνθήκες κρυογενικής ψύξης.
- Σχήμα 5.1: Κινηματική της τórνευσης-στιγμιότυπο από κατεργασία τórνευσης.

- Σχήμα 5.2: Εξωτερικό ακροφύσιο στην ζώνη κοπής, μεταξύ αποβλίπτου και κοπτικής ακμής.
- Σχήμα 5.3: Εικόνες SEM κοπτικού με επικάλυψη (α) χρήση γαλακτώματος σαπουνέλαιου και (β) χρήση CO₂.
- Σχήμα 5.4: Φωτογραφίες SEM που δείχνουν την σχηματισμό ρωγμών για δυο δοφορετικές επιλογές ψυκτικών μέσων.
- Σχήμα 5.5: Σύγκριση σχηματισμού Λευκού Στρώματος και αλλαγών στην μικροδομή του κράματος τιτανίου στην κρυογενική και στην συμβατική ψύξη.
- Σχήμα 5.6: Σύγκριση πλευρικής φθοράς κοπτικού σε τόννευση Ti-6Al-4V για συμβατική και κρυογενική ψύξη, με ταχύτητα κοπής $v_c=150$ m/min, πρόωση $f=0.13$ mm και βάθος κοπής $a_p=0.3$ mm
- Σχήμα 5.7: Σύγκριση πλευρικής φθοράς κοπτικού στην συμβατική ψύξη με χρήση λιπαντικού σαπουνέλαιου (μεσαία) και στην κρυογενική ψύξη (δεξιά), σε τόννευση τιτανίου με ταχύτητα κοπής $v_c=90$ m/min και πρόωση $f=0.1$ /rev , για 2 λεπτά
- Σχήμα 5.8: Σύγκριση φθοράς κρατήρα φθοράς κοπτικού στην συμβατική ψύξη με χρήση σαπουνέλαιου (μεσαία) και στην κρυογενική ψύξη (δεξιά), σε τόννευση τιτανίου με ταχύτητα κοπής $v_c=90$ m/min και πρόωση $f=0.1$ /rev , για 2 λεπτά.
- Σχήμα 5.9: Το προφίλ του κρατήρα του κοπτικού που επεκτείνει την κοπτική ακμή κατά την κρυογενική τόννευση του κράματος Ti-6Al-4V.
- Σχήμα 5.10: Εσωτερική διανομή του υγρού άζωτο απευθείας στην ζώνη κοπής
- Σχήμα 5.11: Πλευρική και φθορά επιφάνειας αποβλίπτου κατά την ξηρή και κρυογενική κατεργασία.
- Σχήμα 5.12: Εξέλιξη της φθοράς κοπτικού.
- Σχήμα 5.13: Οι εικόνες Α,Γ,Ε αντιστοιχούν σε ξηρή κατεργασία και οι εικόνες Β,Δ,ΣΤ αντιστοιχούν στην κρυογενική με χρήση αζώτου. Οι παράμετροι κοπής βρίσκονται στον Πίνακα 5.1.
- Σχήμα 5.14: Θερμοκρασία κοπτικού εργαλείου στην ξηρή κατεργασία για κάθε μια από τις παραμέτρους.
- Σχήμα 5.15: Θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου στην κρυογενική ψύξη, με θερμοκρασία έναρξης -196°C , μέγιστη θερμοκρασία κοπής στους -145°C και θερμοκρασία λήξης -196°C
- Σχήμα 5.16: Εξωτερική ψύξη του κράματος τιτανίου.
- Σχήμα 5.17: Διάταξη πειραμάτων για κρυογενική ψύξη, ψύξη με nMQL και κρυογενικό επεξεργαστή
- Σχήμα 5.18: Εικόνες SEM για φθορά κοπτικού με ταχύτητα κοπής 60 m/min και πρόωση 0.12 mm/rev.
- Σχήμα 5.19: Εικόνες SEM για φθορά κοπτικού στις υψηλές ταχύτητες και προώσεις.
- Σχήμα 5.20: Θερμοκρασία στην ζώνη κοπής σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για κάθε μέθοδο ψύξης.
- Σχήμα 5.21: Φθορά ελεύθερης επιφάνειας κοπτικού σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για κάθε εναλλακτική μέθοδο ψύξης.
- Σχήμα 5.22: Εικόνες από μικροσκόπιο για την φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού σε κάθε εναλλακτική μέθοδο ψύξης κατά την κοπή χάλυβα.

- Σχήμα 5.23: Σύγκριση φθοράς επιφάνειας αποβλίπτου σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για κάθε μέθοδο ψύξης.
- Σχήμα 5.24: Φθορές επιφάνειας αποβλίπτου του κοπτικού.
- Σχήμα 5.25: Μορφή παραγόμενου αποβλίπτου κατά την κρυογενική (α) και κατά την ξηρή(β) τórνευση.
- Σχήμα 5.26: Βάθος φθοράς CBN κοπτικού και βάθος φθοράς ελεύθερης επιφάνειας.
- Σχήμα 5.27: Φθορά κύριας κόψης τρυπανιού κατά την διάτρηση με χρήση γαλακτώματος και με χρήση αζώτου.
- Σχήμα 5.28: Δύναμη διάτρησης για κρυογενική και ξηρή ψύξη, κατά την διάτρηση CFPR.
- Σχήμα 5.29: Φθορά κοπτικού εργαλείου, αριστερά με χρήση γαλακτώματος και δεξιά με χρήση υγρού αζώτου.
- Σχήμα 5.30: Φραίζα με εσωτερικά κανάλια ψύξης, πεπιεσμένου αέρα και διοξειδίου του άνθρακα.
- Σχήμα 5.31: Τελικά επιφάνεια ανοξειδωτου χάλυβα κατά την ξηρή και κρυογενική κατεργασία του.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην σύγχρονη κοινωνία απαιτούνται συνεχώς καινοτόμες ιδέες και τεχνικές παραγωγής για αξιόπιστα και διαρκή αποτελέσματα. Σαν αποτέλεσμα επιτυγχάνεται συνεχής βελτίωση των κατασκευαστικών τεχνολογιών με κύριο χαρακτηριστικό την διαρκή αύξηση της αποδοτικότητας των μεθόδων αλλά και των αποτελεσμάτων. Τον τελευταίο αιώνα η κατασκευαστική τεχνολογία έχει σημειώσει αλματώδη εξέλιξη. Υπάρχει εντεινόμενο ενδιαφέρον στην βελτίωση όλων εκείνων των χαρακτηριστικών που δίνουν προϊόντα με άριστες μηχανικές ιδιότητες, ενώ συνεχώς γίνονται προσπάθειες να εξελιχθούν οι μηχανουργικές κατεργασίες με γνώμονα το περιβάλλον και την ελαχιστοποίηση του κόστους και της ενέργειας η οποία καταναλώνεται.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η καταγραφή των εξελίξεων που έχουν πραγματοποιηθεί όσον αφορά την μηχανουργική κατεργασία μετάλλων σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται τα αποτελέσματα της κρυογενικής μεθόδου στις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων μελετώνται πειραματικές έρευνες που έχουν γίνει από την επιστημονική κοινότητα σε κατεργασίες κοπής μετάλλων (τόρνευση, φραιζάρισμα, διάτρηση) σε διάφορα μεταλλικά και μη υλικά, με χρήση κρυογενικών ψυκτικών μέσων, ενώ παράλληλα καταγράφεται και η επίδραση της κρυογενικής μεθόδου στα κοπτικά εργαλεία μεταλλουργικής κατεργασίας (αντοχή στην φθορά, χρόνος ζωής του εργαλείου).

1.2 Δομή της εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας διαμορφώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 δίνεται αρχικά ένας ορισμός της έννοιας κρυογενική ενώ ταυτόχρονα εξετάζεται το ιστορικό της υπόβαθρο. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις κρυογενικές θερμοκρασίες, πως ορίζονται και πολύ συνοπτικά πως μπορούν να επιτευχθούν. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνεται μια αναλυτική περιγραφή μηχανουργικών κατεργασιών μετάλλων και άλλων υλικών, με χρήση συμβατικών τρόπων λίπανσης και ψυκτικών (Με Γαλάκτωμα, MQL, Πεπιεσμένος αέρας).

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αρχικά μια αναλυτική περιγραφή των πιο συνηθισμένων ψυκτικών μέσων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κρυογενική κατεργασία μετάλλων όπως είναι το υγρό άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο διεξάγεται η κρυογενική μηχανουργική κατεργασία και αναλύονται σχεδιαστικοί παράγοντες που επιδρούν στην αποτελεσματικότητά της με ταυτόχρονη αναφορά στον ρευστομηχανικό μηχανισμό διανομής των κρυογενικών μέσων. Τέλος, αναφέρεται συνοπτικά η εργονομία της κρυογενικής κατεργασίας.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική περιγραφή της επίδρασης της κρυογενικής μεταλλουργικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες του κατεργασμένου μετάλλου (Σκληρότητα, Καταπνήσεις, Τραχύτητα επιφάνειας, Ολκιμότητα, Αγωγιμότητα, Αντοχή στη διάβρωση, Χρόνος ζωής κοπτικού) μέσω ερευνών και πειραμάτων που διεξήχθησαν από την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η επίδραση της κρυογενικής μεθόδου σε τρεις διαφορετικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, σε διάφορα κράματα, κεραμικά και πολυμερή υλικά. μετάλλων (Τόρνευση, Φραιζάρισμα, Διάτρηση και Λείανση μετάλλων). Εξετάζονται πειράματα που έχουν γίνει στα διάφορα υλικά, οι παράμετροι των κατεργασιών στα πειράματα αυτά και η επίδραση που είχε η κρυογενική ψύξη στα κοπτικά εργαλεία, στον

σχηματισμό του αποβλίπτου, στην θερμοκρασία κοπής, στην ποιότητα επιφάνειας αλλά και στις δυνάμεις κοπής.

Στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται κάποιες καινοτομίες που σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν γύρω από την κρυογενική ψύξη. Οι καινοτομίες αυτές αφορούν κυρίως τον σχεδιασμό και την κατασκευή κατάλληλων εργαλείων φραιζαρίσματος και διάτρησης ώστε να παρέχουν αποτελεσματικά το κρυογενικό ρευστό.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, εξάγονται τα κατάλληλα συμπεράσματα και γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Κρυογενική Κατεργασία : ορισμός και πλεονεκτήματα

Για πάνω από έναν αιώνα, η επιστήμη και η τεχνολογία παραγωγής περιβάλλοντος χαμηλής θερμοκρασίας αναφέρεται γενικά ως κρυογενική (cryogenics) . Επιστημονικά, "κρυογενική" είναι ο κλάδος της φυσικής και της μηχανικής που μελετά την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών και τη συμπεριφορά υλικών υπό τέτοιες συνθήκες «ψύχους» [1].

Τον τελευταίο αιώνα η κρυογενική τεχνολογία βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε αρκετούς τομείς. Εφαρμόζεται στον τομέα των προϊόντων διατροφής με στόχο την διατήρηση των τροφίμων από την βλαβερή επίδραση του αέρα –ακόμα και κατά την μεταφορά τους, και στην κατασκευή αναλώσιμων ή εξοπλισμού όπως για παράδειγμα στα μουσικά όργανα και τις εργαλειομηχανές. Η κρυογενική παίζει σημαντικό ρόλο επίσης στην συντήρηση βιολογικών υλικών όπως του σπέρματος, του αίματος, ιστών και εμβρύων ενώ χρησιμοποιείται και στον πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό (NMR), στην μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος στις πόλεις και στην ανακύκλωση υλικών [4].

Τα τελευταία χρόνια η κρυογενική εφαρμόζεται και στην μηχανουργική κατεργασία μετάλλων, όπου αυτός είναι και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής. Σε αυτόν τον τομέα η εφαρμογή της κρυογενικής αποτελεί μια μόνιμη θερμική κατεργασία που δεν έχει έξοδα και είναι φιλική προς το περιβάλλον [1]. Τα προς κατεργασία μέταλλα υποβάλλονται σε πολύ χαμηλές (κρυογενικές) θερμοκρασίες, οι οποίες μεταβάλλουν τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου με αποτέλεσμα τα άτομα του να τείνουν να έρθουν ακόμη πιο κοντά μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι μια ακόμη πιο πυκνή δομή. Αυτή η πυκνή διάταξη οδηγεί στην συμπλήρωση των κενών που υπήρχαν στη δομή του μετάλλου προηγουμένως, αφού τα μόρια που βρίσκονται στο κρυσταλλικό του πλέγμα αναδιατάσσονται. Ταυτόχρονα με τη μεταβολή που δημιουργείται στη κρυσταλλική δομή, και επειδή οι συστολές και διαστολές που συμβαίνουν γίνονται ομοιόμορφα στο κατεργασμένο μέταλλο, εκτονώνονται οι όποιες τάσεις υπήρχαν στο αντικείμενο εξαιτίας των προηγούμενων κατεργασιών που είχε υποστεί. Όταν η διαδικασία ψύξης έχει ολοκληρωθεί, η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και επαναφορά του μετάλλου σε συνθήκες περιβάλλοντος συμβάλλουν ώστε οι μεταβολές στη δομή να παραμένουν και το μέταλλο να διατηρεί τη νέα του πλέον δομή και τα πλεονεκτήματα αυτής μόνιμα [2].

Από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της κρυογενικής κατεργασίας αποτελούν η αύξηση στη διάρκεια ζωής των υλικών και η αυξημένη τους αντοχή στην φθορά και κόπωση. Επιπλέον, αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα, μειώνονται οι ταλαντώσεις και εξαλείφονται οι παραμένουσες τάσεις οδηγώντας στην διαστατική σταθερότητα και μη παραμόρφωση των υλικών [1].

Η εφαρμογή της κρυογενικής τεχνολογίας λαμβάνει χώρα μια και μόνο φορά στην μηχανουργική κατεργασία, και τα αποτελέσματά της διαρκούν μέχρι το τέλος του χρόνου ζωής του υλικού [1]. Το δραστικό μέσο που χρησιμοποιείται στην κρυογενική ψύξη καλείται κρυογενικό μέσο και είναι συνήθως κάποιο υγροποιημένο αέριο όπως για παράδειγμα το υγρό άζωτο (LN₂) [1]. Στη συνέχεια αυτής της εργασίας θα γίνει ειδική αναφορά σε ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται στις κρυογενικές κατεργασίες.

Το κόστος κτήσης και εγκατάστασης του απαραίτητου εξοπλισμού είναι υψηλό, ωστόσο το χρησιμοποιούμενο κρυογενικό μέσο έχει χαμηλό κόστος, αφού βρίσκεται σε αφθονία [1]

2.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία της κρυογενικής έχει ως αφηγήτρια το έτος 1877 όπου έγινε η υγροποίηση του οξυγόνου από τους επιστήμονες L. Cailletet και R. Pictet στο Παρίσι (LOx). Ο Cailletet τοποθέτησε οξυγόνο και μονοξείδιο του άνθρακα στην συσκευή υγροποίησης αερίου, τα έψυξε στους -29°C και τα συμπίεσε στις 300 atm ενώ ο Pictet υγροποίησε το οξυγόνο στις 320 atm και στους -140°C χρησιμοποιώντας ένα μείγμα από θειικό και ανθρακικό οξύ [5].

Το 1882 ο Γερμανός φυσικός H.K. Onnes ίδρυσε ένα εργαστήριο κρυογενικής στο πανεπιστήμιο Leiden της Ολλανδίας και μαζί με άλλους ερευνητές μελέτησαν την συμπεριφορά των υλικών σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν [1] ενώ τον Ιούλιο του 1908 έγινε ο πρώτος φυσικός που υγροποίησε το ήλιο χαμηλώνοντας την θερμοκρασία σε λιγότερο από τον ένα βαθμό πάνω από το απόλυτο μηδέν, φτάνοντας τα 0,9 K, την πιο κρύα θερμοκρασία στη Γη για την εποχή εκείνη. Επιπλέον, το 1908 μετέτρεψε το εργαστήριό του σε κέντρο της κρυογονικής για πάνω από 50 χρόνια [1].

Έναν χρόνο αργότερα, τον Απρίλιο του 1883, οι Πολωνοί φυσικοί Z. Wroblewski και K. Olszewski υγροποίησαν το άζωτο (LN_2), το οποίο είναι σήμερα το πιο σύνηθες ψυκτικό μέσο στην κρυογονική μέθοδο εξαιτίας της ποσότητας του αερίου αζώτου (N_2) σε μεγάλες ποσότητες στον ατμοσφαιρικό αέρα ενώ το 1898 ο φυσικός J. Dewar υγροποίησε το υδρογόνο [1].

Τα πρώτα πειράματα εφαρμογής της κρυογενικής σε μέταλλα ξεκίνησαν κατά τη διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου στη Γερμανία. Τα πειράματα αυτά αφορούσαν κυρίως βύθιση μεταλλικών αντικειμένων μέσα σε υγρό άζωτο. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι τα μέταλλα που είχαν παγώσει σε χαμηλές θερμοκρασίες έδειξαν μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά. Ωστόσο, η τεχνολογία της εποχής σε συνδυασμό με τις μικρές ποσότητες αζώτου που ήταν διαθέσιμες δεν επέτρεψαν την γενικευμένη χρήση της κρυογενικής [1].

Ωστόσο και κατά την εποχή του Ψυχρού Πολέμου, Σοβιετικοί επιστήμονες δοκίμασαν να ψύξουν χαλύβδινα δοκίμια χωρίς όμως ιδιαίτερα αξιόλογα αποτελέσματα. Η μέθοδος που χρησιμοποίησαν ήταν η απλή εμβάπτιση των δοκιμών σε υγρό άζωτο με αποτέλεσμα αυτό το θερμικό σοκ από την ακαριαία πτώση της θερμοκρασίας να είχε περισσότερο δυσμενή παρά ευεργετικά αποτελέσματα στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών [6].

Το 1966 στην Αμερική, ο E. Busch δημιούργησε τον πρώτο κρυογενικό επεξεργαστή που χρησιμοποιούσε αέριο άζωτο. Έτσι ιδρύθηκε η Cryo-tech Company στο Ντιτρόιτ των ΗΠΑ, η πρώτη εταιρεία κρυογονικής κατεργασίας μετάλλων παγκοσμίως, η οποία μπόρεσε να πραγματοποιήσει την αύξηση κατά 200% - 400% τη διάρκεια ζωής των μεταλλικών εργαλείων [1]. Αξίζει να σημειωθεί πως ο όρος κρυογονική κατεργασία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Uehara και Kumagai το 1968 [1].

Το 1973 ο E. Busch σε συνεργασία με τον R. Barron, καθηγητή κρυογενικής στο Πανεπιστήμιο της Louisiana, πραγματοποίησαν έρευνα για τα αποτελέσματα της κρυογενικής σε μεταλλικά αντικείμενα [1] ενώ στις αρχές του 1976 δημιουργήθηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές εφαρμογής της κρυογονικής μηχανουργικής κατεργασίας και πιο πρόσφατα από την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Engineering Foundation). [1].

Το 1989 ο P. Paulin εξαγόρασε την τεχνολογία από τον E. Busch και εξελίχθηκε περαιτέρω ο κρυογενικός επεξεργαστής καθώς μέσω των καινούργιων τεχνολογιών δημιουργήθηκε

εξειδικευμένο λογισμικό, το οποίο παρείχε πολλές πληροφορίες σχετικές με το χρόνο και τη θερμοκρασία της κρυογονικής κατεργασίας.

Το 1999 μια νέα εταιρεία στην πολιτεία του Ιλινόις, η 300BELOW, εξαγόρασε πλήρως την Cryo-tech και έγινε η μεγαλύτερη εταιρεία κρυογενικής κατεργασίας στον κόσμο. Από το 2000 μέχρι και το 2005 γίνεται κατεργασία από την εταιρεία αυτή πάνω από 1500 τόνους μέταλλο το χρόνο και παγκοσμίως λειτουργούν 160 κρυογενικές περιφερειακές της μονάδες.

2.1.3 Κρυογενικές θερμοκρασίες

Με τον όρο κρυογενικές θερμοκρασίες αναφέρονται οι θερμοκρασίες στις οποίες εφαρμόζεται η κρυογενική τεχνολογία. Στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα όταν γίνεται αναφορά σε κρυογενικές θερμοκρασίες χρησιμοποιείται κυρίως η κλίμακα Kelvin ή η κλίμακα Rankine. Η αιτία που προτιμούνται οι συγκεκριμένες κλίμακες είναι γιατί οι τιμές τους μετρώνται θετικά από το απόλυτο μηδέν (0 °K) [2].

Στους περισσότερους ερευνητικούς οργανισμούς καθώς και τα διεθνή πρότυπα μετρήσεων έχει διαπιστωθεί ότι η κρυογενική κατεργασία αρχίζει στους 123°K (-150°C). Ο ερευνητικός οργανισμός της Αμερικής (Cryogenic Society of America) ορίζει ως κρυογενικές θερμοκρασίες τις θερμοκρασίες εκείνες κάτω των 120°K (-153°C). Το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology), καθορίζει ως κρυογενικές τις θερμοκρασίες κάτω των 93°K (-180.8°C) [1].

Ως κρυογενικά ψυκτικά μέσα χρησιμοποιούνται πολυάριθμα αέρια, όπως για παράδειγμα το ήλιο, υδρογόνο, νέον, άζωτο, οξυγόνο κ.α., των οποίων τα σημεία βρασμού είναι κάτω των 93°K (-180°C). Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα κανονικά σημεία βρασμού (NBP) των πιο συνηθισμένων κρυογενικών ψυκτικών μέσων, σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πιέσεων.

Αέρια	Kelvin (°K)	Celsius (°C)
Μεθάνιο	111.7	- 161,5
Οξυγόνο	90.2	- 183,0
Άζωτο	77.4	-195.8
Υδρογόνο	20,3	-252.9
Ήλιο	4,2	- 269.0
Νέον	27	- 246
Αργό	87	- 186

Πίνακας 2.1 : Σημεία βρασμού για διάφορα κρυογενικά αέρια.

Οι κρυογενικές συνθήκες παράγονται με μία από τις τέσσερις βασικές τεχνικές:

- Αγωγή θερμότητας
- Ψύξη με εξάτμιση
- Ψύξη με γρήγορη επέκταση (φαινόμενο Joule-Thomson)
- Αδιαβατικός απομαγνητισμός

Η αγωγή θερμότητας συμβαίνει όταν δύο σώματα έρχονται σε επαφή, με μετάδοση θερμότητας από το σώμα που βρίσκεται σε υψηλότερες θερμοκρασιακές κλίσεις προς το σώμα με χαμηλότερη θερμοκρασία. Η αγωγή θερμότητας είναι απαραίτητη για την

παραγωγή κρυογενικών θερμοκρασιών και μπορεί να συμβεί με απλή εμβάπτιση του σώματος σε κρυογενικό περιβάλλον [2].

Η δεύτερη φυσική διεργασία είναι η ψύξη με εξάτμιση, η οποία συμβαίνει επειδή τα άτομα ή τα μόρια ενός υγρού έχουν λιγότερη ενέργεια όταν είναι στην υγρή φάση, από όταν είναι στην αέρια κατάσταση. Καθώς εξατμίζεται ένα υγρό, τα μόρια στην επιφάνειά του προσλαμβάνουν αρκετή ενέργεια από το περιβάλλον για να μεταβούν στην αέρια κατάσταση. Επειδή το υπόλοιπο υγρό έχει χαμηλότερη ενέργεια, η θερμοκρασία του υγρού πέφτει. Έτσι λοιπόν, έχουμε το φαινόμενο της εξαναγκασμένης ψύξης με εξάτμιση. Στην ουσία υπάρχει εξαναγκασμένη εξάτμιση και ταυτόχρονη άντληση των επιφανειακών μορίων ενός υγρού με σκοπό την ψύξη του υπόλοιπου υγρού. Μόλις, επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία, η άντληση συνεχίζεται με μειωμένο ρυθμό ώστε να διατηρηθεί η χαμηλότερη θερμοκρασία [22].

Η τρίτη διεργασία χρησιμοποιεί το φαινόμενο Joule-Thomson το οποίο περιλαμβάνει την ψύξη ενός πεπιεσμένου αερίου με την ταχεία διόγκωσή του ή ισοδύναμα με την ακαριαία μείωση της πίεσής του [22]. Το φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1852 από τους Joule και Thomson και ήταν καταλυτικό στην υδροποίηση του υδρογόνου και του ήλιου.

Η τέταρτη διεργασία, αδιαβατικός απομαγνητισμός, περιλαμβάνει την χρήση παραμαγνητικών αλάτων για την απορρόφηση θερμότητας. Αυτό το φαινόμενο έχει χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της θερμοκρασίας του υγρού ηλίου σε λιγότερο από ένα χιλιοστό του ενός βαθμού πάνω από το απόλυτο μηδέν με τον ακόλουθο τρόπο. Ένα παραμαγνητικό άλας μοιάζει πολύ με μια τεράστια συλλογή πολύ μικροσκοπικών μαγνητών που ονομάζονται μαγνητικές στιγμές. Κανονικά, αυτοί οι μικροσκοπικοί μαγνήτες είναι τυχαία ευθυγραμμισμένοι, έτσι ώστε το σύνολό τους να μην είναι μαγνητικό.. Αυτή η διαδικασία μειώνει την εντροπία του συστήματος, αφού το άλας απορροφά ενέργεια από το περιβάλλον του υγρού μειώνοντας έτσι την θερμοκρασία του [22].

2.2 Υγρά κοπής

Οι υψηλές θερμοκρασίες και θερμορροές που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας μηχανουργικής κατεργασίας, η φθορά στα εργαλεία κατεργασίας με συνέπεια τον μικρό χρόνο ζωής τους αλλά και οι αλλοιώσεις στην επιφάνεια των κατεργασμένων μετάλλων υποχρεώνουν την έρευνα για χρήση διαφόρων μεταλλουργικών υγρών ώστε να αποφεύγονται όσο γίνεται δυνατόν οι παραπάνω επιπτώσεις και να προκύπτουν τα καλύτερα αποτελέσματα κατά την κατεργασία μετάλλων [3].

Τα υγρά κοπής παραδοσιακά χρησιμοποιούνται στις μηχανουργικές κατεργασίες ώστε να λιπαίνουν το κοπτικό εργαλείο με το απόβλιττο και το κοπτικό εργαλείο με το κατεργαζόμενο τεμάχιο, αφαιρώντας την θερμότητα από το αντικείμενο εργασίας και την ζώνη κοπής. Βέβαια η πρωταρχική και κύρια χρήση τους είναι η λίπανση και η ψύξη ενώ παράλληλα μειώνουν την τριβή μεταξύ κοπτικού και αποβλίττου [7].

Τα μεταλλουργικά υγρά που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας εξυπηρετούν τις παρακάτω βασικές λειτουργίες:

- λιπαίνουν τη ζώνη κοπής του μετάλλου που υφίσταται κατεργασία
- παρέχουν ψύξη για το εργαλείο και το κατεργαζόμενο μέταλλο για γρήγορη και αποτελεσματική αφαίρεση της θερμότητας που παράγεται κατά τη διαδικασία κοπής
- διευκολύνουν ή βοηθούν στην απομάκρυνση του μέρους του μετάλλου που κόβεται από τη ζώνη κοπής (απόβλιττο) ενώ παράλληλα συμβάλλουν στην διαμόρφωση ενός επιθυμητού αποβλίττου
- μειώνουν την καταναλισκόμενη ενέργεια

- βοηθούν στην παραγωγή πολύ καλής τελικής επιφάνειας με διαστατική ακρίβεια
- να προστατεύουν το κοπτικό εργαλείο και την εργαλειομηχανή από τυχόν διάβρωση
- να προστατεύουν το κοπτικό εργαλείο από την υπερθέρμανση ώστε να μην μειώνονται η σκληρότητά του και η αντίσταση στην τριβή αυξάνοντας έτσι την διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου [8]

Οι επιθυμητές ιδιότητες των υγρών κοπής συνοψίζονται στην υψηλή θερμική αγωγιμότητά τους, στο υψηλό σημείο ανάφλεξης (ωστέ να αποφεύγεται ο κίνδυνος πυρκαγιάς), στην μη παραγωγή ελαστικού ή στερεού ιζήματος σε συνθήκες θερμοκρασίες εργασίας και να είναι σταθερά απέναντι στην οξείδωση. Επιπλέον τα υγρά κοπής είναι απαραίτητο να έχουν χαμηλό ιξώδες, ώστε να υπάρχει ελεύθερη ροή στις επιφάνειες και τέλος να μην προκαλούν ερεθισμό και μόλυνση στο ανθρώπινο δέρμα [8].

Η σχετική σημασία αυτών των λειτουργιών εξαρτάται συχνά από το μέταλλο που υφίσταται κατεργασία, τη λειτουργία που εκτελείται και το εργαλείο που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, τα μεταλλουργικά υγρά διακρίνονται σε δύο μεγάλες ομάδες, τα έλαια κοπής (απλά ή χημικά μη ενεργά και με πρόσθετα υψηλής πίεσης ή χημικά ενεργά) που εμφανίζουν αυξημένη λιπαντική δράση και τα υδατικά υγρά κοπής, που εμφανίζουν αυξημένη ψυκτική δράση (γαλακτώματα και υδατικά διαλύματα) [7]. Ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει το είδος του μεταλλουργικού υγρού που προτιμάται για διάφορα είδη κατεργασιών.

Είδος Κατεργασίας	Έλαιο Κοπής	Γαλάκτωμα
Εκχόνδριση	**	*
Κοχλιοτόμιση	**	*
Κοπή Οδοντωτών τροχών	**	-
Διάτρηση	**	*
Φραιζάρισμα	**	**
Τόρνευση	**	**
Κοπή σε αυτόματες ΕΜ	**	**
Πριόνισμα	**	**
Λείανση, Φινίρισμα	**	*
Κοπή Σφηνόδρομου	**	**
Λείανση Σπειρωμάτων	**	*
Λείανση Εργαλείων	**	**
Λείανση οδοντών	**	*
Περιφερική Λείανση	*	**
Μετωπική Λείανση	*	**

Πίνακας 2.2 : Είδος μεταλλουργικού υγρού για διάφορες κατεργασίες.

Το έτος 2002, πάνω από 7.5 εκ. κυβικά μέτρα υγρών κοπής χρησιμοποιήθηκαν από βιομηχανίες της Βόρειας Αμερικής, ενώ παράλληλα υπολογίστηκε ότι το κόστος χρήσης υγρών κοπής κυμαίνεται μεταξύ του 7% και 17% του συνολικού κόστους παραγωγής. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι τα υγρά κοπής επιβάρυναν το υπέδαφος και μόλυναν

ποτάμια, λίμνες και τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ τυχόν φιλική προς το περιβάλλον διαχείρισή τους μετά την χρήση τους αύξησε υπερβολικά πάρα πολύ το κόστος [7].

Το NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) υπολόγισε ότι 1.2 εκ. εργάτες στις μηχανουργικές τεχνολογίες εκτέθηκαν σε μετα-χρησιμοποιούμενα υγρά. Η χρήση υγρών κοπής κατά την διάρκεια μια κατεργασίας ή μιας διαμόρφωσης παράγει αερομεταφερόμενη σκόνη που σε συνδυασμό με το ίδιο το υγρό προκαλεί δερματίτιδες, αρκετά είδη καρκίνων και άλλες παθήσεις [7].

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση, οι συνέπειες στην υγεία των εργατών καθώς και το οικονομικό κόστος (απόκτησης-διαχείρισης των υγρών κοπής) οδήγησαν τις προηγούμενες δεκαετίες σε έρευνες για εναλλακτικούς τρόπους λίπανσης κατά την διάρκεια μιας κατεργασίας [7].

Παρακάτω περιγράφονται διάφορα μέσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τα εργαλεία μηχανουργικής κατεργασίας μετάλλων.

2.2.1 Κατεργασία μετάλλων με χρήση νερού/λαδιού (oil/water emulsion)

Η χρήση νερού ως ψυκτικού μέσου σε διαδικασίες κατεργασίας μετάλλων χρονολογείται από τον 16ο αιώνα. Ωστόσο, η σύγχρονη εφαρμογή ψυκτικών υγρών (γαλακτωμάτων) με βάση το λάδι και το νερό έγινε διαδεδομένη στις αρχές του 20ου αιώνα στη μηχανουργική κατεργασία μετάλλων και ιδιαίτερα των κραμάτων χάλυβα [7].

Γαλάκτωμα (emulsion) ονομάζεται το κολλοειδές διάλυμα που προκύπτει με την προσθήκη διαλυτού ελαίου σε νερό υπό ορισμένη αναλογία. Για παράδειγμα, το γαλάκτωμα ελαίου σε νερό έχει μικροσκοπικά σταγονίδια ενός οργανικού διαλύτη (υδρογονάνθρακα) διασκορπισμένου σε ένα διάλυμα νερού γαλακτώματος.

Η παρασκευή ενός γαλακτώματος γίνεται με αργή προσθήκη ελαίου στο νερό (ποτέ το αντίστροφο) και συνεχή ανάδευση για την ομογενοποίηση του διαλύματος. Η αναλογία νερού/ελαίου στο γαλάκτωμα εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου και το είδος της κατεργασίας. Οι τυπικές τιμές της αναλογίας γαλακτώματος για διάφορες κατεργασίες κοπής δίνονται στον Πίνακα 2.3 [9].

Είδος κατεργασίας	Ποσοστό ελαίου (%)
Εκχόνδριση	10-20
Κοχλιοτόμιση	5-10
Βαθιά διάτρηση	10-20
Κατεργασία διάσχισης	5-10
Φραιζάρισμα	5-10
Τόρνευση	3-10
Πριόνισμα	5-20
Τρόχιση εργαλείων	3-6
Λείανση	3-6

Πίνακας 2.3 : Αναλογία ανάμειξης γαλακτωμάτων.

Ένα γαλάκτωμα που συχνά χρησιμοποιείται στην κατεργασία μετάλλων είναι το νερό σε λάδι (φυσικό πετρέλαιο) ή κοινώς σαπουνέλαιο, το οποίο έχει μικροσκοπικά σταγονίδια

διαλύματος νερού διασκορπισμένα σε ένα λάδι [9]. Ο τύπος γαλακτώματος σαπουνέλαιο μπορεί εύκολα να καθαριστεί από το τεμάχιο με νερό και ελαφρύ απορρυπαντικό ενώ ο τύπος νερού σε λάδι αφήνει ένα λιπαρό φιλμ (υμένιο) που είναι πολύ δύσκολο να αφαιρεθεί [9]. Έχει διαπιστωθεί ότι το ελάχιστο μέγεθος των σωματιδίων που παρατηρείται στο υμένιο μπορεί να φτάσει μέχρι και 50μm [9]. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται συμβατική τórνευση μετάλλου με χρήση σαπουνέλαιου.



Σχήμα 2.1 : Συμβατική Τórνευση με χρήση γαλακτώματος σαπουνέλαιου.

Ο Πίνακας 2.4 συγκρίνει τα έλαια κοπής με τα γαλακτώματα όσον αφορά τις διάφορες παραμέτρους της κοπής [7,8].

Παράμετρος	Έλαια κοπής	Γαλακτώματα
Ισχύς κοπής	Μεσαίες/βαριές κοπές	Ελαφρές/μεσαίες κοπές
Ταχύτητα κοπής	Χαμηλές/μεσαίες στροφές και προώσεις	Υψηλές στροφές και προώσεις
ΔΖ κοπτικού εργαλείου	Μεγαλύτερη	Μικρότερη
Ποιότητα επιφάνειας	Καλλίτερη	Χειρότερη
Υλικό τεμαχίου	Χρωματισμός Cu με θειούμενα έλαια	Μη συμβατά με Mg
Υλικό Κοπτικού	Για όλα τα υλικά ΚΕ	Σκληρομέταλλα/ Κεραμικά σε ορισμένες περιπτώσεις
Εργαλειομηχανή	Καλή συμπεριφορά	Συχνά προβληματική
Μηχανέλαια	Καλή συμβατότητα	Όχι καλή συμβατότητα

Επίδραση στον άνθρωπο	Λιγότερο επιβλαβή σε δερματοπάθειες, καπνογόνα Ρυπαίνει	Περισσότερο επιβλαβή, κακή οσμή λόγω βακτηριδίων Καλή συμβατότητα
Περιβάλλον	Για κάθε υλικό και	Ειδικές χρήσεις και
Εύρος χρήσης	κατεργασία	εφαρμογές
Διάρκεια χρήσης	Μεγαλύτερη	Μικρότερη
Καθαριστική ικανότητα	Κακή	Καλή
Αντοχή σε βακτηρίδια	Καλή	Μέτρια
Κατανάλωση	Μεγαλύτερη	Μικρότερη
Αναφλεξιμότητα	Αναφλέξιμο	Μη αναφλέξιμο
Κόστος	Μεγαλύτερο	Μικρότερο
Δευτερεύοντα έξοδα	Μεγαλύτερα	Μικρότερα
Προστασία σε διάβρωση	Καλή	Μέτρια

Πίνακας 2.4 : Σύγκριση ελαίων κοπής με γαλακτώματα σε διάφορες παραμέτρους της κοπής.

Το γαλάκτωμα μπορεί να μεταφερθεί στην επιφάνεια του κατεργασμένου μετάλλου με δύο τρόπους:

- εξωτερικά όπου το γαλάκτωμα μεταφέρεται μέσω εξωτερικού ακροφυσίου στην επιφάνεια κοπής που βρίσκεται κοντά στο εργαλείο και στο μέταλλο που υποβάλλεται σε μηχανουργική κατεργασία
- εσωτερικά μέσα από το κοπτικό εργαλείο όπου το γαλάκτωμα μεταφέρεται μέσω εσωτερικών τρυπών στο εργαλείο κατεργασίας [7].

Οι μηχανισμοί λίπανσης καθορίζονται από την ταχύτητα ροής του γαλακτώματος, ωστόσο έχει διαπιστωθεί ότι σε υψηλότερες ταχύτητες το γαλάκτωμα ελαίου σε νερό παράγει λεπτά υμένια, κάτι που θεωρείται ανεπιθύμητο κατά την μεταλλουργική κατεργασία [9].

Από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα αυτών των ψυκτικών υγρών είναι ότι λιπαίνουν το μέρος του μετάλλου που κόβεται κατά την μηχανουργική κατεργασία με αποτέλεσμα να ελέγχεται η τριβή και να βελτιώνεται η διάχυση της θερμότητας από το μέρος του μετάλλου που κόβεται και συνεπώς να μειώνονται οι μηχανισμοί θερμικής και χημικής φθοράς ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η ποιότητα του τεμαχίου [9].

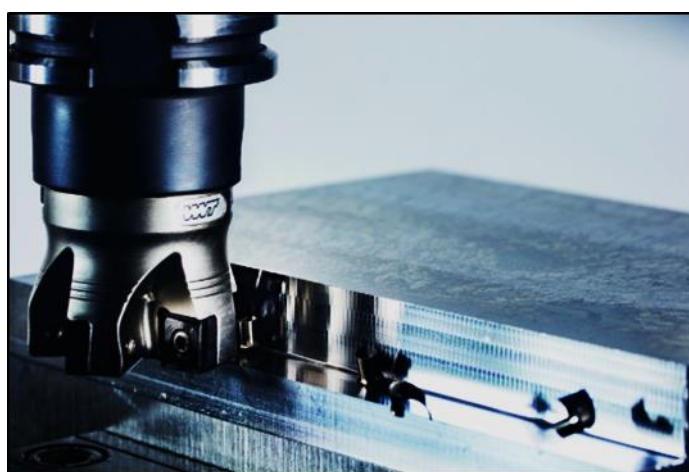
Από την άλλη πλευρά, πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η έκθεση σε τέτοια ψυκτικά υγρά σχετίζεται με την μεταγενέστερη ανάπτυξη διαφόρων ειδών καρκίνων, δερματίτιδας και αναπνευστικών ασθενειών. Σύμφωνα με τις οδηγίες της επιτροπής Metalworking Fluid Standards Advisory Committee σχετικά με τα γαλακτώματα, το όριο έκθεσης σε αυτά δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0.5 mg/m^3 ενώ προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια όλων των εμπλεκομένων είναι αναγκαία η ιατρική παρακολούθηση, ο συνεχής έλεγχος του χώρου εργασίας και η εκτεταμένη εκπαίδευση των εργαζομένων [10]. Τα προαναφερόμενα ζητήματα υγείας σε συνδυασμό με το κόστος διατήρησης και ασφαλούς απομάκρυνσης των υγρών κοπής έχουν αυξήσει το ενδιαφέρον των ερευνητών για μεθόδους χωρίς χρήση γαλακτωμάτων, όπου είναι η κατεργασία μετάλλων με χρήση πεπιεσμένου αέρα [11].

2.2.2 Κατεργασία μετάλλων με χρήση πεπιεσμένου αέρα (dry machining)

Όταν εργαλεία κοπής μετάλλων με επικάλυψη εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970, οι διεργασίες ξηρής κατεργασίας μετάλλων (dry machining) άρχισαν να γίνονται με

την χρήση πεπιεσμένου αέρα που παρέχονταν μέσα από το εργαλείο κατεργασίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις κατεργασίας με χρήση πεπιεσμένου αέρα, δεν υπήρχε τόσο μεγάλη ανάγκη για λίπανση του μέρους του μετάλλου που κοβόταν ενώ η παραγόμενη θερμότητα μπορούσε να αντιμετωπιστεί, αφού ο υψηλής πίεσης αέρας απομάκρυνε το απόβλητο από την ζώνη κοπής [7].

Πολλές μελέτες έχουν εστιάσει σε τέτοιες διεργασίες ξηρής κατεργασίας μετάλλων που αφορούν στη διάτρηση κραμάτων αλουμινίου χύτευσης. Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει την κατεργασία μετάλλων υπό ξηρές συνθήκες με χρήση πεπιεσμένου αέρα. Στις μελέτες αυτές η ξηρή κατεργασία αποδείχθηκε ανεπαρκής καθώς υπήρχαν επιπτώσεις πάνω στην επιφάνεια των μετάλλων, όπως η υπερβολική φθορά στα εργαλεία κοπής και η τραχύτητα στην επιφάνεια των μετάλλων που κόβονταν. Και οι δύο αυτοί παράγοντες είχαν ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του κόστους κατεργασίας και την μείωση της παραγωγικότητας [7].



Σχήμα 2.2 : Μεταλλουργική κατεργασία υπό ξηρές συνθήκες με χρήση πεπιεσμένου αέρα.

Ωστόσο σήμερα υπάρχουν πολλοί παράγοντες που έχουν οδηγήσει στην βελτίωση της κατεργασίας μετάλλων υπό ξηρές συνθήκες. Πρώτα από όλα, σημαντικό ρόλο παίζουν οι ταχύτητες στα μηχανήματα καθώς καθιστούν την κατεργασία υπό ξηρές συνθήκες πιο πρακτική. Ένας τυπικός τροχός κοπής με διάμετρο 150-200mm μπορεί να αφεθεί να τρέχει για πάνω από μία ώρα σε βάθος 10mm της κοπής, σε 200-300rpm. Αυτή η υψηλή ταχύτητα βοηθά να αποφευχθεί η ζημιά στην επιφάνεια κοπής [11]. Επιπλέον, οι υψηλές ταχύτητες κατά την ξηρή κατεργασία ενισχύονται σήμερα και με την χρήση Computerized Numerical Control (CNC Machining). Συστήματα CNC, μηχανές δηλαδή που λειτουργούν μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, συνηθίζονται στην κατεργασία μετάλλου και ξύλου και επιτρέπουν τυποποίηση και ακρίβεια διότι απαιτούν μόνο ένα πρόγραμμα αντί για καλούπια.

Ένας άλλος παράγοντας βελτίωσης της κατεργασίας μετάλλων υπό ξηρές συνθήκες είναι οι πρόοδοι στους τύπους επικάλυψης που εφαρμόζονται στα εργαλεία κοπής. Μόλις πριν από λίγα χρόνια, η κύρια επίστρωση εργαλείων ήταν το οξειδίο του αλουμινίου (Al_2O_3). Ωστόσο σήμερα έχουν αναπτυχθεί και άλλες επικαλύψεις με βάση το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN), το κυανίδιο του τιτανίου (TiCN) και το αργιλονιτρίδιο του τιτανίου (TiAlN) ώστε να αντέχουν σε πιο δύσκολες συνθήκες λειτουργίας του εργαλείου κοπής και κατεργασίας μετάλλων [7]. Έρευνα έδειξε ότι η επικάλυψη με το αργιλονιτρίδιο του τιτανίου (TiAlN) παρουσιάζει θερμική σταθερότητα μέχρι την θερμοκρασία των 900°C [12].

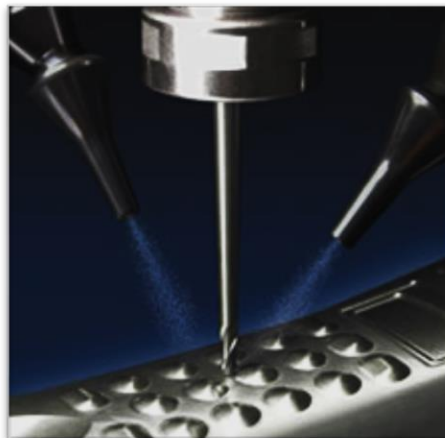
Ένα από τα πλεονεκτήματα της κατεργασίας μετάλλων υπό ξηρές συνθήκες είναι ότι μειώνεται η ατμοσφαιρική ρύπανση και η μόλυνση των υδάτων και του εδάφους καθώς επίσης και ο κίνδυνος για την υγεία του χειριστή. Επιπλέον, υπάρχει σημαντική μείωση του κόστους καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για αγορά, αποθήκευση, χειρισμό και ασφαλή απομάκρυνση των υγρών κοπής [12].

Παρά τα θετικά, η ξηρή κατεργασία δεν έχει ακόμη βρει ευρεία χρήση, σε μεγάλο βαθμό λόγω της έλλειψης αποτελεσματικών υλικών επικάλυψης. Έτσι, ενώ η τεχνολογία για την πραγματοποίηση της ξηρής κατεργασίας έχει βελτιωθεί, απαιτείται μεταλλουργικό υγρό για να εξασφαλιστεί ότι το τελείωμα (φινίρισμα) της επιφάνειας των μετάλλων που κατεργάζονται ανταποκρίνεται στις προσδοκίες [11].

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της εταιρείας Caterpillar, η οποία έχει δοκιμάσει την ξηρή κατεργασία μετάλλων σε μια σειρά μηχανουργικών κατεργασιών τα τελευταία 20 χρόνια. Οι νέες επικαλύψεις εργαλείων ήταν χρήσιμες, αλλά εξακολουθεί να υπάρχει το πρόβλημα ότι η μηχανουργική κατεργασία δεν μπορεί να γίνει με το ρυθμό που απαιτείται για να επιτευχθεί η αναμενόμενη παραγωγικότητα στην κατεργασία όπως εκείνη διαπιστώνεται με τη χρήση μεταλλουργικών ρευστών [12].

2.2.3 Κατεργασία μετάλλων με MQL (Minimum Quantity Lubrication)

Η τεχνολογία λίπανσης ελάχιστης ποσότητας (Minimum Quantity Lubrication, MQL) αναδείχθηκε στη δεκαετία του 1990 μια πιο προοδευτική και βιώσιμη λύση στην κατεργασία μετάλλων. Κατά την εφαρμογή της, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, εκτοξεύεται σπρέι μείγματος λαδιού/αέρα από ειδικό ακροφύσιο που βρίσκεται κοντά στην άκρη του κοπτικού εργαλείου [13]. Ενώ σε μεθόδους κατεργασίας μετάλλων τα κοπτικά υγρά επιλέγονται με βάση την απόδοσή τους στην κοπή, η τεχνολογία αυτή λαμβάνει υπόψιν της άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα την ανθρώπινη ασφάλεια και την προστασία από την περιβαλλοντική μόλυνση [13].



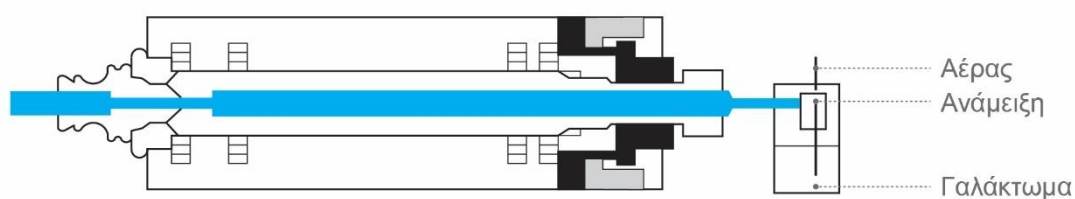
Σχήμα 1.3 : Εκτόξευση σπρέι μείγματος λιπαντικού /αέρα κατά την MQL κατεργασία μετάλλων.

Με την τεχνολογία αυτή μπορούν να εφαρμοστούν μικρές ποσότητες λιπαντικού υψηλής ποιότητας απευθείας στη διεπιφάνεια εργαλείου κοπής/ κατεργαζόμενου μετάλλου [13]. Έτσι, η ποσότητα του εφαρμοζόμενου λιπαντικού μειώνεται στο ελάχιστο.

Η μέγιστη ογκομετρική παροχή εφαρμοζόμενου λιπαντικού με την τεχνολογία MQL είναι μικρότερη από 50 ml/ώρα. Σε σύγκριση με την συμβατική μηχανουργική κατεργασία με χρήση ψυκτικού υγρού, όπου χρησιμοποιούνται έως και 12.000 lt ψυκτικού υγρού ανά ώρα,

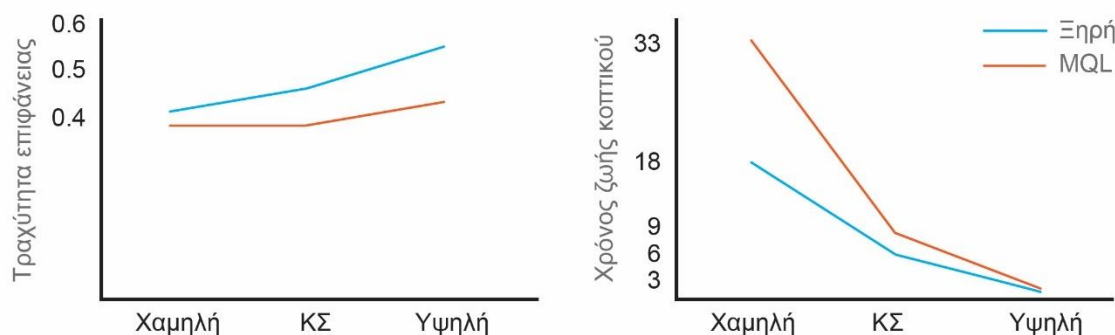
στην τεχνολογία MQL δεν χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα από λίγα ml. Επιπλέον, τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται βασίζονται πάνω σε φυτικά έλαια και κοστίζουν μεταξύ \$ 20 και \$ 60 ανά γαλόνι [7].

Η τελευταία εξέλιξη της τεχνολογίας MQL είναι η εφαρμογή του λιπαντικού απευθείας μέσα από μια οπή στο εργαλείο κοπής. Μέσα στο εργαλείο κοπής προστίθενται αέρας από το ένα κανάλι και λιπαντικό από το δεύτερο κανάλι. Στην συνέχεια αυτά αναμειγνύονται και στην έξοδο του μηχανήματος κατεργασίας προκύπτει ένα σπρέι μείγματος λιπαντικού/αέρα [14]. Το Σχήμα 2.4 παρουσιάζει τον εσωτερικό σχεδιασμό εργαλείου μηχανουργικής κατεργασίας μετάλλων με μείγμα λιπαντικού/αέρα κατά την MQL κατεργασία μετάλλων.



Σχήμα 2.4 : Εσωτερικός σχεδιασμός εργαλείου μηχανουργικής κατεργασίας μετάλλων με μείγμα λιπαντικού/αέρα κατά την MQL κατεργασία μετάλλων.

Κατά την μέθοδο MQL σχηματίζεται ένα λεπτό υμένιο χαμηλής τριβής μεταξύ του εργαλείου κοπής και του κατεργαζόμενου μετάλλου. Με την τεχνολογία αυτή αποτρέπεται η συσσώρευση θερμότητας στη ζώνη κατεργασίας του μετάλλου οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου και ανώτερη ποιότητα επιφάνειας κατεργασμένου μετάλλου με μειωμένη τραχύτητα [13]. Το Σχήμα 2.5 εξετάζει τις δύο αυτές παραμέτρους συγκριτικά με την κατεργασία MQL και την κατεργασία υπό ξηρές συνθήκες σε χάλυβα [15].



Σχήμα 2.5 : Σύγκριση κατεργασίας MQL και κατεργασίας υπό ξηρές συνθήκες για την διάρκεια ζωής εργαλείου και τραχύτητα σε επιφάνεια χάλυβα.

Όπως φαίνεται και στο πρώτο γράφημα, η κατεργασία MQL είναι ικανή όχι απλά να αυξήσει την διάρκεια ζωής του εργαλείου αλλά να την διπλασιάσει, κυρίως λόγω της διείσδυσης του λιπαντικού στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και της μείωσης της θερμότητας στη ζώνη κοπής του μετάλλου. Ωστόσο, η τεχνική αυτή αποδεικνύεται περιορισμένη σε συνάρτηση με την ταχύτητα κοπής, καθώς υψηλή ταχύτητα οδηγεί και σε εξάτμιση του [15]. Στο δεύτερο γράφημα απεικονίζεται μια μικρή βελτίωση στην ποιότητα επιφάνειας του

κατεργασμένου μετάλλου με μειωμένη τραχύτητα. Αυτή η βελτίωση είναι πιθανόν να οφείλεται τόσο στην δράση του ίδιου του κοπτικού υγρού που λειτουργεί περισσότερο ως λιπαντικό παρά ως ψυκτικό όσο και στην μειωμένη θερμοκρασία στην ζώνη κατεργασίας του μετάλλου. Επιπρόσθετα, υψηλή ταχύτητα κοπής οδηγεί σε αυξημένη τραχύτητα στην επιφάνεια του κατεργασμένου μετάλλου [15].

Η τεχνολογία MQL φαίνεται να έχει πολλά πλεονεκτήματα για το περιβάλλον και το ίδιο το άτομο. Πρώτα από όλα, ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μειώνοντας σημαντικά τη χρήση υγρών και εξαλείφοντας την ανάγκη για κατεργασία και απόρριψη ψυκτικού υγρού. Τα υπολείμματα είναι λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον και δεν υπάρχει εξάπλωση λιπαντικού γύρω από το μηχάνημα ενώ μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας και η εκπομπή διοξειδίων του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Σπουδαίο ρόλο παίζει και στην προστασία της ανθρώπινης υγείας, αφού πρόσφατη σύγκριση της χρήσης MQL και της κατεργασίας με λίπανση έδειξε πως η πρώτη δημιουργεί εξαιρετικά λιγότερα αναπνευστικά προβλήματα και δερματοπάθειες [13].

Επιπρόσθετα έχει σημαντική επίδραση σε χρόνο και χρήμα μιας και εξοικονομεί ψυκτικό υγρό λόγω της μικρότερης απαιτούμενης ογκομετρικής παροχής. Ακόμα, μειώνονται οι χρόνοι κατεργασίας καθώς συντελούνται αυξημένοι ρυθμοί κοπής, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου μέσω πιο σταθερής ψύξης χωρίς ξαφνική θερμική καταπόνηση και μειώνεται ο αριθμός αλλαγών στα εργαλεία κοπής και στις απαιτήσεις των εργαλείων. Τέλος, δεν υπάρχουν μεγάλη κόστη συντήρησης ενώ στα νέα μηχανήματα απαιτούνται λιγότερες επενδύσεις στο σύστημα ψύξης [13].

Χαρακτηριστικό είναι το σχόλιο χειριστή όπου υπογραμμίζει πως «Η όλη διαδικασία είναι ευκολότερη, καλύτερα διαχειρίσιμη και πιο αποτελεσματική. Η εκτίμηση μας είναι πως γλιτώνουμε περίπου 5 - 10% χρόνο από την συνολική διαδικασία κατεργασίας χρησιμοποιώντας την τεχνική MQL, βελτιώνοντας δραματικά ότι δυσχέραινε προηγουμένως την δουλειά μας» [16].

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MQL πολλαπλασιάζονται περαιτέρω όταν χρησιμοποιούνται 100% βιοαποδομήσιμα ψυκτικά υγρά με την ονομασία Coolube® που παρασκευάζονται από ανανεώσιμα φυτικά έλαια. Μελέτες έχουν δείξει ότι το Coolube® έχει ανώτερες φυσικές ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό λιπαντικό. Οι πολικές ιδιότητες του δημιουργούν ένα ισχυρό συνεκτικό δεσμό μεταξύ του Coolube® και των μεταλλικών επιφανειών, δημιουργώντας ένα ομοιόμορφο, ισχυρό και ανθεκτικό στρώμα λίπανσης. Το Coolube® μειώνει την τριβή κατά την κατεργασία του μετάλλου κατά 50% καλύτερα από τα τυπικά ορυκτέλαια ενώ είναι ακόμα πιο αποτελεσματικό όταν εφαρμόζεται με ακρίβεια με ένα σύστημα εφαρμογής Unist MQL [17].

Τα συστήματα Unist MQL διαθέτουν ακριβείς αντλίες μέτρησης με αέρα που μπορούν να παραδώσουν το ψυκτικό μέσο Coolube® σε ποσότητες μικρότερες από μία σταγόνα ανά κύκλο. Το Coolube® αναμιγνύεται τυπικά με μια μικρή ποσότητα πετρελαιμένου αέρα ακριβώς στην άκρη του ακροφυσίου για να διασκορπίσει το υγρό και να το προωθήσει στο εργαλείο κοπής. Με την τεχνολογία αυτή μειώνεται σημαντικά η θερμότητα τριβής ενώ σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να μειωθεί και το κόστος μηχανουργικής κατεργασίας. Επιπλέον, τα ψυκτικά υγρά που χρησιμοποιούνται προστατεύουν τόσο το περιβάλλον όσο και την υγεία του χειριστή αφού δεν διαθέτουν πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), οργανικές δηλαδή ενώσεις που έχουν υψηλή τάση ατμών σε συνηθισμένη θερμοκρασία δωματίου και είναι επικίνδυνες για την φύση και την ανθρώπινη υγεία [17]

3. ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

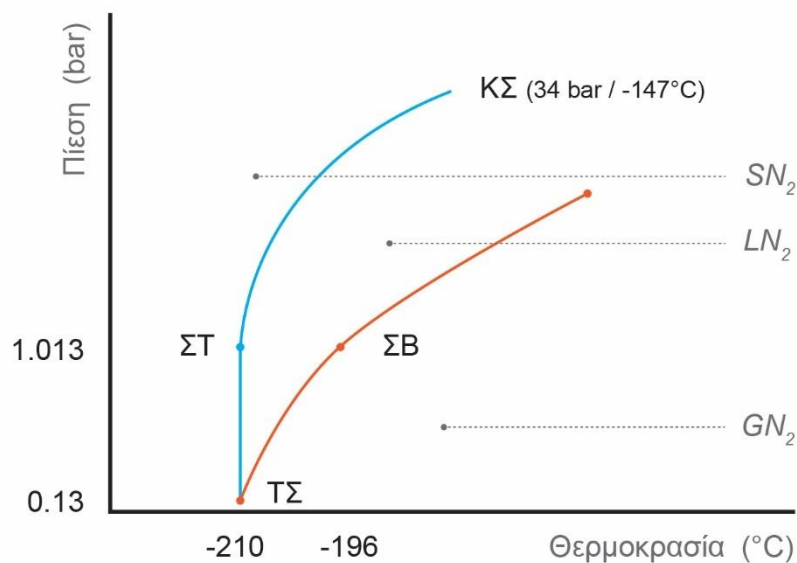
Το δραστικό μέσο που χρησιμοποιείται στην κρυογενική μηχανουργική κατεργασία μετάλλων καλείται κρυογενικό μέσο και είναι συνήθως κάποιο υγροποιημένο αέριο. Τα πιο συνήθη κρυογενικά αέρια είναι είτε το υγρό άζωτο (LN) είτε κάποια άλλα αδρανή αέρια. Στη συνέχεια αυτής της εργασίας θα γίνει ειδική αναφορά στα πιο διαδεδομένα αέρια που χρησιμοποιούνται στις κρυογενικές κατεργασίες [1].

Η πρώτη χρήση ενός κρυογενικού αερίου σε κατεργασία έγινε το 1953, με την χρησιμοποίηση του CO₂, ενώ το 1961 ο W.S.Hollis απέδειξε ότι μπορεί να αυξήσει τον χρόνο ζωής κοπτικών εργαλείων καρβιδίων χρησιμοποιώντας CO₂ ως ψυκτικό σε κατεργασίες κραμάτων αλουμινίου [20]. Στα μέσα του 1960, ερευνητές στο GAM (Grumman Aircraft Manufacturing) παρατήρησαν ότι όταν κατεργάζονται τιτάνιο με χρήση LN₂ και CO₂ υπάρχει ταχύτερη αφαίρεση υλικού [20].

3.1 Υγρό άζωτο (LN₂)

Στην κρυογενική κατεργασία χρησιμοποιείται κυρίως υγροποιημένο άζωτο για την αντικατάσταση των συμβατικών ρευστών που χρησιμοποιούνται στις κατεργασίες κοπής των μετάλλων. Το άζωτο είναι ένα αδρανές, ακίνδυνο, μη τοξικό, μη εύφλεκτο, άχρωμο και άοσμο αέριο, το οποίο αποτελεί το 79% του αέρα [1]. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και διασκορπίζεται σε αυτόν μετά την εφαρμογή, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις για συντήρηση, τον καθαρισμό του εργαλείου μετά την κατεργασία του μετάλλου και την απόρριψη - διαχείρισή του ως απόβλητο.

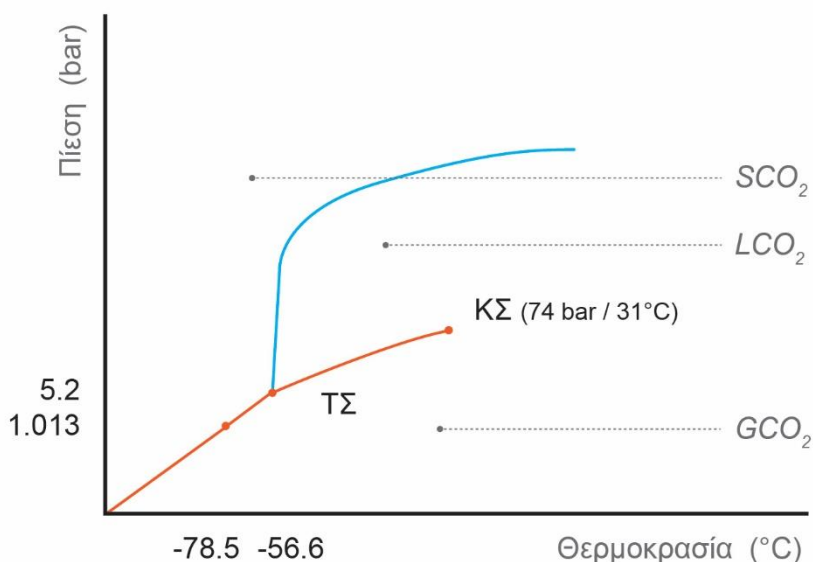
Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το διάγραμμα φάσης του LN₂. Το τριπλό σημείο εντοπίζεται σε πίεση 0.13 bar και σε θερμοκρασία - 210 °C (63.15 K) και είναι το σημείο όπου συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις [18]. Το άζωτο πρέπει να αποθηκεύεται σε μονωμένες δεξαμενές και σε πολύ υψηλή πίεση, καθώς όταν έρχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η πίεση μειώνεται σε 1.01 bar και έτσι αρχίζει να βράζει στους -196°C (77.15 K) [18]. Για τους λόγους αυτούς, το υγρό άζωτο είναι πιο κατάλληλο για ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, αυτή η συμπεριφορά προκαλεί συγκεκριμένα προβλήματα για την εφαρμογή του ως αποτελεσματικό ψυκτικό μέσο. Πρώτον, όλες οι γραμμές τροφοδοσίας καθώς και τα κανάλια ψύξης του κοπτικού εργαλείου που χρησιμοποιείται κατά την κατεργασία των μετάλλων πρέπει να είναι μονωμένα ώστε να αποφεύγονται οι κίνδυνοι και η μειωμένη ικανότητα ψύξης. Κατά δεύτερον, όταν το υγρό άζωτο έλθει σε επαφή με πολύ θερμές επιφάνειες αρχίζει να βράζει και να εξατμίζεται, δημιουργώντας έτσι μια μεμβράνη (υμένιο) στην επιφάνεια του κοπτικού και του τεμαχίου μειώνοντας έτσι την επίδραση της ψύξης [20].



Σχήμα 3.1 : Διάγραμμα φάσης του LN_2 .

3.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αποτελεί μια άλλη ψυκτική επιλογή στην κρυογενική κατεργασία. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται το τριπλό σημείο όπου συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις του διοξειδίου του άνθρακα. Από πίεση 0 μέχρι 5.2 bar και σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται στο διάστημα $-273^\circ C$ μέχρι $-56.6^\circ C$ [$0 K - 217.15 K$] το CO_2 υπάρχει μόνο σε στερεή ή αέρια κατάσταση [18]. Για την μετατροπή του, σε υγρό, το CO_2 χρειάζεται να συμπιεσθεί άνω των 5.2 bar. Το CO_2 αποθηκεύεται ως υγρό σε δεξαμενές μέσης πίεσης (MPT) σε πίεση περίπου 57 bar και σε θερμοκρασία $20^\circ C$ (293 K) [1,18].



Σχήμα 3.2 : Διάγραμμα φάσης του CO_2 .

Σε κατεργασίες κοπής το υγροποιημένο διοξείδιο του άνθρακα παρέχεται μέσω σωλήνων ανθεκτικών στην πίεση, απευθείας στην ζώνη κοπής. Οι γραμμές τροφοδοσίας δεν επηρεάζονται θερμικά εφόσον μόνο το διοξείδιο του άνθρακα είναι υπό πίεση [1]. Όταν το

διοξείδιο του άνθρακα εξέρχεται από το ακροφύσιο σε συνθήκες περιβάλλοντος πραγματοποιείται μεγάλη πτώση της πίεσης, προκαλώντας την διαστολή του και την ψύξη του, λόγω του φαινομένου Joule-Thomson [1].

Η μετατροπή της κατάστασης του CO₂ ονομάζεται εξάχνωση. Το CO₂ ψύχεται στους -78.5 °C (195 K) και μετατρέπεται κατά 40% σε χιόνι και κατά 60% σε αέριο. Η ενέργεια που απαιτείται για αυτόν τον μετασχηματισμό λαμβάνεται από το περιβάλλον με την μορφή θερμότητας. Εφόσον, το CO₂ εξυπηρετήσει τον ρόλο του ως υγρό κοπής, εξαχνώνεται στον ατμοσφαιρικό αέρα χωρίς να αφήνει υπολείμματα [18]. Αρκετοί ερευνητές έχουν βρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την απόδοση της ψύξης με αέριο διοξείδιο του άνθρακα κατά την κατεργασία μετάλλων με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα [1].

3.3 Θερμικά χαρακτηριστικά κρυογενικής ψύξης

Γενικά, το κρυογενικό ρευστό διαπερνά μερικώς την επιφάνεια μεταξύ κοπτικού εργαλείου και αποβλήτου μέσω ενός δικτύου τριχοειδών αγγείων και με διάχυση μέσω της κύριας ζώνης παραμόρφωσης. Αυτό μειώνει τη θερμοκρασία κοπής είτε μειώνοντας την ενέργεια κοπής είτε βελτιώνοντας τη δυνατότητα απαγωγής θερμότητας από τη ζώνη κοπής:

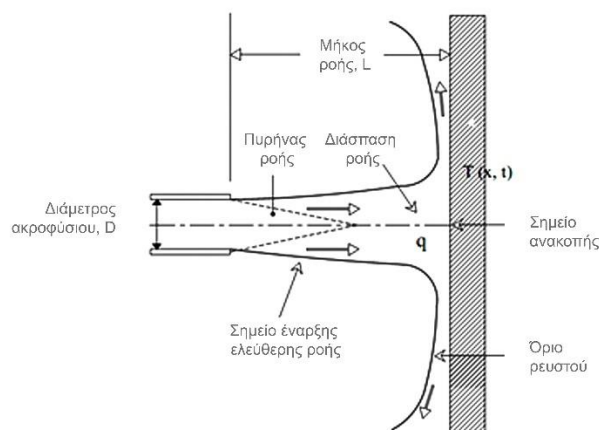
- a) Η κρυογενική κατεργασία ελατών υλικών, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσής τους, ενεργοποιεί τον πρώτο μηχανισμό κατά Rebinder, μειώνοντας τις καταπονήσεις του υλικού εργασίας
- b) Από την άλλη, η απαγωγή θερμότητας είναι ανάλογη:
 - i. του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h
 - ii. και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του ψυκτικού υγρού (t_f) και της θερμής επιφάνειας

Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας κατά την κρυογονική κατεργασία έχει ως αποτέλεσμα έναν σχετικά αυξημένο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h , εξαιτίας της απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας και της θέρμανσης των αερίων από το θερμοκρασία βρασμού τους σε θερμοκρασία δωματίου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η εξάτμιση του ψυκτικού υγρού έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός στρώματος αερίων μεταξύ της επιφάνειας κοπτικού εργαλείου και αποβλήτου το οποίο λειτουργεί ως λιπαντικό.

3.3.1 Χαρακτηριστικά ροής κρυογενικού ρευστού

Το πεδίο εφαρμογής μιας δέσμης ρευστού χαρακτηρίζεται από 3 περιοχές (Σχήμα 3.3):

1. Περιοχή ελεύθερης ροής, όπου παρατηρείται ο ενδεχόμενος πυκνός πυρήνας ($L/D = 4-6$),
2. Η περιοχή όπου εμφανίζεται το στάσιμο σημείο της ροής, και
3. Η περιοχή πρόσπτωσης της ροής στην επιφάνεια



Σχήμα 3.3 : Περιοχές ροής δέσμης κρυογενικού ρευστού.

Στην περιοχή πρόσπτωσης της δέσμης ρευστού, το οριακό στρώμα που έχει ήδη δημιουργηθεί από το στάσιμο σημείο έχει σημαντική επίδραση στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Επιπλέον, μόρια αερίων δημιουργούνται στο εσωτερικό του ρευστού εξαιτίας διατμητικών δυνάμεων με αποτέλεσμα ένα σύνολο δινών να δημιουργείται γύρω από τη δέσμη ρευστού.

Στην κρυογενική κατεργασία, η δέσμη ρευστού βρίσκεται σε υγρή μορφή στην έξοδο του ακροφυσίου και εισάγεται με υποκρίσιμη πίεση αλλά με υπερκρίσιμη ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Όταν ο λόγος πίεσης/κρίσιμης πίεσης (p/p_{cr}) είναι μικρότερος από 0.03, το πάχος της δέσμης ρευστού είναι σχετικά μικρό και το ρευστό είναι σε υγρή μορφή, με σταγονίδια του ρευστού ενδεχομένως να εξέρχονται της δέσμης. Το αέριο που έχει ενσωματωθεί στο υγρό αυξάνει τη μεταφορά θερμότητας σε συνθήκες υπόψυκτου βρασμού.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία της δέσμης ρευστού, το μήκος του πυκνού πυρήνα της δέσμης είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη της διαμέτρου του μπεκ. Επομένως, σε πρακτικές εφαρμογές η επιφάνεια εισόδου του ζεστού κοπτικού εργαλείου βρίσκεται συνήθως μέσα στην περιοχή του πυκνού πυρήνα, όπου η ψυκτική δυνατότητα της δέσμης ρευστού είναι μέγιστη.

Για τέτοιου είδους εξαιρετικά υποκρίσιμη κατάσταση ($p_{env} \ll p_{cr}$), η συμπεριφορά της δέσμης ρευστού την κλασική θεωρία υγροποίησης. Όταν ο κατευθυντήρας της ροής βρίσκεται σε απόσταση περίπου 40 φορές της διαμέτρου της δέσμης ρευστού, έχει υπολογιστεί ότι το άζωτο είναι περίπου κατά 50% σε υγρή μορφή έως ότου φτάσει στο στόχο. Αυτή η αλλαγή επιφέρει ακόμα και διπλασιασμό του όγκου του ρευστού. Η διόγκωση αυτή συνεισφέρει στην απομάκρυνση του αποβλίπτου ειδικά σε εφαρμογές της αεροδιαστημικής τεχνολογίας.

Ο βρασμός λεπτού στρώματος κατά την επίδραση LN2 κρυογενικής δέσμης ρευστού ερευνήθηκε από τους Barron and Stanley οι οποίοι έδειξαν ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για μία δέσμη ρευστού η οποία προσπίπτει σε κυλινδρική επιφάνεια διέπτετε από την επόμενη σχέση:

$$Nu_{avg} = 0.0885 Re^{0.45} Pr^{1/3}$$

όπου, Re: ο αριθμός Reynolds και Pr: ο αριθμός Prandtl, αριθμοί οι οποίοι εξαρτώνται από την διάμετρο εξόδου του ακροφυσίου (d), το ρυθμό παροχής μάζας (m) και τις θερμικές και φυσικές ιδιότητες του LN2 και του υλικού εργασίας.

Η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας σε συστήματα κρυογενικής κατεργασίας μελετήθηκε και από τον Dreitser ο οποίος ασχολήθηκε με ένα μεγάλο εύρος διαμέτρων LN_2 ακροφυσίων, ταχυτήτων ροής και θερμοκρασιών της επιφάνειας του υλικού προ κατεργασία. Μέσω της απεικόνισης ροής, αποδείχτηκε ότι δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα υγρού σε μια περιοχή από 1 έως 5 φορές της διαμέτρου της δέσμης ρευστού, ανάλογα με τη μέση ταχύτητα διάδοσης και την κλίση της επιφάνειας του υλικού. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας βρέθηκε να είναι της τάξης των 1700-6500 W/m²K, 10 έως 40 φορές υψηλότερος σε σχέση με τη φυσική συναγωγή θερμότητας.

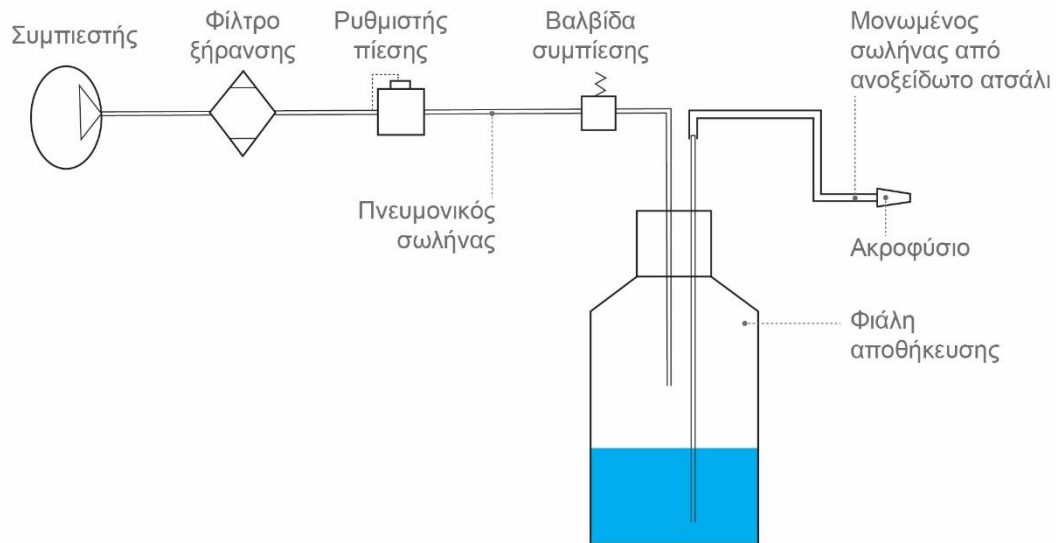
Τα χαρακτηριστικά της ροής μια δέσμης ρευστού που εξέρχεται από σωλήνωση που βρίσκεται στο εσωτερικό σωλήνωσης μεγαλύτερης διαμέτρου και προσπίπτει σε επιφάνειες διάφορων θερμικών χαρακτηριστικών, μελετήθηκε από τους Zhang et al.. Σε αυτή την εφαρμογή, η ακαριαία μεταβολή της διεύθυνσης της δέσμης ρευστού κατά 180° έχει ως αποτέλεσμα την επίσης ραγδαία μεταβολή της ορμής του ρευστού, γεγονός που οδηγεί στην έντονη διαταραχή των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας της επιφάνειας προσβολής. Με τη σταδιακή αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας, το ρευστό εισέρχεται σε μια μεταβατική περιοχή στην οποία φτάνει στο κρίσιμο σημείο βρασμού. Έχει αποδειχτεί ότι η δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας και το κρίσιμο σημείο βρασμού αυξάνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης της δέσμης ρευστού, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της έντασης των χαρακτηριστικών τυρβώδους ροής που έχει επιτευχθεί.

Επίσης, στην περιορισμένη ροή, η παρουσία σχισμών δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο την πολυπλοκότητα της ροής διότι η μετάδοση θερμότητας σε στενές κοιλότητες μπορεί να έχει κυρίαρχο ρόλο, όπως αποδείχτηκε από τους Attia και D'Silva . Η λύση σε αυτό το μη γραμμικό πρόβλημα είναι να προβλεφθεί εάν εμφανίζεται πυρηνικός βρασμός στην περιοχή που εμφανίζονται οι σχισμές.

3.4 Διανομή των κρυογενικών μέσων

Το κρυογενικό μέσο τροφοδοτείται στην ζώνη κοπής με διάφορους τρόπους και εξοπλισμό. Το υγρό αποθηκεύεται σε σφαιρικές ή κυλινδρικές δεξαμενές εξοπλισμένες με αισθητήρες που ελέγχουν την πίεση, την θερμοκρασία αλλά και τυχόν εξάτμιση [19]. Κατά τον κρυογενικό ψεκασμό, η πίεση στην δεξαμενή είναι αυτή που εξαναγκάζει το ρευστό σε κίνηση και έτσι δεν απαιτείται πρόσθετη ενέργεια ώστε να κινηθεί το ρευστό [19].

Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται σχηματικά η εγκατάσταση που απαιτείται για την διαχείριση του κρυογενικού μέσου, η οποία συνοπτικά αποτελείται από την δεξαμενή αποθήκευσης, τον συμπιεστή, το φίλτρο ξήρανσης, τον ρυθμιστή πίεσης, τον πνευμονικό σωλήνα, την βαλβίδα εκτόνωσης, τους μονωμένους αγωγούς και το ακροφύσιο [3].

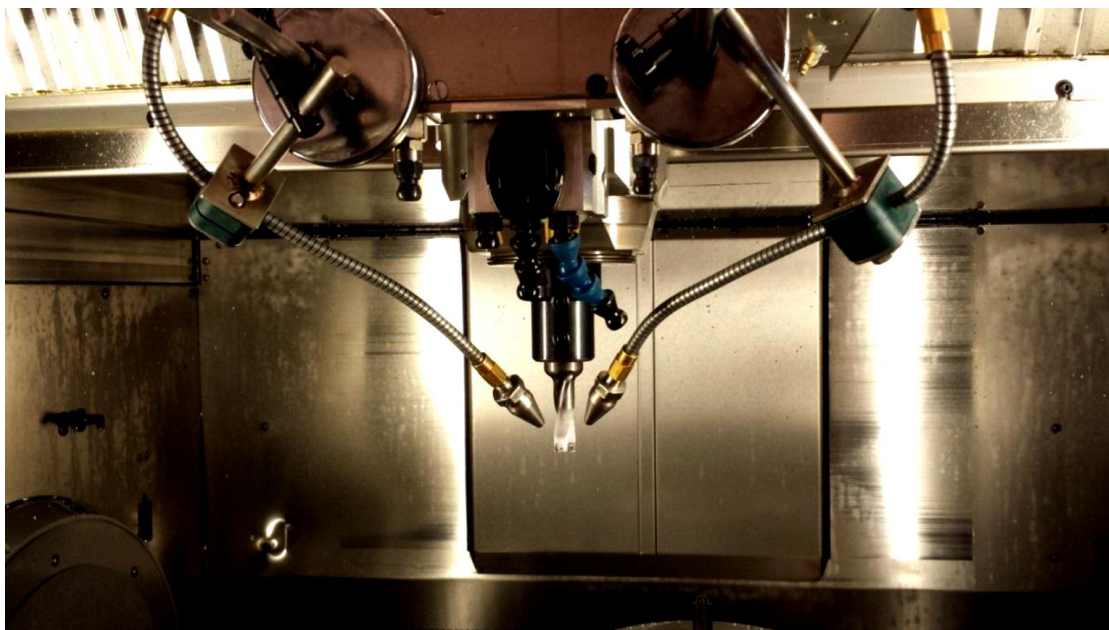


Σχήμα 3.4 : Η διάταξη του κρυογενικού συστήματος.

Το υγρό άζωτο είτε μεταφέρεται στο μηχάνημα κατεργασίας από δεξαμενή έξω από το κτίριο είτε από κύλινδρο υπό πίεση κοντά στο μηχάνημα κοπής. Αυτό συντελείται μέσω μονωμένων γραμμών υπό κενό που καταλήγουν σε ειδικά σχεδιασμένα ακροφύσια. Το ακροφύσιο παρέχει μια σταθερή ελεύθερη ροή υγρού αζώτου, η οποία επιδρά στην μεταφορά θερμότητας [1].

Η διανομή του κρυογενικού ρευστού μπορεί να εφαρμοστεί είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά. Η εξωτερική ψύξη (Σχήμα 3.5) παρέχεται μέσω ευέλικτου ακροφυσίου είτε πάνω από την ροή του αποβλίττου, είτε πάνω από την πρωτογενή ζώνη παραμόρφωσης ή στην διεπαφή κοπτικού εργαλείου – αποβλίττου. Η εσωτερική ψύξη παρέχεται μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου εργαλείου όπου τα κρυογενικά μέσα παρέχονται απευθείας στην διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου – τεμαχίου – αποβλίττου ή στην πρόσδεση του κοπτικού εργαλείου (Σχήμα 3.6) [3,19]. Κατά την διανομή του κρυογενικού μέσου θα πρέπει οπωσδήποτε να αποφευχθεί η απευθείας ροή του υγρού αζώτου πάνω στο κατεργαζόμενο μέταλλο ώστε να μην λάβει χώρα η κατάψυξη του τελευταίου με αποτέλεσμα την αλλοίωση της μικροδομής και των μηχανικών χαρακτηριστικών του μετάλλου [18].

Η χρήση εξωτερικών ακροφυσίων υψηλής πίεσης για την διανομή του ψυκτικού αποτελεί την πιο ανακριβή μέθοδο καθώς απαιτεί υψηλότερο ρυθμό ροής κρυογενικού ρευστού στην διεπαφή κοπτικού – αποβλίττου – τεμαχίου. Συνήθως τα ακροφύσια τοποθετούνται και στοχεύουν στην ζώνη κοπής χωρίς άλλη βοήθεια από τον χειριστή, σε αντίθετη περίπτωση εκθέτουν τον χειριστή σε πρόσθετους και αχρείαστους κινδύνους [18].



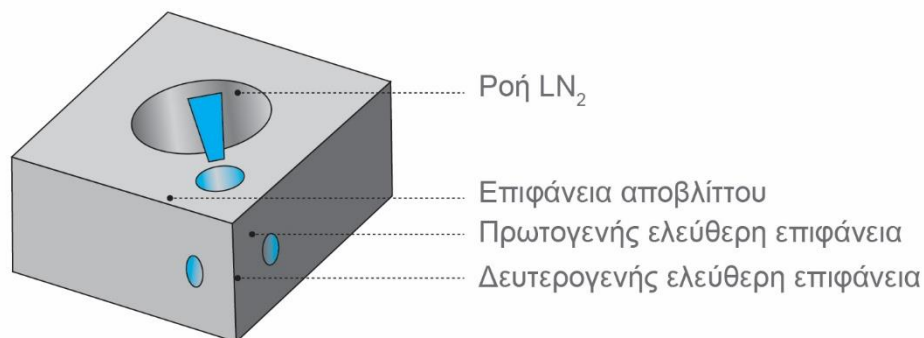
Σχήμα 3.5 : Εξωτερικός ψεκασμός CO₂ με ακροφύσιο σε κατεργασία διάτρησης.



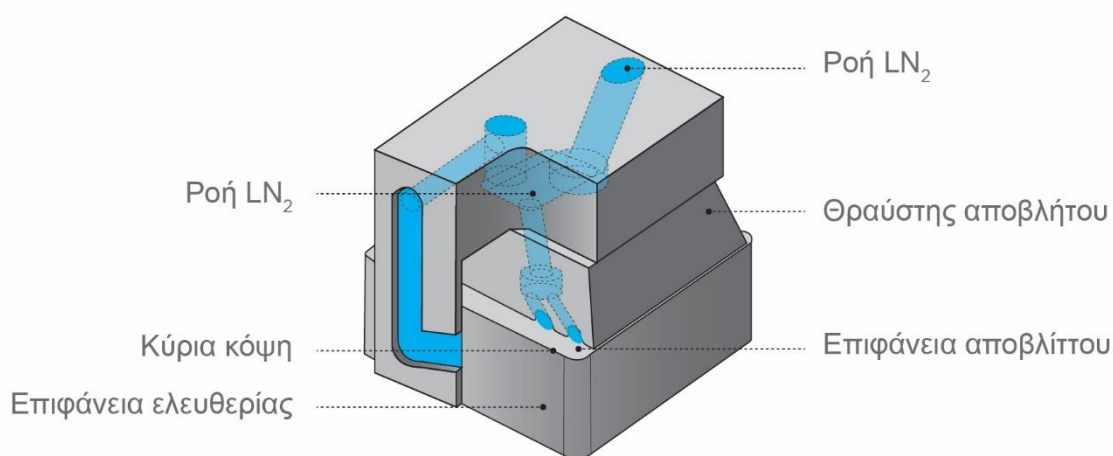
Σχήμα 3.6 : Διανομή κρυογενικού ψυκτικού μέσω ακροφυσίου στην πρόσδεση του κοπτικού, σε κατεργασία τόννευσης

Η εσωτερική ψύξη, με ακροφύσιο που είναι προσαρμοσμένο στο κοπτικό εργαλείο, αποτελεί μια βελτίωση των εξωτερικών ακροφυσίων υψηλής πίεσης καθώς προσφέρει μια πιο ακριβή και ελεγχόμενη ταχύτητα ροής [18].

Επιπλέον, επειδή το LN₂ έχει σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία από το CO₂, στην εσωτερική ψύξη είναι απαραίτητος ο κατάλληλος και σωστός σχεδιασμός των κοπτικών εργαλείων. Η άτρακτος πρέπει να είναι εφοδιασμένη με έναν ειδικά υπό κενό μονωμένο αγωγό και ειδική περιστροφική τροφοδοσία, τέτοια ώστε να επιτρέπει τις χαμηλές θερμοκρασίες του LN₂. Μέρος του υγρού αζώτου εξατμίζεται μέσα στα κανάλια τροφοδοσίας οδηγώντας έτσι στην μερική εσωτερική ψύξη του κοπτικού [18,20]. Στο [Σχήμα 3.7](#) φαίνεται η τροποποίηση των κοπτικών ώστε να επιτρέπεται η εσωτερική διανομή του LN₂.



Σχήμα 3.7 : Κανάλια για την εσωτερική ψύξη.



Σχήμα 3.8 : Κανάλια για την παροχή υγρού άζωτου μέσω του κοπτικού (εσωτερική ψύξη).

Ένας επιπλέον τρόπος κρυογενικής ψύξης, είναι η κρυογενική αγωγή που είναι παρόμοια με την θερμική αγωγή [1]. Σε αυτήν την μέθοδο τεμάχια ή κοπτικά εργαλεία ψύχονται σε ειδικό επεξεργαστή μέχρι να φτάσουν σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Τα τεμάχια αυτά διατηρούνται στις κρυογενικές θερμοκρασίες, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (συνήθως 24 ώρες) και κατόπιν θερμαίνονται μέχρι της θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με αυτήν την μέθοδο αυξάνεται η αντοχή τους σε φθορά και η διαστατική σταθερότητά τους. Βέβαια, σε αυτή την μέθοδο οι εναλλαγές θερμοκρασίας πρέπει να γίνονται αργά και με σταθερό ρυθμό ώστε να αποφευχθεί θερμικό σοκ στο τεμάχιο, που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες ή και στην θραύση του. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές κρυογενικής αγωγής ή επεξεργασίας για την ενίσχυση της αντοχής σε φθορά και σε παραμορφώσεις, από κοπτικά εργαλεία φραιζαρίσματος μέχρι μαχαίρια που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Ωστόσο, η επίδραση της κρυογενικής αγωγής δεν είναι ακόμα τόσο αποδοτική για όλες τις μηχανουργικές κατεργασίες.

Τελευταίος τρόπος εφαρμογής της κρυογενικής ψύξης στις κατεργασίες είναι η κρυογενική ψύξη μέσω ακροφυσίων, μόνο του τεμαχίου προς κατεργασία. Με αυτόν τον τρόπο ψύχεται το τεμάχιο και κατ'επέκταση το απόβλιτο. Το κρυογενικό ρευστό συμβάλλει στην μείωση της δυσθραυστότητας του αποβλήτου και έτσι το απόβλιτο γίνεται πιο μαλακό, σπάει σε μικρότερα τεμάχια και απομακρύνεται πιο εύκολα. Βέβαια, αυτή η μέθοδος δεν έχει επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα, αφού αυξάνει τις δυνάμεις κοπής και τις τριβές μεταξύ

κοπτικού και κατεργαζόμενης επιφάνειας. Επιπλέον, προκαλεί διαστατική ανακρίβεια στο τελικό τεμάχιο και καθιστά την κρυογενική οικονομικά ζημιογόνα.

3.5 Υλοποίηση κρυογενικής κατεργασίας

Σε αυτό το υποκεφάλαιο καταγράφονται αρκετά στοιχεία από τα πειράματα που βρέθηκαν στην βιβλιογραφική έρευνα της συγκεκριμένης διπλωματικής. Τα στοιχεία που καταγράφονται είναι τα μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, τα κοπτικά εργαλεία και οι παράμετροι των κατεργασιών που μελετήθηκαν.

3.5.1 Μεταλλικά υλικά

Μέχρι σήμερα, το ενδιαφέρον για κρυογενική κατεργασία επικεντρώθηκε σε υλικά που έχουν μεγάλη δυσκολία κατεργασιμότητας, όπως τα αποκαλούμενα αεροδιαστημικά υλικά ή υπερ-κράματα. Τα αεροδιαστημικά υλικά είναι πολύ σκληρά, ανθεκτικά στην διάβρωση και ικανά να διατηρούν την αντοχή τους σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας [36].

Η μικροδομή των αεροδιαστημικών υλικών είναι τέτοια που τα καθιστά κατεργαστικά πολύ δύσκολα. Η εξαιρετικά χαμηλή αγωγιμότητά τους οδηγεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες το κοπτικό εργαλείο και σε συνάρτηση με την υψηλή τριβή στην ζώνη κοπής, οδηγεί στην συγκέντρωση της θερμότητας στην διεπαφή κοπτικού – αποβλίπτου [36]. Έτσι, προστίθεται στο κοπτικό επιπλέον 20-30 % θερμικής ενέργειας, που οδηγεί σε αύξηση της ολκιμότητάς του και του βαθμού φθοράς του [37]. Η φθορά του κοπτικού οφείλεται στην διάσπαση του υλικού του εργαλείου και στην προσκόλληση του αποβλίπτου και φυσικά στην χημική αντίδραση των υλικών κοπτικού – αποβλίπτου. Για αυτούς τους λόγους λοιπόν τα αεροδυναμικά υλικά κατεργάζονται και διαμορφώνονται με χαμηλές παραμέτρους, με αποτέλεσμα την χαμηλή παραγωγικότητα [38].

Τα υλικά που θεωρούνται ως αεροδιαστημικά στην καθημερινή μηχανική είναι τα κράματα χάλυβα, νικελίου και τιτανίου. Οι έρευνες και τα πειράματα σχετικά με την κρυογενική κατεργασία αυτών των υλικών έχουν δείξει πολλά ενθαρρυντικά αποτελέσματα, τα οποία αποδίδονται στην κρυογενική θερμοκρασία κατά την κατεργασία. Τέλος, θετικές επιδράσεις της κρυογενικής κατεργασίας έχουν εντοπιστεί στα καρβίδια του βολφραμίου, στον χάλυβα AISI 4340, στους ανοξείδωτους και ανθρακούχους χάλυβες [37,39].

3.5.2 Κοπτικά εργαλεία

Στην κρυογενική ψύξη χρησιμοποιούνται εργαλεία πολλών ειδών, αλλά η πλειονότητα των ερευνών που απασχόλησαν αυτήν την εργασία, χρησιμοποίησαν εργαλεία καρβιδίων με επικάλυψη PVD και PCD. Τα κοπτικά από καρβίδια ή από κεραμικά ή από καρβίδια του βολφραμίου είναι κατάλληλα για την κρυογενική κατεργασία γιατί στις χαμηλές θερμοκρασίες αυξάνεται η σκληρότητά τους. Πολύ λίγες δοκιμές έχουν γίνει με διαμάντι, κεραμικά και CBN αφού τα συγκεκριμένα κοπτικά είναι μεν προηγμένα αλλά πολύ ακριβά.

Για την κρυογενική τόννευση έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά ένθετα κοπτικών. Από τις παρατηρήσεις αυτής της εργασίας τα διαμαντένια ή τετραγωνικά ένθετα κοπτικών, είναι τα πιο κοινά, με μήκος 12mm και πάχος 4.76 mm όπως στο Σχήμα 3. Η ακτίνα των κοπτικών είναι συνήθως από 0.4 έως 0.8 [19, 36, 37].

3.5.3 Παράμετροι κατεργασίας

Οι παράμετροι κατεργασίας είναι σημαντικοί προκυμμένοι να διασφαλιστεί η υψηλότερη απόδοση κοπτικού, τεμαχίου και εργαλειομηχανής. Η παραμικρή απόκλιση στον ρυθμό παροχής του ψυκτικού μέσου ή της ταχύτητας κοπής ή της γεωμετρίας του κοπτικού μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των πειραμάτων και αρνητικό αντίκτυπο στην διαδικασία.

3.5.4 Ταχύτητες κοπής

Ο καθαρισμός των ταχυτήτων κοπής εξαρτάται πάρα πολύ από το υλικό του τεμαχίου προς κατεργασία. Σε τόννευση κραμάτων νικελίου, η πιο σύνηθης ταχύτητα κοπής κυμαίνονται στο διάστημα v_c 30 - 130 m/min. Η πρόωση του κοπτικού είναι επίσης πολύ χαμηλή με τιμή από $f=0.05$ mm/rev μέχρι $f=0.25$ mm/rev. Ενώ το βάθος κοπής στα πειράματα που εξετάστηκαν είναι από $a_p = 0.66$ mm μέχρι $a_p = 1.5$ mm.

Σε τόννευση κραμάτων τιτανίου που ερευνήθηκαν, η πιο σύνηθης ταχύτητα κοπής κυμαίνονταν στο διάστημα $v_c = 70 - 150$ m/min. Η πρόωση του κοπτικού ήταν λίγο πιο υψηλή σε σχέση με αυτήν των κραμάτων νικελίου, με τιμή από $f=0.10$ mm/rev μέχρι $f=0.25$ mm/rev. Ενώ το βάθος κοπής στα πειράματα που εξετάστηκαν είναι από $a_p = 0.30$ mm μέχρι $a_p = 2.00$ mm.

Στην διάτρηση κραμάτων τιτανίου και μαγνησίου που καταγράφηκαν χρησιμοποιήθηκαν αρκετές διαφορετικές τιμές για τις προώσεις και τις ταχύτητες κοπής. Αναφορικά με το βάθος της διάτρησης, σε κανένα πείραμα που ερευνήθηκε δεν ξεπερνούσε τα 10 mm. Επίσης στις κατεργασίες διάτρησης που καταγράφηκαν το κρυογενικό μέσο βρισκόταν σε πίεση περίπου 3 – 4 bar. Στην περίπτωση της διάτρησης, δεν επιτρέπεται παροχή κρυογενικού ρευστού με πίεση μεγαλύτερη των 4 bar, προκαλεί αναπήδηση του αποβλίπτου και ψύξη του κοπτικού και τελικά θραύση του κοπτικού.

3.6 Εργονομία κρυογενικής

Η υπερκατανάλωση φυσικών πόρων και η περιβαλλοντική ρύπανση οδηγούν στην ανάγκη θέσπισης ενός πιο αυστηρού πλαισίου λειτουργίας για τις μονάδες παραγωγής. Η εφαρμογή των αρχών βιωσιμότητας στις τεχνολογίες παραγωγής θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένες περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιδόσεις. Κάποιες από τις δράσεις που μπορεί να λάβουν οι βιομηχανίες, ώστε να αποκτήσουν πιο βιώσιμη παραγωγή είναι :

- Η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στις κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης.
- Ελαχιστοποίηση των αποβλήτων.
- Χρήση ανανεώσιμων πηγών.
- Ανακύκλωση.
- Ειδική μεταχείριση των υγρών κοπής – ελαίων και των αποβλίπτων κοπής.

Στην σύγχρονη μηχανουργική τεχνολογία τα υγρά κοπής αποτελούν ανυπόστατο μέρος πολλών κατεργασιών. Όμως, όπως αναφέρθηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα υγρά κοπής και ειδικότερα τα υγρά με βάση το λάδι αυξάνουν πολύ το κόστος παραγωγής και αποτελούν μια εξαιρετικά σημαντική επιβάρυνση στο περιβάλλον. Η κρυογενική ψύξη είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση από την συμβατική λίπανση, καθώς εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα χωρίς να αφήνει βλαβερά υπολείμματα.

3.6.1 Κατεργασία φιλική προς το περιβάλλον

Τα συμβατικά ρευστά κοπής με βάση το πετρέλαιο περιλαμβάνουν χημικά όπως οι υδρογονάνθρακες, το θείο, ο φώσφορος, το χλώριο και τα βιοκτόνα και είναι επιβλαβή για το οικοσύστημα με σοβαρές συνέπειες. Αντιθέτως η κρυογενική όπως αναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον ψύξη με σχεδόν μηδαμινές συνέπειες. Το διοξείδιο του άνθρακα θεωρείται ως ένα αέριο θερμοκηπίου και μια από τις βασικότερες χημικές ενώσεις που ευθύνονται για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Σύμφωνα λοιπόν με αυτό το αξίωμα, ένα λογικό συμπέρασμα θα ήταν ότι η κρυογενική κατεργασία με χρήση CO₂ δεν είναι φιλική προς το περιβάλλον. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος του CO₂ που

χρησιμοποιείται στην κρυογενική προέρχεται από επεξεργασία αποβλήτων CO₂. Έτσι η κρυογενική συμβάλλει στην χρησιμοποίηση ενός ρυπογόνου αέριου αποβλήτου, μετατρέποντάς το CO₂ σε ένα περιβαλλοντικά ουδέτερο αέριο [18].

Από την άλλη προκειμένου να παραχθεί το κρυογενικό άζωτο απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας και σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται βιώσιμοι πόροι για την παραγωγή του, οι μηχανουργικές κατεργασίες που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο κρυογενικό μέσο, μπορούν να θεωρηθούν μη φιλικές προς το περιβάλλον. Βέβαια, η χρησιμοποίησή του ως ψυκτικό έναντι των συμβατικών γαλακτωμάτων προσφέρει ισορροπία στις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Ωστόσο, το υγρό άζωτο μπορεί να παραχθεί μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστώντας το πλήρως ως ένα βιώσιμο μέσο για το οικοσύστημα [19].

3.6.2 Υγειονομική παράμετρος της κρυογενικής κατεργασίας

Η σκόνη και το νέφος που προκύπτουν από τις κατεργασίες με χρήση υγρών κοπής, έχουν αποδειχθεί επιβλαβείς για την προσωπική υγεία των χειριστών. Αυτά τα επικίνδυνα αέρια και σκόνες περιλαμβάνουν βακτήρια από τις σωληνογραμμές των υγρών κοπής, βιοκτόνα, επιφανειοενεργές ουσίες, χλωριωμένα λιπαρά, χηλικές οργανικές ενώσεις και αντιαφριστικά. Οι ουσίες αυτές έχουν αποδειχθεί ότι εξασθενούν της εύρυθμη λειτουργία των πνευμόνων, όσων εκτίθενται σε αυτές [24]. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας το σύστημα μπορεί να μετατραπεί σε ιδανικό περιβάλλον για ανάπτυξη βακτηριδίων και άλλων παθογόνων, το οποίο αποτελεί κίνδυνο για τον χειριστή του εξοπλισμού. Επιπλέον, απαιτείται επιπλέον κόστος και χρόνος ώστε το σύστημα κατεργασίας να διατηρείται καθαρό και ασφαλές. Με την χρήση όμως κρυογενικών μέσων ως ψυκτικών, το περιβάλλον κατεργασίας απαιτεί λιγότερο καθάρισμα και οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργούν αποτρεπτικά στην ανάπτυξη βακτηριδίων και άλλων παθογόνων [24]. Βέβαια, στην κρυογενική κατεργασία πρέπει να ληφθεί υπόψιν ένας πολύ σοβαρός κίνδυνος για του χειριστές μηχανημάτων. Λόγω των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών στο περιβάλλον κατεργασίας, μπορεί να προκληθούν εγκαύματα σε περίπτωση επαφής, οπότε πρέπει κάθε φορά να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα προστασίας και ο χειριστής να βρίσκεται όσο το δυνατόν λιγότερο χρονικά εκτεθειμένος κοντά στην ζώνη κοπής [24].

3.6.3 Διαχείριση αποβλήτου

Το συνεχές απόβλιττο (γρέζι) ή το ασυνεχές απόβλιττο (ρινίσματα) που προκύπτει από τις κατεργασίες κοπής μπορεί συνήθως να ανακυκλωθεί, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα της παραγωγής. Στις συμβατικές κατεργασίες όμως, με χρήση γαλακτωμάτων ή άλλων υγρών κοπής, τα απόβλιττα καλύπτονται με «λάδια» καθιστώντας τα έτσι μη ανακυκλώσιμα, εκτός εάν διαχωριστούν, τεμαχιστούν και καθαριστούν. Αυτό απαιτεί επιπλέον διεργασίες που αυξάνουν το κόστος παραγωγής και σπαταλούν διαθέσιμους πόρους και χρόνο. Στην κρυογενική κατεργασία, το ψυκτικό υγρό είτε το υγρό άζωτο είτε το διοξείδιο του άνθρακα εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα, εφόσον εξυπηρετήσει τον ρόλο του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα απόβλιττα να μπορούν να ανακυκλωθούν αμέσως μετά την κατεργασία, χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες ενέργειες [7].

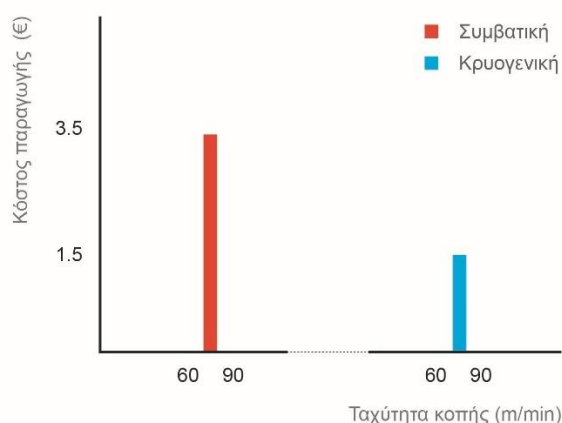
3.6.4 Κατανάλωση ενέργειας κατά την κρυογενική κατεργασία

Η μηχανουργική τεχνολογία γενικά, απαιτεί υψηλά ποσά ενέργειας για την λειτουργία των μηχανημάτων αλλά και των υποστηρικτικών παραμέτρων. Αλλάζοντας τις δυνάμεις κοπής που απαιτούνται για τις κατεργασίες, δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την συνολική κατανάλωση ενέργειας [19]. Όπως είναι γνωστό αύξηση της αποδοτικότητας κοπής

επιτυγχάνεται με αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού (αύξηση ταχύτητας κοπής και θεωρητικής επιφάνειας του αποβλίπτου) [25]. Επομένως, επιτυγχάνεται μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας αφού με την κρυογενική βελτιώνεται ο συντελεστής τριβής, το απόβλιπτο απομακρύνεται πιο εύκολα και δεν χρειάζεται επιπλέον ενέργεια για να κινηθεί το ψυκτικό. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, η πίεση του κρυογενικού μέσα στην δεξαμενή είναι αρκετή ώστε να διανείμει το ψυκτικό από την δεξαμενή στην ζώνη κοπής, χωρίς επιπρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις όπως στην περίπτωση των συμβατικών υγρών κοπής.

3.6.5 Οικονομική παράμετρος κρυογενικής κατεργασίας

Εδώ και κάποιο διάστημα γίνονται μελέτες του κόστους της κρυογενικής κατεργασίας. Σε οικονομική μελέτη που έγινε μετρήθηκαν οι ρυθμοί παροχής υγρού αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα σε κρυογενική κατεργασία μετάλλου για τον υπολογισμό του κόστους ροής κρυογενικού ρευστού[1]. Συνδυάζοντας δεδομένα κατανάλωσης ψυκτικού μέσου με τη διάρκεια ζωής και την παραγωγικότητα του εργαλείου, μπορεί να υπολογιστεί το κόστος κατεργασίας μετάλλου. Μελέτη που δείχνει χαμηλότερο κόστος κρυογενικής κατεργασίας σε σύγκριση με την κατεργασία υπό ξηρές συνθήκες για το εργαλείο κατεργασίας κράματος Inconel 718 φαίνεται στο Σχήμα 3.10 [1]:



Σχήμα 3.10: Κόστος παραγωγής για την κατεργασία κράματος Inconel 718 για κρυογενική κατεργασία σε σύγκριση με μια συμβατική κατεργασία υπό ξηρές συνθήκες [1].

Διαπιστώθηκε ότι η συμβατική κατεργασία είναι σημαντικά ακριβότερη από την κρυογενική κατεργασία καθώς όπως φαίνεται και παραπάνω το κόστος παραγωγής είναι μεγαλύτερο κάτω από ίδιες παραμέτρους κοπής. Επιπλέον, το κόστος μειώνεται καθώς το κοπτικό εργαλείο κατεργασίας έχει τώρα βελτιωμένη αντοχή σε φθορά, μεγαλύτερο χρόνο ζωής και δεν χρειάζεται αντικατάσταση, σε σύγκριση με της συμβατικές κατεργασίες κοπής [1].

Το κόστος για την απόκτηση και εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού για την κρυογενική ψύξη είναι αρκετά μεγάλο, αλλά συμβαίνει μια φορά. Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω τα κρυογενικά αέρια που χρησιμοποιούνται βρίσκονται σε αφθονία και το κόστος κτήσης τους θεωρείται μηδαμινό. Από την άλλη μεριά, στις συμβατικές κατεργασίες απαιτείται συνεχής αγορά υγρών κοπής, διαχείρισή τους μετά την χρησιμοποίησή τους, καθαρισμός των αποβλίπτων και καθαρισμός των καναλιών παροχής τους, γεγονός που αυξάνει το κόστος παραγωγής.

4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σε χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη μεταλλική κατεργασία, οι ιδιότητες πολλών μεταλλικών υλικών όπως η εφελκυστική τάση, η σκληρότητα, η φθορά και η αντοχή στην κόπωση ενισχύονται συγκριτικά με τις αντίστοιχες ιδιότητες των μετάλλων σε θερμοκρασία δωματίου. Οι περισσότερες βελτιώσεις των ιδιοτήτων παρατηρούνται στους χάλυβες [1]. Παρακάτω περιγράφεται η επίδραση που έχει η κρυογενική μηχανουργική κατεργασία στις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων.

4.1 Σκληρότητα και αντοχή στις εφελκυστικές τάσεις

Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι η κρυογενική κατεργασία αυξάνει την σκληρότητα και την αντοχή σε εφελκυστικές τάσεις σε ένα ευρύ φάσμα υλικών [1]. Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η επίδραση της στον χάλυβα και σε άλλα κράματα.

Η κρυογενική κατεργασία χάλυβα οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας του σε σχέση με τη συμβατική θερμική κατεργασία. Η αύξηση αυτή οφείλεται σε αυξημένη περιεκτικότητα σε μαρτενσίτη, μια σκληρή και εύθραυστη φάση που σχηματίζεται όταν ο χάλυβας θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία, ώστε να σχηματιστεί ωστενίτης, και κατόπιν υποστεί απότομη ψύξη. Η κρυογενική κατεργασία γενικά μετασχηματίζει τον ωστενίτη σε μαρτενσίτη καθώς κατά την διάρκειά της μειώνεται η ποσότητα του διατηρούμενου ωστενίτη και μόνο ένα ποσοστό της τάξης του 10-20% ωστενίτη παραμένει μετά την κατεργασία σε χάλυβες και χυτοσίδηρο [1]. Διάφορες έρευνες επιβεβαιώνουν την μείωση της ποσότητας του ωστενίτη από 49% σε μόλις 3% κατά την κρυογενική κατεργασία [2], ενώ μελέτη που σύγκρινε την ποσότητα ωστενίτη μετά το τέλος μιας συμβατικής θερμικής κατεργασίας και μετά από κρυογενική κατεργασία στους -180°C (93 K) έδειξε ποσοστά 12% και 6% ωστενίτη αντίστοιχα [2].

Η μεγαλύτερη ποσότητα μαρτενσίτη και ο σχηματισμός καρβιδίων, ενώσεων δηλαδή των μετάλλων με τον άνθρακα που χαρακτηρίζονται από υψηλή σκληρότητα και αντοχή στη θερμότητα, οδηγεί επίσης σε αύξηση της αντοχής στις εφελκυστικές τάσεις. Έρευνες σε σύρματα από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα δείχνουν ότι η κρυογενική μηχανουργική κατεργασία έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερες τελικές αντοχές στην εφελκυστική τάση σε θερμοκρασία δωματίου με αυξήσεις κατά 10% [2]. Αυτή η αυξημένη αντοχή στην εφελκυστική τάση οφείλεται στην μεγαλύτερη πυκνότητα μετατοπίσεων που υπάρχουν σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, διαπιστώθηκε ότι μετά από κρυογενική κατεργασία σε κράμα αλουμινίου υπήρξε μεγάλη πυκνότητα μετατοπίσεων και η αντοχή σε εφελκυστικές δυνάμεις αυξήθηκε από 315 σε 522 MPa. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας στους περίπου 150°C οδήγησε σε μείωση στην αντοχή από 522 έως 471 MPa και μια αναδιάταξη των μετατοπίσεων ενώ στους 300°C η αντοχή εφελκυσμού μειώθηκε στα 340 MPa [2].

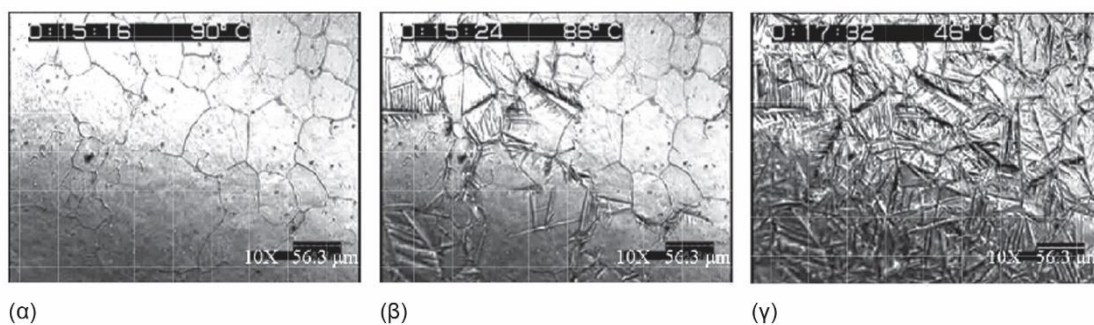
Κατά τη διάρκεια της κρυογενικής κατεργασίας, αυξάνεται η ποσότητα των πυρήνων καρβιδίων που σχηματίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες επειδή η ενέργεια παραμόρφωσης σε μαρτενσίτη αυξάνεται και τα άτομα άνθρακα κινούνται και σχηματίζουν συστάδες. Με την επαναφορά της θερμοκρασίας σε θερμοκρασία δωματίου, οι συστάδες άνθρακα σχηματίζουν καρβίδια. Τα καρβίδια που σχηματίζονται είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα. Αν και τα καρβίδια γενικά χαρακτηρίζονται ως σκληρά και σταθερά - έχουν πολύ υψηλές τιμές σκληρότητας ανάμεσα σε εκείνες μεταξύ αλουμινίου και διαμαντιού, σε θερμοκρασία δωματίου είναι αρκετά εύθραυστα. Επίσης, τα πιο πολλά καρβίδια αντέχουν στις υψηλές θερμορροές καθώς εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλά σημεία ζέσης ($2.000-3.000^{\circ}\text{C}$) [27].

Χάλυβες με υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες έναρξης και ολοκλήρωσης της φάσης του σχηματισμού μαρτενσίτη σε σχέση με τη θερμοκρασία δωματίου [27]. Γενικά, ο ωστενίτης που είναι αλλοτροπική μορφή του σιδήρου που κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα, έχει χαμηλότερη αντοχή στις εφελκυστικές τάσεις από την μαρτενσίτη που έχει τετραγωνική δομή και η τετραγωνικότητα του αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα [27].

Ο ωστενίτης και ο μαρτενσίτης έχουν ένα διαφορετικό μέγεθος των αντίστοιχων κρυσταλλικών δομών τους, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα όταν ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη, να αποκτά μεγαλύτερη αντοχή και σκληρότητα, αλλά χαμηλότερη ολκιμότητα. Η φάση του ωστενίτη στον χάλυβα γενικά είναι ασταθής σε θερμοκρασία δωματίου και αποσυντίθεται αργά. Η κρυογονική κατεργασία μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές διαστάσεων στις κρυσταλλογραφικές δομές του ωστενίτη και του μαρτενσίτη στον κατεργασμένο χάλυβα [27].

Ο μαρτενσίτης προσφέρει εξαιρετικό συνδυασμό αντοχής ($> 3500 \text{ MPa}$) και ανθεκτικότητας ($> 200 \text{ MPa m}^{1/2}$). Κατά την ταχεία ψύξη του ωστενίτη, ένας θερμικός μαρτενσιτικός μετασχηματισμός αρχίζει στη θερμοκρασία εκκίνησης φάσης του μαρτενσίτη. Στη συνέχεια, το κλάσμα όγκου του μαρτενσίτη αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας και τέλος, ο μετασχηματισμός ολοκληρώνεται όταν φτάσει η τελική θερμοκρασία σχηματισμού μαρτενσίτη [27].

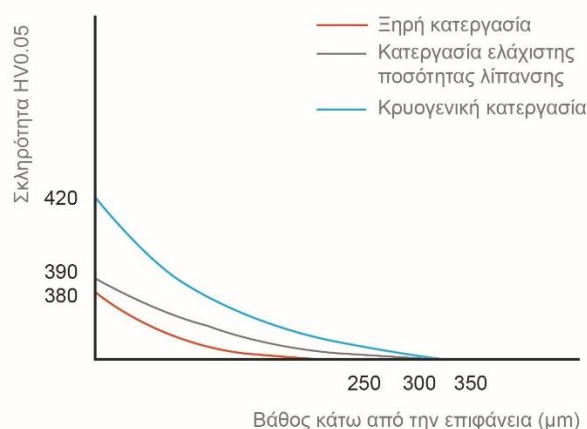
Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει τον μετασχηματισμό μαρτενσίτη σε πλάκα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χάλυβα όπως αυτός παρατηρείται με την χρήση μικροσκοπίου σάρωσης με λέιζερ, με την ώρα και την θερμοκρασία να σημειώνονται στην επάνω αριστερή γωνία.



Σχήμα 4.1 : Μικροδομή πλάκας χάλυβα (α) σε θερμοκρασία ελαφρώς πάνω από την θερμοκρασία έναρξης μετασχηματισμού μαρτενσίτη (β) σε θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία έναρξης μετασχηματισμού μαρτενσίτη (γ) κοντά στη τελική θερμοκρασία σχηματισμού μαρτενσίτη.

Σε πρόσφατα πειράματα που συνέκριναν τόσο την τόννευση με χρήση πεπιεσμένου αέρα όσο και την τόννευση με λίπανση ελάχιστης ποσότητας με την κρυογενική τόννευση σε κράμα τιτανίου Ti-6Al4V διαπιστώθηκε ότι η επιφάνεια του κράματος έγινε σκληρότερη αλλά λεπτότερη [1]. Το Σχήμα 4.2 συγκρίνει τα προφίλ σκληρότητας του κράματος Ti-6Al4V σε επιφάνεια και σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια κατά τη μηχανική κατεργασία του υπό ξηρές, με λίπανση ελάχιστης ποσότητας και κρυογενικές συνθήκες με ταχύτητα κοπής 150 m/min . Όπως φαίνεται, οι τιμές σκληρότητας στο κατεργασμένο κράμα τιτανίου είναι σημαντικά μεγαλύτερες κατά την κρυογενική κατεργασία τόσο στην επιφάνεια όσο και

σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια, αλλά σε βάθος 350 μm κάτω από την επιφάνεια του κράματος, οι τιμές είναι συγκριτικά ίσες.



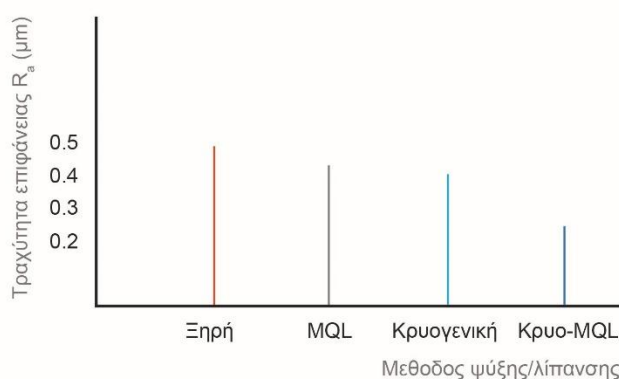
Σχήμα 4.2 : Σύγκριση προφίλ σκληρότητας σε επιφάνεια και σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια κατά τη μηχανική κατεργασία του κράματος Ti-6Al4V υπό ξηρές, με λίπανση ελάχιστης ποσότητας και κρυογενικές συνθήκες με ταχύτητα κοπής 150 m/min.

Υπάρχει πληθώρα ερευνών που επιβεβαιώνουν ότι η κρυογενική κατεργασία αυξάνει την σκληρότητα των κραμάτων. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα εξής:

- Inconel 718: αναλύθηκε η αποτελεσματικότητα του αερίου διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με την μηχανουργική κατεργασία με πεπιεσμένο αέρα και μελετήθηκαν οι επιδράσεις στην μικροσκληρότητα που αναπτύχθηκε στο κατεργαζόμενο μέταλλο. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι η κατεργασία με πεπιεσμένο αέρα οδηγεί σε χαμηλότερη σκληρότητα, ενώ η κατεργασία με διοξείδιο του άνθρακα παράγει αύξηση της σκληρότητας περίπου 25% σε σύγκριση με την αρχική σκληρότητα του κατεργαζόμενου μετάλλου [1].
- AA1050 και AA5083: δοκιμές σε αυτά τα κράματα αλουμινίου δείχνουν βελτιωμένη αντοχή στις εφελκυστικές δυνάμεις χάρη στη βελτιωμένη σκληρότητα [1].
- LC4Al: σε κρυογενική κατεργασία κράματος LC4Al διαπιστώθηκε αύξηση της αντοχής σε θλίψη του υλικού [1].
- Co-Cr-Mo: κατά την διάρκεια της κρυογενικής λείανσης βελτιώθηκε σημαντικά η τραχύτητα της επιφάνειας, αυξήθηκε η σκληρότητα του και δημιουργήθηκε ένα παχύτερο στρώμα στην επιφάνειά του [1].
- γ-TiAl: διαπιστώθηκε αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας του κράματος μετά την κρυογενική τόννευση [1].

Συμπερασματικά, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού βελτιώνονται με την κρυογενική κατεργασία επειδή γίνεται μετασχηματισμός φάσεων, κάτι που δεν συμβαίνει κατά την μηχανουργική κατεργασία με ξηρή μέθοδο όπου δεν παρατηρείται μεγαλύτερη σκληρότητα λόγω του μη μετασχηματισμού φάσεων του κατεργασμένου μετάλλου [3].

Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα μετά από κρυογενική κατεργασία στις επιφανειακές και υποεπιφανειακές στρώσεις του κράματος AZ31BMg. Στην κρυογενική κατεργασία βρέθηκε ότι υπάρχει σημαντική επίδραση στη τελική μικροδομή καθώς και ότι η σκληρότητα του επηρεαζόμενου στρώματος αυξήθηκε σε περίπου 95 HB από 55 HB από το αρχικά ακατέργαστο υλικό. Αντίστοιχα υπό τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας του κράματος, η μηχανουργική κατεργασία σε ξηρή κατάσταση δεν δημιούργησε αλλαγές στη μικροδομή και δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στη χημική σύνθεση μετά από μετρήσεις που έγιναν με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ενεργειακής διασποράς [1].



Σχήμα 4.3 : Γράφημα σύγκρισης σκληρότητας για διαφορετικούς τρόπους ψύξης, σε κατεργασία με κεραμικό κοπτικό εργαλείο, ταχύτητα κοπής $v_c=60$ m/min, $f=0.05$ mm/rev και βάθος κοπής $a_p=0.63$ mm.

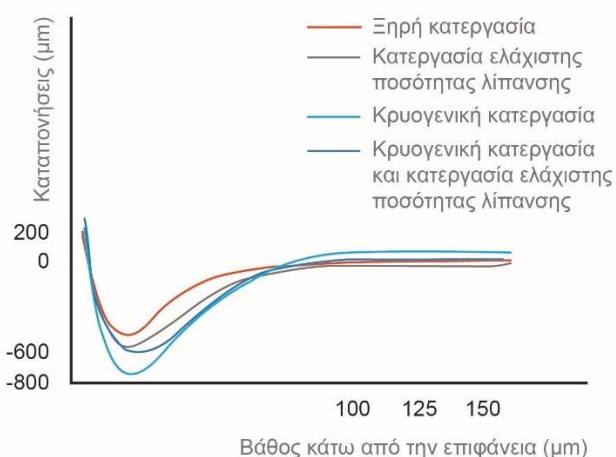
4.2 Καταπονήσεις

Πολλές έρευνες έχουν γίνει τις τελευταίες δεκαετίες στον ρόλο που παίζουν οι καταπονήσεις, η επίδραση δηλαδή δυνάμεων και ροπών πάνω σε σώματα που τα παραμορφώνει, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την κρυογενική κατεργασία [28].

Η κύρια επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας αφορά στην δομή κρυογενικά ψυχθέντων υλικών, η οποία γίνεται πολύ πιο ομοιόμορφη και πυκνή, καθώς βελτιώνονται οι κόκκοι των υλικών με σταθερά και παχιά νανοκρυσταλλικά επιφανειακά στρώματα και μειώνονται οι καταπονήσεις. Η κρυογενική μπορεί να μειώσει σημαντικά την ταχύτητα φθοράς των υλικών αφού αυξάνει την σκληρότητα, την ανθεκτικότητα, την μηχανική σταθερότητα στην επιφάνεια φθοράς και προκαλεί λιγότερες αστοχίες λόγω ρωγμών που προκύπτουν από τη διάδοση γραμμών τάσης [28].

Τα οφέλη αυτά έχουν επιβεβαιωθεί από πολλές έρευνες. Προκαταρκτικές δοκιμές που έγιναν για τον προσδιορισμό της επίδρασης της κρυογενικής επεξεργασίας σε κοπτικά εργαλεία τόρνου που είχαν εμποτιστεί σε υγρό άζωτο για 12 ώρες έδειξαν ότι η διάρκεια ζωής του εργαλείου αυξήθηκε από 50% σε περισσότερο από 200% [28]. Πολλά πειράματα έχουν εστιάσει επίσης στην σύγκριση των καταπονήσεων που προκύπτουν από την κρυογενική κατεργασία και την κατεργασία σε ξηρή κατάσταση, αποδεικνύοντας ότι η κατεργασία χάλυβα με κρυογενική αυξάνει την ποσότητα μαρτενσίτη και μειώνει την καταπόνηση στο υλικό κατά 50% [1]. Ακόμα, μελέτες που εστιάζουν στην αντοχή στη διάβρωση, φθορά και κόπωση σε κράματα μαγνησίου έδειξαν ότι η κρυογενική κατεργασία συμβάλλει στη βελτίωση της τελικής επιφάνειας του υλικού, αυξάνει την σκληρότητα στο επιφανειακό του στρώμα και βελτιώνει την αντίσταση στη διάβρωση ενώ οι καταπονήσεις λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερα βάθη [18].

Ανάλογα συγκρίθηκαν η κρυογενική με την κατεργασία με χρήση πεπιεσμένου αέρα και την κατεργασία ελάχιστης ποσότητας λίπανσης όσον αφορά τις παράλληλες και κάθετες στην κατεύθυνση κατεργασίας καταπονήσεις για το κράμα Inconel 718. Διαπιστώθηκε ότι με τη κρυογενική ψύξη οι καταπονήσεις είναι πολύ μικρότερες από την επιφάνεια ως και βάθος 25μm κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου, ωστόσο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4 αυξάνουν σημαντικά και γίνονται μεγαλύτερες για βάθος 75μm κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου [29]. Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνονται και από άλλες έρευνες που δείχνουν πως έπειτα από κρυογενική ψύξη δημιουργούνται καταπονήσεις σε περιφερειακές και αξονικές διευθύνσεις μέχρι 20 mm κάτω από την κατεργασμένη επιφάνεια [1].



Σχήμα 4.4 : Τιμές καταπονήσεων στο κράμα Inconel 718 μετά από διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.

4.3 Ολκιμότητα

Σε κρυογενικές κατεργασίες που εφαρμόζονται σε τομείς όπως η αποθήκευση υγροποιημένου αερίου, η μετατροπή ενέργειας, η υπεραγωγιμότητα και η βιοιατρική μηχανική χρησιμοποιούνται διάφορα μέταλλα και κράματα που χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ολκιμότητα προκειμένου να αντέξουν τις τεράστιες δυνάμεις που ασκούνται πάνω τους από την υπεραγωγιμότητα των μαγνητικών πεδίων [30]. Ο όρος ολκιμότητα αναφέρεται στην ιδιότητα των υλικών να εμφανίζουν σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις πριν τη θραύση τους και σε κρυογενικές θερμοκρασίες οφείλεται στην μεγαλύτερη πυκνότητα μετατοπίσεων του υλικού που υφίσταται κρυογενική κατεργασία [27].

Η ολκιμότητα του υλικού εξαρτάται από την σύσταση του κράματος, από την κρυσταλλική δομή του και την προϋστορία του σε μηχανικές επεξεργασίες [27]. Στις κρυογενικές θερμοκρασίες οι μετατοπίσεις εντοπίζονται σε καθορισμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα. Για να κατανοηθούν οι διαφορές στην ολκιμότητα σε κρυογενικές θερμοκρασίες, εξετάζεται η κρυσταλλική δομή. Γενικά, μέταλλα με ενδοκεντρωμένη κυβική δομή (fcc) διατηρούν την ολκιμότητα τους σε κρυογενικές θερμοκρασίες, ενώ μέταλλα που έχουν χωροκεντρωμένη κυβική δομή (bcc) και εξαγωνική κλειστή δομή (hcp) γίνονται πιο εύθραυστα [27].

Για παράδειγμα, μελέτη που έγινε για το κράμα CoCrFeMnNi που έχει ενδοκεντρωμένη κυβική δομή έδειξε ότι διαθέτει έναν εξαιρετικό συνδυασμό υψηλής αντοχής σε θραύση

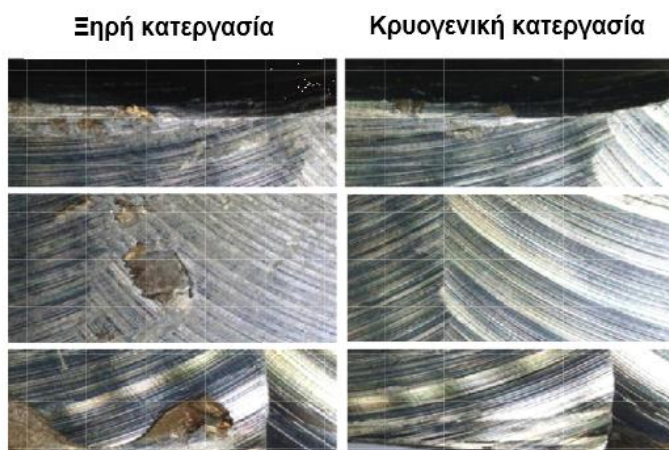
(μέχρι 219 MPa) και μεγάλης ολκιμότητας, μηχανικές ιδιότητες που το καθιστούν ισχυρό υποψήφιο για ευρείες κρυογενικές εφαρμογές [30]. Αντίστοιχα, αρκετά κράματα τιτανίου (A-110), νικελίου (Hastelloy C), χάλυβα (347-C) και αλουμινίου (5456-O) επιλέγονται σε κρυογενικές κατεργασίες καθώς παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά της αυξημένης σκληρότητας και ολκιμότητας σε θερμοκρασίες -252.7°C (21 K) [30].

Συμπερασματικά, για την αξιολόγηση και επιλογή υλικού κατάλληλου για τις κρυογενικές κατεργασίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν παράμετροι όπως η σκληρότητα του υλικού, η ολκιμότητά του, η δύναμη διάτμησης και η θερμικής διαστολή ενώ ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε υλικά που έχουν μειωμένη ολκιμότητα και επιμήκυνση λιγότερο από 5% [20].

4.4 Βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων που επιτυγχάνονται από την κρυογενική κατεργασία μετάλλων, ένα από τα σημαντικότερα είναι η βελτίωση των συνθηκών επιφάνειάς τους. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970 πολλές μελέτες ανέφεραν ότι η κρυογενική ψύξη μειώνει σημαντικά τη δύναμη κοπής και τη θερμοκρασία ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την ζωή του εργαλείου και την ακεραιότητα της επιφάνειας του [31].

Πρόσφατες μελέτες σχετικά με την κρυογενική κατεργασία μιας σειράς μετάλλων έχουν δείξει σταθερά βελτιωμένες συνθήκες επιφάνειας από την άποψη των μετασχηματισμών μικροδομής και μετασχηματισμών φάσης καθώς και την αύξηση της σκληρότητας των επιφανειών και υπο-επιφανειών των μετάλλων [32]. Από την παρατήρηση των προφίλ τραχύτητας επιφάνειας και των κατεργασμένων επιφανειών, παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας στο κατεργασμένο μέταλλο είναι εμφανής σε ξηρές συνθήκες κατεργασίας. Έρευνες έχουν υπογραμμίσει ότι αυτά τα μη ικανοποιητικά αποτελέσματα θα μπορούσαν να αποφευχθούν με την υιοθέτηση μιας στρατηγικής κρυογενικής ψύξης / λίπανσης έχοντας ως αποτέλεσμα μια σταθερή διαδικασία κοπής. Το Σχήμα 4.4 παρουσιάζει την ποιότητα επιφάνειας κατεργασμένου κράματος σε συνθήκες ξηρής κατεργασίας και σε συνθήκες κατεργασίας υπό κρυογενικές συνθήκες. Η αυξημένη απόδοση της κρυογενικής κατεργασίας στην επιφάνεια των μετάλλων αποδίδεται στην πιο αποτελεσματική αφαίρεση θερμότητας καθώς και στο ότι οι δυνάμεις των εργαλείων κοπής γίνονται μικρότερες [32].



Σχήμα 4.5 : Ποιότητα επιφάνειας κατεργασμένου κράματος X12CrNiWTiB16-13 σε συνθήκες ξηρής κατεργασίας και σε συνθήκες κατεργασίας υπό κρυογενικές συνθήκες.

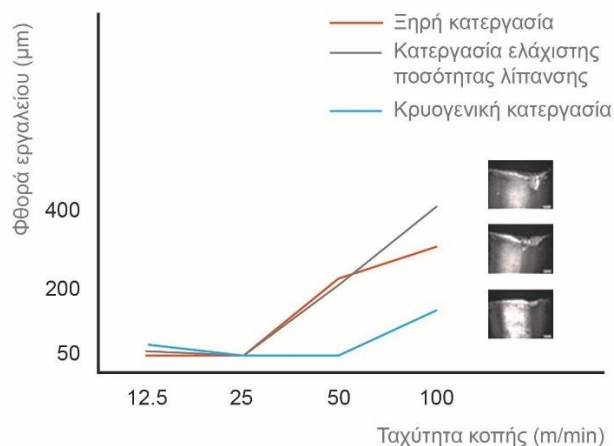
Πράγματι, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες κοπής που σχετίζονται με την κρυογενική μηχανική κατεργασία σε διάφορα κατεργασμένα μεταλλικά υλικά, όπως το κράμα τιτανίου Ti-6Al4V, φαίνεται να μειώνει σημαντικά την τραχύτητα της επιφάνειας και την φθορά του εργαλείου κατά 77% και 66% αντίστοιχα σε σύγκριση με την κατεργασία υπό ξηρές συνθήκες ή με την χρήση γαλακτώματος, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου κατά 240%

[33]. Παρόμοια μελέτη αξιολόγησε την κατεργασία κράματος Ti-6Al4V σε μια περιστροφική διαδικασία κοπής με ειδικά εργαλεία κοπής και διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία κοπής και η τραχύτητα της επιφάνειας μειώθηκαν κατά 61-66% και 36%, αντιστοίχως. Η άμεση εφαρμογή του υγρού αζώτου μέσα από τις οπές που έγιναν στο εργαλείο κοπής θεωρήθηκε πιο αποτελεσματική. Αντίστοιχα, η δύναμη κοπής μειώθηκε επίσης κατά 35-42%, ενώ η φθορά των πλευρών μειώθηκε κατά 27-39% κατά τη κατεργασία με νερό [33]

Εκτεταμένη μελέτη διεξήχθη σχετικά και με την κρυογενική κατεργασία των κραμάτων NiTi και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η κατεργασία προκαλεί μειωμένη τραχύτητα στην επιφάνεια του μετάλλου και βελτιώνει σημαντικά τις συνθήκες επιφάνειας του υλικού όσον αφορά την αυξημένη μικροσκληρότητα, τις θερμοκρασίες μετασχηματισμού φάσης και την ποιότητα της επιφάνειας [33]. Σημαντική μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας σε κράμα αργιλίου-τιτανίου (AlTi) με κρυογενική ψύξη έχει επίσης μελετηθεί σε σύγκριση με την κατεργασία ελάχιστης ποσότητας λίπανσης [31].

Έρευνες που συγκρίνουν την απόδοση μηχανουργικής κατεργασίας στην επιφάνεια του κράματος με διαφορετικές τεχνολογίες (νερό, ξηρές συνθήκες, κατεργασία ελάχιστης ποσότητας λίπανσης και κρυογενική με υγρό άζωτο) έχουν παρουσιάσει βελτιωμένα αποτελέσματα στις συνθήκες επιφάνειας του κατεργασμένου μετάλλου AA 7075-T651 [31], κραμάτων τιτανίου Ti-5553 [31] και κραμάτων νίκελ Inconel 718 [29] για κατεργασία που έγινε υπό κρυογενικές συνθήκες. Φαίνεται λοιπόν ότι η κρυογενική κατεργασία συμβάλλει στη μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας του κατεργασμένου μετάλλου εμποδίζοντας μηχανικές και χημικές αποικοδομήσεις της επιφάνειάς του [1].

Γενικά, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας μπορούν να βελτιωθούν εντελώς με κρυογενικές συνθήκες, ωστόσο οι ταχύτητες κοπής φαίνεται να επηρεάζουν τα αποτελέσματα σχετικά με την ποιότητα επιφάνειας του κατεργασμένου μετάλλου [1]. Σε πρόσφατη μελέτη για τη φθορά των εργαλείων ερευνήθηκε και αναλύθηκε η κύρια μεταβολή της δύναμης κοπής ως προς τον χρόνο κοπής. Η μικρότερη μεταβολή παρατηρήθηκε στην κατεργασία με ελάχιστη ποσότητα λίπανσης, ωστόσο, η κρυογενική ψύξη παρήγαγε σημαντικά χαμηλότερες δυνάμεις κοπής σε διαφορετικούς χρόνους κοπής συγκριτικά με την ξηρή κατεργασία και την κατεργασία με ελάχιστη ποσότητα λίπανσης. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η κρυογενική ψύξη μείωσε την ταχύτητα φθοράς του εργαλείου σε υψηλές ταχύτητες κοπής, ιδιαίτερα την προοδευτική φθορά στη περιοχή της μύτης του εργαλείου και τη φθορά στο βάθος της γραμμής κοπής του εργαλείου [1]. Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει την σύγκριση της φθοράς που δημιουργείται πάνω στην μύτη του εργαλείου κοπής έπειτα από τις τρεις κατεργασίες για NiTi κράματα:



Σχήμα 4.6 : Οι ταχύτητες κοπής επηρεάζουν τα αποτελέσματα σχετικά με την ποιότητα επιφάνειας του κατεργασμένου μετάλλου σε διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας και για διαφορετικές δυνάμεις κοπής.

Όπως φαίνεται σε ταχύτητες κοπής των εργαλείων κατεργασίας πάνω από 25m/min αρχίζει να αυξάνει η φθορά στα εργαλεία κατεργασίας. Σε ταχύτητα 50m/min η επιφάνεια του εργαλείου κατεργασίας εμφανίζει καλύτερη ποιότητα μετά από κρυογενική κατεργασία σε σχέση με τις άλλες δύο κατεργασίες ενώ η χειρότερη ποιότητα στην επιφάνεια του εργαλείου κατεργασίας διαπιστώνεται σε συνθήκες ελάχιστης ποσότητας λίπανσης. Η αντοχή στην φθορά των εργαλείων κατεργασίας μετάλλου παίζει γενικά σημαντικό ρόλο στην κατεργασία του μετάλλου καθώς έχει διαπιστωθεί ότι η φθορά του εργαλείου κατεργασίας οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειών των κατεργασμένων μετάλλων [1].

4.5 Αντοχή στην διάβρωση

Η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στα μέταλλα σε ότι αφορά την μηχανουργική τους ιδιότητα, όπως είναι η αντοχή στη διάβρωση, έχει διερευνηθεί εκτεταμένα κατά την τελευταία δεκαετία, καθώς υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις για υλικά που δεν είναι επιρρεπή σε διάβρωση ώστε να χρησιμοποιούνται από τις χημικές, ιατρικές και κατασκευαστικές βιομηχανίες. Ένα τέτοιο παράδειγμα υλικού που πρέπει να αντέχει στην διάβρωση είναι και ο χάλυβας, ο οποίος είναι σε υψηλή ζήτηση σε πολλούς τομείς της μηχανικής, όπως η κατασκευή κτιρίων, οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, οι μεταφορές κ.λπ.[34].

Στην κρυογενική επεξεργασία, τα υλικά ψύχονται σταδιακά από τη θερμοκρασία δωματίου στους -196°C (77 K) και εμποτίζονται σε αυτή τη θερμοκρασία για αρκετές ώρες, προτού επανέλθουν βαθμιαία σε θερμοκρασία δωματίου και πάλι. Στόχος είναι να αυξηθεί η σκληρότητα των υλικών, η αντίσταση τους στην φθορά, στην διάβρωση και στην τριβή, και τέλος η αντοχή τους στην εφελκυστική τάση και κάμψη ώστε να βελτιωθεί η διάρκεια ζωής τους. Η αντοχή στη διάβρωση φαίνεται να βελτιώνεται σε διαφορετικούς βαθμούς για διαφορετικά υλικά [34].

Για παράδειγμα, κράμα μαγνησίου AZ61 υπεβλήθη σε κρυογενική επεξεργασία για διαφορετικές περιόδους διαβροχής με σταθερή θερμοκρασία -180°C (93 K) και τόσο η σκληρότητα όσο και η αντοχή στη διάβρωση αυξήθηκαν με την αύξηση της περιόδου εμποτισμού. Αντίστοιχα ήταν τα αποτελέσματα για κράμα ρητίνης και αλουμινίου που υπέστησαν κρυογενική επεξεργασία σε θερμοκρασία εμποτισμού -180°C (93 K) και

περίοδο εμποτισμού 24 ώρες καθώς διαπιστώθηκε αύξηση της σκληρότητας κατά 13,64%, και βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση β κατά παράγοντα 2,65 [34].

Σε άλλη μελέτη διερευνήθηκαν οι επιδράσεις της βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας σε σύγκριση με τη θερμική κατεργασία επί του ρυθμού διάβρωσης, της σκληρότητας και της αντοχής εφελκυσμού σε μαλακό χάλυβα και τα αποτελέσματά τους επιβεβαίωσαν ότι μετά από βαθιά κρυογενική κατεργασία, ο ρυθμός διάβρωσης του μαλακού χάλυβα βελτιώθηκε [34]. Διερευνήθηκε επίσης η επίδραση κρυογενικών συνθηκών τηγμένης επιφάνειας μη σιδηρούχων κραμάτων έπειτα από laser στα χαρακτηριστικά μικροδομής και διάβρωσης τους και διαπιστώθηκε ότι η τήξη με λείζερ σε κρυογενικές συνθήκες είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη αντοχή στη διάβρωση σε κράματα αλουμινίου, χαλκού και τιτανίου λόγω της δημιουργίας μιας πολύ λεπτόκοκκης μικροδομής στα τηγμένα στρώματα, μιας μικροδομής που αποτελείται από υπερκορεσμένα στερεά διαλύματα και μικρής ποσότητας διμεταλλικές φάσεις, οι οποίες περιορίζουν τον σχηματισμό κυψελίδων διάβρωσης [34].

Αποτελέσματα ερευνών έδειξαν ότι οι ρυθμοί διάβρωσης του κράματος LC4 Al σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου πριν και μετά την κρυογενική κατεργασία ήταν 0,152 mm/a και 0,135 mm/a αντίστοιχα, υποδεικνύοντας ότι η κατεργασία αυτή ενίσχυσε την αντοχή στη διάβρωση [34]. Επιπλέον, σε μελέτες που έγιναν σε κράματα μαγνησίου διαπιστώθηκε ότι τα δείγματα που έχουν κατεργαστεί με κρυογενική ψύξη είχαν πολύ καλύτερη αντοχή σε διάβρωση σε σύγκριση με δείγματα που είχαν υποστεί ξηρή κατεργασία και πως η βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση οφειλόταν σε αυξημένη μικροδομή και επιφανειακή/υποεπιφανειακή ποιότητα [34].

4.6 Χρόνος κόπωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κρυογενική κατεργασία στα μέταλλα παράγει επιφάνειες με μικρότερη τραχύτητα, λιγότερα ελαττώματα, υψηλότερη σκληρότητα και λιγότερες εφελκυστικές καταπονήσεις από εκείνες που λαμβάνουν χώρα σε επιφάνειες που έχουν κατεργαστεί με χρήση πεπιεσμένου αέρα ή ελάχιστη ποσότητα λίπανσης [35]. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστεί η επίπτωση της κρυογενικής στη λειτουργική απόδοση των μετάλλων, όπως είναι η αύξηση του χρόνου αντοχής τους στην κόπωση.

Μηχανικές δοκιμές, περιλαμβανομένης της κόπωσης, της κρούσης και της σκληρότητας, που διεξήχθησαν σε δείγματα χάλυβα μετά από διάφορες συνθήκες κατεργασίας έδειξαν ότι η σκληρότητα και η αντοχή στην κόπωση των κρυογενικά επεξεργασμένων δειγμάτων ήταν υψηλότερες (της τάξεως των 25-30 MPa σε διάρκεια ζωής περίπου 107 κύκλων). Μάλιστα, υπολογίστηκε ότι ο χρόνος πριν την τελική κόπωση ενός ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα με κρυογενική κατεργασία θα μπορούσε να αυξηθεί έως και 100% σε σύγκριση με μια συμβατική κατεργασία [1].

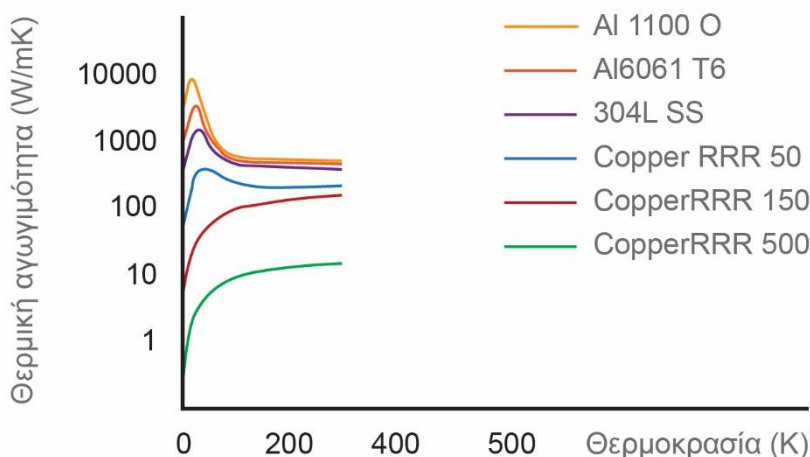
Αντίστοιχες μελέτες σε χάλυβα AISI 304 επιβεβαίωσαν ότι η κρυογενική κατεργασία μπορούσε αυξήσει κατά σχεδόν 15% το όριο αντοχής του σε 2×10^6 κύκλους. Αναλύσεις στην επιφάνεια κόπωσης του έδειξαν ότι οι ρωγμές κόπωσης που παρατηρούνται στα δείγματα που έχουν υποστεί ψύξη με κρυογονική ψύξη είναι πιο επιφανειακές (30-50 μm) από εκείνες που δημιουργούνται υπό συνθήκες κατεργασίας με βάση το έλαιο (150-200 μm). Αυτές οι βελτιώσεις στην επιφάνεια και στον χρόνο κόπωσης θεωρείται ότι σχετίζονται με τη μείωση της θερμοκρασίας στην ζώνη λείανσης εξαιτίας της κρυογενικής ψύξης [35]. Τα ευρήματά αυτά είναι σε συμφωνία με αντίστοιχες μελέτες σε κράματα όπως το Ti6Al4V και το WC-Co, οι οποίες έδειξαν ότι στα κρυογενικά επεξεργασμένα δείγματα ο χρόνος πριν τη τελική τους κόπωση είναι μεγαλύτερος (μεγαλύτερος αριθμός κύκλων πριν την κόπωση)

[35]. Συμπερασματικά, η κρυογενική κατεργασία οδηγεί σε αύξηση του χρόνου κόπωσης των υλικών και υψηλότερο όριο αντοχής.

4.7 Θερμική αγωγιμότητα

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων που επιτυγχάνονται από την κρυογενική κατεργασία των υλικών είναι και ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας, της ιδιότητας τους δηλαδή να διαχέουν πιο ομοιόμορφα την θερμότητα στο εσωτερικό τους. Η θερμική αγωγιμότητα μετριέται με τον "συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας" (h) ο οποίος διαφέρει από σώμα σε σώμα [27].

Στις κρυογενικές εφαρμογές όπου απαιτείται καλή θερμική αγωγιμότητα, όπως για παράδειγμα στους εναλλάκτες θερμότητας, χρησιμοποιείται κυρίως ο χαλκός και το αλουμίνιο ενώ ο ανοξείδωτος χάλυβας προτιμάται σε εφαρμογές όπου δεν παίζει κύριο ρόλο η θερμική αγωγιμότητα, όπως για παράδειγμα σε υποστηρίγματα και δομικά μέλη. Τα μέταλλα έχουν συνήθως θερμικές αγωγιμότητες στην περιοχή των 10 W/mK (κράματα ανοξείδωτου χάλυβα) έως 400 W/mK (χαλκός) σε θερμοκρασία δωματίου [1]. Το Σχήμα 4.6 παρουσιάζει τις τιμές θερμικής αγωγιμότητας για μια σειρά από κράματα αλουμινίου και χαλκού:



Σχήμα 4.7 : Τιμές θερμικής αγωγιμότητας για διάφορα μέταλλα σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Πολλές έρευνες επιβεβαιώνουν πράγματι πως η θερμική αγωγιμότητα ενισχύεται από την επεξεργασία σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, η αγωγιμότητα ενός κράματος χαλκού/χρωμίου αυξάνεται κατά περίπου 3-4% με ψύξη στους -196°C ενώ τα καρβίδια που όπως έχει ήδη αναφερθεί σχηματίζονται αρχικά σε κρυογενικές θερμοκρασίες χαρακτηρίζονται από καλή θερμική αντοχή αγωγιμότητα. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι υψηλότερες θερμικές αγωγιμότητες εμφανίζονται για τα πολύ καθαρά μέταλλα, όπως είναι ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο και ο χαλκός, καθώς βρέθηκε ότι οι ακαθαρσίες μειώνουν την θερμική αγωγιμότητα [2].

Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου γήρανσης ενός μετάλλου. Όταν ένα ήδη κατεργασμένο κράμα μετάλλων υποβληθεί σε κρυογενικές θερμοκρασίες και κατεργαστεί ξανά σε χαμηλότερη θερμοκρασία, η θερμική αγωγιμότητα διαπιστώνεται ότι αυξάνεται κατά 3 έως 4% χωρίς να

επηρεάζεται η σκληρότητα. Χωρίς την κρυογενική κατεργασία ωστόσο δεν επιτυγχάνεται μετρήσιμη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας [2].

4.8 Σχηματοποίηση (Formability)

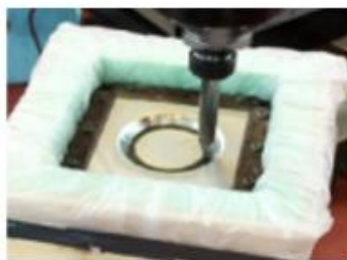
Έχουν αναφερθεί ήδη αρκετές έρευνες για τη συμπεριφορά των υλικών και τις αλλαγές στις ιδιότητες τους σε κρυογενικές θερμοκρασίες, με υποδειγματικά αποτελέσματα. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ιδιότητες όπως η αντοχή στην εφελκυστική τάση, η σκληρότητα, η φθορά και η αντοχή στην κόπωση και η σχηματοποίηση των μεταλλικών υλικών ενισχύονται σε σύγκριση με τις ιδιότητες τους σε θερμοκρασία δωματίου [1]

Στα υλικά με ενδοκεντρωμένη κυβική δομή, η κρυογενική ψύξη μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη σχηματοποίηση, καθώς αυτά δεν υφίστανται μετάβαση από όλκιμη σε εύθραυστη συμπεριφορά ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες δοκιμές σε κράματα αλουμινίου για την αντοχή τους στην εφελκυστική τάση και αποδείχθηκε ότι συγκεκριμένες κρυογενικές θερμοκρασίες έχουν θετικές επιδράσεις στην επιμήκυνση του θραύσματος και στην τελική αντοχή σε εφελκυσμό, δύο ιδιότητες που σχετίζονται με την σχηματοποίηση [1]. Άλλη μελέτη περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ενισχυμένα κράματα αλουμινίου από τις σειρές 1100, 3000, 4000 μπορούν να σχηματοποιηθούν κρυογενικά μεταξύ -100°C και -200°C , με αποτέλεσμα τη βελτίωση της δυνατότητας σχηματοποίησης κατά την εφαρμογή διαδικασιών σκλήρυνσης [2].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα σχηματοποίησης σε κατεργασμένα μέταλλα μπορεί να προσδιοριστεί από τα επίπεδα μέγιστης τάσης θραύσης που μπορούν να επιτευχθούν σε απλές δοκιμές εφελκυσμού. Η υψηλή τάση σχηματοποίησης κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000 σε μειωμένες θερμοκρασίες, για παράδειγμα, μπορεί να εξηγηθεί λόγω της μειωμένης επίδρασης της υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο σε αυτά τα κράματα σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Έτσι, ενώ σε θερμοκρασία δωματίου επηρεάζεται έντονα η πλαστική συμπεριφορά αυτών των κραμάτων εξαιτίας της περιεκτικότητάς τους σε μαγνήσιο, περιορίζοντας τη δυνατότητα σχηματοποίησής τους, οι κρυογενικές θερμοκρασίες πιστεύεται ότι μειώνουν σημαντικά την επίδραση του μαγνησίου, με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη δυνατότητα μορφοποίησης των κραμάτων [1].

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η κρυογενική κατεργασία δεν συμβάλλει πάντα με πλεονεκτικό τρόπο στη σχηματοποίηση των υλικών, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται πιο πολύπλοκες διαδρομές παραμόρφωσης. Έρευνα έδειξε αποτυχία στην σχηματοποίηση μετάλλων όπως τα AA1050-H24 και AA5083-H111 σε κρυογενικές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τα επίπεδα ικανότητας σχηματισμού που μπορούν να επιτευχθούν σε θερμοκρασία δωματίου, υποδεικνύοντας έτσι ορισμένα όρια στην βιομηχανική εφαρμογή των επιδράσεων της κρυογενικής ψύξης [1].

Η σχηματοποίηση των μετάλλων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7 σε συνθήκες κρυογενικής ψύξης μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους όπως (α) κάθετη ρύθμιση του μετάλλου προς κατεργασία με παροχή ψυκτικού μέσου ή (β) με οριζόντια ρύθμιση με το μέταλλο προς κατεργασία να είναι εντελώς βυθισμένο στο υγρό άζωτο [1].



Σχήμα 4.8 : Διαφορετικοί τρόποι κατά την σχηματοποίηση μετάλλων σε συνθήκες κρυογενικής ψύξης [1].

4.9 Γενική σύγκριση κρυογενικής ψύξης με τις συμβατικές μεθόδους

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν για την μηχανουργική κατεργασία σε μέταλλα με κρυογενική ψύξη προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους ψύξης σε κατεργασίες κοπής σε συνάρτηση με α. την απομάκρυνση του αποβλίττου, β. την ψύξη της κατεργασίας, γ. την λίπανση της κατεργασίας, δ. την ψύξη της εργαλειομηχανής, στ. την ψύξη του τεμαχίου κατεργασίας, ζ. τον έλεγχο της σκόνης, η. ποιότητα τελικού προϊόντος [1].

Στον Πίνακα 4.1 γίνεται σύγκριση των μεθόδων λίπανσης και ψύξης [1].

Μέθοδος Επίδραση	Γαλάκτωμα (oil-based)	Ξηρή κατεργασία (dry)	MQL	Κρυογενική κατεργασία (LN ₂)	Υβριδική (LN ₂ +MQL)
Ψύξη	Καλή	Κακή	Μέτρια	Εξαιρετική	Εξαιρετική
Λίπανση	Εξαιρετική	Κακή	Εξαιρετική	Μέτρια	Εξαιρετική
Απομάκρυνση αποβλίττου	Καλή	Καλή	Μέτρια	Καλή	Καλή
Ψύξη εργαλειομηχανής	Καλή	Κακή	Κακή	Μέτρια	Μέτρια
Ψύξη τεμαχίου	Καλή	Κακή	Κακή	Καλή	Καλή
Έλεγχος σωματιδίων σκόνης	Καλή	Κακή	Μέτρια	Μέτρια	Καλή
Ποιότητα επιφάνειας κατεργασμένου μετάλλου	Καλή	Κακή	Μέτρια	Εξαιρετική	Εξαιρετική

Πίνακας 4.1 : Σύγκριση απόδοσης μεθόδων για διάφορους τρόπους ψύξης και λίπανσης.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τον παραπάνω πίνακα είναι :

- Ένας υβριδικός συνδυασμός χρήσης LN₂ και MQL είναι ο καταλληλότερος με τα καλύτερα αποτελέσματα, τόσο και κατά την κατεργασία όσο και στο τελικό τεμάχιο.
- Η λίπανση με γαλάκτωμα δίνει ακόμα και σήμερα τα καλύτερα αποτελέσματα, όχι όμως στον χρόνο ζωής κοπτικού (όπως θα αναλύεται στο 5^ο Κεφάλαιο).

- Η κρυογενική αποτελεί την καλύτερη μέθοδο όσο αφορά την τελική ποιότητα επιφάνειας κατεργασμένου υλικού και συμβάλλει στην καλύτερη απομάκρυνση του αποβλίπτου στην ζώνη κοπής.
- Όπως έχει αναφερθεί στο 3^ο Κεφάλαιο, κατά την χρήση κρυογενικής δεν υπάρχουν σκόνες και επιβλαβή αέρια ή υγρά σωματίδια.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ένας συνδυασμός κρυογενικής ψύξης με MQL τεχνολογία μπορεί να φέρει εξαιρετικά αποτελέσματα σε ότι αφορά τις φυσικές και μηχανικές αποδόσεις του τελικού τεμαχίου αλλά και της ποιότητας της επιφάνειάς του.

5. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΨΥΞΗ

Οι κύριες μηχανουργικές κατεργασίες, οι οποίες θα απασχολήσουν και θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο, είναι οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, οι οποίες εξασφαλίζουν την τελική γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά ποιότητας που απαιτούνται σε ένα προϊόν. Με τις κατεργασίες κοπής ουσιαστικά αφαιρείται πλεονάζον υλικό από ένα κατεργαζόμενο τεμάχιο με τη μορφή αποβλίπτων. Οι βασικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο είναι : η τόννευση (turning), το φραιζάρισμα (milling), η λείανση (grinding) και η διάτρηση (drilling) [26].

5.1 Τόννευση

Με τον όρο τόννευση εννοούμε την κατεργασία κοπής, κατά την οποία κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής, με κατά κανόνα κυκλική διατομή. Κατά την τόννευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόννου [26]. Με αυτόν τον τρόπο συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει την δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκους μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Πρόκειται δηλαδή, για κατεργασία αφαίρεσης υλικού με κύρια κίνηση την περιστροφική κίνηση της ατράκτου, όπου προσδένεται κατάλληλα το τεμάχιο, και δευτερεύουσα τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης (κίνηση του κοπτικού εργαλείου). Η εργαλειομηχανή που εξασφαλίζει με ακρίβεια τις κινήσεις του τεμαχίου και του εργαλείου για την τόννευση, είναι ο τόννος [26].

Υπάρχουν αρκετά είδη τόννευσης, αλλά μπορούμε να τις χωρίσουμε σε 4 ειδικές κατηγορίες [26]:

- A. Ανάλογα με τη διάταξη του άξονα τόννευσης :
 - Οριζόντια (οριζόντιος άξονας).
 - Κατακόρυφη (κατακόρυφος άξονας)
- B. Ανάλογα με τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας:
 - Εσωτερική.
 - Εξωτερική.
- C. Ανάλογα με την σχέση κύριας και δευτερεύουσας κίνησης:
 - Διαμήκης τόννευση, με κίνηση πρόωσης παράλληλη προς τον άξονα τόννευσης.
 - Εγκάρσια τόννευση, με κίνηση πρόωσης κάθετη προς τον άξονα τόννευσης, η οποία διακρίνεται με την σειρά της σε:
 - i. Μετωπική.
 - ii. Ακτινική.
 - Κωνική τόννευση, με την διεύθυνση της κίνησης πρόωσης να τέμνει τον άξονα τόννευσης.
- D. Ειδικές τόννευσεις :
 - Σπειροτόμηση (εσωτερική ή εξωτερική)
 - Τόννευση με πολλά κοπτικά εργαλεία, είτε με διαιρούμενη πρόωση, είτε με διαιρούμενο βάθος κοπής.

5.1.2 Συνθήκες κοπής

Στην τόννευση οι συνθήκες κοπής είναι η ταχύτητα κοπής που σχετίζεται με τις στροφές περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τη διάμετρο κοπής, η πρόωση που είναι η κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής του τεμαχίου μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή της ατράκτου και το βάθος κοπής (a_p), που είναι το εγκάρσιο βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται η περιστροφή του τεμαχίου και η εγκάρσια και διαμήκης μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου. Οι τρεις αυτοί

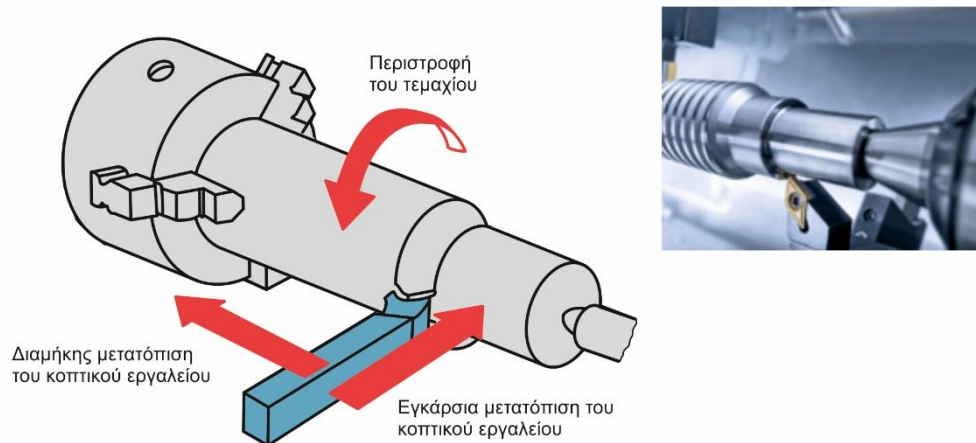
παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατεργασία και είναι απαραίτητη η σωστή επιλογή τους κατά την τόννευση [26].

Κατά την τόννευση τεμαχίου διαμέτρου D [mm], το οποίο περιστρέφεται με n στροφές το λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής v_c προκύπτει από την σχέση [26] :

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

Η ταχύτητα κοπής δεν επιλέγεται τυχαία, αφού χαμηλή ταχύτητα κοπής οδηγεί σε μεγάλο χρόνο κοπής και κατά συνέπεια σε χαμηλή παραγωγικότητα. Από την άλλη όμως, υψηλή ταχύτητα κοπής έχει ως αποτέλεσμα ανάλογες υψηλές θερμοκρασίες στο κοπτικό εργαλείο. Η πρόωση εκφράζει την ταχύτητα της κίνησης του κοπτικού σε χιλιοστά ανά λεπτό [mm/min], συμβολίζεται με f_{min} και ουσιαστικά πρόκειται για την ταχύτητα μετακίνησης του κοπτικού εργαλείου [26] :

$$f_{min} = f \cdot n$$



Σχήμα 5.1 : Κινηματική της τόννευσης – Στιγμιότυπο από κατεργασία τόννευσης

Ο χρόνος κοπής ισούται με το πηλίκο του μήκους κοπής L δια την πρόωση f_{min} . Το μήκος κοπής L περιλαμβάνει και τους όρους l_a και l_u που είναι αντίστοιχα τα διαστήματα πριν και μετά την κοπή, δηλαδή όσο απαιτείται για να πλησιάσει το κοπτικό εργαλείο και αντίστοιχα να απομακρυνθεί [26] :

$$th = \frac{L}{f_{min}} = \frac{L}{f \cdot n} [min]$$

5.1.3 Κοπτικά εργαλεία

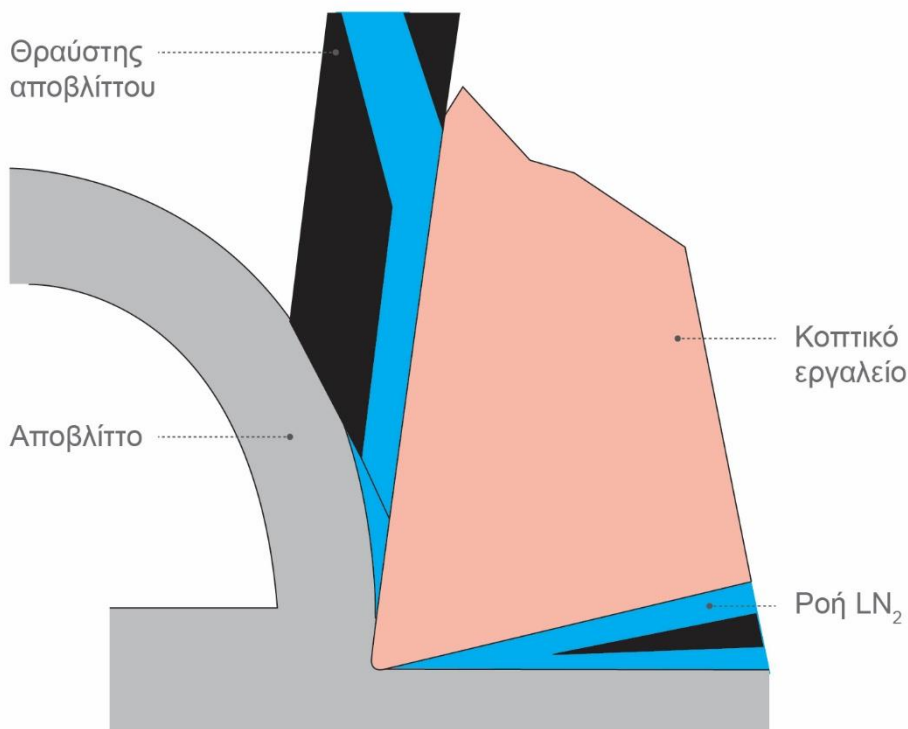
Κατά την τόννευση χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία τα οποία λειτουργούν σε ακραίες συνθήκες όσον αφορά στα επιβαλλόμενα φορτία και στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε αυτά [25]. Τα υλικά κατασκευής τους πρέπει να συνδυάζουν ιδιότητες, οι οποίες συγκεντρώνονται παρακάτω [26] :

- Υψηλή σκληρότητα, ώστε να μπορεί το εργαλείο να εισχωρεί στο μαλακότερο κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Χαμηλό ρυθμό φθοράς, ώστε να διατηρούνται οι κοπτικές ιδιότητες της κοπτικής ακμής.
- Υψηλή αντίσταση στην θερμότητα, ώστε να διατηρεί τη σκληρότητά του στις πολύ υψηλές αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή.
- Μεγάλη δυσθραυστότητα, ώστε να έχει αντοχή σε θλίψη και κάμψη.

Τα συνήθη υλικά κατασκευής των κοπτικών εργαλείων της τόννευσης είναι τα σκληρομέταλλα, τα κεραμικά πυρίμαχων οξειδίων, οι ανθρακούχοι χάλυβες, οι κεκραμένοι χάλυβες και οι ταχυχάληβες [25].

5.2 Κρυογενική τórνευση

Η πλειονότητα των ερευνητικών εργασιών γύρω από την κρυογενική κατεργασία πραγματοποιήθηκε στις κατεργασίες τórνευσης. Ο λόγος που έγινε αυτό είναι η εύκολη πρόσβαση των κρυογενικών μέσων στην ζώνη κοπής μέσω ενός εξωτερικού ακροφυσίου (Σχήμα 5.2). Παρακάτω θα καλυφθεί η κρυογενική τórνευση που συνδέεται με διαφορετικά υλικά εξετάζοντας τις δυνάμεις κοπής, τον συντελεστή τριβής, την αντοχή του κοπτικού εργαλείου αλλά και την επιφανειακή τραχύτητα του κατεργαζόμενου μετάλλου.



Σχήμα 5.2 : Εξωτερικό ακροφύσιο στην ζώνη κοπής, μεταξύ αποβλίττου και κοπτικής ακμής.

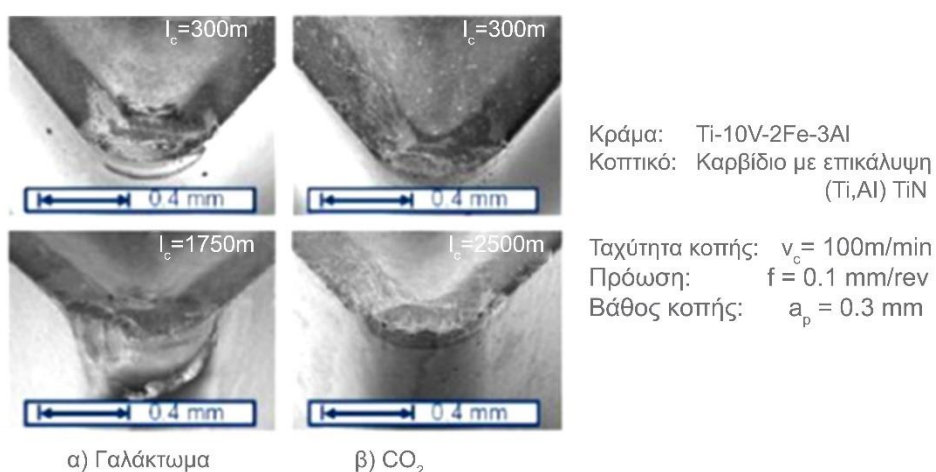
5.2.1 Κράματα τιτανίου

Η ομάδα του Pusavec [19] πραγματοποίησε πειράματα και μελέτες που επικεντρώθηκαν σε βιώσιμες μεθόδους παραγωγής. Σύγκριναν την κρυογενική ψύξη με χρήση LN₂ με την παραδοσιακή κατεργασία χρήσης γαλακτώματος και την ψύξη με χρήση υψηλής πίεσης (HPJAM). Σε μια από τις μελέτες τους συνέκριναν την αξιολόγηση του κύκλου ζωής στις τórνευσεις του ίδιου προϊόντος για έναν ολόκληρο χρόνο μεταξύ των τριών προαναφερθέντων τρόπων ψυκτική λίπανσης [19]. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από το παραδοσιακό γαλάκτωμα και το HPJAM είναι σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με την κρυογενική ψύξη.

Η ερευνητική ομάδα του Machai [36, 41] δημοσίευσε 2 άρθρα σχετικά με την κατεργασία των κραμάτων β-τιτανίου, τα οποία είναι γνωστά ως τα πιο δύσκολα κατεργάσιμα μέταλλα από κράματα τα κράματα τιτανίου. Το υλικό που χρησιμοποίησε ήταν το Ti-10V₂Fe-3Al το οποίο προσφέρει τον καλύτερο συνδυασμό αντοχής-σκληρότητας- αντοχή σε κόπωση

μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε CNC τόρνο με κεραμικά κοπτικά εργαλεία αμφότερα επικαλυμμένα με (Ti,Al)N-TiN. Το CO₂ εφαρμόστηκε στην πρόσδεση του κοπτικού, μέσω ενός ακροφυσίου ενσωματωμένου πάνω από την κοπτική ακμή. Σύμφωνα λοιπόν με αυτά τα πειράματα, τα εργαλεία από σφυρήλατο καρβίδιο είναι αυτά που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη διάρκεια ζωής του κοπτικού τόσο στην χρήση γαλακτώματος όσο και στην κρυογενική ψύξη με χρήση CO₂ [36,41]

Στο σχήμα 5.3 φαίνονται εικόνες από μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων (SEM) της κατάστασης της κοπτικής ακμής καρβιδίου μετά από διαφορετικά μήκη κοπής. Οι εικόνες στα αριστερά αποκαλύπτουν τη φθορά μορφής αύλακος του κοπτικού κατά την τórνευση με χρήση γαλακτώματος. Στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού, τόσο για την κρυογενική ψύξη όσο και για την χρήση γαλακτώματος, το υλικό έχει παραμορφωθεί εξαιτίας δημιουργίας συγκολλητών μικροδεσμών. Ως εκ τούτου, η ψύξη του CO₂ δεν κατάφερε να διεισδύσει πλήρως στην ζώνη κοπής ώστε να καταστείλει τη χημική αντιδραστικότητα του κατεργαζόμενου μετάλλου. Όμως, η χρήση του CO₂ διατήρησε τη σκληρότητα του κοπτικού εργαλείου και μείωσε την τριβή στην επιφάνεια αποβλίττου του κοπτικού. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, η πλευρική φθορά και η εμφάνιση μικροθραύσεων στο κοπτικό, μειώθηκε σημαντικά με την χρήση του CO₂. Επιπλέον, η επικάλυψη του κοπτικού στην κύρια και στην δευτερεύουσα ελεύθερη επιφάνειά του, απομακρύνθηκε αλλά πιο αργά σε σύγκριση με αυτήν στην χρήση γαλακτώματος [36,41].

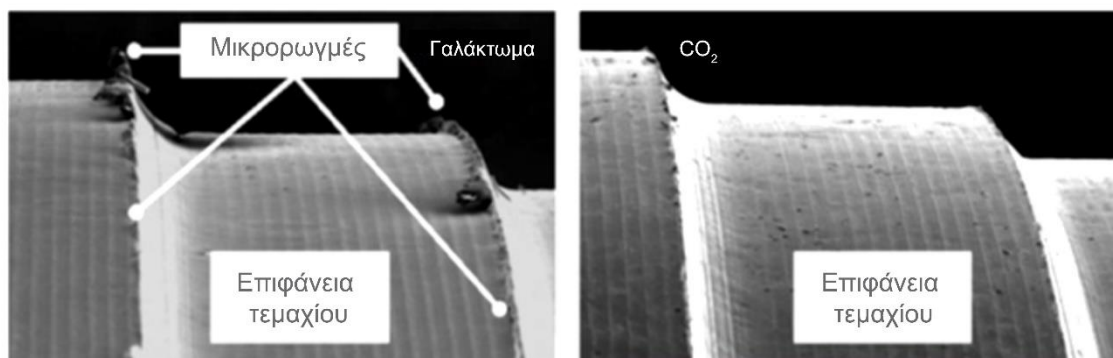


Σχήμα 5.3 : Εικόνες SEM κοπτικού με επικάλυψη για (α) χρήση γαλακτώματος με βάση το πετράιλεο και (β) χρήση CO₂ [36]

Στην κρυογενική τórνευση η διάρκεια ζωής του εργαλείου αυξήθηκε για όλα τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν σε ταχύτητα κοπής $v_c = 100\text{ m/min}$. Ειδικά τα εργαλεία με στρογγυλεμένη κοπτική ακμή επωφελήθηκαν λόγω της μείωσης της τριβής στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εξαιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της παραμόρφωσης της επιφάνειας του κατεργαζόμενου υλικού. Τα εργαλεία με επικάλυψη και με αιχμηρές κοπτικές ακμές προσέφεραν τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κοπτικού τόσο για κρυογενική ψύξη όσο και για την ψύξη με χρήση γαλακτώματος

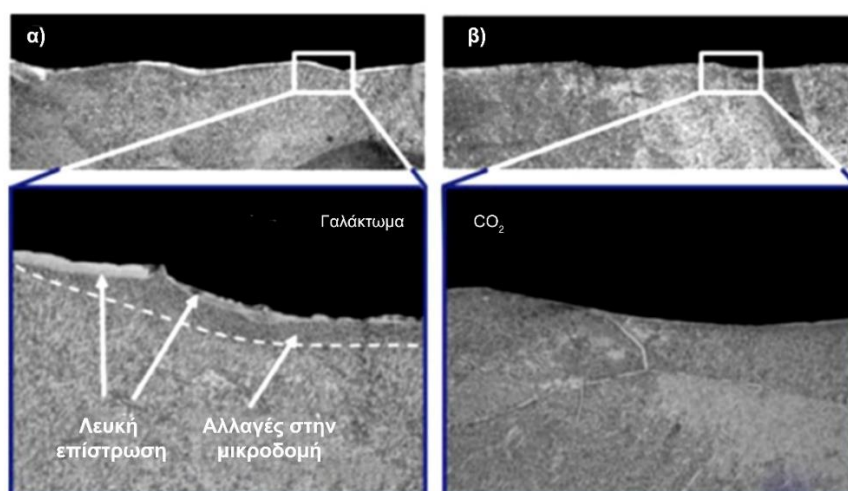
Λιγότερη λίπανση και κανονική απομάκρυνση της ψευδόκοψης θα δημιουργούσαν μικρές αυλακώσεις στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται ο σχηματισμός ρωγμών στο τεμάχιο, μετά το πέρας της κατεργασίας κοπής με ταχύτητα κοπής $v_c = 100\text{ m/min}$ και με

πρόωση $f=0.1$ mm, χρησιμοποιώντας συμβατική λίπανση με βάση το λάδι (αριστερά) και με χρήση χιονιού CO_2 (δεξιά) [36,41].



Σχήμα 5.4 : Φωτογραφίες από SEM που δείχνουν τον σχηματισμό ρωγμών για δυο διαφορετικές επιλογές ψυκτικών μέσων [36].

Η χαμηλή θερμοκρασία στο κοπτικό αλλά και στο κράμα τιτανίου στην ψύξη με CO_2 πρόσφερε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο κοπτικό και αποφευχθήκαν οι αλλαγές στην μικροδομή του μετάλλου και ο σχηματισμός της «λευκής επικάλυψης» (WHITE Layers) στο τελικό τεμάχιο [36,41]. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η σύγκριση της τórνευσης του $\text{Ti-10V}_2\text{Fe-3Al}$ με χρήση γαλακτώματος βάσης λαδιού (αριστερά) και με χρήση CO_2 (δεξιά), με ταχύτητα κοπής $v_c=125$ m/min και πρόωση $f=0.1$ mm.



1

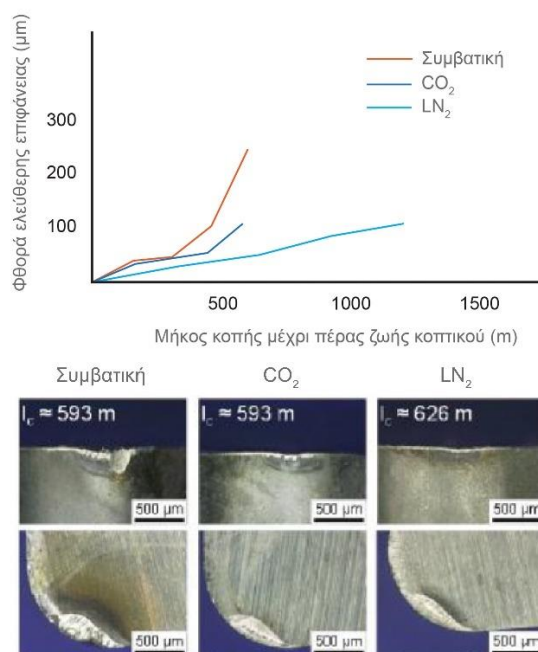
Σχήμα 5.5 : Σύγκριση σχηματισμού Λευκού Στρώματος και αλλαγών στην μικροδομή του κράματος τιτανίου στην κρυογενική και στην συμβατική ψύξη [41].

Η ομάδα του Machai [36,41] κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ζωή του κοπτικού εργαλείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες κοπής και τη μικροδομή του κατεργαζόμενου κράματος. Η θερμική μεταχείριση του τεμαχίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για την φθορά του κοπτικού, ειδικότερα για την πλευρική φθορά και την φθορά τύπου αύλακος. Σε

¹ White Layers : πρόκειται για μια αστοχία όπου λευκό στρώμα παραμορφωμένου υλικού δημιουργείται κάτω από την κατεργασμένη επιφάνεια. Ουσιαστικά κατά την κοπή υπάρχει και μια παραμόρφωση αυτής της τελικής επιφάνειας στην επιφανειακή στοιβάδα που έχει ένα χαρακτηριστικό λευκό στρώμα στα κράματα τιτανίου. Από εδώ και πέρα αυτή η αστοχία θα καλείται «Λευκή επίστρωση» [26].

ταχύτητες κοπής μεγαλύτερες των $v_c=100$ m/min, υποστηρίζουν ότι το κοπτικό φθείρεται πιο γρήγορα, εξαιτίας της ανικανότητας των ψυκτικών μέσων να διεισδύσουν αποτελεσματικά στην διεπαφή κοπτικού-αποβλίπτου-τεμαχίου. Το συμπέρασμά τους είναι, ότι η φθορά του κοπτικού που προκύπτει στις υψηλές ταχύτητες ($v_c > 100$ m/min) είναι ο κύριος λόγος που η κρυογενική ψύξη δεν έχει βρει ακόμα χρήση στην βιομηχανία παραγωγής.

Οι Klocke κ.α. [37] μελέτησαν την επίδραση της παροχής λιπαντικών υψηλής πίεσης και της κρυογενικής ψύξης χρησιμοποιώντας LN_2 και CO_2 σε εξωτερική διαμήκη τórνευση των κραμάτων τιτανίου Ti-6Al-4V και Inconel 718 με κοπτικά. Με τα αποτελέσματα της έρευνάς τους αξιολόγησαν την φθορά και θερμοκρασία του κοπτικού, την μορφή του αποβλίπτου και τις δυνάμεις κοπής. Παρατήρησαν, λοιπόν, σαφή βελτίωση στην φθορά του κοπτικού μεταξύ της συμβατικής με την κρυογενική ψύξη (Σχήμα 5.6). Όσο αφορά την πλευρική φθορά του κοπτικού η χρήση του υγρού αζώτου είναι προτιμότερη έναντι του διοξειδίου του άνθρακα, καθώς η πλευρική φθορά σχηματίζεται πιο αργά. Επιπλέον, η πλευρική φθορά του κοπτικού στην κρυογενική κατεργασία θεωρείται προβλέψιμη και πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την αντίστοιχη στην συμβατική ψύξη. Επίσης, λόγω χαμηλής θερμοκρασίας στην ζώνη κοπής στην κρυογενική ψύξη, η φθορά του κοπτικού ήταν μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη στην ψύξη υψηλής πίεσης, κάτι που είχε σαν αποτέλεσμα τον πενταπλασιασμό της ζωής του κοπτικού στην κρυογενική μέθοδο [37].

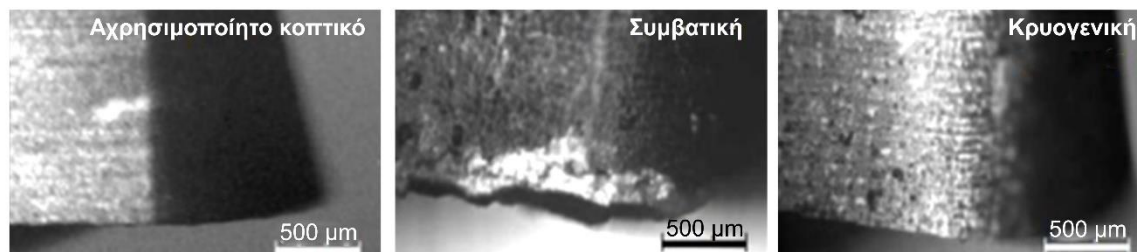


Σχήμα 5.6 : Σύγκριση πλευρικής φθοράς κοπτικού σε τórνευση Ti-6Al-4V για συμβατική και κρυογενική ψύξη, με ταχύτητα κοπής $v_c=150$ m/min, πρόωση $f=0.13$ mm και βάθος κοπής $a_p=0.3$ mm [37].

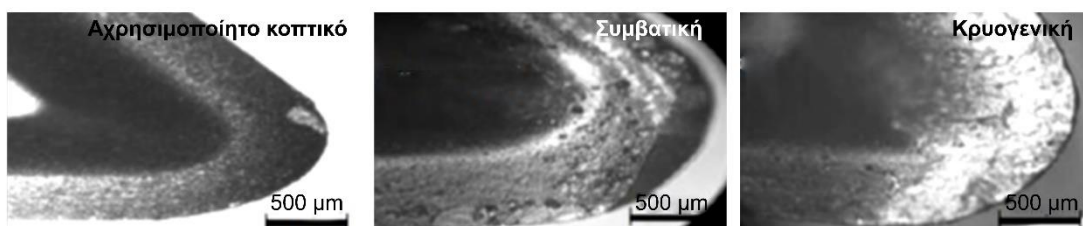
Σε πειράματα τórνευσης [38] κραμάτων τιτανίου με κοπτικά καρβιδίων με επικάλυψη Ti-Al-N δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής για την κρυογενική ψύξη και αντίστοιχα για την συμβατική λίπανση.

Η κρυογενική ψύξη έκανε τα απόβλιττα πιο εύθραυστα, να σπάνε πιο εύκολα και να απομακρύνονται πιο γρήγορα (λόγω της υψηλής πίεσης του κρυογενικού), χωρίς όμως να κάνει πιο εύθραυστο το τεμάχιο ή το κοπτικό [38]. Με τα κρυογενικά υγρά υπήρξε σχεδόν μηδενική πλευρική και φθορά κρατήρα στο κοπτικό (Σχήμα 5.7) και η επιφανειακή

τραχύτητα αποδείχθηκε ότι βελτιώνεται με υψηλότερες ταχύτητες κοπής. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η φθορά κρατήρα και η απόξεση στο κοπτικό στην συμβατική και στην κρυογενική ψύξη. Το ένθετο που χρησιμοποιήθηκε στην κρυογενική τόννευση έχει ίχνη μικροσυγκολήσεων από το υλικό του τεμαχίου στην κόψη του όπως επίσης και λευκό επίστρωμα (White Layers) όπως φαίνεται στην δεξιά εικόνα του Σχήματος 5.8 [42]. Συγκρίνοντας την συμβατική με την κρυογενική ψύξη, η πλευρική φθορά και η φθορά κρατήρα του ένθετου μειώθηκε δραματικά ενώ η επιφανειακή τραχύτητα βελτιώθηκε από $0.43 \mu\text{m}$ σε $0.13 \mu\text{m}$.



Σχήμα 5.7 : Σύγκριση πλευρικής φθοράς κοπτικού στην συμβατική ψύξη με χρήση λιπαντικού με βάση το λάδι (μεσαία) και στην κρυογενική ψύξη (δεξιά), σε τόννευση τιτανίου με ταχύτητα κοπής $v_c = 90 \text{ m/min}$ και πρόωση $f = 0.1/\text{rev}$, για 2 λεπτά [42].



Σχήμα 5.8 : Σύγκριση φθοράς κρατήρα φθοράς κοπτικού στην συμβατική ψύξη με χρήση λιπαντικού με βάση το λάδι (μεσαία) και στην κρυογενική ψύξη (δεξιά), σε τόννευση τιτανίου με ταχύτητα κοπής $v_c = 90 \text{ m/min}$ και πρόωση $f = 0.1/\text{rev}$, για 2 λεπτά [42].

Το 2007 οι Venigopal κ.α [42] δημοσίευσαν ένα άρθρο σχετικά με την τόννευση κραμάτων τιτανίου με ένθετα καρβιδίων, υπό κρυογενική ψύξη. Και στα δυο πειράματά τους το κράμα Ti-6Al-4V τόννεύτηκε σε ξηρή, υγρή και κρυογενική ψύξη. Το LN_2 χρησιμοποιήθηκε ως κρυογενικό ψυκτικό ρευστό το οποίο τροφοδοτήθηκε μέσω πιδάκων, προσκρούοντας στην κόψη του εργαλείου και στην ελεύθερη επιφάνειά του, χρησιμοποιώντας ένα ειδικά σχεδιασμένο ακροφύσιο. Παρατήρησαν ότι, η φθορά κρατήρα είχε την τάση να είναι πιο στενή από αυτήν της τόννευσης χάλυβα, ανεξάρτητα τις μεθόδου ψύξης (Σχήμα 5.9). Αυτό σημαίνει μικρή επαφή κοπτικού με απόβλιττο και όσο μικρότερη είναι η συγκεκριμένη επαφή τόσο αυξάνεται η θερμοκρασία και η φθορά μικροσυγκολήσεων και μικροθραύσεων του κοπτικού. Επιπλέον, εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιακών κλίσεων στο τέλος της φθοράς κρατήρα, παρατηρήθηκε απόξεση του αποβλίττου πάνω στο κοπτικό τόσο κατά την συμβατική όσο και για την κρυογενική ψύξη [42].



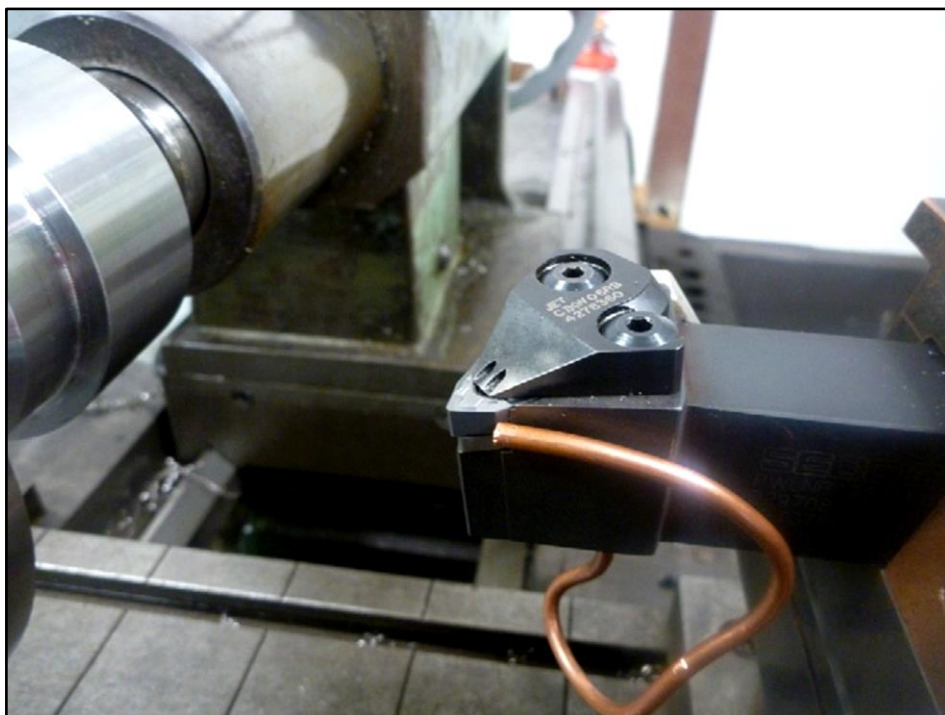
Σχήμα 5.9 : Το προφίλ του κρατήρα του κοπτικού που επεκτείνει την κοπτική ακμή κατά την κρυογενική τόννευση του κράματος Ti-6Al-4V [42].

Το 2014 οι Dhananchezian κ.α [43], πραγματοποίησαν δοκιμές τόννευσης κράματος Ti-6Al-4V με πλακίδια από καρβίδιο του βολφραμίου με επικάλυψη PVD TiAlN με υγρή και κρυογενική ψύξη. Το κρυογενικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το LN₂ με εσωτερική παροχή (βλ. Κεφ. 3.3) στοχεύοντας την διεπαφή κοπτικού-αποβλήτου, με διαφορετικές ταχύτητες κοπής και με πρόωση 0.159 mm/rev. Τα ευρήματά τους έδειξαν, ότι στην κρυογενική τόννευση, η θερμοκρασία κοπής μειώθηκε κατά 60 – 65 %, ενώ παράλληλα η δύναμη κοπής και η δύναμη πρόωσης μειώθηκαν αντιστοίχως κατά 35 % και 42% . Τέλος, παρατήρησαν ότι η επιφανειακή τραχύτητα του τελικού τεμαχίου βελτιώθηκε κατά 35 με 39 % [43].

Οι Bermingham, Kirsch, Sun και Palanisamy [40] κατεργάστηκαν με τόννευση το κράμα Ti-6Al-4V υπό κρυογενική ψύξη με LN₂ και υπό ξηρή κατεργασία. Η ταχύτητα κοπής ήταν σταθερή για όλες τις δοκιμές με τιμή $v_c = 125$ mm/min αλλά με διαφορετική πρόωση και βάθος κοπής για κάθε δοκιμή με διάρκεια 9 min. Στον πίνακα 5.1 φαίνονται οι διαφορετικές παράμετροι κοπής που δοκιμάστηκαν. Το κρυογενικό διανεμήθηκε στην ζώνη κοπής μέσω ακροφυσίου στην πρόσδεση του κοπτικού (εσωτερική ψύξη) και κατέληγε απευθείας πάνω από την κόψη και απευθείας πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια (Σχήμα 5.10) [40].

Ταχύτητα κοπής V_c (m/min)	Πρόωση f (mm/rev)	Βάθος κοπής, a_p	Όγκος ανά χρόνο (cm ³ /min)
125	0.36	1.1	48.61
125	0.20	2.0	48.53
125	0.15	2.7	48.69

Πίνακας 5.1 : Παράμετροι κοπής.



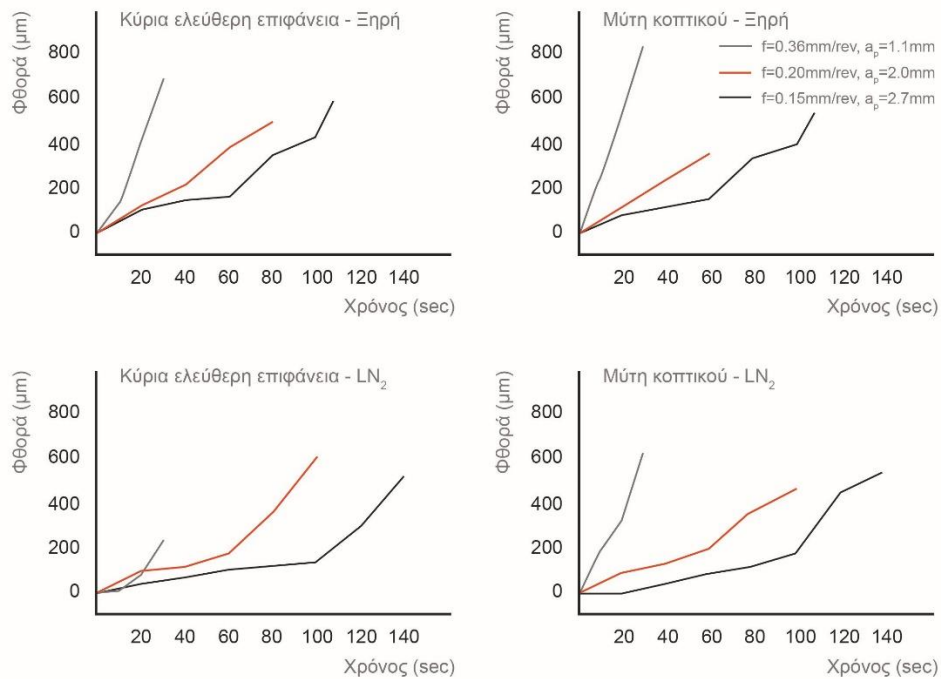
Σχήμα 5.10 : Εσωτερική διανομή του υγρού άζωτο απευθείας στην ζώνη κοπής.

Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι αποτυχίες του κοπτικού εργαλείου και η σαφής βελτίωση στον χρόνο ζωής του κοπτικού με κρυογενική ψύξη [40].

Κατάσταση	Χρόνος Ζωής Κοπτικού				Βελτίωση (%)
	Ξηρή	Τόπος Αποτυχίας	LN ₂	Τόπος Αποτυχίας	
f=0.36 mm/rev, a _p =1.1	12	Μύτη	19	Μύτη	58
f=0.20 mm/rev, a _p =2.0	51	Πρωτοβάθμια Ελεύθερη επιφάνεια	73	Μύτη	43
f=0.15 mm/rev, a _p =2.7	75	Πρωτοβάθμια Ελεύθερη επιφάνεια	108	Μύτη	44

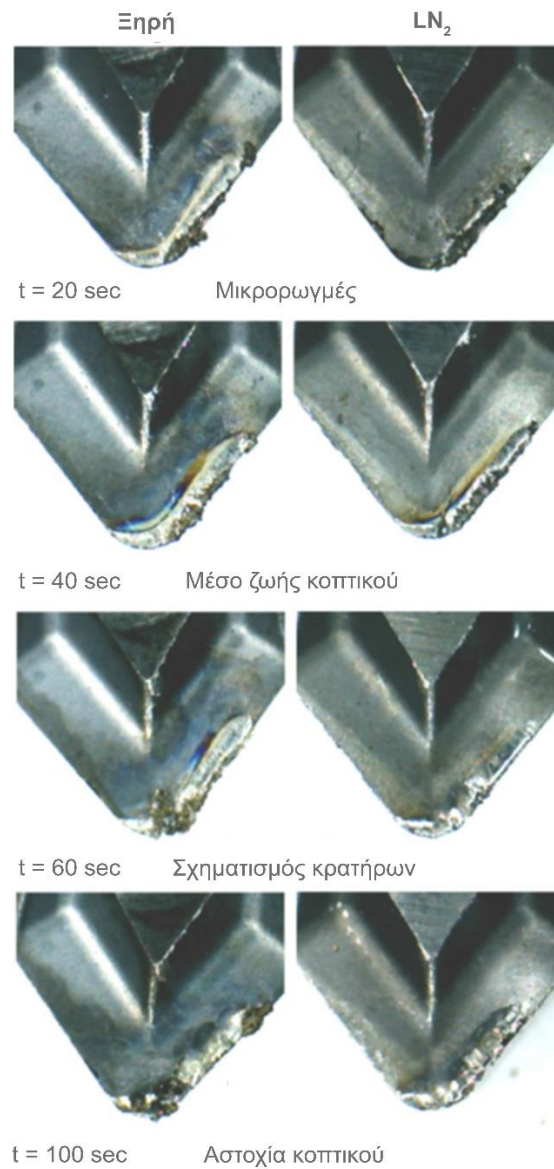
Πίνακας 5.2 : Χρόνος ζωής κοπτικού για κάθε είδος ψύξης.

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η μέση φθορά στην πρωτοβάθμια ελεύθερη επιφάνεια και η φθορά κόψης κατά την διάρκεια ξηρής και κρυογενικής κατεργασίας. Είναι ξεκάθαρο ότι η φθορά κόψης και ελεύθερης επιφάνειας μειώνεται σημαντικά με την χρήση υγρού άζωτου [40].



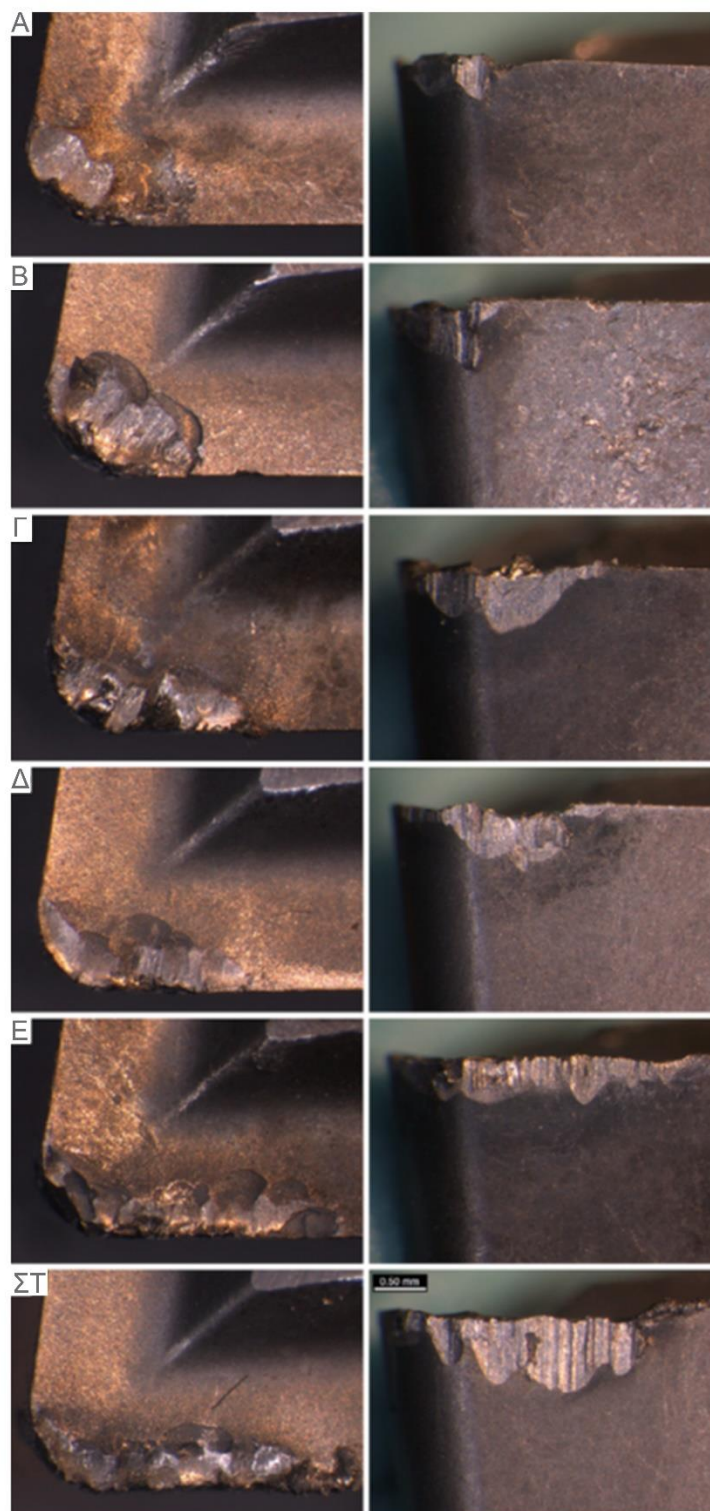
Σχήμα 5.11 : Πλευρική και φθορά κόψης κατά την ξηρή και κρυογενική κατεργασία.

Στο Σχήμα 5.12 [40] φαίνεται η εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού σε συνάρτηση με τον χρόνο και ο σχηματισμός φθοράς κόψης και κρατήρα κατά την διάρκεια ξηρής και κρυογενικής κατεργασίας. Παρατηρούμε ότι στο ίδιο χρονικό διάστημα υπάρχει πιο αργή φθορά του κοπτικού στην κρυογενική τόνρευση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κοπτικό εργαλείο αποτυγχάνει πλήρως από την στιγμή που αρχίζει να σχηματίζεται ο κρατήρας. Η ταχύτητα πρόωσης ήταν $f=0.15\text{ mm/rev}$ και το βάθος κοπής $a_p=2.7\text{ mm}$.



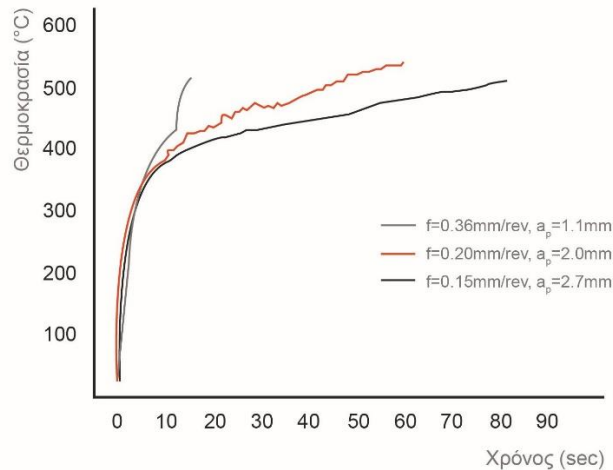
Σχήμα 5.12 : Εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού.

Στο Σχήμα 5.13 [40] φαίνεται η φθορά του κοπτικού μετά το πέρας των δοκιμών για κάθε είδος ψύξης. Βέβαια, η φωτογραφίες του κοπτικού είναι αφού έχει τον χρόνο ζωής του, σύμφωνα με το ISO3685 για φθορά ελεύθερης επιφάνειας στο 300 μm και αφού έχει σχηματιστεί μεγάλη φθορά κρατήρα, αύλακος, ελεύθερης επιφάνειας και απολέπισης (λόγω ροής αποβλίττου).

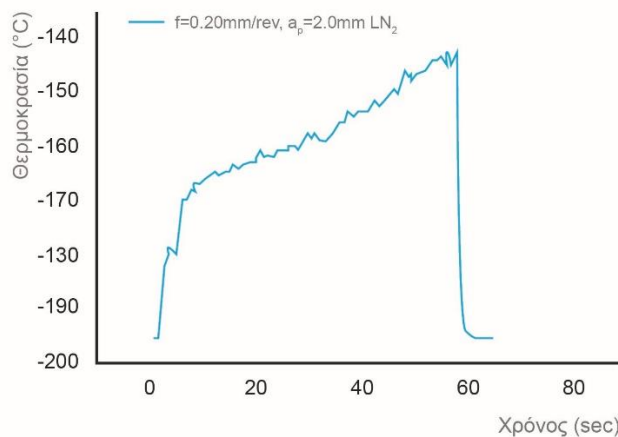


Σχήμα 5.13 : Οι εικόνες Α,Γ,Ε αντιστοιχούν σε ξηρή κατεργασία και οι εικόνες Β,Δ,ΣΤ αντιστοιχούν στην κρυογενική με χρήση αζώτου. Οι παράμετροι κοπής βρίσκονται στον Πίνακα 5.1.

Στο Σχήμα 5.14 και στο Σχήμα 5.15, φαίνεται η θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου στην ξηρή και στην κρυογενική κατεργασία αντίστοιχα [40].



Σχήμα 5.14 : Θερμοκρασία κοπτικού εργαλείου στην ξηρή κατεργασία για κάθε από τις 3 παραμέτρους.



Σχήμα 5.15 :Θερμοκρασία του κοπτικού στην κρυογενική ψύξη, με θερμοκρασία έναρξης – 196°C, μέγιστη θερμοκρασία κοπής στους -145°C και θερμοκρασίας λήξης -196°C.

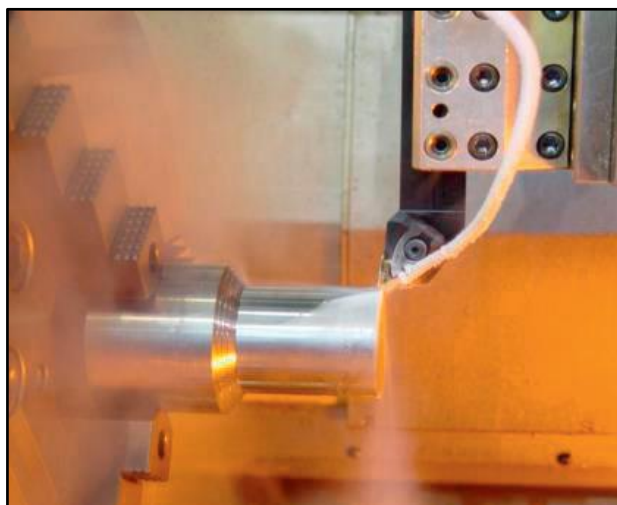
Με τα αποτελέσματα των δοκιμών τους κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η κρυογενική ψύξη συμβάλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου μέχρι και 6 φορές, με πιο σημαντικό παράγοντα την πρόωση, η οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του κοπτικού.

Η επαφή κοπτικού – αποβλίπτου (tool-chip contact length) μειώθηκε, κάτι που συνεπάγεται την μείωση της θερμότητας που παράγεται λόγω τριβών. Στις ταχύτητες κοπής που εξετάστηκαν η ελαχιστοποίηση της παραγωγής θερμότητας είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας στην αύξηση του χρόνου ζωής του εργαλείου. Το κρυογενικό μέσο και ο τρόπος διανομής του συνέβαλαν στην πιο εύκολη μηχανική απομάκρυνση του αποβλίπτου από το κοπτικό. Τέλος η παροχή του κρυογενικού και στην γωνία του αποβλίπτου και στην ελεύθερη επιφάνεια συνέβαλε στην μείωση των δυνάμεων κοπής, όμως οι θλιπτικές δυνάμεις αυξήθηκαν και η δύναμη πρόωσης παρέμειναν ίδιες [40].

Οι Stoll, Werthheim, Busch κ.α (2015) κατεργάστηκαν με τόννευση κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V χρησιμοποιώντας ένθετα καρβιδίων με επικάλυψη [18]. Ο σκοπός της έρευνάς τους ήταν να εντοπίσουν τον καλύτερο συνδυασμό ταχυτήτων κοπής με ψυκτικό μέσο, ενώ άλλοι παράμετροι της τόννευσης παρέμειναν σταθεροί. Οι τρόποι ψύξης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κρυογενικό μέσο CO₂, υψηλής πίεσης στο στόμιο του φυσητήρα, και αερόλυμα ξηρής λίπανσης σε συνδυασμό με διοξείδιο του άνθρακα. Τα ακροφύσια παροχής ψυκτικού και στους δυο τρόπους ψύξης προσαρμόστηκαν στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού [18].

Λόγω των διαφορετικών τρόπων ψύξης, τα αποτελέσματά τους δεν ήταν ξεκάθαρα, με αρκετά πλεονεκτήματα σε κάθε τρόπο ψύξης. Πάντως για το συγκεκριμένο κράμα τιτανίου ο συνδυασμός αερολύματος και διοξειδίου του άνθρακα μείωσε τον χρόνο ζωής του κοπτικού. Τα εργαλεία απέτυχαν εξαιτίας της αποκοπής και της φθοράς της κοπτικής ακμής, με εντονότερη την φθορά κρατήρα στο κοπτικό [18].

Το 2018 οι Damir, Sadek και Attic [44] δημοσιεύσαν πείραμα τόννευσης που πραγματοποίησαν στο κράμα Ti-6Al-4V σε τόρνο CNC 6 αξόνων Beohringen NG200. Στα πειράματά τους επικεντρώθηκαν στην μελέτη των δυνάμεων κοπής, ποιότητα τελικής επιφάνειας, φθορά κοπτικού και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κρυογενικής κατεργασίας. Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν για την κρυογενική ψύξη LN₂ και για την συμβατική ψύξη γαλάκτωμα πλημμύρας (5% πετρέλαιο-95% νερό) [44]. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε είδος ψύξης [44]. Η παροχή του κρυογενικού μέσου έγινε με ακροφύσιο στην ζώνη κοπής (εξωτερική ψύξη) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16 .



Σχήμα 5.16 : Εξωτερική ψύξη του κράματος τιτανίου [44].

Παράμετροι Κοπής	Τιμές Παραμέτρων
Μέθοδος ψύξης	LN ₂ : 1 lt/min
	Oil-based : 6 lt/min
Ταχύτητα κοπής v_c	100, 120, 150 m/min
Πρόωση f	0.1, 0.2 mm/rev

Πίνακας 5.3 : Παράμετροι κατεργασίας στο κράμα τιτανίου [44].

Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε κατά την τόννευση ήταν καρβίδιο με επικάλυψη CVD (κεραμική επικάλυψη). Η παροχή του κρυογενικού αζώτου έγινε με εξωτερική διανομή απευθείας στη ζώνη κοπής [44].

Η δύναμη κοπής κατά την κρυογενική ήταν μικρότερη στην χαμηλή ταχύτητα κοπής και πρόωση, όπως και η δύναμη πρόωσης και η αξονική δύναμη. Στις υψηλές ταχύτητες κοπής βρέθηκαν μειωμένες δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με την συμβατική ψύξη. Η κύρια δύναμη κοπής βρέθηκε μικρότερη κατά 10-15 % στην κρυογενική, ενώ η αξονική μειώθηκε κατά 30-40 % . Για βάθος κοπής 0.6 mm παρατήρησαν μείωση κατά 13 % της κύριας δύναμης κοπής και κατά 35 % της αξονικής. Για βάθος κοπής 1 mm υπήρξε μείωση κατά 44 % της κύριας δύναμης σε συνθήκες δύσκολης κοπής [44].

Επιπλέον, παρατήρησαν καλύτερη τελική επιφάνεια στην κρυογενική ψύξη έναντι της συμβατικής, ειδικότερα σε συνθήκες δύσκολης κοπής υπήρξε μείωση μέχρι και 19 % της τραχύτητας R_a μm . Συμπεράναν ότι η μείωση της τραχύτητας στην κρυογενική οφείλεται στην υψηλή ικανότητα της κρυογενικής για ψύξη και αποβολή θερμότητας [44].

5.2.2 Κράματα βολφραμίου

Τα κράματα βολφραμίου ανήκουν στα υπέρσκληρα υλικά που αντέχουν ακραίες συνθήκες και θερμοκρασίες λειτουργίας. Τα κράματα βολφραμίου χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική, στις αμυντικές εφαρμογές, στα διαστημικά οχήματα και στην αυτοκινητοβιομηχανία εξαιτίας της σχέσης φυσικομηχανικές ιδιότητες – κόστος. Είναι από το πιο επιφανή από τα υπερκράματα εξαιτίας της υψηλής αντίστασής του στην φθορά, την μεγάλη αντοχή του στις υψηλές θερμοκρασίες (λόγω πυκνότητας) και στο υψηλό σημείο τήξης του βολφραμίου [45].

Το 2014 οι Nandan, Rarikiran και Rao κατεργάστηκαν σε τόννευση βαρύ κράμα βολφραμίου υπό κρυογενικές συνθήκες [45]. Χρησιμοποίησαν 3 διαφορετικά βαρία κράματα βολφραμίου : 95%, 93 %, 90%, αφού πρώτα διαμορφώθηκαν κατάλληλα. Στην αρχή τα κράματα κονιορτοποιήθηκαν σε μεταλλουργική σκόνη, χυτεύτηκαν, συμπίεστηκαν σε κυλινδρικές ράβδους 50 mm και έπειτα προ-πυροσυσσωματώθηκαν (pre-sintering) για 2 ώρες στους 900 °C και έπειτα πυροσυσσωματώθηκαν για άλλες 2 ώρες στους 1460 °C σε ατμόσφαιρα υδρογόνου [45].

Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές ήταν επιχαλκομένο καρβίδιο χωρίς επικάλυψη ISO 6 R 2525 (uncoated solid carbide brazed tipped tool). Για την συμβατική κατεργασία χρησιμοποιήθηκε ως ψυκτικό μέσο γαλάκτωμα 95% νερού και 5% πετρελαίου με παροχή 6lt/min. Για την κρυογενική ψύξη επιλέχθηκε το LN_2 με παροχή του μέσου απευθείας στην ζώνη κοπής με ακροφύσιο και ρυθμό 2lt/min. Επιπλέον, το υγρό άζωτο ήταν αποθηκευμένο σε φιάλη χωρητικότητας 25 λίτρων με μόνωση από πολυμερές [45].

Οι παράμετροι κοπής που επιλέχθηκαν για την τόννευση σε δύσκολες συνθήκες ήταν $v_c=105$ m/min, $f=0.05$ mm/rev, $a_p=0.3$ mm [45].

Στον Πίνακα 5.4 που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών τους σχετικά με την κύρια δύναμη κοπής, τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού και την επιφανειακή τραχύτητα για κάθε μέθοδο ψύξης που επιλέχθηκε και για τα 3 κράματα που κατεργάστηκαν[45].

Δείγμα	Ρυθμός Αφαίρεσης Υλικού (gm/sec)	Κύρια Δύναμη Κοπής (N)	Επιφανειακή Τραχύτητα (Ra μ m)
Συμβατική ψύξη (oil – based emulsion)			
Κράμα 1	43.27	90.45	1.491
Κράμα 2	45.18	80.29	1.124
Κράμα 3	40.55	91.45	1.36
Ψύξη με LN ₂			
Κράμα 1	128	59.53	1.251
Κράμα 2	120	71.02	1.071
Κράμα 3	108	60.71	1.091

Πίνακας 5.4 : Καταγραφή αποτελεσμάτων δοκιμών σε τόννευση σκληρού κράματος βολφραμίου με συμβατική και κρυογενική ψύξη.

Σύμφωνα λοιπόν με τον παραπάνω πίνακα κατέληξαν στα συμπεράσματά τους ότι στην κρυογενική ψύξη υπάρχουν χαμηλότερες διατμητικές τάσεις στο απόβλιττο, γεγονός που βελτιώνει την μορφή του αποβλίττου και μειώνει τον συντελεστή της τριβής, στην συμβατική το απόβλιττο ήταν ασυνεχές και μικροσκοπικό. Δεν εντόπισαν αλλαγές στην μικροδομή του κατεργασμένου τεμαχίου [45].

Επιπλέον, το LN₂ επηρέασε ευεργετικά το κοπτικό εργαλείο, αφού το προστάτευσε από παραμορφώσεις, φθορά, παραμόρφωση στην επιφάνεια κοπτικού-αποβλίττου και συνέβαλε στην μείωση των τριβών. Στην κρυογενική και για τα 3 δείγματα υπήρξε μεγαλύτερος ρυθμός αφαίρεσης υλικού εξαιτίας της καλύτερης σχηματοποίησης του αποβλίττου, γεγονός που σημαίνει αύξηση της παραγωγικότητας της κοπής. Εξαιτίας της μικρότερης φθοράς της κοπτικής ακμής στην κρυογενική ψύξη, το κατεργασμένο δείγμα είχε καλύτερη επιφάνεια (και στα 3 δείγματα , στην κρυογενική μειώθηκε η τραχύτητα) [45].

Τέλος, στην κρυογενική κατέγραψαν μικρότερες κύριες δυνάμεις κοπής (και ακτινικές και πρόωσης) εξαιτίας της μείωσης των τριβών μεταξύ τεμαχίου- κοπτικού και μεταξύ κοπτικού-αποβλίττου. Οι μειωμένες δυνάμεις κοπής στην κρυογενική οδηγούν σε καλύτερη απόδοση του κοπτικού και σε αύξηση του χρόνου ζωής του καθώς και σε μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας [45]. Συμπερασματικά, μετά τις δοκιμές τους κατέληξαν ότι η κατεργασία βαρέως κράματος βολφραμίου με χρήση LN₂ αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή κατεργασίας με πολύ καλά αποτελέσματα [45].

Ο Pusavec [46] το 2012 έκανε πειράματα ώστε να μελετήσει την κατεργασιμότητα του πορώδους βολφραμίου (porous tungsten). Οι πόροι της επιφάνειας είναι ένα σημαντικό

χαρακτηριστικό του βολφραμίου, αλλά συχνά κατά τις κατεργασίες εμφανίζονται επιχρίσματα στην επιφάνεια προκαλώντας την μείωση ή την εξαφάνιση των πόρων. Η σύνηθης λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση διηθητήρων (συνήθως πλαστικοί) κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Όμως, οι διηθητήρες δεν είναι φιλικόι προς το περιβάλλον επειδή συνήθως αποτελούνται από πλαστικό ή πολυμερές [46].

Κατά την μελέτη του, συγκρίθηκαν εργαλεία καρβιδίου, κεραμικά, διαμάντι και CBN για να βρεθούν οι καλύτερες συνθήκες κοπής και να βελτιωθούν οι πόροι στην επιφάνεια. Ο αριθμός των πόρων, το μέγεθος των πόρων, η τραχύτητα της επιφάνειας και η φθορά του κοπτικού μετρήθηκαν και αναλύθηκαν [46].

Αμφότεροι και οι δυο τρόποι ψύξης (κρυογενική και συμβατική με χρήση διηθητήρων) εφαρμόστηκαν με ίδιες παραμέτρους, αλλά ο συμβατικός με χρήση πλαστικού διηθητήρα υπερτέρησε. Αντίθετα, η κρυογενική υπερτέρησε στην βιωσιμότητα και στην συμπεριφορά απέναντι στο περιβάλλον [46].

Τα PCD κοπτικά εργαλεία παρήγαγαν εξαρτήματα με αρκετά καλή πορώδη επιφάνεια και μικρότερη φθορά (στα κοπτικά) σε σύγκριση με τα υπόλοιπα εργαλεία. Η κρυογενική κατεργασία του πορώδους βολφραμίου είναι η πρώτη εναλλακτική μέθοδος κατεργασίας πορώδους βολφραμίου με ικανοποιητικά αποτελέσματα (σύμφωνα με τα βιομηχανικά πρότυπα παραγωγής) έναντι της χρήσης πλαστικών διηθητήρων [46].

Η χρήση της κρυογενικής μπορεί να οδηγήσει σε κατεργασίες τέτοιων υλικών φιλικότερες προς το περιβάλλον, με μειωμένο κόστος, με μειωμένη κατανάλωση ενέργεια, μειωμένο απόβλητο και ασφαλέστερες προς το προσωπικό. Τέλος, λόγω σπανιότητας τέτοιων ερευνών θεωρείται από την επιστημονική κοινότητα, ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των αποτελεσμάτων [46].

5.2.3 Κράματα νικελίου

Το 2015 οι Stoll, Busch, Pause et al [18]. δημοσίευσαν πειράματα που έκαναν στο κράμα νικελίου Inconel 718. Τα κράματα νικελίου έχουν ευρεία χρήση στην αεροδιαστημική, στις πετρελαιοβιομηχανίες, στα ιατρικά εξαρτήματα κ.α., εξαιτίας των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων όπως υψηλή αντοχή, σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλη αντοχή στην διάβρωση [18]. Τα κράματα νικελίου αντέχουν σε θερμοκρασία λειτουργίας μέχρι και τους 730 °C, και έχουν υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και υψηλά όρια εφελκυσμού [18].

Οι δοκιμές τους έγιναν στον τόρνο N20 (NILES-Simmons) με κοπτικό εργαλείο καρβιδίου με επικάλυψη. Δοκίμασαν διαφορετικούς τρόπους ψύξης της ζώνης κοπής με διαφορετικές ταχύτητες κοπής, ενώ οι υπόλοιποι παράμετροι κοπής έμειναν σταθεροί. Ως ψυκτικά χρησιμοποίησαν, α. ψυκτικό υψηλής πίεσης (ADL + CO) με πίδακα μέσω κοπτικού στην επιφάνεια αποβλίττου, β. CO₂ σκέτο μέσω του κοπτικού στην επιφάνεια αποβλίττου και γ. ξηρή ψύξη σε συνδυασμό με CO₂ με εξωτερικό ακροφύσιο στην ζώνη κοπής.

Οι ταχύτητες κοπής που χρησιμοποίησαν ήταν $v_c = 50$ και 75 m/min, πρόωση $f = 0.1$ mm/rev και βάθος κοπής $a_p = 1.5$ mm.

Στα αποτελέσματά τους καταγράφουν ότι στις υψηλές ταχύτητες κοπής είτε στην κρυογενική ψύξη είτε στην ψύξη υψηλής πίεσης, η διάρκεια ζωής του κοπτικού μειώθηκε κατά 60%. Βάση των αποτελεσμάτων τους κατέληξαν ότι υψηλότερη διάρκεια ζωής κοπτικού επετεύχθη με την ψύξη υψηλής πίεσης. Η χρήση του CO₂ οδήγησε σε μείωση της

θερμοκρασίας κοπής στους -246°C (27 K) και παρήγαγε τεμάχια με πολύ καλή συνοχή επιφάνειας [18].

Το 2019 οι Chetan, Rao, Ghosh [47] πραγματοποίησαν δοκιμές τórνευσης του κράματος νικελίου Nimonic 90 με δύο διαφορετικούς τρόπους ψύξης. Για την κρυογενική ψύξη χρησιμοποίησαν LN_2 και για την συμβατική ψύξη χρησιμοποίησαν την μέθοδο MQL με βάση νανοσωματίδια Al_2O_3 (nMQL). Τα κοπτικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πλακίδια από καρβίδιο του βολφραμίου με επικάλυψη AlTiN και βυθίστηκαν σε βαθύ κρυογενικό κύκλο στους -196°C για 12 ώρες και έπειτα σε κύκλος σκλήρυνσης για 2 ώρες (σε κρυογενικό επεξεργαστή CP220LH) [47].

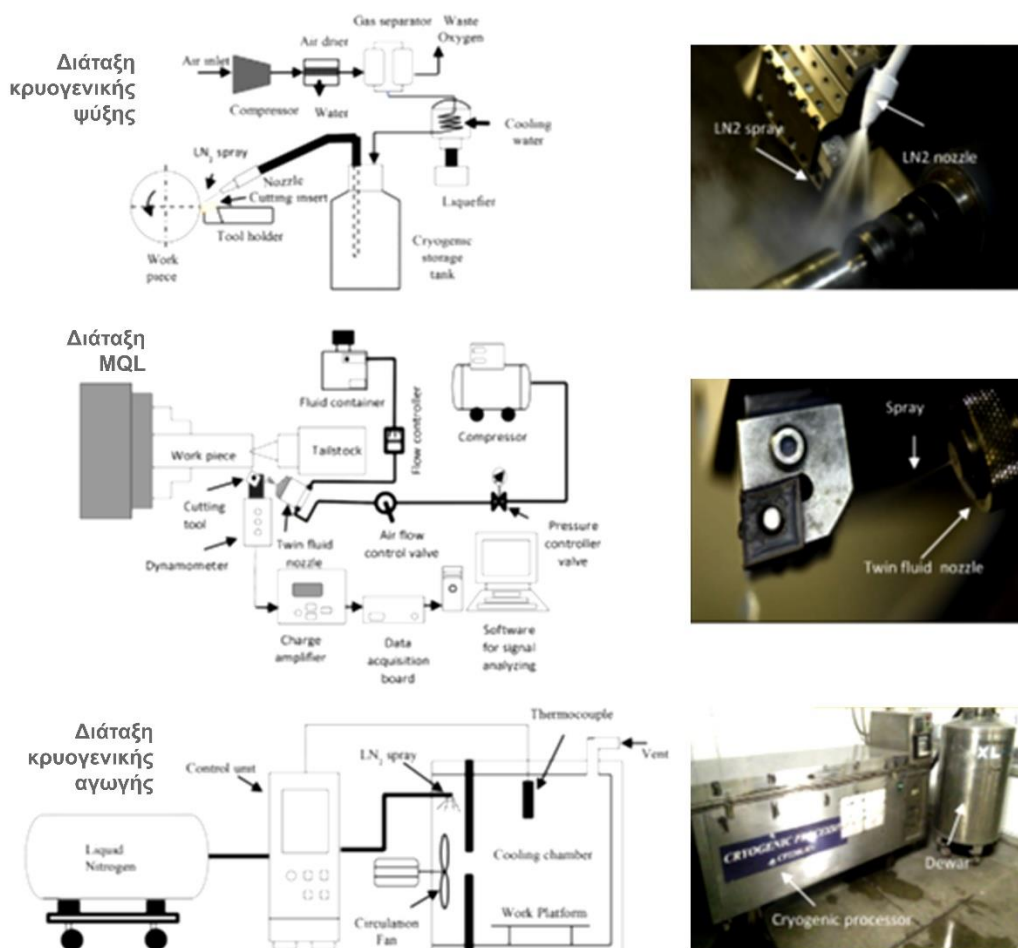
Το συμβατικό υγρό ψύξης nMQL αναμίχθηκε με νερό και διανεμήθηκε στην ζώνη κοπής με ακροφύσιο με ρυθμό 125 ml/h και πίεση 4 bar. Το LN_2 διανεμήθηκε στην ζώνη κοπής ακριβώς πάνω από την επιφάνεια αποβλίπτου του κοπτικού με εξωτερικό ακροφύσιο. Ο τρίτος τρόπος ψύξης, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω ήταν η βύθιση του κοπτικού σε κρυογενικό.

Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται η διάταξη και η εγκατάσταση της εργαλειομηχανής με τα υπόλοιπα μέρη των πειραμάτων [47].

Διενεργήθηκαν συνολικά 18 δοκιμές τórνευσης για κάθε περιβάλλον ψύξης. Στον Πίνακα 5.5 καταγράφονται οι παράμετροι κοπής για τις τórνευσεις και για τις δύο μεθόδους ψύξης [47].

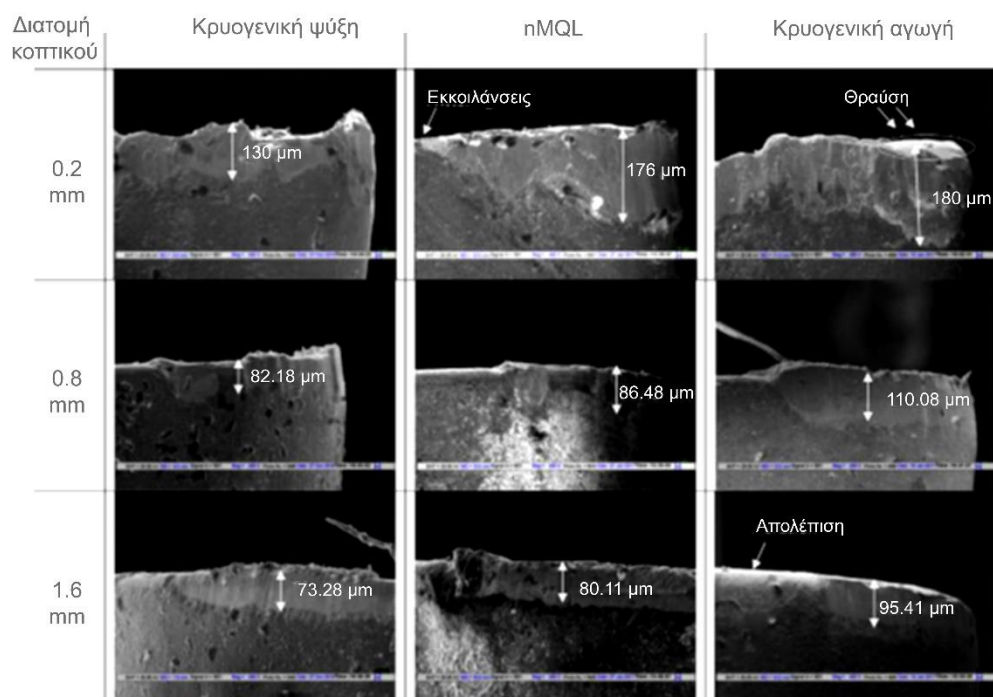
Ταχύτητα Κοπής v_c (m/min)	Πρόωση f (mm/rev)	Ακτίνα μύτης r_r (mm)	Βάθος κοπής a_p (mm)
20	0.04	0.2	0.5
40	0.08	0.4	0.5
60	0.12	0.8	0.5
80	0.16	1.2	0.5
100	0.2	1.6	0.5

Πίνακας 5.5 : Παράμετροι κοπής για το κράμα Nimonic 90.

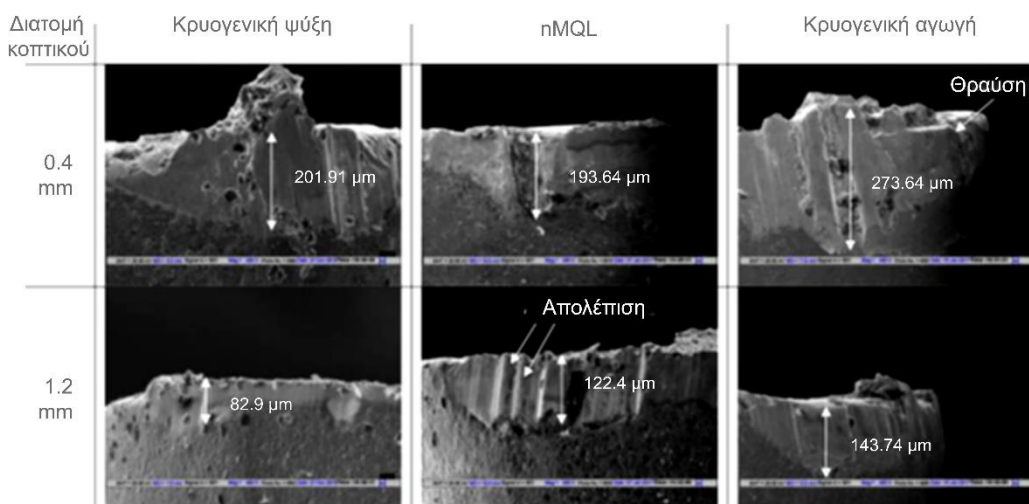


Σχήμα 5.17 : Διάταξη πειραμάτων για κρυογενική ψύξη, ψύξη με nMQL και κρυογενικό επεξεργαστή.

Στα σχήματα : Σχήμα 5.18 , Σχήμα 5.19 φαίνονται εικόνες από το μικροσκόπιο που αφορούν τις φθορές των κοπτικών σε κάθε περιβάλλον ψύξης και για κάθε παράμετρο κοπής [47]. Όσο αφορά τις φθορές αύλακος, φθορές ελεύθερης επιφάνειας, φθορές ρωγμών και διάβρωση του κοπτικού παρατηρείται καλύτερη επίδοση της απευθείας κρυογενικής ψύξης στην ζώνη κοπής [47]. Ειδικότερα, για υψηλότερες ταχύτητες κοπής και μεγαλύτερες ακτίνες του κοπτικού η κρυογενική ψύξη στην ζώνη κοπής είχε τα καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με τις φθορές των κοπτικών.



Σχήμα 5.18 : Εικόνες SEM για φθορά κοπτικού με ταχύτητα κοπής 60 m/min και πρόωση 0.12 mm/rev.



Σχήμα 5.19 : Εικόνες SEM για τις φθορές κοπτικού στις υψηλές ταχύτητες και πρόωση.

Τα συμπεράσματα σχετικά με την κατεργασία κραμάτων νικελίου συμπυκνώνονται παρακάτω :

- Η παράμετρος με την μεγαλύτερη επιρροή στην αύξηση της κύριας δύναμης κοπής ήταν η πρόωση.
- Σε υψηλές ταχύτητες κοπής, για μείωση της κύριας δύναμης κοπής, η καλύτερη μέθοδος ψύξης αποδείχθηκε η nMQL.
- Η χρήση μεγαλύτερων ακτίνων μύτης κοπτικού μειώνει σημαντικά την φθορά στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού και στις τρεις μεθόδους.
- Το υγρό άζωτο μείωσε την φθορά μορφής αύλακος και τις ρωγμές στις υψηλές ταχύτητες κοπής.

- Το υγρό άζωτο μειώνει την τριβή και αυτό οδηγεί σε ομαλοποίηση και καλύτερη σχηματοποίηση του αποβλίπτου.

Μετά το πέρας των δοκιμών τους κατέληξαν ότι η ψύξη με κρυογενικό άζωτο στην ζώνη κοπής προσφέρει το καλύτερο περιβάλλον για τόννευσεις κραμάτων νικελίου.

Τον Απρίλιο του 2019, ο C.V. Yildirim, πραγματοποίησε πειράματα τόννευσης του υπερκράματος Inconel 625 [48]. Για τα 16 διαφορετικά πειράματά του, χρησιμοποίησε κεραμικό κοπτικό με επικάλυψη PVD, και αρκετές διαφορετικές μεθόδους ψύξης. Ανάμεσα, στις μεθόδους ψύξης που χρησιμοποίησε ήταν οι : ξηρή, MQL, κρυογενική με LN₂, hMQL με Al₂O₃, hBN (εξαγωγικό νιτρίδιο του βορίου) και συνδυασμούς αυτών των ψυκτικών.

Εξετάστηκαν η θερμοκρασία κοπτικού-αποβλίπτου, η φθορά του κοπτικού και η τραχύτητα της τελικής επιφάνειας. Με τα αποτελέσματά του κατέληξε ότι ο συνδυασμός 0.5%κ.ο hBN με LN₂ έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με την τελική επιφάνεια και με την φθορά εργαλείων. Σχετικά με την θερμοκρασία κοπτικού – αποβλίπτου αναφέρει ότι τα καλύτερα αποτελέσματα παρείχε η χρήση σκέτου υγρού αζώτου στην ζώνη κοπής [48].

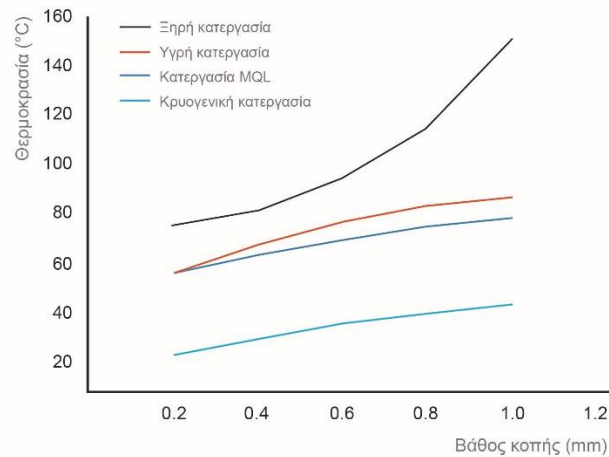
5.2.4 Χάλυβες

Ο ανοξειδωτος χάλυβας 17-4 PH ανήκει στους χάλυβες με την μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση και υψηλή αντοχή υλικού, λόγω χημικής του σύστασης (17% Cr, 4% Ni) [49]. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει ευρεία χρήση στην αεροδιαστημική, στην πυρηνική βιομηχανία καθώς και σε ενάλιες εφαρμογές. Ο σύνηθες τρόπος κατεργασίας του 17-4 PH ήταν σε ξηρή κατεργασία με χρήση πεπιεσμένου αέρα [49], γεγονός όμως που οδηγούσε σε χαμηλή ποιότητα τελικής επιφάνειας και σε πολύ υψηλό κόστος κατεργασίας [49].

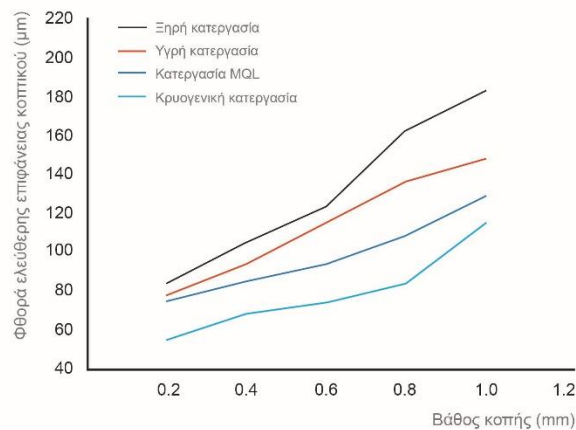
Το 2018 δημοσιεύτηκε έρευνα από τους Sivaih και Chakrdhar [49] που αφορούσε δοκιμές τόννευσης του ανοξειδωτου χάλυβα 17-4 PH. Ο τόρνος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο “KIRLOS-KAR” και δοκιμάστηκαν τέσσερις διαφορετικές τρόποι ψύξης : α. κρυογενική, β. υγρή με χρήση γαλακτώματος (5% πετρέλαιο, 95 % νερό), γ. ξηρή (χωρίς ψυκτικό) και δ. MQL. Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν πλακίδια από καρβίδιο του βολφραμίου

Οι παράμετροι κοπής που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές τους ήταν : ταχύτητα κοπής $v_c=78.5$ m/min, πρόωση $f=0.143$ mm/rev, βάθος κοπής $a_p= 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ mm, γωνία σφήνα = 75° και γωνία αποβλίπτου -6°. Το LN₂ διανεμήθηκε μέσω εξωτερικού ακροφυσίου με $d=1$ mm, υπό πίεση 4 bar και ρυθμό παροχής 0.45 kg/min. Η MQL διανεμήθηκε στην ζώνη κοπής και αυτή με χρήση εξωτερικού ακροφυσίου με $d= 10$ mm, με πίεση 4 bar και ρυθμό παροχής 70 ml/h ενώ το γαλάκτωμα με ρυθμό παροχής 6 lt/min.

Στο Σχήμα 5.20 και στο Σχήμα 5.21 φαίνονται τα διαγράμματα της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος κοπής και η φθορά ελεύθερης επιφάνειας σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για κάθε εναλλακτική μέθοδο ψύξης που δοκιμάστηκε.

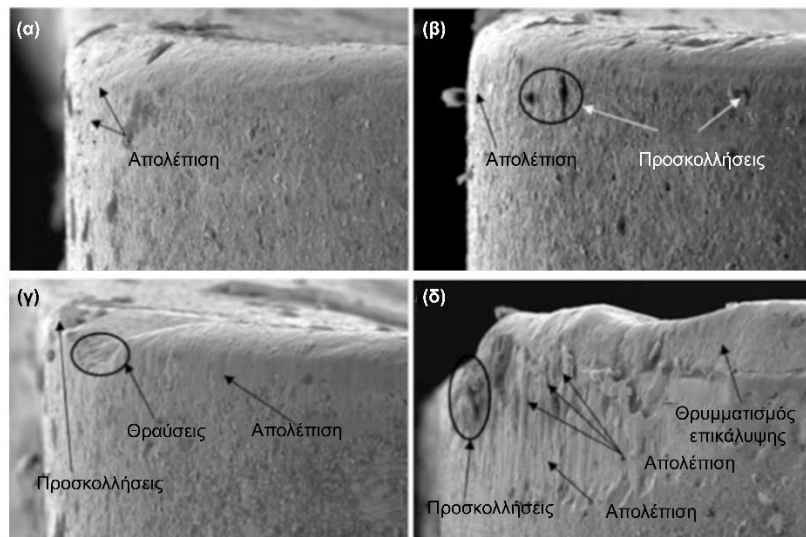


Σχήμα 5.20 : Θερμοκρασία στην ζώνη κοπής σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για κάθε μέθοδο ψύξης [49].



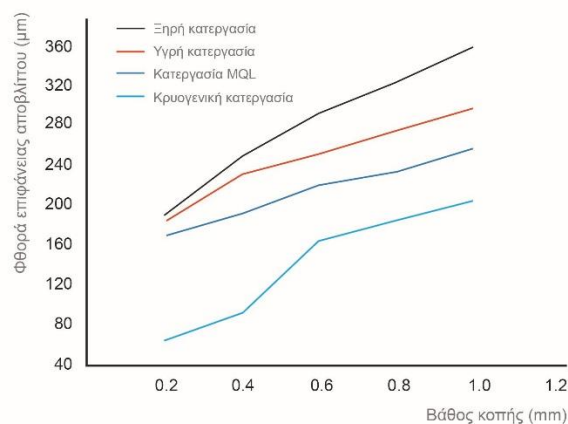
Σχήμα 5.21 : Φθορά ελεύθερης επιφάνειας κοπτικού σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για κάθε εναλλακτική μέθοδο ψύξης [49].

Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα, η φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού ήταν στην κρυογενική ψύξη ήταν πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τον συνήθη τρόπο κατεργασίας του ανοξείδωτου χάλυβα (dry machining) για κάθε βάθος κοπής υπό την ίδια ταχύτητα κοπής και πρόωσης. Επιπλέον, λόγω των μικρότερων θερμοκρασιών στην κρυογενική ψύξη παρήχθησαν τεμάχια με πιο ομοιόμορφη τελική επιφάνεια και μικρότερη τραχύτητα. Στο Σχήμα 5.22 φαίνονται εικόνες από το μικροσκόπιο σχετικά με την φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού στην κάθε μέθοδο ψύξης για βάθος κοπής 1mm.



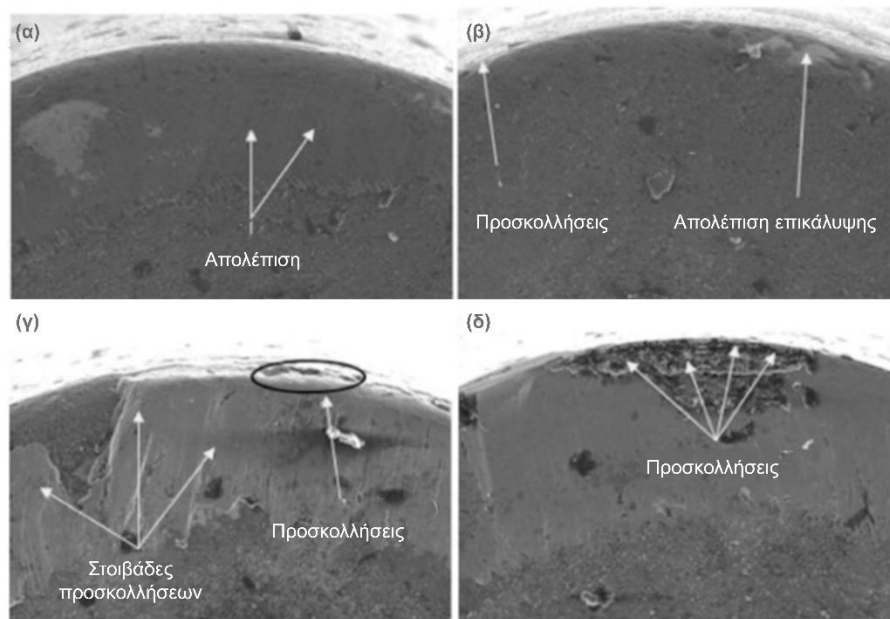
Σχήμα 5.22 : Εικόνες από μικροσκόπιο για την φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού σε κάθε εναλλακτική μέθοδο ψύξης κατά την κοπή χάλυβα.

Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζεται η φθορά της επιφάνειας αποβλίτου το κοπτικού σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για όλες τις εναλλακτικές μεθόδους ψύξης. Παρατηρείται σαφής υπεροχή της κρυογενικής ψύξης αναφορικά με την συγκεκριμένη φθορά έναντι όλων των εναλλακτικών [49].



Σχήμα 5.23 : Σύγκριση φθοράς επιφάνειας αποβλίτου σε συνάρτηση με το βάθος κοπής για κάθε μέθοδο ψύξης.

Στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζονται εικόνες από μικροσκόπιο που δείχνουν την φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού και για τις 4 μεθόδους ψύξης που δοκιμάστηκαν στην τórνευση του χάλυβα για βάθος κοπής 1mm.



Σχήμα 5.24 : Φθορές επιφάνειας αποβλίπτου του κοπτικού.

Όσο αφορά το πάχος του αποβλίπτου παρατηρήθηκε ότι όσο αυξανόταν το βάθος κοπής, αυξανόταν η πλαστική παραμόρφωση του αποβλίπτου και κατ'επέκταση το πλάτος του αποβλίπτου. Λόγω της μειωμένης θερμοκρασίας κοπής στην κρυογενική παρατηρήθηκε καλύτερο και συνεχές απόβλιττο κάτι που οδηγεί σε ευκολότερη καταστροφή του αποβλίπτου και σε καλύτερη ποιότητα επιφάνειας. Στην κρυογενική, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους, υπήρχε μικρότερη πλευρική ροή του αποβλίπτου εξαιτίας της μεγάλης πίεσης ψεκασμού του κρυογενικού. Λόγω υψηλότερων πιέσεων ψεκασμού στην κρυογενική, υπήρξε μειωμένη θερμοκρασία στην ζώνη παραμόρφωσης του αποβλίπτου και κατά συνέπεια μικρότερες παραμένουσες τάσεις στο απόβλιττο, κάτι που συνέβαλλε στην παραγωγή λεπτότερου αποβλίπτου [49]. Επιπλέον, στην αναφορά τους σημειώνουν ότι στην κρυογενική δεν υπήρξαν προσκολλήσεις αποβλίπτου στην τελική επιφάνεια και δεν απαιτήθηκε ο καθαρισμός του αποβλίπτου [49].

Στα συμπεράσματα που κατέληξαν θεωρούν την κρυογενική ως την καλύτερη μέθοδο ψύξης σε κατεργασίες κοπής [49] γιατί :

- Όσο αυξανόταν το βάθος κοπής η κρυογενική ψύξη επέδειξε τις καλύτερες επιδόσεις, σε σχέση με την επιφανειακή τραχύτητα, θερμοκρασία κοπής και φθορά κοπτικού.
- Η κρυογενική αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή για παραγωγή καλύτερης μορφολογίας και μικρότερου πάχους αποβλίπτου, για τις συγκεκριμένες παραμέτρους κοπής.
- Η κρυογενική βελτίωσε την συνοχή της επιφάνειας και την απόδοση του συγκεκριμένου χάλυβα,
- Από άποψη υγιονομικού ενδιαφέροντος η κρυογενική αποτελεί την καλύτερη μέθοδο καθώς δεν παράγει επιβλαβή νέφη και σκόνες.

Το 2016 οι Yap, Sivaraos et.al, δημοσίευσαν μελέτη για κατεργασία του ανθρακούχου χάλυβα S45C [32]. Συγκεκριμένα τόννευσαν τεμάχια ανθρακούχου χάλυβα με διάμετρο 36 mm και μήκος 500 mm υπό κρυογενική ψύξη, ξηρή και ψύξη με χρήση γαλακτώματος (5% πετρέλαιο – 95% νερό). Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποίησαν για τις δοκιμές τους ήταν καρβίδιο με επικάλυψη TiN. Για την κρυογενική ψύξη χρησιμοποίησαν υγρό άζωτο, με

πίεση 0.34 bar και ροή του ρευστού στην διεπαφή ένθετου – ανθρακούχου χάλυβα. Οι παράμετροι κοπής που επιλέχθηκαν ήταν ταχύτητα κοπής $v_c = 175.93, 201.06, 226.19$ m/min, βάθος κοπής $a_p = 0.3$ mm και πρόωση $f=0.121$ mm/rev.

Τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν ήταν ότι η χρήση του κρυογενικού ρευστού δίνει χειρότερη τελική επιφάνεια στον ανθρακούχο χάλυβα με πολύ μεγαλύτερη τραχύτητα έναντι της ξηρής και της χρήσης συμβατικού υγρού κοπής. Η τόννευση ανθρακούχου χάλυβα με χρήση γαλακτώματος παραμένει η καλύτερη επιλογή αναφορικά με την τελική επιφάνεια. Στην χρήση του κρυογενικού αζώτου οι δυνάμεις κοπής ήταν αρκετά μεγαλύτερες από ότι στις άλλες δυο κατεργασίες. Τέλος, αναφορικά με την μορφή και την παραγωγή αποβλίττου στην τόννευση ανθρακούχου χάλυβα σημειώνουν ότι η κρυογενική κατεργασία είναι η καλύτερη επιλογή καθώς παράγει μικρότερο και κοντύτερο απόβλιττο, λόγω χαμηλών τριβών [32].

Οι Dhar, Paul και Chattopadlyay τόννευσαν δυο ειδών χάλυβα, τους AISI 1040 και E4340C με κοπτικά καρβιδίων [52]. Η ροή του υγρού αζώτου πραγματοποιήθηκε με χρήση ειδικά σχεδιασμένων ακροφυσίων, τοποθετημένων απέναντι από την ζώνη κοπής. Η ταχύτητα κοπής ήταν 60 – 150 m/min και βάθος κοπής 1.5 και 0.3 mm. Τα περιβάλλοντα ψύξης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το κρυογενικό και το ξηρό. Παρατήρησαν ότι με την άνοδο των ταχυτήτων κοπής και προώσεων μειώνεται η δραστηριότητα του LN_2 λόγω δυσκολίας εισχώρησης του ρευστού στην επαφή αποβλίττου με κοπτικό εργαλείο [52].

Στα αποτελέσματά τους συγκαταλέγεται η μείωση της θερμοκρασίας κοπής κατά 34 % στην κρυογενική έναντι της ξηρής κατεργασίας. Επιπλέον, με την χρήση του LN_2 μειώθηκε η φθορά ελεύθερης επιφάνειας και η φθορά μορφής αύλακος που οδήγησε σε αύξηση του χρόνου ζωής του κοπτικού. Το LN_2 συνέβαλε στην βελτίωση της διαστατικής ακρίβειας και την ποιότητα της τελικής επιφάνειας λόγω μειωμένης φθοράς και καταστροφής στο κοπτικό άκρο [52].

Τέλος, καταλήγουν ότι στην τόννευση των συγκεκριμένων χάλυβων παίζει σημαντικό ρόλο η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου ώστε να επιτρέπεται η καλύτερη ψύξη στην επαφή κοπτικού – αποβλίττου [52].

5.2.5 Ελαστομερή

Τα ελαστομερή υλικά λόγω των ελαστικών τους ιδιοτήτων χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, ως μονωτικά υλικά για την αποφυγή διαρροών υγρών και αερίων, ως ρουλεμάν για την αποφυγή κραδασμών, σε καλωδιώσεις και ως μεταφορικές ταινίες για την μετακίνηση διαφόρων υλικών [50]. Τα τελευταία χρόνια η διαμόρφωση ελαστομερών με κοπή χρησιμοποιείται ως εναλλακτική τεχνολογία παραγωγής για μείωση του κόστους [50]. Λόγω μικρού μέτρου ελαστικότητας, τα ελαστομερή παθαίνουν μεγάλες παραμορφώσεις κατά την κοπή τους με αποτέλεσμα την μειωμένη ποιότητα τελικής επιφάνειας και χαμηλότερη ακρίβεια [50]. Η ιδανική ψύξη τους κατά την κοπή αυξάνει το μέτρο ελαστικότητάς τους και το καθιστά πιο εύκολα κατεργάσιμο με σκοπό την καλύτερη τελική επιφάνεια [50]. Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας κοπής ενός ελαστομερούς αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητάς του με συνέπεια την αύξηση των ορίων εφελκυσμού του [50].

Στην τόννευση ελαστομερών συνήθως το ελαστομερές υλικό βυθίζεται πριν την κατεργασία του σε κάποιο κρυογενικό αέριο. Το 2016 οι Dutz, Neuber et al. [50] πραγματοποίησαν δοκιμές τόννευσης του ελαστομερούς NBR δοκιμάζοντας διαφορετικές προώσεις και διαφορετικές γωνίες τόννευσης, αφού προσαρμόσαν το ελαστομερές σε κατάλληλο άξονα

για να προσδεθεί στο τσοκ . Στην ουσία δοκίμασαν τόννευση του NBR υπό κρυογενικές συνθήκες με χρήση LN₂ και με ξηρή κατεργασία (dry machining). Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποίησαν ήταν καρβίδιο χωρίς επικάλυψη, το βάθος κοπής ήταν σε όλες τις δοκιμές ίδιο $a_p=1.5\text{ mm}$ και η ταχύτητα κοπής ήταν 200 m/min. Η παροχή του υγρού αζώτου έγινε με ακροφύσιο διαμέτρου 3 mm, σε απόσταση 40mm από την ζώνη κοπής και με πίεση 1.2 bar [50].

Κατά την κρυογενική ψύξη παρατήρησαν μικρή πτώση της θερμοκρασίας μέσα στο κοπτικό (48 °C), κάτι που οδήγησε σε αυξημένο συντελεστή τριβής [50]. Αναφορικά με την τελική επιφάνεια κατέληξαν ότι η κρυογενική προκαλεί μικρότερες παραμορφώσεις αλλά στην τελική επιφάνεια φαίνονται οι αυλακώσεις τροφοδοσίας του LN₂, με απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων ίση με την παροχή. Αντίθετα η χρήση ξηρής κατεργασίας δεν δημιούργησε καθόλου αυλακώσεις στην τελική επιφάνεια [50].

Στα ευρήματά τους σχετικά με την σχηματοποίηση του αποβλίπτου αναφέρουν μεγάλες διαφορές μεταξύ κρυογενικής και ξηρής κατεργασίας. Στη ξηρή κατεργασία το απόβλιπτο ήταν συνεχές και μακρύ, με μορφή κορδέλας, ενώ στην κρυογενική το απόβλιπτο ήταν ασυνεχές, σπασμένο σε μικρά κομμάτια. Η χαμηλή θερμοκρασία κατά την κρυογενική σε ελαστομερή, έχει ως αποτέλεσμα την κατάψυξη του αποβλίπτου και την μετατροπή του σε πολύ εύθραυστο και έτσι ενισχύεται το σπάσιμό του [50]. Στο Σχήμα 5.25 φαίνεται η μορφή του αποβλίπτου κατά την ξηρή και κατά την κρυογενική τόννευση του NBR [50]. Τέλος αναφέρουν ότι η χρήση του LN₂ άλλαξε τα χαρακτηριστικά του ελαστομερές, προκαλώντας μικρότερες παραμορφώσεις με αποτέλεσμα την καλύτερη ποιότητα επιφάνειας [50].



Σχήμα 5.25: Μορφή παραγόμενου αποβλίπτου κατά την κρυογενική (α) και κατά την ξηρή (β) του τόννευση.

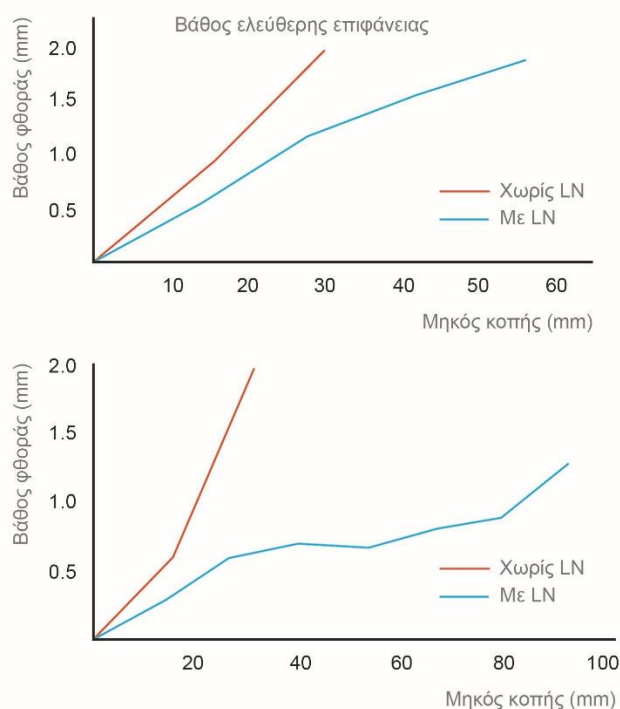
5.2.6 Κεραμικά

Τα προηγμένα κεραμικά διαθέτουν αρκετές προηγμένες τεχνολογίες, οι οποίες τους επιτρέπουν λειτουργίες πέρα των δυνατοτήτων των μετάλλων ή των πολυμερών. Τα κεραμικά χρησιμοποιούνται ευρέως στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, στην αεροδιαστημική, στα οπτικά συστήματα, στους αισθητήρες, στους εναλλάκτες θερμότητας κ.λπ.. Όμως τα κεραμικά παρουσιάζουν δύσκολη κατεργασιμότητα, ανεβάζουν το κόστος παραγωγής και τυχόν αστοχίες του οδηγούν στην πρόωμη καταστροφή τους [51].

Η μεγάλη ανάπτυξη της θερμοκρασίας, κατά την τόννευση κεραμικών είναι ο κύριος λόγος που επηρεάζει την διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων. Για την κατεργασία τους απαιτούνται μεγάλες δυνάμεις κοπής, δηλαδή μεγάλα ποσά ενέργειας, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα στην κοπτική ακμή του εργαλείου [51].

Οι Wang και Rajurkar δημοσίευσαν μελέτη δοκιμών τόννευσης νιτρίδιο σιλικόνης (RSBN) με χρήση CBN κοπτικού εργαλείου [51]. Στην μελέτη τους βγάλαν συμπεράσματα σχετικά με τον χρόνο ζωής του κοπτικού, την φθορά του κοπτικού και τις δυνάμεις κοπής σε περιβάλλον ξηρής και κρυογενικής κατεργασίας με χρήση LN_2 , πάνω από το ένθετο του κοπτικού. Για την τόννευση του κεραμικού χρησιμοποίησαν ταχύτητα κοπής $v_c = 350$ rpm, πρόωση $f = 0.1$ mm/rev και βάθος κοπής $a_p = 0.5$ mm.

Στην ξηρή κατεργασία η θερμοκρασία κοπής έφτασε τους $1153^\circ C$, γεγονός που οδήγησε σε γρήγορη αποτυχία του κοπτικού και σε πολύ μεγάλη φθορά του. Αντίθετα κατά την κρυογενική ψύξη η θερμοκρασία κοπής κυμάνθηκε στα αποδεκτά όρια των $829^\circ C$ για το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο. Σε σύγκριση κρυογενικής και ξηρής κατεργασίας η παραγωγή θερμότητας στην ακμή του κοπτικού μειώθηκε κατά 28 %. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ζωής του κοπτικού και την πολύ μικρότερη φθορά στην ελεύθερη επιφάνειά του. Στην ουσία κατά την κρυογενική τόννευση παρατήρησαν διπλασιασμό του χρόνου ζωής του κοπτικού [51]. Στο Σχήμα 5.26 παρουσιάζεται η φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού κατά την κρυογενική και ξηρή κατεργασία [51].



Σχήμα 5.26 : Βάθος φθοράς CBN κοπτικού και βάθος φθοράς ελεύθερης επιφάνειας.

5.3 Διάτρηση

Με τον όρο Διάτρηση στην μηχανουργική τεχνολογία εννοούμε την κατεργασία αφαίρεσης υλικού για την δημιουργία οπών. Η διάτρηση, είναι μια ιδιαίτερα σημαντική κατεργασία μια και τα περισσότερα από τα μηχανολογικά εξαρτήματα διαθέτουν οπές διαφόρων μορφών και μεγεθών και χρησιμοποιείται για κατεργασία οπών σε αντικείμενα μεταλλικά ή μη

μεταλλικά [26]. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη διάτρηση καλείται τρυπάνι ενώ η εργαλειομηχανή διάτρησης ονομάζεται δράπανο [26].

5.3.1 Παράμετροι διάτρησης

Οι συνθήκες κοπής στην διάτρηση είναι η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, το βάθος κοπής, και το πλάτος του αποβλίπτου [26].

Η ταχύτητα κοπής v_c αποτελεί την κύρια κίνηση κοπής και αφορά την περιστροφή του κοπτικού εργαλείου :

$$V_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000$$

Όπου $\pi = 3.14159$, D η διάμετρος του κοπτικού και n ο αριθμός των στροφών ανά λεπτό.

Η πρόωση στη διάτρηση εκφράζει την ταχύτητα βύθισης του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και συμβολίζεται ως f_{min} (mm/rev) :

$$f_{min} = f \cdot n$$

Το βάθος κοπής t είναι η απόσταση από την κατεργασμένη επιφάνει έως τον άξονα του τρυπανιού.

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην περιοχή της κοπής είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη διάτρηση, με ένα μέρος της ενέργειας διάτρησης να μετατρέπεται σε θερμότητα και να διοχετεύεται στα απόβλιττα, στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και στο κοπτικό εργαλείο [26]. Τα φαινόμενα που ακολουθούν την αύξηση την θερμοκρασίας στην περιοχή κοπής μπορεί να επηρεάσουν [26] :

- το είδος παραμόρφωσης – ελαστική / πλαστική συμπεριφορά,
- την επιφάνεια – την κατεργασμένη επιφάνεια,
- το ρυθμό φθοράς του εργαλείου, ο οποίος εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής, την επικάλυψη του κοπτικού, την απόδοση του ψυκτικού κ.λπ..

Η παραγόμενη θερμότητα κατά τη διάτρηση είναι σημαντική και σχετίζεται κυρίως με τις δύο διακριτές περιοχές [26] :

- την πρωτογενή ζώνη διάτμησης όπου η πλαστική παραμόρφωση είναι η κύρια πηγή θερμότητας,
- την δευτερογενή ζώνη διάτμησης όπου αναπτύσσεται έντονη τριβή ανάμεσα στο εργαλείο και τα απόβλιττα. Έτσι, η επιφανειακή θερμοκρασία του τρυπανιού, επηρεάζεται σημαντικά από την επιφανειακή θερμοκρασία του αποβλίπτου.

5.3.2 Κοπτικό εργαλείο διάτρησης

Στο δράπανο, η άτρακτος περιστρέφει το κοπτικό εργαλείο, το οποίο προωθείται προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Τα είδη των κοπτικών εργαλείων διάτρησης είναι πολλά και περιλαμβάνουν τα ελικοειδή τρυπάνια με ευθύ αυλάκι, τρυπάνια βαθιάς διάτρησης, κεντροτρύπανα κ.λπ.. Το πιο διαδεδομένο τρυπάνι είναι αυτό με τα ελικοειδή αυλάκια. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται συνήθως τα τρυπάνια είναι ο ταχυχάλυβας ή σπάνια ο ανθρακούχος χάλυβας και τα σκληρομέταλλα. Η διάμετρος του κοπτικού εξαρτάται από το μέγεθος της οπής που θα κατεργαστεί το τρυπάνι [26].

5.4 Κρυογενική διάτρηση

Η εφαρμογή της κρυογενικής ψύξης σε κατεργασίες διάτρησης καθίσταται δύσκολη, λόγω της δυσκολίας διανομής του κρυογενικού ψυκτικού στην ζώνη κοπής. Για αυτόν τον λόγο υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία σε σύγκριση με αυτήν της τórνευσης.

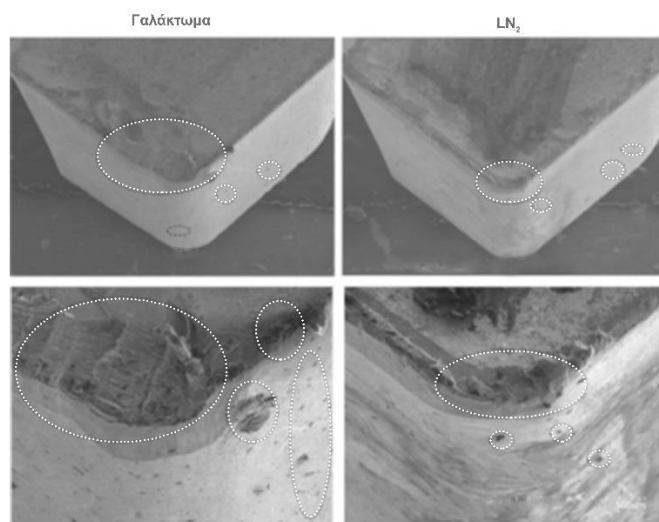
5.4.1 Κράματα τιτανίου

Το κράμα Ti6Al4V διαθέτει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες όπως χαμηλή πυκνότητα, υψηλή αντίσταση στην διάβρωση και εξαίρετη βιοσυμβατότητα. Ωστόσο, είναι ένα δύσκολα κατεργάσιμο υλικό, λόγω του χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που οδηγεί σε εκτεταμένη φθορά των κοπτικών εργαλείων. Για τον λόγω αυτό, πολλές μελέτες έχουν εστιάσει στην κατεργαστική επίδοση του κράματος αυτού, υπό διάφορες μεθόδους ψύξης και λίπανσης [53].

Το 2016, πραγματοποιήθηκε έρευνα [53] στην μικροδιάτρηση του κράματος Ti6Al4V με χρήση κρυογενικής και με χρήση γαλακτώματος. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τρυπάνια από καρβίδιο του βολφραμίου. Το κρυογενικό μέσο, LN₂, και το γαλάκτωμα (1-15 νερό) διανεμήθηκαν στην ζώνη κοπής μέσω ακροφυσίου και υπό πίεση 4 bar (πίεση μεγαλύτερη των 4 bar προκαλεί αναπήδηση του αποβλίπτου - γρέζι και θραύση του κοπτικού). [53]. Στις δοκιμές μετρήθηκαν η θερμοκρασία κοπής η ροπή στρέψης M_z , δύναμη ώθησης F_z , ο σχηματισμός του αποβλίπτου, η επιφανειακή τραχύτητα και η ποιότητα επιφάνειας της οπής.

Οι παράμετροι διάτρησης ήταν : α. βάθος διάτρησης $h= 10, 20, 30$ mm, γ. πρόωση $f = 0.02, 0.05, 0.008$ mm/rev, γ. ταχύτητα κοπής $v_c=40, 50, 60$ m/min. Γενικά στην διάτρηση ισχύει ότι όσο αυξάνεται η πρόωση, τόσο αυξάνεται η δύναμη ώθησης (οπής) κάτι που επιφέρει αύξηση του αποβλίπτου που σχηματίζεται ανά μονάδα χρόνου [53]. Στα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν ήταν [53] :

- Η χρήση του LN₂ μείωσε την θερμοκρασία κοπής για όλες τις ταχύτητες κατά 28-61 %. Στις μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής και προώσεις η μείωση της θερμοκρασίας με την χρήση του LN₂ άγγιξε το 60 %, σε σύγκριση με διάτρηση χρήσης υγρού κοπής.
- Η χρήση του LN₂ επέφερε μείωση της δύναμης ώθησης κατά 14 % στις υψηλές ταχύτητες. Η χρήση LN₂ μείωσε την δύναμη στρέψης M_z κατά 6.43 – 32.28 %.
- Στην κρυογενική διάτρηση υπήρξε μείωση της επιφανειακής τραχύτητας του κατεργασμένου μετάλλου κατά 4.36 – 51.67 % σε σύγκριση με την χρήση γαλακτώματος. Στις υψηλές ταχύτητες κοπής η επιφανειακή τραχύτητα της κατεργασίας με χρήση γαλακτώματος, ήταν 1 μm παραπάνω από αυτήν της κρυογενικής.
- Η χρήση LN₂ πρόσφερε πιο κυκλική και κυλινδρική οπή με καλύτερη διαστατική ακρίβεια και καλύτερη τελική επιφάνεια της οπής. Η οπή της κρυογενικής διάτρησης στο κράμα τιτανίου ήταν πιο ακριβής και από αυτήν στην χρήση γαλακτώματος.
- Στην χρήση υγρού αζώτου επετεύχθη καλύτερη θραύση του αποβλίπτου και καλύτερος σχηματισμός γρεζιών (μικρότερα ύψη γρεζιών), που οδήγησε σε αύξηση του χρόνου ζωής του κοπτικού. Με την χρήση LN₂ δεν υπήρξε καθόλου φθορά στην κύρια κόψη του κοπτικού (Σχήμα 5.26).



Σχήμα 5.27 : Φθορά κύριας κόψης τρυπανιού κατά την διάτρηση με χρήση γαλακτώματος και με χρήση υγρού άζωτου.

5.4.2 Κράματα μαγνησίου

Τα κράματα Μαγνησίου ανήκουν στην κατηγορία των ελαφρών κραμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροδιαστημική και στην αυτοκινητοβιομηχανία εξαιτίας της υψηλής αντοχής τους σε καταπόνηση και σε θλιπτικές δυνάμεις [54]. Οι Lu, Ammouri et al. ανέπτυξαν μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό να ερευνήσουν την επίδραση της κρυογενικής ψύξης στο κράμα Mg Az31b όσο αναφορά την επιφανειακή σκληρότητα [54]. Το κρυογενικό μέσο το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν το υγρό άζωτο (6 bar), με ρυθμό παροχής 6 g/sec και διανεμήθηκε στην ζώνη διάτρησης μέσω κατάλληλων εσωτερικών οπών στο τρυπάνι. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν από καρβίδιο με επικάλυψη με οπές για την παροχή ψύξης ή πεπιεσμένου αέρα (dry machining). Το βάθος κοπής των διατρήσεων ήταν 10 mm, η ταχύτητα κοπής ίδια για όλες τις δοκιμές, στα 512 RPM και οι προώσεις ήταν : $f = 0.05, 0.1, 0.2 \text{ mm/rev}$ [54].

Από την επεξεργασία των μετρήσεών τους κατέληξαν ότι η κρυογενική μείωσε στο ήμισυ την δύναμη ώθησης, σε σύγκριση με αυτήν της ξηρής κατεργασίας. Παράλληλα παρατήρησαν μειωμένες ροπές στρέψης κατά την κρυογενική διάτρηση. Αναφορικά με την σκληρότητα της τελικής επιφάνειας, παρατήρησαν ότι είτε στις μικρές είτε στις μεγάλες προώσεις η ψύξη με άζωτο προσέφερε βελτιωμένη και αυξημένη σκληρότητα έως και 4 μm κάτω από την κατεργασμένη επιφάνεια [54]. Σε ορισμένες προώσεις μάλιστα η κρυογενική ψύξη προσέφερε μέχρι και 12 HV παραπάνω στην τιμή της σκληρότητας επιφάνειας.

5.4.3 Κράματα χάλυβα και κράμα αλουμινίου

Κατά την κατεργασία της διάτρησης παράγονται γρέζια τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την λειτουργικότητα του παραγόμενου εξαρτήματος, ανεβάζοντας το ρίσκο ατυχήματος και προκαλώντας ζημιές σε όλα τα μέρη του συστήματος κατεργασίας [55]. Αναφορικά με την διαχείριση των γρεζιών είτε υπάρχει απομάκρυνσή τους είτε διαμορφώνονται στρατηγικές που ελαχιστοποιούν την παραγωγή τους. Τέτοιες στρατηγικές είναι η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, η ιδιότητα του υλικού προς κατεργασίας αλλά και η σωστή επιλογή και επίδραση της ψύξης [55].

Οι Biermann και Hartmann [55] πραγματοποίησαν έρευνα σχετική με τον σχηματισμό γρεζιών κατά την κρυογενική κατεργασία και σύγκριναν τα ευρήματά τους με αυτά από ξηρή διάτρηση και διάτρηση με χρήση γαλακτώματος. Στις δοκιμές του κατεργάστηκαν τα κράμα χάλυβα 34CrNiMo6 και το κράμα αλουμινίου AlMgSi1 σε ταχύτητα κοπής 300m/min. Ως κρυογενικό μέσο χρησιμοποίησαν την ροή του CO₂ με διάφορες παροχές μέσω 3 ακροφυσίων, τοποθετημένων όσο πιο κοντά μεταξύ του γίνεται. Τα ακροφύσια στόχευαν απευθείας την ζώνη σχηματισμού αποβλίπτου ώστε να μην υπάρχει απευθείας εξάτμιση του CO₂. Στις παρατηρήσεις τους σημειώνουν ότι η ιδανική παροχή CO₂ είναι m°=2.3 Kg/min, καθώς ο συγκεκριμένος ρυθμός σχηματίζει το ιδανικότερο απόβλιπτο.

Αναφορικά με τον χάλυβα σημειώνουν ότι στις μικρές προώσεις ο σχηματισμός του αποβλίπτου είναι ιδανικότερος στην κρυογενική διάτρηση από την ξηρή και από την διάτρηση χρήσης γαλακτώματος. Στις μεγαλύτερες προώσεις ($f > 0.20$ mm/rev) πρέπει να προτιμάται η ξηρή κατεργασία για τον καλύτερο σχηματισμό αποβλίπτου. Η κρυογενική πρόσφερε στην διάτρηση του χάλυβα καλύτερη ποιότητα επιφάνειας και πιο κυκλική οπή. Επιπλέον, η επιφανειακή τραχύτητα στο τελικό τεμάχιο ήταν αρκετά βελτιωμένη στην χρήση του CO₂ σε σχέση με την αντίστοιχη κατά την ξηρή κατεργασία. Οι ερευνητές, αναφορικά με την διάτρηση χάλυβα, κατέληξαν ότι είναι προτιμότερη η χρήση CO₂ όσο αναφορά τον σχηματισμό των γρεζιών με μικρότερα ύψη [55].

Αναφορικά με την διάτρηση του κράματος αλουμινίου, αναφέρουν το CO₂ δεν κατάφερε να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα, κυρίως λόγω της μαλακότητας του κράματος. Η επιφανειακή τραχύτητα κατά την κρυογενική κατεργασία ήταν σχεδόν διπλάσια από αυτήν της ξηρής. Αναφορικά με τον σχηματισμό γρεζιών προτείνουν την ξηρή διάτρηση για κράματα αλουμινίου [55].

Το 2016 οι Arun et al. κάναν πειράματα διάτρησης του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316 με κοπτικό από καρβίδιο του βολφραμίου [56]. Στις δοκιμές του χρησιμοποίησαν ξηρή διάτρηση και κρυογενική μεταχείριση του κοπτικού. Τοποθέτησαν το τρυπάνι μονωμένη καμπίνα με LN₂ και ξηρό πάγο και εξανάγκασαν το τρυπάνι να διαγράψει έναν ολόκληρο θερμικό κύκλο σε ρηχή και σε βαθιά κρυογέννηση. Η βαθιά κρυογενική ψύξη του τρυπανιού περιλάμβανε αργή ψύξη, από την θερμοκρασία περιβάλλοντος στους -196°C για 24 ώρες, μετά επαναφορά του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και κατόπιν θέρμανση του τρυπανιού στους 200°C για 2 ώρες. Με αυτόν τον τρόπο το κοπτικό αύξησε την σκληρότητά του. Για την ρηχή κρυογενική ψύξη του τρυπανιού ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με μόνη διαφορά το όριο κατώτερης θερμοκρασίας που ήταν στους -140°C. Για να αποφευχθεί θερμικό σοκ, θραύση και παραμόρφωση του κοπτικού, οι εναλλαγές των θερμοκρασιών κατά την ψύξη και θέρμανσή του γίναν ελεγχόμενα και με αργό ρυθμό (1.5°C/min).

Οι παράμετροι κοπής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $v_c = 20, 25, 30$ m/min, $f = 0.04, 0.07, 0.10$ mm/rev) και $h = 6$ mm. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν συνοψίζονται παρακάτω [56] :

- Η ρηχή κρυογενική μεταχείριση του κοπτικού είναι πιο οικονομική για την διάτρηση μικρών οπών και καταλληλότερη για διατρήσεις με $v_c=20$ m/min και $f=0.078$ mm/rev. Ενώ η βαθιά κρυογενική συνίσταται για χαμηλές προώσεις.
- Η κρυογενική μεταχείριση του κοπτικού είχε σημαντική επίδραση στην μετατροπή του εναπομείναντα ωστενίτη σε μαρτενσίτη και συνέβαλλε στην ομοιόμορφη κατανομή των καρβιδίων.
- Η δύναμη διάτρησης, η ποιότητα επιφάνειας, η ποιότητα και η διαστατική ακρίβεια της οπής, ήταν σημαντικά βελτιωμένες κατά την κρυογενική έναντι της ξηρής. Πιο

συγκεκριμένα υπολογίστηκε ότι η κρυογενική μείωσε την δύναμη διάτρησης κατά 3-4 %.

- Η κρυογενική διάτρηση μείωσε από 15 μέχρι και 40 % την επιφανειακή τραχύτητα, κυρίως εξαιτίας της μείωσης των δυνάμεων διάτρησης. Μέχρι την ταχύτητα κοπής των 20 m/min παρατηρήθηκε πολύ μικρότερο σφάλμα στις διαμέτρους των οπών.
- Στην ξηρή διάτρηση υπήρξε πολύ μεγαλύτερη φθορά του τρυπανιού και μετά από 22 διατρήσεις, το κοπτικό αποτύγχανε. Αντίθετα στην κρυογενική χρειάστηκαν 60 διατρήσεις μέχρι την τελική αποτυχία του κοπτικού. Η κρυογενική προσέφερε καλύτερες επιδόσεις στις υψηλότερες ταχύτητες κοπής με μικρότερες φθορές στο κοπτικό. Ο χρόνος ζωής των κοπτικών κατά την κρυογενική αυξήθηκε κατά 14 – 118- 218 % για κάθε ταχύτητα κοπής, έναντι της ξηρής κατεργασίας.
- Η κρυογενική ψύξη αποτελεί μια οικονομική επιλογή καθώς είναι πιο φθηνή από χρήση εργαλείων με επικάλυψη.

5.4.4 Χυτοσίδηρος

Το 2012 οι Dix, Drossel et al. [57] δημοσίευσαν έρευνα που αφορούσε δοκιμές διάτρησης σε χυτοσίδηρο με χρήση ξηρής κατεργασίας, γαλακτώματος, MQL και CO₂. Τα αποτελέσματά τους δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές στην απόδοση της διάτρησης μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων ψύξης, στις χαμηλές ταχύτητες κοπής και στις χαμηλές προώσεις. Βέβαια, παρατήρησαν ότι όσο αυξανόταν η ταχύτητα κοπής, υπήρξε ξεκάθαρη υπεροχή της κρυογενικής ψύξης και της MQL όσο αφορά την διάρκεια ζωής του κοπτικού έναντι της ξηρής κατεργασίας. Όσο αυξανόταν η ταχύτητα κοπής από 160 m/min σε 210 m/min και η πρόωση 0.25 mm/rev 0.33 mm/rev, η κρυογενική ψύξη απέδιδε καλύτερα από την MQL και πολύ καλύτερα από την ξηρή. Η κρυογενική διάτρηση είχε ως αποτέλεσμα 80 % αύξηση στον χρόνο ζωής του τρυπανιού. Παρόλο που χρησιμοποίησαν αρκετή ενέργεια στις καταστάσεις υψηλής αφαίρεσης υλικού, η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα είχε σημαντικά καλύτερες επιδόσεις όσο αναφορά τον χρόνο ζωής του κοπτικού και του κόστους κατεργασίας, σε σύγκριση πάντα με τις υπόλοιπες μεθόδους [57]. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η χαμηλή κατανάλωση και το χαμηλό κόστος αρχικής επένδυσης σε σχέση με τις αντίστοιχες αποδόσεις της χρήσης γαλακτώματος, καθιστούν την κρυογενική ψύξη μια εναλλακτική μέθοδο που προσφέρει κοπές υψηλής απόδοσης [57].

5.4.5 Ελαστομερή

Η εκτεταμένη χρήση του CFRP (Carbon fibre reinforced polymer) έχει φέρει επανάσταση στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, στις κατασκευές, στην αιολική ενέργεια και σε άλλες ακόμα βιομηχανικές χρήσεις. Λόγω του χαμηλού τους βάρους και της μεγάλης αντοχής τους χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροναυπηγική, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα την κατασκευή του BOEING 787, όπου το 50 % της μάζας του, είναι κατασκευασμένο από CFRP [58]. Κατά τις κατεργασίες κοπής του CFRP και ειδικότερα κατά την διάτρησή του λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός υλικό (αποελασματοποίηση – delamination), αποτελώντας την κύρια αστοχία του υλικού αυτού [58]. Μια από της σημαντικότερες ιδιότητες του συγκεκριμένου ελαστομερούς, είναι η ικανότητά του να απορροφά μεγάλα ποσά ενέργειας και καταπονήσεων πριν την θραύση του [58].

Στην έρευνα που μελετήθηκε στο παρόν υποκεφάλαιο [58], ελάσματα CFRP με διαστάσεις 25*8 mm επιλέχθηκαν για την διερεύνηση της κρυογενικής διάτρησης. Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν καρβίδιο από βολφράμιο με επικάλυψη, με διάμετρο 8 mm και με τρεις αυλακώσεις. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι τα τρυπάνια καρβιδίων διαθέτουν πολύ καλές κρυογενικές επιδόσεις, καθώς διατηρούν την ανθεκτικότητά τους και την αντοχή τους σε κρούσεις, στις κρυογενικές κατεργασίες. Επιπλέον, θεωρούνται ιδεατά

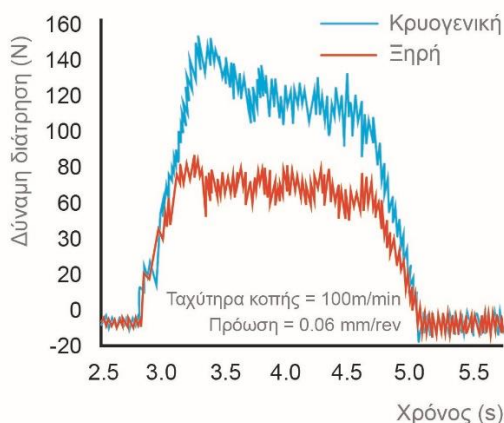
για κατεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών, καθώς όσο η θερμοκρασία κατεργασίας μειώνεται, τόσο η σκληρότητα των κοπτικών από καρβίδια αυξάνεται [58].

Στις δοκιμές διάτρησης του CFRP χρησιμοποιήθηκε ξηρή ψύξη και κρυογενική ψύξη, με χρήση LN₂, όπου διανεμήθηκε στην ζώνη διάτρησης με εξωτερικό ακροφύσιο υπό πίεση 24 bar, θερμοκρασία – 190°C και ρυθμό παροχής 5 lt/hr. Με τα αποτελέσματά τους εξέτασαν την επίδραση της κρυογενικής στην δύναμη διάτρησης, στην επιφανειακή τραχύτητα και στον συντελεστή απόελασματοποίησης. Οι παράμετροι διάτρησης του ελαστομερούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

Παράμετροι Διάτρησης			
Ταχύτητα Κοπής v_c (m/min)	100	125	150
Πρόωση f (mm/rev)	0.03	0.06	0.09

Πίνακας 5.6 : Παράμετροι κοπής που χρησιμοποιήθηκαν για την διάτρηση του CFRP.

Σχετικά με την δύναμη της διάτρησης παρατήρησαν ότι στην κρυογενική είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη κατά την ξηρή κατεργασία. Η μεγαλύτερη δύναμη διάτρησης στην κρυογενική οφείλεται στην μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας κοπής εξαιτίας του κρυογενικού αζώτου, αφού η χρήση κρυογενικού ρευστού συμβάλλει στην διάχυση της θερμότητας. Στο Σχήμα 5.27 φαίνεται η σύγκριση της δύναμης διάτρησης, για τις δυο μεθόδους ψύξης, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η ξαφνική μεγάλη κλίση στις δυο καμπύλες οφείλεται στην είσοδο του κοπτικού στο τεμάχιο εξαιτίας της γωνίας κόψης που επιλέχθηκε. Επιπλέον, η δύναμη διάτρησης και στις δυο μεθόδους αυξάνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, όσο αυξάνεται το βάθος κοπής.



Σχήμα 5.28 : Δύναμη διάτρησης για κρυογενική και ξηρή ψύξη, κατά την διάτρηση CFRP.

Στις παρατηρήσεις τους αναφέρουν ότι και για τις δυο μεθόδους, όσο αυξάνεται η πρόωση (σε σταθερή ταχύτητα κοπής), αυξάνεται και η δύναμη διάτρησης. Αυτό συμβαίνει γιατί, όσο αυξάνεται η πρόωση, αυξάνεται η γωνία αποβλήτου, μειώνεται η γωνία ελευθερίας και κατά συνέπεια αυξάνεται η δύναμη διάτρησης. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι κατά την ξηρή κατεργασία η ταχύτητα της κοπής, δεν έχει σημαντική επίδραση στην δύναμη διάτρησης, για το CFRP (αντίθετα στα μέταλλα αυξάνοντας την ταχύτητα κοπής, συμβαίνει σκλήρυνση του υλικού και έτσι αυξάνεται η δύναμη διάτρησης). Στο CFRP δεν παρατηρήθηκε

σκληρύωση του υλικού, επειδή στα συνθετικά υλικά ο μηχανισμός κοπής βασίζεται στην κάμψη.

Η μέγιστη δύναμη διάτρησης για την κρυογενική καταγράφηκε για $v_c = 100 \text{ m/min}$ και $f = 0.09 \text{ mm/rev}$, με τιμή 257.5 N , ενώ για την ξηρή για την ίδια πρόωση, η μέγιστη τιμή της δύναμης διάτρησης ήταν στα 145.3 N . Η δύναμη της διάτρησης κατέγραψε υψηλότερες τιμές κατά την κρυογενική εξαιτίας της μείωσης τις θερμοκρασίας κοπής, η οποία οδήγησε σε ακαμψία το υλικό και έτσι βελτίωσε την αντοχή του σε κρούση. Στην κρυογενική παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της ταχύτητας κοπής, υπήρξε ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας πάρα την παρουσία του υγρού αζώτου. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής παράγεται περισσότερη θερμότητα τριβής και έτσι μειώνεται η δραστηριότητα του κρυογενικού μέσου στην ζώνη κοπής [58]. Τέλος, σχετικά με τις δυνάμεις διατρήσεις στην κρυογενική σημειώνουν, ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής, τόσο αυξάνεται η θερμοκρασία και μειώνονται οι διατμητικές τάσεις. Για αυτόν τον λόγο, κατά την κρυογενική στις μεγάλες ταχύτητες κοπής υπήρξε μείωση των δυνάμεων διάτρησης, σε σύγκριση με τις μικρές και μεσαίες ταχύτητες κοπής. Δεν παρατηρήθηκε το ίδιο στην ξηρή κατεργασία, γιατί εκεί υπάρχει κάμψη. Κατά την ξηρή κατεργασία, οι δυνάμεις διάτρησης δεν παρουσιάζουν τάσεις μείωσης επειδή η κοπή προκαλείται εξαιτίας κάμψης και όχι διάτμησης [58].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αποελασματοποίηση είναι η κύρια αστοχία που προκαλείται στα συνθετικά υλικά κατά την διάρκεια της διάτρησης, μειώνοντας την αντοχή τους και την απόδοσή τους. Στα συγκεκριμένα πειράματα διάτρησης [58] αναπτύχθηκε αναλυτικό μοντέλο μέτρησης του συντελεστή αποελασματοποίησης (delamination factor f_c). Στην κρυογενική διάτρηση με την χρήση υγρού αζώτου μετρήθηκε πολύ χαμηλότερος συντελεστής αποελασματοποίησης, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κοπής τόσο μειώνεται η δύναμη διάτρησης. Αντιθέτως στην ξηρή κατεργασία στις μικρότερες ταχύτητες κοπής ο f_c είναι μικρότερος, αλλά με την αύξηση των ταχυτήτων κοπής υπήρξε ταυτόχρονη αύξηση στο συντελεστή αποελασματοποίησης. Κατά την ξηρή κατεργασία, στις ταχύτητες άνω των 150 m/min , ο f_c αυξάνεται, εξαιτίας της μείωσης τις αντίστασης και της ανόδου της θερμοκρασίας, που κάνει το πολυμερές πιο μαλακό [58].

Σχετικά με την επιφανειακή τραχύτητα στη διάτρηση του CFRP, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξανόταν η πρόωση (με σταθερή ταχύτητα) τόσο αυξανόταν και η τραχύτητα και για τις δυο μεθόδους. Αντίθετα με την πρόωση, στις αυξήσεις της ταχύτητας κοπής, η τραχύτητα μειώθηκε. Ειδικότερα στην κρυογενική στις πολύ υψηλές ταχύτητες κοπής, επιφανειακή τραχύτητα βρέθηκε μειούμενη. Στις γενικές τους παρατηρήσεις, κατέληξαν ότι ο μέσος όρος επιφανειακής τραχύτητας κατά την κρυογενική είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο μέσο όρο της ξηρής κατεργασίας [58].

Σχετικά με την φθορά κοπτικού βρέθηκε ότι όσο αυξάνεται η πρόωση, τόσο αυξάνεται και η παραγωγή θερμότητας, προκαλώντας μεγαλύτερη φθορά στο κοπτικό και για τις δυο μεθόδους. Συμπερασματικά, λοιπόν, η κρυογενική προσέφερε πολύ λιγότερη τραχύτητα τελικής επιφάνειας και μείωση της δύναμης διάτρησης στις υψηλές ταχύτητες κοπής [58].

5.5 Φραιζάρισμα

Το φραιζάρισμα αποτελεί κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Με φραιζάρισμα κατεργάζονται τεμάχια από διάφορα υλικά όπως χάλυβας, χυτοσίδηρος, σύνθετα υλικά κ.λπ., με επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες, εσοχές, αυλάκια ακόμα και οδοντωτοί τροχοί. Τα τεμάχια αυτά, συνήθως εκχονδρίζονται ή αποπερατώνονται με φραιζάρισμα, ενώ όταν απαιτούνται πολύ καλές επιφάνειες, ως τελική κατεργασία χρησιμοποιείται η λείανση [26]. Στο φραιζάρισμα, η κοπή πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός περιστρεφόμενου κοπτικού εργαλείου. Το

εργαλείο αυτό διαθέτει πολλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες σε κύκλο, ενώ για να μπορεί να εισέρχεται στο κατεργαζόμενο κομμάτι, οι κοπτικές ακμές έχουν τη μορφή σφήνας [26].

Η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου αποτελεί και την κύρια κίνηση κοπής. Η γωνιακή ταχύτητα της περιστροφής αυτής είναι σημαντική παράμετρος της ταχύτητας κοπής, γι' αυτό και επιλέγεται σε συνδυασμό με το κατεργαζόμενο υλικό, το υλικό του κοπτικού εργαλείου και το είδος φραιζαρίσματος [26]. Για τη συνέχεια της κοπής, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το οποίο είναι «δεμένο» στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, μετατοπίζεται με προκαθορισμένο ρυθμό που είναι η ταχύτητα πρόωσης [26].

Κατά την διάρκεια της κοπής, τα κοπτικά δόντια εισέρχονται και εξέρχονται το καθένα από το κομμάτι, μέσα σε ένα μικρό διάστημα της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Αυτό έχει ως συνέπεια τα κοπτικά δόντια να προλαβαίνουν να απάγουν θερμότητα στο διάστημα που δεν κόβουν και έτσι να μην καταπονούνται θερμικά, όπως το εργαλείο της τórνευσης το οποίο εκτελεί συνεχή κοπή [26].

Για τα διάφορα είδη φραιζαρίσματος, χρησιμοποιούνται διαφορετικών μορφών κοπτικά εργαλεία. Συνήθως τα εργαλεία αυτά κατασκευάζονται από ταχυχάλυβα, επειδή επιτρέπει τη χρησιμοποίηση υψηλότερων ταχυτήτων κοπής από τους κοινούς χάλυβες εργαλείων. Πολύ συχνά χρησιμοποιούνται και πλακίδια σκληρομετάλλων. Γενικά οι συνήθεις μορφές κοπτήρων φραιζας είναι κυλινδρικοί, δισκοειδείς, πριονοειδείς, κοπτήρες μορφής, κοχλιωτοί και κονδύλια [26].

5.5.1 Παράμετροι φραιζαρίσματος

Ο αριθμός των στροφών του κοπτικού εργαλείου, εξαρτάται, όπως και στην τórνευση και τη διάτρηση, από την επιθυμητή ταχύτητα κοπής. Η ταχύτητα κοπής στο φραιζάρισμα αντιπροσωπεύει την περιστροφή του κοπτικού δοντιού στο χρόνο [26].

Η ταχύτητα κοπής εκφράζει το ρυθμό κοπής στην κύρια κίνηση που είναι η περιστροφή του εργαλείου. Όπως και στην τórνευση, έτσι και στο φραιζάρισμα τεμαχίου με κοπτικό εργαλείο διαμέτρου D (mm) το οποίο περιστρέφεται με n στροφές το λεπτό (rpm), η ταχύτητα κοπής v_c σε m/min, ισούται [26] :

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000$$

Η πρόωση είναι η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στο κοπτικό εργαλείο και ονομάζεται ταχύτητα πρόωσης. Συνήθως η κίνηση της πρόωσης είναι στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και έτσι εκφράζεται συχνά ως η ταχύτητα κίνησής του. Η πρόωση στο φραιζάρισμα δίνεται με δύο μορφές : α. πρόωση ανά λεπτό, f_{min} , που είναι η σχετική μετατόπιση ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στο κοπτικό εργαλείο σε ένα λεπτό και σε β. πρόωση ανά δόντι f_z , που είναι η σχετική μετατόπιση ανάμεσα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στο κοπτικό εργαλείο, στο χρονικό διάστημα από την εισχώρηση ενός δοντιού (μιας κόψης), μέχρι την εισχώρηση του επόμενου [26].

Η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές προώσεις είναι η εξής [26] :

$$f_{min} = f_z \cdot Z \cdot n$$

Η γωνία επαφής στο φραιζάρισμα είναι η γωνία του τόξου στο οποίο υπάρχει κοπή και προκύπτει συναρτήσει του βάθους κοπής t και της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου D [26] :

$$\cos x = 1 - (2 \cdot t / D)$$

5.6 Κρυογενικό φραιζάρισμα

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές έρευνες και πειράματα που ασχολήθηκαν με την επίδραση της κρυογενικής ψύξης στην κατεργασία του φραιζαρίσματος. Οι δοκιμές επικεντρώθηκαν στην επίδραση της κρυογενικής ψύξης στην διάρκεια ζωής της φραιζας, στην θερμοκρασία που παράγεται κατά την κοπή, στις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά το φραιζάρισμα κ.λπ.. Το παρόν υποκεφάλαιο καταγράφει τα ευρήματα των ερευνών, γύρω από το κρυογενικό φραιζάρισμα, σε κράματα τιτανίου, κράματα νικελίου, χάλυβες, και κράματα αλουμινίου. Βέβαια, υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία γύρω από το κρυογενικό φραιζάρισμα καθώς για την διανομή του κρυογενικού μέσου απαιτούνται ειδικά σχεδιασμένα κοπτικά εργαλεία.

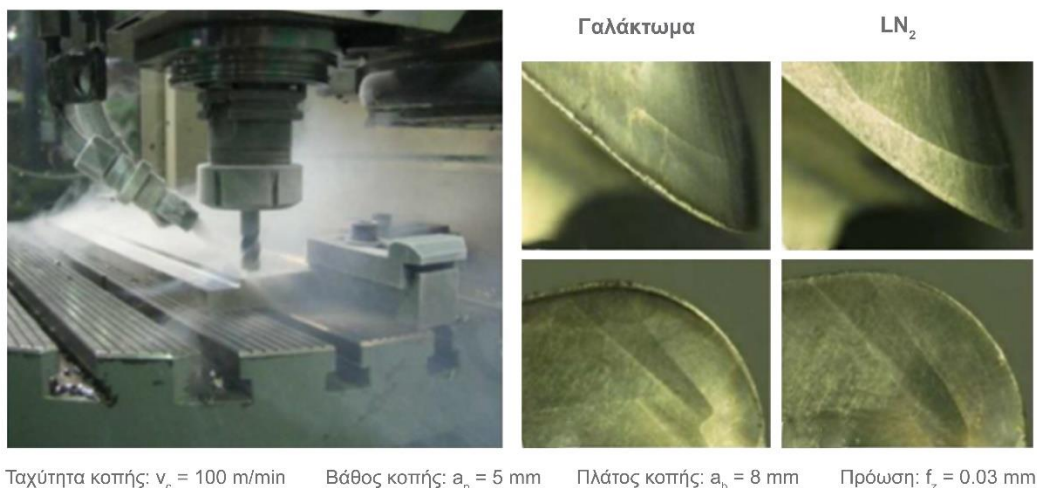
5.6.1 Κράματα τιτανίου

Το 2018 ο C.M. Pittala [59] πραγματοποίησε δοκιμές φραιζαρίσματος σε κράμα τιτανίου με χρήση κρυογενικού CO₂. Το τεμάχιο που κατεργάστηκε ήταν από α/β κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V και επικεντρώθηκε στην επίδραση της κρυογενικής ψύξης στην φθορά του κοπτικού εργαλείου. Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν σκληρό πλακίδιο από καρβίδια του βολφραμίου με επικάλυψη (Ti,Al)N, με 5 κοπτικά δόντια και διάμετρο κεντρικού άξονα 16 mm και πραγματοποιήθηκε ομόρροπο φραιζάρισμα. Σαν ψυκτικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν, συμβατικό γαλάκτωμα blasocut BC25 και κρυογενικό CO₂. Τα ψυκτικά μέσα διανεμήθηκαν στην ζώνη κοπής μέσω ειδικού εσωτερικού αγωγού, παράλληλο στον άξονα του κονδυλίου, και μέσω 5 ακτινικών οπών στην μύτη του κοπτικού με ρυθμό παροχής 2.9 kg/min (μέσω του αγωγού) και 1.7 kg/min (μέσω των οπών). Τα ψυκτικά μέσα διανεμήθηκαν στην ζώνη κοπής με πίεση 50 bar. Η κρυογενική ψύξη λαμβάνει χώρα εξαιτίας του φαινομένου Joule-Thomson : στην έξοδο του ακροφυσίου, η πίεση μετατρέπεται σε ατμοσφαιρική προκαλώντας διόγκωση του CO₂ και μετατροπής του σε μίγμα αέριου CO₂ και CO₂ χιόνι με θερμοκρασία -79°C [59].

Η ταχύτητα κοπής ήταν 90 m/min, πρόωση ανά δόντι $f_z = 0.088$ mm/rev/tooth, βάθος κοπής $t=8$ mm και πάχος αποβλίπτου $h_m=1.6$ mm. Ο κεντρικός αγωγός στον άξονα του κοπτικού συνέβαλε στην ψύξη της γωνίας ελευθερίας του κοπτικού, προκαλώντας πολύ μικρότερη φθορά ελεύθερης επιφάνειας, στην χρήση CO₂ [59].

Στις παρατηρήσεις του αναφέρει, ότι σε μικρές τιμές πρόωσης η κρυογενική ψύξη αποδίδει καλύτερα από την ψύξη γαλακτώματος. Σε πρόωση άνω των 0.16 mm/tooth το CO₂ δεν έδειξε καλύτερα αποτελέσματα από το γαλάκτωμα. Μεγαλύτερες ακτινικές οπές στο κοπτικό προσφέρουν μικρότερη φθορά ελεύθερης επιφάνειας, καθώς η μεγαλύτερη παροχή CO₂ οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας του κοπτικού. Μικρότερη φθορά στο κοπτικό παρατηρήθηκε κατά την κρυογενική, στις ταχύτητες κοπής 90 – 130 m/min. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής η ψύξη με CO₂ δεν επιφέρει μικρότερες φθορές στο κοπτικό. Τέλος, αναφέρει ότι το CO₂ έδειξε πολύ καλή απόδοση σχετικά με τον χρόνο ζωής του κοπτικού, όταν η διανομή του γίνεται με τις παραπάνω παροχές [59].

Ο Klocke et al. [37] πραγματοποίησαν πειράματα σε κατεργασίας φραιζαρίσματος Ti-6Al-4V με κονδύλι καρβιδίων, σε κρυογενικό περιβάλλον με χρήση LN₂ και σε περιβάλλον με χρήση γαλακτώματος με βάση το πετρέλαιο (95 % νερό-5% πετρέλαιο). Στις δοκιμές τους σύγκριναν τις επιδόσεις των δυο διαφορετικών μεθόδων ψύξης στην θερμοκρασία κοπής, στην φθορά του κοπτικού και στον σχηματισμό του αποβλίπτου. Το κρυογενικό άζωτο διανεμήθηκε στην ζώνη κοπής μέσω εξωτερικού ακροφυσίου [37]. Στο Σχήμα 5.28 φαίνεται η παροχή του κρυογενικού μέσου με εξωτερικό ακροφύσιο, οι παράμετροι κοπής, η φθορά του κοπτικού εργαλείου και η προσκόλληση μετάλλου πάνω στο κοπτικό.



Σχήμα 5.29 : Φθορά κοπτικού εργαλείου, αριστερά με χρήση γαλακτώματος και δεξιά με χρήση υγρού αζώτου.

Οι δοκιμές έδειξαν λιγότερη φθορά στο κοπτικό κατά την κρυογενική ψύξη. Η προσκόληση στο κοπτικό κράματος τιτανίου ήταν πολύ λιγότερη και μόνο γρατζουνιές ήταν εμφανείς πάνω στην επικάλυψη μετά από τον ίδιο χρόνο κοπής. Στην συμβατική ψύξη η φθορά του κοπτικού ήταν αρκετά μεγαλύτερη όπως και ο χρόνος ζωής του [37].

Το 2016 οι A. Shokran et al. ήταν οι πρώτοι που διερεύνησαν την επίδραση της κρυογενικής ψύξης στην συνοχή της τελικής επιφάνειας του τεμαχίου [61]. Στις δοκιμές τους χρησιμοποίησαν LN_2 ως κρυογενικό ρευστό, γαλάκτωμα με βάση το νερό και πεπιεσμένο αέρα. Οι δοκιμές τους αφορούσαν μετωπικό φραιζάρισμα του κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V με κοπτικό από καρβίδιο με επικάλυψη. Οι παράμετροι κοπής που χρησιμοποίησαν ήταν : $v_c = 30, 115, 200$ m/min, $f_z = 0.03, 0.055, 0.1$ mm/tooth και βάθος κοπής $a_p = 1, 3, 5$ mm [61].

Μετά το πέρας των πειραμάτων τους κατέληξαν ότι η κρυογενική βελτίωσε την επιφανειακή τραχύτητα. Συγκεκριμένα, στην χαμηλή $v_c=30$ m/min και στην μέγιστη πρόωση ανά δόντι $f_z=0.1$ mm/tooth, η κρυογενική παρήγαγε τεμάχια με πολύ λιγότερη επιφανειακή τραχύτητα από ότι η υγρή και η ξηρή κατεργασία, με τις ίδιες παραμέτρους κοπής. Σε αυτές τις παραμέτρους κοπής η κρυογενική προσέφερε 18 % λιγότερη τραχύτητα επιφάνειας από ότι η υγρή κατεργασία και 21 % λιγότερη τραχύτητα από την ξηρή κατεργασία [61].

Η μικρότερη επιφανειακή τραχύτητα στην κρυογενική ψύξη καταγράφηκε στην max ταχύτητα κοπής $v_c=115$ m/min, στην min πρόωση $f_z=0.03$ mm/tooth και στο max βάθος κοπής $a_p=5$ mm. Σε αυτές τις παραμέτρους κοπής η επιφανειακή τραχύτητα ήταν 30 % λιγότερη από το υγρό φραιζάρισμα και 40 % από το ξηρό φραιζάρισμα [61]. Η μικροσκοπική ανάλυση έδειξε ότι η κρυογενική είχε λιγότερες επιφανειακές ανωμαλίες και πλαστικές παραμορφώσεις, σε σύγκριση με την ψύξη υγρού κοπής και ξηρής ψύξης. Τέλος, σημειώνουν ότι η κρυογενική βελτίωσε την συνοχή της τελικής επιφάνειας. Η ανάλυση των κατώτερων στοιβάδων από την επιφάνεια έδειξε ότι κατά την κρυογενική ψύξη σημειώθηκε η μεγαλύτερη αύξηση της μικροσκληρότητας του κράματος τιτανίου [61].

5.6.2 Κράματα νικελίου

Οι Trusdale et al. πραγματοποίησαν δοκιμές φραιζαρίσματος στο κράμα νικελίου Umidet 720 με σκοπό να ερευνήσουν την επίδραση της ταχύτητας κοπής στην μικροδομή του κράματος [62]. Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν επικαλυμμένα κοπτικά καρβιδίων. Στις

δοκιμές τους χρησιμοποίησαν σταθερή πρόωση και σταθερό βάθος κοπής αλλά διαφορετικές ταχύτητες κοπής για ομόρροπο και αντίρροπο φραιζάρισμα. Το υγρό άζωτο διανεμήθηκε στην ζώνη κοπής μέσω εξωτερικού ακροφυσίου και με κατεύθυνση στο τεμάχιο, ακριβώς πριν ξεκινήσει η κατεργασία φραιζαρίσματος. Μετά την ψύξη του τεμαχίου, το ακροφύσιο κατευθύνθηκε στο κοπτικό, ώστε να λάβει χώρα το κρυογενικό φραιζάρισμα.

Για το συγκεκριμένο κράμα ο παράγοντας της μικροδομής είναι σημαντικός για το τελικό αποτέλεσμα [62]. Έτσι σε περίπτωση που η μικροδομή του υλικού παραμορφωθεί, φθαρεί ή αποκολληθεί κατά την κατεργασία, το υλικό αστοχεί οριστικά και χάνει την αξία του. Με την κρυογενική ψύξη, επιτεύχθηκαν ταχύτητες κοπής της τάξεως των 120 m/min, ενώ με την χρήση γαλακτώματος μόλις 10 m/min. Στην χρήση γαλακτώματος η ταχύτητα κοπής συνέβαλε στην καταστροφή της μικροδομής. Αντιθέτως στην κρυογενική κατεργασία, η μικροδομή διατηρήθηκε και κρίσιμες φθορές κοπτικού εμφανίστηκαν μετά το φράγμα των 120 m/min.

Μελέτες έχουν ασχοληθεί με τη φθορά του εκάστοτε κοπτικού εργαλείου και τη μορφολογία του αποβλήτου ως αποτέλεσμα του φραιζαρίσματος του Inconel 718 υπό συνθήκες υψηλής ταχύτητας. Μία από αυτές τις μελέτες επικεντρώθηκε στην διερεύνηση της απόδοσης κοπτικών εργαλείων καρβιδίων του βολφραμίου με επικάλυψη υπό τις προαναφερθείσες συνθήκες. Κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης, οι μέθοδοι κρυογενικής κατεργασίας με χρήση διοξειδίου του άνθρακα αλλά και σε συνθήκες ξηρής κοπής επικεντρώθηκαν και υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα εύρος παραμέτρων κοπής για την καλύτερη απορρόφηση των αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά, η ταχύτητα κοπής κυμάνθηκε από 120 έως 140 m/min, ο ρυθμός τροφοδοσίας από 0.15 έως 0.25 mm/δόντι και το αξονικό βάθος κοπής από 0.3 έως 0.7mm, ενώ το ακτινικό βάθος κοπής παρέμεινε σταθερό στα 0.4mm [63]. Η μέθοδος κρυογενικής κατεργασίας με χρήση διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάστηκε με στόχο αφενός τη βελτίωση και αφετέρου τη σταθεροποίηση της απόδοσης κατά τη διάρκεια της κοπής. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έλαβε υπόψιν παράγοντες όπως ο χρόνος ζωής και τα μοτίβα φθοράς του κοπτικού εργαλείου σε συνάρτηση με την μορφολογία του αποβλήτου.

Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι τα μοτίβα φθοράς του κοπτικού εργαλείου ήταν εφάμιλλα τόσο στην κρυογενική κατεργασία όσο και σε συνθήκες ξηρής κοπής. Η φθορά του κοπτικού εργαλείου ξεκινά με ομαλή τριβή και αποβολή ρινισμάτων υλικού πέριξ της γραμμής κοπής, χαρακτηριστικά τα οποία οδηγούν σε πλευρική φθορά και τελικά στη δημιουργία εγκοπών. Υπό συνθήκες ξηρής κοπής, παρατηρείται έντονη επικάλυψη υλικού στη μύτη του κοπτικού εργαλείου γεγονός το οποίο επιταχύνει σημαντικά την εμφάνιση των παραπάνω μηχανισμών φθοράς. Επομένως, η κρυογενική κατεργασία με χρήση διοξειδίου του άνθρακα εισάγει σημαντικά πλεονεκτήματα προς την κατεύθυνση βελτίωσης του χρόνου ζωής του κοπτικού εργαλείου (έως και κατά 70.8% αύξηση του χρόνου ζωής σε σχέση με την κατεργασία υπό συνθήκες ξηρής κοπής). Ο κύριος λόγος στον οποίο οφείλεται η βελτίωση αυτή είναι η παροχή συνεχόμενης ψύξης ως αποτέλεσμα της χρήσης διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που μειώνει τη θερμοκρασία στο σημείο κοπής κατά 80% (σε σχέση με την κατεργασία υπό συνθήκες ξηρής κοπής) [63].

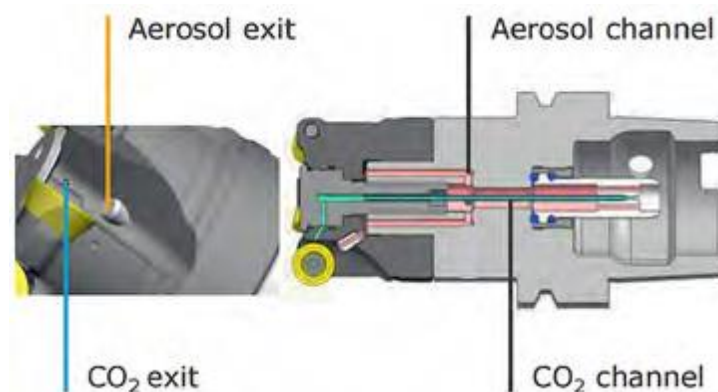
Τέλος, αποδείχτηκε ότι οι συνθήκες κοπής και τα διάφορα μοτίβα φθοράς είχαν σημαντική επίδραση στη μορφολογία του αποβλήτου. Σε σχέση με την κρυογενική κατεργασία, το σχήμα αλλά και το χρώμα των ρινισμάτων μετά την ξηρή κοπή βρέθηκε να είναι σημαντικά παραμορφωμένο και έντονα σκούρο αντίστοιχα, γεγονός που επιβεβαιώνει την σημαντική επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών που συναντήθηκαν [63].

5.6.3 Χάλυβες

Οι Schaarshcmid et al. [63] διερεύνησαν την επίδραση διάφορων μεθόδων ψύξης κατά το φραιζάρισμα του ανοξείδωτου χάλυβα X12CrNiWTiB16-13. Στα πειράματά τους επικεντρώθηκαν στην θερμοκρασία της κοπτικής ακμής, στην θερμοκρασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου, στην φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού. Το τεμάχιο το οποίο κατεργάστηκαν ήταν πτερύγιο αεροσκάφους και χρησιμοποίησαν 5 διαφορετικές μεθόδους ψύξης : ξηρή, εξωτερική MQL, ξηρή με γαλάκτωμα (εσωτερικός ψεκασμός), ξηρή με γαλάκτωμα εσωτερικά και διοξείδιο του άνθρακα εξωτερικά και τέλος εσωτερικά πεπιεσμένος αέρας με εξωτερική ψύξη με διοξείδιο του άνθρακα.

Η φθορά ελεύθερης επιφάνειας μεταξύ των 5 διαφορετικών μεθόδων για το φραιζάρισμα ενός μόνο τεμαχίου ήταν σχεδόν παρόμοια. Όμως κατεργάζοντας 3 τεμάχια συνεχόμενα με κάθε μέθοδο, η χρήση πεπιεσμένου αέρα και διοξειδίου του άνθρακα απέδωσε την μικρότερη φθορά ελεύθερης επιφάνειας.

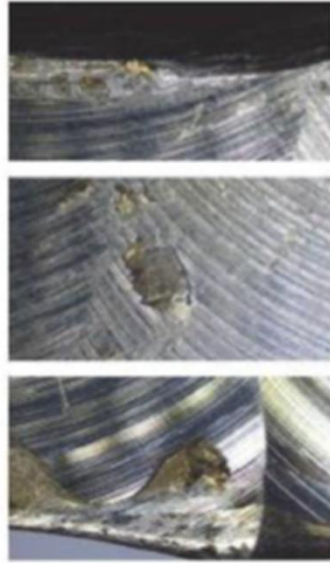
Επιπλέον, κατεργάστηκαν σε φραιζάρισμα το ίδιο τεμάχιο με χρήση ενός καινούριου κοπτικού που διέθετε 2 εσωτερικούς αγωγούς-κανάλια, το ένα για πεπιεσμένο αέρα το άλλο για κρυογενικό διοξείδιο του άνθρακα (Σχήμα 5.30). Με την κρυογενική ψύξη η φθορά ελεύθερης επιφάνειας μειώθηκε δραστικά από 0.16 mm (ξηρή) σε μόλις 0.06 mm (CO₂). Επίσης με την χρήση του διοξειδίου του άνθρακα κατάφεραν να αυξήσουν την ταχύτητα κοπής κατά 25% και την πρόωση από 0.40 σε 0.55 πέτυχαν παρόμοια φθορά από την ξηρή με μικρότερες παραμέτρους. Στο Σχήμα 5.31 φαίνεται η ποιότητα επιφάνειας η οποία είναι εμφανώς βελτιωμένη με την κρυογενική ψύξη παρά τις μεγαλύτερες παραμέτρους κοπής. Κατά την ξηρή κατεργασία εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών κομμάτια αποβλήττου συγκολλόνται στην επιφάνεια του τεμαχίου, ενώ δεν παρατηρήθηκε παρόμοιο φαινόμενο κατά την κρυογενική ψύξη [63].



Σχήμα 5.30 : Φραίζα με εσωτερικά κανάλια ψύξης, πεπιεσμένου αέρα και διοξειδίου του άνθρακα.

$v_c = 320 \text{ m/min}$, $f_z = 0.40 \text{ mm}$

Ξηρή κατεργασία



$v_c = 400 \text{ m/min}$, $f_z = 0.55 \text{ mm}$

CO₂



Σχήμα 5.31 : Τελικά επιφάνεια ανοξείδωτου χάλυβα κατά την ξηρή και κρυογενική κατεργασία του.

Το φραιζάρισμα του χάλυβα παράγει υπερβολική θερμότητα κατά τη διαδικασία σχηματισμού αποβλίπτου, πράγμα που αυξάνει τη θερμοκρασία του εργαλείου κοπής και επιταχύνει τη φθορά του εργαλείου. Η εφαρμογή συμβατικού υγρού κοπής κατά την διαδικασία του φραιζαρίσματος μπορεί να μην ελέγχει αποτελεσματικά την παραγωγή θερμότητας και επιπλέον συμβάλλει στην δημιουργία περιβαλλοντικών προβλημάτων και προβλημάτων υγείας του χειριστή. Για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων αυτών που προκαλούνται από τη χρήση συμβατικής κοπής αναπτύσσεται συνεχώς η μέθοδος φραιζαρίσματος με κρυογενικό υγρό και συγκεκριμένα με υγρό άζωτο (LN₂) [64].

Σε έρευνα που έγινε σχετικά με την επίδραση του LN₂ ως ψυκτικού μέσου στην μηχανική κατεργασία του σκληρυμένου χάλυβα εργαλείων AISI H13 για διάφορες ταχύτητες κοπής στην περιοχή 75-125 m / min κατά τη διάρκεια του τελικού φραιζαρίσματος με καρβίδιο TiAlN επικαλυμμένο με PVD φάνηκε ότι η κατεργασία με το LN₂ μείωσε τη θερμοκρασία κοπής, τη φθορά των εργαλείων, την τραχύτητα της επιφάνειας και τις δυνάμεις κοπής σε σύγκριση με την ξηρή και υγρή κατεργασία. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην καλύτερη ψύξη και λίπανση μέσω σημαντικής μείωσης της θερμοκρασίας στη ζώνης κοπής. Μάλιστα, φάνηκε ότι η μείωση στην θερμοκρασία κοπής με αυτό το ψυκτικό μέσο είναι σημαντική σε χαμηλότερες ταχύτητες κοπής.

Πιο αναλυτικά, διαπιστώθηκε ότι σε σύγκριση με την ξηρή και την υγρή κατεργασία, η κατεργασία με LN₂ μείωσε τη θερμοκρασία κοπής κατά 57-60% και 37-42% αντίστοιχα, αφού η τροφοδότηση LN₂ στην επαφή κοπτικού εργαλείου και αποβλίπτου εξατμίζεται γρήγορα απορροφώντας τη θερμότητα. Ακόμα, η φθορά των εργαλείων μειώθηκε κατά 29-34% και 10-12% ως αποτέλεσμα της μείωσης της θερμοκρασίας στην ζώνη κοπής και της μειωμένης τριβής μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου εργασίας, ενώ η τραχύτητα της επιφάνειας μειώθηκε από 33-40% και 25-29% αντίστοιχα εξαιτίας των χαμηλότερων δυνάμεων κοπής και φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Επιπλέον, οι δυνάμεις κοπής (F_x, F_y και F_z) στη κατεργασία LN₂ μειώθηκαν 22-24%, 19-24% και 20-26% αντιστοίχως σε σύγκριση με τις συνθήκες ξηρής κοπής, ενώ η αντίστοιχη μείωση σε σχέση με την υγρή κατεργασία ήταν 4-9%, 9-12% και 11-15% , γεγονός που οφείλεται στο ότι η κατεργασία

με LN_2 παρέχει καλύτερη ψύξη και λίπανση μέσω ουσιαστικής μείωσης της θερμοκρασίας της ζώνης κοπής [64].

Συμπερασματικά, η εφαρμογή του ψυκτικού υγρού LN_2 στο φραιζάρισμα του χάλυβα AISI H13 μπορεί να συμβάλλει όχι μόνο προστασία του περιβάλλοντος αλλά και στη βελτίωση της ζωής του εργαλείου, την τραχύτητα της επιφάνειας και να μειώσει σημαντικά τις δυνάμεις κοπής.

6. ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι νέες καινοτομίες σήμερα εστιάζονται κυρίως σε κοπτικά εργαλεία ικανά να παρέχουν τα κρυογενικά ρευστά, μέσω των ίδιων των κοπτικών και επίσης να συνδυάζονται με άλλα υγρά κοπής όπως γαλακτώματα, MQL και πεπιεσμένο αέρα [1].

Οι Walter και Starrag ανέπτυξαν μια μέθοδο κρυογενικής ψύξης με βάση το CO₂ για την παραγωγή πτερυγίων στροβίλου. Το CO₂ διανεμήθηκε στην ζώνη κοπής, μέσω του κοπτικού εργαλείου στην διεπαφή κοπτικού-τεμαχίου. Με το συγκεκριμένο κοπτικό υποστηρίζουν ότι μπορούν να κατεργαστούν τεμάχια έως και 70 % γρηγορότερα από ότι με την χρήση πεπιεσμένου αέρα σε ίδιες παραμέτρους κοπής, αυξάνοντας παράλληλα τον χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου. Το κοπτικό που ανέπτυξαν (Cryo-tec F2334R) διαθέτει ένα ψυκτικό σύστημα δυο αγωγών, με τον έναν κατάλληλα μονωμένο ώστε να παρέχει το CO₂ και τον άλλον για πεπιεσμένο αέρα ή γαλάκτωμα. Στα άμεσα σχέδιά τους είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός περιστρεφόμενου συστήματος τροφοδοσίας με τρεις αγωγούς, το οποίο θα είναι σε θέση να χρησιμοποιεί συμβατική ψύξη, κρυογενική ψύξη και MQL ή και συνδυασμό τους.

Η γερμανική MAG (Manufacturing Technology) αναπτύσσει ένα νέο εργαλείο το οποίο θα είναι σε θέση να συνδυάσει το υγρό άζωτο με MQL προκειμένου να μειώσει την τριβή και τις αποκολλήσεις υλικού. Το καινούριο αυτό κοπτικό θα είναι κατάλληλο για κατεργασία κραμάτων νικελίου και τιτανίου, χυτοσιδήρου και συμπαγούς γραφίτη. Η κύρια εστίαση της MAG είναι η ανάπτυξη κοπτικών για φραιζάρισμα και διάτρηση με σκοπό να αυξήσουν κατά 60 % την ταχύτητα κοπής σε κοπτικά με επικάλυψη CGI και κατά 400 % σε κοπτικά καρβιδίων με επικάλυψη PCD.

Επιπλέον, η MAG εφάρμοσε κρυογενική ψύξη χαμηλής ροής για την κατεργασία τεμαχίων τιτανίου που χρησιμοποιήθηκαν στο μαχητικό Lockheed Martin F-35 Lightning II Stealth. Με την εφαρμογή της κρυογενικής ψύξης πέτυχαν αύξηση της παραγωγικότητας και αποδοτικότητας της κατεργασίας κατά 25 %. Στις κατεργασίες τους, χρησιμοποίησαν υγρό άζωτο με βελτιστοποιημένο ρυθμό ροής και κατάφεραν να αυξήσουν τον χρόνο ζωής του κοπτικού όπως και τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Η MAG αποτελεί ένα καινοτόμο παράδειγμα εφαρμογής κρυογενικής ψύξης, αφού εισήγαγε στις 5 αξόνων φραιζομηχανές της και στις δραπενομηχανές της, την κρυογενική κατεργασία.



Σχήμα 6.1 : Κοπτικό εργαλείο φραιζας εφοδιασμένο με μονωμένο αγωγό για παροχή CO₂ και πεπιεσμένου αέρα.

7. ΣΥΝΟΨΗ

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας ήταν να συγκεντρώσει και να αναλύσει την επίδραση και τις επιδόσεις των κρυογενικών ρευστών στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Παράλληλα καταγράφηκαν συγκρίσεις μεταξύ των παραδοσιακών τρόπων ψύξης και λίπανσης και της κρυογενικής ψύξης, σε πειράματα τόννευσης, διάτρησης και φραιζαρίσματος.

Παρόλο, που η τεχνολογία της κρυογενικής αναπτύσσεται τα τελευταία 70 χρόνια, οι βιομηχανίες παραγωγής δεν έχουν ακόμα προσαρμοστεί. Αρκετοί ερευνητές στον κλάδο της μηχανουργικής τεχνολογίας κατέληξαν ότι πρόκειται για μια αποδοτική και οικολογική κατεργασία, που είναι ικανή να αυξήσει την παραγωγικότητα των κοπών.

Η επιτυχία της κρυογενικής εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το υλικό του κοπτικού εργαλείου, την γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και την ταχύτητα κοπής. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα της κρυογενικής ψύξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο διανομής και ρυθμό παροχής του κρυογενικού ρευστού. Η πλειονότητα των ερευνών που καταγράφηκαν χρησιμοποίησε το κρυογενικό μέσο απευθείας στην ζώνη κοπής για δύσκολα κατεργάσιμα μέταλλα, με εξαιρετικά αποτελέσματα. Οι περισσότερες έρευνες που παρουσιάστηκαν στην διπλωματική αυτή ανέφεραν θετικά αποτελέσματα κατά την κρυογενική κατεργασία γύρω από τον χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου, τις φθορές τους και την ποιότητα της τελικής επιφάνειας. Μεταλλικά υλικά, όπως τα αεροδιαστημικά και αεροναυπηγικά, επέδειξαν καλύτερες επιδόσεις στις κατεργασίες κοπής, κατά την κρυογενική ψύξη.

Οι περισσότερες έρευνες της προηγούμενης δεκαετίας, γύρω από την κρυογενική κατεργασία, αφορούσαν πειράματα τόννευσης κραμάτων τιτανίου και χάλυβα με χρήση του LN_2 ως ψυκτικού μέσου. Τα πειράματα φραιζαρίσματος ήταν αρκετά λιγότερα, ενώ ελάχιστα πειράματα κρυογενικής διάτρησης έχουν λάβει χώρα από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Ο κύριος λόγος που οι επιστήμονες επικεντρώθηκαν σε πειράματα τόννευσης είναι πιθανότατα η εύκολη πρόσβαση του κρυογενικού ρευστού στην ζώνη κοπής και η μη τροποποίηση και χρησιμοποίηση κατάλληλων κοπτικών εργαλείων. Για την εφαρμογή της κρυογενικής ψύξης σε πειράματα φραιζαρίσματος και διάτρησης είναι απαραίτητο το κοπτικό εργαλείο να είναι εφοδιασμένο με κατάλληλους εσωτερικούς αγωγούς για την διανομή του κρυογενικού. Κάτι τέτοιο είναι χρονοβόρο και οικονομικά μη συμφέρον. Σε κατεργασίες φραιζαρίσματος και διάτρησης, η εξωτερική ψύξη της ζώνης κοπής απαιτεί υψηλότερη πίεση και μεγαλύτερο ρυθμό ροής, ώστε να είναι αποτελεσματικό το κρυογενικό ρευστό.

Η πιο συνήθης επιλογή κρυογενικού μέσου στα πειράματα που μελετήθηκαν ήταν το LN_2 και αυτό γιατί το άζωτο βρίσκεται σε αφθονία και είναι ένα άοσμο και αβλαβές αέριο. Αντίθετα το CO_2 ανήκει στα αέρια του θερμοκηπίου. Κατά την κρυογενική κατεργασία με διοξείδιο του άνθρακα δεν υπάρχει κάποιος κίνδυνος, αφού το CO_2 βρίσκεται σε κρυογενική θερμοκρασία αλλά μετά την χρησιμοποίησή του επιστρέφει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθιστώντας το εκ νέου επικίνδυνο.

Αναφορικά με την επιλογή των κοπτικών εργαλείων, η πλειονότητα των δοκιμών χρησιμοποίησε κοπτικά από καρβίδια με επικάλυψη TiAlN , κεραμικά και πλακίδια από καρβίδια του βολφραμίου. Είναι απαραίτητο κατά την κρυογενική κατεργασία να προτιμώνται κοπτικά εργαλεία με υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ώστε το κρυογενικό ψυκτικό να απορροφά όλη την θερμότητα.

Παρόλη την εικόνα των επιστημονικών δημοσιεύσεων, οι οποίες αξιολογούν την κρυογενική ψύξη ως μια βιώσιμη επιλογή με εξαιρετικά αποτελέσματα έναντι των εναλλακτικών, τίθεται το ερώτημα γιατί οι μεγάλες βιομηχανίες παραγωγής δεν έχουν υιοθετήσει αυτήν την τεχνολογία. Υπάρχει περιορισμένος αριθμός βιομηχανιών που έχουν εισάγει την κρυογενική ψύξη με την Boeing και την Airbus να αποτελούν τα ελάχιστα παραδείγματα. Ελάχιστες είναι επίσης και οι εταιρίες κατασκευής εργαλειομηχανών και κοπτικών, οι οποίες προσφέρουν τεχνολογία κρυογενικής ψύξης.

Αν και σε όλη την έκταση της παραπάνω εργασίας καταγράφονται τα θετικά της κρυογενικής ψύξης, πρέπει να αναφερθούν κάποιοι από τους λόγους που η βιομηχανία παραγωγής δεν έχει ακόμα προσαρμοστεί στην καινούρια αυτή τεχνολογία. Πρώτον, υπάρχει έλλειψη κατάρτισης από τους χειριστές των εργαλειομηχανών όπως επίσης και έλλειψη κατάλληλων κοπτικών για κρυογενικές κατεργασίες φραιζαρίσματος και διάτρησης. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και ο συντηρητισμός των κατασκευαστών εργαλειομηχανών και βιομηχανών παραγωγής ενώ και το κόστος της αρχικής εγκατάστασης είναι μεγάλο. Τέλος, το επίπεδο βελτιστοποίησης της ροής του κρυογενικού ρευστού παραμένει ακόμα υψηλό.

Σε κάθε περίπτωση, η κρυογενική κατεργασία είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος αφαίρεσης υλικού και η συνεχής αύξηση των ερευνών που μελετούν τα αποτελέσματά της αποδεικνύουν πως η κατεργασία αυτή θα απασχολήσει την βιομηχανία και στο μέλλον.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] I.S.Jawahir, H.Attia, D.Biermann, J.Duffou, F.Klocke, D.Meyer et.al. , “Cryogenic-Manufacturing processes”, CIRP Annals- The International Academy for Production Engineering, USA, 2016
- [2] Yoseph Bar-Cohen, Low Temperature Materials and Mechanisms, Chapter 6, Florida, USA, 2016, p.p 1-4
- [3] Franci Pušavec, Antun Stoić, Janez Kopač, “The Role of Cryogenics in Machining Processe”, Slovenia,2013
- [4] [D. Mohan Lal, S. Renganarayanan, A. Kalanidhi “Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels“ Cryogenics,2001, VOL.41, pp.149-155 Flavio J. da Silva, Sinesio D. Franco, Alisson R. Machado, Emmanuel O. Ezugwu, Antonio M. Souza Jr. “Performance of cryogenically treated HSS tools“ Wear, 2006, VOL.261, pp. 674–685
- [5] Faidra Papanelopoulou , Louis Paul Cailletet: The liquefaction of oxygen and the emergence of low-temperature research . Notes and Records: The Royal Society Journal of the History of Science. 2013; 67(4): 355–373
- [6] Γ. Πεχλιβάνογλου , Κρυογενική Ανακρυστάλλωση, research and Development available at file:///C:/Users/mszyc1/Downloads/cryogenics4upload.pdf
- [7] D.P.Adler, W.W-SHii, D.J.Michalek and J.W.Sutherland, “Examining the Role of Cutting Fluids in Machining and Efforts to Adress Associated Environmental/Health Concerns”, Machining Science and Technology, USA, 2006
- [8] Vamsi Krishna Mamidi and M.Anthony Xavior, “A Review on Selection of Cutting Fluids”, Abhinav Journal, India, 03/2019
- [9] Pei Yan, Yiming Rong and Gnag Wang, “The effect of cutting fluids applied in metal cutting process”, Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, UK, June, 2016
- [10] Standards Advisory Committee on Metalworking Fluids, Department of Labor Occupational Safety and Healthy Administration
- [11] Dr. Neil Canter, “ The Possibilities and Limitations of Dry Machining”, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Illinois, November,2003
- [12] J.HaiderM.S.J.Hashmi, Comprehensive Materials Processing, 8.02 - Health and Environmental Impacts in Metal Machining Processes , Volume 8, 2014, Pages 7-33
- [13] N.Boubekri, V.Shaikh, “Machining Using Minimum Quantity Lubrication : A Technology for Sustainability”, International Journal of Applied Science and Technology, USA, 2012
- [14] A.K. Sharma, A.K.Tiwari, A.R.Dixit, “Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review”, Journal of Cleaner Production, USA, July 2016
- [15] M.H.S. Elmuuafi, D. Kurnianwan, M.Y. Noordin, “Use of Castor Oil as Cutting Fluid in Machining of Hardened Stainless Steel with Minimum Quantity of Lubricant”, Procedia CIRP, USA, 2016
- [16] <https://www.grouphes.com/article/the-truth-about-mql-system>
- [17] Tim Walker “The MQL Handbook” - Conference Paper , January 2013
- [18] A.Stoll, R.Wertheim, K.Busch,C.Hochmuth,B.Pause, “Investigation of cooling and lubrication strategies for maching high-temerature alloy”, Germany, 3rd ICMS, 2015
- [19] Franci Pušavec, Antun Stoić, Janez Kopač, “Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies”., Journal of Cleaner Production, pp. 174-184.
- [20] Ghosh, Ranajit, “Technology Assessment on Current Advanced Research Projects in Cryogenic Machining “, The Association for Manufacturing Technology , 2006
- [21] B. D .Jerold, M. P. Kumar, “Experimental comparsion of carbon-dioxide and liquid nitrogen cryogenic coolants in turning of AISI 1045 steel”, Elsevier, Vol.52, Issue 10, October 2012

- [22] Ronald G. Ross Jr, Refrigeration Systems for Achieving Cryogenic Temperatures, CIT, Jet Propulsion Laboratory, Chapter 6
- [23] S. Tirelli, E. Chiappini, M. Strano, M. Monno, "Experimental Comparison between Traditional Cryogenic Cooling Condition in Rough Turning of Ti-6Al-4V", KEM, May 2014
- [24] Pusavec, Franci and Kopac, Janez, « Sustainability Assessment: Cryogenic Machining of Inconel 718 », International Journal of Mechanical Engineering 57, 2011
- [25] Τεχνολογίες Παραγωγής, Ι.Νικολός, Ν. Τσουρβελοπούλης, Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά 2014
- [26] Μηχανουργική Τεχνολογία, Α.Θ.Αντωνιάδης, Τόμος Β', Κατεργασίες Κοπής, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφ. 4-6
- [27] Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, Callister D. William, Rethwisch G. David, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012
- [28] A. Bensely a,*, S. Venkatesh a, D. Mohan Lal a, G. Nagarajan a, A. Rajadurai b, Krzysztof «Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized En 353 steel» June 2008
- [29] F.Pusavec, H.Hamdi, J.Kopac, I.S.Jawahir, "Surface integrity in cryogenic machining of nickel based-alloy – Inconel 718", Journal of Materials Processing Technology, December 2010
- [30] Y.M.Wang, E.Ma,R.Z.Valliev,Y.T.Zhn, "Tough Manostuctured Metals as Cryogenic Temperatures", Advanced Materials, USA, February 2004
- [31] N.R.Dhar, S.Paul, "The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels", Elsevier, Wear, 2001
- [32] T.C.Yap, Sivaraos, C.S.Lim, J.W.Leau, "Surface Roughness and Cutting Forces in Cryogenic Turning of Carbon Steel", Journal of Engineering Science and Technology, July 2015
- [33] V.Dhokia, A.Shokrani, S.T.Newman, "Effects of Cryogenic Cooling in the Surface Quality and Tool Wear in End-Milling 6061 – T6 Aluminum" , University of Bath, UK, 2012
- [34] S.Ramesh, B.Bhuvaneshwari, G.S.Palari et.al. "Enhancing the corrosion resistance performance of structural steel via a novel deep cryogenic treatment procees" Vacuum, January 2019
- [35] N.b. Fredj, H.Sidhom, "Effects of cryogenic cooling on the fatiguy strength of the AISI 304 stainless steel ground componets", Cryogenics, June 2006
- [36] Machai, Christian, Biermann, Dirk, "Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: cooling with carbon dioxide snow", Journal of Material Processing technology, p.p 1175 – 1283
- [37] Klocke F, et al. "High Performance Cutting to difficult to cut materials through targeted selection of lubricoolant strategy" 9th International Conference oh High Speed Machining
- [38] Mon Thet, et al. , "Performance of Cryogenic Machining with Nitrogen Gas in Machining of Titanium", Applied Mechanics and Materials, 2008
- [39] L.Morum et al, "A review of cryogenic cutting", Sandrik 2011
- [40] M.S.Birmingham, J.Kirch et al. "New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic turning Ti-6Al-4V" ,International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011
- [41] C. Machai, H. Abahams, D. Biermann, "Machining of β -titanium under Cryogenics Conditions : Process Cooling by CO₂-Snow" , Future Trends in Production Engineering, 2013
- [42] K.A.Venugopal, S. Paul, A.B. Chattopadhyay, " Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling", Journal Wear, 2007
- [43] M. Dhananchezian, M.P. Kumar , "Cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts", Cryogenis 51, 2011

- [44] A. Damir, A. Sadek, H. Attia, "Characterization of machinability and environmental impact of cryogenic turning of Ti-6Al-4V" 25th CIRP Life Cycle Engineering Conf, May 2018, Denmark
- [45] S.R. Nandan, U. Ravikiran, A.A. Rao, "Machining of Tungsten Heavy Alloy under Cryogenic Environment", 3rd International Conf. on Materials Processing and Characterisation, 2004
- [46] F. Pusavec, "Porous tungsten machining under cryogenic conditions", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012
- [47] Chetan, S. Ghosh, P.V. Rao, "Comparsion between sustainable cryogenic techniques and nano-MQL cooling mode in turning of nickel-based alloy". Journal of Cleaner Production, 2018
- [48] C.V.Yildirim, "Experimental comparsion of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625" , Tribology International, April, 2019
- [49] P. Sivaiah, D. Chakrdhar, "Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel. A comparsion with MQL, wet, dry machining", Journal of Manufacturing Science and Technology, March 2018
- [50] M. Putz, M. Dix, N. Neubert, G. Schmidt, R. Nerthheiss "Investigation of Turning Elastomers Assisted with Cryogenic Cooling", 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing, 2016
- [51] Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar, "Wear of CBN tool in turning of silicon nitride with cryogenic cooling", Elsevier 1997
- [52] N. R. Dhar, S. Paul, A. B. Chattopadhyay, "The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuransy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steel", Wear, 2002
- [53] L.S. Ahmed, M. P. Koumar, "Cryogenic Drilling of Ti-6Al-4v Alloy under liquid Nitrogen cooling", Materials and Manufacturing Processes, 2016
- [54] A. H. Kheireddine, A. H. Ammouri, I. Lu, I.S. Jawahir, R.F. Hamade, "An FEM analysis with experimental Validation to study the Hardness of In-Process Cryogenically Cooled Drilled Holes in Mg Az31b" 14th CIRP CMMO, 2013
- [55] D. Biermann, H. Hartmann "Reduction of Burr Formation in Drilling Using Crogenic Process Cooling" 45th CIRP CMS, 2012
- [56] A. Cicek, I. Uygur, T. Kivak, N. A. Ozbek, "Machinability of AISI 316 Austenitic Stainless Steel with Cryo-Treated M35 High-Speed Steel Twist Drills", Journal of Manufacturing Sciences and Engineering, 2016
- [57] R. Neuyebauer, N. Drossel, R. Wertheim, C. Hochmitt, M .Dix, "Resurce and Energy Efficiency in Machining Using High-Performance and Hybrid Processes", Procedic CIRP, 2012
- [58] S. Joshi, K.Rawat, A.S.S Bdan, "A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP", Journal of Materials Processing Technology, 2018
- [59] G.M.Pittali, "A study of the effect of CO2 cryogenic coolant in end milling of Ti-6Al-4V", 8th CIRP on High Perfomance Cutting, 2018
- [60] A. Shokrani, V.Dhokia, S.T. Newman, "Invesstigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy" Journal of Manufacturing Processes, 2016
- [61] Truesdale, Samuel L. and Shin, Yung C. "Microstructural analysis and machinability improvement of udimet 720 via cryogenic milling" Machining Science and Technology: An International Journal, 2009
- [62] T. Schaarschmidt, Cordes S.E. ,Hubner, F. " Turbine Blade Machining by Use of Carbon Dioxide as Cryogenics", 3rd ICMC - Hybrid Processes, 2015.

- [63] N.H.A. Halimb, C.H.C. Haron, , J.A. Ghanian, M.F. Azhar "Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened Inconel 718 under dry and cryogenic CO₂ conditions", Wear 426-427, 2019
- [64] S. Ravi, M. Kumar, "Experimental investigations on cryogenic cooling by liquid nitrogen in the end milling of hardened steel", Cryogenics, 2011