

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

"Υπολογιστική μελέτη της χρήσης νανορευστών ως υγρών κοπής υπό συνθήκες ελάχιστης ποσότητας ψυκτικού υγρού κατά τη λείανση."

Κότσιρας Ηλίας

Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

Πρόλογος Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το γενικότερο θέμα που ασχολείται η παρούσα εργασία είναι η χρήση των νανορευστών ως υγρών κοπής με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών της κατεργασίας της λείανσης ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα κατεργασίας αλλά και όσο το δυνατόν γίνεται πιο φιλική κατεργασία προς το περιβάλλον.

Η παρούσα μελέτη ξεκινάει με μια γενική ανάλυση της κατεργασίας της λείανσης και κάποια βασικά χαρακτηριστικά της καθώς και ανάλυση των υγρών κοπής που χρησιμοποιούνται ευρέως κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Στη συνέχεια γίνεται μια παρουσίαση των μεθόδων των νανορευστών και εξηγούνται οι χρήσεις και οι εφαρμογές τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς το μοντέλο του Jaeger και γίνεται εκτενής αναφορά σε μελέτες, με βάση την βιβλιογραφία, που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την χρήση νανορευστών κατά την κατεργασία της λείανσης. Γίνεται προσπάθεια να συλλεχθούν τα κυριότερα συμπεράσματα των επιστημόνων που ασχολήθηκαν με τον αρκετά σύγχρονο και διαρκώς αναπτυσσόμενο κλάδο της χρήσης των ιδιοτήτων των νανορευστών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της υπολογιστικής μοντελοποίησης του θερμικού μοντέλου με δύο ξεχωριστές περιοχές για το ψυκτικό υγρό και το στερεό τεμάχιο. Περιγράφονται η κατασκευή της γεωμετρίας, η επιλογή των υλικών, οι επιλογές των φυσικών παραμέτρων με έμφαση στην μοντελοποίηση της θερμοκρασίας λείανσης. Επιπλέον περιγράφεται η κατασκευή του πλέγματος, καθώς και οι ρυθμίσεις που τέθηκαν για την επίλυση του προβλήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο που δημιουργήθηκε. Συνοπτικά, μελετήθηκε η επίδραση της πυκνότητας και του σχήματος του πλέγματος, οι διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής του ρευστού, το πάχος της επιφάνειας στην οποία εισέρχεται το ρευστό καθώς και διάφοροι τύποι νανορευστών. Υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές των τάσεων για κάθε είδος νανορευστού και τέλος μελετήθηκε μια διαφορετική κατανομή της πηγής.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται μια ανακεφαλαίωση των κύριων ευρημάτων της εργασίας, καθώς και κάποιες προτάσεις για την εξέλιξη του μοντέλου.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας τον επίκουρο καθηγητή, κ. Μαρκόπουλο Άγγελο, για την δυνατότητα που μου προσέφερε να εργαστώ σε ένα πολύ σύγχρονο αντικείμενο, ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, καθώς η χρήση του μοντέλου με τις δύο περιοχές δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην μέχρι τώρα βιβλιογραφία και είναι απαραίτητη η σωστή μοντελοποίηση του για την ανάλυση της επίδρασης των νανορευστών στην λείανση. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Κάρκαλο, για τη συνεχή, ουσιαστική και μεθοδική βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα στάδια δημιουργίας της εργασίας αυτής, η οποία υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που μου συμπαραστάθηκαν σε όλα τα χρόνια φοίτησής μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η δημιουργία, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μοντέλου λείανσης ελάχιστης ποσότητας ψυκτικού υγρού (Minimum Quantity Lubrication) με νανορευστά. Στόχος είναι η όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική απόκριση του μοντέλου υπό διάφορες συνθήκες. Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο Comsol Multiphysics.

Αρχικά κατασκευάστηκε η δισδιάστατη γεωμετρία της διάταξης κατεργαζόμενου τεμαχίου-περιοχής ρευστού στρωτής ροής, βασισμένη σε διάταξη από τη βιβλιογραφία. Η πηγή θερμότητας ορίστηκε στην διεπιφάνεια των δύο περιοχών. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μοντελοποίησης, το μοντέλο προσομοιώθηκε για διαφορετικές συνθήκες. Η προσομοίωση έγινε στο πεδίο του χρόνου για σταθερή ταχύτητα πρόωσης.

Αρχικά, έγινε μελέτη ανάμεσα σε διαφορετικά πλέγματα ώστε να αποσαφηνιστεί ποιο ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, εξετάσθηκαν διαφορετικές παράμετροι της προσομοίωσης όπως η ταχύτητα εισόδου του ρευστού και το πάχος της άνω επιφάνειας. Αφού μελετήθηκαν οι παράμετροι της προσομοίωσης, επιλέχθηκε ο ακριβέστερος ώστε να εξεταστούν άλλοι 5 τύποι νανορευστών. Μετρήθηκαν οι θερμικές τάσεις που αναπτύχθηκαν από την χρήση και των 6 νανορευστών και δοκιμάστηκε η χρήση διαφορετικού τύπου πηγής θερμότητας.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω συγκρίθηκαν άμεσα με την διαθέσιμη βιβλιογραφία ώστε να κριθεί η εγκυρότητα του μοντέλου. Τα αποτελέσματα υπήρξαν αρκετά ικανοποιητικά για τις απαιτήσεις της βιβλιογραφίας.

Abstract

In this diploma thesis, a finite element model was developed for cases of Minimum Quantity Lubrication grinding with nanofluids. The aim of the thesis is to make the model as realistic as possible under various conditions. For the simulations, Comsol Multiphysics computational package was used.

Initially, the geometry of the two-dimensional model consisting of the region of cooling fluid and the region of the workpiece was constructed, based on an experimental setup described in the literature. The heat flux source was defined at the interface of the two regions. After completing the modeling process, the model was simulated for different conditions. The simulation was performed in the time domain for constant feed speed.

Then, an investigation was conducted regarding different types of meshes to clarify which one best meets the simulation demands. Different simulation parameters were then examined, such as the fluid inlet velocity and the thickness of top region. After studying the simulation parameters, the most accurate one was chosen to simulate the other 5 types of nanofluids. The thermal stresses developed from the use of all 6 nanofluids were calculated and the use of a different type of heat source was tested.

The results of the above simulation were compared directly with the results of experimental studies in the relevant literature to judge the validity of the model. The results were considered quite satisfactory compared to the experimental results in the literature

Πίνακας Περιεχομένων

1. Λείανση	10
1.1 Ορισμός	10
1.2 Είδη λείανσης	10
1.3 Λειαντικός τροχός	12
1.3.1 Γενικά	12
1.3.2 Χαρακτηριστικά	14
1.4 Υγρά κοπής	14
1.4.1 Γενικά	14
1.4.2 Μελέτες και πειραματικές εφαρμογές	15
1.5 Νανορευστά	16
1.5.1 Ορισμός	16
1.5.2 Ιστορική αναδρομή	17
1.5.3 Ιδιότητες νανορευστών	18
1.5.4 Μέθοδοι κατασκευής νανορευστών	19
1.5.5 Εφαρμογές	21
2. Ερευνητικές και πειραματικές μελέτες για την κατεργασία της	
λείανσης	22
2.1 Περιγραφή μοντέλων Jaeger και FEM (Finite Element Method)	22
2.2 Περιγραφή μελετών που χρησιμοποιούν μεθόδους νανορευστών σε κατεργασίες λείανσης	24
2.2.1 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων των νανορευστών σε διαδικασίες MQL λείανσης	24
2.2.2 Πειραματικός χαρακτηρισμός σε φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία μικρο- λείανσης κράματος τιτανίου χρησιμοποιώντας λίπανση ηλεκτροψεκασμού με ροή αέ με νανορευστά	ρα 27
2.2.3 Πειραματική εκτίμηση μιας φιλικής προς το περιβάλλον διαδικασίας λείανσης τη χρήση MQL νανορευστών με κρυογονικό αέρα	με 29
2.2.4 Έρευνες για την λίπανση στη λείανση με χρήση νανορευστών MWCNTs με χρ υποβοηθούμενη από υπερήχους διασποράς	ήση 32
2.2.5 Αποτελεσματικότητα μεταφοράς θερμότητας σε λείανση MQL με διαφορετικά νανορευστά για κράματα με βάση το Νi χρησιμοποιώντας φυτικό έλαιο	36
2.2.6 Άλλες μελέτες	38
3. Περιγραφή-Υλοποίηση υπολογιστικού μοντέλου	42
3.1 Το πακέτο λογισμικού Comsol Multiphysics	42
3.2 Σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου	42
3.3 Καθορισμός κίνησης της πηγής	44

3.4 Επιλογή υλικών προσομοίωσης κατεργασίας	. 45
3.5 Ρυθμίσεις φυσικών μοντέλων	. 47
3.6 Υπολογισμός θερμικών τάσεων	. 50
3.7 Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης (meshing)	. 50
3.8 Ρυθμίσεις επίλυσης	. 52
4. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	. 54
4.1 Μελέτη πλέγματος	. 54
4.2 Μελέτη των 2 παραμέτρων της προσομοίωσης	. 59
4.2.1 Μελέτη πάχους της άνω επιφανείας του ρευστού	. 59
4.2.2 Μελέτη ταχύτητας εισόδου του ρευστού	. 62
4.3 Μελέτη διαφορετικών ειδών νανορευστών	. 66
4.4 Μελέτη διαφορετικού είδους πηγής	. 75
5. Σύνοψη και μελλοντικές κατευθύνσεις	. 80
Βιβλιογραφία	. 82

1. Λείανση

1.1 Ορισμός

Η λείανση είναι κατεργασία αποβολής υλικού – κυρίως αποπεράτωσης – με κοπτικό εργαλείο τον λειαντικό τροχό (grinding wheel) που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Ο λειαντικός τροχός αποτελείται από πολλές κοπτικές ακμές, τους λειαντικούς κόκκους (abrassives, grits), οι οποίοι είναι άμορφοι χωρίς καθορισμένη γεωμετρία. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ενεργούν ταυτόχρονα στην αποβολή υλικού μεγάλος αριθμός λειαντικών κόκκων. Άρα, η λείανση είναι κατεργασία κοπής πολλαπλής σημειακής επαφής. [1]

1.2 Είδη λείανσης

Υπάρχουν διάφορα είδη λείανσης, η χρήση του καθενός καθορίζεται από το μέγεθος, το σχήμα, τα χαρακτηριστικά και τον επιθυμητό ρυθμό παραγωγής. Μερικά είδη αναφέρονται περιληπτικά παρακάτω:

Επίπεδη λείανση (surface grinding): Πρόκειται για λείανση επίπεδων επιφανειών και διακρίνεται σε περιφερική και μετωπική λείανση, ανάλογα με τη διάταξη του κοπτικού τμήματος του τροχού ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια. [1] (εικόνα 1)



Four types of surface grinding with horizontal or vertical spindles, and with reciprocating linear motion or rotating motion of the workpiece.

Εικόνα 1:Επίπεδη λείανση

Κυλινδρική λείανση (cylindrical grinding): Για την κατεργασία κυλινδρικών επιφανειών. Διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική κυλινδρική λείανση. [1] (εικόνα 2)



Εικόνα 2: Κυλινδρική λείανση

Άκεντρη λείανση (centerless grinding): Αποτελεί είδος κυλινδρικής λείανσης όπου το τεμάχιο λειαίνεται ελεύθερο μεταξύ δύο τροχών. [1] (εικόνα 3)



Εικόνα 3: Άκεντρη λείανση

Λείανση μεγάλης πρόωσης (creep-feed grinding): Ανακαλύφθηκε στην Γερμανία τα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τους Edmund και Gerhard Lang. Η διαφορά από την κανονική λείανση, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για να τελειώνει επιφάνειες, είναι ότι η CFG χρησιμοποιείται για αφαίρεση μεγαλύτερης ποσότητας υλικού, συγκρινόμενη με την τόρνευση (turning) και το φρεζάρισμα (milling). [2] (Εικόνα 4)



Εικόνα 4: Λείανση μεγάλης πρόωσης

Λείανση μορφής (form grinding): Και αυτό το είδος ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία της κυλινδρικής λείανσης. Ο λειαντικός τροχός έχει ειδικά διαμορφωμένο περίγραμμα, το οποίο αποδίδει στο τεμάχιο κατά την κατεργασία. [1] (εικόνα 5)



Εικόνα 5: Λείανση μορφής [1]

Electrolytic in-process dressing (ELID) grinding: Πρόκειται για μία από τις πιο σύγχρονες και πιο ακριβής μεθόδους λείανσης. Ο λειαντικός τροχός εμποτίζεται ηλεκτροχημικά πριν και κατά τη διάρκεια της κατεργασίας διατηρώντας την εξαιρετική ακρίβεια λείανσης. [3] (Εικόνα 6)



Εικόνα 6: Electrolytic in-process dressing (ELID) grinding

1.3 Λειαντικός τροχός

1.3.1 Γενικά

Ο λειαντικός τροχός αποτελείται από (εικόνα 7):

- Τους λειαντικούς κόκκους που είναι από πολύ σκληρό υλικό και παίζουν τον ρόλο μικροσκοπικών κοπτικών εργαλείων.
- Το δεσμό (bond) που είναι το συνδετικό υλικό που συγκρατεί τους κόκκους μεταξύ τους και αποδίδει γεωμετρική μορφή στον τροχό.

Το πορώδες (porosity) που είναι το σύνολο των κενών που σχηματίζονται στο εσωτερικό του τροχού και διευκολύνουν την απομάκρυνση των αποβλήτων και την πρόσβαση του υγρού κοπής στη θέση κατεργασίας. [1]



Εικόνα 7: Συστατικά λειαντικού τροχού [1]

Το κοπτικό εργαλείο αποτελείται από τα εξής υλικά κόκκου (abrasive type), ανάλογα με το είδος του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το προς λείανση τεμάχιο:

- Φυσικό ή τεχνητό κορούνδιο: Πρόκειται για Al2O3. Λαμβάνεται φυσικά από το ορυκτό σμύριδα ή παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο από βωξίτη
- Ανθρακοπυρίτιο (SiC): Παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο με πρώτες ύλες χαλαζιακή άμμο και άνθρακα
- Διαμάντι
- Κυβικός βοριονιτρίτης (CBN)
- > Κεραμικά

Οι λειαντικοί τροχοί που αποτελούνται από κεραμικά, ανθρακοπυρίτιο και κορούνδια είναι συμβατικοί. Ενώ οι λειαντικοί τροχοί που αποτελούνται από διαμάντι και βοριονιτρίτη ονομάζονται υπερ-κόκκοι.

Οι τροχοί κορουνδίου κυκλοφορούν στο εμπόριο σε διάφορα χρώματα, ανάλογα με τις προσμίξεις που περιέχουν. Τα συνήθη χρώματα τροχών είναι: μαύρο, καφέ, κόκκινο και λευκό. Το κόστος του τροχού αυξάνεται από το μαύρο στο λευκό καθώς είναι πιο καθαρής σύνθεσης. Χρησιμοποιούνται για λείανση σκληρών και συνεκτικών υλικών. Οι κόκκοι ανθρακοπυριτίου έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από τους κόκκους κορουνδίου. Οι τροχοί ανθρακοπυριτίου χρησιμοποιούνται για όλα τα ψαθυρά υλικά – μαλακά ή σκληρά – καθώς επίσης για τα πολύ μαλακά υλικά. Η χρήση τροχών από

CBN βαίνει συνεχώς αυξανόμενη μιας και προσφέρει πιο αποτελεσματική λείανση με μοναδικό μειονέκτημα το υψηλό κόστος. [1]

1.3.2 Χαρακτηριστικά

Κόκκωση (grain size): Καθορίζει το μέσο μέγεθος των κόκκων του λειαντικού τροχού και εκφράζεται με το αντίστοιχο μέγεθος κόσκινου από το οποίο περνούν οι κόκκοι.

Σκληρότητα (wheel grade): Εκφράζει τη σχετική δύναμη συγκράτησης του κόκκου από το δεσμό και όχι τη σκληρότητα του κόκκου. Υπάρχουν κατηγορίες σκληρότητας των δεσμών από το A (μαλακό) μέχρι το Z (σκληρό). Κρίσιμο μέγεθος είναι η αναλογία ανάμιξης των υλικών κόκκων και δεσμού και το κενό μεταξύ αυτών.

Υφή (Structure): Αναφέρεται στο πορώδες της κατασκευής του λειαντικού τροχού και η υφή του λειαντικού τροχού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να διευκολύνεται η απομάκρυνση των αποβλήτων. [1]

1.4 Υγρά κοπής

1.4.1 Γενικά

Ψυκτικά και λιπαντικά είναι τα υγρά κοπής που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συμβατικές κατεργασίες στις μέρες μας. Χωρίς αμφιβολία οι ιδιότητες τους προσφέρουν σημαντικά στην ποιότητα της κατεργασίας όμως κατά την εξέταση του περιβαλλοντικού κόστους και των κινδύνων που σχετίζονται με την εκτεταμένη χρήση τους, οφείλουμε να αναζητήσουμε νέες λύσεις. Η επιλογή και η βέλτιστη εφαρμογή ενός υγρού κοπής κατά τη διάρκεια της λείανσης είναι θέμα πρωταρχικής σημασίας. Η επίτευξη ευνοϊκής ψύξης, κατάλληλων συνθηκών λίπανσης, η αποτελεσματική αφαίρεση του αποβλήτου και η προστασία από τη διάβρωση είναι οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται από το ρευστό [5]. Επιπλέον, το κόστος χρήσης υγρών κοπής είναι αρκετές φορές υψηλότερο από το κόστος των εργαλείων [16]. Συνεπώς, το κόστος και οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τη χρήση των υγρών κοπής πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό λειτουργίας. Μαζί με το κόστος του ίδιου του υγρού κοπής, πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη και άλλες πτυχές: η διαθεσιμότητα του, η δυνατότητα ανακύκλωσης, τα μέτρα ασφαλείας, κλπ. [4]

Το ψυκτικό υγρό πρέπει να είναι καθαρό και σε καλή κατάσταση, επομένως συστήματα που φιλτράρουν είναι υποχρεωτικά στις μέρες μας. Όμως τα συστήματα αυτά είναι ακριβά και μπορεί να καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στο εργαστήριο. Τεχνολογίες για την μείωση της κατανάλωσης των ψυκτικών μέσων και των λιπαντικών έχουν συνεπώς αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμες σε συμβατικές διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας. Τεχνικές, όπως η Ελάχιστη Ποσότητα Ψυκτικού Υγρού (MQL) (εικόνα 8), βρίσκουν ήδη εφαρμογή στη βιομηχανία ειδικά σε διαδικασίες όπως η τόρνευση, η διάτρηση ή ακόμα και το φρεζάρισμα. Ωστόσο, στην περίπτωση των διαδικασιών λείανσης, αυτοί οι τύποι λύσεων απέχουν πολύ από τη βιομηχανική εφαρμογή [4]. Σε γενικές γραμμές, η εφαρμογή της τεχνικής MQL μπορεί να μειώσει τις δυνάμεις λείανσης, την κατανάλωση ενέργειας, τη φθορά των τροχών, το κόστος παραγωγής καθώς επίσης και να παράγει λεπτότερο φινίρισμα και καλύτερη ακεραιότητα στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε σύγκριση με τις πιο συμβατικές μεθόδους. [16]



Εικόνα 8: Ανάλυση θερμότητας της Minimum Quality Lubrication (MQL)

Κατά την λείανση επιτυγχάνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η αφαίρεση υλικού συμβαίνει εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται. Κατά συνέπεια, πρέπει να αντιμετωπιστούν μεγάλες ποσότητες της παραγόμενης θερμότητας αλλιώς σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να παρουσιαστεί θερμική βλάβη του κατεργαζόμενου τεμαχίου, επιτάχυνση της φθοράς του τροχού και θερμικά προκαλούμενες παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα κατεργασία χαμηλής ποιότητας. [6]

1.4.2 Μελέτες και πειραματικές εφαρμογές

Δύο ευρείες περιοχές μπορούν να αναγνωριστούν όταν πρόκειται για τη βέλτιστη εφαρμογή ψυκτικών και λιπαντικών κατά την λείανση: αφενός, οι πτυχές που σχετίζονται με τη γεωμετρία και την τοποθέτηση του ακροφυσίου είναι κρίσιμες για τη μεγιστοποίηση της παροχής που φθάνει στο εσωτερικό της ζώνης επαφής του τροχούτεμαχίου και από την άλλη πλευρά, οι προσεγγίσεις που οδηγούν στη μείωση ή, όπου είναι δυνατόν, στην πλήρη εξάλειψη του ρευστού λείανσης [4]. Η επίδραση της θέσης του ακροφυσίου και η επίδραση των ορίων του αέρα έχουν αντιμετωπιστεί [7]. Σε πρόσφατο έργο, οι Morgan et al. [8] χρησιμοποίησαν την υπολογιστική δυναμική του ρευστού καθώς και πειραματικές τεχνικές για να δείξουν ότι η εφικτή χρήσιμη παροχή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τροχού και τις παραμέτρους λείανσης (πορώδες και ταχύτητα), ενώ η πραγματική χρήσιμη παροχή επηρεάζεται από τη θέση του ακροφυσίου, το σγεδιασμό, το ρυθμό ροής και την ταχύτητα του πίδακα. Σε αυτή την εργασία έγιναν προσομοιώσεις πολλαπλών φάσεων, ενώ πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του σωλήνα Pitot. Η περιοχή της μέγιστης ταχύτητας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την περιοχή πλάτους λείανσης. Αυτό επιτρέπει τον αποτελεσματικό προσδιορισμό της θέσης του ακροφυσίου. Για την creep-feed grinding, όπου η φόρτιση του τροχού είναι ιδιαίτερα σημαντική και έχει ως αποτέλεσμα τη θερμική βλάβη του τεμαχίου εργασίας, οι Cameron et al. [9] έδειξαν ότι ο προσανατολισμός του πίδακα καθαρισμού δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση σ' αυτήν την διαδικασία λείανσης.

Πρόσφατα ερευνητικά έργα υποδηλώνουν τη σκοπιμότητα της ξηρής λείανσης, ωστόσο αυτή η τεχνολογία παρουσιάζει ακόμα σημαντικούς περιορισμούς που αποτρέπουν την πρακτική χρήση της στη βιομηχανία. Ο κύριος λόγος γι 'αυτό είναι ότι

η πλήρης απομάκρυνση του ρευστού κοπής έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες θερμοκρασίες στη διαδικασία, επηρεάζοντας την ακεραιότητα της επιφάνειας και τη γεωμετρική ακρίβεια του τεμαχίου, αυξάνοντας την φθορά των τροχών και την απόφραξη [10,11]. Παρόλα αυτά, τα πιθανά οφέλη αυτής της τεχνολογίας και οι δυνατότητες που προσφέρει για την άμεση μέτρηση των μεταβλητών διαδικασίας δικαιολογούν την περαιτέρω έρευνα.

Η κρυογονικά υποβοηθούμενη διαδικασία λείανσης είναι επίσης υπό αξιολόγηση (στην δημοσίευση των Nguyen et al. [12] χρησιμοποιείται υγρό άζωτο). Σε αυτή την μελέτη, η διείσδυση ψυχρού αερίου στη ζώνη επαφής φαίνεται να είναι πολύ περιορισμένη λόγω του πολύ υψηλού ποσοστού εξάτμισης. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αυξηθεί από την τυρβώδη ροή αέρα που παράγεται από την ταχύτητα περιστροφής του τροχού. Τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν οι επιστήμονες είναι ότι επίδραση της διαρροής θερμότητας υπάρχει μόνο πλησίον της ζώνης επαφής.

Η πλήρης εξάλειψη των ρευστών λείανσης είναι ήδη εφικτή στη χημο-μηχανική λείανση (CMG) με μαλακούς τροχούς λείανσης με κόκκους (SAGW), μια αναδυόμενη τεχνολογία για μηχανουργική κατεργασία δισκίου Si μεγάλου μεγέθους με χαμηλό κόστος, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κλασικής λείανσης (χρησιμοποιώντας σωματίδια CeO₂ σε μορφή τροχού λείανσης) και χημική μηχανική στίλβωση (CMP).

Μια εναλλακτική λύση στην ξηρή λείανση μπορεί να βρεθεί σε τεχνικές MQL και στην κρυογονική ψύξη. Στην περίπτωση της λείανσης MQL, η ζώνη επαφής τροχούτεμαχίου τροφοδοτείται με σταγονίδια μίγματος ελαίου και αέρα. Η κατανάλωση λιπαντικού και συνεπώς το κόστος που σχετίζεται με το λιπαντικό μειώνονται δραστικά. Βιβλιογραφικές εργασίες αναφέρουν ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τα σταγονίδια ελαίου μπορούν να φτάσουν στα πέλματα των τροχών βελτιώνοντας σημαντικά τη λιπαντικότητα στη ζώνη επαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποιότητας επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και την αύξηση της ζωής του τροχού. Οι Da Silva et al. [13] ανέλυσαν την επίδραση της διαδικασίας MQL στην επιφανειακή ακεραιότητα των εξαρτημάτων χάλυβα ABNT 4340. Οι Tawakoli et al. έχουν μελετήσει διεξοδικά την εφαρμογή της MQL στην λείανση σε διάφορες ερευνητικές δημοσιεύσεις [14, 15, 56, 72], δίνοντας προσοχή σε πτυχές όπως η επίδραση της σκληρότητας του μέρους του υλικού, των συνθηκών λείανσης, την φύση των κόκκων και τις παραμέτρους λίπανσης.

1.5 Νανορευστά

1.5.1 Ορισμός

Κατά τη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας, ο ταχύτατος ρυθμός ανάπτυξης στον τομέα της νανοτεχνολογίας δημιούργησε πολλές προοπτικές στους επιστήμονες και στους μηχανικούς να εμβαθύνουν σε αρκετούς τομείς. Η ανάπτυξη του τομέα των νανορευστών ήταν μια άμεση συνέπεια της εξέλιξης αυτής. [68-71, 73-81]

Τα νανορευστά είναι ένα μίγμα ρευστών σωματιδίων με μέγεθος της τάξης του νανόμετρου που ονομάζονται νανοσωματίδια. Αυτά τα ρευστά είναι κατασκευασμένα με κολλοειδές αιώρημα μικροσωματιδίων σε ένα ρευστό βάσης. Τα νανοσωματίδια που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοια νανορευστά αποτελούνται από διάφορα υλικά όπως κεραμικά οξείδια (Al₂O₃, CuO), νιτρικά κεραμικά (AlN, SiN), ανθρακικά κεραμικά (SiC, TiC), μέταλλα (Cu, Ag, Au), ημιαγωγούς (TiO₂, SiC) καθώς και σύνθετα υλικά που παράγουν κράματα νανοσωματιδίων. Ως βάσεις για το ρευστό χρησιμοποιούνται συνήθως το νερό, η αιθυλενογλυκόλη (EG), το λάδι μηχανής (EO), το λάδι αντλίας και η γλυκερίνη [17].

Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των συμβατικών ρευστών μεταφοράς θερμότητας (HTFs) είναι ένας σοβαρός περιορισμός στην βελτίωση της απόδοσης της λείανσης [17]. Τα νανορευστά κατασκευάζονται, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, μέσω αιωρήσεως νανοσωματιδίων μέσου μεγέθους κάτω των 100 nm σε παραδοσιακά ρευστά μεταφοράς θερμότητας όπως νερό, έλαιο και αιθυλενογλυκόλη κλπ. Τα νανορευστά θεωρούνται ότι προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών ρευστών μεταφοράς θερμότητας. Μια πολύ μικρή ποσότητα νανοσωματιδίων, όταν διασκορπίζεται ομοιόμορφα και αιωρείται σταθερά στα υγρά βάσης, μπορεί να προσφέρει δραματικές βελτιώσεις στις θερμικές ιδιότητες των ρευστών του ξενιστή. Η δημιουργία αιωρήματος νανοσωματιδίων υποφέρει από συσσώρευση νανοσωματιδίων, το οποίο αποτελεί βασικό ζήτημα σε όλη την τεχνολογία που αφορά τα νανορευστά.

Το αποτέλεσμα είναι μια ταιριαστή σειρά αξιόλογων θερμικών ιδιοτήτων που έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον σπουδαστών, επιστημόνων και μηχανικών ανά τον κόσμο να ανακαλύψουν κάθε πιθανή ευεργετική ιδιότητα μπορούν να προσφέρουν τα ρευστά αυτά [17].

1.5.2 Ιστορική αναδρομή

Είναι γνωστό ότι αρκετά από τα μεταλλικά και μη-μεταλλικά υλικά έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από τα γνωστά και συνηθισμένα ρευστά μεταφοράς θερμότητας (HTFs). Συνεπώς, μια πρωτοποριακή ιδέα ήταν η ενίσχυση της θερμικής τους αγωγιμότητας προσθέτοντας στερεά σωματίδια στα HTFs. Έτσι στερεά σωματίδια της κλίμακας του μικρομέτρου, ακόμα και της κλίμακας του χιλιοστού, άρχισαν να προστίθενται στα ρευστά βάσης με σκοπό την δημιουργία προσμίξεων [17]. Όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα των μεγάλων στερεών σωματίδιων είναι ότι προκαλούν εκδορές στην επιφάνεια, βουλώνουν τα μικροκανάλια, διαβρώνουν τους αγωγούς και αυξάνουν την πτώση της πίεσης με αποτέλεσμα να περιορίζουν αρκετά τις πρακτικές τους εφαρμογές. Εκτός από το μεγάλο μέγεθος των σωματιδίων άλλος ένας ανασταλτικός παράγοντας είναι και η δυσκολία κατασκευής μικρών σωματιδίων [58-65].

Τα προβλήματα άρχισαν να ξεπερνιούνται όταν ο Choi [18] και ο Eastman στο Argonne National Laboratory [19] επανεξέτασαν αυτόν τον τομέα με την πρωτοποριακή ιδέα μεταλλικού σωματιδίου στην νανοκλίμακα και ετερογενή διαλύματα ανθρακικών μικροσωλήνων. Πειραματίστηκαν αρκετά με διάφορα νανοσωματίδια, μεταλλικά και μη-μεταλλικά οξείδια σε διάφορες βάσεις ρευστών και τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά. Παρ' όλα αυτά αρκετά πράγματα παρέμειναν απατηλά όσων αφορά τις αιωρήσεις των νανο-χτισμένων σωματιδίων [17].

Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας με τις πιο σημαντικές χρονολογίες για την ανάπτυξη του τομέα των νανορευστών.

1981	D. B. Tuckerman familiarizes microchannel technology.					
1985	Argonne National Laboratory initiated a scheme to establish advanced fluids.					
1991	In Argonne National Laboratory, Choi progresses a microchannel heat exchanger for the settled photo source.					
1992	Argonne national fluid program starts to work from micro to nano with funding cut.					
1993	Thus, research of nanofluids technology came into being 12 years after Tuckermans introduction of mi-					
	crochannel technology. In May, Choi submits first nanofluids proposal and second proposal with Eastman					
	later on.					
1994	Third proposal of nanofluids submits.					
1995	Choi presents a seminal paper on the concept of nanofluids at the American Society Mechanical Engineers					
	Winter Annual Meeting, San Francisco, CA, Nov. 12-17.					
1998-Present	Argonne nanofluids research funded by U. S. Department of Energy (DOE) Office of Basic Energy Sci-					
	ence (BES) and Office of Transportation Technologies to works on both fundamentals and applications of nanofluids.					
1999	Lee's group publishes the first SCI article on nanofluids (Lee [3]).					
2000	President William Jefferson "Bill" Clinton announces the United States' National Nanotechnology Initia-					
	tive (NNI) at Caltech in January. Choi serves as a proposal reviewer for DOE BES and National Science					
	Foundation. Also, he works on the first Nanoscale Science, Engineering and Technology proposals under the NNI.					
2001	Choi's group with Eastman publishes two papers in Applied Physics Letters (Eastman et al. [4], Choi et a [5]).					
2002-2003	The nanofluids research achieved a top position by DOE's Office of Basic Energy Sciences in both 2002 and 2003.					
2007	The first single-theme conference on nanofluids was held. Nanofluids: Fundamentals and Applications,					
	Copper Mountain, CO, Sept.16-20, 2007, the Engineering Conferences International. The first book on					
	nanofluids, Nanofluids: Science and Technology (Das et al. [6]) is published by Wiley.					
2008-till now	Scientists all over the world are attempting to reach at an agreement by publishing their theoretical and					
	experimental investigations so that the use of nanofluids will be effective as it was predicted before.					

Εικόνα 9: Χρονολογικά γεγονότα ανάπτυξης νανορευστών [17]

1.5.3 Ιδιότητες νανορευστών

Αν και μπορεί να ειπωθεί ότι τα νανορευστά είναι ένας τύπος κολλοειδούς διασποράς, το μέγεθος του σωματιδίου, η φάση, οι κύριες φυσικές ιδιότητες, τα βασικά στάδια επεξεργασίας και οι μείζονες εφαρμογές διαφέρουν αρκετά από τις κολλοειδείς διασπορές.

Κολλοειδής ρευστά διασποράς έχουν διακριτές ιδιότητες όπως:

α) περιέχουν σωματίδια μεγέθους 10-100 nm [17]

β) ένα κολλοειδές σε κολλοειδείς διασπορές μπορεί να είναι στερεό, υγρό σταγονίδιο ή φυσαλίδα αερίου, σχηματίζοντας αντίστοιχα, ένα αιώρημα, ένα γαλάκτωμα ή αφρό [17]

γ) τα κολλοειδή έχουν μελετηθεί κυρίως με βάση τις ρεολογικές τους ιδιότητες [17]

δ) η κολλοειδής επεξεργασία έχει πέντε βασικά στάδια: την σύνθεση σκόνης, την παρασκευή του αιωρήματος, την σταθεροποίηση, την απομάκρυνση του διαλυτικού μέσου και την πυκνότητα σε υψηλές θερμοκρασίες [17]

 ε) η επιστήμη των κολλοειδών έχει οδηγήσει σε τεχνολογικές εξελίξεις στα κεραμικά υλικά [17] Από την άλλη πλευρά, οι ιδιότητες των νανορευστών που είναι διαφορετικές από τα κολλοειδή ρευστά είναι οι εξής:

α) τα σωματίδια έχουν μεγέθη 1-100 nm [17]

β) ένα νανοσωματίδιο στα νανορευστά είναι στερεό, σχηματίζοντας οπότε μόνο αιώρημα [17]

γ) το επίκεντρο όσον αφορά τα νανορευστά έχει μετατοπιστεί στις θερμικές ιδιότητες
[17]

 δ) η επεξεργασία με νανορευστά έχει ένα ή δύο βήματα: σύνθεση σκόνης και προετοιμασία αιωρήματος [17]

ε) πρόσφατα εμφανίστηκαν νέες πιθανές εφαρμογές στην ψύξη ηλεκτρονικών, στις μηχανές οχημάτων, στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και στις βιολογικές επιστήμες [17]

1.5.4 Μέθοδοι κατασκευής νανορευστών

Το μέγεθος των σωματιδίων είναι πολύ σημαντικό για τη δημιουργία πρακτικών νανορευστών. Πρώτα απ 'όλα, το μέγεθος του σωματιδίου είναι σημαντικό για την κατασκευή σταθερών νανορευστών. [52-55] Η χρήση πυκνών νανοσωματιδίων μπορεί να αποκλειστεί σε υγρά, επειδή τα σωματίδια έχουν εξαιρετικά υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο έτσι ώστε η αλληλεπίδραση της επιφάνειας των σωματιδίων με τα υγρά να είναι αρκετά ισχυρή ώστε να υπερνικά τις διαφορές στην πυκνότητα. Επιπλέον, τα νανοσωματίδια είναι φορτισμένα και έτσι δεν επιτρέπονται αλληλεπιδράσεις σωματιδίων-σωματιδίων. Δεύτερον, το μέγεθος έχει σημασία στην παραγωγή νανορευστών με νέες ιδιότητες. Το πολύ μικρό μέγεθος σωματιδίων μπορεί να επηρεάσει τους μηχανισμούς μεταφοράς στη νανοκλίμακα. Οι ιδιότητες των νανορευστών καθορίζονται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά της δομής επιφανειών και διεπαφών της νανοκλίμακας αλλά και από τη δυναμική της νανοκλίμακας. Παράδειγμα της σημασίας του μεγέθους του νανορευστού είναι ότι επειδή το μέγεθος των νανοσωματιδίων είναι παρόμοιο με αυτό των βιομορίων, τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως η χορήγηση φαρμάκων. [17]

Η διάχυση των νανοσωματιδίων με ομοιόμορφο τρόπο και η σταθερή τους αιώρηση στο υγρό υποδοχής είναι κρίσιμη για την παραγωγή νανορευστών υψηλής ποιότητας. Η καλή διασπορά και το σταθερό αιώρημα είναι προαπαιτούμενα για τη μελέτη των ιδιοτήτων των νανορευστών και για τις εφαρμογές τους. Το κλειδί για την παραγωγή εξαιρετικά σταθερών νανορευστών είναι η διασπορά μονοσθενών νανοσωματιδίων προτού συσσωρευθούν [17]. Διάφορες διαδικασίες για την παρασκευή νανορευστών έχουν αναπτυχθεί και συνεχίζουν να αναπτύσσονται από τους επιστήμονες. Αυτές οι διαδικασίες μπορούν να συνοψιστούν σε δύο κατηγορίες:

a) One-step method

Η One-step method είναι η διαδικασία που συνδυάζει την προετοιμασία των νανοσωματιδίων με την σύνθεση των νανορευστών, για την οποία τα νανοσωματίδια παρασκευάζονται απευθείας με την τεχνική φυσικής εναπόθεσης ατμού (PVD) ή με υγρή χημική μέθοδο. Σε αυτή τη μέθοδο, οι διαδικασίες της μεταφοράς και της διακριτικής κατανομής των νανοσωματιδίων αποφεύγονται, έτσι ώστε να μειωθεί η συσσώρευση νανοσωματιδίων και να ενισχυθεί η σταθερότητα των ρευστών. Η σύνθεση και η διασπορά νανοσωματιδίων στο ρευστό βάσης πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε μία διαδικασία [17].

Η νέα αυτή διαδικασία που αναπτύχθηκε από τους Eastman et al. [19] που με την βοήθεια της PVD βοήθησε να ξεπεραστούν οι δυνάμεις van der Waals μεταξύ των νανοσωματιδίων και να παραχθούν σταθερά αιωρήματα νανοσωματιδίων Cu χωρίς διασκορπίσεις. Βασικό μειονέκτημα της one-step method με χρήση της PVD είναι ότι δεν μπορεί να συνθέσει νανορευστά σε μεγάλη κλίμακα καθώς επίσης και το κόστος της είναι αρκετά υψηλό, οπότε η one-step chemical method αναπτύσσεται γρήγορα. Οι Zhu et al. [20], Liu et al. [21] χρησιμοποίησαν one-step chemical method για την παραγωγή σταθερών μεταλλικών νανορευστών.

Το κύριο πλεονέκτημα της one-step method είναι ότι τα νανοσωματίδια είναι συγκριτικά καθαρά και έχουν πιο ομοιόμορφα μεγέθη. Υπάρχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα και το πιο σημαντικό είναι ότι τα κατάλοιπα των αντιδράσεων αφήνονται στα νανορευστά λόγω της ατελούς αντίδρασης ή σταθεροποίησης. Επίσης, μόνο ρευστά βάσης με χαμηλή πίεση υπό ατμό είναι συμβατά με αυτή τη διαδικασία [17].

β) Two-step method

Στην two-step method, τα νανοσωματίδια παράγονται πρώτα ως ξηρή σκόνη με φυσικές ή χημικές μεθόδους, όπως συμπύκνωση αδρανούς αερίου και χημική εναπόθεση ατμού. Από την δεκαετία του 1930, η τεχνική της εξάτμισης και συμπύκνωσης του αδρανούς αερίου (τα νανοσωματίδια σχηματίζονται μέσω της εξάτμισης μιας μεταλλικής πηγής σε ένα αδρανές αέριο) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη σύνθεση των πολύ λεπτών μεταλλικών σωματιδίων. Επίσης, η βασική χημική μέθοδος για την παραγωγή νανοσωματιδίων είναι να έχουν κάποια ένωση, τυπικά ένα αλογονίδιο, που να περιέχει ένα άτομο μετάλλου, καθώς και έναν μειωτικό παράγοντα να απομακρύνει τα υπόλοιπα μέρη της ένωσης. Αυτό το βήμα ακολουθείται από διασπορά σκόνης στο ρευστό [17].

Το κύριο πλεονέκτημα της διαδικασία two-step method είναι ότι τα νανοσωματίδια μπορούν να παραχθούν χωριστά με βιομηχανική μέθοδο που επιτρέπει την μαζική και φθηνή παραγωγή. Αυτή η διαδικασία είναι αρκετά καλή για νανοσωματίδια οξειδίων αλλά όχι για μεταλλικά νανοσωματίδια. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η συσσώρευση νανοσωματιδίων [17].

Οι περισσότεροι ερευνητές αγοράζουν νανοσωματίδια σε σκόνη έτσι ώστε να μπορούν να σχηματίσουν κατά βούληση νανορευστά κατά ανάμιξη τους με το ρευστό βάσης. Ωστόσο, αυτά τα νανορευστά δεν είναι σταθερά, αν και η σταθερότητα μπορεί να ενισχυθεί με έλεγχο pH και προσθήκη επιφανειοδραστικού. Μερικοί ερευνητές αγοράζουν εμπορικά διαθέσιμα νανορευστά. Αλλά αυτά τα νανορευστά περιέχουν ακαθαρσίες και νανοσωματίδια των οποίων το μέγεθος είναι διαφορετικό από τις προδιαγραφές των πωλητών [17].

Τα πρωτοποριακά πειράματα με νανορευστά έδειξαν ότι τα νανορευστά έχουν νέες πρωτοφανείς ιδιότητες θερμικής μεταφοράς που οδηγούν σε αξιόλογη ενίσχυση των θερμικών ιδιοτήτων όπως η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διάχυση, το ιξώδες καθώς

και οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με εκείνων των ρευστών βάσης. [49,50] Αναζητείται από τους ερευνητές μια πραγματική συσχέτιση της θερμικής αγωγιμότητας, του ιξώδους και της πυκνότητας καθώς έχουν μελετηθεί εκτενώς όπως και η μεταφορά θερμότητας σε μία ή δύο φάσεις. Μαθηματική περιγραφή των ιδιοτήτων των νανορευστών είναι ένα φαινόμενο που απασχολεί τους ερευνητές καθώς μεταξύ των πολλών ευρημάτων, παρατηρήθηκαν κάποιες ανώμαλες συμπεριφορές των νανορευστών.

1.5.5 Εφαρμογές

Πολλές από τις ερευνητικές δημοσιεύσεις σχετικά με την κατανόηση της συμπεριφοράς των νανορευστών γίνονται ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου είναι αναγκαία και πρωταρχικής σημασίας η ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, σε ηλεκτρονικές εφαρμογές, καθώς και στη βιοϊατρική και στα τρόφιμα. Αξιοσημείωτες δημοσιεύσεις σχετικά με τις εφαρμογές των νανορευστών είναι των Wong και Leon [22], Choi [23, 51, 57], Saidur et al. [24], Yu και Xie [25], Taylor et al. [26], Mahian [27] κλπ.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η έρευνα των νανορευστών γίνεται ολοένα και πιο ενεργή και σημαντική. Εφαρμογές νανορευστών είναι πολλά υποσχόμενες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλούς τομείς που αφορούν τη μεταφορά θερμότητας και άλλες εφαρμογές ψύξης. Στους βιολογικούς και βιοϊατρικούς τομείς, τα νανορευστά παίζουν σημαντικό ρόλο εδώ και αρκετό χρονικό διάστημα και η χρήση τους θα επεκταθεί στην πορεία των χρόνων. Έρευνες έχουν δείξει ότι μπορούν να αποτελέσουν θεραπευτικές θεραπείες καρκίνου. Χρήση έχουν επίσης σε λέβητες ορυκτών καυσίμων, σε ηλεκτρονικές βιομηχανίες, σε μηχανικές βιομηχανίες, σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και στον τομέα της ηλιακής ενέργειας [17].

Σε πειραματικό στάδιο, τα νανορευστά πρέπει να χαρακτηρίζονται καλά όσον αφορά το μέγεθος των σωματιδίων, το σχήμα των σωματιδίων και τη συσσώρευση έτσι ώστε να παρέχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Μόλις οι πειραματικές και θεωρητικές έρευνες των νανορευστών γίνουν πλήρως κατανοητές, οι δυνατότητες που θα προσφέρουν θα είναι ατελείωτες και θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές.

2. Ερευνητικές και πειραματικές μελέτες για την κατεργασία της λείανσης

2.1 Περιγραφή μοντέλων Jaeger και FEM (Finite Element Method)

Η τεχνολογία της λείανσης έχει έναν αναντικατάστατο ρόλο στην ακρίβεια του τομέα των κατεργασιών. Εκτός από τη χρήση του στην μικροσκοπική επεξεργασία των μετάλλων όπως ο ανθρακοχάλυβας ή ο χυτοσίδηρος, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κοπή σκληρότερων υλικών, όπως κεραμικά, χάλυβες εργαλείων και σκληροί κραματοποιημένοι χάλυβες.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κατά την λείανση, η τριβή μεταξύ του τροχού λείανσης και το τεμαχίου κατεργασίας παράγει θερμότητα που μπορεί να προκαλέσει θερμική βλάβη της επιφάνειας του τεμαχίου και επηρεάζει την εμφάνιση και το μέγεθος του τεμαχίου άμεσα. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα της διαδικασίας είναι απαραίτητο να ελέγχεται η παραγωγή θερμότητας στη ζώνη λείανσης.

Σχεδόν όλα τα μοντέλα θερμικής μοντελοποίησης της λείανσης βασίζονται στη δημοσίευση του Jaeger για κινούμενες πηγές θερμότητας [34]. Στο μοντέλο Jaeger (εικόνα 10) ο τροχός λείανσης αντιπροσωπεύεται από μια πηγή θερμότητας που κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του τεμαχίου με ταχύτητα ίση με την επιφάνεια κατεργασίας. Χρησιμοποιείται ένα δισδιάστατο μοντέλο, με την προϋπόθεση ότι το πλάτος λείανσης είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το μήκος. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι η συνολική ενέργεια λείανσης απορροφάται πλήρως από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, ενώ στην πραγματικότητα η συνολική ενέργεια λείανσης και το ψυκτικό. Το αρχικό μοντέλο βελτιώθηκε με τη μελέτη του ποσοστού της συνολικής θερμότητας που εισέρχεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και της επίδρασης του κοπτικού ρευστού στη μέγιστη θερμοκρασία [35-38] και με την εισαγωγή μοντέλων όπου η θερμική ικανότητα και η θερμική αγωγιμότητα εξαρτώνται από τη θερμοκρασία [39].



Εικόνα 10: Το μοντέλο του Jaeger

Στην εργασία των Mamalis et al. [40] προτείνεται ένα μοντέλο FEM, βασισμένο στο πρότυπο Jaeger, για την προσομοίωση της διαδικασίας λείανσης. Η διαμόρφωση του μοντέλου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 11:Μοντέλο FEM για προσομοίωση λείανσης [40]

Στην πάνω επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας εισέρχεται θερμότητα στο τεμάχιο κατεργασίας, με τη μορφή ροής θερμότητας Q, εισόδου που κινείται κατά μήκος αυτής της επιφάνειας. Η ψύξη προσομοιώνεται με συνθήκες οριακών συνθηκών. Όλες οι άλλες πλευρές του τεμαχίου θεωρούνται αδιαβατικές και έτσι δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας σε αυτές τις πλευρές.

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η πηγή θερμότητας χαρακτηρίζεται από μια φυσική ποσότητα, την ροή θερμότητας Q, που αντιπροσωπεύει τη θερμότητα που εισέρχεται στο τεμάχιο κατεργασίας ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας και θεωρείται ότι έχει την ίδια πυκνότητα κατά το μήκος της, γεωμετρικό μήκος επαφής, le, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$l_c = \sqrt{a * d_s} \tag{2.1.1}$$

Όπου a: βάθος κοπής, ds: διάμετρος λειαντικού τροχού.

Το πραγματικό μήκος επαφής αναμένεται να είναι μεγαλύτερο λόγω της εκτροπής του τροχού λείανσης και του κατεργαζόμενου τεμαχίου στην περιοχή επαφής. Παρόλα αυτά, τα γεωμετρικά και πραγματικά μήκη επαφής θεωρούνται ίσα. Η ροή θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q = \varepsilon \frac{F_t \prime * v_s}{l_c} \tag{2.1.2}$$

Όπου ε: ποσοστό της ροής θερμότητας που εισέρχεται στο τεμάχιο, F_t : εφαπτομένη δύναμη ανά πλάτος μονάδας του τεμαχίου, v_s : ταχύτητα περιφερικών τροχών, l_c : γεωμετρικό μήκος επαφής.

Η συνολική ειδική ενέργεια λείανσης αποτελείται από τρία διαφορετικά συστατικά. Την ειδική ενέργεια που απαιτείται για το σχηματισμό και την αφαίρεση του αποβλήτου (uch), την ειδική ενέργεια που απαιτείται για τις περιοχές όπου οι κόκκοι διεισδύουν στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου αλλά το υλικό δεν αφαιρείται (upl), και η συγκεκριμένη ενέργεια που απαιτείται για να φτιαχτούν οι κόκκοι φθοράς στην επιφάνεια του τεμαχίου (usl). Συνεπώς η εξίσωση δίνεται ως εξής:

$$u = u_{ch} + u_{pl} + u_{sl} \tag{2.1.3}$$

Έχει αναλυθεί [40] και έχει δειχθεί πειραματικά ότι:

$$\varepsilon = 1 - 0.45 \frac{u_{ch}}{u} \tag{2.1.4}$$

Το u_{ch} έχει σταθερή τιμή περίπου 13.8 J/mm³ για λείανση σε όλα τα σιδηρούχα υλικά και u υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$u = \frac{F_t \prime * v_s}{a * v_w} \tag{2.1.5}$$

Όπου vw είναι η ταχύτητα πρόωσης και ως εκ τούτου, όπως στο μοντέλο του Jaeger, η ταχύτητα της κινούμενης πηγής θερμότητας.

Η τιμή του F_t είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας και της συνολικής ειδικής ενέργειας λείανσης και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F_{t}' = \frac{P_{t}'}{v_{s}}$$
(2.1.6)

Όπου Pt' είναι η ισχύς ανά πλάτος μονάδας του τεμαχίου.

Το είδος της μοντελοποίησης που προτείνεται σε αυτήν την μελέτη είναι κατάλληλο για διαδικασίες λείανσης με πολύ μικρό βάθος κοπής, αφού δεν προβλέπεται μοντελοποίηση του αποβλήτου.

2.2 Περιγραφή μελετών που χρησιμοποιούν μεθόδους νανορευστών σε κατεργασίες λείανσης

Οι ακόλουθες μελέτες αποτελούν ένα δείγμα ερευνών που έχουν γίνει πάνω στα νανορευστά και στην χρήση τους στην κατεργασία της λείανσης ώστε να μειωθεί η παραγόμενη θερμοκρασία και να εξασφαλιστεί το καλύτερο αποτέλεσμα.

2.2.1 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων των νανορευστών σε διαδικασίες MQL λείανσης

Αν και αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις επιδόσεις της μεθόδου MQL, που έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, στη λίπανση και στην ψύξη της ζώνης επαφής κατά τη διάρκεια της λείανσης, μία από τις πρώτες συστηματικές αναλύσεις του αποτελέσματος της χρήσης νανορευστών στις επιδόσεις λείανσης έγινε από τους Mao et al. [28]. Σε αυτή την μελέτη, μελετήθηκαν κατά την λείανση με χρήση των MQL νανορευστών, διαφορετικές παράμετροι νανορευστών συμπεριλαμβανομένου του τύπου και της διαμέτρου των νανοσωματιδίων, της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων στο νανορευστό και του τύπου του ρευστού βάσης. Οι ιδιότητες λείανσης συμπεριλαμβανομένης της δύναμης λείανσης, της θερμοκρασίας και της τραχύτητας της επιφάνειας του τεμαχίου ερευνήθηκαν και συγκρίθηκαν.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα ευθείας επιφανειακής λείανσης σε μηχανή λείανσης επιφανειών (MGK7120x6). Χρησιμοποιήθηκε τροχός λείανσης Al₂O₃ με υαλώδες δεσμό (WA100) με μέσο μέγεθος λειαντικών κόκκων να είναι 130 μm. Το υλικό του τεμαχίου ήταν σκληρυμένος χάλυβας AISI 52100. Το βάθος λείανσης ήταν 10 μm και η ταχύτητα του λειαντικού τροχού ήταν 31.4 m/s. Ο ρυθμός ροής του νανορευστού ρυθμίστηκε στα 60 ml/h και η απόσταση ψεκασμού ήταν 40 mm. Στην παρακάτω

εικόνα φαίνονται οι πέντε τύποι νανορευστών που δοκιμάστηκαν στην επικείμενη έρευνα.

	Environment	Nanoparticle	Diameter	Base fluid	Volume	Weight
					fraction	fraction
Test	Nanofluid	Al ₂ O ₃	40 nm	Deionized	1%	0.25%
1	MQL			water		
Test	Nanofluid	Al ₂ O ₃	40 nm	Deionized	3%	0.75%
2	MQL			water		
Test	Nanofluid	Al ₂ O ₃	40 nm	Deionized	5%	1.25%
3	MQL			water		
Test	Nanofluid	Al ₂ O ₃	80 nm	Deionized	3%	0.75%
4	MQL			water		
Test	Nanofluid	MoS ₂	70 nm	Canola oil	1%	4.8%
5	MQL					
Test	Wet	Synthetic emulsion				
6						
Test	Dry	1				
7						

Εικόνα 12: Τύποι ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα [28]

Τρία κλάσματα όγκου (1%, 3% και 5%) αποτέλεσαν το ποσοστό του νανοσωματιδίου στο ρευστό βάσης. Για τη διερεύνηση της επίδρασης της διαμέτρου του νανοσωματιδίου, χρησιμοποιήθηκε νανοφθοριούχο Al₂O₃ 80 nm. Το κάθε νανορευστό παρασκευάστηκε με διασπορά νανοσωματιδίων στο ρευστό βάσης. Η διασπορά επιτεύχθηκε με υπερηχητική δόνηση για δύο ώρες. Για τις μετρήσεις των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο τριών συστατικών (Kistler 9257BA) και για την μέτρηση της θερμοκρασίας της λείανσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των μονόπολων θερμοστοιχείων.

Τα συμπεράσματα στα οποία οδηγήθηκαν οι επιστήμονες που εκτέλεσαν αυτήν την μελέτη ήταν τα εξής. Η συγκέντρωση των νανοσωματιδίων στο νανορευστό έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα της λείανσης. Η απόδοση λίπανσης και ψύξης στη ζώνη λείανσης βελτιώθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης νανοσωματιδίων. Ως εκ τούτου, η MQL λείανση με υψηλότερη συγκέντρωση νανοσωματιδίων έχει χαμηλότερη δύναμη λείανσης, θερμοκρασία λείανσης και τραχύτητα της επιφάνειας σε

σύγκριση με εκείνη με χαμηλότερη συγκέντρωση νανοσωματιδίων. Η διάμετρος του νανοσωματιδίου δεν έχει επιπτώσεις στην μέγιστη θερμοκρασία λείανσης. Όταν η διάμετρος των νανοσωματιδίων αυξάνεται, η εφαπτομενική δύναμη λείανσης μειώνεται ελαφρά. Τέλος το ρευστό βάσης παίζει κρίσιμο ρόλο για τη λίπανση και την ψύξη της ζώνης λείανσης. Η δύναμη λείανσης και η επιφανειακή τραχύτητα του νανορευστού με βάση το πετρέλαιο είναι χαμηλότερες από εκείνες που έχουν ως βάση το νερό, αλλά η θερμοκρασία λείανσης για το πρώτο είναι υψηλότερη αντίστοιχα. Αυτό το φαινόμενο δείχνει ότι η λιπαντική επίδραση του νανορευστού με βάση το πετρέλαιο είναι καλύτερη σε σύγκριση με το νανορευστό με βάση το νερό, αλλά το νανορευστό με βάση το νερό έχει καλύτερα αποτελέσματα ψύξης από το νανορευστό με βάση το πετρέλαιο.

Τα αποτελέσματα φαίνονται καλύτερα στις παρακάτω εικόνες



Εικόνα 13: Δυνάμεις λείανσης στα πειράματα [28]



Εικόνα 14: Αναλογία δυνάμεων λείανσης στα πειράματα [28]



Εικόνα 15: Θερμοκρασίες λείανσης στα πειράματα [28]

2.2.2 Πειραματικός χαρακτηρισμός σε φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία μικρολείανσης κράματος τιτανίου χρησιμοποιώντας λίπανση ηλεκτροψεκασμού με ροή αέρα με νανορευστά

Σε αυτή την μελέτη (Lee et al.) [29], το νανορευστό εισάγεται για την περαιτέρω ενίσχυση των αποτελεσμάτων ψύξης και λίπανσης της προτεινόμενης τεχνικής. Με αυτή τη νέα τεχνική λίπανσης, πραγματοποιείται μια σειρά πειραμάτων μικρο-λείανσης από κράμα τιτανίου (Ti-6Al-4V) στο μικροσκοπικό εργαλείο μικρο-λείανσης. Οι δυνάμεις λείανσης, η ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου και οι συνθήκες του εργαλείου αναλύονται συγκριτικά κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες μηχανουργικής κατεργασίας.

Η βασική λειτουργία της AF-ESL τεχνικής εισήχθη στο προηγούμενο έργο της ερευνητικής ομάδας των συγγραφέων (Lee et al.) [30].Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί

ηλεκτρική δύναμη με υψηλή τάση (100 ~ 104 Volt) για να σχηματίσει σταγονίδια και κατάλληλη ροή αέρα για να επιτύχει κατάλληλη ψύξη και απομάκρυνση αποβλήτου. Τα πειράματα μικρο-λείανσης πραγματοποιήθηκαν στην παρακάτω διάταξη.



Εικόνα 16: Πειραματική διάταζη [29]

Το κράμα τιτανίου έχει χαμηλή θερμική διάχυση και υψηλή ανθεκτικότητα, χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν τη χαμηλή μηχανική του ικανότητα. Έτσι, τα νανοσωματίδια που έχουν εξαιρετικές τριβολογικές επιδράσεις και υψηλή θερμική αγωγιμότητα θα μπορούσαν να ενισχύσουν την απόδοση λείανσης του κράματος τιτανίου. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς επέλεξαν το νανοδιαμάντι (nanodiamond) ως πρόσθετο στο νανορευστό λόγω της μη τοξικότητάς του στον άνθρωπο, της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας (2000 W/m K) και της εξαιρετικής τριβολογικής ιδιότητας με το σφαιρικό σχήμα του (Lee et al.) [30].

Για τα πειράματα, σχεδιάστηκαν έξι πειραματικές περιπτώσεις, με ξηρό αέρα, καθαρό AF-ESL, και τέσσερα νανορευστά AF-ESL. Η δύναμη λείανσης, η ποιότητα επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και η κατάσταση του εργαλείου ελήφθησαν υπόψη για πειραματική αξιολόγηση.

Case	Lubrication conditions	Particle size [nm]	Particle concentration [wt. %]	
Run 1	Dry air		-	
Run 2	Pure AF-ESL	/ Y -	-	
Run 3	Nanofluid AF-ESL	35	0.2	
Run 4	Nanofluid AF-ESL	35	0.8	
Run 5	Nanofluid AF-ESL	80	0.2	
Run 6	Nanofluid AF-ESL	80	0.8	

Εικόνα 17: Τύποι ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα [29]

Τέλος, κατά τη διάρκεια του πειράματος AF-ESL, το βασικό ρευστό ήταν φυτικό έλαιο στο οποίο προστέθηκε ισοπροπανόλη με συγκέντρωση 15 wt. %.

Αποδείχθηκε πειραματικά ότι το AF-ESL με νανορευστό θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις προκύπτουσες δυνάμεις λείανσης και τις αναλογίες δύναμης λείανσης (εικόνα 18) και θα μπορούσε να ενισχύσει την ποιότητα της επιφάνειας του τεμαχίου και την κατάσταση του εργαλείου λείανσης. Παρατηρώντας τα πειραματικά αποτελέσματα, τα μεγαλύτερα σωματίδια nanodiamond (80 nm) ήταν πιο αποτελεσματικά στην βελτίωση των επιδόσεων της μικρο-λείανσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου κράματος τιτανίου από ότι τα μικρότερα (35 nm). Στην περίπτωση της συγκέντρωσης βάρους, υψηλότερη συγκέντρωση (0.8%) ήταν επωφελής για τη μείωση της προκύπτουσας δύναμης λείανσης και της αναλογίας δυνάμεων λείανσης, και από την άλλη πλευρά, χαμηλότερη (0.2%) ήταν πλεονεκτική για την ενίσχυση της ποιότητας της επιφάνειας και την κατάσταση του εργαλείου λείανσης. Ως εκ τούτου, η σωστή επιλογή μεγέθους και συγκέντρωσης βάρους σωματιδίων στο σύστημα AF-ESL-νανορευστού ήταν πολύ σημαντική για την αποτελεσματική ενίσχυση των επιδόσεων της μικρο-λείανσης.



Εικόνα 18: Αναλογία δυνάμεων λείανσης [29]

2.2.3 Πειραματική εκτίμηση μιας φιλικής προς το περιβάλλον διαδικασίας λείανσης με τη χρήση MQL νανορευστών με κρυογονικό αέρα

Η μέθοδος του κρυογονικού αέρα (CA) και η μέθοδος ελάχιστης ποσότητας ψυκτικού υγρού με νανορευστά (NMQL) θεωρούνται τεχνολογίες οικολογικού χαρακτήρα. Ωστόσο, η λιπαντική απόδοση του κρυογονικού αέρα είναι αναποτελεσματική και η ικανότητα ψύξης της NMOL δεν είναι ικανοποιητική. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα συγκεκριμένα εμπόδια στις κατεργασίες αυτές, προτάθηκε μια νέα τεχνολογία πράσινης επεξεργασίας που συνδυάζει τα πλεονεκτήματά τους και ονομάζεται κρυογονική ελάχιστη ποσότητα ψυκτικού υγρού με νανορευστά (CNMQL). Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους επεξεργασίας και άλλες n CNMOL είναι ανώτερη πράσινες τεγνολογίες. για την οικονομική αποτελεσματικότητά της, τη χαμηλή κατανάλωση άνθρακα, την υψηλή απόδοση, την εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και εξαιρετικές επιδόσεις ψύξης και λίπανσης. Ακολουθεί η μελέτη της σειράς πειραμάτων επιφανειακής λείανσης που πραγματοποίησαν οι Zhang et al. [31] υπό τρεις συνθήκες λίπανσης (CA, NMQL, CNMQL).



Εικόνα 19: Διάταζη κατεργασίας και διαδικασία μέτρησης αποτελεσμάτων δύναμης λείανσης και θερμοκρασίας [31]

Η διάταξη του πειράματος φαίνεται παραπάνω (εικόνα 19), όπου η αριστερό σχήμα απεικονίζει τον τρόπο μέτρησης της δύναμης λείανσης ενώ το δεξί την μέτρηση της θερμοκρασίας λείανσης.

Το Ti-6Al-4V χρησιμοποιήθηκε ως υλικό κατεργασίας στο πείραμα. Το κράμα Ti χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην αεροναυπηγική, την αεροδιαστημική, την ναυσιπλοΐα και σε άλλους βιομηχανικούς τομείς, λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του (όπως υψηλή σκληρότητα, υψηλή αντοχή, υψηλή θερμική σταθερότητα και ισχυρή αντίσταση στη διάβρωση). Το κράμα Ti είναι, επίσης, ένα είδος υλικού το οποίο είναι δύσκολο να επεξεργαστεί καθώς απαιτεί υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση. Επομένως, πειραματικές μελέτες για την λείανση Ti-6Al-4V έχουν μεγάλη σημασία. Στην μελέτη αυτή, το μέγεθος του τεμαχίου ορίστηκε ως 40 mm×30 mm×30 mm.

Το λιπίδιο σύνθεσης KS-1008 επελέγη ως ρευστό βάσης της MQL μεθόδου και τα νανοσωματίδια AI₂O₃ χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσθετα για την παρασκευή των νανορευστών σε αυτό το πείραμα. Τα νανορευστά παρασκευάστηκαν με την μέθοδο two-step που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αφού πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα Η βέλτιστη απόδοση λίπανσης, η μικρότερη ειδική ενέργεια λείανσης (51.96 J/mm³) και ο συντελεστής τριβής (0.60) ελήφθησαν υπό την μέθοδο CNMQL, ακολουθούμενη από την NMQL μέθοδο και τέλος από την CA μέθοδο. Η ειδική ενέργεια λείανσης στις μεθόδους NMQL και CA αυξήθηκε κατά 12.3% και 69.1%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με εκείνη της CNMQL. Επιπλέον, οι συντελεστές τριβής κάτω από τις συνθήκες CA και NMQL μειώθηκαν κατά 17.8% και 7.7% αντίστοιχα, σε σύγκριση με τις συνθήκες CNMQL.

Οι επιδόσεις ψύξης και μεταφοράς θερμότητας της CNMQL υπό την επίδραση του κρυογονικού αέρα (CA) βελτιώθηκαν σημαντικά και επιτεύχθηκε η χαμηλότερη θερμοκρασία λείανσης (155.9 °C), η οπαία μεώ θηκε κατά πεα που60 °C σε συ γκριση με εκείνη της NMQL μεθόδου (εικόνα 20).

Εικόνα 20: Σύγκριση θερμοκρασιών λείανσης [31]

Στην CNMQL, τα λιπαντικά νανορευστά είχαν υψηλότερο ιξώδες (3.84 cP) και μεγαλύτερη γωνία επαφής (41.5 °), έτσι ώστε το φιλμ λιπαντικού ελαίου ήταν παχύτερο και είχε βέλτιστο αποτέλεσμα συγκράτησης στη διεπιφάνεια λειαντικού τροχού/τεμαχίου κατεργασίας. Κατά συνέπεια, η σταθερότητα του φιλμ ελαίου ήταν βέλτιστη και επιτεύχθηκε καλύτερη απόδοση λίπανσης.

Λόγω του μικρότερου ρυθμού ροής αερίου (10 m³/h) κατά την CNMQL, η συνολική κρουστική ενέργεια πρόσκρουσης, η ταχύτητα πρόσκρουσης των ρευστών που ψεκάζονται στη ζώνη λείανσης και η διαφορά πίεσης μεταξύ των νανορευστών και του αέρα περιβάλλοντος ήταν μικρότερες. Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκε μεγαλύτερη διαταραχή του ατμοσφαιρικού αέρα από το όριο ψεκασμού και παρατηρήθηκε μεγαλύτερη γωνία ψεκασμού (42.08 °). Η πυκνότητα των σταγονιδίων σε ολόκληρη τη ζώνη ψεκασμού ήταν σχετικά ομοιόμορφη και το εύρος μεταβολής της πυκνότητας της κατανομής των σταγονιδίων μεταξύ των μεσαίων και των οριακών ζωνών δεν ήταν προφανές, γεγονός που προκάλεσε ευνοϊκό αποτέλεσμα ψεκασμού. Με μια μεγάλη περιοχή εξάπλωσης σταγονιδίων και πιο ομοιόμορφα κατανεμημένων σταγονιδίων στη ζώνη λείανσης, αποκτήθηκε το βέλτιστο αποτέλεσμα λίπανσης.

Η ελάχιστη επιφανειακή τραχύτητα και η βέλτιστη τοπογραφία της επιφάνειας ελήφθησαν κατά την CNMQL. Ως αποτέλεσμα, καταναλώθηκε λιγότερη ενέργεια κατά την λείανση και επιτεύχθηκε χαμηλότερη ειδική ενέργεια λείανσης και συντελεστής δυνάμεως τριβής.

Εικόνα 21: Σύγκριση επιφανειακής τραχύτητας [31]

Η CNMQL συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της CA και της NMQL και επιτυγχάνει ανώτερη απόδοση λείανσης και εξαιρετική απόδοση ψύξης και λίπανσης. Έχει επίσης τα πλεονεκτήματα της οικονομικής απόδοσης, της χαμηλής κατανάλωσης άνθρακα, της υψηλής αποδοτικότητας χρήσης, καθώς και των οικολογικών και φιλικών προς το περιβάλλον ιδιοτήτων. Συνοψίζοντας, έχει λαμπρές προοπτικές εφαρμογής σε διάφορα πεδία επεξεργασίας.

2.2.4 Έρευνες για την λίπανση στη λείανση με χρήση νανορευστών MWCNTs με χρήση υποβοηθούμενη από υπερήχους διασποράς

Η παρούσα έρευνα των Huang et al. [32] χρησιμοποιεί τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά της αγωγής θερμότητας των CNT νανοσωματιδίων διασκορπισμένα σε ρευστό βάσης φυτικών ελαίων για την δημιουργία νανορευστού. Υπερηχητική σπηλαίωση χρησιμοποιήθηκε για τη διασπορά των CNTs στο νανορευστό χωρίς την προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών. Το νανορευστό χρησιμοποιήθηκε για την λείανση χάλυβα NAK80 χρησιμοποιώντας την μέθοδο MQL. Η διεργασία λείανσης με την βοήθεια του νανορευστού και το διασκορπιστικό αποτέλεσμα των υπερήχων διερευνώνται σε ξηρή λείανση, σε λείανση με MQL, σε λείανση με MQL μέθοδο με νανορευστά (0.25% κ.β.) και σε λείανση υπερηχητικής MQL μεθόδου με νανορευστά (0.25% κ.β.).

Η διάταξη του πειράματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα

Εικόνα 22: Διάταξη πειράματος [32]

Όλα τα πειράματα διεξήχθησαν σε πέντε διαφορετικά δείγματα για να εξαλειφθούν οι ακραίες τιμές και αναλύθηκαν η προκύπτουσα δύναμη λείανσης, η θερμοκρασία λείανσης και η τραχύτητα της επιφάνειας. Για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας του υποβοηθούμενου με υπερήχους ταλαντωτή, ο ρυθμός ροής MQL ρυθμίστηκε στα 20 ml/h και η πίεση αέρα ήταν 5 MPa. Χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μετάδοσης για φωτογράφηση δειγμάτων. Συγκρίνοντας τα δείγματα με και χωρίς υπέρηχο, οι κατανομές νανοσωματιδίων φαίνονται παρακάτω.

Εικόνα 23: Σύγκριση συσσώρευσης νανοσωματιδίων [32]

Εικόνα 24: Σύγκριση συσσώρευσης νανοσωματιδίων [32]

Οι μαύρες κηλίδες υποδεικνύουν περιοχές συσσωμάτωσης MWCNTs στην εικόνα 23. Όταν χρησιμοποιήθηκε υπέρηχος, οι μαύρες κηλίδες προφανώς μειώθηκαν. Στην εικόνα 24, φαίνεται επίσης ότι ο υπέρηχος αύξησε τη διασπορά των MWCNT σε σταγονίδια ελαίου. Αυτή η σύγκριση καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα του υποβοηθούμενου από υπερήχους ταλαντωτή στην καλύτερη διασπορά των νανοσωματιδίων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση της υπερηχητικής μεθόδου MQL με χρήση νανορευστών (0.25% κ.β.) είχε σαφή πλεονεκτήματα στην δύναμη λείανσης, στην θερμοκρασία λείανσης, στην τραχύτητα επιφανείας και στην μορφολογία επιφανείας, επειδή τα νανοσωματίδια του ρευστού κοπής σχημάτιζαν ένα προστατευτικό στρώμα μεταξύ του λειαντικού τροχού και του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η υπεροχή της μεθόδου φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (25-28).

Εικόνα 25: Σύγκριση δύναμης Ft στις διάφορες μεθόδους [32]

Εικόνα 26: Σύγκριση αναλογίας δυνάμεων λείανσης στις διάφορες μεθόδους [32]

Εικόνα 27: Σύγκριση θερμοκρασιών λείανσης στις διάφορες μεθόδους [32]

Μπορεί να φανεί ότι, δεδομένου ότι η ξηρή λείανση δεν χρησιμοποιεί υγρό κοπής για λίπανση και ψύξη, η θερμοκρασία λείανσης ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των άλλων μεθόδων. Αν και χρησιμοποιούσε υγρό κοπής, η αποτελεσματικότητα ψύξης της MQL χωρίς νανοσωματίδια ήταν μικρότερη από εκείνη με νανοσωματίδια. Αυτό δείχνει σαφώς ότι το νανορευστό διαθέτει βελτιωμένες θερμο-φυσικές ιδιότητες με την προσθήκη νανοσωματιδίων και απομακρύνει γρήγορα τη θερμότητα που παράγεται κατά τη διαδικασία λείανσης.

Εικόνα 28: Σύγκριση τραχύτητας επιφάνειας στις διάφορες μεθόδους [32]

Η αγωγιμότητα των MWCNTs αύξησε αρκετά τη θερμική αγωγιμότητα του ρευστού κοπής, για να απομακρύνει γρήγορα τη θερμότητα. Μέσω του προστατευτικού μηχανισμού των νανοσωματιδίων στη ζώνη λείανσης επιτεύχθηκαν οι επιδράσεις της επιδιόρθωσης, λίπανσης και στίλβωσης. Αποδείχθηκε ότι ένα νανορευστό MWCNTs
με διασπορά υποβοηθούμενη από υπερήχους έχει σημαντική δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης της λείανσης.

2.2.5 Αποτελεσματικότητα μεταφοράς θερμότητας σε λείανση MQL με διαφορετικά νανορευστά για κράματα με βάση το Ni χρησιμοποιώντας φυτικό έλαιο

Τέλος, η μελέτη αυτή των Li et al. [33] εξετάζει την απόδοση ψύξης έξι νανορευστών, δηλαδή το ρευστό που περιέχει αντίστοιχα τα νανοσωματίδια Al₂O₃, διαμάντι, MoS₂, CNT, ZrO₂ και SiO₂ με φοινικέλαιο ως ρευστό βάσης, κατά την λείανση κράματος με βάση το Ni. Οι μηχανισμοί πίσω από τους οποίους τα νανορευστά μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά τη θερμότητα και να μειώσουν τη θερμοκρασία λείανσης αναλύθηκαν επίσης.

Το πείραμα διεξήχθη με ένα τροχιστή επιφάνειας (surface grinder) ακριβείας K-P36 CNC. Οι κύριες τεχνικές παράμετροι ήταν η μέγιστη ισχύς εξόδου του κύριου άξονα 4,5 kW και η ταχύτητά του που κυμαινόταν από 45 έως 4.800 rpm. Χρησιμοποιήθηκε ένας λειαντικός τροχός λευκού κορουνδίου με μέγεθος κόκκων 80 mm και διάμετρο 300 mm. Χρησιμοποιήθηκε ως μονάδα τροφοδοσίας του ρευστού η Bluebe MQL για την απελευθέρωση των νανορευστών. Οι παράμετροι λείανσης για το πείραμα φαίνονται στην εικόνα 29.



Εικόνα 29: Πειραματική διάταζη [33]

Το υλικό δείγματος ήταν ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο κράμα με βάση το νικέλιο, υψηλής θερμοκρασίας, το GH4169. Λόγω της υψηλής αντοχής θερμοκρασίας, της εξαιρετικής ανθεκτικότητας και της χαμηλής θερμικής διαχύσεως, η λείανση αυτού του

υλικού μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του υλικού κατεργασίας και σε φθορά του λειαντικού τροχού. Οι διαστάσεις του τεμαχίου κατεργασίας ήταν 40x30 mm με πάχος 30 mm για να διευκολυνθούν οι δοκιμές λείανσης και οι μετρήσεις δεδομένων.

Το φοινικέλαιο χρησιμοποιήθηκε ως ρευστό βάσης της MQL μεθόδου. Αυτό το λάδι έχει καλή ικανότητα λίπανσης και ψύξης λόγω του σχετικά υψηλού ιξώδους του και της καλής πολικότητας του [41]. Έξι τύποι νανοσωματιδίων χρησιμοποιήθηκαν μεμονωμένα για να σχηματίσουν έξι νανορευστά έτσι ώστε να μπορεί να διεξαχθεί μια περιεκτική μελέτη για την αξιολόγηση της απόδοσής τους. Αυτά τα υλικά νανοσωματιδίων ήταν, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα MoS₂, SiO₂, PCD, CNT, Al₂O₃ και ZrO₂. Το μέσο μήκος του CNT ήταν 10-30 μm, με μέση διάμετρο 50 nm. Το μέγεθος των άλλων νανοσωματιδίων ήταν 50 nm.

Με βάση τα ευρήματα των μελετών των Jia et al.[42] και Zhang et al. [43], παρασκευάστηκαν νανορευστά με 6% κλάσμα μάζας νανοσωματιδίων. Το πολυσορβικό 80 (polysorbate 80) προστέθηκε σε κλάσμα μάζας 0,3% ως μέσο διασποράς για την πρόληψη της συσσωμάτωσης των νανοσωματιδίων στο βασικό έλαιο.

Η συχνότητα δειγματοληψίας για τη μέτρηση των δυνάμεων λείανσης ήταν 1 kHz σε διάρκεια 60 δευτερολέπτων για κάθε δοκιμή. Ταυτόχρονα, η θερμοκρασία λείανσης μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο clip-type. Μετά το πείραμα, επιλέχθηκαν 100 σημεία από την σταθερή περιοχή λείανσης κάθε δοκιμής για στατιστική ανάλυση.

Η απόδοση μεταφοράς θερμότητας των έξι νανορευστών μελετήθηκε και ελήφθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα από τους συγγραφείς:

Τα νανορευστά MoS2 έχουν τη χαμηλότερη αναλογία δύναμης λείανσης (0.365), ενώ την μεγαλύτερη αναλογία (0.40) την έχουν τα νανορευστά PCD.



Εικόνα 30: Σύγκριση αναλογίας δύναμης λείανσης μεταξύ νανορευστών [33]

Όμως, τα νανορευστά CNT έχουν τη χαμηλότερη θερμοκρασία λείανσης (110.7 ° C), ακολουθούμενα από τα νανορευστά AI₂O₃ (112.4 ° C).



Εικόνα 31: Σύγκριση θερμοκρασιών λείανσης [33]

Συνολικά, τα νανορευστά CNT έχουν την καλύτερη απόδοση μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των μελετώμενων νανορευστών.

Τα νανορευστά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα έχουν καλή απόδοση μεταφοράς θερμότητας. Περαιτέρω, συζητήθηκε η επίδραση του ιξώδους του νανορευστού στην απόδοση μεταφοράς θερμότητας. Αποδείχθηκε ότι το CNT νανορευστό έχει τον υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (1.3×10⁴ W/(m×K)).

Παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια του τεμαχίου που έχει υποστεί κατεργασία MQL με νανορευστό που περιέχει CNT έχει πολλές μικρές κοιλότητες και ρωγμές και ότι το CNT νανορευστό έχει μεγάλη γωνία επαφής και χαμηλή επιφανειακή τάση. Συνεπώς, το CNT έχει βρεθεί ότι έχει καλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας.

2.2.6 Άλλες μελέτες

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν συνοπτικά μερικές ακόμα μελέτες και πειράματα για την χρήση μεθόδων νανορευστών στην κατεργασία της λείανσης.

Στην πειραματική έρευνα, των Nandakumar et al. [44], που ακολουθεί αξιολογείται η απόδοση της MQL λείανσης σύνθετων μεταλλικών πλεγμάτων αλουμινίου (Al) ενισχυμένων με νανο-SiC. Τα σύνθετα μεταλλικά πλέγματα (MMCs) είναι μια νέα ομάδα σύνθετων υλικών που αποτελούνται από ένα όλκιμο μεταλλικό πλέγμα ενισχυμένο από σκληρά σωματίδια ή ίνες. Η περαιτέρω ανάπτυξη των MMCs οδήγησε στην ιδέα της σύνθεσης σύνθετων νανο-μεταλλικών πλεγμάτων (MMNCs). Προς το παρόν, οι MMNC αναπτύσσονται σημαντικά σε αρκετές περιοχές μηχανικής. Χρησιμοποιήθηκαν 3 τύποι MQL το SAE20W40, φυτικό λάδι (cashew nut shell oil) και φυτικό λάδι με νανοσωματίδια TiO₂. Η σύνθεση των νανορευστών διεξήχθη με ανάμιξη 10 g νανο-TiO₂ σε 500 ml φυτικού ελαίου χρησιμοποιώντας υπερηχητικό επεξεργαστή. Τα επεξεργασμένα δείγματα διατηρήθηκαν για 24 ώρες.

Οι ερευνητές κατέγραψαν τα εξής αποτελέσματα μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών διαδικασιών. Τα ενισχυμένα με νανο-SiC σύνθετα πλέγματα αλουμινίου κατασκευάσθηκαν επιτυχώς με την μέθοδο της στερεοποίησης βασισμένη σε κενό. Οι επιδράσεις των παραμέτρων λείανσης, όπως η ταχύτητα του τροχού, η ταχύτητα του κομματιού κατεργασίας, το βάθος κοπής και το ποσοστό νανο-SiC, εξετάστηκαν με βάση τις δυνάμεις και τη θερμοκρασία λείανσης για να αναπτυχθεί η βέλτιστη λίπανση και η υψηλή βιολογική και οικολογική λύση. Οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την κατεργασία είναι ο τύπος MQL, η ταχύτητα του τροχού και το βάθος κοπής. Η καλύτερη απόδοση επετεύχθη στην χρήση λιπαντικού MQL με βάση το φυτικό έλαιο με νανοσωματίδια TiO₂, καθώς το λιπαντικό του συστήματος MQL διεισδύει μέσα στο τεμάχιο κατεργασίας και την ζώνη επαφής του τροχού-τεμαχίου. Η ποιότητα των νανορευστών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην μεταφορά της θερμότητας κατά τη διάρκεια της λείανσης καθώς και για την βελτίωση του επιφανειακού φινιρίσματος.

Η έρευνα των **Bin Shen et al.** [45], διερεύνησε τη φθορά των τροχών και τα τριβολογικά χαρακτηριστικά σε λείανση υγρού, ξηρού και ελαχίστου ποσοστού λίπανσης (MQL) χυτοσίδηρου. Το Al₂O₃ με βάση το νερό και τα νανοδιαμάντια χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία λείανσης MQL και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα από λείανση με καθαρό νερό. Η απόδοση λείανσης διερευνήθηκε και συγκρίθηκε ως προς τη δύναμη λείανσης, την αναλογία φθοράς τροχού, την τραχύτητα της επιφάνειας και τη θερμοκρασία λείανσης.

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι ρευστών σε δοκιμές λείανσης, συνθετικό υγρό λείανσης Cimtech 500 σε συγκέντρωση 5% κατ' όγκο, καθαρό νερό, νανορευστά Al₂O₃ με βάση το νερό και νανορευστά με διαμάντια με βάση το νερό. Τα νανορευστά Al₂O₃ παρασκευάστηκαν με διασπορά 40 nm νανοσωματιδίων Al₂O₃ στο απιονισμένο νερό. Αναλύθηκαν τρία κλάσματα όγκου νανορευστών Al₂O₃ σε 1.0%, 2.5% και 4.0%. Το 4.0% κατ' όγκο βρίσκεται ήδη στην υψηλή πλευρά της συγκέντρωσης για τα νανορευστά Al₂O₃ λόγω της σημειούμενης αύξησης του ιξώδους. Δύο δείγματα νανορευστών με διαμάντια διαμορφώνονται ώστε να έχουν ένα κλάσμα βάρους 250 καρατίων/1000 ml, τα οποία έχουν ισοδύναμο κλάσμα όγκου 1.5% διαμάντι. Ένα δείγμα περιέχει διαμάντια με επίστρωση άνθρακα 200 nm και το άλλο περιέχει μονοκρυσταλλικά διαμάντια μήκους 100 nm. Για υγρή λείανση με ψύξη χρησιμοποιήθηκε συνθετικό υγρό άλεσης Cimtech 500 σε συγκέντρωση 5% κατ' όγκο και ο ρυθμός ροής μετρήθηκε στα 5400 mL/min. Για την λείανση MQL, ο ρυθμός ροής δοκιμής ρυθμίστηκε στα 5 mL/min, εκτός από τη δοκιμή θερμοκρασίας λείανσης, και εξετάστηκαν διαφορετικοί ρυθμοί ροής (5, 15 και 30 mL/min).

Η απόδοση λείανσης ερευνήθηκε και συγκρίθηκε όσον αφορά τις δυνάμεις λείανσης, την αναλογία G (G-ratio), την τραχύτητα της επιφάνειας και τη θερμοκρασία λείανσης. Η διασπορά των στερεών σωματιδίων βρέθηκε να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, ειδικά όταν σχηματίστηκε ένα στρώμα κονιάματος. Το στρώμα κονιάματος δημιούργησε υψηλότερο G-ratio (μικρότερη φθορά τροχών), μικρότερες δυνάμεις λείανσης και καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας. Η προκαταρκτική μελέτη της λείανσης MQL έδειξε ότι θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τη θερμοκρασία λείανσης σε σύγκριση με την ξηρή λείανση.



Εικόνα 32: Σύγκριση θερμοκρασιών [45]

Ωστόσο, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στη θερμοκρασία λείανσης κατά τη χρήση νανορευστών. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η ποσότητα των νανορευστών που εφαρμόζονται στην MQL μέθοδο είναι πολύ μικρή για να κάνει οποιαδήποτε διαφορά ακόμα κι αν έχουν καλύτερη μεταφορά θερμότητας και θερμική αγωγιμότητα. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη μεταφορά θερμότητας για να κατανοήσουμε καλύτερα τα πλεονεκτήματα ψύξης που παρέχονται από τη διαδικασία λείανσης MQL με νανορευστά. Αυτή η μελέτη επίσης απέδειξε ποσοτικά ότι ο ρυθμός ροής ήταν πολύ σημαντικός στην κατεργασία και ήταν δυνατόν να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα ψύξης αυξάνοντας την ποσότητα ρευστών που εφαρμόζονται στην MQL λείανση.

Η μελέτη των **Molaie et al.** [46] παρουσιάζει μια πειραματική έρευνα των μεμονωμένων και συνδυασμένων αποτελεσμάτων της ελάχιστης λιπαντικής ποσότητας της υποβοηθούμενης υπερηχητικά λείανσης. Η MQL εφαρμόστηκε με τη χρήση νανορευστών με βάση το πετρέλαιο. Τα νανοσωματίδια MoS₂ προστίθενται σε έλαια βάσης σε δύο συγκεντρώσεις, σε υψηλή συγκέντρωση (6% κατά βάρος MoS₂ νανοσωματίδιο) και σε χαμηλή συγκέντρωση (2% κατά βάρος MoS₂ νανοσωματίδιο).

Η εφαρμογή οριζόντιων δονήσεων με υπερήχους σε ξηρή λείανση δείχνει μείωση 37% της κανονικής δύναμης και 21% μείωση της εφαπτομενικής δύναμης. Όταν προστίθεται το νανορευστό, οι δυνάμεις λείανσης μειώθηκαν έως και 61% στην κανονική δύναμη λείανσης και έως 58% στην εφαπτομενική δύναμη για συμπύκνωση νανορευστών με βάση την παραφίνη. Παρατηρήθηκε ότι οι MQL και UAG παρέχουν μηχανισμούς, οι οποίοι αφενός αυξάνουν τη διείσδυση των κόκκων και αφετέρου

μειώνουν την τριβή. Επομένως, και οι δύο δυνάμεις μειώνονται. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η χρήση UAG με MQL με νανορευστό οδηγεί σε σημαντική βελτίωση και στην τραχύτητα της επιφάνειας. Η επίδραση των συνδυασμένων MQL νανορευστών και UAG προσφέρει μια πολύτιμη ευκαιρία για την βελτίωση της απόδοσης της λείανσης ενώ ελαχιστοποιούν την ποσότητα λιπαντικών που χρησιμοποιούνται.

Στην επόμενη μελέτη των **Kumar et al** [47] μελετώνται τα χαρακτηριστικά λείανσης του νιτριδίου του πυριτίου με νανορευστά που αποτελούνται από νανοσωματίδια γραφίτη, MoS₂ και WS₂. Η αύξηση της χρήσης του νιτριδίου του πυριτίου σε διάφορες εφαρμογές, όπως η δομική, η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία κ.λπ., δημιούργησε την ανάγκη να διερευνηθεί η συμπεριφορά των κεραμικών υπό διάφορες συνθήκες λίπανσης ελέγχοντας την τραχύτητα της επιφάνειας και τις βέλτιστες συνθήκες λείανσης. Συνεπώς, έχει διερευνηθεί η επίδραση των παραμέτρων εισόδου όπως η ταχύτητα του τροχού, το βάθος κοπής, η ταχύτητα του πίνακα και ο τύπος του λιπαντικού στην τραχύτητα της επιφάνειας και οι δυνάμεις λείανσης.

Για αυτή την έρευνα, τα νανορευστά από γραφίτες, MoS₂ και WS₂ έχουν παρασκευαστεί σε απιονισμένο νερό (DI νερό). Νανοσωματίδια γραφίτη, MoS₂ και WS₂ μέσου μεγέθους σωματιδίων (APS) 400 nm, 500 nm και 500 nm αντιστοίχως αναμιγνύονται σε DI νερό και τα νανορευστά παρασκευάζονται χρησιμοποιώντας την μέθοδο two-step. Η συγκέντρωση των νανοσωματιδίων στο νερό είναι 0.05% κατά βάρος. Για να αποφευχθεί η καθίζηση και για τη σταθερότητα των νανοσωματιδίων στο νερό, προστέθηκε το δωδεκυλοβενζολοσουλφονικό νάτριο (SDBS) με ένα δέκατο βάρος των νανοσωματιδίων. Τα ρευστά έχουν τροφοδοτηθεί στη ζώνη λείανσης με τη βοήθεια εγκατάστασης εσωτερικής λίπανσης ελάχιστης ποσότητας (MQL).

Η ξηρή λείανση νιτριδίου του πυριτίου με λειαντικό τροχό από διαμάντι συγκρίθηκε με τη λείανση κάτω από περιβάλλον MQL με τα τρία νανορευστά που αναλύθηκαν προηγουμένως. Από αυτό το πειραματικό έργο μπορούν να παραχθούν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα. Το νανορευστό MoS₂ παρείχε τη μικρότερη γωνία επαφής σε σύγκριση με τα νανορευστά WS2 και γραφίτη. Η μικρότερη επιφανειακή τάση του MoS_2 νανορευστού σε σύγκριση με άλλα νανορευστά έχει πιθανώς οδηγήσει σε μείωση της γωνίας επαφής. Κατά συνέπεια, το MoS2 έγει παρουσιάσει τα καλύτερα χαρακτηριστικά διαβροχής. Η μεγαλύτερη τιμή ελάττωσης που παρατηρείται στις εφαπτομενικές δυνάμεις κοπής ανήκει στο MoS2 νανορευστό σε όλες τις παραμετρικές συνθήκες. Στην περίπτωση των νανοσωματιδίων MoS2, η μείωση των δυνάμεων λείανσης μπορεί να αποδοθεί στη βελτιωμένη ικανότητα διαβροχής μαζί με την κυλινδρική και διατμητική δράση των νανοσωματιδίων. Ο σχηματισμός προστατευτικού στρώματος οξειδίου στην περίπτωση του MoS2 έχει αποτρέψει επίσης την καταστροφή της επιφάνειας κατά την λείανση. Ενώ παράλληλα, παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτα υψηλές επιφανειακές ζημιές στην περίπτωση ξηρής λείανσης ακολουθούμενη από γραφίτη και WS₂.

3. Περιγραφή-Υλοποίηση υπολογιστικού μοντέλου

Για την επίλυση προβλημάτων στα οποία η πολυπλοκότητά τους σε διάφορα στάδια καθιστούν αδύνατη την επίλυσή τους, συχνά καταφεύγουμε στη χρήση διαφόρων αριθμητικών μεθόδων. Μια από τις πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM), που αποτελεί μια εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων, και η βάση για τη χρησιμοποίησή της τέθηκε τη δεκαετία του '40. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μια πολύπλοκη περιοχή, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, που ονομάζονται Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements), τα οποία συνθέτουν ένα πλέγμα, στους κόμβους του οποίου υπολογίζονται προσεγγιστικά οι ζητούμενες προς επίλυση τιμές. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση διαφόρων φυσικών κλάδων σε μόνιμες ή μεταβατικές καταστάσεις. Συνήθως, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα στάδια.

- Η γεωμετρική κατασκευή του μοντέλου, η οποία υλοποιείται σε ένα πρόγραμμα CAD.
- Η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία του γεωμετρικού μοντέλου, καθώς και η εισαγωγή επιπλέον δεδομένων για τον τρόπο επίλυσης (pre processing).
- Η επίλυση των παραπάνω δεδομένων, με χρήση της κατάλληλης υπολογιστικής μεθόδου από τον επιλύτη (solver).
- Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της επίλυσης, με τη χρήση του τελικού επεξεργαστή (post processor) για την απεικόνιση και μελέτη των αποτελεσμάτων της επίλυσης του προβλήματος.

3.1 Το πακέτο λογισμικού Comsol Multiphysics

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την υπολογιστική προσομοίωση και μελέτη των συνθηκών λείανσης, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics 5.1. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διάφορων εφαρμογών στο πεδίο του μηχανικού, μέσω της επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equations) με τις αρχικές και συνοριακές τους συνθήκες. Βασίζεται σε προηγμένες αριθμητικές μεθόδους για την μοντελοποίηση και επίλυση σύνθετων φυσικών προβλημάτων και διαθέτει ευρεία γκάμα φυσικών εφαρμογών όπως δομική ανάλυση, ηλεκτρικά φαινόμενα, μεταφορά θερμότητας, ακουστική, ρευστά και οπτική, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για σχεδιασμό εφαρμογών συζευγμένων φυσικών φαινομένων. Επίσης, παρέχει στο μηχανικό κατάλληλο σχεδιαστικό περιβάλλον για μοντελοποίηση σε δύο ή τρεις διαστάσεις καθώς και αλληλεπίδραση με άλλα προγράμματα όπως η MATLAB και το AutoCad.

3.2 Σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου

Προκειμένου να υπάρχει συγκριτική δυνατότητα των παραμέτρων που θα εξετασθούν στο επόμενο κεφάλαιο με πειραματικά αποτελέσματα, αποφασίσθηκε η κατασκευή δισδιάστατης (2D) γεωμετρίας η οποία, να προσομοιάζει αυτή της πειραματικής διάταξης του μοντέλου που ανάφεραν στην δημοσίευση τους, οι Li et al. [33]. Η γεωμετρία αποτελείται ουσιαστικά από δύο μέρη. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο ομοίων διαστάσεων με εκείνο της δημοσίευσης των Li et al. [33] και ένα ορθογώνιο ίσου μήκους που εφάπτεται στην άνω πλευρά του τεμαχίου. Οι διαστάσεις του τεμαχίου φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 33: Η τελική γεωμετρία του μοντέλου με διαστάσεις

Για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα.

Aρχικά έχοντας ανοίξει τον πλοηγητή **Model Wizard**, που εμφανίζεται όταν ανοίξουμε το Comsol Multiphysics, επιλέγουμε σύστημα συντεταμένων για 2D γεωμετρία. Στη συνέχεια επιλέχθηκε από την ενότητα **Geometry** με δεξί κλικ η επιλογή **rectangle** (ορθογώνιο) και εισήχθησαν οι τιμές για μήκος και πλάτος. Η θέση του τεμαχίου ορίστηκε στο x=0 mm, y=0 mm, όπως φαίνεται στην εικόνα 33. Με την επιλογή **build all** κατασκευάστηκε το τεμάχιο 40mm x 30mm. Κατά τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκε και το άνω ορθογώνιο στην θέση x=0, y=30mm ώστε να εφάπτεται με το προηγούμενο. Τέλος από την ενότητα **Geometry** επιλέχθηκε η επιλογή **Form an assembly** με **Pair type** → **Identity pair**

Settings Form Union/Assembly Build Selected Build All
Label: Form Assembly
 Form Union/Assembly
Action:
Form an assembly 🗸
Form a union
Form an assembly
Split disconnected pairs
Pair type:
Identity pair v
Relative repair tolerance:
1E-6

Εικόνα 34: Χαρακτηριστικά της γεωμετρίας

Η επιλογή Form an assembly επιλέχθηκε καθώς υποθέτει ότι όλα τα αντικείμενα γεωμετρίας δεν είναι αλληλεπικαλυπτόμενα. Η επιλογή μεταξύ της Identity και Contact Pair διέπεται από τη φυσική που θέλουμε να λύσουμε. Η δημιουργία Contact Pairs θα πρέπει να γίνεται μόνο όταν επιλύουμε ένα πρόβλημα μηχανικής στερεάς λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε για Length unit το mm για μονάδα μέτρησης ώστε να συμβαδίζει με το μοντέλο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Πρέπει να αναφερθεί, ότι αν και σε αρκετές προσομοιώσεις η γεωμετρία του άνω ορθογωνίου άλλαξε, ως προς το πάχος, τα βήματα για την υλοποίησή της είναι όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

3.3 Καθορισμός κίνησης της πηγής

Για να καθοριστεί η ταχύτητα της πηγής θερμότητας σε σχέση με το χρόνο ορίστηκαν δύο συναρτήσεις, η μία είναι η αρχική θέση της πηγής για t=0s και η δεύτερη ακολουθεί ευθύγραμμη ομαλή κίνηση για όσο χρόνο κάνει η πηγή να φτάσει στο τέλος του μήκους του τεμαχίου.

Για την δημιουργία των συναρτήσεων στο Comsol πήγαμε στην ενότητα Global Definitions και με δεξί κλικ επιλέξαμε Functions \rightarrow Analytic

Για την αρχική θέση ορίσαμε:

$$x_0 = v_w * t \tag{3.3.1}$$

όπου $v_w=50$ mm/s, η ταχύτητα πρόωσης (feed speed) σύμφωνα με τους Li et al. [33]

Settings Analytic Plot 🚮 Cre	ate Plot		~ 1	
Label:	Arxiki Thesi			
Function name:	: x0			
 Definition 				
Expression: 0.0	Expression: 0.05 * t			
Arguments: t				
Derivatives: A	utomatic		~	
Periodic Ex	tension			
 Units 				
Arguments:				
Function:				
Advanced				
 Plot Param 	ieters			
** Argument	Lower limit	Upper limit		
t	0	0		

Εικόνα 35: Αρχική θέση πηγής

Για την δεύτερη συνάρτηση που ορίζει την κίνηση της πηγής για t >0 s, ορίσαμε την εξής συνάρτηση:

$$x_1 = v_w * t + l_c \tag{3.3.2}$$

Όπου $v_w=0.05$ m/s, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και το γεωμετρικό μήκος επαφής ορίστηκε από την εξίσωση 2.1.1:

$$l_c = \sqrt{a * d_s}$$

Όπου a: βάθος κοπής, ds: διάμετρος λειαντικού τροχού.

Για το l_c έπειτα από υπολογισμούς με τα δεδομένα των Li et al. [33] υπολογίζεται $l_c=0.001732$ m. Άρα έχουμε για την δεύτερη εξίσωση:

Settings		* #
Analytic		
💷 Plot 📷	Create Plot	
Label:	Euthigrammi kinisi	
Function nam	e: x1	
 Definition 	on	
Expression:	0.05 * t + 0.001732	
Arguments:	t	
Derivatives:	Automatic	~
Periodic	Extension	
 Units 		
Arguments:		
Function:		
▷ Advance	ed	
 Plot Par 	ameters	
Argument	Lower limit	Upper limit
t	0	0.8

Εικόνα 36: Κίνηση πηγής σε συνάρτηση με το χρόνο

Τέλος ο χρόνος που κάνει η πηγή να φτάσει στο τέλος του τεμαχίου υπολογίστηκε από την σχέση:

$$t = \frac{40 \ mm}{v_w}$$

Όπου 40 mm το μήκος του τεμαχίου άρα ο συνολικός χρόνος που θα χρειαστεί είναι t=0.8 s, όπως φαίνεται και στο **Upper limit**.

3.4 Επιλογή υλικών προσομοίωσης κατεργασίας

Σύμφωνα πάλι με τα δεδομένα της δημοσίευσης των Li et al. [33] το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι ένα δείγμα κράματος νικελίου (Ni), το GH4169, με τις διαστάσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στην πολύ καλά ενημερωμένη βιβλιοθήκη υλικών του Comsol περιλαμβάνεται το υλικό αυτό. Οπότε επιλέγοντας το κάτω ορθογώνιο και κάνοντας δεξί κλικ στην επιλογή Materials \rightarrow Add Material επιλέγουμε το Inconel 718 (UNS N07718) και τέλος για να οριστικοποιήσουμε την επιλογή μας πατάμε το Add to Selection. Έτσι το κάτω σχήμα απέκτησε τις ιδιότητες του υλικού που θέλαμε.

Για το άνω ορθογώνιο θα χρησιμοποιήσουμε αρκετά υλικά όπως θα φάνει και στην επόμενη ενότητα ώστε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις ιδιότητες των νανορευστών. Το ρευστό βάσης θα είναι το φοινικέλαιο οπότε με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως και το άνω ορθογώνιο έχει τις ιδιότητες του φοινικελαίου [66].

Όμως σημαντικό είναι να αναλύσουμε ότι κατά την δημιουργία νανορευστών οι ιδιότητες του φυτικού ελαίου αλλάζουν ανάλογα με το νανοσωματίδιο με το οποίο

αναμιγνύεται. Σύμφωνα με την έρευνα της Minea [48] οι εξισώσεις που υπολογίζουν τις τιμές που νανορευστού φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:

$$\begin{split} \rho_{\text{eff}} &= (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \\ c_p \text{eff} &\equiv \frac{(1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_p}{(1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p} \\ \frac{k_{\text{eff}}}{k_f} &= \frac{k_p + 2k_f + 2\varphi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi(k_p - k_f)} \end{split}$$

Εικόνα 37: Εξισώσεις υπολογισμού ιδιοτήτων νανορευστών[48]

Όπου ρ είναι η πυκνότητα, C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και k η θερμική αγωγιμότητα.

Για τους υπολογισμούς των ιδιοτήτων το f αφορά τις ιδιότητες του ρευστού βάσης, του φυτικού ελαίου εν προκειμένω και το p αφορά τις ιδιότητες του εκάστοτε νανοσωματιδίου. Τέλος το φ συμβολίζει το ποσοστό του νανοσωματιδίου στο ρευστό βάσης, που σε αυτή την περίπτωση ήταν 6%.

Αφού έγιναν οι παραπάνω υπολογισμοί για το κάθε νανορευστό ξεχωριστά, συμπληρώθηκαν στο Comsol οι διορθωμένες ιδιότητες του νανορευστού, με βάση τις μονάδες που αναγράφει η στήλη που φαίνεται στην εικόνα 38.

	Property	Name	Value	Unit
1	Density	rho		kg/m³
5	Dynamic viscosity	mu		Pa·s
	Thermal conductivity	k		W/(m·
	Heat capacity at constant pres	Ср		J/(kg·K)
	Ratio of specific heats	gamma		1
	dL	dL	(dL_liqui	
	Coefficient of thermal expansi	alpha	(alpha_li	1/K

Εικόνα 38: Νέες ιδιότητες νανορευστού

Όσον αφορά το ιξώδες υπολογίστηκε μέσω της σχέσης:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi + \varphi^2 \tag{3.4.1}$$

Εκτός από τα νανοσωματίδια (Al₂O₃, SiO₂) που υπολογίστηκε μέσω των σχέσεων: Για το SiO₂

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 56.5\varphi \tag{3.4.2}$$

 $\Gamma\iota\alpha \text{ to } Al_2O_3$

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 39.11\varphi + 533.9\varphi^2 \tag{3.4.3}$$

Όσον αφορά το γ δόθηκε η τιμή γ=1.4 για όλα τα νανορευστά που εξετάστηκαν σε αυτήν την μελέτη.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι το Comsol, πέρα από τις βασικές ιδιότητες των υλικών, διαθέτει μια πληθώρα επιπλέον ιδιοτήτων για διαφορετικές φυσικές (μηχανική των στερεών, ηλεκτρομαγνητισμός, ρεολογία, ακουστική κ.ά.) και για διάφορα μοντέλα υλικού (γραμμικό και μη γραμμικό ελαστικό, υπερελαστικό, ελαστοπλαστικό, βισκοελαστικό κ.ά.).

3.5 Ρυθμίσεις φυσικών μοντέλων

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η φυσική του προβλήματος, ώστε να προσομοιωθεί η μεταφορά θερμότητας με όσο το δυνατόν καλύτερο τρόπο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι κόμβοι που δημιουργήθηκαν στην ενότητα της φυσικής:



Εικόνα 39: Υποκόμβοι των επιλογών φυσικής

Αρχικά μετά την επιλογή της διδιάστατης γεωμετρίας, έγινε η κατάλληλη επιλογή του φυσικού μοντέλου από την πληθώρα επιλογών που έχει το Comsol. Το πιο κατάλληλο μοντέλο για την προσομοίωση που θα κάνουμε είναι το **Conjugate Heat Transfer** → Laminar Flow

Select Physics



Εικόνα 40: Επιλογή συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας

Η επιλογή συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας (conjugate heat transfer) με στρωτή ροή (laminar flow) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της σύζευξης μεταξύ μεταφοράς θερμότητας και ροής ρευστού. Συνδυάζει τις επιλογές φυσικών μοντέλων μεταφοράς θερμότητας σε στερεά (heat transfer in solids) και στρωτής ροής (laminar flow).

Η ομοιόμορφη πηγή ορίζεται με δεξί κλικ Heat transfer \rightarrow Heat Flux, επιλέγοντας την διεπιφάνεια ανάμεσα στα δύο ορθογώνια και η εξίσωση είναι της μορφής:

$$q_0 = q_{wb} * (x > x_0(t)) * (x < x_1(t))$$
(3.5.1)

Ενώ για τριγωνική πηγή η εξίσωση είναι της μορφής:

$$q_{0} = \left(\left(2 * \frac{q_{wb}}{xdif(t[\frac{1}{s}])} * x\left[\frac{1}{m}\right] - \left(\left(2 * q_{wb}\right) * \frac{x_{0}(t[\frac{1}{s}])}{xdif(t[\frac{1}{s}])}\right)(x \ge x_{0}(t)) * (x < x_{1}(t))\right)$$

$$(3.5.2)$$

Όπου q_{wb} ορίζεται ως η πυκνότητα ροής που μεταδίδεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και υπολογίζεται σύμφωνα με τους Li et al. [33] ως εξής:

$$R = \frac{q_{wb}}{q_{total}} \tag{3.5.3}$$

Όπου R είναι συντελεστής ενέργειας και qtotal η συνολική πυκνότητα ροής που δημιουργείται κατά την λείανση.

$$q_{total} = \frac{F_t * v_s}{l_c * b} \tag{3.5.4}$$

Όπου F_t ορίζεται ως η εφαπτομενική δύναμη λείανσης, v_s η ταχύτητα λείανσης και b το πλάτος λείανσης.

Για κάθε είδος νανοσωματιδίων υπολογίζεται ξεχωριστά η qwb, όπως θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο, από τα δεδομένα της μελέτης των Li et al. [33] και συμπληρώνεται στο Comsol, ώστε να γίνουν οι υπολογισμοί.

Για την περίπτωση της πηγής με τριγωνική κατανομή ορίστηκε με δεξί κλικ στο Global Definitions \rightarrow Parameter το q_{wb} [W/m²] και πάλι με δεξί κλικ Global Definitions \rightarrow Functions \rightarrow Analytic δημιουργήθηκε μια νέα εξίσωση όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

Function nan	ne: xdif			
 Definiti 	ion			
Expression:	x1(t)-x0(t)		
Arguments:	t			
Derivatives:	Automa	itic		×
Periodi	c Extensio	on		
 Units 				
Arguments:				
Function:				
Advance	ed			
 Plot Pa 	rameters			
Argumen	ıt	Lower limit	Upper limit	
t		0	0.8	

Εικόνα 41: Εξίσωση για την τριγωνική πηγή

Με αυτές τις μετατροπές έγιναν τα τρεξίματα για την τριγωνική πηγή που θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 42: Ορισμός πηγής στην διεπιφάνεια

Όσον αφορά την στρωτή ροή επιλέχθηκε το πάνω ορθογώνιο και με δεξί κλικ προστέθηκαν οι επιλογές Laminar Flow \rightarrow Inlet, Laminar Flow \rightarrow Outlet, Laminar

Flow \rightarrow **Open Boundary** για να χαρακτηριστεί η ροή του ρευστού στο ορθογώνιο, επιλέγοντας τις αντίστοιχες περιοχές. Στην επιλογή **Inlet** εξετάστηκαν, ανάλογα με τα τρεξίματα, διάφορες τιμές ταχυτήτων όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

3.6 Υπολογισμός θερμικών τάσεων

Για να γίνει ο υπολογισμός των θερμικών τάσεων στην παρούσα προσομοίωση ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα. Αρχικά προστέθηκε από το Add Physics το Structural Mechanics \rightarrow Solid Mechanics, επιλέγοντας το κάτω ορθογώνιο.



Εικόνα 43: Υποενότητα του Comsol για Solid Mechanics

Στην υποενότητα που προκύπτει ορίζουμε με δεξί κλικ στο Linear Elastic Material \rightarrow Thermal Expansion και πάλι με δεξί κλικ Linear Elastic Material \rightarrow Plasticity καθώς λόγω του υλικού υπήρχε περίπτωση να αναπτυχθούν πολύ μεγάλες τάσεις.

Τέλος στην υποενότητα Multiphysics με δεξί κλικ Multiphysics \rightarrow Thermal Coupling και εκεί επιλέγεται στην επιλογή Source \rightarrow Heat Transfer και στην επιλογή Destination \rightarrow Solid Mechanics.

Με αυτόν τον τρόπο το Comsol υπολογίζει τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ώστε να γίνει εκτίμηση τους στην επομένη ενότητα της εργασίας.

3.7 Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης (meshing)

Για την κατασκευή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, το Comsol έχει τη δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος εννέα κατηγοριών, ξεκινώντας από υπερβολικά αραιό (extremely coarse) μέχρι υπερβολικά πυκνό (extremely fine) αλλά και κατευθυνόμενο από το χρήστη, στην ενότητα Mesh. Το Comsol εκτός από τη δυνατότητα αραιού και πυκνού πλέγματος δίνει την δυνατότητα να καθοριστεί από τον χρήστη το είδος των στοιχείων (τριγωνικό ή τετραγωνικό) καθώς και το ανώτερο μέγεθος του κάθε στοιχείου. Με αυτές τις δυνατότητες δοκιμάστηκαν αρκετά είδη πλέγματος όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, με σκοπό να βρεθεί εκείνο που θα αποδώσει καλύτερα αποτελέσματα στο συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης.

Στις εικόνες 44-45 φαίνονται ενδεικτικά ορισμένα από τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 44: Πυκνό τριγωνικό πλέγμα



Εικόνα 45: Τετραγωνικό πλέγμα με προεπιλογή finer

Τέλος αφού επιλέξουμε το επιθυμητό πλέγμα και πατήσουμε την επιλογή **Build all**, με δεξί κλικ **Mesh** \rightarrow **Statistics** έχουμε την δυνατότητα να δούμε τις ιδιότητες των στοιχείων του εκάστοτε πλέγματος, όπως φαίνεται παρακάτω:

Statistics	
Complete mesh	
Element type: All eleme	ents ~
Quadrilateral elements: 78	300
Edge elements: 55	56
Vertex elements: 8	
- Domain element statistic	CS
Number of elements:	7800
Minimum element quality:	0.9657
Average element quality:	0.9987
Element area ratio:	0.7669
Mesh area:	1237 mm ²
Maximum growth rate:	1.0
Average growth rate:	1.0

Εικόνα 46: Στατιστικά στοιχεία πλέγματος

3.8 Ρυθμίσεις επίλυσης

Οι ρυθμίσεις της επίλυσης του προβλήματος βρίσκονται στην ενότητα Study. Προκειμένου να προσθέσουμε το είδος της επίλυσης που επιθυμούμε, επιλέγουμε Add Study → Time dependent. Η επιλογή δυναμικής ανάλυσης είναι οριακά αποδεκτή για προβλήματα επαφής γιατί μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σύγκλισης στην επίλυση, εάν τα αδρανειακά φαινόμενα έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο πρόβλημα, ή αν δεν χρησιμοποιηθεί επαρκώς μικρό μέγιστο χρονικό βήμα. Επιπλέον, σε σχέση με μια στατική ανάλυση προβλέπεται να έχει πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Όμως, η επιλογή δυναμικής ανάλυσης είναι ενδεδειγμένη και επιθυμητή, καθώς προσομοιώνει καλύτερα τα τριβολογικά φαινόμενα, τα οποία είναι χρονικά εξαρτώμενα.

Time Dependent = Compute C Update Solution					
Label: Time Dependent					
 Study Setting 	ļs				
Time unit:	unit: s ~				
Times:	range(0,0.01,0.8)	s			
Relative tolerance:	0.01				
Rest Range X					
 Phy Entry me 	ethod:	Step 👻			
Modi Start:		0			
Ph Step:	Step: 0.01				
He Stop:		0.8			
La	Function to apply to all values: None v				
Replace Add Cancel					
Values of Dependent Variables					
Mesh Selection					
Study Extensions					

Εικόνα 47:Χρονικοί παράμετροι επίλυσης

Αρχικά θέλουμε να ρυθμίσουμε τις χρονικές παραμέτρους με τις οποίες θα τρέξει η προσομοίωση, δηλαδή τον αρχικό και τελικό χρόνο, καθώς και το χρονικό βήμα. Όπως είδαμε και προηγουμένως ο τελικός χρόνος υπολογίστηκε t=0.8s και το βήμα

επιλέχθηκε για t=0.01s που κρίνεται επαρκές (εικόνα 47). Συνεπώς το Comsol υπολογίζει τιμές θερμοκρασίες για τους παραπάνω χρόνους, με την εντολή Compute αφού έχουν ελεχθεί όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης να ανταποκρίνονται στα δεδομένα που έχουμε ορίσει σύμφωνα τα πειραματικά δεδομένα που έχουμε από μελέτες και την φυσική του προβλήματος.

4. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να γίνει η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις διαφορετικές προσομοιώσεις που εξετάστηκαν. Σκοπός είναι η δημιουργία ενός αξιόπιστου μοντέλου προσομοίωσης το οποίο να ανταποκρίνεται σε διάφορες συνθήκες με ακρίβεια και όχι ιδιαίτερα υψηλό υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό θα αναπτυχθεί σταδιακά το μοντέλο.

Πρώτα θα ελεγχθεί η ακρίβεια, που επιτυγχάνεται με δύο διαφορετικά είδη και διάφορες πυκνότητες πλέγματος, για μια συγκεκριμένη περίπτωση και στη συνέχεια θα διερευνηθούν οι τιμές των δύο άγνωστων παραμέτρων του προβλήματος, της ταχύτητας εισαγωγής του ρευστού και το πάχος άνω περιοχής, ώστε να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τα αποτελέσματα καθώς και κατά πόσο το μοντέλο είναι ευαίσθητο σε αυτές τις παραμέτρους. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές το μοντέλο εφαρμόζεται και σε άλλες πέντε περιπτώσεις νανορευστών και ελέγχουμε την ακρίβειά του. Τέλος ελέγχεται η επίδραση της χρήσης διαφορετικού τύπου πηγής για τις 6 διαφορετικές περιπτώσεις και γίνεται σύγκριση για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αρχικά η σύγκριση θα γίνει μόνο με τη διαθέσιμη θερμοκρασία, στη συνέχεια όμως θα υπολογιστούν και μεγέθη που δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν πειραματικά όπως το βάθος στο οποίο υπάρχει επίδραση της θερμότητας της πηγής και οι θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται.

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την μελέτη των Li et al. [33] ώστε να εξεταστεί η εγκυρότητα του εν λόγω μοντέλου. Στόχος είναι επαλήθευση της μέγιστης θερμοκρασίας λείανσης που παρουσιάστηκε στην μελέτη που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Για όλες τις προσομοιώσεις οι τιμές για την μέγιστη θερμοκρασία βρέθηκαν, μετά από αρκετούς ελέγχους, για x=30mm οπότε για t=0.6s, δηλαδή όταν η κατεργασία βρίσκεται στο 75% από το πέρας της. Επίσης οι τιμές της θερμοκρασίας της επιφάνειας μετρήθηκαν λίγο κάτω από το βάθος κοπής συνεπώς για y=29.8mm.

4.1 Μελέτη πλέγματος

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση του σχήματος του πλέγματος. Θα εξετασθούν 10 διαφορετικά πλέγματα, σε πυκνότητα και σε σχήμα. Σε κάθε σχήμα πλέγματος, εξετάζονται πέντε διαφορετικές πυκνότητες. Συνεπώς θα εξεταστεί το είδος του πλέγματος ώστε να αποσαφηνιστεί πιο προσεγγίζει καλύτερα τις επιθυμητές τιμές μέγιστης θερμοκρασίας λείανσης. Οι υπόλοιποι παράμετροι της προσομοίωσης θα εξεταστούν αναλυτικά στην συνέχεια και γι αυτή την προσομοίωση επιλέχθηκαν ως εξής:

Πάχος άνω περιοχής 1 mm και ταχύτητα εισαγωγής ρευστού 0.05 m/s

Το νανορευστό που εξετάστηκε ήταν το Al_2O_3 και ιδιότητες του υπολογίστηκαν όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 48: Μέγιστη θερμοκρασία λείανσης για finer τετραγωνικό πλέγμα

Αρχικά εξετάστηκε το τετραγωνικό πλέγμα με πυκνότητα πλέγματος από την προεπιλογή του Comsol finer. Σε αυτό το πλέγμα είχαμε 616 domain elements και 156 boundary elements. Το μέγιστο μέγεθος κάθε στοιχείου είναι 1.48mm.

Η θερμοκρασία για t=0.6s μετρήθηκε T=130.94 °C και η παρακάτω εικόνα δείχνει ακριβώς τη διακύμανση της θερμοκρασίας την χρονική στιγμή αυτή.



Εικόνα 49: Θερμοκρασία λείανσης για t=0.6s

Η θερμοκρασία αυτή είναι κοντά στην τιμή T=112.4°C που αναγράφεται στην δημοσίευση αλλά δεν ικανοποίει ακριβώς τις απαιτήσεις του μοντέλου. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν και πυκνότερα πλέγματα της μορφής αυτής προκειμένου να πετύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Για τετραγωνικό πλέγμα και για τις προεπιλογές extra fine (2000 domain elements, 280 boundary elements) και extremely fine (7800 domain elements, 556 domain elements) πυκνότητας έγιναν οι ακόλουθες προσομοιώσεις, που έδωσαν σαν αποτελέσματα T= 138.5°C και T=144.1°C. Τα μέγιστα μεγέθη του κάθε στοιχείου του πλέγματος δίνονται από το Comsol 0.8mm και 0.4mm αντίστοιχα. Οι θερμοκρασίες παρατηρούμε ότι αυξάνονται όσο πυκνώνει το πλέγμα, γεγονός που δεν εξυπηρετεί το στόχο μας.

Καθώς έχουμε υπερβεί τις προεπιλογές του Comsol για την πυκνότητα του πλέγματος χρησιμοποιούμε την επιλογή **Custom** για να αυξήσουμε περαιτέρω την πυκνότητα του πλέγματος προσπαθώντας να συγκλίνουμε προς την επιθυμητή τιμή. Mε element size 0.3mm (13936 domain, 744 boundary) και 0.2mm (31000 domain, 1110 boundary) έγιναν δύο ακόμα προσομοιώσεις με αποτελέσματα T=145.4°C και T=138.32°C. Συνεπώς και με τα πέντε διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα δεν προσεγγίστηκε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η μέγιστη θερμοκρασία λείανσης χωρίς όμως τα αποτελέσματα να είναι υπερβολικά μακριά από το επιθυμητό.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε το τριγωνικό πλέγμα όπου κύρια επιδίωξη ήταν να γίνουν αντίστοιχες προσομοιώσεις σε αριθμό στοιχείων με αυτά του τετραγωνικού ώστε να βγουν πιο ασφαλή συμπεράσματα. Συνεπώς για να διατηρηθεί αντιστοίχως αριθμός domain elements χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις η επιλογή custom και το maximum element size καθοριζόταν αναλόγως. Αρκεί να αναλογιστούμε ότι τα τριγωνικά στοιχεία είναι περίπου τα μισά από τα τετραγωνικά οπότε αντίστοιχα το maximum element size θα είναι το διπλάσιο.

	Triangular	Quadrilateral
element size	2.4	1.48
domain element	622	616
boundary element	120	156
element size	1.25	0.8
domain element	2024	2000
boundary element	180	280
element size	0.64	0.4
domain element	7874	7800
boundary element	352	556
element size	0.49	0.3
domain element	13842	13936
boundary element	456	744
element size	0.33	0.2
domain element	31212	31000
boundary element	676	1110

Εικόνα 50: Σύγκριση ιδιοτήτων στοιχείων τετραγωνικού και τριγωνικού πλέγματος

Συνεπώς τα αντίστοιχα τρεξίματα που έγιναν για το τετραγωνικό θα γίνουν και για το τριγωνικό συμπληρώνοντας πριν από κάθε τρέξιμο το maximum element size σύμφωνα με την εικόνα 50. Με τις ίδιες συνθήκες όπως και πριν και με element size 2.4 για t=0.6s η μέγιστη θερμοκρασία λείανσης υπολογίστηκε:



Εικόνα 51: Μέγιστη θερμοκρασία λείανσης για t=0.6s

Και η διακύμανση της θερμοκρασίας για την δεδομένη χρονική στιγμή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 52: Θερμοκρασία λείανσης για t=0.6s

Μέγιστη θερμοκρασία λείανσης μετρήθηκε T=97.39 °C. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία αυτή προσεγγίζει ακόμα καλύτερα την επιθυμητή σε σχέση με το αντίστοιχο τρέξιμο με τετραγωνικό πλέγμα. Πυκνώνοντας το πλέγμα περισσότερο στα επόμενα τρεξίματα θα μας δώσει μια πιο σαφή εικόνα για την ποιότητα του πλέγματος.

Στο δεύτερο τρέξιμο με τριγωνικό πλέγμα και μέγεθος στοιχείου 1.25mm η μέγιστη θερμοκρασία υπολογίστηκε T= 103.75 °C που προσεγγίζει την επιθυμητή τιμή κατά 92% και κατά πολύ καλύτερα από την αντίστοιχη τιμή T= 138.5°C που έδινε το τετραγωνικό πλέγμα για τον ίδιο αριθμό στοιχείων.

Συνεχίζοντας τα τρεξίματα προκύπτει ο πίνακας που φαίνεται παρακάτω με άμεση σύγκριση με τα δεδομένα που προέκυψαν από τα τρεξίματα με τετραγωνικό πλέγμα.

	Triangular	Quadrilateral
Number of elements		
~600	97.39	130.94
~2000	103.75	138.5
~7800	126.92	144.1
~13800	134.98	145.4
~31000	133.61	138.32

Εικόνα 53: Μέγιστες θερμοκρασίες για διαφορετικά είδη πλεγμάτων



Μέγιστη θερμοκρασία λείανσης

Εικόνα 54: Άμεση σύγκριση τιμών για τριγωνικό και τετραγωνικό πλέγμα

Από την εικόνα 54 συμπεραίνουμε ότι το τριγωνικό πλέγμα είναι πιο κατάλληλο για την μελέτη που θέλουμε να διεξάγουμε καθώς στα δύο πυκνότερα τριγωνικά πλέγματα η τιμή T=112.4°C, σύμφωνα με τους Li et al. [33] προσεγγίζεται καλύτερα από ότι στα δύο πυκνότερα τετραγωνικά πλέγματα. Γενικά λόγω της σχετικά απλής γεωμετρίας είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί το τριγωνικό πλέγμα και από άποψη υπολογιστικού χρόνου. Τα τρεξίματα που θα ακολουθήσουν στις επόμενες υποενότητες θα δώσουν ακόμα καλύτερη προσέγγιση της θερμοκρασίας αυτής.

4.2 Μελέτη των 2 παραμέτρων της προσομοίωσης

Αφού μελετήθηκε το πλέγμα και αποδείχθηκε ότι το τριγωνικό πλέγμα είναι το κατάλληλο για αυτού του είδους την προσομοίωση, εξετάστηκαν οι δύο άγνωστοι παράμετροι της προσομοίωσης, το πάχος της άνω επιφάνειας και η ταχύτητα εισόδου του ρευστού. Η ευαισθησία του μοντέλου ως προς αυτές τις παραμέτρους θα φανεί από την μέγιστη θερμοκρασία λείανσης στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

4.2.1 Μελέτη πάχους της άνω επιφανείας του ρευστού

Συνεπώς θα γίνουν τα αντίστοιχα τρεξίματα για τριγωνικά πλέγματα της προηγούμενης υποενότητας για 6 διαφορετικά πάχη από 0.2 mm έως 2 mm.



Εικόνα 55: Μέγιστες θερμοκρασίες για πάχος 0.2 mm



Εικόνα 56: Μέγιστες θερμοκρασίες για πάχος 0.56 mm



Εικόνα 57: Μέγιστες θερμοκρασίες για πάχος 0.92 mm



Πάχος 1.28 mm

Εικόνα 58:Μέγιστες θερμοκρασίες για πάχος 1.28 mm



Εικόνα 59:Μέγιστες θερμοκρασίες για πάχος 1.64 mm



Εικόνα 60:Μέγιστες θερμοκρασίες για πάχος 2 mm

Στα παραπάνω διαγράμματα (εικόνες 55-60) φαίνονται οι θερμοκρασίες λείανσης για 6 διαφορετικά πάχη της επιφάνειας του ρευστού από το πιο αραιό πλέγμα στο πυκνότερο. Παρατηρούμε ότι για μικρά πάχη οι τιμές αποκλίνουν αρκετά σε σχέση με τα μεγαλύτερα πάχη. Στα δύο τελευταία πάχη δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις τιμές των θερμοκρασιών διότι από ένα σημείο και μετά δεν επηρεάζει το πλάτος στην μεταφορά θερμότητας. Συνεπώς επιλέγουμε ως κατάλληλο πάχος το1.64 mm καθώς δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στα επιθυμητά και δεν αυξάνει τη γεωμετρία όπως το 2 mm, συνεπώς και το πλέγμα και τον υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσης.

4.2.2 Μελέτη ταχύτητας εισόδου του ρευστού

Αφού έγινε η επιλογή του πλέγματος και του πάχους της επιφάνειας μελετήθηκε η ταχύτητα του νανορευστού που εισέρχεται στην προσομοίωση. Στις προηγούμενες υποενότητες η ταχύτητα είχε καθοριστεί 0.05 m/s όσο ήταν και η ταχύτητα πρόωσης.

Σε αυτή την υποενότητα θα μελετηθεί η ταχύτητα για εύρος από 0.005 m/s μέχρι 0.05 m/s και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα. Το νανορευστό παραμένει το Al2O3 οπότε και η μέγιστη θερμοκρασία λείανσης παραμένει ίδια με τις προηγούμενες υποενότητες.



Εικόνα 61: Επιθυμητό τριγωνικό πλέγμα και επιθυμητό πάχος άνω περιοχής

Στην παραπάνω εικόνα 61 παρατηρούμε το πλέγμα και την τελική γεωμετρία, που επιλέχθηκαν από τις προηγούμενες υποενότητες, στα οποία θα γίνουν τα τρεξίματα για την ταχύτητα εισόδου με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση της θερμοκρασίας λείανσης. Το πλέγμα θα είναι πυκνό τριγωνικό (31706 domain elements και 680 boundary elements).



Εικόνα 62: Θερμοκρασίες για χρονική στιγμή t=0.6s και ταχύτητα 0.005 m/s



Εικόνα 63: Μέγιστη θερμοκρασία για ταχύτητα 0.005 m/s

Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας λείανσης υπολογίστηκε για ταχύτητα u=0.005 m/s, T=134.26 °C. Η τιμή παραμένει κοντά στην T=112.4 °C αλλά δεν μας ικανοποιεί αρκετά. Αυξάνοντας την ταχύτητα εισόδου αναμένουμε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για ταχύτητα εισόδου u=0.01 m/s παρατηρήθηκε παρόμοια κατανομή θερμοκρασίας στο τεμάχιο για t=0.6s (εικόνα 62) και η μέγιστη θερμοκρασία μετρήθηκε T=134.37 °C. Συνεπώς τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν από το προηγούμενο τρέξιμο.



Εικόνα 64: Θερμοκρασίες για χρονική στιγμή t=0.6s και ταχύτητα 0.01 m/s

Συνεχίζοντας να αυξάνουμε την ταχύτητα εισόδου του ρευστού έχουμε τα εξής αποτελέσματα (εικόνα 65). Η θερμοκρασία μειώθηκε όσο αυξανόταν η ταχύτητα εισόδου του ρευστού με αποτέλεσμα να φτάσει στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για ταχύτητα εισόδου ρευστού ίση με την ταχύτητα πρόωσης, u=0.05 m/s. Η ταχύτητα εισόδου του ρευστού δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από αυτό το νούμερο καθώς χωρίς υψηλή πίεση δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας πρόωσης.



Εικόνα 65: Μέγιστες θερμοκρασίες λείανσης για διαφορετικές ταχύτητες εισόδου

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις θερμοκρασίες για διαφορετικές ταχύτητες, όμως η διαφορά 10 °C μεταξύ των δύο ακραίων τιμών ταχύτητας είναι σημαντική και επομένως θεωρούμε καταλληλότερη ταχύτητα εισόδου του ρευστού την u=0.05 m/s.

Από τα τρεξίματα που έγιναν συμπεραίναμε ότι το τριγωνικό πλέγμα είχε καλύτερα αποτελέσματα από ότι το τετραγωνικό, το πάχος της πάνω ορθογωνικής επιφάνειας που θα περάσει το ρευστό, θα είναι 1.64 mm και η ταχύτητα εισόδου του ρευστού θα είναι ίση με την ταχύτητα πρόωσης 0.05 m/s. Αυτές οι συνθήκες προσομοίωσης έδωσαν αποτελέσματα πιο κοντά στα επιθυμητά (εικόνες 66-67).



Εικόνα 66: Κατανομή θερμοκρασίας για t=0.6s και u=0.05 m/s



Εικόνα 67: Μέγιστη θερμοκρασία λείανσης για t=0.6s και u=0.05 m/s

4.3 Μελέτη διαφορετικών ειδών νανορευστών

Αφού αποφασίστηκαν οι παράμετροι της προσομοίωσης στις προηγούμενες υποενότητες για το Al2O3 σε αυτήν την υποενότητα θα γίνει χρήση του μοντέλου για τα υπόλοιπα νανορευστά που αναφέρουν στην δημοσίευση τους οι Li et al. [33]. Τα νανοσωματίδια αυτά είναι όπως έχουμε δει και σε προηγούμενη ενότητα τα ZrO₂, MoS₂, CNT, PCD και SiO₂.

Οι ιδιότητες για το κάθε ένα από αυτά υπολογίστηκαν όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα και αφού σχηματίστηκαν νανορευστά με βάση το φοινικέλαιο, εισήχθησαν οι νέες ιδιότητες τους στο Comsol ώστε να γίνει η εκάστοτε προσομοίωση.

Η ομοιόμορφη πηγή υπολογίστηκε επίσης ξεχωριστά για το κάθε νανοσωματίδιο σύμφωνα με την μέθοδο που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Για τις προσομοιώσεις που ακολουθούν διατηρήθηκαν οι παράμετροι που είχαν αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα, οι τιμές για την θερμοκρασία θα λαμβάνονται για t=0.6s και σε σημείο της επιφάνειας λίγο κάτω από το βάθος κοπής για y=29.8mm

Το πλέγμα σύμφωνα με όσα αποδείχθηκαν προηγουμένως θα είναι τριγωνικό (31706 domain elements και 680 boundary elements), το πάχος της άνω επιφάνειας θα είναι 1.68 mm και η ταχύτητας εισόδου του ρευστού θα είναι 0.05 m/s.

Με αυτά τα δεδομένα ξεκίνησαν οι προσομοιώσεις που θα αναλυθούν στη συνέχεια της παρούσας εργασίας με αποτελέσματα θερμοκρασίας λείανσης όσο γίνεται πιο κοντά στα επιθυμητά. Θα μετρηθούν επίσης και οι δυνάμεις τάσεις von Mises στο σημείο που αναπτύσσεται η μέγιστη θερμοκρασία λείανσης και για τα 6 νανορευστά καθώς το μοντέλο, μας δίνει την δυνατότητα αυτή.



Για το ZrO2 και με τις παραμέτρους που αναλύθηκαν προηγουμένως έχουμε:

Εικόνα 68: Κατανομή θερμοκρασίας για το νανορευστό ZrO2 την χρονική στιγμή t=0.6s



Εικόνα 69:Μέγιστη θερμοκρασία για το νανορευστό ZrO2 για t=0.6s

Και οι τάσεις για κάθε χρονική στιγμή δίνονται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Εικόνα 70: Τάσεις von Mises για το ZrO₂

Η μέγιστη τάση υπολογίζεται στη χρονική στιγμή που έχουμε και την μέγιστη θερμοκρασία λείανσης, t=0.6s και είναι ίση με 3.324 10^8 N/m².



Εικόνα 71: Μέγιστη τιμή θερμικής τάσης για το ZrO₂

Αντίστοιχα για το MoS2



Εικόνα 72: Κατανομή θερμοκρασίας για το νανορευστό MoS2 την χρονική στιγμή t=0.6s



Εικόνα 73: Μέγιστη θερμοκρασία για το νανορευστό MoS_2 για t=0.6s



Και οι θερμικές τάσεις για το MoS_2 φαίνονται στο διάγραμμα με μέγιστη τιμή την 2.716 $10^8~\rm N/m^2,$ την χρονική στιγμή t=0.6s

Εικόνα 74:Τάσεις von Mises για το MoS₂





Εικόνα 75: Μέγιστη θερμοκρασία για το νανορευστό CNT για t=0.6s

Και οι θερμικές τάσεις για το CNT φαίνονται στο διάγραμμα με μέγιστη τιμή την 2.672 $10^8~\rm N/m^2,$ την χρονική στιγμή t=0.6s



Εικόνα 76:Τάσεις von Mises για το CNT





Εικόνα 77: Μέγιστη θερμοκρασία για το νανορευστό PCD για t=0.6s
Οι θερμικές τάσεις για το PCD φαίνονται στο διάγραμμα με μέγιστη τιμή την 2.86 10^8 $\rm N/m^2,$ την χρονική στιγμή t=0.6s



Εικόνα 78:Τάσεις von Mises για το PCD





Εικόνα 79: Μέγιστη θερμοκρασία για το νανορευστό SiO₂ για t=0.6s



Και οι θερμικές τάσεις για το SiO_2 φαίνονται στο διάγραμμα με μέγιστη τιμή την 3.415 $10^8 \; \text{N/m}^2$



Τέλος για το Al2O3, οι θερμικές τάσεις υπολογίζονται από το παρακάτω διάγραμμα με μέγιστη τιμή την 3.284 $10^8\ {\rm N/m^2}$



Εικόνα 81: Τάσεις von Mises για το Al_2O_3

Όπως φαίνεται και στις εικόνες 69, 73, 75, 75, 79 καθώς και από τα τρεξίματα που έγιναν στην προηγούμενη υποενότητα για το Al₂O₃ οι θερμοκρασίες σε σύγκριση με αυτές της βιβλιογραφίας προκύπτουν ως εξής:



Μέγιστη θερμοκρασία λείανσης



Όπου με πορτοκαλί χρώμα είναι οι τιμές που υπολογίστηκαν στην παρούσα έρευνα ενώ με μπλε χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν από τους Li et al. [33].

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό οι θερμοκρασίες διαφέρουν σε μικρό βαθμό από αυτές που προέκυψαν από την βιβλιογραφία και μπορεί να οφείλονται σε μικροαποκλίσεις στον υπολογισμό των ιδιοτήτων των νανορευστών ή της πηγής.

Όμως παρατηρείται ότι στο νανορευστό που αναπτύχθηκε η χαμηλότερη θερμοκρασία και στις δύο μελέτες ήταν το CNT ενώ αντίστοιχα η υψηλότερη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε και στις δύο μελέτες ήταν στο ZrO2. Το ίδιο συμβαίνει και στις ενδιάμεσες τιμές θερμοκρασίας που αναπτύχθηκαν (εικόνα 82). Συνεπώς, και αυτό είναι το πιο σημαντικό, υπάργει ταύτιση στην σειρά των θερμοκρασιών λείανσης ανάμεσα στην παρούσα μελέτη και την βιβλιογραφία. Με αυτό τον τρόπο αναδεικνύεται η εγκυρότητα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, καθώς συμβαδίζει απόλυτα με την τάση που ακολουθούν οι θερμοκρασίες της βιβλιογραφίας.

Όσον αφορά τις τιμές της μέγιστης τάσης δεν παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διαφορές για κάθε τύπο νανορευστού και συναντώνται για t=0.6s όπου είναι λογικό γιατί τότε το τεμάχιο δέχεται την μεγαλύτερη θερμική φόρτιση καθώς αναπτύσσεται η μέγιστη θερμοκρασία λείανσης. Μεγαλύτερη τιμή αναπτύχθηκε από το ZrO2 και μικρότερη από το SiO₂.



Θερμικές τάσεις (x 10⁸ N/m²)

Εικόνα 83: Μέγιστες τιμές θερμικής τάσης για κάθε νανορευστό

Παρατηρώντας τα διαγράμματα (εικόνες 69, 73, 75, 77, 79) της μέγιστης θερμοκρασίας λείανσης προκύπτει ότι το βάθος διείσδυσης για το κάθε νανορευστό κυμαίνεται από 27 mm έως 27.5 mm όπως φαίνεται ενδεικτικά και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 84: Βάθος διείσδυσης θερμότητας για το ZrO2

4.4 Μελέτη διαφορετικού είδους πηγής

Εκτός από την ομοιόμορφη πηγή υπάρχουν και άλλα είδη πηγής όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα οποία έχουν την ίδια ισχύ αλλά διαφέρει ο τρόπος

κατανομής τους. Σε αυτή την υποενότητα θα εξεταστεί η τριγωνική πηγή και θα συγκριθεί με τα αποτελέσματα της ομοιόμορφης.

Συνεπώς βάζοντας τα δεδομένα για τριγωνική πηγή στο Comsol υπολογισμένα σύμφωνα με τον τρόπο που αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες έχουμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία είναι πάλι στο t=0.6s μετά από δοκιμές που έγιναν σε διάφορους χρόνους. Οι τιμές λαμβάνονται στο y=29.8 mm στην επιφάνεια κατεργασίας και οι παράμετροι της προσομοίωσης παραμένουν οι ίδιοι με αυτούς που επιλέχθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες.

Για το Al2O3 έχουμε λοιπόν ότι η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας λείανσης υπολογίζεται ως T=125.84 °C όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 85: Θερμοκρασία λείανσης για Al₂O₃ με τριγωνική πηγή

Παρατηρούμε και εδώ ότι το βάθος της επίδρασης της θερμότητας, δηλαδή η απόσταση από την επιφάνεια κατεργασίας που αποκτά θερμοκρασία πάνω από την αρχική θερμοκρασία του τεμαχίου είναι στα 27mm.

Οι θερμικές τάσεις υπολογίζονται στο σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη θερμοκρασία ως:



Εικόνα 86: Θερμικές τάσεις για το Al₂O₃ με τριγωνική πηγή

Η μέγιστη θερμική τάση έχει την τιμή σύμφωνα με το διάγραμμα 3.31 $10^8\,\mathrm{N/m^2}$

Οι τιμές αυτές είναι σχεδόν ίδιες με αυτές της ομοιόμορφης πηγής οπότε η κατανομή της πηγής δεν φαίνεται να παίζει σπουδαίο ρόλο στην μέγιστη θερμοκρασία της λείανσης και στην μέγιστη τιμή των θερμικών τάσεων.

Θα εξετάσουμε άλλο ένα νανορευστό για να βεβαιωθούμε για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το επόμενο νανορευστό που θα εξεταστεί θα είναι το ZrO₂ και αν οι τιμές είναι και σε αυτό πολύ κοντινές με αυτές τις ομοιόμορφης πηγής θα συμπεράνουμε ότι σε αυτό το μοντέλο και με αυτές τις συνθήκες δεν επηρεάζονται οι ιδιότητες των νανορευστών από την κατανομή της πηγής.

Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε για το ZrO_2 είναι ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε προηγουμένως οπότε:

Για το ZrO_2 η μέγιστη θερμοκρασία της λείανσης (T=133.49 °C) δίνεται σύμφωνα με την εικόνα:



Εικόνα 87: Θερμοκρασία λείανσης για το ZrO2 με τριγωνική πηγή

Και εδώ το βάθος της επίδρασης της θερμότητας είναι στα 27mm.

Οι τάσεις λαμβάνονται ως εξής:





Η μέγιστη θερμική τάση έχει την τιμή σύμφωνα με το διάγραμμα 3.35 $10^8 \ \mathrm{N/m^2}$

Επομένως δεν χρειάζεται να προχωρήσουμε σε περαιτέρω μελέτη καθώς οι τιμές έχουν ελάχιστες διαφορές από τις αντίστοιχες για ομοιόμορφη πηγή (εικόνες 89-90). Η κατανομή της πηγής είτε είναι ομοιόμορφη είτε τριγωνική στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν επηρεάζει τις παραμέτρους της προσομοίωσης και τα αποτελέσματα έχουν ελάχιστη απόκλιση.



Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)

Εικόνα 89: Σύγκριση τριγωνικής και ομοιόμορφης πηγής σε θερμοκρασίες λείανσης



Μέγιστη τάση (N/m²)

Εικόνα 90: Σύγκριση τριγωνικής και ομοιόμορφης πηγής σε θερμικές τάσεις

5. Σύνοψη και μελλοντικές κατευθύνσεις

Στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η χρήση νανορευστών ως υγρών κοπής υπό συνθήκες ελάχιστης ποσότητας ψυκτικού υγρού κατά την κατεργασία της λείανσης. Το μοντέλο δύο περιοχών μεταφοράς θερμότητας δεν έχει μελετηθεί αρκετά καθώς είναι αρκετά σύγχρονο οπότε είναι σημαντική η σωστή προσομοίωση του. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η ανάλυση των συνθηκών λείανσης για διάφορες περιπτώσεις.

Μετά από μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί η διάταξη των δύο περιοχών συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας, με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου Comsol Multiphysics. Το βασικό πρόβλημα που εξετάστηκε ήταν η επίδραση διάφορων παραμέτρων της προσομοίωσης στην θερμοκρασία λείανσης στο πεδίο του χρόνου. Το υλικό κατεργασίας αποτελεί την μία περιοχή και η στρωτή ροή του ρευστού την άλλη. Το ρευστό αποτελείται από νανοσωματίδια και το υλικό του τεμαχίου είναι κράμα νικελίου. Η πηγή τοποθετήθηκε στην διεπιφάνεια των δύο περιοχών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είχαν άμεση σύγκριση με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας.

Αρχικά εξετάστηκαν δύο είδη πλέγματος (τριγωνικό-τετραγωνικό) με διαφορετικές πυκνότητες (αραιά και πυκνά) για νανορευστό που περιέχει νανοσωματίδια Al2O3 με ομοιόμορφη κατανομή της πηγής. Μετά από αρκετά τρεξίματα το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ότι το κατάλληλο πλέγμα για αυτήν την προσομοίωση ήταν το πυκνό τριγωνικό καθώς είναι ιδανικότερο για προσομοίωσης με απλή γεωμετρία και απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Στη συνέχεια εξετάστηκαν το πάχος της άνω περιοχής και η ταχύτητα εισόδου του ρευστού στην άνω περιοχή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν άμεσα με τιμές τις βιβλιογραφίας ώστε να προκύψει η βέλτιστη λύση που θα συγκλίνει στα πειραματικά δεδομένα. Αφού εξετάστηκαν 6 διαφορετικά πάχη και 7 τιμές ταχυτήτων εισόδου, επιλέχθηκαν οι τιμές που συνέκλιναν καλύτερα στην θερμοκρασία της λείανσης που υπήρχε στην βιβλιογραφία για το δεδομένο νανορευστό. Η ταχύτητα εισόδου του ρευστού προσομοιώθηκε ίση με την ταχύτητα πρόωσης καθώς δεν μπορεί να την υπερβεί καθώς έχουμε μικρή παροχή λόγω του MQL και δεν χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα ψύξης υπό υψηλή πίεση. Μετέπειτα αφού επιλέχθηκαν οι παράμετροι που ανταποκρίνονταν καλύτερα εξετάστηκε η συμπεριφορά διαφορετικών τύπων νανορευστών σύμφωνα με δεδομένα της βιβλιογραφίας. Τα νανορευστά που εξετάστηκαν είγαν τις αναμενόμενες συμπεριφορές στην επίδραση τους στην θερμοκρασία της λείανσης οπότε επαλήθευσαν την εγκυρότητα του μοντέλου. Το μοντέλο αυτό προσφέρει την δυνατότητα να αξιολογήσουμε την απόδοση του τρόπου ψύξης MQL με νανορευστά αλλά και να υπολογίσουμε μεγέθη που δεν μπορούν να υπολογιστούν εύκολα όπως το βάθος διείσδυσης της θερμότητας και τις θερμικές τάσεις. Τέλος μελετήθηκε πηγή τριγωνικής κατανομής που απέφερε αποτελέσματα με ελάχιστη απόκλιση από αυτά της ομοιόμορφης πηγής, συμπέρασμα αναμενόμενο καθώς έχουν την ίδια ισχύ. Συνεπώς η κατανομή της πηγής δεν επηρεάζει σημαντικά το εν λόγω μοντέλο.

Αν και το παρόν μοντέλο έδειξε να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε αρκετές αλλαγές παραμέτρων, σίγουρα υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης και διερεύνησης. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές προτάσεις:

 Επέκταση του μοντέλου σε τρεις διαστάσεις. Θα είχε ενδιαφέρον να παρατηρηθεί αν το μοντέλο θα είχε ανάλογη συμπεριφορά και στον τρισδιάστατο χώρο. Στην παρούσα εργασία δεν έγινε προσπάθεια ανάπτυξης του μοντέλου σε τρεις διαστάσεις καθώς ο υπολογιστικός χρόνος θα υπερέβαινε τον χρονικό ορίζοντα της διπλωματικής εργασίας.

 Ανάλυση περισσότερων τύπων νανορευστών καθώς και μελέτη περισσότερων παραμέτρων της λείανσης όπως οι δυνάμεις λείανσης που αναφέρονται στην βιβλιογραφία

 Ανάπτυξη μοντέλου που θα λαμβάνει υπ' όψιν την εξάτμιση του ρευστού της άνω περιοχής κατά την διάρκεια της κατεργασίας.

Για τη σύνδεση με πιο πρακτικές περιπτώσεις, θα είχε νόημα η εισαγωγή του μοντέλου για τη βελτιστοποίηση κάποιας βιομηχανικής διαδικασίας, αλλά το στάδιο στο οποίο βρίσκονται οι έρευνες στη χρήση των νανορευστών στην λείανση είναι ακόμα πρώιμο και θα χρειαστεί περαιτέρω εμβάθυνση προτού γίνει πρακτική εφαρμογή του μοντέλου.

Βιβλιογραφία

1. Μανωλάκος Δ., Κατεργασίες ΙΙ, Σημειώσεις μαθήματος

2. Ortega N., Bravo H., Pombo I., Sánchez J. A. and Vidal G., Thermal analysis of creep feed grinding. Procedia engineering, 132, 1061-1068., 2015

3. Lim H. S., Fathima K., Kumar A. S. and Rahman M., A fundamental study on the mechanism of electrolytic in-process dressing (ELID) grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(8), 935-943., 2002

4. Alberdi R., Sanchez J. A., Pombo I., Ortega N., Izquierdo B., Plaza S.and Barrenetxea D., Strategies for optimal use of fluids in grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51(6), 491-499., 2011

5. Marinescu I. D., Hitchiner M. P., Uhlmann E., Rowe W. B. and Inasaki I., Handbook of Machining with Grinding Wheels, CRC Press, 2007

6. Rowe W. Brian, Principles of modern grinding technology, William Andrew, 2013

7. S. Ebbrell, N.H. Wooley, Y.D. Tridimas, D.R. Allanson, W.B. Rowe, Effects of cutting fluid application methods on the grinding process, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2), 2000

8. Morgan M. N., Jackson A. R., Wu H., Baines-Jones V., Batako A.and Rowe W. B., Optimisation of fluid application in grinding. CIRP annals, 57(1), 363-366., 2009

9. Cameron A., Bauer R. and Warkentin, A., An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(1), 126-130., 2010

10. Klocke F. A. E. G. and Eisenblätter G., Dry cutting. Cirp Annals, 46(2), 519-526., 1997

11. Malkin S. and Guo, C., Grinding technology: theory and application of machining with abrasives. Industrial Press Inc., 2008

12. Nguyen T. and Zhang L. C., Grinding-hardening using dry air and liquid nitrogen: Prediction and verification of temperature fields and hardened layer thickness. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(10), 901-910., 2010

13. da Silva L. R., Bianchi E. C., Fusse R. Y., Catai R. E., Franca T. V. and Aguiar P. R., Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(2), 412-418., 2007

14. Tawakoli T., Hadad M. J., Sadeghi M. H., Daneshi A., Stöckert S. and Rasifard A., An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(12-13), 924-932., 2009

15. Tawakoli T., Hadad M. J. and Sadeghi M. H., Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant–lubricant types. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(8), 698-708., 2010

16. Hadad M. J., Tawakoli T., Sadeghi M. H. and Sadeghi B., Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 54, 10-17., 2012

17. Rahman M. M., Uddin M., Eltayeb I., Kalbani K. S. A., Alam M. S., & Al-Salti N., Fundamentals of nanofluids: evolution, applications and new theory., 2016

18. SU, S. Choi. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, developments and applications of non-Newtonian flows. ASME FED, 1995, 105.99: 231, 1995

19. Eastman J. A., Choi S. U. S., Li S., Yu W. and Thompson L. J., Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. Applied physics letters, 78(6), 718-720., 2001

20. Zhu H., Zhang C., Liu S., Tang Y.and Yin Y., Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe 3 O 4 aqueous nanofluids. Applied Physics Letters, 89(2), 023123, 2006

21. Liu M. S., Lin M. C. C., Tsai C. Y. and Wang C. C., Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(17-18), 3028-3033., 2006

22. Wong K. V. and De Leon O., Applications of nanofluids: current and future. Advances in mechanical engineering, 2, 519659, 2009

23. Choi S. U., Nanofluids: from vision to reality through research. Journal of Heat transfer, 131(3), 033106, 2009

24. Saidur R., Leong K. Y. and Mohammad H., A review on applications and challenges of nanofluids. Renewable and sustainable energy reviews, 15(3), 1646-1668., 2011

25. Yu W. and Xie H., A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. Journal of nanomaterials, 1, 2012

26. Taylor R., Coulombe S., Otanicar T., Phelan P., Gunawan A., Lv W., ... and Tyagi H., Small particles, big impacts: a review of the diverse applications of nanofluids. Journal of Applied Physics, 113(1), 1, 2013

27. Mahian O., Kianifar A., Kalogirou S. A., Pop I. and Wongwises S., A review of the applications of nanofluids in solar energy. International Journal of Heat and Mass Transfer, 57(2), 582-594., 2013

28. Mao C., Zhang J., Huang Y., Zou H., Huang X. and Zhou, Z., Investigation on the effect of nanofluid parameters on MQL grinding. Materials and Manufacturing Processes, 28(4), 436-442., 2013

29. Lee P. H., Kim J. W. and Lee, S. W., Experimental characterization on eco-friendly microgrinding process of titanium alloy using air flow assisted electrospray lubrication with nanofluid. Journal of Cleaner Production, 201, 452-462., 2018

30. Lee P. H., Nam J. S., Kim J. S. and Lee S. W., Experimental Study on Micro-Grinding Process of Titanium Alloy Using Electro-Hydro-Dynamic Spray With Nanofluid and Compressed Air. In ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference (pp. V002T05A003-V002T05A003). American Society of Mechanical Engineers, 2015

31. Zhang J., Li C., Zhang Y., Yang M., Jia D., Liu G., ... and Cao H., Experimental assessment of an environmentally friendly grinding process using nanofluid minimum quantity lubrication with cryogenic air. Journal of cleaner production, 193, 236-248., Journal of Cleaner Production, 2018

32. Huang W. T. and Liu W. S., Investigations into lubrication in grinding processes using MWCNTs nanofluids with ultrasonic-assisted dispersion. Journal of cleaner production, 137, 1553-1559., 2016

33. Li B., Li C., Zhang Y., Wang Y., Jia D., Yang M., ... and Sun K., Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil. Journal of Cleaner Production, 154, 1-11., Journal of Cleaner Production, 2017

34. Jaeger J.C., Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts, Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales, Vol. 76/3, 1942

35. Outwater J.O., Shaw M.C., Surface temperatures in grinding, Transactions of ASME, 74, 1952

36. Des Ruisseaux N.R., Zerkle R.D., Temperature in semi-infinite and cylindrical bodies subjected to moving heat sources and surface cooling, Journal of Heat Transfer, 92, 1970

37. Guo C. and Malkin S., Energy partition and cooling during grinding. Journal of Manufacturing Processes, 2(3), 151-157., 1999

38. Rowe W. B., Morgan M. N. and Allanson D. A., An advance in the modelling of thermal effects in the grinding process. CIRP annals, 40(1), 339-342, 1991

39. Mahdi M., Zhang L., The finite element thermal analysis of grinding processes by ADINA, Computers and Structures Vol. 56, No. 2/3, p. 313-320, 1995

40. Mamalis A. G., Kundrak J. and Markopoulos A., Numerical simulation for the determination of the temperature fields and the heat affected zones in grinding. Prod Syst Inf Eng Misk, 1, 3-16, 2003

41. Li B., Li C., Zhang Y., Wang Y., Jia D. and Yang M., Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. Chinese Journal of Aeronautics, 29(4), 1084-1095, 2016

42. Jia D., Li C., Zhang D., Zhang Y. and Zhang, X., Experimental verification of nanoparticle jet minimum quantity lubrication effectiveness in grinding. Journal of nanoparticle research, 16(12), 2758, 2014

43. Zhang D., Li C., Jia D., Zhang Y., and Zhang X., Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding. Chinese Journal of Aeronautics, 28(2), 570-581., 2015

44. Nandakumar A., Rajmohan T. and Vijayabhaska, S., Experimental Evaluation of the Lubrication Performance in MQL Grinding of Nano SiC Reinforced Al Matrix Composites. Silicon, 1-13., 2019

45. Shen B., Shih A. J. and Tung S. C., Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding. Tribology Transactions, 51(6), 730-737., 2008

46. Molaie M. M., Akbari J. and Movahhedy M. R., Ultrasonic assisted grinding process with minimum quantity lubrication using oil-based nanofluids. Journal of cleaner production, 129, 212-222., 2016

47. Kumar A., Ghosh S. and Aravindan S., Grinding performance improvement of silicon nitride ceramics by utilizing nanofluids. Ceramics International, 43(16), 13411-13421., 2017

48. Minea A. A., Hybrid nanofluids based on Al2O3, TiO2 and SiO2: numerical evaluation of different approaches. International Journal of Heat and Mass Transfer, 104, 852-860., 2017

49. Barczak L.M., Batako A.D.L. and Morgan M.N., A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 50(11), 977-985, 2010

50. Chen Z. Z., Xu J. H., Ding W. F., Ma C. Y. and Fu Y. C., Grinding temperature during high-efficiency grinding inconel 718 using porous cbn wheel with multilayer defined grain distribution. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 77(1), 165-172, 2015

51. Choi S.U.S., Zhang Z.G., Yu W. and Lockwood F.E., Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. Applied Physics Letters. 79(14), 2252-2254, 2001

52. Chu H.Q. and Yu B.M., Fractal analysis of boiling heat. Advances in Mechanics.13,259-272, 2009

53. Das S.K., Putra N. and Roetzel W., Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes. International Journal of Multiphase Flow.29(8),1237-1247, 2003

54. Das S.K., Putra N. and Roetzel W., Pool boiling characteristics of nano-fluid. International Journal of Heat & Mass Transfer. 46(5), 851-862, 2003

55. Deb S. and Yao S.C., Analysis on film boiling heat transfer of impacting spray. Heat Mass Transf.32,2099-2112. Gu, T.R., Zhu, B.Y., Li, W.L., 2004. Surface chemistry. Beijing: Science Press, 1989

56. Hadad M. J., Tawakoli T., Sadeghi M. H. and Sadeghi, B., Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 54, 10-17., 2012

57. Hong T.K., Yang H.S and Choi C.J., Study of the enhanced thermal conductivity of Fe Nanofluids, Journal of Applied Physics. 97(6),064311-064314, 2005

58. Buongiorno J., Hu L. W., Kim S. J., Hannink R., Truong B. A. O. and Forrest E., Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: an evaluation of the potential features, issues, and research gaps. Nuclear Technology, 162(1), 80-91., 2008

59. Buongiorno J., Hu L. W., Apostolakis G., Hannink R., Lucas T. and Chupin A., A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in light-water reactors. Nuclear Engineering and Design, 239(5), 941-948., 2009

60. Rahman M. M. and Eltayeb, I. A., Radiative heat transfer in a hydromagnetic nanofluid past a non-linear stretching surface with convective boundary condition. Meccanica, 48(3), 601-615., 2013

61. Rahman M. M., Roşca A. V. and Pop I., Boundary layer flow of a nanofluid past a permeable exponentially shrinking/stretching surface with second order slip using Buongiorno's model. International Journal of Heat and Mass Transfer, 77, 1133-1143., 2014

62. Rahman M. M., Rosca A. V. and Pop I., Boundary layer flow of a nanofluid past a permeable exponentially shrinking surface with convective boundary condition using Buongiorno's model. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 25(2), 299-319., 2015

63. Rahman M. M., Grosan T. and Pop I., Oblique stagnation-point flow of a nanofluid past a shrinking sheet. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 26(1), 189-213., 2016

64. Rahman M. M., Al-Rashdi M. H. and Pop I., Convective boundary layer flow and heat transfer in a nanofluid in the presence of second order slip, constant heat flux and zero nanoparticles flux. Nuclear Engineering and Design, 297, 95-103., 2016

65. Alam M. S. and Hossain S. C., Effects of Viscous Dissipation and Joule Heating on Hydromagnetic Forced Convective Heat and Mass Transfer Flow of a Nanofluid along a Nonlinear Stretching Surface with Convective Boundary Condition. Journal of Engineering e-Transaction, 8(1), 01-09., 2013

66. Rojas E. E. G., Coimbra J. S. and Telis-Romero J., Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower and soybean oils as a function of temperature. International journal of food properties, 16(7), 1620-1629., 2013

67. Sheremet M. A., Pop I., and Rahman M. M., Three-dimensional natural convection in a porous enclosure filled with a nanofluid using Buongiorno's mathematical model. International Journal of Heat and Mass Transfer, 82, 396-405., 2015

68. Mandal B., Singh R., Das S. and Banerjee S., Development of a grinding fluid delivery technique and its performance evaluation. Materials and Manufacturing Processes, 27(4), 436-442, 2012

69. Li C. H., Mao W., Hou Y. L. and Ding Y. C., Investigation of hydrodynamic pressure in high-speed precision grinding. Procedia Engineering, 15, 2809-2813, 2011

70. Thamizhmanii S. and Rosli S. H., A study of minimum quantity lubrication on Inconel 718 steel. Archives of Materials Science and Engineering, 39(1), 38-44, 2009

71. Srikant R. R., Prasad M. M. S., Amrita M., Sitaramaraju A. V. and Krishna, P. V., Nanofluids as a potential solution for minimum quantity lubrication: a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 228(1), 3-20., 2014

72. Tawakoli T., Hadad M., Sadeghi M. H., Daneshi A. and Sadeghi B., Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant–lubricant types. Journal of Cleaner Production, 19(17-18), 2088-2099., 2011

73. Teng T. P., Hung Y. H., Teng T. C., Mo H. E., & Hsu H. G., The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. Applied Thermal Engineering, 30(14-15), 2213-2218. 2010

74. Shen B., Malshe A. P., Kalita P. and Shih A. J., Performance of novel MoS2 nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. Trans. NAMRI/SME, 36(357), e364, 2008

75. Vasu V. and Kumar, K. M., Analysis of nanofluids as cutting fluid in grinding EN-31 steel. Nano-Micro Letters, 3(4), 209-214., 2011

76. Feng J., Chen P. and Ni J., Prediction of surface generation in microgrinding of ceramic materials by coupled trajectory and finite element analysis. Finite Elements in Analysis and Design, 57, 67-80, 2012

77. Xie G. Z. and Huang H., An experimental investigation of temperature in high speed deep grinding of partially stabilized zirconia. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(14), 1562-1568., 2008

78. Yu T., Li H. and Wang W., Experimental investigation on grinding characteristics of optical glass BK7: with special emphasis on the effects of machining parameters. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82(5-8), 1405-1419, 2016

79. Liu Y., Li B., Wu C. and Zheng Y., Simulation-based evaluation of surface micro-cracks and fracture toughness in high-speed grinding of silicon carbide ceramics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86(1-4), 799-808., 2016

80. Liu Q., Chen X. and Gindy N., Assessment of Al2O3 and superabrasive wheels in nickelbased alloy grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33(9-10), 940-951, 2007

81. Sharma A. K., Tiwari A. K. and Dixit A. R., Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, 127, 1-18., 2016