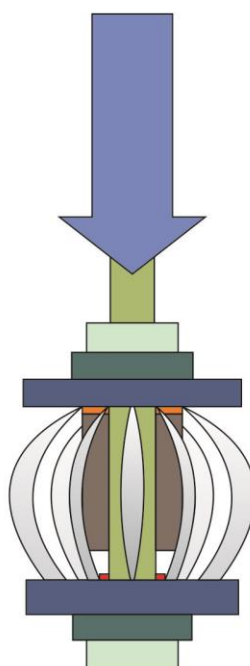




ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ



ΒΑΛΣΑΜΙΔΗΣ ΓΙΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, τους φίλους και συμφοιτητές μου. Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης καθώς και τη Δρ. Μαρία Παππά και τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Βακόνδιο τόσο για την επίβλεψη, όσο και για τη βοήθεια και την αποτελεσματική συνεργασία. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη συμπαράσταση

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2. ΛΕΙΑΝΣΗ	4
2.1 Είδη λείανσης	7
2.2 Μηχανισμός λείανσης	8
2.3 Λειαντικός τροχός	9
2.4 Παράμετροι λείανσης	12
2.5 Μοντελοποίηση διεργασιών λείανσης	13
2.6 Προσομοίωση διεργασιών λείανσης	23
2.7 Τελευταίες εξελίξεις της έρευνας πάνω στη λείανση	31
3. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	35
3.1 Το καινοτόμο εργαλείο του Hierrp	35
3.2 Μαθηματική μοντελοποίηση του κοπτικού με τις λεπίδες	36
3.3 Η επίδραση της περιστροφής στο σύστημα των λεπίδων	37
3.4 Σχεδιασμός και ανάπτυξη του VRC	40
3.5 Αυτοματοποιημένοι μηχανισμοί του VRC	42
3.6 Ενσωμάτωση και ολοκλήρωση της κίνησης του ελεγκτή	44
3.7 Ρύθμιση του συστήματος	44
4. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	47
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	66

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σημασία της κατεργασίας αφαίρεσης υλικού είναι τεράστια στην κατασκευαστική τεχνολογία. Από την εφεύρεση του τόνου το 1700 υπάρχει μια διαρκής εξέλιξη μέχρι σήμερα όπου χρησιμοποιούνται πολυάριθμες μηχανές αριθμητικού ελέγχου CNC και νέες τεχνικές διαφόρων πηγών ενέργειας. Οι πιο ευέλικτες κατεργασίες είναι το φραιζάρισμα (milling), το πλάνισμα (planing), η επίπεδη μορφοποίηση επιφανειών (shaping), η αυλάκωση (broaching) και το πριόνισμα (sawing).

Διαχρονικά, η ανάπτυξη της οικονομίας βασίζεται κατά κύριο λόγο στις μηχανουργικές μορφοποιήσεις, λόγω του τεράστιου αριθμού των βιομηχανικών κλάδων που στηρίζονται στη μαζική παραγωγή εξαρτημάτων και αντικειμένων. Η συνεχώς αυξανόμενη τεχνολογική εξέλιξη, ιδιαίτερα στον 20ο αιώνα, οφείλεται μεν στην οργάνωση σε γραμμές παραγωγής, αλλά κυρίως στην εμφάνιση καινοτόμων εργαλείων. Αν και προέκυψαν υψηλότερα κόστη όσον αφορά την αγορά των εργαλείων και το κόστος εγκατάστασης της γραμμής παραγωγής, ο αριθμός των τελικών τεμαχίων όχι μόνο έχει αυξηθεί σημαντικά, αλλά συγχρόνως το κόστος κάθε τεμαχίου είναι αρκετά χαμηλό συγκριτικά με αυτό του παρελθόντος.

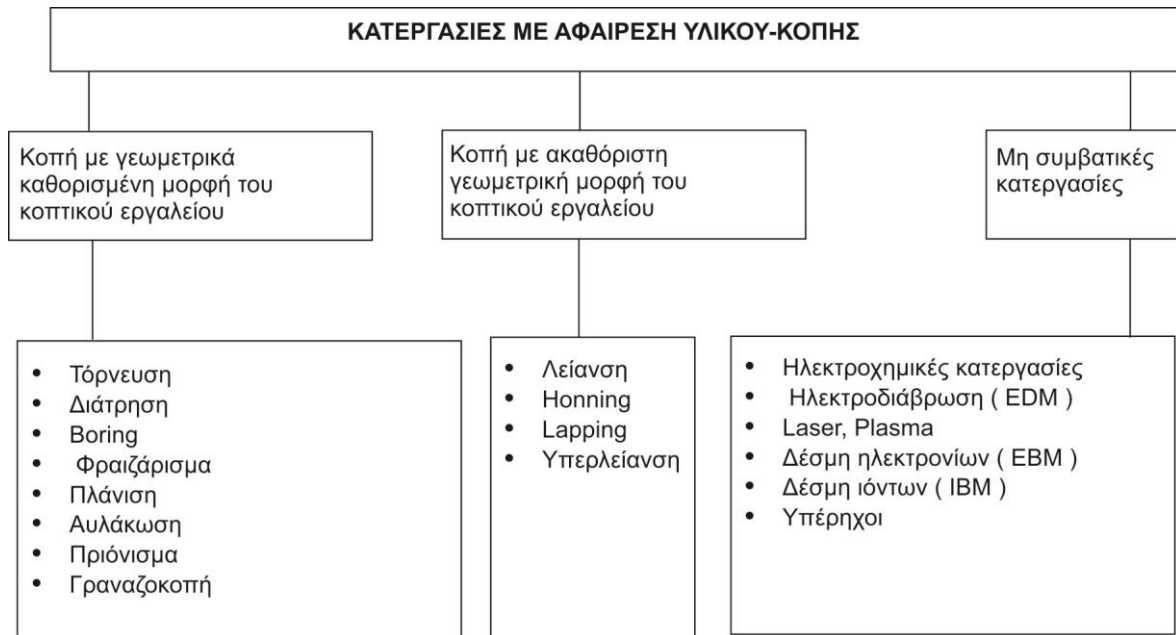
Η λείανση ορίζεται ως η αφαίρεση υλικού με χρήση λειαντικού τροχού από κόκκους σκληρού υλικού που συγκρατούνται από συνδετικό υλικό. Έτσι, αποτελεί κατεργασία κοπής πολλαπλής σημειακής επαφής. Η λείανση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αποπεράτωσης, δηλαδή αφαίρεσης υλικού μέσω χρήσης σκληρών κόκκων και η χρήση της κρίνεται σκόπιμη για τεμάχια υψηλής σκληρότητας και ψαθυρότητας, για υψηλή επιθυμητή επιφανειακή ποιότητα και για μεγάλη διαστατική ακρίβεια. Οι περισσότερες κατεργασίες λείανσης χρησιμοποιούνται για την επίτευξη καλής επιφανειακής ποιότητας, γεγονός το οποίο οφείλεται στη χρήση λεπτόκοκκων λειαντικών τροχών, σε υψηλότερες ταχύτητες πρόωσης και σε τροχούς με μεγαλύτερο αριθμό κόκκων ανά επιφάνεια λείανσης (πυκνότερη υφή). Αξιοσημείωτο είναι πως η επιφανειακή ποιότητα μπορεί να είναι ως και δέκα φορές καλύτερη από αυτήν που παράγεται είτε στο φραιζάρισμα, είτε στην τόννευση. Ακόμα, η λείανση παρέχει σχήματα με υψηλή ακρίβεια μορφής καθώς και χρησιμοποιείται στο τρόχισμα κοπτικών εργαλείων.

Η εξέλιξη του κλάδου αυτού απαιτεί εξοικονόμηση χρόνου και κόστους παραγωγής, διατηρώντας υψηλή ποιότητα τελικού προϊόντος. Λύση είναι το ενιαίο εργαλείο για διαφορετικές γεωμετρικές απαιτήσεις. Αυτή η κατεύθυνση στην εξέλιξη της έρευνας είναι πολύ καινοτόμα και έχουν ασχοληθεί ελάχιστοι, όπως για παράδειγμα ο Hierpp Tran.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η εξέλιξη της έρευνας πάνω στην λείανση μέχρι σήμερα, προτείνοντας λύσεις για χρήση μοναδικού εργαλείου ανά κατεργασία πολύπλοκης γεωμετρίας.

2. ΛΕΙΑΝΣΗ

Ο όρος αφαίρεση υλικού αντιπροσωπεύει την αφαίρεση μιας ποσότητας μη επιθυμητού υλικού από ένα αρχικό τεμάχιο, το οποίο είναι συνήθως σφυρήλατο ή χυτό, και τη μετατροπή του σε ένα τελικό προϊόν που θα εκπληρώνει συγκεκριμένες σχεδιαστικές απαιτήσεις και που θα έχει μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα επιφάνειας. Η αφαίρεση υλικού στα πλαίσια κατεργασίας γίνεται χειροκίνητα με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων όπως η λίμα και το πριόνι, ή με εργαλειομηχανές όπως ο τόρνος, η φραιζα, η πλάνη κτλ. Οι εργαλειομηχανές αυτές παρέχουν τη δυνατότητα όχι μόνο συνηθισμένων κυλινδρικών ή επίπεδων επιφανειών, αλλά και ειδικές διαμορφώσεις όπως το σπείρωμα και οι οδοντώσεις. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες κατεργασιών με αφαίρεση υλικού.



Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση κατεργασιών κοπής

Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως η μηχανουργική μορφοποίηση αφαίρεσης διακρίνεται στην κοπή με προκαθορισμένη γεωμετρία κόψης και σε αυτήν με μη προκαθορισμένη γεωμετρία κόψης. Στις συγκεκριμένες κατεργασίες, η ύλη του μορφοποιούμενου αντικειμένου διασπάται μετά την έντονη παραμόρφωση που συμβαίνει στην περιοχή επαφής του τεμαχίου με το κοπτικό εργαλείο. Στη συνέχεια, παρατηρείται το φαινόμενο του αποχωρισμού του υλικού από το τεμάχιο μέσω προσαγωγής θερμικής ενέργειας, όπου αποχωρίζονται μικρές ποσότητες ύλης μέσω υγροποίησης ή εξαέρωσης του υλικού. Αυτή η ποσότητα ύλης ονομάζεται απόβλιτο (γρέζι), έχει διάφορες μορφές και περιγράφει την ενέργεια αποχωρισμού ενός υλικού από ένα τεμάχιο, μέσω μίας ιδιοσυσκευής ή με τη χρήση μηχανικής διάταξης.

Το συνεχές απόβλιτο δημιουργείται από συνεχή πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της ζώνης διάτμησης και δηλώνει την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κοπής. Συνεχές απόβλιτο υπάρχει σε όλκιμα μέταλλα ή κράματα και στο χαλκό.

Το ασυνεχές απόβλιτο δημιουργείται με την περιοδική θραύση του αποβλίτου καθώς περνάει από τη ζώνη διάτμησης. Συναντιέται σε ψαθυρά υλικά όπως ο χυτοσίδηρος και οφείλεται σε λανθασμένη επιλογή των συνθηκών κοπής, με πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής, με μεγάλες προώσεις καθώς και σε κοπτικά εργαλεία με μικρές γωνίες αποβλίτου.

Σημαντικό είναι το γεγονός πως παρόλο που κατεργασίες όπως η τόρνευση, η διάτρηση,

το φραιζάρισμα, η πλάνιση, το πριόνισμα, η αυλάκωση και η λείανση θεωρούνται κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, όλες οι παραπάνω εκτός από τη λείανση αποτελούν κατεργασίες κοπής με διάτμηση, ενώ η λείανση αποτελεί κοπή με απόξεση.

Η κινηματική της κοπής καθορίζει τις σχετικές θέσεις ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο καθώς και τον τρόπο με τον οποίο θα εξελιχθεί η κοπή. Ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες αποτελούν οι συνθήκες κοπής, όπως η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής.

Ως ταχύτητα κοπής ορίζεται η στιγμιαία ταχύτητα της κύριας κίνησης κοπής που αποκτά ένα σημείο της κόψης του εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αντίστοιχα, η στιγμιαία ταχύτητα της δευτερεύουσας κίνησης πρόωσης που αποκτά ένα σημείο της κόψης του εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο αποτελεί την ταχύτητα πρόωσης.

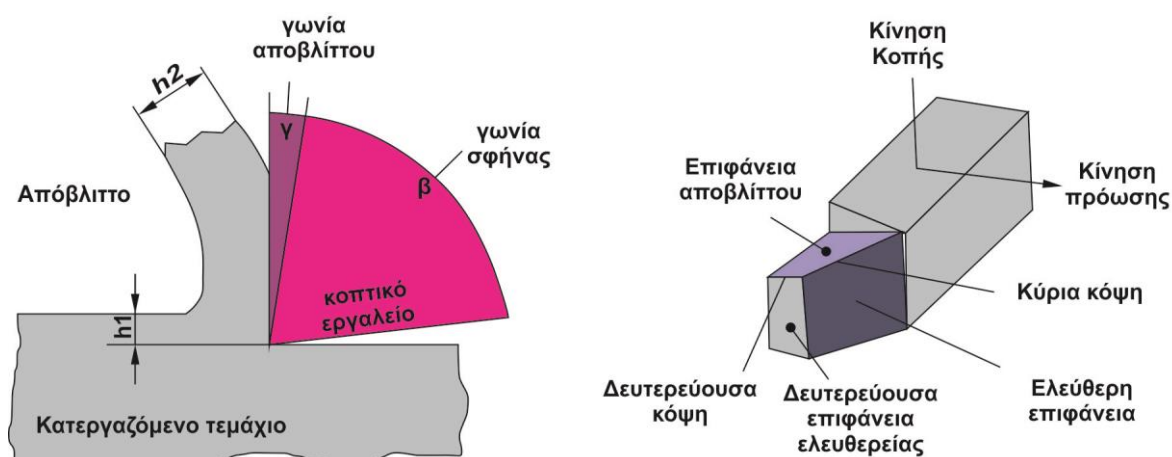
Εκτός από τις συνθήκες κοπής, υπάρχουν αρκετές εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές οι οποίες μπορούν να αλλάξουν άμεσα κατά την κατεργασία είναι:

- το υλικό,
- η γεωμετρία και η οξύτητα του κοπτικού εργαλείου,
- η χρήση υγρών κοπής,
- οι συνθήκες κοπής όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως και
- οι μηχανισμοί συγκράτησης τόσο του κοπτικού εργαλείου, όσο και του τεμαχίου.

Αντίθετα, οι εξαρτημένες μεταβλητές επηρεάζονται από πιθανές αλλαγές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Αυτές είναι:

- η μορφή του αποβλίπτου (συνεχές ή ασυνεχές) και η γεωμετρία του,
- οι δυνάμεις και η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την κατεργασία,
- η αύξηση θερμοκρασίας στο απόβλιττο, στο τεμάχιο και στο κοπτικό εργαλείο,
- η φθορά του κοπτικού και
- η ποιότητα της επιφάνειας που προέκυψε.

Όσον αφορά τη γεωμετρία της κόψης, στο ακόλουθο σχήμα 2.2 αναπαρίσταται μια κοπτική σφήνα που εισέρχεται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και μπορεί να προσομοιώσει την κατεργασία αφαίρεσης υλικού.



Σχήμα 2.2 Γεωμετρία κοπτικής σφήνας.

Όπως διακρίνεται, η γωνία ελευθερίας α , σχηματίζεται ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια και την κατεύθυνση της κοπής και επηρεάζει τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Η γωνία σφήνας β σχηματίζεται ανάμεσα στις επιφάνειες αποβλίπτου και ελευθερίας, ενώ η γωνία

αποβλήτου γ σχηματίζεται ανάμεσα στην κάθετο της κατεύθυνσης της κοπής και στην επιφάνεια αποβλήτου.

Τόρνευση

Στην τόρνευση, η κύρια κίνηση είναι η περιστροφική κίνηση της ατράκτου όπου το τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του ενώ συγκρατείται από το σφικτήρα (τσοκ) του τόννου και η δευτερεύουσα κίνηση είναι η πρόωση του κοπτικού εργαλείου. Τα τεμάχια που κατεργάζονται στη συγκεκριμένη κατεργασία είναι συνήθως κυκλικής διατομής και συμμετρικά εκ περιστροφής. Τα διάφορα είδη τόρνευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με:

- τη διάταξη του άξονα τόρνευσης (οριζόντια και κατακόρυφη).
- τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας (εσωτερική και εξωτερική).
- την αμοιβαία σχέση μεταξύ της κύριας και δευτερεύουσας κίνησης, (διαμήκης τόρνευση όπου η κίνηση πρόωσης είναι παράλληλη με τον άξονα τόρνευσης, εγκάρσια τόρνευση όπου η κίνηση πρόωσης είναι κάθετη με τον άξονα τόρνευσης, μετωπική τόρνευση, ακτινική τόρνευση και κωνική τόρνευση όπου η διεύθυνση της πρόωσης τέμνει τον άξονα τόρνευσης).
- Ειδικές торνεύσεις όπως η σπειρωτόμηση (εσωτερική ή εξωτερική) και η τόρνευση με πολλά κοπτικά εργαλεία, είτε με διαιρούμενη πρόωση, είτε με διαιρούμενο βάθος κοπής.

Σημαντικό ρόλο έχει η πρόωση και η ταχύτητα κοπής, οι τιμές των οποίων επηρεάζουν μεγέθη όπως η ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας, ο χρόνος κατεργασίας, οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις και η καταναλισκόμενη ισχύς της κοπής καθώς και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.

Διάτρηση.

Με τη διάτρηση επιτυγχάνονται οι οπές διαφόρων μορφών και μεγεθών σε μεταλλικά ή όχι αντικείμενα. Οι διατρήσεις μπορεί να είναι είτε πλήρους οπής, είτε μεγέθυνσης οπής. Στη διάτρηση, η κύρια κίνηση είναι η περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου, δηλαδή του τρυπανιού. Δευτερεύουσα κίνηση είναι η μετακίνηση του τρυπανιού προς το τεμάχιο. Τα μεγέθη που επηρεάζουν την κατεργασία της διάτρησης είναι εκτός από τις συνθήκες κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση και βάθος οπής) οι ιδιότητες του τεμαχίου, το υλικό και η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου.

Φραιζάρισμα.

Τα τεμάχια που κατεργάζονται με το φραιζάρισμα είναι από υλικά όπως χάλυβας, χυτοσίδηρος και σύνθετα υλικά, τα οποία μπορούν να διαθέτουν επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες, εσοχές και αυλάκια. Κύρια κίνηση κοπής στο φραιζάρισμα είναι η περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου, το οποίο ουσιαστικά είναι ένας κύκλος που φέρει πολλές κοπτικές ακμές. Οι κατηγορίες φραιζαρίσματος αφορούν την κατεύθυνση του άξονα του κοπτικού εργαλείου ως προς την επιφάνεια που κατεργάζεται. Έτσι, υπάρχει το περιφερικό φραιζάρισμα όπου ο άξονας του κοπτικού εργαλείου είναι παράλληλος με την επιφάνεια και το μετωπικό φραιζάρισμα όπου ο άξονας είναι κάθετος με την επιφάνεια.

Πλάνιση.

Η πλάνιση θα μπορούσε να οριστεί ως η συνεχής κατεργασία ενός κοπτικού εργαλείου σε περάσματα για τη διαμόρφωση του τεμαχίου. Διακρίνεται στην οριζόντια και στην κατακόρυφη πλάνιση. Στην οριζόντια πλάνιση κατεργάζονται κατά κύριο λόγο οριζόντιες επίπεδες επιφάνειες καθώς και αυλάκια. Στην κατακόρυφη πλάνιση γίνεται κατεργασία πιο πολύπλοκων επιφανειών. Στην συγκεκριμένη κατεργασία η ταχύτητα κίνησης του κοπτικού εργαλείου αποτελεί την ταχύτητα κοπής, εκτός από την περίπτωση όπου η

εργαλειομηχανή (πλάνη) είναι οριζόντια, όπου ως ταχύτητα κοπής ορίζεται η ταχύτητα κίνησης του τραπέζιου.

Πριόνισμα.

Η διαδικασία στην οποία το κοπτικό εργαλείο είναι μία πριονολάμα ή ένας κοπτικός δίσκος, το οποίο πραγματοποιεί τόσο την κίνηση της κοπής όσο και της πρόωσης για να αποκόπτει διάφορα υλικά, ονομάζεται πριόνισμα. Τα βασικά είδη πριονίσματος είναι το πριόνισμα με πριονολάμα, το πριόνισμα με πριονοκορδέλα και το πριόνισμα με δισκοπρίονο. Στην πρώτη περίπτωση, η πριονολάμα κινείται μπροστά ή πίσω, είτε χειροκίνητα, είτε με μηχανικό τρόπο. Στην δεύτερη περίπτωση, το κοπτικό κινείται σαν ένας ιμάντας, ενώ στην περίπτωση κοπτικού δίσκου ο οποίος φέρει κοπτικά δόντια στην περιφέρεια του, παράγεται το καλύτερο αποτέλεσμα.

Αυλάκωση.

Αυλάκωση είναι η κατεργασία στην οποία το κοπτικό εργαλείο που φέρει κοπτικά δόντια στη σειρά, εκτελεί μια ευθύγραμμη κίνηση προς το τεμάχιο με σκοπό να αφαιρέσει υλικό από αυτό. Δύο είναι τα είδη της αυλάκωσης, η εξωτερική όπου γίνεται κατεργασία της εξωτερικής επιφάνειας, και η εσωτερική αυλάκωση όπου γίνεται κατεργασία μιας οπής που έχει ήδη διαμορφωθεί. Τα πιο συνηθισμένα αντικείμενα με εσωτερική αυλάκωση είναι φλάντζες, οδοντώσεις και δίσκοι τουρμπίνων.

Λείανση

Το κοπτικό εργαλείο στη λείανση είναι ένας περιστρεφόμενος λειαντικός κόκκος ή τροχός λείανσης που φέρει κοπτικούς ή αλλιώς λειαντικούς κόκκους. Ο τροχός αυτός που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα, ανάλογα με το επιθυμητό τεμάχιο έχει διάφορα μεγέθη και σχήματα, και ανάλογα με ποια επιφάνεια κατεργάζεται το τεμάχιο, προκύπτουν τα διάφορα είδη λείανσης όπως θα περιγραφούν στην επόμενη παράγραφο.

Η λείανση αποτελεί μία από τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Βρίσκει εφαρμογή στο τρόχισμα των κοπτικών εργαλείων αλλά και σε σκληρά ή όχι τεμάχια. Δημιουργείται πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας του τεμαχίου, όσο και υψηλή διαστατική ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο, η λείανση χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση τεμαχίου με υψηλή ακρίβεια.

2.1. Είδη λείανσης

• Επίπεδη λείανση

Πρόκειται για λείανση επίπεδων επιφανειών και διακρίνεται σε περιφερειακή και μετωπική λείανση, ανάλογα με τη διάταξη του κοπτικού τμήματος του τροχού ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Είναι μια διαδικασία τελικής επεξεργασίας που χρησιμοποιεί ένα περιστρεφόμενο τροχό λείανσης για να εξομαλύνει την επίπεδη επιφάνεια μεταλλικών ή μη μεταλλικών υλικών για να τους δώσει μια πιο εκλεπτυσμένη εμφάνιση.

• Κυλινδρική λείανση

Χρησιμοποιείται για την κατεργασία κυλινδρικών επιφανειών. Διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική κυλινδρική λείανση. Κυλινδρικό τρόχισμα χρησιμοποιείται για να λειάνει τις κυλινδρικές επιφάνειες και τους ώμους του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το τεμάχιο τοποθετείται σε κέντρα και περιστρέφεται από μία συσκευή, γνωστή ως “drive dog” ή οδηγό του κέντρου (center driver). Ο τροχός λείανσης και το τεμάχιο περιστρέφονται από χωριστούς κινητήρες και σε διαφορετικές ταχύτητες.

• Άκεντρη λείανση

Στην άκεντρη λείανση το τεμάχιο υποστηρίζεται από μία λεπίδα αντί με κέντρα ή τσοκ. Χρησιμοποιούνται δύο τροχοί, ο μεγαλύτερος χρησιμοποιείται για να λειάνει την επιφάνεια

του τεμαχίου εργασίας και ο μικρότερος τροχός χρησιμοποιείται για να ρυθμίζει την αξονική κίνηση του τεμαχίου εργασίας.

- Λείανση μορφής

Λείανση μορφής είναι ένας εξειδικευμένος τύπος κυλινδρικής λείανσης όπου ο τροχός λειάνσεως έχει το ακριβές σχήμα του τελικού προϊόντος. Ο τροχός λείανσης δεν διασχίζει το τεμάχιο εργασίας. Ο λειαντικός τροχός έχει ειδικά διαμορφωμένο περίγραμμα, το οποίο μεταφέρει στο τεμάχιο κατά την κατεργασία.

- Αποκοπή υλικού με λειαντικό δίσκο

Εφευρέθηκε στη Γερμανία στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τον Edmund και Gerhard Lang. Ο λειαντικός τροχός έχει πολύ μικρό πάχος (3 mm) και ικανή ελαστικότητα ώστε να εκτελεί κατεργασία αποκοπής στο τεμάχιο (σωλήνας, άξονας κλπ.). Σε αντίθεση με την κανονική λείανση, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για να τελειώσει τις κατεργασίες επιφανειών, η αποκοπή υλικού με λειαντικό τροχό χρησιμοποιείται για υψηλά ποσοστά αφαίρεσης υλικού, που ανταγωνίζονται το φραιζάρισμα και ως επιλογή διαδικασίας κατεργασίας.

- Honing

σε περίπτωση λείανσης εσωτερικών κυλινδρικών επιφανειών χρησιμοποιούνται λειαντικά ραβδίδια αντί για λειαντικός τροχός. Στη μέθοδο αυτή το κοπτικό εργαλείο εκτός από την περιστροφική του κίνηση, κάνει παράλληλα και μια παλινδρομική στο εσωτερικό του τεμαχίου. Η κατεργασία honing βρίσκει εφαρμογές σε λείανση εσωτερικών κυλινδρικών επιφανειών, όπως σε κυλίνδρους μηχανών και υδραυλικών συστημάτων.

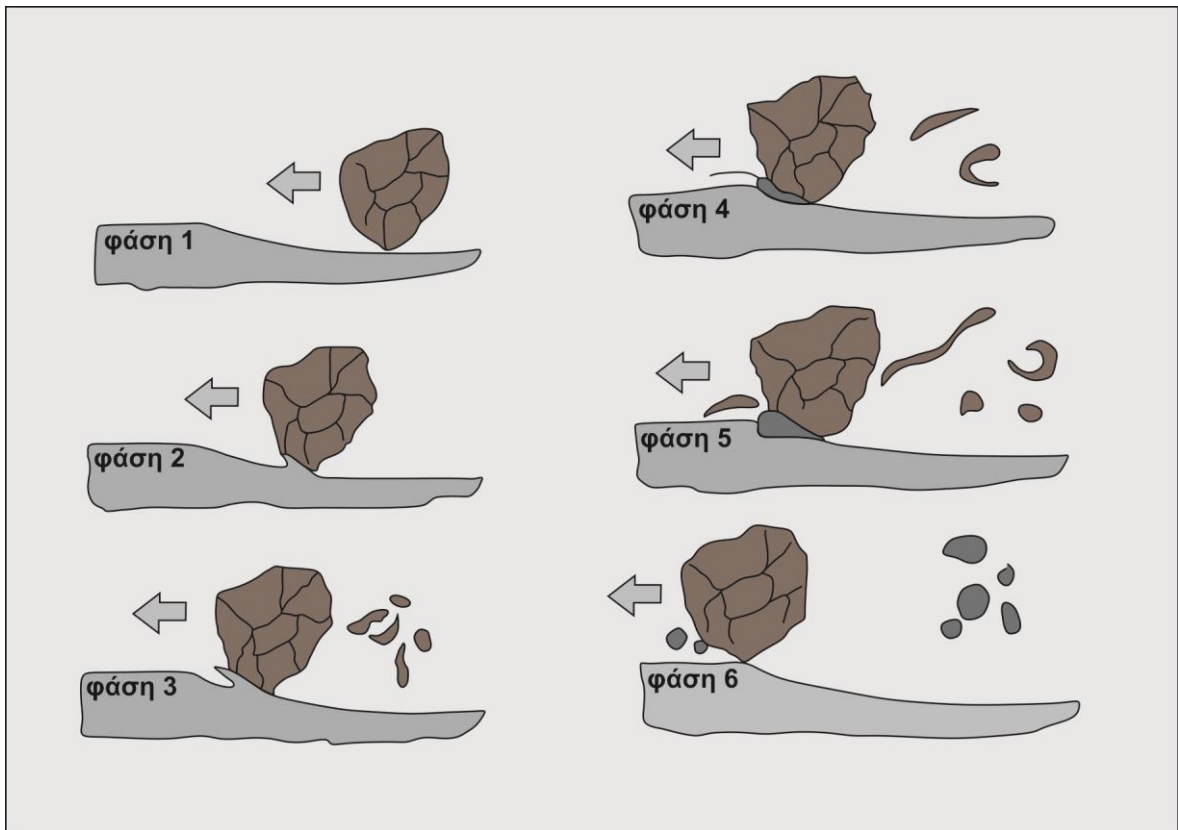
- Lapping

Με αυτήν την κατεργασία παρέχεται υψηλότερη ποιότητα επιφάνειας και διαστατική ακρίβεια. Αντί για λειαντικό τροχό ή λειαντικά ραβδίδια χρησιμοποιείται λειαντική σκόνη και μπορεί να εκτελεστεί είτε χειροκίνητα, είτε σε ειδικές εργαλειομηχανές.

2.2. Μηχανισμός λείανσης

Κάθε κόκκος του περιστρεφόμενου λειαντικού τροχού θεωρείται ως ένα ξεχωριστό εργαλείο. Η ακμή του κάθε κόκκου διεισδύει στην επιφάνεια του τεμαχίου, όπου υπάρχει πλαστική παραμόρφωση και εν συνεχεία πλαστική ροή του υλικού. Ο μηχανισμός λείανσης, δηλαδή ο τρόπος και η διαδικασία με την οποία αφαιρείται υλικό μπορεί να περιγραφεί πειραματικά όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από 6 διαδοχικές φάσεις:

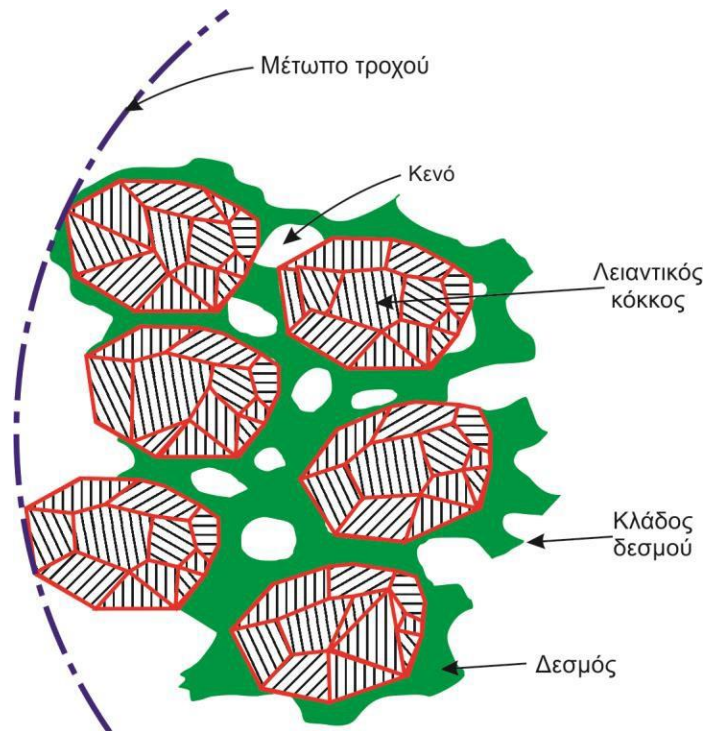
- Φάση 1: ο κάθε κόκκος που διεισδύει στο τεμάχιο δημιουργεί μέσω της ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης ένα αυλάκι.
- Φάση 2: δημιουργείται και αφαιρείται απόβλιττο παραλληλόγραμμης διατομής, ενώ συγχρόνως συμπιέζεται και κάμπτεται λόγω του τροχού λείανσης.
- Φάση 3: για μικρά βάθη κοπής και μικρές προώσεις, αυτό είναι το τελευταίο στάδιο. Στη συγκεκριμένη φάση δημιουργούνται σπειροειδή απόβλιττα.
- Φάση 4: στην παρούσα φάση υπάρχει μεγάλο βάθος κοπής και μεγάλη πρόωση, για το λόγο αυτό οι ακμές των κόκκων διεισδύουν βαθύτερα στο τεμάχιο δημιουργώντας έτσι ζώνη διάτμησης και ως εκ τούτου ανάπτυξη θερμότητας που δε μπορεί να απαχθεί λόγω συσσώρευσης υλικού και ανικανότητας των ψυκτικών υγρών. Στην περίπτωση που αυτή πρόκειται για την τελευταία φάση, δημιουργούνται μακρόστενα απόβλιττα.
- Φάση 5: το απόβλιττο λιώνει στην περίπτωση που αυτή η διείσδυση των κόκκων στο τεμάχιο συνεχίζεται σε ολόκληρο το μήκος επαφής.
- Φάση 6: πρόκειται για την τελευταία φάση όπου εξαιτίας επιφανειακών τάσεων, το λιωμένο απόβλιττο παίρνει σχεδόν σφαιρική μορφή και απομακρύνεται.



Σχήμα 2.3: Μηχανισμοί λείανσης

2.3. Λειαντικός τροχός

Ο λειαντικός τροχός όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4, αποτελείται από:

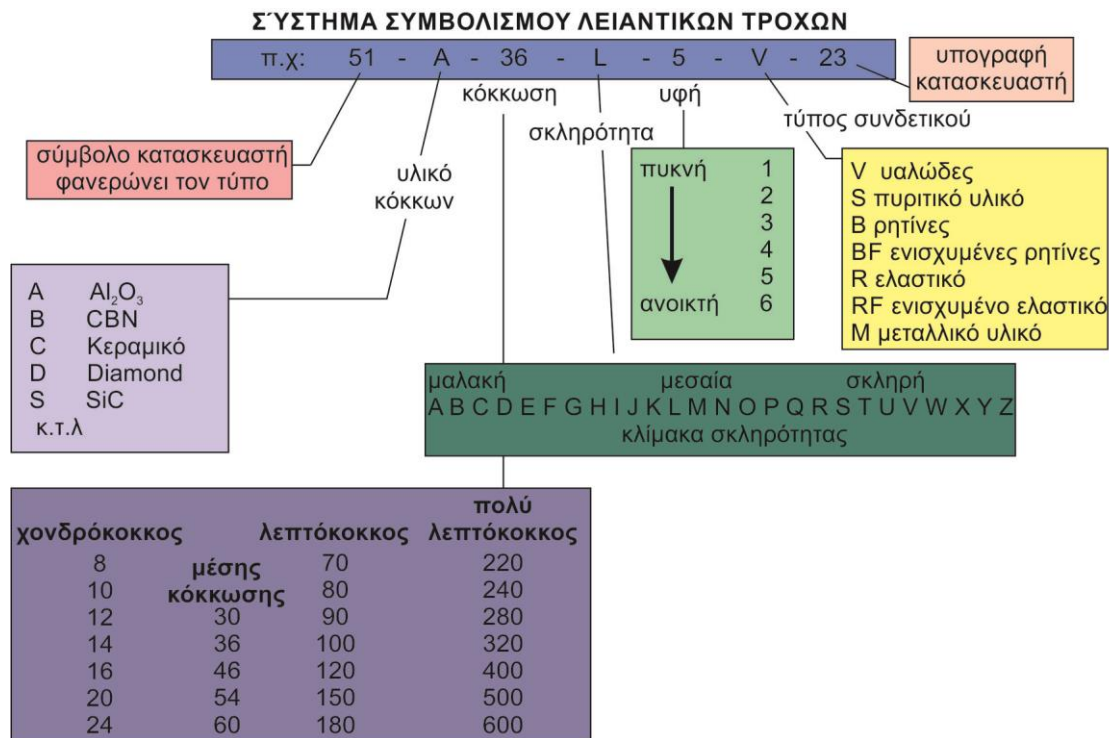


Σχήμα 2.4: Συστατικά του λειαντικού τροχού

- Τους **λειαντικούς κόκκους** που είναι από πολύ σκληρό υλικό και παίζουν τον ρόλο μικροσκοπικών κοπτικών εργαλείων. Οι κόκκοι μπορούν να είναι είτε από φυσικά είτε από τεχνητά υλικά. Τα πιο συνηθισμένα υλικά είναι το φυσικό ή τεχνητό κορούνδιο καθώς και ανθρακοπυρίτιο. Πιο σπάνια, γίνεται χρήση κόκκων από φυσικό ή τεχνητό διαμάντι και από νιτρίδιο του βορίου.
- 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.

Σπουδαίο ρόλο παίζει και το σχήμα του τροχού λείανσης. Ακόμα, ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των τροχών είναι το πάχος του, η εξωτερική του διάμετρος καθώς και η διάμετρος της κεντρικής του οπής.

Οι λειαντικοί τροχοί κυκλοφορούν στην αγορά με συγκεκριμένες ονομασίες και συμβολισμούς, κάθε γράμμα και αριθμός της οποίας αντιπροσωπεύει και ένα χαρακτηριστικό ή συστατικό του τροχού. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται παράδειγμα της ονοματολογίας των λειαντικών τροχών.



Σχήμα 2.5: Τυποποίηση λειαντικών τροχών

2.3.1. Υλικό κόκκων (abrasive type)

Τα πιο συνηθισμένα υλικά κόκκων σε λειαντικούς τροχούς είναι:

- Φυσικό ή τεχνητό κορούνδιο. Πρόκειται για Al_2O_3 . Λαμβάνεται φυσικά από το ορυκτό σμύριδα ή παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο από βωξίτη. Οι τροχοί που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν διάφορα χρώματα, ανάλογα με τις προσμίξεις που περιέχουν. Τα συνήθη χρώματα τροχών είναι: μαύρο (A), καφέ (B), κόκκινο (C) και λευκό (D). Το κόστος του τροχού αυξάνεται από την κατηγορία A προς την κατηγορία D

(είναι πιο καθαρής σύνθεσης). Χρησιμοποιούνται για λείανση σκληρών και συνεκτικών υλικών.

- Ανθρακοπυρίτιο **SiC**. Παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο με πρώτες ύλες χαλαζιακή άμμο και άνθρακα (C). 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.

- Ζιρκόνιο-Κορούνδιο

Κατασκευάζεται με την τήξη ενός μείγματος από ZrO_2 και Al_2O_3 σε ακριβώς καθορισμένες αναλογίες ανάμειξης. Σε μια θερμοκρασία γύρω στους 1900°C δημιουργείται μια μικροκρυσταλλική δομή, όπου ελευθερώνονται συνεχώς νέες επιφάνειες κοπής και εμφανίζεται ένα φαινόμενο αυτοτροχίσματος. Είναι εξαιρετικά τραχύ υλικό και κατάλληλο για την επεξεργασία χάλυβα.

- Διαμάντι

- Κυβικός βοριονιτρίτης (**CBN**). Η χρήση τροχών από CBN βαίνει συνεχώς αυξανόμενη (πιο αποτελεσματική λείανση). Μοναδικό τους μειονέκτημα το υψηλό κόστος.

2.3.2. Κόκκωση (grain size)

Κόκκωση χαρακτηρίζεται εκείνη η παράμετρος που περιγράφει το μέσο μέγεθος των κόκκων του λειαντικού τροχού. Αναφέρεται στη διάμετρο των μεμονωμένων κόκκων του ιζήματος. Το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται χονδρικά, από 10 μm (λεπτόκοκκοι, κόκκωση 600 για μαλακά υλικά) έως 1200 μm (χοντρόκοκκοι, κόκκωση 8 για σκληρά υλικά). Οι λεπτόκοκκοι τροχοί δημιουργούν καλύτερη επιφανειακή ποιότητα, ενώ οι χοντρόκοκκοι τροχοί επιτρέπουν μεγαλύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού (MRR). Επιπρόσθετα, για την λείανση σκληρών υλικών είναι καταλληλότεροι οι λεπτόκοκκοι τροχοί, ενώ αντίθετα για την λείανση μαλακών υλικών χρησιμοποιούνται χοντρόκοκκοι τροχοί. Ένας κόκκος μπορεί να αποτελείται από πολλούς κρυστάλλους. Ένα κοκκώδες υλικό μπορεί να κυμαίνεται από πολύ μικρά κολλοειδή σωματίδια, όπως πηλός, λάσπη, άμμος και χαλίκι, μέχρι και ογκόλιθους.

Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων, η κόκκωση των λειαντικών τροχών διαχωρίζεται σε κατηγορίες, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1

Χαρακτηρισμός τροχού	Κόκκωση τροχού				
Πολύ χονδρόκοκκος	8	10	12		
Χονδρόκοκκος	14	16	20	24	3
Μέσης κόκκωσης	36	40	46	50	6
Λεπτόκοκκος	70	80	90	100	1
Πολύ λεπτόκοκκος	150	180	200	220	2
Κόκκωση τύπου κόνεως	260	300	400	500	6

Πίνακας 2.1: Κοκκώσεις λειαντικών τροχών

2.3.3. Σκληρότητα (Grade)

Εκφράζει τη σχετική δύναμη συγκράτησης του κόκκου από το δεσμό και όχι τη σκληρότητα του κόκκου. Κρίσιμο μέγεθος είναι η αναλογία ανάμειξης των υλικών κόκκων και δεσμού και το κενό μεταξύ αυτών. Η “μαλακή” ή “σκληρή” συμπεριφορά του λειαντικού τροχού κατά τη λείανση δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον χαρακτηρισμό του, αλλά είναι συνάρτηση και των συνθηκών κατεργασίας. Το κρίσιμο μέγεθος για το

χαρακτηρισμό της σκληρής ή μαλακής συμπεριφοράς του τροχού είναι η αναπτυσσόμενη δύναμη ανα κόκκο.

2.3.4. Υφή (structure)

Αναφέρεται στο πορώδες της κατασκευής του λειαντικού τροχού και χαρακτηρίζεται με βάση την κλίμακα των αριθμών 0-9, όπου 0 είναι πολύ πυκνή υφή και 9 ή πολύ ανοικτή. Η υφή του λειαντικού τροχού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να διευκολύνεται η απομάκρυνση των αποβλήτων.

2.3.5. Συνδετικό υλικό (bonding material)

Ανάλογα με το υλικό του δεσμού, ο λειαντικός τροχός χαρακτηρίζεται ως εξής:

- V: Δεσμός από κεραμικό υλικό (υαλώδες, ψαθυρό και υψηλής αντοχής). Δεν επηρεάζεται από το νερό ή το λάδι και αντέχει σε ελαφρά θέρμανση. Είναι κατάλληλος για ξηρή και υγρή λείανση. Αντιπροσωπεύει πάνω από το 75% του συνόλου των χρησιμοποιούμενων λειαντικών τροχών.
- S: Δεσμός από υδρύαλο (πυριτικό υλικό). Κατάλληλος για τρόχιση ειδικών εργαλείων, όπου η παραγωγή θερμότητας πρέπει να είναι ελάχιστη και δεν ενδιαφέρει η φθορά του τροχού.
- B: Δεσμός από συνθετικές ρητίνες, με σημαντική αντοχή σε κρούση. Χρησιμοποιείται σε λείανση μεγάλης ταχύτητας, όπου προέχει ο υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού, καθώς επίσης και σε τροχούς κοπής.
- BF: Δεσμός από ρητινικό υλικό ενισχυμένο με ίνες.
- R: Δεσμός από ελαστικό, με πολύ υψηλή αντοχή σε κρούση. Προσφέρεται για μεγάλες ταχύτητες λείανσης. Δεν ανέχεται υψηλές θερμοκρασίες και χρήση ψυκτικού υγρού. Κατασκευάζεται με πάχος μέχρι 3 mm και χρησιμοποιείται σε ειδικές και δύσκολες εφαρμογές (κοπή σκληρών υλικών)
- RF: Δεσμός από ελαστικό υλικό ενισχυμένο με ίνες.
- M: Δεσμός από μεταλλικό υλικό (Al, κράματα Cu-ορείχαλκου, μπρούντζος και σπάνια χάλυβας). Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε αδαμαντοτροχούς λόγω της πολύ υψηλής αντοχής του και στους τροχούς ηλεκτροχημικής λείανσης λόγω της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας.

2.4. Παράμετροι λείανσης

Οι κύριοι παράμετροι της διαδικασίας λείανσης, είναι η ταχύτητα κοπής, ο ρυθμός της πρόωσης, το βάθος κοπής και το υγρό κοπής (λιπαντικό).

Η ταχύτητα κοπής V στη λείανση είναι πολύ υψηλή. Έχει σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του τροχού η οποία και υπολογίζεται από τη σχέση

$$V = \pi \cdot D \cdot n \quad 2.1$$

όπου το D είναι η διάμετρος του τροχού, και το n είναι η ταχύτητα περιστροφής του τροχού λείανσης.

Ο ρυθμός της πρόωσης είναι εκείνο το μέγεθος που περιγράφει την περιστροφή του κομματιού κατά τη λείανση.

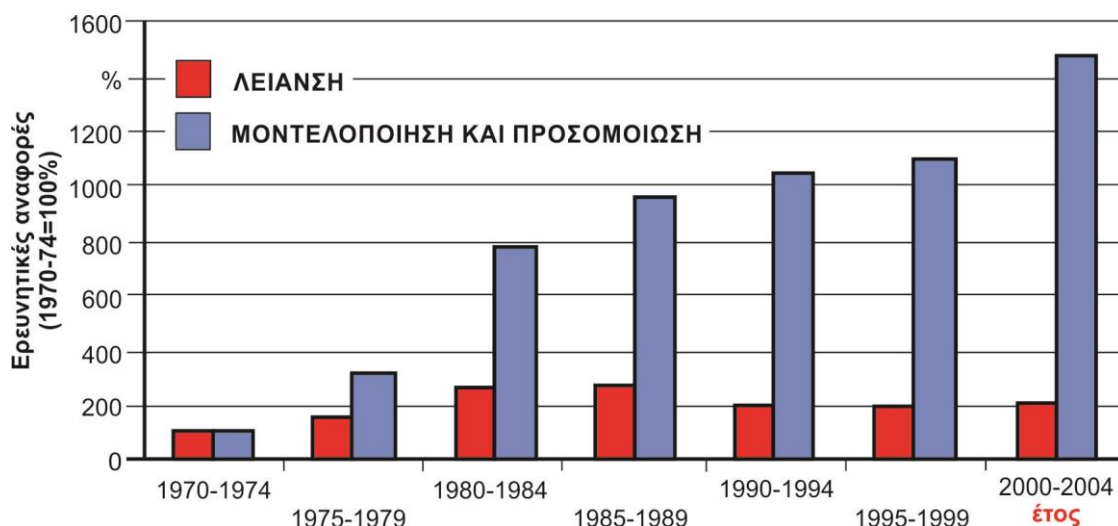
Βάθος κοπής ή πρόωση ονομάζεται το μέγεθος της διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο κατεργασίας, συνήθως μετριέται σε mm. Τα υγρά κοπής αποτελούν μια ουσιαστική συνιστώσα του συστήματος κοπής (εργαλειομηχανή-κοπτικό εργαλείο-κατεργάσιμο τεμάχιο). Η δράση τους αφορά κυρίως τη λίπανση και την ψύξη

και δευτερευόντως τον καθαρισμό (απομάκρυνση μικρών σωματιδίων αποβλήτων) της ζώνης κοπής. Τα υγρά κοπής θεωρούνται απαραίτητα για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος (διαστατική ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας, διάρκεια ζωής κοπτικών κ.λπ.).

2.5. Μοντελοποίηση διεργασιών λείανσης

Την τελευταία δεκαετία έχει εξελιχθεί σημαντικά η μοντελοποίηση και η προσομοίωση των διεργασιών λείανσης. Με βάση τις πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων του συστήματος (των μηχανικών παραμέτρων, των παραμέτρων της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων της λείανσης) καθώς και την άμεση σχέση της διεργασίας με τη βιομηχανική παραγωγή, η μοντελοποίηση και η προσομοίωση αποτελεί το επίκεντρο της μηχανικής τόσο σε πανεπιστήμια όσο και στη βιομηχανία. Αυτό φανερώνεται και από τον αυξανόμενο αριθμό δημοσιεύσεων την τελευταία δεκαετία, όπως απεικονίζεται στο [σχήμα 2.6](#)

Στη διεθνή έρευνα, η προσομοίωση των κατεργασιών αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση των κατεργασιών κοπής και λείανσης. Η γνώση σχετικά με την αλληλεπίδραση εργαλείου-τεμαχίου στη λείανση ανάλογα με τον επιλεγμένο συνδυασμό παραμέτρων καθορίζει την πιθανή στρατηγική της διαδικασίας για την καλύτερη ποιότητα του τεμαχίου, τον ελάχιστο χρόνο κατεργασίας και την υψηλή οικονομική απόδοση. Λόγω της αυξανόμενης σχέσης μεταξύ της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης στην κατεργασία λείανσης, την τελευταία δεκαετία στη Διεθνή Ακαδημία Μηχανικών Παραγωγής (CIRP), παρουσιάστηκε και συζητήθηκε ένας σημαντικός αριθμός άρθρων [231, 48, 189, 12, 201, 249, 117, 251, 74, 108] από το 1992 ως το 2004. Το 1880 ο F. W. Taylor [229] ξεκίνησε την έρευνα του στην κοπή μεταλλικών δοκιμίων και ανέπτυξε τα πρώτα μοντέλα που την περιγράφουν το 1906. Το μοντέλο που ανέπτυξε παραμένει ακόμα η βάση για όλες τις έρευνες στον τομέα. Γνωστοί ερευνητές στον τομέα της λείανσης και των πρώιμων μοντέλων της είναι οι Tarasov, Pahlitzsch, Ernst, Merchant, Gottwein, Opitz, Peters, Saljé, Colding και König [228, 180, 50, 51, 64, 176, 184, 185, 208, 36, 37, 3, 187, 120] το 1925, 1946, 1952 ως και το 1984



Σχήμα 2.6: Αποτελέσματα έρευνας στη λείανση

Μέχρι τη δεκαετία του '80 εφαρμόστηκαν κυρίως φυσικό-αναλυτικά και φυσικό-εμπειρικά μοντέλα βασισμένα στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, τα οποία μεταφέρθηκαν στη γενικευμένη μορφή, τα λεγόμενα βασικά μοντέλα. Με την τρέχουσα πρόοδο, οι υπολογιστές υψηλών επιδόσεων επιτρέπουν την ανάπτυξη νέων τύπων μοντέλων και μεθόδων προσομοίωσης, όπως η Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (FEA), τα Κινηματικό - γεωμετρικά μοντέλα (FEM), τα μοντέλα Μοριακής Δυναμικής (MD)

Μία βασική αναλυτική προσέγγιση στοχεύει στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης τα οποία προέρχονται από τις βασικές φυσικές αλληλεπιδράσεις. Με βάση τη γνώση μιας κατεργασίας και την επιλογή κατάλληλων φυσικών ποσοτήτων, τα φυσικά μοντέλα μπορούν να αναπτυχθούν με τη χρήση μαθηματικών τύπων. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η κατανόηση της αλληλεπιδράσης τεμαχίου - κόκκων λείανσης, η οποία καθορίζει τις επιπτώσεις και τη διαδικασία αφαίρεσης υλικού και εξαρτάται από τα τριβολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Η διαδικασία λείανσης αντιπροσωπεύει το σύνολο αυτών των αλληλεπιδράσεων ενώ τα μοντέλα οφείλουν να περιγράψουν τις πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ της τοπογραφίας του τροχού λείανσης, της κινηματικής της διαδικασίας και τα χαρακτηριστικά του τεμαχίου. Οι Tönshoff κ.α το 1992 [231] μελέτησαν τα αναλυτικά μοντέλα λείανσης και τις αλληλεπιδράσεις τους.

Η κινηματική της διαδικασίας λείανσης μπορεί να μελετηθεί μέσω της τοπογραφίας του τροχού λείανσης και των μοντέλων για απόβλιττα μεγάλου πάχους/διαστάσεων. Από αυτά, μπορούν να αναπτυχθούν μοντέλα ισχύος, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της φθοράς των λειαντικών κόκκων (abrasive grits) και για την εκτίμηση της ενέργειας λείανσης. Τα μοντέλα τοπογραφίας του τροχού και πάχους αποβλίττου χρησιμοποιούνται ακόμα για την πρόβλεψη της επιφανειακής τραχύτητας. Η ενέργεια λείανσης είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του δοκιμίου και συνεπώς την ακεραιότητα της επιφάνειας (surface integrity).

Η μοντελοποίηση της λείανσης απαιτεί γνώση της τοπογραφίας του τροχού λείανσης ώστε να εκτιμηθεί η συγκέντρωση και η διανομή των ενεργών κόκκων λείανσης καθώς και το πώς αυτοί μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με την επιφάνεια του τεμαχίου. Μεμονωμένες και σε συνδυασμό αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόκκων και της επιφάνειας του τεμαχίου επηρεάζουν τη διαδικασία σχηματισμού αποβλίττου και ως εκ τούτου τις δυνάμεις λείανσης και το φινίρισμα της επιφάνειας. Οι μέθοδοι μέτρησης έχουν αναθεωρηθεί από τους Verkerk και Peters και περιλαμβάνουν SEM καταμέτρηση κόκκων ή προφίλομετρία. Πιο πρόσφατες οπτικές τεχνικές και διαδικασίες αντιγραφής έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς.

Μοντέλα τα οποία μελετούν τη συνδυασμένη δράση- ενέργεια των λειαντικών κόκκων που είναι στοχαστικά διανεμημένα στην επιφάνεια του τροχού λείανσης, είναι απαραίτητα για περαιτέρω αναλύσεις. Οι Tönshoff κ. α [231] αναθεώρησαν μοντέλα τοπογραφίας και τα μελέτησαν σε συνθήκες στατικής ή δυναμικής συγκέντρωσης κόκκων το 1992. Σε όλα αυτά τα μοντέλα, οι εκθέτες φανερώνουν τη σχετική σημασία των παραμέτρων λείανσης και απαιτούν τη λήψη μεγάλου αριθμού μετρήσεων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των μοντέλων που δεν λαμβάνονται υπόψη, όπως και η αλλαγή χαρακτηριστικών με το χρόνο.

Οι Warnecke κ. α το 1998 [248] ανέπτυξαν μια ολοκληρωμένη ιδέα για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας, η οποία παρέχει ένα εργαλείο λογισμικού για την ανάλυση και το σχεδιασμό διαδικασιών λείανσης υψηλής απόδοσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της κινηματικής προσομοίωσης. Οι διεργασίες λείανσης μπορούν να αναπαραχθούν ως η συσσώρευση πολλαπλών δεσμευμένων ενεργών κόκκων με μαθηματικά μοντέλα τα οποία περιγράφουν τις σχετικές κινήσεις σε τρισδιάστατα μοντέλα που προσδιορίζουν τη μακρογεωμετρία και μικρογεωμετρία τόσο του δοκιμίου, όσο και του τροχού λείανσης. Οι Hecker, Ramoneda και Liang το 2003 χρησιμοποίησαν μια τρισδιάστατη μεθοδολογία για τη μέτρηση της γεωμετρίας κόκκων και της στατικής τους πυκνότητας συναρτήσει της διεύθυνσης του τροχού [78]. Στη συνέχεια, τροποποιήθηκε η στατική πυκνότητα με σκοπό τον υπολογισμό της δυναμικής πυκνότητας μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί η δύναμη σε κάθε κόκκο. Το 2000, η σχέση μεταξύ των δυνάμεων λείανσης και της τοπογραφίας του τροχού λείανσης, εξετάστηκε απ' τους Badger και Torrance [4].

Τα μοντέλα που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λείανσης, οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική φύση της διαδικασίας. Για παράδειγμα, η τοπογραφία του τροχού μεταβάλλεται με το χρόνο, οδηγώντας σε μεταβαλλόμενες συνθήκες επαφής και συγκέντρωσης ενεργών κόκκων. Σε μελέτη των Hwang, Evans και Malkin το 2000, ερευνήθηκε η συμπεριφορά αδαμάντινων ηλεκτρολυτικών τροχών [92] και αναπτύχθηκε ένα στατιστικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της τοπογραφίας του τροχού κατά τη λείανση σε περιπτώσεις συγκέντρωσης ενεργών και μη κόκκων φθοράς σε επίπεδη επιφάνεια. Μεταξύ των δυνάμεων λείανσης και της επίπεδης επιφάνειας βρέθηκαν γραμμικές σχέσεις, γεγονός το οποίο φανερώνει μια σταθερή πίεση επαφής και έναν συντελεστή τριβής. Αυξημένη ταχύτητα του τροχού απ' τη μία οδηγεί σε χαμηλότερη πίεση επαφής, αλλά απ' την άλλη είχε ελάχιστη επίδραση στο ρυθμό φθοράς, γεγονός που υποδηλώνει πως η μεγαλύτερη επιφάνεια ολίσθησης αντισταθμίζεται με χαμηλότερες πιέσεις επαφής και δυνάμεις λείανσης.

Η ικανότητα βελτιστοποίησης των συνθηκών λείανσης μέσω του ελέγχου της τοπογραφίας της επιφάνειας του τροχού, έχει ερευνηθεί από πολλούς συγγραφείς. Ωστόσο, οι Brinksmeier και Cinar ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο υπολόγιζε απ' τη μία τον αριθμό των συνολικών αδαμάντινων κόκκων και απ' την άλλη τον αριθμό των κόκκων που συμμετέχουν στη λείανση και προσδιόριζε έτσι την τοπογραφία της επιφάνειας λείανσης σε έναν τροχό λείανσης. Πιο πρόσφατα, συγκεκριμένα το 2000, οι Torrance και Badger προέβλεψαν την τοπογραφία του τροχού λείανσης σε διαφορετικές συνθήκες λείανσης με μοντέλα πρόβλεψης ισχύος, τα οποία σε συνδυασμό με μοντέλα τοπογραφίας, βελτιστοποιούν τη διαδικασία για δεδομένη κατάσταση λείανσης [4].

2.5.1. Δυνάμεις λείανσης και ενέργειας

Η ανάγκη για την πρόβλεψη των δυνάμεων λείανσης είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του έργου και των παραμορφώσεων του τροχού καθώς και για το αν τα θερμικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας της λείανσης ελέγχονται. Η δύναμη λείανσης, η οποία είναι το αποτέλεσμα της εφαιπτομενικής δύναμης και της ταχύτητας κοπής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ενέργειας λείανσης για το σχηματισμό του αποβλίττου. Το 1977, 1978, 1984 και 1989 διαπιστώθηκε πως το μεγαλύτερο ποσό της μηχανικής ενέργειας εισόδου μετατρέπεται σε θερμότητα η οποία διαχέεται εντός του τεμαχίου, στο απόβλιττο, στον τροχό, ενώ το υπόλοιπο ποσό χρησιμοποιείται για το σχηματισμό της επιφάνειας [163, 159, 160, 128] και την παραγωγή των παραμενουσών τάσεων. Διάφορα τέτοια ενεργειακά μοντέλα έχουν δημοσιευθεί και συνοψίζονται απ' τους Tönshoff κ. α [231] το 1992.

Η ειδική ενέργεια αυξάνεται με τη μείωση του βάθους κοπής καθώς το πάχος του αποβλίττου μειώνεται. Η λεγόμενη "επίδραση μεγέθους" στη λείανση είναι γνωστή και οι Rowe και Chen έδειξαν το 1997 ότι η συγκεκριμένη επίδραση σχετίζεται άμεσα με την επιφάνεια αποβλίττου [202]. Δηλαδή, οι αλλαγές στις συνθήκες λείανσης επηρεάζουν το μέγεθος του αποβλίττου και επομένως την ειδική ενέργεια λείανσης, με χαμηλή ταχύτητα κοπής και χαμηλό βάθος, να οδηγούν σε υψηλή ειδική ενέργεια. Συγκεκριμένα, οι Rowe και Chen έδειξαν πως η κατάσταση φινιρίσματος παράγει υψηλή πυκνότητα ακμών κοπής, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε περιορισμένο μέγεθος αποβλίττου και ως εκ τούτου σε αυξημένη δύναμη λείανσης. Με όμοιο τρόπο, η κατάσταση με τραχιά λείανση οδηγεί συχνά σε χαμηλότερες δυνάμεις λείανσης. Η ύπαρξη στρογγυλεμένων κόκκων στην επιφάνεια του τροχού έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη τριβή ολίσθησης αυξάνοντας σημαντικά την ειδική ενέργεια για μικρά βάθη κοπής. Επιπλέον, το 2005 αποδείχτηκε πως η επίδραση μεγέθους των κόκκων έχει σημαντικό ρόλο [263].

Οι Hwang, Evans και Malkin [92] το 2000 ερεύνησαν τη δυναμική φύση της λείανσης

και πώς η φθορά των κόκκων των γαλβανισμένων τροχών επηρεάζει το πάχος του αποβλήτου. Το πλάτος (bs) της επιπέδης περιοχής φθοράς των κόκκων και η πυκνότητα c, εξαρτώνται από το βάθος της ακτινικής φθοράς και συνεπώς του μήκους ολίσθησης. Καθώς και τα δύο αυξάνονται με τη φθορά του τροχού, το μέγιστο πάχος αποβλήτου που δεν έχει παραμορφωθεί μειώνεται με αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση της ειδικής ενέργειας λείανσης. Έτσι, με υψηλές ταχύτητες τροχού παρατηρείται χαμηλότερη ειδική ενέργεια για δεδομένο πάχος αποβλήτου. Επιπτώσεις όσον αφορά τα θερμικά χαρακτηριστικά της λείανσης έχει και η αύξηση της ειδικής ενέργειας με το χρόνο. Συγκεκριμένα, η αλλαγή στις συνθήκες επαφής οδηγούν στην αύξηση της συνολικής ροής θερμότητας σε αυξημένες θερμοκρασίες και πιθανότητα στη δημιουργία καύσης κατά τη διαδικασία λείανσης, η οποία πρέπει να εξερευνηθεί περαιτέρω καθώς η θερμοκρασία της ζώνης λείανσης αποτελεί συνάρτηση της εισερχόμενης ενέργειας. Με βάση το θερμικό μοντέλο του Jaeger, ο Malkin ανέπτυξε το 1978 διαγράμματα ορίου καύσης τα οποία εξετάζουν την κρίσιμη ενέργεια κοπής για την περίπτωση μιας τέτοιας βλάβης [159]. Περαιτέρω μελέτη έγινε το 1999 από τον Mayer κ. α [165] για διάφορους χάλυβες και για μία συγκεκριμένη ενέργεια λείανσης που καθορίστηκε από μετρήσεις.

Σε μία άλλη δοκιμή το 1991, οι Bifano και Fawcett [8] παρακολούθησαν τις εύπλαστες ρωγμές των κεραμικών σε λείανση μέσω μετρήσεων εντός της κατεργασίας και οδηγήθηκαν στο αποτέλεσμα πως η ειδική ενέργεια παρέμενε σχετικά σταθερή στην περίπτωση όλκιμης λείανσης, ενώ μειώθηκε με την αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού για εύθραυστη λείανση.

2.5.2. Θερμικά μοντέλα λείανσης

Τα θερμικά μοντέλα είναι απαραίτητα ώστε να συσχετίζουν τις παραμέτρους της κατεργασίας με τις παραγόμενες θερμοκρασίες, όσον αφορά την ανάλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας στη λείανση. Τα περισσότερα από αυτά τα θερμικά μοντέλα βασίζονται στην πρώιμη εργασία των Carslaw και Jaeger το 1942 και 1959 [99, 20], στην οποία μία ομοιόμορφη ροή θερμότητας θεωρείται επίπεδη πηγή θερμότητας και κινείται με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος μιας επιφάνειας ενός στερεού. Το πρώτο αναλυτικό μοντέλο στη θερμική ανάλυση για λεπτή λείανση εισήχθη το 1952 από τους Outwater και Shaw [179], οι οποίοι μοντελοποίησαν τη μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια εδάφους που βασιζόταν σε μια συρόμενη πηγή θερμότητας στην επίπεδη διάτμηση. Ωστόσο, για την αποφυγή της δυσκολίας υπολογισμού του ολοκληρώματος του μοντέλου του Jaeger, προτάθηκε από τον Takazawa το 1966 [226] ένας τύπος που το προσέγγιζε και είχε τη δυνατότητα να προσδιορίζει τις μέγιστες θερμοκρασίες τόσο στην επιφάνεια επαφής, όσο και κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου. Από την άλλη, το 1968 και 1970, οι Des Ruisseaux και Zerkle [45,46] μελέτησαν την επίδραση της ψύξης της επιφάνειας λόγω του ψυκτικού υγρού και βρήκαν ότι για συγκεκριμένους αριθμούς Peclet και συντελεστές συναγωγής, δε συμβαίνει αξιοσημείωτη ψύξη λόγω συναγωγής στη ζώνη επαφής. Παραπάνω μοντέλα αναπτύχθηκαν από τους Salje και Brandin [42, 163, 11], το 1974, το 1977 και το 1978 στα οποία συμπεριλαμβάνονται οι περισσότερες παράμετροι όπως η περιφερειακή ταχύτητα του τεμαχίου, η ταχύτητα λείανσης και η ισοδύναμη διάμετρος ως γεωμετρική μεταβλητή.

Η καλύτερη λύση για μια συρόμενη πηγή θερμότητας, φαίνεται να είναι μία τριγωνική κατανομή θερμότητας σε ολόκληρη τη ζώνη επαφής, την οποία έδειξε το 1978 ο Snoeys [218], ενώ παράλληλα αναπτύχθηκε από τον Rowe κ. α [196] ένα μοντέλο που βασίζεται στις σύνθετες ιδιότητες του τροχού λείανσης το 1988. Με αυτό το μοντέλο, προσδιορίζεται η αναλογία της ενέργειας που μεταφέρεται στο τεμάχιο, γνωστή και ως λόγος διάτμησης R_w με μία απλή μέθοδο. Για περισσότερες γωνίες κώνου, ο Lavine μοντελοποίησε τη μεταφορά θερμότητας εντός κωνικών κόκκων [138] το 1989 λαμβάνοντας μια μέση τιμή 45° για την αξιολόγηση του. Ωστόσο, η

τροποποίηση του παραπάνω κωνικού μοντέλου που έγινε το 1991 από τον Rowe κ. α [197], συμπεριέλαβε την επίδραση στο λόγο διάτμησης της παροδικής θέρμανσης στη ζώνη επαφής και έδειξε πως μειώνεται. Οι Malkin και Guo το 1995 μελετώντας το πρόβλημα της παροδικής μεταφοράς θερμότητας σε ολισθαίνουσα πηγή θερμότητας, κατέστησαν εφικτή την ανάλυση της επίδρασης του χρόνου όταν η πηγή θερμότητας κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του δοκιμίου [69]. Ο Korpalinsky [128] χρησιμοποίησε τις δυνάμεις κοπής και τις τριβές των κόκκων λείανσης για να προσδιορίσει τη ροή θερμότητας στη λείανση το 1984. Ενώ το 2004 ο Fricker [57] χρησιμοποίησε ένα θερμικό μοντέλο για την πρόβλεψη των προφίλ χρόνου-θερμοκρασίας για κατεργασία σκλήρυνσης.

Τα θερμικά μοντέλα των παραπάνω δημοσιεύσεων, είναι κατάλληλα για τις συνηθισμένες συνθήκες όπου το βάθος κοπής είναι συνήθως λιγότερο από 0.1 mm και έτσι αμελείται το βάθος λείανσης. Για συνθήκες κοπής μεγαλύτερου βάθους, όπως είναι η λείανση HEDG (High Efficiency Deep Grinding - Λείανση Μεγάλου Βάθους και Υψηλής Απόδοσης), τα βάθη κοπής κυμαίνονται από 1 ως 10 mm και υπάρχει σφήνα μεταξύ της επιφάνειας επαφής του τροχού και της επιφάνειας φινιρίσματος του τεμαχίου, γεγονός το οποίο αλλάζει σημαντικά το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας, με μεγάλες τιμές στους αριθμούς Peclet λόγω μεγάλης πρόωσης. Ο αριθμός Peclet είναι αδιάστατος, εκφράζεται ως ο λόγος της θερμικής ενέργειας συναγωγής του ρευστού προς τη θερμική ενέργεια που διαχέεται εντός του ρευστού και εξαρτάται από την πυκνότητα και το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Πρόσφατα, και συγκεκριμένα το 2001 αναπτύχθηκε από τους Rowe και Jin [203] το μοντέλο πηγής θερμότητας κυκλικού τόξου με σκοπό να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις μεγάλης γωνίας επαφής και μεγάλου αριθμού Peclet. Η γωνία επαφής περιλαμβάνεται στο μοντέλο των Rowe-Jin για την περιγραφή του κυκλικού τόξου της επιφάνειας επαφής, ενώ στο μοντέλο των Carslaw- Jaeger η συγκεκριμένη γωνία ισούται με το μηδέν. Για την ανάλυση του προβλήματος θερμότητας σε βαθιά λείανση αναπτύχθηκε ένα μοντέλο κινούμενης πηγής θερμότητας σε κεκλιμένο επίπεδο τόσο από τους Jin και Cai, όσο και από τον Rowe και στο οποίο η γωνία του κεκλιμένου καθορίζεται από τη γωνία επαφής. Οι Jin και Cai κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η γωνία επαφής του κεκλιμένου έχει σοβαρότερη επίδραση στις θερμοκρασίες για τις συνθήκες HEDG. Ακόμα, ο Rowe επεσήμανε το γεγονός πως η θερμοκρασία στο επίπεδο φινιρίσματος θα μπορούσε να είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία επαφής σε HEDG και πως η “ψυχρή λείανση” καθίσταται δυνατή ακόμα και αν υπάρχει υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού. Το μοντέλο του κυκλικού τόξου μελετήθηκε περαιτέρω από τους Jin και Rowe, οι οποίοι συμπεριέλαβαν την παροδική επίδραση της μεταφοράς θερμότητας. Βρέθηκε πως για σχετικά μικρό αριθμό Peclet ($L=1$) επιτυγχάνεται μια σταθερή κατάσταση μόνο όταν η απόσταση που διανύει ο τροχός υπερβεί κατά 5 φορές το μήκος επαφής.

Ένα βασικό ζήτημα αποτελεί το γεγονός πως για την ακριβή πρόβλεψη της θερμοκρασίας στη λείανση, απαιτείται η γνώση της διανομής της θερμότητας στα διάφορα θερμικά βάθη στις ζώνες λείανσης, δηλαδή στο τεμάχιο, στον τροχό λείανσης, τους λειαντικούς κόκκους και στο απόβλιτο. Εξαιτίας όμως της πολυπλοκότητας της κατεργασίας, συχνά καθορίζεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Στο μοντέλο Hahn [76] το 1962, υπολογίστηκε για το λόγο αυτό ο λόγος κατανομής τεμαχίου-τροχού R_{ws} , ο οποίος εξαρτάται από την ακτίνα επαφής των λειαντικών κόκκων και ο οποίος παραμένει σχεδόν σταθερός για ένα συγκεκριμένο λειαντικό υλικό και ένα συγκεκριμένο τεμάχιο, ενώ ο λόγος R_{ws} της εισερχόμενης θερμότητας μεταβάλλεται. Η ροή θερμότητας προς το απόβλιτο εκτιμήθηκε από την ενέργεια του αποβλίτου e_{ch} . Η ενέργεια μπορεί να βρεθεί εξισώνοντας τη μέγιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια του τεμαχίου με αυτήν της σύνθετης επιφάνειας, η οποία αποτελείται από τους λειαντικούς κόκκους και το υγρό λείανσης. Μια διαφορετική προσέγγιση προτάθηκε το 1989 από τους Lavine, Malkin και Jen [138] στην οποία οι λειαντικοί κόκκοι και το υγρό λείανσης

δεν συνέθεταν μία σύνθετη επιφάνεια. Το ενεργειακό μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως απαιτεί τιμές για τη φθορά στην επίπεδη περιοχή και για το σχήμα των κόκκων, οι οποίες δεν είναι γνωστές επακριβώς και έτσι χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικές τιμές στην ανάλυση. Πιο σύνθετα θερμικά μοντέλα αναπτύχθηκαν από τους Lavine, Jen και Demetriou [138, 139, 140, 141, 142, 143, 101, 102] το 1989, το 1991 και το 2000. Σε αυτά, η μεταφορά θερμότητας του τεμαχίου, των λειαντικών κόκκων και του υγρού λείανσης συμψηφίζονται ώστε να προκύψει ένα συνολικό θερμικό σύστημα που θα εκτιμά τη θερμοκρασία λείανσης.

Εκτός από τις έρευνες για την ανάλυση της ροής της θερμότητας, βασιζόμενος στο μοντέλο του Jaeger, ο Bei [6] ασχολήθηκε το 1964 με την τριγωνική ροή θερμότητας και αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες για τον καθορισμό της ροής θερμότητας στη ζώνη λείανσης με ρεαλιστικό τρόπο και η οποία σύμφωνα με περαιτέρω μελέτες προσδίδει τη ροή θερμότητας με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με τα αρχικά μοντέλα του Jaeger. Σημαντική επίδραση στη θερμοκρασία έχει επίσης και το μήκος επαφής του τροχού με το τεμάχιο λόγω της ελαστικής του παραμόρφωσης.

2.5.3. Μοντέλα λείανσης με υγρό κοπής

Με σκοπό τη μείωση της ειδικής ενέργειας λείανσης, τη μείωση της θερμοκρασίας στη ζώνη λείανσης αλλά και την αύξηση της διάρκειας ζωής του τροχού, χρησιμοποιούνται κατάλληλα λιπαντικά και ψυκτικά υγρά. Το 1992, οι Guo και Malkin [67] ανέλυσαν θεωρητικά τη ροή του υγρού προβλέποντας την ταχύτητα του, το βάθος διείδυσης και την απαραίτητη ροή στη ζώνη λείανσης με βασικές παραδοχές: αμελητέα βαρυτική δύναμη και δισδιάστατη ροή υγρού. Τη συγκεκριμένη ανάλυση τροποποίησαν το 1996 οι Chang κ. α [22] ώστε να συμπεριληφθεί και η επίδραση της υδροστατικής πίεσης που δημιουργείται από την επιφάνεια του τροχού λείανσης και του τεμαχίου και προέκυψαν αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, το 1991 διεξήχθη έρευνα για τη μοντελοποίηση της ροής του υγρού κάτω από τον τροχό λείανσης από τους Schumack κ. α [213], οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα σχέδιο διαταραχής στην περίπτωση λείου τροχού με μικρό διάκενο μεταξύ του τροχού και του τεμαχίου καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως οι εξισώσεις Navier- Stokes πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση με σωστό τρόπο της ροής του υγρού στην κατάλληλη γεωμετρία. Ωστόσο, για την απλοποίηση των εξισώσεων Navier- Stokes προτείνεται η υπόθεση των Hagen-Poiseuille, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση της πίεσης στο τόξο του τροχού καθώς και την επίδραση της κλίσης της πίεσης κατά την περιστροφή του τροχού. Τόσο ο Hryniewicz όσο και ο Reynolds [91] ασχολήθηκαν με τη ροή του ρευστού το 2001, με τον δεύτερο να ερευνά τη στρωτή και την τυρβώδη ροή κάνοντας χρήση της εξίσωσης Reynolds και της τροποποιημένης εξίσωσης Reynolds, με έμφαση στην υδροδυναμική πίεση που αναπτυσσόταν στη ζώνη επαφής.

Οι Nguyen και Zhang [172] διαπίστωσαν το 2005 πως η χρήση του τροχού λείανσης με θάλαμο υγρού κατά διαστήματα, μειώνει σημαντικά την ποσότητα του ψυκτικού υγρού που χρησιμοποιείται καθώς και βελτιώνει την επιφάνεια. Έτσι, αφού χρησιμοποίησαν την αστάθεια (jet instability) των Weber και Newton και έλαβαν υπόψη τις παραμέτρους για λείανση, ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη του ρυθμού ροής που παρέχεται το υγρό (mist flow rate).

Σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση της θερμότητας λείανσης που μπορεί να προκαλέσει θερμική βλάβη στην επιφάνεια του τεμαχίου έχει η ψύξη μέσω συναγωγής. Το 1968 ο Des Resuisseaux [45] εισήγαγε το συντελεστή υγρού λείανσης για μεταφορά θερμότητας στο μοντέλο των Carslaw- Jaeger και θεωρητικά απέδειξε τη σημαντικότητα της ψύξης με υγρό στην παραγόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή φανερώνει την αποδοτικότητα της ψύξης στη ζώνη λείανσης η οποία είναι σημαντική μεταβλητή για τον καθορισμό της επιφανειακής θερμοκρασίας του τεμαχίου. Επειδή η τιμή του συντελεστή όχι μόνο

δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη, αλλά ακόμα και η εκτίμηση θεωρείται πολύ δύσκολη, οι περισσότερες προηγούμενες έρευνες επικεντρώθηκαν στη διανομή της ενέργειας της συνολικής θερμότητας λείανσης για να εκτιμηθεί η επιφανειακή θερμοκρασία του τεμαχίου. Οι Jin, Stephenson και Rowe [107] ανέπτυξαν το 2003 ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εντός της ζώνης λείανσης και τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι τιμές του συντελεστή είναι αρκετά υψηλότερες από τις προηγούμενες. Η ταχύτητα του τροχού και το πάχος του προφίλ του υγρού επηρεάζουν τις τιμές του συντελεστή συναγωγής. Αφού το πάχος του προφίλ επηρεάζεται με τη σειρά του από την ταχύτητα του τροχού, το πορώδες, το μέγεθος των κόκκων και το μέγεθος του ακροφυσίου, γίνεται σαφές πως για λείανση με μεγάλο βάθος (όπως HEDG) η ανώτερη τιμή του πάχους του προφίλ του υγρού επιτυγχάνεται εύκολα λόγω της αυξημένης πίεσης και του υψηλού ρυθμού παροχής του ψυκτικού.

Έναν διαφορετικό τρόπο για την εύρεση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ανάλογα με τις παραμέτρους λείανσης και της παροχής ψυκτικού πρότειναν οι Wittmann κ. α [258] το 2006. Ακόμα, ο υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τριγωνική ολισθαίνουσα πηγή θερμότητας.

Αρκετές προσπάθειες έγιναν για την πειραματική μέτρηση του χρήσιμου ρυθμού ροής υγρού λείανσης. Ενώ οι Guo και Malkin [49, 14] τόσο το 1992 όσο και το 2001 έβγαλαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα συγκρίνοντας τους προβλεπόμενους ρυθμούς ροής με τα πειραματικά δεδομένα, οι Gviashville, Webster και Rowe ανέπτυξαν ένα μοντέλο, που με βάση την πίεση του ψυκτικού στη ζώνη επαφής, υπολόγιζε το ρυθμό ροής.

Μέσω της αντίστροφης ανάλυσης της μεταφοράς θερμότητας στη λείανση, οι Guo και Malkin κατέληξαν σε τρεις μεθόδους:

- τη μέθοδο αντιστοίχισης θερμοκρασιών (temperature matching)
- τη μέθοδο ολοκλήρωσης (integral)
- τη διαδοχική μέθοδο (sequential),

κάθε μία από τις οποίες αξιολογήθηκε τόσο για την ακρίβεια, όσο και για τη σταθερότητα με ψηφιακή προσομοίωση. Οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόστηκαν για λείανση χάλυβων με τροχούς Al_2O_3 και CBN ώστε να εκτιμηθεί περαιτέρω η ροή θερμότητας και ο συντελεστής για συναγωγή. Η πρώτη μέθοδος έχει μειονέκτημα στη μέτρηση των σφαλμάτων, ενώ η τρίτη μέθοδος αν και παρέχει σταθερά αποτελέσματα παραλείπει αρκετές λεπτομέρειες.

2.5.4. Μοντελοποίηση τοπογραφίας λειαντικού τροχού

Βασικό κομμάτι της διαδικασίας της μοντελοποίησης, αποτελεί η τοπογραφία του τροχού λείανσης. Για τη λήψη αριθμητικών δεδομένων για την τοπογραφία του τροχού, υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές:

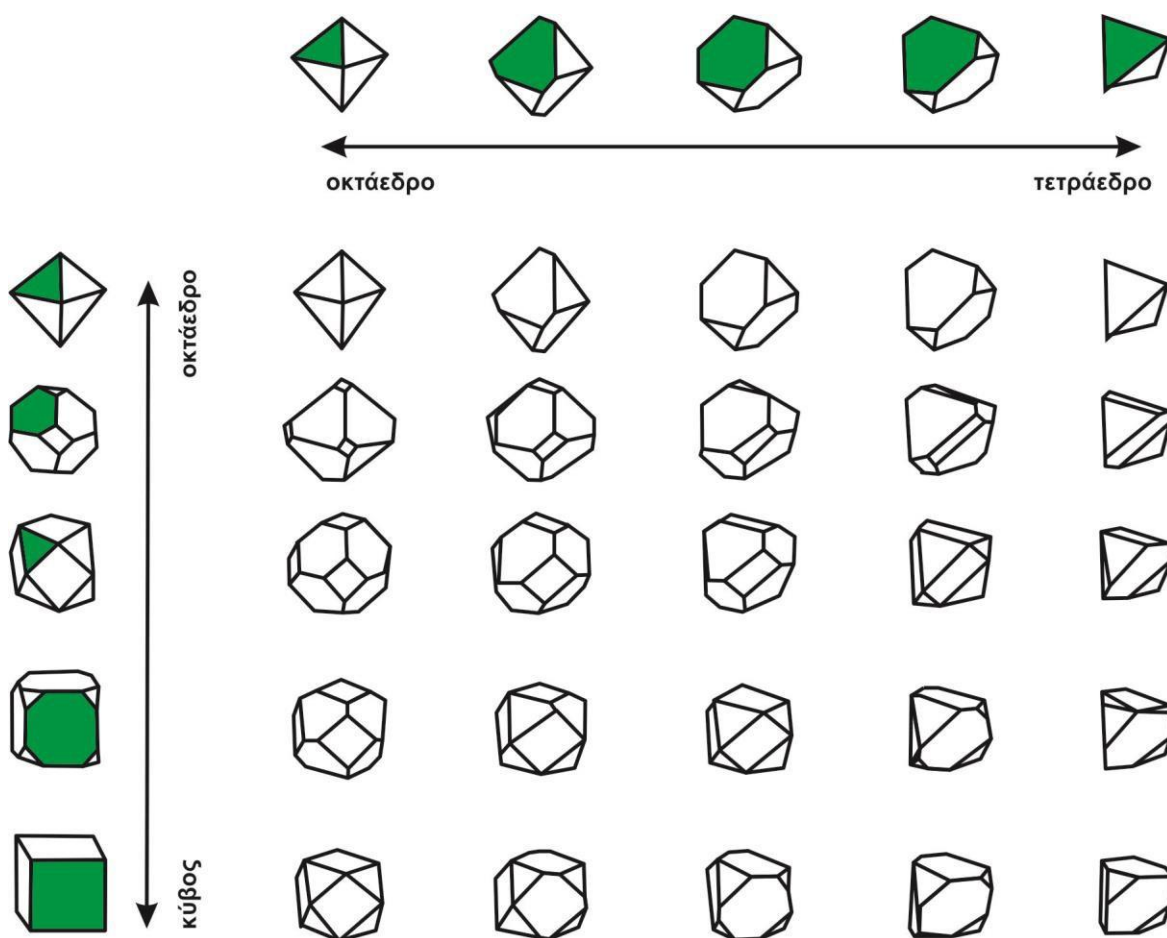
- η χρήση περισσότερο ή λιγότερο πραγματικών σαρώσεων της τοπογραφίας της επιφάνειας του τροχού λείανσης
- η σύνθετη δημιουργία τοπογραφίας της επιφάνειας βάσει στατιστικών αναλύσεων των επιφανειών του τροχού.

Ο Inasaki [95, 96] στις προσομοιώσεις λείανσης το 1996 παρουσίασε μια άμεση προσέγγιση για τη δημιουργία της τοπογραφίας του τροχού. Προσομοίωσε με τη βοήθεια H/Y τα δεδομένα που έλαβε, μετρώντας έναν μεγάλο αριθμό προφίλ επιφανειών γύρω από την περίμετρο του τροχού.

Στη σύνθετη δημιουργία τοπογραφίας αναλύονται ως προς τα χαρακτηριστικά τους οι σαρωμένες επιφάνειες, προκειμένου να εξαχθούν γενικές πληροφορίες για την τοπογραφία των τροχών παράλληλα με στατιστικά δεδομένα, όπως οι κατανομές για

το μέγεθος των κόκκων, ο διαχωρισμός τους σε πολλαπλές κατευθύνσεις και το ύψος που προεξέχουν. Όσον αφορά τη γεωμετρία των λειαντικών κόκκων, είτε προσεγγίζεται με απλά σχήματα όπως σφαίρες και κώνους, είτε με τροποποιημένα σχήματα όπως οκτάεδρα, τετράεδρα και ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, ενώ χρησιμοποιούνται τυχαιές κατανομές για να βρεθεί η κατανομή τους γύρω από την επιφάνεια του τροχού.

Οι κόκκοι ενός λειαντικού τροχού είναι τυχαιές γεωμετρίας και διάστασης. Σύμφωνα με τον F. Klocke [270] αρχικά γίνεται ο προσδιορισμός της ιδεατής βασικής μορφής και των παραμέτρων του κόκκου. Σε επόμενη φάση, πραγματοποιείται έρευνα της στατιστικής διασποράς της παραμέτρου του μοντέλου του κόκκου και στη συνέχεια γίνεται η παραγωγή του ιδανικού κόκκου, οριστικοποίηση του αριθμού και προσανατολισμού των περαιτέρω επιπέδων του κόκκου. Οι σύνηθες μορφές κόκκων είναι αυτές που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.7 και είναι στην ουσία γεωμετρίες 6 έως 24 εδρών.



Σχήμα 2.7: Γεωμετρίες κόκκων σύμφωνα με τον Prof. Dr.-Ing. F. Klocke.

2.5.5. Κινηματικά μοντέλα λείανσης

Οι πρώτες προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση του τομέα της κινηματικής στη λείανση, έγιναν το 1969 από τους Yoshikawa, Kassen [111, 112, 113] και από το Law το 1973 [143], στις οποίες γινόταν περιγραφή επιπέδων ή/και κυλινδρικών επιφανειών λείανσης με τη χρήση δισδιάστατου μοντέλου, υπολογίζοντας την τραχύτητα ή τις διατομές του τεμαχίου και του αποβλήτου. Η κύρια ιδέα των βασικών κινηματικών προσεγγίσεων έγκειται στη μοντελοποίηση του προφίλ επιφάνειας [81] και της επιφανειακής τραχύτητας του τεμαχίου, είτε προς τη διεύθυνση της λείανσης, είτε κάθετα προς αυτήν [261, 143]. Ο Yoshikawa [261] επικεντρώθηκε το 1968 στη διάταξη

των κόκκων και τη γεωμετρία του αποβλίπτου, ενώ αντίθετα, το 1969, ο Kassen [111] στο πάχος και το μήκος του αποβλίπτου καθώς και στον αριθμό δυναμικών κόψεων των κόκκων.

Κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα

Οι θεμελιώδεις ιδέες των κινηματικό-γεωμετρικών μοντέλων λείανσης έχουν κοινό στοιχείο με τις βασικές κινηματικές προσεγγίσεις το γεγονός πως και τα δύο μοντέλα εξαρτώνται από τη γεωμετρική διείσδυση του τροχού στο τεμάχιο. Σε αντίθεση με τις δισδιάστατες βασικές κινηματικές προσεγγίσεις, το κύριο σημείο στα συγκεκριμένα μοντέλα είναι ο πλήρης υπολογισμός της γεωμετρικής διείσδυσης μεταξύ του τροχού και του τεμαχίου σε ένα υψηλότερο επίπεδο διακριτοποίησης. Έτσι, ο υπολογισμός του όγκου του τεμαχίου που αφαιρείται γίνεται συναρτήσεως της σχετικής κίνησης μεταξύ του τεμαχίου και του τροχού με την άμεση μοντελοποίηση της επαφής του κάθε κόκκου με το τεμάχιο. Γίνεται με αυτόν τον τρόπο δηλαδή μια πιο ολοκληρωμένη διαδικασία ανάλυσης και βαθύτερη κατανόηση του μικροσκοπικού επιπέδου της λείανσης.

Η εμφάνιση ισχυρότερων υπολογιστικών συστημάτων από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 όχι μόνο έκαναν εφικτές τις αριθμητικές προσομοιώσεις με τη χρήση τρισδιάστατων κινηματικό-γεωμετρικών μοντέλων, αλλά τις έκαναν και πιο ρεαλιστικές βελτιστοποιώντας συγκεκριμένες εφαρμογές λείανσης. Τα κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα αναπτύχθηκαν το 1982 από τον Konig [121], ακολούθησε το 1983 ο Steffens [221], ο Goerne το 1986 [61].

Το 1991 ο Fawcett [52, 53], το 1995 από τον Domala [47], το 1996 από τον Chen [24, 25, 26, 27] και τον Inasaki [95, 96], το 1998 Warnecke [248], το 1999 από τον Koshy [129] και Zitt [269]. Συνέχισαν μελέτες το 2000 οι Kempa [114] και Cooper [38], το 2002 οι Gong [62], Tuerich [238] και τον Zhou [267] και το 2004 ο Becker [5].

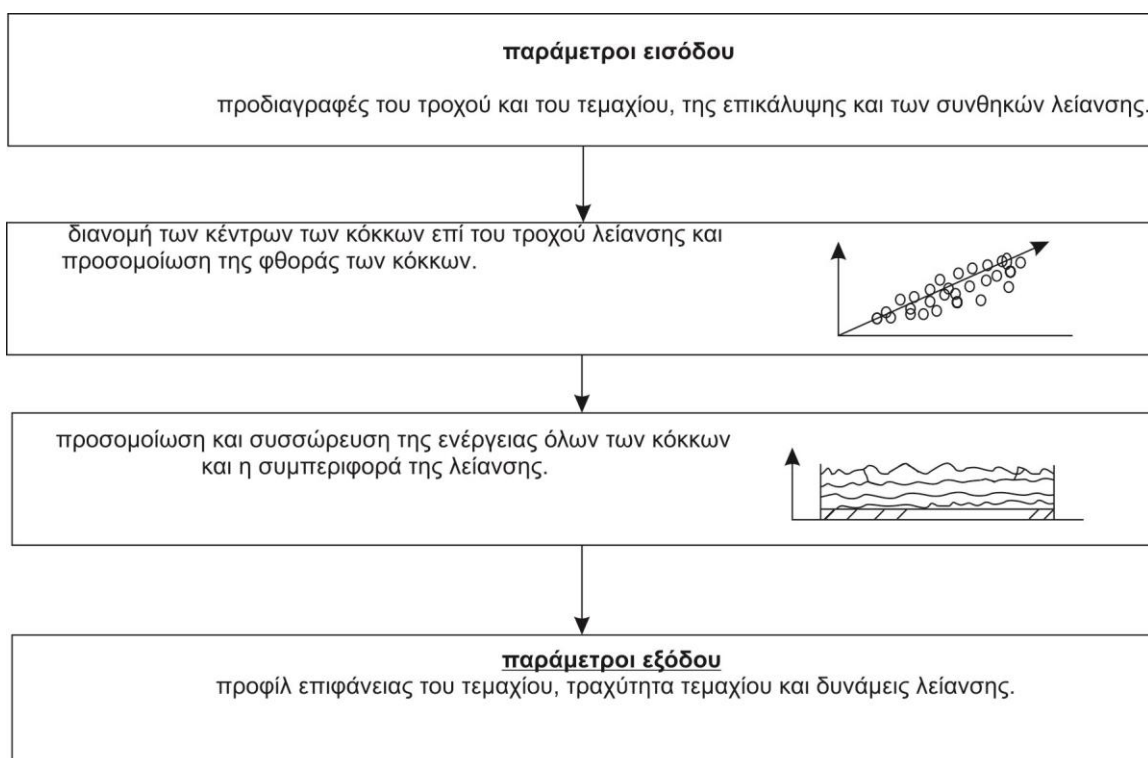
Η διαφορά με τις βασικές κινηματικές προσεγγίσεις οι οποίες έχουν ως κύρια παράμετρο εξόδου την επιφανειακή τραχύτητα, είναι πως τα κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα έχουν παραμέτρους εξόδου τη διατομή του αποβλίπτου, τις ειδικές δυνάμεις λείανσης του τεμαχίου και την ταχύτητα του τροχού, σύμφωνα με τις οποίες υπολογίζονται οι δυνάμεις κάθε κόκκου, η κατανομή της πίεσης καθώς και στατιστικές παράμετροι για το πάχος του αποβλίπτου και για τον αριθμό των κινηματικών κόκκων. Η πλειοψηφία των παραπάνω μοντέλων θεωρεί πως η αφαίρεση του υλικού γίνεται με ιδανικό τρόπο, δηλαδή οι κόκκοι του τροχού αφαιρούν το σύνολο του όγκου του υλικού χωρίς να ληφθεί υπόψη η πλαστική παραμόρφωση των κόκκων. Ωστόσο, ορισμένα μοντέλα περιλαμβάνουν προηγμένες περιγραφές που επιτρέπουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της ζώνης επαφής και του τεμαχίου.

Η γενική προσέγγιση του κινηματικό-γεωμετρικού μοντέλου είναι εξαιρετικά ευέλικτη, δεν περιορίζεται στη σχέση του τεμαχίου με τους λειαντικούς κόκκους και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για εσωτερική και εξωτερική λείανση, όσο και για γωνιακή λείανση. Το 1982 και το 1987, οι Konig και Stephens [121, 122] ανέπτυξαν μοντέλα τροχού λείανσης με βάση τις σαρωμένες επιφάνειες του τροχού, παρουσιάζοντας μια μέθοδο προσομοίωσης κλειστού βρόγχου που βασιζόταν στην εργασία του Steffens [221]. Η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει τον επαναληπτικό αριθμητικό υπολογισμό της διαδικασίας λείανσης χρησιμοποιώντας παραμέτρους όπως η τοπογραφία του τροχού, παράμετροι set-up των εργαλειομηχανών, η θερμική αγωγιμότητα και τις μηχανικές και ελαστικές ιδιότητες του συστήματος της εργαλειομηχανής με το τεμάχιο. Οι παράμετροι που προκύπτουν από την παραπάνω μοντελοποίηση είναι οι εφαιπτομενικές και οι κανονικές δυνάμεις, η θερμοκρασία και η τραχύτητα του τεμαχίου και γίνεται δυνατή η περιγραφή της ροής της θερμότητας κατά το μήκος της ζώνης επαφής.

Ο Inasaki [95, 96] παρουσίασε το 1996 ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της απόδοσης της λείανσης, όπου μοντελοποιήθηκε η τοπογραφία του τροχού λείανσης με την αποθήκευση μεγάλου αριθμού μετρούμενων προφίλ της επιφάνειας του τροχού, γύρω

από την περίμετρο του. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι οι δυνάμεις κοπής, η κανονική και η εφαπτομενική δύναμη λείανσης, η ισχύς και η τραχύτητα του τεμαχίου. Από την άλλη, ο Chen [24, 25, 26, 27] όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8 κάνοντας χρήση μεγάλου αριθμού σφαιρών που είχαν κατανεμηθεί τυχαία στον τροχό, δημιούργησε το 1996 και το 1998 την τρισδιάστατη τοπογραφία του τροχού λείανσης. Η προσομοίωση της κινηματικής του κάθε κόκκου, όπως και η διερεύνηση της ελαστικής του παραμόρφωσης έχει απόδοση κοπής της τάξης του 75% σύμφωνα με το Chen, άρα το 25% του μη παραμορφωμένου αποβλήτου παραμένει στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Παράμετροι εισόδου θεωρούνται οι φυσικές ιδιότητες του υλικού, ο προσδιορισμός του τροχού, ενώ προκύπτουν οι δυνάμεις λείανσης, το προφίλ της επιφάνειας του τεμαχίου και η τραχύτητα του τεμαχίου.

Το 1998 και το 1999, οι Warnecke και Zitt [248, 269] ανέπτυξαν μια δομημένη προσομοίωση για τη λείανση σε επίπεδη επιφάνεια και για τη λείανση εσωτερικά και εξωτερικά του τεμαχίου. Ο Zitt επικεντρώθηκε στις κινηματικές σχέσεις της λείανσης και τη δημιουργία ενός σύνθετου, τριών διαστάσεων μοντέλου τροχού, ενώ παράλληλα η προκαταρκτική εργασία για τη μοντελοποίηση διεξήχθη το 1991 και το 1994 από τους Warnecke, Merz και Spiegel [247, 166, 219]. Η περιγραφή του τροχού λείανσης δίδεται τόσο από τη μακρογεωμετρία, όσο και από τη μικρογεωμετρία. Η πρώτη δείχνει ένα ιδανικό κυκλικό προφίλ γύρω από την περιφέρεια του τροχού, το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει λάθη και μη ομοιόμορφη φθορά του τροχού. Αντίθετα, η μικρογεωμετρία περιγράφεται από τη στοχαστική κατανομή των κόκκων στο τρισδιάστατο χώρο. Τα δεδομένα που προκύπτουν έπειτα από την προσομοίωση είναι το πάχος του μη παραμορφωμένου αποβλήτου, το μήκος του αποβλήτου, η επιφάνεια του τεμαχίου και οι δυνάμεις λείανσης. Στο μοντέλο του Koshy το 1999 [129], η προσομοίωση αφορούσε το διαμάντι και βασιζόταν σε τρισδιάστατους τροχούς λείανσης των οποίων οι κόκκοι ήταν σφαιρικοί με κανονικά διανεμημένη διάμετρο. Δεδομένο ήταν η τοπογραφία του τροχού, ενώ απαραίτητες ήταν και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου. Ο κύριος στόχος ήταν να διερευνηθεί η επιρροή του υλικού του τεμαχίου ως προς την τραχύτητα του. Σε περαιτέρω προσομοιώσεις το 2003, ο Koshy [130] τοποθέτησε τους κόκκους σε συγκεκριμένο μοτίβο με αποτέλεσμα να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του τροχού λείανσης.



Κινηματικό-εμπειρικά μοντέλα

Στα κινηματικό-εμπειρικά μοντέλα προκύπτουν παρόμοια δεδομένα εξόδου με τα κινηματικό-γεωμετρικά μοντέλα με διαφορά όμως τον τρόπο υπολογισμού των χαρακτηριστικών και των αποτελεσμάτων της διαδικασίας. Δηλαδή, ενώ τα κινηματικό- γεωμετρικά μοντέλα κάνουν τους υπολογισμούς από τη διαδρομή κίνησης του εργαλείου, τα κινηματικό-εμπειρικά χρησιμοποιούν εμπειρικές και αναλυτικές εξισώσεις.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η προσομοίωση κυλινδρικής λείανσης σε βύθιση το 1993 από τον Chiu [32], όπου μέσω αναλυτικών και εμπειρικών μαθηματικών μοντέλων προβλέπονται οι δυνάμεις λείανσης, η ισχύς, ο πραγματικός ρυθμός αφαίρεσης υλικού, η θερμική διαστολή, η φθορά του τροχού λείανσης, η τραχύτητα και η καμπυλότητα του τεμαχίου.

Εκτός από το μοντέλο του Chiu, υπάρχει και το μοντέλο του Hecker το 2003 [78, 79], το οποίο βασίστηκε στο πιθανολογικό μοντέλο μη παραμορφωμένου αποβλήτου που εκφράστηκε στην κατανομή πιθανοτήτων του Rayleigh. Τα πεδία εφαρμογής της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι για κυλινδρική και επιφανειακή λείανση, εγκάρσια και σε βύθιση. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι το πάχος του αποβλήτου, η κανονική δύναμη ανά κόκκο, η συνολική δύναμη λείανσης, η τραχύτητα του τεμαχίου και το βάθος της πλαστικής παραμόρφωσης.

2.6. Προσομοίωση διεργασιών λείανσης

Λόγω της συνεχούς αύξησης της πολυπλοκότητας των προβλημάτων κατεργασίας και των γεωμετρικών σχημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτά έπρεπε να αναπτυχθούν λογισμικά που να τα επιλύουν. Δημιουργήθηκε δηλαδή η ανάγκη προσεγγιστικού υπολογισμού πολλών και περίπλοκων διαφορικών εξισώσεων για την περιγραφή των κατεργασιών. Στα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται γίνεται προσπάθεια να συνδεθούν παράγοντες και συνθήκες κοπής μιας κατεργασίας με τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, τα απόβλητα, τις τάσεις και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία με την βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να βρει εφαρμογή σε όλα τα προβλήματα κατεργασιών.

Το 1944 ο Merchant πρότεινε το πρώτο αναλυτικό μοντέλο που έθεσε τα πλαίσια για τη μοντελοποίηση της ορθογωνικής κοπής. Με την εφεύρεση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, οι τεχνικές με πεπερασμένα στοιχεία (**FEM-Fine Element Modeling**) άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κατεργασιών.

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα, τρίγωνα ή πολύγωνα και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρότερου ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων. Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και καθορίζονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρική μορφή και υπολογίζονται οι τιμές κάθε

βαθμού ελευθερίας . Όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει άπειρους κόμβους. Ωστόσο ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξηθεί απεριόριστα ο αριθμός των κόμβων αν είναι επιθυμητό το αποτέλεσμα σε σύντομο χρόνο. Η χρήση του υπολογιστή επιβάλλεται για την μοντελοποίηση ενός προβλήματος FEM και εκτός των γρήγορων υπολογισμών μπορεί επιπλέον να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

2.6.1. Μοντέλα προσομοίωσης Euler – Lagrange

Δύο είναι τα βασικότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση κατεργασιών κοπής, του Euler και του Lagrange. Κατά τη διατύπωση του Euler, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι χωρικά σταθερό και το υλικό ρέει μέσα από αυτό προκειμένου να προσομοιώσει το σχηματισμό του αποβλήτου. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι η ποσότητα των στοιχείων για την μοντελοποίηση του κομματιού προς κατεργασία και του αποβλήτου είναι μικρή και το γεγονός ότι δεν υφίστανται στρέβλωση, δεδομένου ότι το πλέγμα είναι εκ των προτέρων γνωστό, άρα και η μορφή του αποβλήτου. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί δύσκολο προγραμματισμό και από πειραματικά δεδομένα πρέπει να είναι ήδη γνωστά ,πριν από την κατασκευή του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από ερευνητές για την προσομοίωση της σταθερής κατάστασης της διαδικασίας κοπής.

Στη μέθοδο Lagrange, τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με το υλικό και το εργαλείο σε σχέση με το τεμάχιο. Το απόβλιτο σχηματίζεται με τη χρήση ενός κριτηρίου διαχωρισμού μπροστά από την ακμή του εργαλείου. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη παραμόρφωση του πλέγματος που παρατηρείται κατά την προσομοίωση. Λόγω της σύνδεσης του πλέγματος στο υλικό του τεμαχίου το πλέγμα καταστρέφεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης στη ζώνη κοπής. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα εφαρμόζεται ένας συνεχής επανασχηματισμός (remeshing) του πλέγματος και μια προσαρμογή του πλέγματος που επιβαρύνουν τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού.

Πλέον ,το μοντέλο του Lagrange προτιμάται περισσότερο από το μοντέλο του Euler στον τομέα της έρευνας. Ενώ παράλληλα έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό και των δύο μεθόδων δίνοντας έμφαση στα προτερήματα τους. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιεί την τεχνική του διαχωρισμού των κόμβων με τη μέθοδο διάδοσης ρωγμής για να μελετήσει την περιοχή αποκόλλησης του αποβλήτου από το τεμάχιο. Έτσι όταν ο τελευταίος κόμβος της κοπτικής ακμής πλησιάζει πιο κοντά από μια απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι, αυτός με την σειρά του διασπάται σε δύο κόμβους. Και οι δύο μέθοδοι στοιχίζουν υπολογιστικά αρκετά και συγχρόνως απαιτείται τοπική πύκνωση του πλέγματος του τεμαχίου κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το κοπτικό εργαλείο.

2.6.2. Βασικά Στοιχεία για την Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (FEA)

Η μέθοδος FEA και η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (FDM), εφαρμόζονται για μοντέλα τα οποία περιγράφουν μέσω διαφορικών εξισώσεων, όπως οι διαφορικές εξισώσεις του Lamé, έναν μεγάλο αριθμό φυσικών διαδικασιών. Στις παραπάνω μεθόδους, η πραγματική διαδικασία μετασχηματίζεται σε ένα μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία οριοθετούνται από στοιχεία-κόμβους. Συγκεκριμένα, στη FDM σχηματίζεται μια δομή πλέγματος από τα στοιχεία και οι επιμέρους εξισώσεις επιλύονται από ένα σύστημα εξισώσεων. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η δυσκολία για την εφαρμογή της σε σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας και πως δεν είναι εφικτή η ανάλυση ενός μέρους της πλεγματικής δομής αλλά ολόκληρης. Ωστόσο, η FDM αποτελεί το κατάλληλο μοντέλο για την ανάλυση της

θερμικής αγωγιμότητας στη λείανση για ορισμένα προβλήματα κατά τα έτη 1995, 1998, 2000 και 2003 [88, 237, 220, 69].

Στη FEA, οι διαφορικές εξισώσεις επιλύονται εφαρμόζοντας τις λεγόμενες “συναρτήσεις σχήματος ή συναρτήσεις παρεμβολής”, οι οποίες οδηγούν σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με γνωστές τις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου και το θερμικό ή μηχανικό φορτίο. Η ακαμψία εξαρτάται από το υλικό και τη γεωμετρία του τεμαχίου. Το πλεονέκτημα στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η δυνατότητα δημιουργίας ακανόνιστων πλεγμάτων για σύνθετες δομές, καθώς και η δυνατότητα προσαρμογής του πλέγματος τοπικά, ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλα μοντέλα.

Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα FEA μπορούν να διαχωριστούν σε μακροσκοπικές και μικροσκοπικές έννοιες για την προσομοίωση των κατεργασιών λείανσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμόζεται η μακροσκοπική προσομοίωση προκειμένου να υπολογιστούν οι επιδράσεις της θερμότητας και της μηχανικής επιφανειακής πίεσης σε ολόκληρο το τεμάχιο, όσον αφορά την κατανομή της θερμοκρασίας. Οι υπολογισμοί βασίζονται κυρίως στα θερμομηχανικά και ελαστομηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού, ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η συμπεριφορά του υλικού στην πλαστική παραμόρφωση και ο σχηματισμός του αποβλίττου. Αντίθετα, η μικροσκοπική προσομοίωση περιορίζεται σε αναλύσεις της ζώνης επαφής. Με αυτόν τον τρόπο μοντελοποιείται ένα μικρό τμήμα του τεμαχίου. Η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί την πιο λεπτομερή προσέγγιση της πραγματικής διαδικασίας λείανσης μέχρι σήμερα, αλλά πρέπει να περιλαμβάνει την ελαστικό-πλαστική συμπεριφορά του υλικού και το σχηματισμό του αποβλίττου. Ωστόσο, δεν υπάρχει η δυνατότητα από τους Η/Υ να αναπτύξουν επαρκώς ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για ολόκληρο τον τροχό λείανσης στις μικροσκοπικές προσομοιώσεις, ή να συμπεριληφθεί ο σχηματισμός του αποβλίττου στις μακροσκοπικές προσομοιώσεις [118]. Για τη διεξαγωγή λείανσης σε εικονικό περιβάλλον, είναι απαραίτητο να μειωθούν οι μεταβλητές του συστήματος, ενώ στη συνέχεια γίνεται ολοκλήρωση όλων των σχετικών παραμέτρων της διαδικασίας και των οριακών συνθηκών.

Οι παράμετροι εισόδου για μια τυπική προσομοίωση FEA είναι η γεωμετρία του τεμαχίου, οι δυνάμεις λείανσης, οι παράμετροι της διαδικασίας, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ψυκτικού και του τεμαχίου, οι συνθήκες ψύξης και οι οριακές συνθήκες.

Ο τροχός λείανσης στα περισσότερα μακροσκοπικά μοντέλα του 1999 παρουσιάζεται ως ο συνδυασμός της πηγής θερμότητας και της επιφανειακής πίεσης, ο οποίος μετακινείται πάνω στο τεμάχιο με την ταχύτητα πρόωσης. Για να προκύψουν ρεαλιστικές παράμετροι πρέπει να περιγραφεί με ακριβή τρόπο η κατανομή της πηγής θερμότητας εντός της ζώνης επαφής μεταξύ του τεμαχίου και του τροχού λείανσης [210]. Επειδή όμως αυτή η μέθοδος προσδιορισμού του προφίλ της πηγής θερμότητας είναι αρκετά χρονοβόρα, τα προφίλ συχνά θεωρούνται ιδανικά, με την υπόθεση πως είναι ορθογώνια, τριγωνικά, παραβολικά ή τραπεζοειδούς μορφής για απλούστευση της διαδικασίας. Για το σχεδιασμό αυτών των απλουστευμένων πηγών θερμότητας, είναι αναγκαίο να είναι γνωστές οι τιμές για την πυκνότητα θερμότητας q_w . Είναι γνωστό πως η πυκνότητα ροής εκτός από τις παραμέτρους της διαδικασίας (όπως η ταχύτητα κοπής v_c) και τις γεωμετρικές συνθήκες επαφής (το μήκος επαφής l_g , το πλάτος του τροχού στη ζώνη επαφής b_k), εξαρτάται και από τη διάχυση ενέργειας K_v , τη διανομή της θερμότητας K_w και την αξονική δύναμη F_t . Για την προσομοίωση μιας πραγματικής διαδικασίας λείανσης απαιτείται να ληφθεί υπόψη το ψυκτικό. Μια εφικτή προσέγγιση παρουσιάστηκε το 1970 και το 1980 από τους Lowin και Des Ruisseaux [46, 153]. Με τη χρήση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας “α”, λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις στην επιφάνεια του τεμαχίου του ψυκτικού και της απαγωγής της θερμότητας. Μέσω πειραμάτων από το 1985, 1991, 1995, 1999 ως το 2001 [173, 174, 69, 210, 250] ή μέσω συνθηκών ροής για επίπεδη πλάκα με εξαναγκασμένη συναγωγή

(αναλυτική μέθοδος), καθορίζεται και η τιμή του “α”.

2.6.3. Εφαρμογές προσομοίωσης

Έρευνες του 2000 έδειξαν ότι οι περισσότερες βλάβες κατά τη διαδικασία λείανσης σε χάλυβες προέρχονται από τη θερμότητα [73]. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσίασαν την προσομοίωση ως ένα κατάλληλο εργαλείο για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων που προκαλούνται από την κατεργασία. Η προσομοίωση FEA επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της κατεργασίας και βοηθά το χρήστη στην ανάλυση σύνθετων πειραματικών αποτελεσμάτων.

Αρκετά μοντέλα FEA αναπτύχθηκαν για την επιφανειακή λείανση. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο εφαρμόστηκε το 2000, το 2004 και το 2005 από τον Hoffmeister [85, 82, 86] για να προσομοιώσει την κατανομή της θερμοκρασίας κατά τη λείανση. Μια άλλη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βασίστηκε στο μοντέλο του Jaeger για δύο διαστάσεις και είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών πεδίων στο τεμάχιο. Το συγκεκριμένο μοντέλο το οποίο μετέπειτα βελτιώθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των κρίσιμων θερμοκρασιών για τις επιδράσεις στη σκλήρυνση. Μια ακόμη μέθοδος είναι η τρισδιάστατη προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση της παροδικής μεταφοράς θερμότητας σε συνθήκες HEDG το 2004 από τους Jin και Stephenson [108]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η στατική κατάσταση μεταφοράς θερμότητας επιτυγχάνεται μόλις επιτυγχάνεται το μέγιστο μήκος επαφής. Ακόμα, μελετάται η επίδραση της ψύξης του τοιχώματος με συναγωγή από το υγρό κατά τη λείανση σε λεπτές πλάκες χάλυβα 2 χιλιοστών (mm).

Η μέθοδος FEA εφαρμόζεται επίσης για την προσομοίωση προφίλ τεμαχίων που έχουν κατεργαστεί. Ο καθορισμός του προφίλ του φορτίου βοηθά στο να γίνει αντιληπτή η φθορά του εργαλείου στα πειράματα. Ακόμα, είναι σημαντικό το γεγονός πως ήδη έχει συμπεριληφθεί η επίπτωση μιας τυχαίας αλλαγής σε μία παράμετρο της διαδικασίας και έτσι μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων οι νέες παράμετροι.

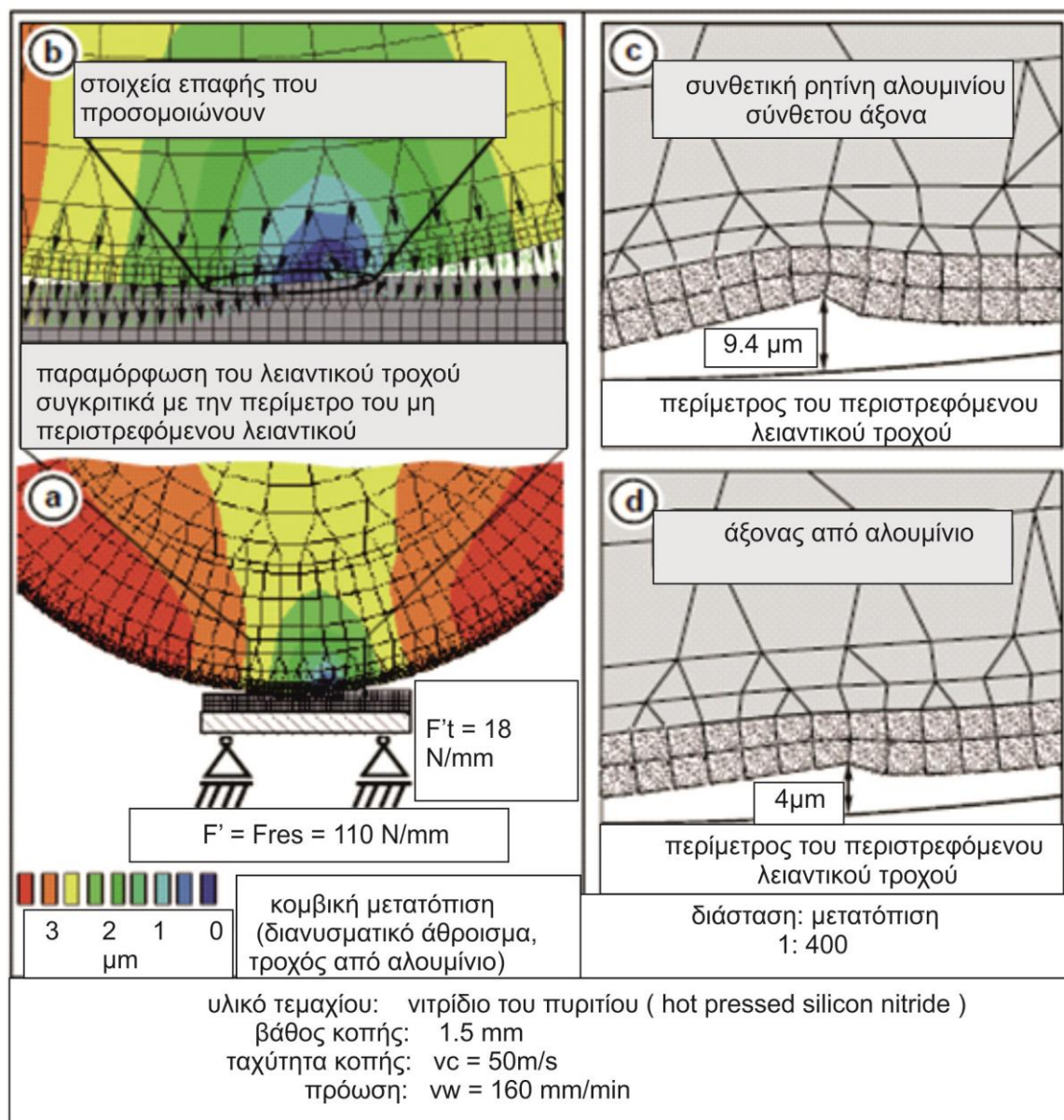
Ένα επιπλέον παράδειγμα της εφαρμογής των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο υπολογισμός τόσο των θερμοκρασιών, όσο και των τάσεων στη λείανση σκληρυμένου χάλυβα [169] το 2001 από τους Moulík και Yang. Το θερμικό φορτίο κατά τη διάρκεια της λείανσης προσομοιώνεται ως μία ομοιόμορφα ή τριγωνικά κατανομημένη πηγή θερμότητας, η οποία κινείται σε ολόκληρη την επιφάνεια ενός θερμικά μονωμένου συστήματος. Οι υπολογισμένες θερμικές κατανομές βασίζονται στην ανάλυση των επιδράσεων της πρόωσης, της ροής θερμότητας και έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές των πειραμάτων.

Η μέθοδος FEA βρίσκει εφαρμογή στην έρευνα για επιφανειακή λείανση του 100Cr6 με κορούνδιο και CBN, όπου μέσω μιας αναλυτικής προσέγγισης βασισμένη στους Jaeger και Carslaw και του μοντέλου FEA υπολογίζεται η θερμοκρασία της ζώνης επαφής. Τα αποτελέσματα και των δύο προσεγγίσεων ήταν σε συμφωνία για βάθος κοπής 120 μm κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου. Οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν για το εργαλείο CBN ήταν περίπου οι μισές σε σχέση με αυτές του κορουνδίου [33]. Με βάση τις θερμοκρασιακές κατανομές που προέκυψαν, υπολογίστηκαν με τη χρήση ενός άλλου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων οι παραμένουσες τάσεις και για τα δύο υλικά το 1986. Θα μπορούσε να αποδειχθεί πως η λείανση με κορούνδιο προκαλεί εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις, ενώ μπορεί να αμεληθεί η θερμική επίδραση στις παραμένουσες τάσεις στην περίπτωση λείανσης με CBN. Η ενσωμάτωση του τεμαχίου και του τροχού λείανσης σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία ακόμα προσέγγιση. Ένα σύστημα “πολλαπλών σωμάτων” που συμπεριλαμβάνει τον τροχό και το τεμάχιο αναπτύχθηκε το 1999 προκειμένου να διερευνηθούν οι επιδράσεις στη ζώνη επαφής [249] όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9.

Με τα δεδομένα που παρατηρήθηκαν μπορεί να προβλεφθεί το πώς αντιδρά ο τροχός λείανσης στους κραδασμούς λόγω κατεργασίας. Αυτό επηρεάζει τους μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού

Η έννοια της μικροσκοπικής προσομοίωσης βασίζεται στη δοκιμή χάραξης μοναδικού κόκκου. Αυτά τα μοντέλα αναπτύχθηκαν το 2005 όπως τα μοντέλα FEA για την ανάλυση της θερμοκρασίας και των τάσεων κατά το σχηματισμό του αποβλίττου [1] και αποτελούνται από ένα σύστημα που περιλαμβάνει τον κάθε κόκκο ξεχωριστά και το τεμάχιο. Ένα τέτοιο μοντέλο απεικονίζεται στο σχήμα 2.10. Με αυτήν την προσέγγιση είναι εφικτή η προσομοίωση της πραγματικής διαδικασίας, ενώ υπάρχουν ελάχιστες διαφορές με τα αποτελέσματα των πειραμάτων του 2002 και 2003 [15, 118]. Οι χαμηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με το μικρό πάχος αποβλίττου οδηγούν στον κακό σχηματισμό αποβλίττου και στην αύξηση του λόγου της μικροχάραξης, ενώ υψηλές ταχύτητες κοπής και μεγάλα πάχη οδηγούν σε έναν αυξημένο λόγο μικροκοπής.

Οι φθορές στα άκρα του τροχού και η κυματοειδής μορφή, συχνά οφείλονται στην ανισότροπη συμπεριφορά του υλικού και στις υπερβολικές αξονικές πιέσεις. Έτσι, η ύπαρξη τροχών λείανσης με τη δυνατότητα να λειτουργούν με ασφάλεια σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες είναι απαραίτητη. Η βοήθεια για την ανάπτυξη νέων εργαλείων με επικάλυψη για καλύτερη απόδοση όσον αφορά την κατανομή της θερμοκρασίας, παρέχεται από τη μοντελοποίηση με FEA το 2001[35]. Οι έρευνες έδειξαν πως ο καλύτερος τρόπος για την ελαχιστοποίηση της θερμοκρασίας σε ένα εργαλείο με επικάλυψη, δηλαδή τη δυνατότητα να διατηρεί το διαμάντι, είναι να χρησιμοποιηθεί ένα κράμα με υψηλή θερμική αγωγιμότητα για το εργαλείο και να τοποθετηθούν πάνω σε αυτό εναλλάκτες θερμότητας.

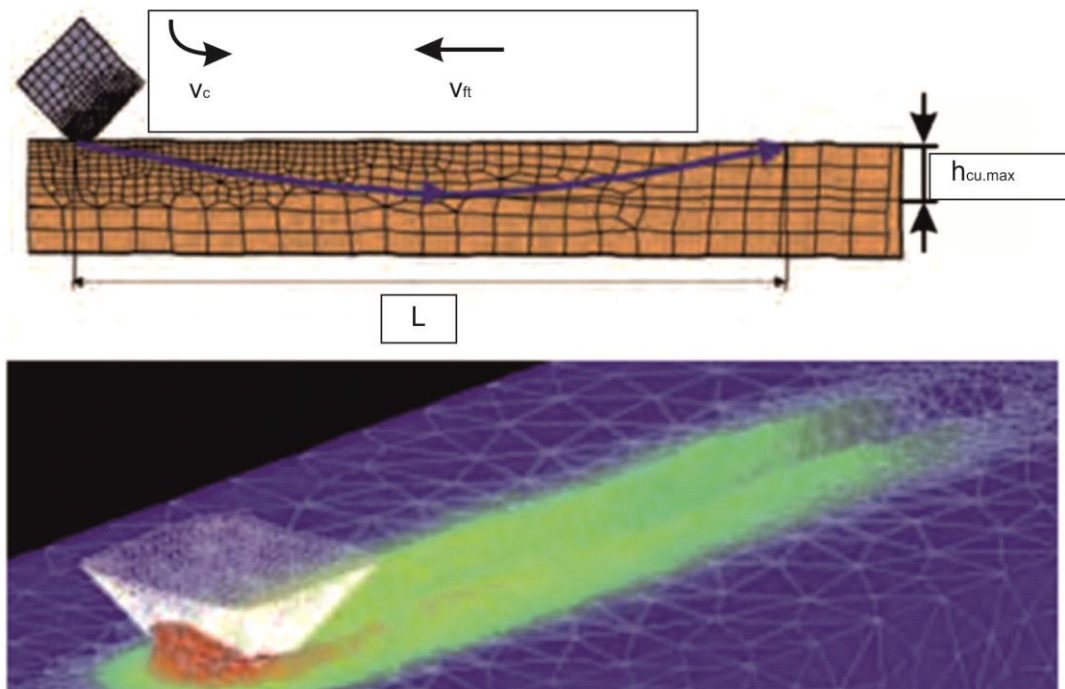


Σχήμα 2.9: Παράδειγμα Πεπερασμένων στοιχείων FEA για μακροσκοπικής προσομοίωση λείανσης κατά Warnecke [249]

Η ανάγκη για τη δημιουργία του τεμαχίου του μοντέλου και του καθορισμού των σχετικών ορίων με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, καθιστά την προσομοίωση με FEA αρκετά χρονοβόρα. Επιπλέον, τα πειράματα για τον προσδιορισμό των μεταβλητών εισόδου της προσομοίωσης έπρεπε να πραγματοποιούνται για κάθε μία προσομοίωση ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν αυτόνομα εργαλεία που βασίζονται στο λογισμικό, τα οποία δημιουργούν αυτόματα μια πλήρη προσομοίωση χωρίς να είναι απαραίτητη καμία επιπλέον γνώση για τη μοντελοποίηση με FEA.

Για να χρησιμοποιηθεί το παραπάνω εργαλείο, απαραίτητες είναι οι τιμές για το K_w καθώς και για τις επαπτομενικές δυνάμεις F_t . Για να επιτευχθεί μια οικονομική μοντελοποίηση, είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός εμπειρικού μοντέλου με έναν καθορισμένο αριθμό πειραμάτων για το στατιστικό σχεδιασμό τους, το οποίο θα περιγράφει το πώς συσχετίζονται οι μετρούμενες παράμετροι με αυτές της εισόδου ποσοτικά (2001) [116]. Ο αριθμός των πειραμάτων εξαρτάται από τον αριθμό των

αναγκαίων παραμέτρων της διαδικασίας. Με βάση αναλύσεις στη στατιστική παλινδρόμηση, τα πειράματα παρέχουν διάφορα δεδομένα. Έτσι, υπολογίζονται και ολοκληρώνονται οι λειτουργικές συσχετίσεις μεταξύ της κατανομής της θερμότητας και των δυνάμεων λείανσης όπως προκύπτει από τους Weinert, Schulte και Kresing το 2004 [254].



Σχήμα 2.10: Παράδειγμα Πεπερασμένων στοιχείων FEA για μικροσκοπικής προσομοίωση λείανσης κατά Klocke (2003) [118]

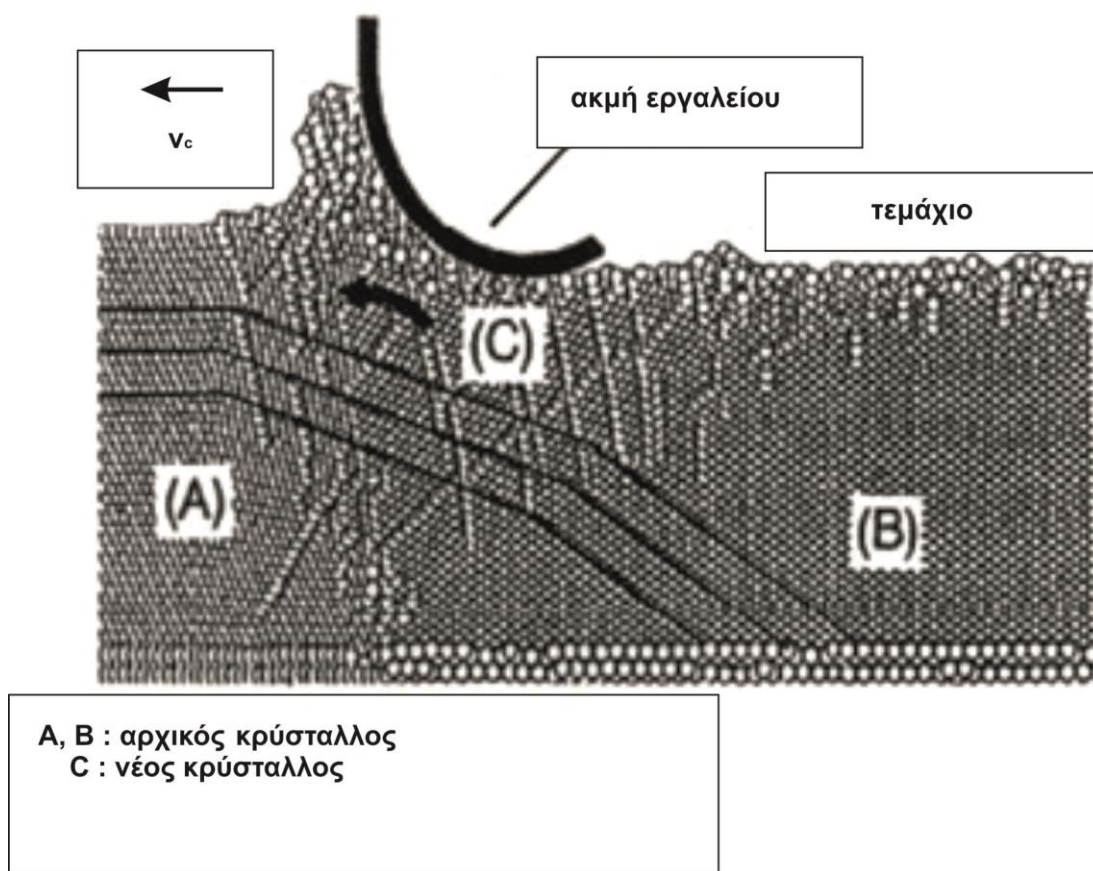
2.6.4. Προσομοίωση μοριακής δυναμικής

Για τη βαθύτερη κατανόηση της μικροσκοπικής συμπεριφοράς και δομής του υλικού, χρησιμοποιείται η προσομοίωση Μοριακής Δυναμικής (MD). Η συγκεκριμένη προσομοίωση βρίσκει εφαρμογή στη μελέτη των διάφορων ιδιοτήτων των υλικών και των φαινομένων για αέρια, υγρά και στερεά (1991, 1995 και 1989) [90, 188, 260].

Η πιο λεπτομερής αναπαράσταση του υλικού στο MD που συμπεριλαμβάνει τη μικροδομή, τον προσανατολισμό του πλέγματος, τα χημικά στοιχεία και τις αλληλεπιδράσεις των ατόμων, επιτρέπει την καλύτερη γνώση για το τι συμβαίνει κατά τη λείανση καθώς και την περιγραφή πολυκρυστάλλων και μη λείων επιφανειών [41, 192, 214, 260], όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11 (1989, 1994 και 1996). Όσον αφορά την ανάλυση των ατόμων, γίνεται εφικτή η λεπτομερής περιγραφή της θερμικής κατάστασης του υλικού και η διερεύνηση της δυναμικής επαφής του τεμαχίου με τους λειαντικούς κόκκους.

Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση είναι απαραίτητη για τη σωστή αναπαράσταση της ειδικής ανισότροπης μικροδομής (από το 1991 ως το 1998, το 2000 και το 2004) [7, 9, 94, 189, 190, 192, 126, 127, 29, 193] και στην περίπτωση όπου το πλάτος είναι μικρό, αν και υπάρχει σωστή δομή, περισσότερο θεωρείται ορθογωνική κοπή παρά λείανση. Αντίθετα, στη μοντελοποίηση σε δύο διαστάσεις το 1991, το 1992 και το 1994, παρατηρούνται πιο απότομες αντιδράσεις και μεγαλύτερες παραμορφώσεις [7, 9, 189]. Με την ανάλυση της προσομοίωσης της διαδικασίας το 1996 και το 2004 υπολογίζονται οι δυνάμεις τριβής, η θερμοκρασία και η κατανομή των τάσεων καθώς και

η ροή ενέργειας που προκύπτει [192, 193].



Σχήμα 2.11: Προσανατολισμός κρυσταλλικής δομής σε 2D προσομοίωση μοριακής δυναμικής MD

Η συγκεκριμένη μέθοδος προσομοίωσης, εκτός από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων, καθορίζει τις κρυσταλλικές δομές που προκύπτουν, την αντοχή του υλικού και την ενέργεια παραμόρφωσης. Η γεωμετρία των λειαντικών κόκκων συχνά απλοποιείται σε πυραμίδα ή μορφή κελύφους με δύσκαμπτα άτομα και με αιχμηρές ή στρογγυλεμένες ακμές. Η παραπάνω προσομοίωση ωστόσο είναι ανεπαρκής όσον αφορά την έκταση του μοντέλου, την αναπαράσταση των πραγματικών παραμέτρων της κατεργασίας και το χρόνο. Η προσομοίωση συχνά περιοριζόταν στις αρχικές καταστάσεις μελετώντας μόνο λίγα νανόμετρα (10^{-6} m) κατεργασμένης επιφάνειας, καθώς και λίγα picoseconds (10^{-12} s) του χρόνου διαδικασίας (συνήθως τιμές μικρότερες από 15 nm και 20 psec αντίστοιχα). Στη μέθοδο MD, η δυνατότητα μεταβολής του βάθους κοπής εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του μοντέλου και όχι από την ταχύτητα, και περιορίζεται συνήθως σε λίγα νανόμετρα. Ο Shimizu το 2003 [215] εξέτασε τη μεταβολή της ταχύτητας της κατεργασίας σε εύρος τιμών από 50 m/s ως 3000 m/s, με σκοπό τη διερεύνηση των φυσικών ορίων. Οι πιο συνηθισμένες ταχύτητες του τροχού λείανσης είναι 5 m/s ως 80 m/s [7, 154, 190, 192] και για λείανση υψηλής ταχύτητας ως 250 m/s [7, 29, 189, 193, 194]. Περαιτέρω εργασίες το 1991, το 1995, το 1996 και το 2004 εστίασαν στις δυνατότητες και την ανάλυση δεδομένων στη μέθοδο MD [7, 190, 191, 193].

Η εξονυχιστική ανάλυση του σχηματισμού του αποβλίπτου, της ελαστικότητας και της πλαστικότητας του κατεργαζόμενου τεμαχίου, καθώς και των ποσοτήτων της διαδικασίας MD, αποκάλυψε πως η ταχύτητα κατεργασίας έχει άμεση επίδραση στη

μικροσκοπική διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, σημαντικές αλλαγές στην τιμή της ταχύτητας κατεργασίας οδηγούν σε αξιοσημείωτες αλλαγές στο σχήμα του αποβλήτου και του μηχανισμού σχηματισμού του.

Μέχρι σήμερα, ο αριθμός προσομοιώσεων στη λείανση με τη μέθοδο MD είναι περιορισμένος και οι περισσότερες μοντελοποιήσεις ουσιαστικά αφορούν τη μικροκοπή. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε δυσκολίες στην ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων σε μικροτοπογραφία, καθώς και της τεράστιας απαιτούμενης ισχύος CPU ακόμα και για πολύ μικρά σε απόλυτο μέγεθος τρισδιάστατα μοντέλα. Μέχρι το 1998, το μέγεθος των μεγαλύτερων μοντέλων MD αυξήθηκε στα 100 εκατομύρια άτομα [87, 239], το οποίο αντιστοιχεί σε έναν ισόπλευρο κύβο δομής fcc με μήκος πλευράς περίπου 100 nm.

Για να γίνει χρήση του μοντέλου MD, είναι αναγκαίο να συμπεριληφθούν όλες οι σχετικές κατευθύνσεις προκειμένου να επιτρέπεται η αποθήκευση ελαστικής ενέργειας και να αποφευχθεί ενισχυμένη πλαστική παραμόρφωση. Μία εναλλακτική προσέγγιση σε ένα μεγάλο μοντέλο MD στο οποίο μόνο η περιφέρεια θα αποθηκεύει ελαστική ενέργεια, είναι ο συνδυασμός της ασυνεχούς περιγραφής των ατόμων MD με μία ελαστική μέθοδο συνεχούς μέσου, όπως FEM στα έτη 1990 και 1998 [124, 149, 177]. Ο πυρήνας των ατόμων σε αυτήν τη συνδυασμένη μέθοδο καλύπτει την πλαστική παραμόρφωση, ενώ η γύρω περιοχή αποθηκεύει μόνο την ελαστική παραμόρφωση που περισσεύει. Η κύρια δυσκολία σε ένα τέτοιο υβριδικό μοντέλο είναι η περιγραφή των κατάλληλων ιδιοτήτων διεπαφής.

2.6.5. Δυνατότητες και Περιορισμοί των διαφόρων μοντέλων λείανσης

Οι βασικές θεμελιώδεις αναλυτικές προσεγγίσεις (FA) παρέχουν έναν καλό τρόπο για την απεικόνιση των ιδεών για τις κατεργασίες λείανσης. Ωστόσο, τα υπάρχοντα μοντέλα περιορίζονται από διάφορες παραμέτρους. Η ποιότητα ενός βασικού αναλυτικού μοντέλου εξαρτάται από την ακρίβεια των παραμέτρων εισόδου που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά. Έτσι, για παράδειγμα η μέτρηση της θερμοκρασίας της διαδικασίας και των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας περιορίζεται από τις τεχνικές μετρήσεις και τα σφάλματα.

Σκοπός της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) είναι η φυσική προσομοίωση της συνολικής διαδικασίας. Ωστόσο, χρειάζεται αρκετή προσπάθεια για τους υπολογισμούς λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας. Οι αναγκαίες δοκιμές υλικών και τα πειράματα λείανσης περιορίζονται από τις τρέχουσες τεχνικές μετρήσεων καθώς οι δοκιμές υλικών σήμερα δεν επιτρέπουν τη χρήση των νόμων για όλες τις παραμέτρους και ιδίως για τον προσδιορισμό των καμπύλων ροής για υψηλές ταχύτητες κατεργασίας. Ακόμα, για την επαλήθευση των τοπογραφιών επιφανείας που έχουν προσομοιωθεί καθώς και για την επαλήθευση των ιδιοτήτων κάτω από την επιφάνεια, είναι αναγκαία η διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων.

Αντίστοιχα, στόχος της μοντελοποίησης Μοριακής Δυναμικής (MD) είναι η λεπτομερής περιγραφή της μικροδομής του υλικού σχετικά με τη δυναμική και τις αλληλεπιδράσεις των ατόμων. Με τη χρήση της μεθόδου MD επιτυγχάνεται μια τρισδιάστατη προσομοίωση της δυναμικής και των τοπικών αλληλεπιδράσεων ενός ή λίγων κόκκων. Όμως, λόγω της πολύ λεπτομερούς τρισδιάστατης μοντελοποίησης της δομής του υλικού με τις κρυσταλλικές του ιδιότητες και του χρονοβόρου προσδιορισμού των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ατόμων, απαιτείται τεράστια ισχύς CPU. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι πως όλες οι πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων και των μορίων πρέπει να περιγράφονται από κάποια κατάλληλη συνάρτηση και από τις επιμέρους παραμέτρους του υλικού. Ωστόσο, αυτά είναι γνωστά μόνο για τα καθαρά υλικά.

Τα βασικά μοντέλα ανάλυσης παλινδρόμησης (RA) έχουν την ικανότητα να περιγράφουν επαρκώς την κατάσταση και των συνθηκών λείανσης λόγω της χαμηλής απαιτούμενης υπολογιστικής δύναμης. Ο αριθμός των πειραμάτων καθορίζει την ποιότητα της προσομοίωσης. Η χρήση του μοντέλου που αναπτύχθηκε για διαφορετικές εφαρμογές, συνήθως καταλήγει σε αρκετά κακή ποιότητα. Παρόλα αυτά, οι πρώτες προσπάθειες για να διερευνηθεί το πεδίο εφαρμογής ήταν ενθαρρυντικές. Όμως, σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου είναι οι εκτενείς υπολογισμοί του συντελεστή και η δυσκολία στη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στον παρακάτω πίνακα 2.2 γίνεται σαφές πως τόσο η προσπάθεια, όσο και η δυσκολία για να ξεκινήσει η μοντελοποίηση είναι μικρή για τα εμπειρικά μοντέλα σε σύγκριση με τις άλλες προσεγγίσεις όπως FEM, RB και MD, όπου είναι απαραίτητη η βαθύτερη κατανόηση της διαδικασίας και του μοντέλου και η γνώση στον προγραμματισμό. Εκτός των άλλων, η ανάγκη για CPU στην προσομοίωση με ευρετικά και εμπειρικά μοντέλα είναι χαμηλή, ενώ αντίθετα για τις μεθόδους FEM και της μεθόδου Μοριακής Δυναμικής MD, οι υπολογισμοί μπορεί να διαρκούν ώρες ή ακόμα και ημέρες.

	προσπάθεια εκκίνησης της μοντελοποίησης	απαιτούμενη CPU για μοντελοποίηση	απαιτήσεις για μοντελοποίηση π.χ γνώση	διατήρηση και περαιτέρω ανάπτυξη
ANN	-----	↓	↓	↓
Regression	-----	↓	↓	↓
RB	↑	↓	↑	↑
FA	↑	↓	↑	↑
Kinematic	↓	↑	↑	-----
FEM	↑	↑	↑	-----
MD	↑	↑	↑	↓

High	↑	Medium	-----	Low	↓
------	---	--------	-------	-----	---

Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις προσομοίωσης λείανσης

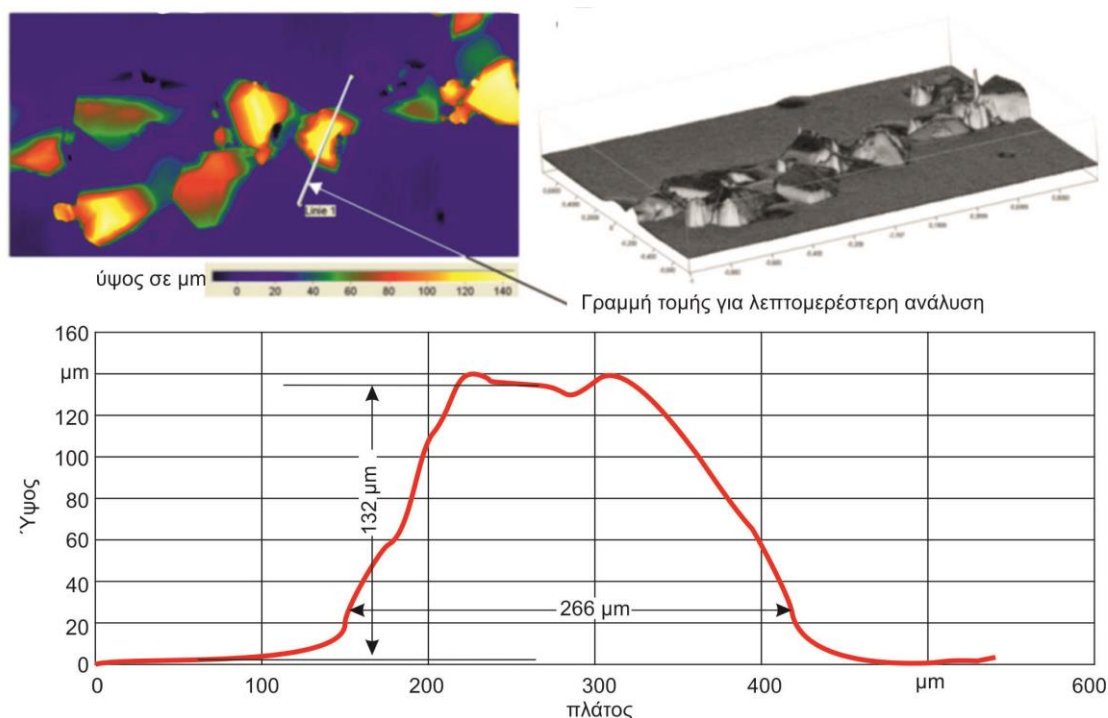
Η εξάρτηση από την ποιότητα των πειραμάτων και των δοκιμών των υλικών αποτελεί μειονέκτημα για όλα τα μοντέλα. Αφού οι φυσικοί νόμοι προσεγγίζονται επαρκώς στις μεθόδους FEM και MD, ο αριθμός των δεδομένων για την επαλήθευση είναι αρκετά μικρός σε αντίθεση με το μεγάλο αριθμό πειραμάτων που απαιτείται στη μοντελοποίηση με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ANN και στην ανάλυση παλινδρόμησης. Επιπλέον, τα κινηματικά μοντέλα παρέχουν τη μέγιστη ευελιξία για διαφορετικές κατεργασίες λείανσης ή εργαλεία λείανσης. Η δυνατότητα λεπτομερούς περιγραφής φανερώνει πως τα κινηματικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στην έρευνα, όσο και στη βιομηχανία.

2.7. Τελευταίες εξελίξεις της έρευνας πάνω στη λείανση

Οι σύγχρονοι ερευνητές συνεχίζουν μέχρι σήμερα να ασχολούνται με το αντικείμενο της λείανσης με την ίδια συχνότητα και ενδιαφέρον και επικεντρώνονται την τελευταία διετία περισσότερο στην προσομοιωτική ανάλυση της λείανσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Δεδομένου ότι οι υπολογιστικές δυνάμεις έχουν εξελιχθεί τεχνολογικά, η 3D προσομοίωση είναι πλέον εφικτή με μεγαλύτερη ακρίβεια και σε λιγότερο χρόνο.

Ο Aurich το 2012 [J.C. Aurich, B. Kirsch, Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5 (2012) 164–174] χρησιμοποιώντας λεπτομερή μοντελοποίηση της τοπογραφίας λειαντικού τροχού σε ορθή γωνία, ανέπτυξε πρωτότυπη κινηματική προσομοίωση της διαδικασίας λείανσης (KSIM), η οποία είναι σε θέση να υπολογίσει και να αξιολογεί τις παραμέτρους αποβλήτου του κάθε κόκκου που συμμετέχουν στη διαδικασία αφαίρεσης υλικού, σχήμα 2.12.



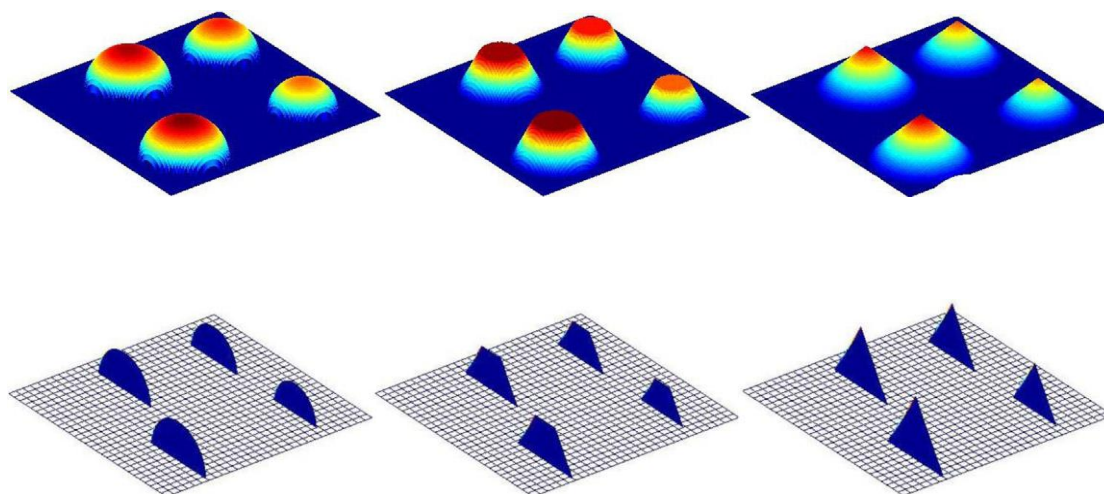
Σχήμα 2.12 Προσδιορισμός φθοράς κόκκων κατά την λείανση κατά Aurich [...]

Αυτό παρέχει την ευκαιρία να ερευνηθεί η διαδικασία λείανσης σε επίπεδο λεπτομέρειας που είναι αδύνατο να επιτευχθεί με πειράματα. Στην δημοσίευσή του συμπεριέλαβε τις ερευνητικές δραστηριότητες που περιλαμβάνουν την KSIM και διεξάγονται τα τελευταία 12 χρόνια παρουσιάζοντας νέες ιδέες στη διαδικασία μοντελοποίησης και την εξέταση των αλληλεπιδράσεων των διεργασιών-μηχανής, χρησιμοποιώντας αυτό το εργαλείο προσομοίωσης.

Την ίδια χρονιά άλλη μία ομάδα ερευνητών αποτελούμενη από τους D. Anderson, A. Warkentin, R. Bauer ασχολήθηκε με την γεωμετρία του κόκκου λείανσης [D. Anderson, A. Warkentin, R. Bauer, Comparison of spherical and truncated cone geometries for single abrasive-grain cutting, Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 1946–1953]. Χρησιμοποίησαν 2 διαφορετικές γεωμετρίες για τους κόκκους του τροχού και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κανονική και εφαπτομενική δύναμη ανά μονάδα πλάτους ήταν παρόμοια και στα δύο εργαλεία μέχρι ένα βάθος κοπής περίπου 3 μm . Η βελτιωμένη γεωμετρία κοπής του κόκκου με σχήμα κόλουρου κώνου οδήγησε σε μείωση της δύναμης κοπής και αύξηση της εφαπτομενικής δύναμης ανά μονάδα πλάτους σε σχέση με το εργαλείο σφαιρικής γεωμετρίας. Η αποτελεσματικότητα της κοπής επιβεβαιώθηκε με σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα. Το μοντέλο έδειξε ότι οι τάσεις εντοπίζονται γύρω από τη περιφέρεια του αποβλήτου που σχηματίζεται από τον κόκκο με σχήμα κόλουρου κώνου αντί να διανέμονται κάτω από τον

κόκκο με το σφαιρικό σχήμα. Ανάλυση της ενέργειας από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων έδειξε ότι στο σφαιρικό εργαλείο παράγονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας τριβής που οφείλονται στην κακή γεωμετρία κοπής, ενώ στο εργαλείο του κόλπου παράγονται μικρές ποσότητες ενέργεια τριβής εξαιτίας της βελτιωμένης γεωμετρίας κοπής. Ενδεχομένως η κοπή στην πραγματικότητα να γίνεται απο συνδυασμό των δύο γεωμετριών εργαλείου που μελετήθηκαν.

Το 2013 οι Liu Y. κ.α. [Y. Liu, A. Warkentin, R. Bauer, Y. Gong, "Investigation of different grain shapes and dressing to predict surface roughness in grinding using kinematic simulations, *Precision Engineering* 37 (2013) 758– 764] δημοσίευσαν την ερευνά τους σχετικά με την ποιότητα επιφάνειας που δημιουργείται ανάλογα με την γεωμετρία των κόκκων που χρησιμοποιούνται, σχήμα 2.13. Στην εργασία τους παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη υπολογιστική μελέτη κινηματικής προσομοίωσης για την πρόβλεψη της τραχύτητας της επιφάνειας τεμαχίου κατά την λείανση χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σχήματα λειαντικών κόκκων (σφαίρα, κόλπου κώνου και κώνου) και ένα μοντέλο λείανσης με αδαμάντινους κόκκους που έχει τόσο όλκιμα όσο και ψαθυρά συστατικά. Απέδειξαν λοιπόν στην εργασία τους ότι, εφαρμόζοντας τόσο την όλκιμη κοπή όσο και την ψαθυρή θραύση εξαρτημάτων το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με όλκιμη κοπή μόνο, ανεξάρτητα από το σχήμα λειαντικών κόκκων που θα χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, το υποτιθέμενο σχήμα του αποξεστικού κόκκου στο τροχό δεν φαίνεται να επηρεάζει την προκύπτουσα προβλεπόμενη επιφάνεια τεμαχίου, αλλά περισσότερο φαίνεται να είναι οι παράμετροι λείανσης (γεωμετρία διαμαντιού, βάθος κοπής και αναλογία επικάλυψης) που επηρεάζουν κυρίως την επιφάνεια του τεμαχίου. Η προσομοίωση επιβεβαιώθηκε πειραματικά για διαφορετικές ταχύτητες τεμαχίου, βάθη κοπής, και αναλογίες επικάλυψης με μέσες διαφορές μεταξύ περίπου 7-11%. Αποδείχθηκε επίσης ότι η κινηματική ταχύτητα προσομοίωσης μπορεί να αυξηθεί κατά ένα συντελεστή 9 (χωρίς απώλεια της ακρίβειας στην προβλεπόμενη επιφανειακή τραχύτητα).



Σχήμα 2.13: 3D ακμές κόκκων και 2D κοπτικές ακμές σύμφωνα με Y. Liu το 2013 [...]

Την ίδια χρονιά οι A.M. Tahvilian κ.α. [M. Tahvilian, H. Champlaud, Z. Liu, B. Hazel, *Study of workpiece temperature distribution in the contact zone during robotic grinding process using finite element analysis, Procedia CIRP* 12 (2013) 205– 210] σε μελέτη πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσαν θερμική συμπεριφορά της λείανσης. Χρησιμοποίησαν μια εξίσωση εισόδου θερμότητας βασισμένη σε δυναμικές λειτουργίες κυρίως με βάση το πάχος αποβλήτου και τις διαδοχικές κρούσεις. Βρήκαν ότι ο λόγος ενέργειας διαχωρισμού σε ευέλικτες περιπτώσεις λείανσης είναι μικρότερος από ότι σε ισοδύναμη συμβατική λείανση.

Θερμική συμπεριφορά μελέτησαν παράλληλα και οι Wang και Djordjevic [Y. Wang, N. Djordjevic, *Thermal Stress FEM Analysis of Rock with Microwave Energy, International*

[Journal of Mineral Processing, in press 2014](#)] Συγκεκριμένα κάνανε μελέτη της θερμικής διαδικασίας θραύσης που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των θερμικών τάσεων και των ρωγμών που συμβαίνει όταν οι κόκκοι εκτίθενται με ενέργεια μικροκυμάτων χαμηλής συχνότητας. Χρησιμοποίησαν 2D μοντέλο κυκλικής πλάκας με υλικά 2 φάσεων για προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία και τον υπολογισμό της θερμικής καταπόνησης με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς θραύσης. Οι ρωγμές αρχικά εμφανίστηκαν, όχι γύρω από τα όρια των κόκκων μεταξύ των δύο υλικών, αλλά σε κάποια απόσταση εξ' αιτίας της τάσης της θερμικής διαστολής στο πλέγμα των υλικών. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι αν και το μέγεθος κόκκου είναι ένας από τους παράγοντες που προκαλούν ρωγμές κατά τη θέρμανση των κοκκωδών υλικών, δεν είναι ο μόνος λόγος. Το μέγεθος και οι θερμικές ιδιότητες του πλέγματος του υλικού μπορεί επίσης να επηρεάσει τα αποτελέσματα των θερμικών καταπονήσεων.

Το 2013 επίσης παρουσιάστηκε η διδακτορική διατριβή του Darafon [\[A. Darafon, Measuring and Modeling of Grinding Wheel Topography, PhD thesis, Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, April 2013\]](#) που είχε στόχο την ανάλυση ολόκληρης της επιφάνειας λειαντικού τροχού σε 3D, την ανάπτυξη μεθόδου μοντελοποίησης της επιφάνειας του τροχού σε 3D και προσομοίωση της αφαίρεσης υλικού κατά τη λείανση, προσδιορίζοντας το αναμενόμενο απόβλιπτο.

Τον τελευταίο χρόνο (2014) ο Siebrecht και οι συνεργάτες του [\[T. Siebrecht, S. Rausch, P. Kersting, D. Biermann, Grinding process simulation of free-formed WC-Co hard material coated surfaces on machining centers using poisson-disk sampled dixel representations, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7 \(2014\) 168–175\]](#) έφτιαξαν ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας λείανσης, το οποίο υπολογίζει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στους κόκκους λείανσης. Τους κόκκους τους μοντελοποίησαν χρησιμοποιώντας τεχνικές CSG και το τεμάχιο κοπής με dixel όρια. Το δυναμικό αυτό μοντέλο που παρουσίασαν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου για ποικίλες καταστάσεις και περιπτώσεις λείανσης.

3. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Η σημασία του φραιζαρίσματος είναι σπουδαία καθώς μεγάλος αριθμός σχημάτων παράγεται από το αρχικό τεμάχιο. Γίνεται κατεργασία επιπέδων, καμπύλων ή ανώμαλων επιφανειών οδηγώντας το τεμάχιο προς ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο που περιέχει έναν καθορισμένο αριθμό δοντιών κοπής. Ο επιθυμητός ρυθμός αφαίρεσης υλικού στην κατεργασία επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας το βάθος κοπής, την ταχύτητα περιστροφής και την πρόωση. Συχνό φαινόμενο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας είναι η αλλαγή ακμών του κοπτικού, η οποία γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα. Τα υλικά των ακμών των κοπτικών διαιρούνται σε πολλές κατηγορίες όπως οι ανθρακούχοι και κεκραμένοι χάλυβες, οι ταχυχάλυβες, τα κράματα κοβαλτίου, τα καρβίδια, τα κυβικά βοριονιτρίδια, το διαμάντι. Κάθε ακμή κοπτικού έχει ένα ειδικό χαρακτηριστικό όπως η διάμετρος και ο αριθμός των δοντιών το οποίο βοηθά το χειριστή να βελτιστοποιήσει τις συνθήκες. Ακόμα, αν η κατεργασία περιλαμβάνει τη δημιουργία ειδικών ακμών ή ειδικών χαρακτηριστικών επιφάνειας όπως για παράδειγμα ένα κοίλο τμήμα, τότε χρησιμοποιούνται οι ειδικές ακμές του κοπτικού. Η κατεργασία όμως γίνεται πιο περίπλοκη και χρονοβόρα αν το τεμάχιο έχει πολλά χαρακτηριστικά με διάφορα μεγέθη που απαιτούν διαφορετικούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού καθώς και συχνές αλλαγές στα μεγέθη των κοπτικών. Άμεση επίπτωση των παραπάνω είναι η κατακόρυφη αύξηση του κόστους ανά τεμάχιο.

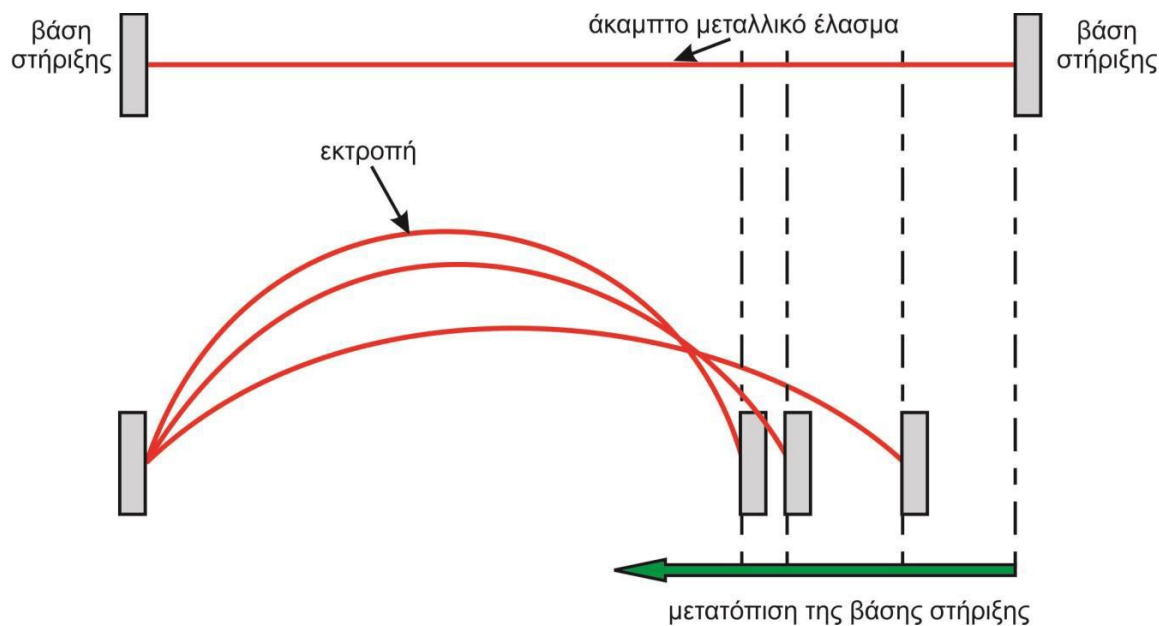
Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τη μείωση αυτού του χρόνου αναμονής κατά την κατεργασία. Μία από αυτές είναι η εφαρμογή ειδικών στηριγμάτων στο εργαλείο για ταχύτερη αλλαγή του κοπτικού, ενώ μια άλλη μέθοδος ενσωματώνει αυτοματοποιημένους μηχανισμούς αλλαγής κατά τη διαδικασία κοπής. Παρόλο που αυτές οι μέθοδοι είναι κοινώς αποδεκτές και εφαρμόζονται ευρέως, εξακολουθούν να υπάρχουν τρόποι βελτίωσής τους. Ένας από αυτούς είναι η δυνατότητα αλλαγής της ακτίνας κοπής από ένα εργαλείο χωρίς να είναι αναγκαία η μετακίνηση ολόκληρου του εργαλείου από το στήριγμα του.

Το 2003 αναπτύχθηκε μια ιδέα εναλλακτική για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αφαίρεσης υλικού. Ως αποτέλεσμα αυτής της έρευνας, σχεδιάστηκε και δημιουργήθηκε κοπτικό μεταβλητής ακτίνας, χρησιμοποιώντας δείγμα κοπτικού προφίλ με μεταβλητή εγκάρσια ακτίνα καμπυλότητας. Η κύρια ιδέα του σχηματισμού πολλαπλών ακτίνων βασίστηκε σε ευέλικτες μεταλλικές λωρίδες τοποθετημένες σε στηρίγματα με δυνατότητα αξονικής κίνησης. Η αρχή λειτουργίας του εργαλείου αυτού όπως και τα στάδια υλοποίησής του παρουσιάζονται παρακάτω.

3.1. Το καινοτόμο εργαλείο του Hierp

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Hierp κατασκευάστηκε το εργαλείο VRC (Variable Radii Cutter), ένα κοπτικό εργαλείο μεταβλητής ακτίνας κοπής. Επινοήθηκε, για την παροχή πολλαπλών ακτίνων κοπής συγκεντρωμένες σε ένα μόνο εργαλείο. Η έρευνα αυτή εστίασε στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά κατά το φραιζάρισμα με κυρτά εργαλεία μεταβλητής ακτίνας. Είναι προφανές πως η διαδικασία αλλαγής κοπτικού για τα διάφορα κυρτά κοπτικά προκαλεί διακοπή στην κατεργασία. Εξοικονόμηση τόσο χρημάτων όσο και χρόνου μπορεί να υπάρξει αν τμήματα της διαδικασίας αλλαγής του κοπτικού εξαλειφθούν ή ελαχιστοποιηθούν μέσω της χρήσης ενός κυρτού κοπτικού εργαλείου που θα έχει τη δυνατότητα να παρέχει πολλαπλά προφίλ. Για αυτόν ακριβώς το λόγο σχεδιάστηκε το VRC.

Η έννοια του σχηματισμού πολλαπλών ακτίνων κοπής βασίζεται σε μία εύκαμπτη μεταλλική λωρίδα η οποία έχει τοποθετηθεί σε ένα άκρο που κινείται αξονικά. Καθώς το ένα στήριγμα κινείται προς το μέρος του άλλου, η λωρίδα εκτρέπεται σχηματίζοντας μια καμπύλη διαφόρων διαστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



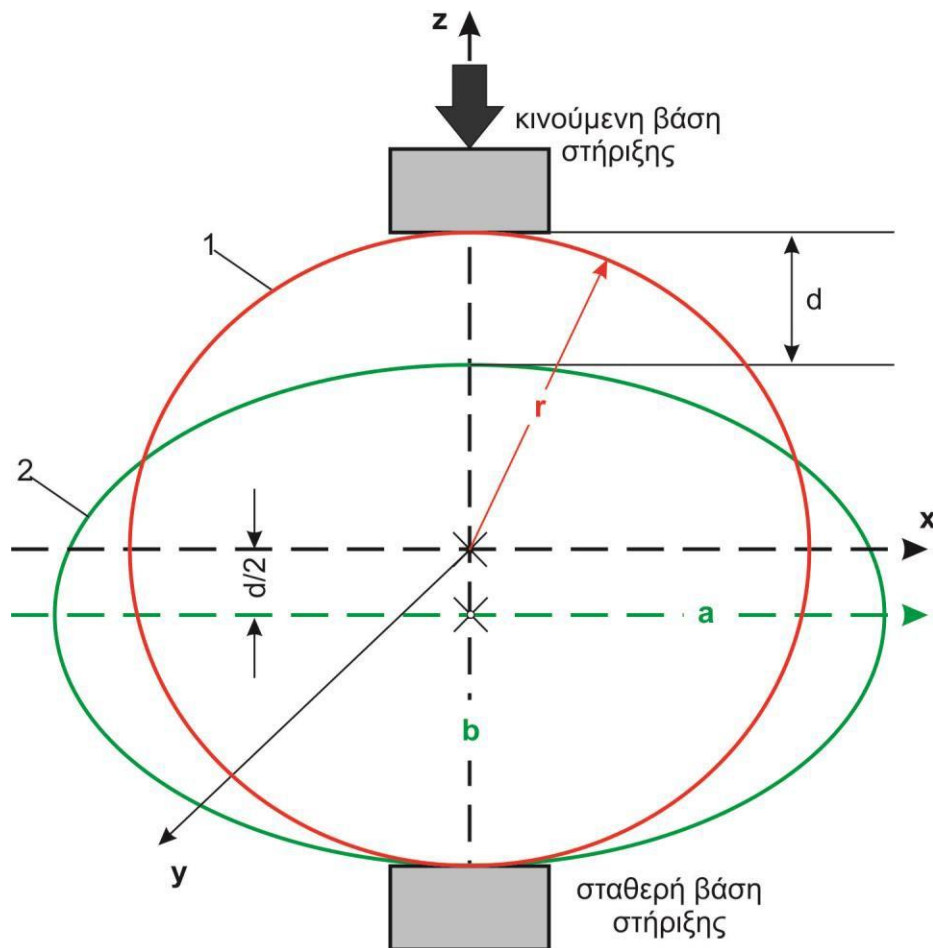
Σχήμα 3.1: Περιγραφή της μεταβολής της ακτίνας μεταλλικών ελασμάτων.

Ολόκληρη η μεταλλική λωρίδα και το σύστημα υποστήριξης περιστρέφεται γύρω από τον άξονα και το περιστρεφόμενο σύστημα σχηματίζει ένα κοπτικό εργαλείο. Για να παρέχεται επαρκής ρυθμός αφαίρεσης υλικού, πολλές μεταλλικές λωρίδες τοποθετήθηκαν στα ίδια περιστρεφόμενα στηρίγματα και επομένως το σύστημα είναι όμοιο με ένα κοπτικό εργαλείο πολλών δοντιών κοπής. Στο VRC χρησιμοποιήθηκαν οκτώ χαλύβδινες λεπίδες τοποθετημένες πάνω σε ένα ζεύγος περιστρεφόμενων δίσκων, οι οποίοι με τη σειρά τους είναι τοποθετημένοι σε ένα τηλεσκοπικό και με καμπύλωση σύστημα άξονα. Η μετατόπιση του ενός δίσκου προκαλεί αλλαγή στο σχήμα των χαλύβδινων λεπίδων. Εξαιτίας της καμπυλότητας προς τα έξω, το σχήμα που προκύπτει είναι όμοιο με αυτό ενός κυρτού κοπτικού. Ανάλογα με το μήκος των λεπίδων και της θέσης του κινητού δίσκου, δημιουργείται μεγάλο εύρος ακτίνων κοπής.

3.2. Μαθηματική μοντελοποίηση του κοπτικού με τις λεπίδες

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η κινητή διάταξη πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν οι λεπίδες και περιγράφεται ο τρόπος εκτροπής της λεπίδας καθώς η στήριξη στη πάνω πλευρά κινείται προς τα κάτω. Η μέγιστη θέση εκτροπής λαμβάνει χώρα, όταν εφαρμόζεται συμπίεση και επιτυγχάνεται ισορροπία στη λεπίδα.

Αν αρχική θέση είναι η “1” και η λεπίδα περιστρέφεται γύρω από τον κεντρικό άξονα, τότε σχηματίζει μια σφαίρα ακτίνας “r”. Κατά τη συμπίεση, η περιστρεφόμενη λεπίδα σχηματίζει μια στερεή έλλειψη από τους κύριους και δευτερεύοντες άξονες “a” και “b”. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, όταν η λεπίδα δεν παραμορφώνεται δημιουργείται μια σφαίρα ακτίνας “r” που προέρχεται από το κινούμενο σύστημα συντεταγμένων $(X, Y, Z)=(0, 0, 0)$. Όταν η λεπίδα συμπίεζεται από την κινούμενη στήριξη απόστασης “a” και ολόκληρο το σύστημα περιστρέφεται γύρω από τον κεντρικό άξονα, τότε σχηματίζεται μια στερεή ελλειπτική μορφή με κύριο άξονα τον “a” στην κατεύθυνση X και δευτερεύοντα άξονα τον “b” στην κατεύθυνση Z. Το κέντρο αυτής της έλλειψης μετατοπίζεται κατά το ήμισυ από εκείνο της πλήρους συμπίεσης.



Σχήμα 3.2: Τοποθέτηση λεπίδων

Η βασική εξίσωση για την περιγραφή μιας συμπιεσμένης λεπίδας με ένα σταθερό μήκος, η οποία συμπίεζεται σε μια στήριξη της είναι η ακόλουθη:

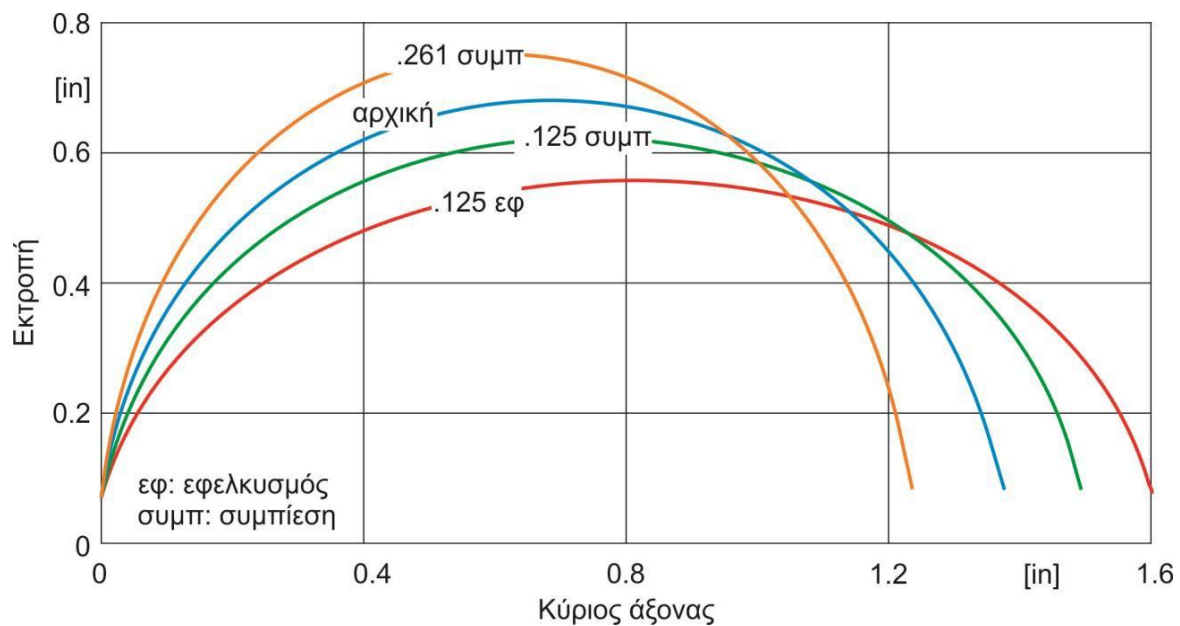
$$\frac{x^2}{\left(\frac{L}{\pi} + \frac{d}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{L}{\pi} + \frac{d}{2}\right)^2} + \frac{(z+d/2)^2}{\left(\frac{L}{\pi} - \frac{d}{2}\right)^2} = 1 \quad (3.1)$$

3.3. Η επίδραση της περιστροφής στο σύστημα των λεπίδων

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κάμψης της λεπίδας σε στατική κατάσταση (δηλαδή το σύστημα δεν περιστρέφεται), όπου διακρίνονται οι μέγιστες μεταβολές της εκτροπής καθώς η λεπίδα υποβάλλεται σε συμπίεση ή εφελκυσμό.

Στη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συναρμολογημένου κοπτικού, πρέπει να συμπεριληφθούν ενδεχόμενοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν καταστάσεις όπως αυτή του σχήματος. Τέτοιοι παράγοντες με σημαντική επίδραση είναι:

- η επίδραση της αντίστασης στη δύναμη κοπής.
- η περιστροφή του άξονα και της έδρας της συναρμογής
- η επίπτωση της φυγόκεντρου δύναμης σε κάθε περιοχή της λεπίδας.



Σχήμα 3.3: Στατικές συνθήκες της μετατόπισης των λεπίδων

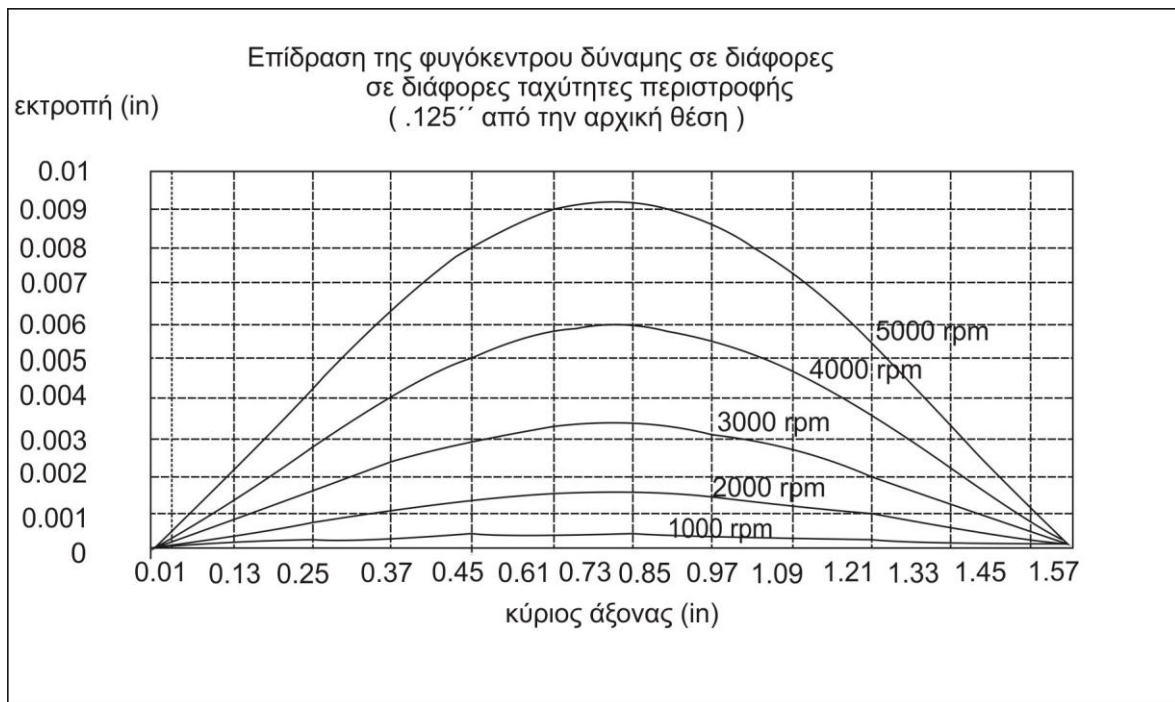
Η αντίσταση στη δύναμη κοπής εξαρτάται από το υλικό κοπής. Για να μην χρειαστεί να ληφθεί αυτός ο παράγοντας υπόψη κατά την μελέτη του εργαλείου, ο Hierpp χρησιμοποίησε μόνο ένα υλικό κοπής το Styrofoam το οποίο είναι ιδιαίτερα μαλακό και παρουσιάζει αμελητέα αντίσταση στην δύναμη κοπής.

Λόγω της χαμηλής παραγόμενης γωνιακής ταχύτητας, μόνο 1000 rpm έναντι 20.000 rpm που παράγουν οι τυπικές μηχανές βιομηχανιών, η επίδραση του στροβιλισμού θεωρήθηκε αμελητέα και αγνοήθηκε. Ο παράγοντας που απαιτήθηκε να μελετηθεί ήταν η επίδραση της φυγόκεντρου δύναμης κατά τη διαδικασία της περιστροφής, η οποία μπορεί να προβλεφθεί από γνωστές παραμέτρους όπως είναι η γεωμετρία, το υλικό, η περιστροφή κτλ.. Με την περιστροφή του άξονα υπάρχει η πιθανότητα η φυγόκεντρος δύναμη να εκτρέψει τη λεπίδα εκτός ορίων όπως παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2.3. Χωρίζοντας την περιστρεφόμενη λεπίδα σε στοιχειώδη, ίσα τμήματα κατά το μήκος της, παρατηρείται πως η δύναμη είναι συνάρτηση της απόστασης κάθε στοιχείου από το κέντρο της περιστροφής. Για κάθε τμήμα η φυγόκεντρος δύναμη δίνεται από τον τύπο:

$$\delta F = \delta m r \Omega^2 \quad (3.2)$$

όπου δF είναι η φυγόκεντρος δύναμη [pound], δm είναι η μάζα τμήματος [slug (=32.2pounds)], Ω είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα [rpm].

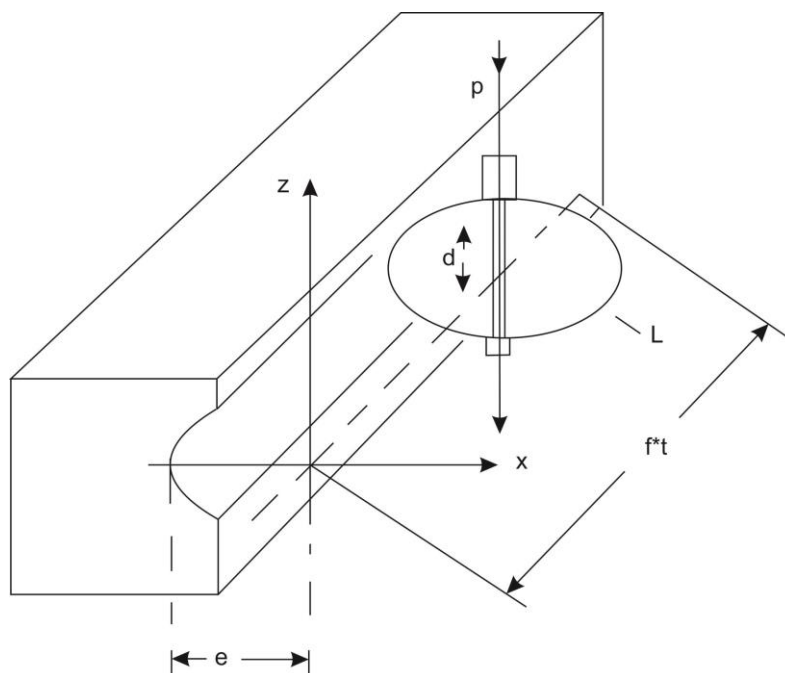
Έπειτα από τον προσδιορισμό των δυνάμεων, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των επιδράσεων τους στη συνολική παραμόρφωση, εφαρμόζοντας κάθε τιμή δύναμης και απόστασης, όπως ακριβώς στην περίπτωση απλής δοκού στήριξης υπό ένα φορτίο. Αθροίζοντας τις επιμέρους παραμορφώσεις που προκαλούνται από καθεμία φυγόκεντρη δύναμη, υπολογίζεται η συνολική παραμόρφωση που προκύπτει. Στο [Σχήμα 3.4](#) παρουσιάζεται η επίδραση της φυγόκεντρου δύναμης όπως υπολογίστηκε από τον Hierpp, για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.



Σχήμα 3.4: Επίδραση της φυγόκεντρου δύναμης για διάφορες ταχύτητες περιστροφής

Αποδείχτηκε πως οι εκτροπές είναι σημαντικότερες όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής και επειδή οι τυπικές μηχανολογικές κατεργασίες γίνονται σε αρκετά υψηλές ταχύτητες, ήταν αναγκαίο να ληφθούν υπόψη είτε σε χειροκίνητη είτε σε αυτόματη λειτουργία συμπίεσης.

Αν κατά την κοπή δεν υπάρχει μόνο συμπίεση αλλά και ενδεχόμενη μετακίνηση προς την κατεύθυνση των X , Y , Z αξόνων, τότε απαραίτητη να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς και αυτές οι συντεταγμένες. Έτσι, αν για παράδειγμα η συναρμογή με τις λεπίδες έχει να εκτελέσει ένα συγκεκριμένο βάθος κοπής e , μια πρόωση f και ένα πέρασμα μήκους p , η περιγραφή της μπορεί γίνει κατανοητή από το **Σχήμα 3.5**.



Σχήμα 3.5: Περιγραφή της κίνησης με συμπίεση και ταυτόχρονη μετακίνηση

Το βάθος κοπής e είναι στην κατεύθυνση X όπου η συναρμογή θα πρέπει να μετακινηθεί για να κοπεί η απόσταση d από την επιφάνεια κοπής. Η πρόωση f είναι παράλληλη με την επιφάνεια κοπής. Το μήκος κοπής επομένως υπολογίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται επί την πρόωση. Το πέρασμα p είναι η απόσταση η οποία πρέπει να διανύσει το κοπτικό προς τα πάνω ή προς τα κάτω κατά την κατεργασία στον άξονα Z .

Οπότε η σχέση (3.1) για την περιγραφή της συμπίεσης, μετατρέπεται ως εξής:

$$\frac{(x - e)^2}{\left(\frac{L}{\pi} + \frac{d}{2}\right)^2} + \frac{(y - ft)^2}{\left(\frac{L}{\pi} + \frac{d}{2}\right)^2} + \frac{(z + d/2 - p)^2}{\left(\frac{L}{\pi} - \frac{d}{2}\right)^2} = 1 \quad (3.3)$$

3.4. Σχεδιασμός και ανάπτυξη του VRC

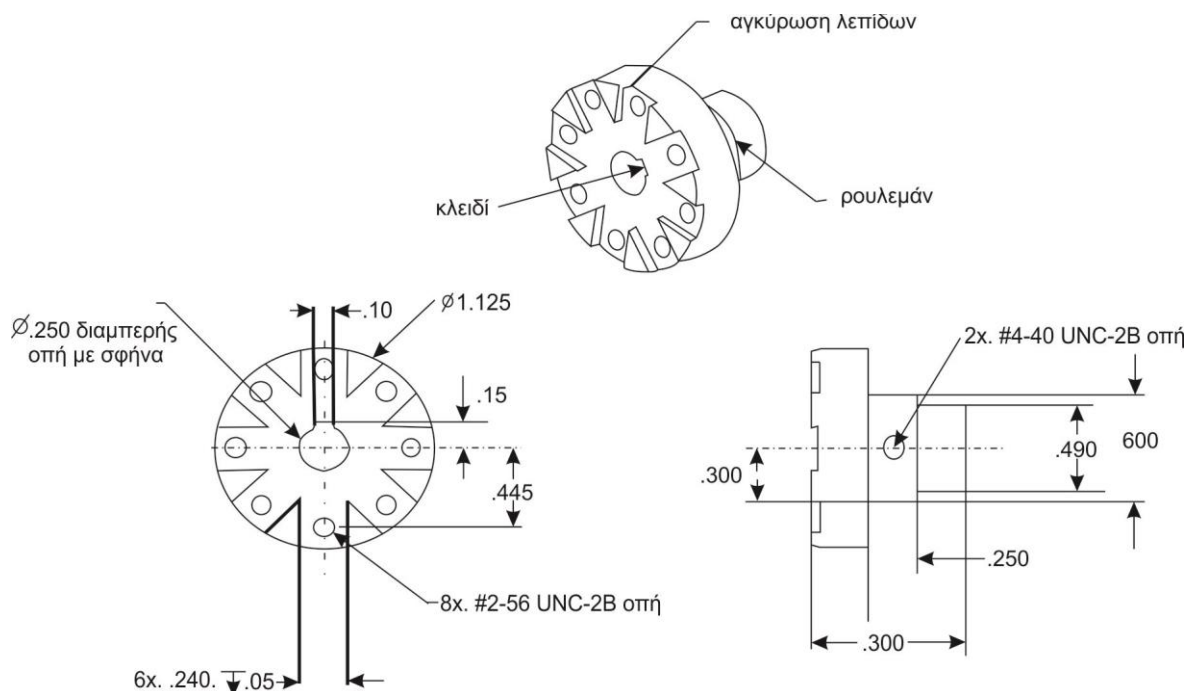
Όπως όλα τα κοπτικά, έτσι και το VRC περιέχει παραμέτρους που περιγράφουν τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα η διάμετρος και ο αριθμός των δοντιών κοπής. Η μόνη διαφορά του VRC με τα τυπικά κοπτικά είναι πως αντί για καθορισμένη ακτίνα παρέχεται ένα εύρος ακτίνων κοπής λόγω της μεταβλητής του ακτίνας. Γι' αυτό ο άξονας σχεδιάστηκε να περιλαμβάνει τηλεσκοπικό χαρακτηριστικό για να αντισταθμίσει την συμπίεση των λεπίδων όταν η επιθυμητή ακτίνα κοπής αλλάζει.

Το VRC σχεδιάστηκε για κοπή είτε με χειροκίνητο τρόπο είτε για να ενσωματώνεται με αυτοματοποιημένες συσκευές, ώστε να ρυθμίζεται αυτόματα το μήκος του άξονα για το σχηματισμό πολλαπλών ακτίνων κοπής. Σε αυτή τη ρυθμιζόμενη συναρμογή λεπίδων, υπάρχουν οκτώ πρότυπες, χαλύβδινες ταινίες 2.5"x0.225"x0,05"(μήκος x πλάτος x πάχος) που συμπιέζονται, τοποθετημένες ανά 45° μοίρες κατά την ακτινική διεύθυνση. Εφόσον η διαμόρφωση στερέωσης των λεπίδων, είναι ισορροπημένη, ο αριθμός των λεπίδων δύναται να μεταβληθεί. Για παράδειγμα, το VRC μπορεί να εξοπλιστεί με ένα ελάχιστο των 2 σκληρυμένων λεπίδων χάλυβα. Ο μέγιστος αριθμός των λεπίδων που μπορεί να τοποθετηθεί στους δίσκους είναι οκτώ. Μια οπή διαμέτρου 0.09 ιντσών υπάρχει σε κάθε άκρο της λεπίδας για τοποθέτηση στο δίσκο ατράκτου. Κατόπιν κατάλληλου ελέγχου της ταχύτητας, οι λεπίδες κρίθηκαν κατάλληλες για την κοπή αφρού, κεριού και μαλακού ξύλου.

Κατασκευασμένος από μηχανουργικό χάλυβα, ο δίσκος τοποθέτησης λεπίδων είναι διαμέτρου 1 ίντσας και σχεδιάστηκε για να παρέχει "αγκύρωση" στις λεπίδες κοπής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 36. Μια οπή σπειρώματος, # 2-56 UNC-2B, βρίσκεται στη μέση της καθεμιάς από τις 8 υποδοχές στο δίσκο οι οποίες έχουν την ίδια διάσταση πλάτους 0,25" όπως και οι λεπίδες, και είναι σε εσοχή σε βάθος 0,06" επιτρέποντας στις λεπίδες να εδράζονται κάτω από την επιφάνεια του δίσκου. Οι εσοχές εμποδίζουν κάθε λεπίδα από αντιδραστική συστροφή που έχει αναπτυχθεί από τη δύναμη κοπής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής. Μια 0,25" διαμπερής οπή με σφήνα, βρίσκεται στο κέντρο του δίσκου. Ο δίσκος μπορεί να ολισθαίνει πάνω στο συγκρότημα του άξονα, και δύο βίδες ρύθμισης χρησιμοποιούνται για να τον εμποδίζει να κινείται στην αξονική διεύθυνση. Η πλήμνη του δίσκου περιέχει επίσης μια περιοχή η οποία επιτρέπει στο δίσκο να εδράζεται στο έδρανο στήριξης όταν χρησιμοποιείται με την επιλογή αυτοματισμού.

Οι δίσκοι τοποθετούνται σε μια χαλύβδινη συναρμογή, η οποία έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει την περιστροφική δύναμη κοπής, καθώς και να διαμορφώνει το μήκος συμπίεσης. Το ανώτερο τμήμα του άξονα, διαμέτρου 0.375" περιέχει μια εσοχή διαμέτρου 0.25" και μήκους 0.75", η οποία επιτρέπει στο χαμηλότερο άξονα να εισέρχεται. Το κλειδί που χρησιμοποιείται για την περιστροφή και τη συμπίεση ενσωματωμένο μέσα στην εσοχή, εμποδίζει και τη σχετική κίνηση μεταξύ των δύο αξόνων. Το κλειδί, συνεπώς εξαλείφει τις σχετικές κινήσεις μεταξύ των δύο αξόνων εντός της συναρμογής. Το άκρο

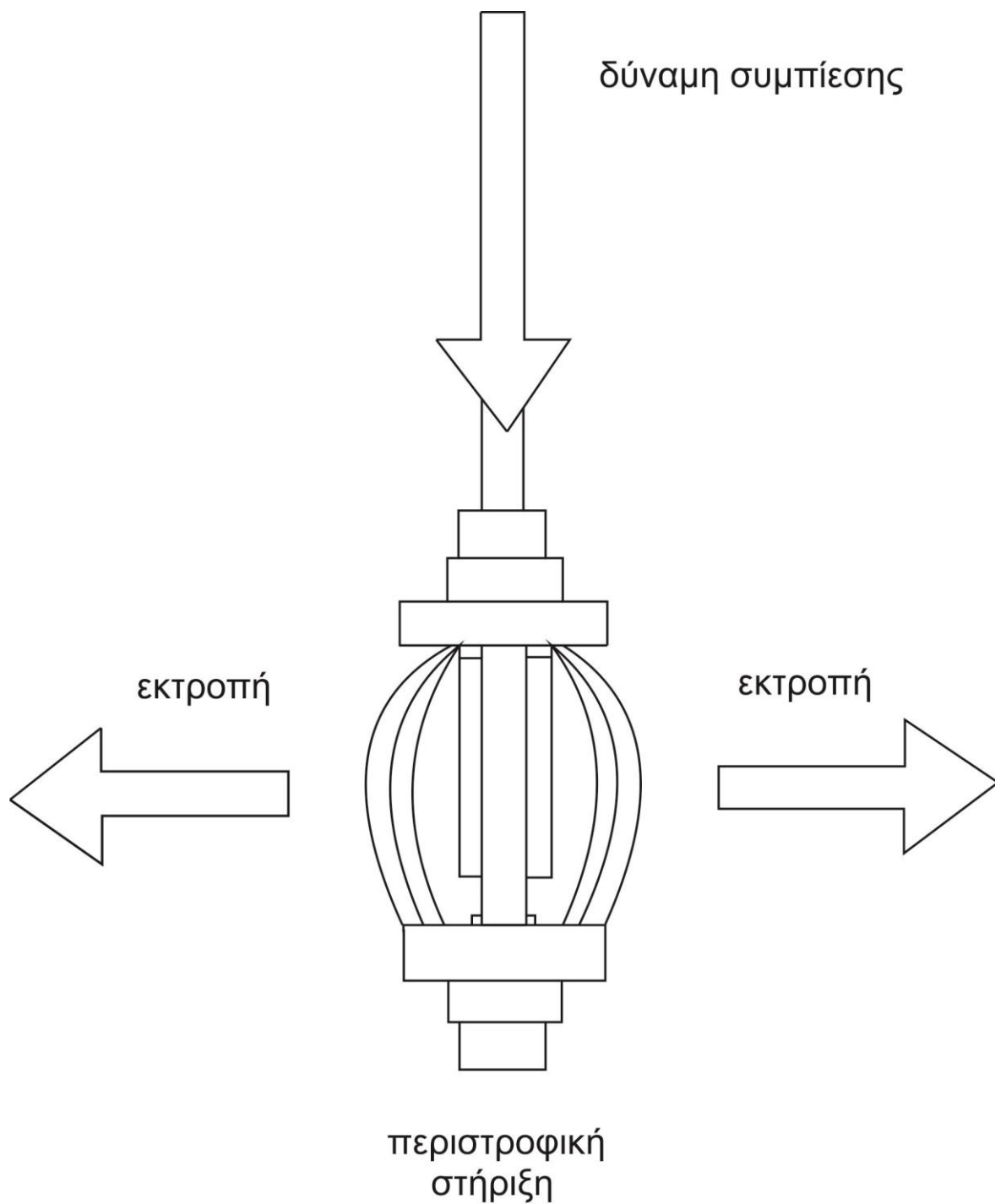
του άνω άξονα επιτρέπει την εγκατάσταση του άνω δίσκου, καθώς και τη συγκράτηση από τον άξονα του κινητήρα κοπής. Έτσι το συνολικό μήκος της συναρμογής, ορίζεται ανάλογα με την επέκταση ή συμπίεση του κάτω άξονα εντός του άνω στο επιθυμητό μήκος.



Σχήμα 3.6: Δίσκος τοποθέτησης των λεπίδων

Σχεδιασμένο για να ταιριάζει με την άνω άτρακτο, το κάτω μισό τμήμα, περιέχει σφηνόδρομο στη μια πλευρά και το αντίστοιχο κλειδί για τη περιοχή στερέωσης στην άλλη πλευρά. Η πλευρά με το κλειδί επιτρέπει την εμπλοκή της σφήνας με την άνω άτρακτο ενώ η άλλη μεριά, με το χαμηλότερο δίσκο. Διαμόρφωση της ατράκτου παρέχεται ως στοπ συμπίεσης, καθώς και ως θέση τοποθέτησης αναφοράς για το κατώτερο δίσκο της ατράκτου. Αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί αυτοματοποίηση της συναρμογής, η κατώτερη άτρακτος στηρίζεται στη βάση, μέσω ενός ρουλεμάν. Μια βαθιά οπή # 10-32 UNC-2B X 0,5 ίντσες βρίσκεται στο άκρο του άξονα. Η προφόρτιση του εδράνου παρέχεται σφίγγοντας τη βίδα του άξονα, ο οποίος προκαλεί την φλάντζα στο κάτω άξονα για να ασκήσει πίεση στο εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν.

Η διαφοροποίηση του συνολικού μήκους της συναρμογής, μετακινεί τους δίσκους τοποθέτησης των λεπίδων, το οποίο με τη σειρά του ασκεί μία δύναμη συμπίεσης στις οκτώ λεπίδες κοπής, προκαλώντας εκτροπή στις λεπίδες. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται, ότι καθώς το συνολικό μήκος του άξονα μικραίνει, υπάρχει μεγαλύτερη συμπιεστική δύναμη και, ως εκ τούτου μεγαλύτερη παραμόρφωση στο σύστημα των λεπίδων. Εξ ου και οι εκτροπές που σχηματίζουν πολλαπλά προφίλ κοπών εξαρτώνται από το συνολικό μήκος του άξονα. Αν κάθε στοιχειώδες μήκος του άξονα μπορεί να μεταφραστεί σε πίεση μέσω μηχανικών διατάξεων, όπως για παράδειγμα η χρήση του σφικτήρα, βίδες ρύθμισης, κλπ, μια κλίμακα μεταβολής των λεπίδων για πολλαπλή κοπή με κυρτή ακτίνα μπορεί να σχηματίζεται για κάθε δεδομένο μήκος της ατράκτου. Φαίνεται στο σχήμα 3.7 ότι αν ο κατώτερος δίσκος υποστηρίζεται και αφήνεται να περιστραφεί ελεύθερα, η δύναμη συμπίεσης που κινεί το ανώτερο στέλεχος προς τα κάτω ή προς τα πάνω, θα αναγκάσει τα περυσία να μεταβάλλονται ακτινικά. Αν εφαρμοστεί αυτοματοποίηση για τη συμπίεση της συναρμογής είτε στον άνω είτε στον κάτω άξονα, μπορεί να δημιουργηθεί πεπερασμένη εκτροπή για ένα δεδομένο μήκος άξονα. Ως εκ τούτου πολλαπλές ακτίνες κοπής μπορεί να σχηματίζονται γρήγορα από ένα μόνο εργαλείο κατά τη διάρκεια μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας κοπής.



Σχήμα 3.7: Η λειτουργία του VRC

3.5. Αυτοματοποιημένοι μηχανισμοί του VRC

Ο στόχος του σχεδιασμού ήταν να ελέγχεται αυτόματα το ποσό της συμπίεσης του άνω άξονα, δημιουργώντας έναν πεπερασμένο αριθμό ακτίνων του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κοπής. Πρόσθετος στόχος του σχεδιασμού ήταν η ενσωμάτωση της συναρμογής συμπίεσης σε ένα καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα που να μπορεί να εκτελέσει τη διαδικασία κοπής παρόμοια με ψηφιακή φραίζα. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, οι συσκευές αυτοματισμού σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν εντός δύο περιοχών: τη

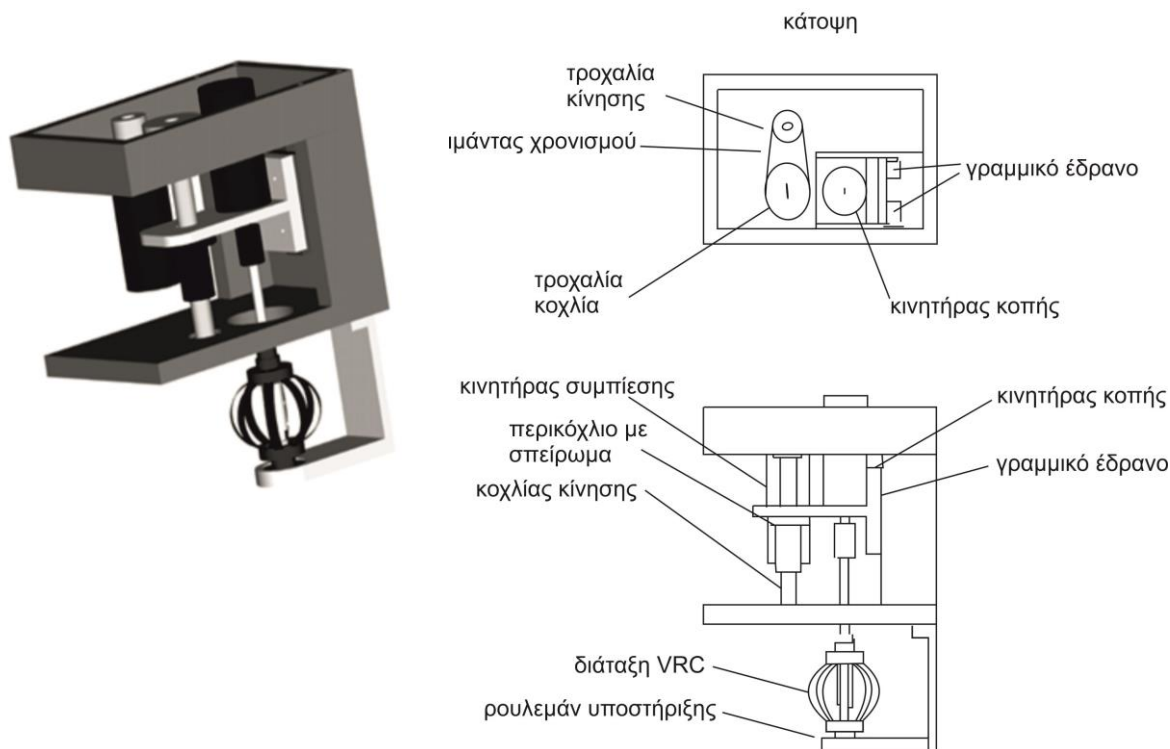
συμπίεση και την συγκράτηση του εργαλείου του μηχανισμού, και το καρτεσιανό ρομπωτικό σύστημα.

3.5.1. Συμπίεση και συγκράτηση εργαλείου

Χρησιμοποιήθηκαν 2 κινητήρες, ένας για τη συμπίεση και ένας για τη λειτουργία κοπής. Σχεδιασμένος να παρέχει γραμμική μετατόπιση, η περιστροφή του κινητήρα συμπιέσεως κινεί έναν κοχλία δημιουργώντας την ανύψωση και το χαμήλωμα της έδρασης όπου έχει εγκατασταθεί ο κινητήρας κοπής. Όταν ο κοχλίας γυρίζει, αυτό περιστρέφεται μέσα σε ένα σπείρωμα περικοχλίου που συνδέεται με γραμμικό έδρανο. Ανάλογα την κατεύθυνση των περιστροφών ο κοχλίας προκαλεί την κίνηση στην ανοδική ή καθοδική κατεύθυνση. Αυτή η προς τα άνω και προς τα κάτω κατεύθυνση του γραμμικού εδράνου χρησιμοποιείται για τη δύναμη συμπίεσης στο άνω άξονα του VRC. Το γραμμικό έδρανο στηρίζεται σε ολισθητήρα που φέρει φορτίο ικανό να παράσχει 2" γραμμικής μετατόπισης.

Για να αυξηθεί η μεταφορά της ροπής καθώς και να ελαχιστοποιηθεί το μήκος της συναρμογής, ο κινητήρας συμπίεσης συνδέθηκε με τον κοχλία μέσω ενός ιμάντα χρονισμού 3:1 λόγο δύναμης και διαμόρφωση της τροχαλίας. Η θέση του κινητήρα παρακολουθείται με ένα ολοκληρωμένο κωδικοποιητή 1024 γραμμών, ενώ η θέση αναφοράς, άνω και κάτω περιοριστικές θέσεις του εδράνου παρακολουθούνται μέσω οπτικών αισθητήρων. Για να ελεγχθεί η θέση του κινητήρα και κατά συνέπεια η συμπίεση στο άνω άξονα, χρησιμοποιήθηκε ένας βιομηχανικός σερβορυθμιστής.

Η δύναμη κοπής του άκρου του εργαλείου παρέχεται με άμεσο μοτέρ κίνησης που είναι συνδεδεμένο με τον άνω άξονα του συγκροτήματος VRC, μέσω ενός άκαμπτου συνδέσμου άξονα. Με το κατώτερο δίσκο της VRC να στηρίζεται σε ένα έδρανο με ρουλεμάν, η ανύψωση και το χαμήλωμα πάνω στο γραμμικού φορέα εδράνου προκαλούν δράσεις συμπίεσης στο ανώτερο άξονα του συγκροτήματος VRC. Η περιστροφική ενέργεια του κινητήρα μπορεί να ρυθμίζεται με διαφοροποίηση της εφαρμοζόμενης τάσης από ένα ρυθμιζόμενο τροφοδοτικό που μπορεί να είναι είτε αυτόματο είτε χειροκίνητο. Δεδομένου ότι όλοι οι διαθέσιμοι άξονες από τον ελεγκτή κίνησης χρησιμοποιήθηκαν για να παρακολουθούν πιο σημαντικές παραμέτρους ολόκληρου του συστήματος, τα χαρακτηριστικά ελέγχου του κινητήρα αφέθηκαν σε χειροκίνητη λειτουργία, Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Συμπύεση και συγκράτηση VRC

3.5.2. Καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα

Όταν είναι πλήρως συναρμολογημένο, το VRC είναι εγκατεστημένο σε ένα 3αξονικό (xyz) Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για όλες τις κινήσεις του. Η κίνηση της x και y κατεύθυνσης παρέχει επίπεδη γεωμετρική κοπή η οποία περιλαμβάνει το βάθος και το ρυθμό κοπής. Ο άξονας z χρησιμοποιείται για να παρέχει το ύψος κοπής και τη μέγιστη κάμψη της λεπίδας. Οι κινητήρες είναι συνεχούς ρεύματος (DC) και έχουν ενσωματωμένους κωδικοποιητές για τον προσδιορισμό της θέσης.

Για τον έλεγχο της κίνησης και της θέσης κατά τη κοπή, χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες προσδιορισμού θέσης και ταχύτητας. Κωδικοποιητής ανάλυσης 1024 γραμμών τοποθετήθηκε στο πίσω μέρος του κινητήρα κάθε άξονα, παρέχοντας πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητα της κατεργασίας. Ο κατάλληλος κινητήρας επιλέχθηκε βάση της απαιτούμενης ισχύος του κάθε άξονα. Η διαδικασία αυτή στηρίχθηκε στον υπολογισμό της ροπής που γίνεται μέσω γνωστών εξισώσεων. Ένας κινητήρας μεγάλου μεγέθους έχει ως αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση του κόστους, ενώ η επιλογή ενόν κινητήρα μικρότερου (από τον κατάλληλο) μεγέθους, θέτει σε κίνδυνο τη λειτουργία του συστήματος. Για τον προσδιορισμό μεταβλητών όπως η απαιτούμενη δύναμη, η μέγιστη ροπή κινητήρα, αναπτύχθηκε μια βάση δεδομένων που προσδιορίζει την κατάλληλη παροχή ρεύματος. Χρησιμοποιήθηκε κινητήρας περίπου 1000 rpm σε 24 Volt συνεχούς ρεύματος, με μέγιστη κατανάλωση 2,4 Amps. Με βάση τις παραμέτρους αυτές, εφαρμόστηκε η ελάχιστη τιμή των 8,53 Amps. Η τροφοδοσία του ρεύματος ήταν 12 Amps και χρησιμοποιήθηκαν και ενισχυτές ισχύος.

3.6. Ενσωμάτωση και ολοκλήρωση της κίνησης του ελεγκτή

Συνδυάστηκε η κίνηση και το σύστημα διαδικασίας, σε ένα ενιαίο σύστημα όπου κάθε υποσύστημα ελεγχόταν ανεξάρτητα από τα άλλα από τον κεντρικό υπολογιστή. Το σημαντικό αυτής της διαδικασίας ήταν πως κάθε σήμα από τον πομπό (σύστημα κίνησης) και την ανατροφοδότηση της διαδικασίας αναλύθηκε και συγχρονίστηκε το ένα με το άλλο για την εκτέλεση της κοπής.

Ο έλεγχος κίνησης επικεντρώθηκε στον έλεγχο και την πρόληψη του συστήματος να αποτύχει και περιλαμβάνει τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης, την ταχύτητα, τη ροπή και την επιτάχυνση. Αν και οι διαφορές των διάφορων συστημάτων ελέγχου δεν αφορούν μόνο το σχήμα και το μέγεθος, ένα ρομποτικό σύστημα απαρτίζεται από τα ακόλουθα

- ελεγκτή κίνησης για τη λήψη σήματος από τον κεντρικό υπολογιστή
- ενεργοποιητή (κινητήρα)
- ενισχυτή για τη λήψη του σήματος από τον ελεγκτή όπου ενισχύει το σήμα για την τροφοδοσία του κινητήρα
- συσκευή ανάδρασης που παρέχει πληροφορίες για τη διαδικασία.

Ο ελεγκτής κίνησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας Parker AT6450 με δυνατότητα ταυτόχρονου και συνεχή έλεγχου και των 4 αξόνων κίνησης. Το σύστημα ελέγχου, οφείλει άμεσα να μειώσει το σφάλμα στο μηδέν ή σε μια πολύ μικρή αποδεκτή τιμή, όταν υπάρξει μια διαταραχή ή αλλαγή αναφοράς.

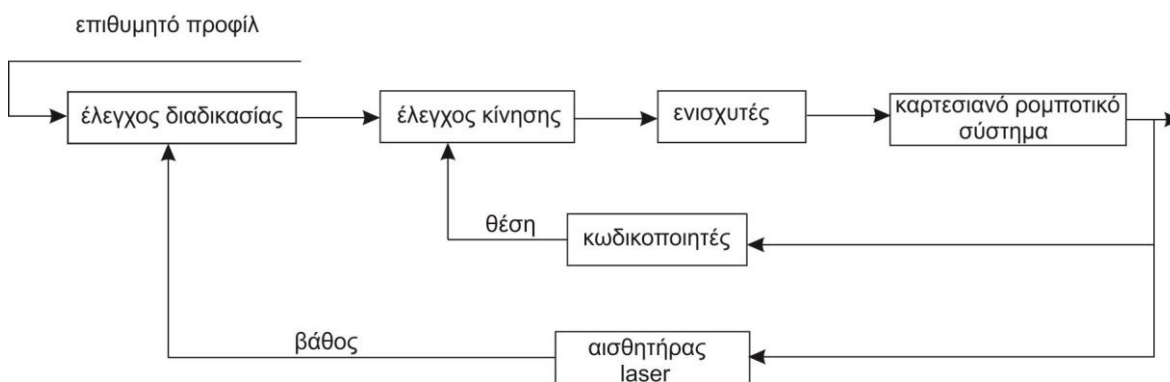
Εκτός από τον έλεγχο της κίνησης, σπουδαία σημασία έχει και η συνεχής παρακολούθηση της κατεργασίας κοπής. Το σύστημα ανατροφοδότησης παρείχε στον ελεγκτή τη δυνατότητα να παρακολουθεί τα πραγματικά προφίλ κοπής καθώς και να εντοπίζει ανωμαλίες, όπως θραύση των λεπίδων. Χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το σκοπό ένας αισθητήρας laser χαμηλού κόστους τοποθετημένος σε κλίση 36,5° ως προς την

επιφάνεια κοπής, σε έναν παλινδρομικό μηχανισμό για να το οδηγεί στη σωστή διεύθυνση. Το laser μετρά το βάθος κοπής σε ολόκληρη την επιφάνεια και παρέχει αναλογικές τιμές τάσης κάθε δέκατο του δευτερολέπτου.

Σκοπός της χρήσης του αισθητήρα ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς της κατεργασίας κοπής καθώς και της εγκυρότητας της προσομοίωσης της κοπής. Το σύστημα λαμβάνει εντολή για κοπή με χαμηλό ρυθμό, καθώς μετράται το πραγματικό προφίλ και συγκρίνεται απευθείας με το προφίλ που έχει προγραμματιστεί. Σε περίπτωση ύπαρξης σημαντικής απόκλισης, ο ελεγκτής οφείλει να παρέμβει. Αν δεν υπάρχει απόκλιση, τότε ενσωματώνεται ένας ελεγκτής στο λογισμικό του συστήματος για την επόμενη φορά.

3.7. Ρύθμιση του συστήματος

Ο ελεγκτής εκπέμπει την εντολή για κοπή στο καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα, ενώ ο αισθητήρας laser υπολογίζει τα προφίλ κοπής τροφοδοτώντας τις πληροφορίες πίσω στον ελεγκτή της διαδικασίας, Σχήμα 3.9.



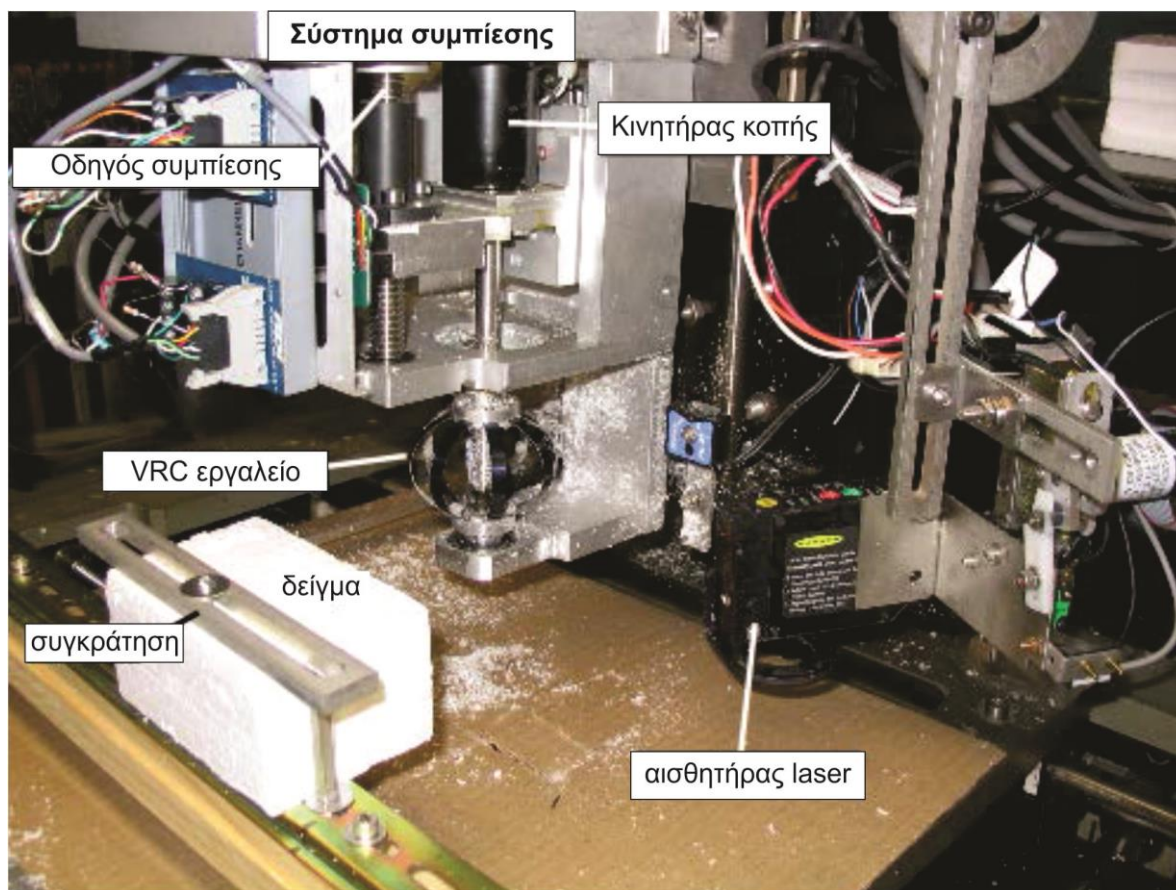
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ροής της κατεργασίας

Το τεμάχιο συσφίγγεται. Κατά την έναρξη της διαδικασίας κοπής ολόκληρη η συναρμογή συμπίεσης χαμηλώνει στην αρχική θέση. Στη συνέχεια, ο Z άξονας δέχεται εντολή να μετακινηθεί σε καθορισμένη θέση κοπής. Το δοκίμιο μεταφέρεται στη διεύθυνση Y, η εκτροπή των λεπίδων ακουμπάει οριακά την επιφάνεια του δοκιμίου και γίνεται τυπική βαθμονόμηση με τον τρόπο που γίνεται σε μια κλασσική φραιζα. Η διαδικασία αφαίρεσης υλικού ξεκινάει με τη μετατόπιση του δοκιμίου στην X ή Y κατεύθυνση αφού έχουν καθοριστεί όλες οι θέσεις. Τις πληροφορίες και τα στοιχεία για τα βάθη κοπής τα παρέχει ο αισθητήρας laser που είναι τοποθετημένος. Όταν το καρτεσιανό ρομπότ κινηθεί σε μια προκαθορισμένη θέση, η λεπίδα συμπίεζεται σε διάφορες τιμές που εξαρτώνται από το βάθος κοπής. Ο αισθητήρας laser σαρώνει την επιφάνεια του δοκιμίου που πρόκειται να κοπεί και έπειτα παρέχει τα δεδομένα σε ένα ξεχωριστό αρχείο. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται το πραγματικό σύστημα του VRC.

Με βάση τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των προφίλ κοπής που προγραμματίστηκαν και των προφίλ που προέκυψαν, εγκαθίσταται ένα σύστημα ελέγχου. Αν δεν υπάρχει απόκλιση, τότε αναπτύσσεται ένα απλό σύστημα ελέγχου στο λογισμικό. Ωστόσο, αν υπάρχει απόκλιση, τότε ένα σύστημα ελέγχου παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την εκτροπή των λεπίδων.

Τα αποτελέσματα των τριών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, επικύρωσαν τη μοντελοποίηση για τη σύνθεση λεπίδων, ιδιαίτερα σε χαμηλές ταχύτητες του κινητήρα (κάτω από 1000 rpm). Το μέσο σφάλμα το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 0.005" και 0.02", αποδεικνύει την ύπαρξη επίδρασης επιπλέον παραγόντων, όπως η δύναμη κοπής και ο στροβιλισμός. Το τελικό αποτέλεσμα επηρεάζεται ακόμα και από τις δονήσεις και τον

παλινδρομικό μηχανισμό του μηχανήματος laser. Εξαιτίας της μικρής τιμής του σφάλματος, η διαφορά του πραγματικού προφίλ κοπής από αυτό για το οποίο εκτελέστηκαν τα πειράματα ελαττώθηκε με τη διερεύνηση περισσότερων χαρακτηριστικών της κατεργασίας, όπως ο έλεγχος για ευνοϊκότερες συνθήκες κοπής, διαφορετικό υλικό λεπίδων και δοκιμίου, διαφορετική ταχύτητα κοπής κ.α. Ακόμα, μέσω της ανατροφοδότησης του αισθητήρα laser, είναι δυνατόν να αποφευχθούν ανωμαλίες στη λειτουργία, με την έξοδο του αισθητήρα να παρέχει πληροφορίες και βοήθεια το χειριστή σχετικά με την κατάσταση της κατεργασίας αντί για κατεργασία σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 3.10: Τελικό εργαλείο VRC

Καταλήγοντας, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή του VRC ελαχιστοποίησε τη διαδικασία αλλαγής κοπτικού εργαλείου και κατά συνέπεια την ελαχιστοποίηση του ολικού χρόνου παραγωγής του τεμαχίου. Η δυνατότητα αλλαγής της ακτίνας κοπής μπορεί να αντικαταστήσει τα πολλαπλά κοπτικά εργαλεία.

Το κοπτικό εργαλείο που κατασκεύασε ο Dr. Hierr άνοιξε το δρόμο σε έναν καινοτόμο τομέα έρευνας και ενέπνευσε το παρόν ερευνητικό έργο για την κατασκευή εργαλείου με πολλαπλές ακτίνες κοπής κατασκευασμένες όμως αυτή τη φορά από πολυμερές υλικό και σκληρούς κοπτικούς κόκκους. Στόχος της κατασκευής τέτοιου κοπτικού εργαλείου είναι η προσπάθεια χρήσης του σε σκληρότερα υλικά.

4. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

Η επιλογή των κοπτικών εργαλείων σε διαδικασίες παραγωγής είναι μια βασική παράμετρος όπου ο απαιτούμενος χρόνος κατασκευής, η ενέργεια που καταναλώνεται και η προσπάθεια μείωσης του κόστους, όλα αλληλοεξαρτώνται. Εάν ο χρόνος αλλαγής των εργαλείων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ή ακόμη και να εξαλειφθεί με τη χρήση ενός μόνο εργαλείου που παρέχει πολλαπλά προφίλ, τότε θα μπορούσε να επιτευχθεί εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας, καθώς και κόστους του εργαλείου. Οι τρέχουσες τεχνικές κατεργασίας βασίζονται σε κοπτικά με ειδική ακμή εργαλείου προκαθορισμένου προφίλ με σταθερό (απαραμόρφωτο) σχήμα. Σε περιπτώσεις όπου κατασκευάζεται ένα τμήμα με πολύπλοκα χαρακτηριστικά (διαφορετική ακτίνα καμπυλότητας, καμπυλότητες στις γωνίες κλπ), ο χειριστής του μηχανήματος συχνά απαιτείται να διακόψει τη διαδικασία και να αντικαταστήσει το εκάστοτε εργαλείο κοπής με ένα άλλο, κατάλληλο, με σκοπό την κατασκευή αυτών των χαρακτηριστικών. Ένα τυπικό μηχανήμα περιέχει μια ποικιλία από αυτά τα εργαλεία, ώστε να ασχοληθεί με διαφορετικές καμπυλότητες και ποσοστά αφαίρεσης υλικού. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτούμενες αλλαγές στο εργαλείο κοπής, θα μπορούσαν να κατασκευαστούν Παραμορφώσιμα μικρο-Κοπτικά. Ο σχεδιασμός τους να βασίζεται βέβαια στην ίδια τεχνική κοπής και μέθοδο συναρμολόγησης όπως σε τυπικά κοπτικά. Κύριο πλεονέκτημα του νέου αυτού τύπου κοπτικού είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου, της ενέργειας και του αριθμού των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην αφαίρεση υλικού κατά το φραιζάρισμα και το τρνάρισμα.

Το παραμορφώσιμο σώμα αυτών των εργαλείων θα μπορούσε να αποτελείται από λειαντικές “nanopowders” όπως αλουμίνα (Al_2O_3), καρβίδιο πυριτίου (SiC), κυβικό νιτρίδιο (CBN) συνθετικό διαμάντι ή DLC επικαλυμμένα νανοσωματίδια κλπ (όπως διεσπαρμένα σωματίδια στον όγκο ενός εύκαμπτου πλέγματος). Αυτό το πλέγμα μπορεί να είναι, για παράδειγμα, μία θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη η οποία θα είναι ελαστομερής ή θα έχει την ικανότητα να εναλλάσσει μεταξύ της υαλώδους/άκαμπτης και ελαστικής κατάστασης ανάλογα με την θερμοκρασία εφαρμογής (π.χ. σιλικόνη, PDMS, εποξική ρητίνη, κλπ) για ρητινοειδή εργαλεία, καουτσούκ για εργαλεία από καουτσούκ, ή παραμορφώσιμο κεραμικό για υαλοποιημένα εργαλεία. Δεδομένου ότι η κοπτική ακτίνα των προτεινόμενων αυτών εργαλείων θα μεταβάλλεται, η άτρακτος του θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει τηλεσκοπικό τμήμα για να αντισταθμίσει την διαστολή και συμπίεση του παραμορφώσιμου σώματος όταν η κοπτική επιθυμητή ακτίνα μεταβάλλεται. Για τη ρύθμιση του όγκου του προσροφημένου υλικού ρευστού προς το κοίλο τμήμα της ατράκτου, το προεξέχον μέρος του υλικού μπορεί να είναι μηχανική λεπίδα από την άκρη του εργαλείου. Ο πυρήνας να μπορεί να ωθείται προς τα έξω κατά μήκος του κελύφους της ατράκτου, εκτινάσσοντας το υλικό του σώματος εργαλείου (ακόμη σε ρευστή μορφή) από τη βελόνα για να σχηματιστεί μια σφαίρα, σύμφωνα με τα φαινόμενα επιφανειακής τάσεως. Ο πυρήνας ωθείται κατόπιν προς τα έξω (σε μια απόσταση ίση ή κάπως μικρότερη από τη διάμετρο της σφαίρας εργαλείου) για να σχηματίσει τον αξονικό πόλο γύρω από τον οποίο το ρευστό υλικό σχηματίζει το σώμα του εργαλείου. Στην κατάσταση αυτή, ο όγκος του σφαιρικού εργαλείου είναι ίσος με εκείνον του ρευστού υλικού μετρημένο μέσα στη βελόνα συν το γνωστό όγκο του μεταλλικού στύλου, και επομένως η ακτίνα/διάμετρος του μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια με την επίλυση ενός κυβικού πολυωνύμου (πραγματική ρίζα της Εξίσωσης). Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την στερεοποίηση του ρευστού υλικού, π.χ. με σκλήρυνση της ρητίνης θερμοσκληρυνόμενης με έκθεση σε υπεριώδες φως ή θέρμανση σε ένα κλίβανο για ένα συγκεκριμένο χρόνο, με εξάτμιση του διαλύτη στο διαλυτοποιημένο ελαστικού μήτρα, ή με ξήρανση της μήτρας κεραμικού. Αυτή η διαδικασία συνήθως συνοδεύεται με μια μικρή αλλαγή του όγκου του σώματος του εργαλείου (και συνεπώς και της ακτίνας του/διάμετρος) που μπορεί να προβλεφθεί και να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση του εργαλείου. Στην περίπτωση των πολυμερικών πλεγμάτων, η βελτιστοποίηση των διεπιφανειακών ιδιοτήτων μεταξύ του πολυμερούς και των λειαντικών μεταλλικών νανοσωματιδίων, καθώς

και των μετάλλων του πυρήνα-κελύφους της βελόνας θα έχει μεγάλη σημασία για να εξασφαλισθεί καλή συγκόλληση μεταξύ αυτών των δύο φάσεων/συστατικών του εργαλείου. Μετά τη στερεοποίηση το μικρό εργαλείο θα είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί ως κανονικό περιφερικό ή τερματικό φραιζαρίσματος, δηλ. με περιστροφή του άξονα της ατράκτου του (N).

Ένα εργαλείο τέτοιας λειτουργίας θα συμβάλει στην ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής και τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας στις διαδικασίες κοπής με ανατροφοδότηση προφίλ, που οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγωγικότητας. Τα οφέλη για την κοινωνία και τη βιομηχανία περιλαμβάνουν:

- ❖ Αποτελεσματική μετάβαση της βιομηχανίας από τους πόρους στη γνώση. Η τρέχουσα βιομηχανική πρακτική κοπής περιλαμβάνει ένα σύνολο εργαλείων, το οποίο αποτελείται από εναλλακτικά συστατικά και κάθε συνιστώσα έχει αναπτυχθεί ανάλογα με τις λεπτομέρειες της εργασίας. Η προτεινόμενη προσέγγιση αντικαθιστά το σύνολο των εργαλείων με ένα μόνο συστατικό, το οποίο είναι σε θέση να προσαρμοστεί στις ιδιαιτερότητες της εργασίας.

- ❖ Έμφαση στην ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών και τεχνολογικών κλάδων. Η προτεινόμενη προσέγγιση είναι διεπιστημονική και ενσωματώνει τα αποτελέσματα από διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους και εμπλέκεται στον αναδυόμενο τομέα των νανοϋλικών/ νανοτεχνολογίας.

- ❖ Η προτεινόμενη προσέγγιση συμβάλλει στη βελτιστοποίηση υλικών και των διαδικασιών στον τομέα της μεταποίησης. Η Βελτιστοποίηση, με τη σειρά της συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση.

- ❖ Τα οφέλη από μια τέτοια προσέγγιση, εκτός της ακρίβειας διαστάσεων των προϊόντων μέσω ανατροφοδότησης, είναι η πρόβλεψη χαμηλότερων δυνάμεων κοπής και θερμοκρασιών, ικανότητα χειρισμού πιο πολύπλοκων 3D μηχανικών επιφανειών σε βελτιωμένες αποδόσεις, ρυθμούς, περάσματα, παρόλη τη μείωση του αριθμού των απαιτούμενων περασμάτων κοπής.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Arrazola, P.J., Villar, A., Ugarte, D., Meslin, F., Le Maitre, F., Marya, S., Serrated Chip Prediction in Numerical Cutting Models, Proceedings: 8th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, Chemnitz, Germany: 115-122, 2005
- [2] Aurich, J.-C., Braun, O., Warnecke, G., Development of a Superabrasive Grinding Wheel With Defined Grain Structure Using Kinematic Simulation, Annals of the CIRP 52/1: 275-280,
- [3] Backer, W.R., Merchant M. E., The Basic Mechanisms of the Grinding Process, Transactions of ASME, 180: 141-148, 1958
- [4] Badger, J., Torrance, A., A comparison of two models to predict the grinding force from wheel surface topography, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 40: 1099-1120, 2000
- [5] Becker, J.-C., Bahngesteuertes Schleifen von Kurbelwellen, Dissertation IFW Hannover, 2004
- [6] Bei, J. Y., Analysis and investigation on grinding temperatures, Journal of Shanghai Jiaotong University, 1964
- [7] Belak, J., Stowers, I. F., The Indentation and Scraping of a Metal Surface: A Molecular Dynamics Study, Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic, Eds.: Singer, Pollock, ASI Series E, 220: 1-10, 1991
- [8] Bifano, T. G., Fawcett, S. C., Specific Grinding Energy as an In-Process Control Variable for Ductile-Regime Grinding, Journal of Precision Engineering, 13, 4: 256-262, 1991
- [9] Boercker, D. B., Belak, J., Stowers, I. F., Donaldson, R. R., Siekhaus, W. J., Simulation of Diamond Turning of Silicon Surfaces, Proc. of ASPE, Oct. 1992, Florida, USA: 45-48, 1992
- [10] Braun, O., Warnecke, G., Aurich, J.-C., Simulation-based Development of a Superabrasive Grinding Wheel with Defined Grain Structure, NAMRC 33, 2005
- [11] Brandin, H., Pendel- und Tiefschleifen. Vergleichende Untersuchung beim Schleifen von Rechteckprofilen, Dissertation, TU Braunschweig, 1978
- [12] Brinksmeier, E., Cinar, M., Characterization of dressing processes by determination of the collision number of the abrasive grits, Annals of the CIRP, 44/1: 299- 302, 1995
- [13] Brinksmeier, E., Tönshoff, H.K., Czenkusch, C., Heinzl, C., Modelling and optimization of grinding processes, Journal of Intelligent Manufacturing, 9/4: 303-314, 1998
- [14] Brinksmeier, E., Heinzl, C., Meyer, L., Coolant Supply Conditions and Their Effect on the Workpiece Surface Layer in Grinding, Annals of the WGP, VIII/1:163-166, 2001
- [15] Brinksmeier, E., Klocke, F., Giwerzew, A., Vucetic, D., Spanbildungsmechanismen beim Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten, IDR 4/02: 285-293, 2002
- [16] Brinksmeier, E., Heinzl, C., Böhm, C., Wilke, T., Simulation of the temperature

distribution and metallurgical transformation in grinding by using the finite-element-method, Production Engineering, X/1: 9-16, 2003

[17] Brinksmeier, E., Heinzl, C., Bleil, N., Randschichtverfestigung durch Nutzung des Größeneffekts beim Schleifen, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 62: 21-37, 2005

[18] Brunner, G., Schleifen mit mikrokristallinem Aluminiumoxid, Dissertation, University of Hannover, 1998

[19] Bücker, C., Schältschleifen mit windschiefer Achsanordnung, Dissertation, RWTH Aachen, 1998

[20] Carslaw, H., Jaeger, J. C., Conduction of heat in solids, Oxford Science Publications, Oxford University Press, 1959

[21] de Carvalho, R. N., Orlande, H. R. B., Estimation of the boundary heat flux in grinding via the conjugate gradient method, Heat Transfer Engineering, 21: 71-82, 2000

[22] Chang, C. C., Wang, S. H., Szeri, A. Z., On the mechanism of fluid transport across the grinding zone, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118: 332- 338, 1996

[23] Challen, J. M., Oxley, P. L. B., An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models, Wear 53: 229-243, 1978

[24] Chen, X., Rowe, W.-B., Analysis and Simulation of the Grinding Process Part I: Generation of the Grinding Wheel Surface, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36: 871-882, 1996

[25] Chen, X., Rowe, W.-B., Analysis and Simulation of the Grinding Process Part II: Mechanics of Grinding, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 36: 883-896, 1996

[26] Chen, X., Rowe, W.-B., Mills, B., Allanson, D.- R., Analysis and simulation of the grinding process Part III: Comparison with experiment, International Journal of Machine Tools and Manufacture 36/8: 897-906, 1996

[27] Chen, X., Rowe, W.-B., Mills, B., Allanson, D.- R., Analysis and simulation of the grinding process Part IV: Effects of wheel wear, International Journal of Machine Tools and Manufacture 38/1/2: 41-49, 1998

[28] Chen, C., Jung, Y., Inasaki, I., Surface, Cylindrical and Internal Grinding of Advanced Ceramics: Grinding Fundamentals and Applications, Journal of Engineering for Industry, 39, 201–211, 1989

[29] Chen, H., Zhang, D., Hagiwara, I., Parallel Molecular Dynamics Simulation of Nanoscale Grinding, Proc. of the 4th int. euspen conference May 31st-June 2nd: 163-164, 2004

[30] Chen, Y. T., Shin, Y. C., A surface grinding process advisory system with fuzzy logic, Conference proceeding: ASME/DSC, 28: 76-77, 1991

[31] Chen, Y. T., Kumara, S. R. T., Fuzzy Logic and Neural Networks for Design of Process Parameters: A Grinding Process Example, International Journal of Production

Research, 36/2:395-415, 1998

[32] Chiu, N., Malkin, S., Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding, Annals of the CIRP 42/1: 383-387, 1993

[33] Choi, H.-Z., Beitrag zur Ursachenanalyse der Randzonenbeeinflussung beim Schleifen, Dissertation, University of Hannover, 1986

[34] Chryssolouris, G., Tsirbas, K., Salonitis, K., An Analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind Hardening, SME Jour. of Manu. Processes, 7/1: 1-9, 2005

[35] Coelho, R. T., de Olivera, J. F. G., de Campos, G. P., Experimental and theoretical study of the temperature distribution on diamond dressing tools for precision grinding, IDR 3/2001: 186-193, 2001

[36] Colding, B. N. , A Wear Relationship for Turning, Milling and Grinding - Machining Economics, Dissertation, Stockholm, 1959

[37] Colding, B., Interpretation of Grinding results in terms of the Grinding Equivalent, K. T. H. Stockholm, 1970

[38] Cooper, W.-L., Lavine, A.-S., Grinding Process Size Effect and Kinematics Numerical Analysis, Journal of Manufacturing Science and Engineering 122: 59-69, 2000

[39] Cybenko, G., Approximation by Superposition of a Sigmoidal Function, Mathematics of Control, Signals and Systems, 2: 303-314, 1989

[40] Czenkusch, C., Technologische Untersuchungen und Prozessmodelle zum Rundschleifen. Dissertation, University of Hannover, 2000

[41] Daw, M.S., Baskes, M.I., Embeddedatom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals, Phys. Rev. B 29, 12: 6443-6453, 1984

[42] Decneut, A., Verantwoorde Keuze van de Slijpvoorwaarden, Dissertation, Katholieke Universiteit te Leuven, 1974

[43] Demetriou, M. D., Lavine, A. S., Thermal aspects of grinding: the case of upgrinding, and fluid. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122: 605-611, 2000

[44] Denkena, B., Becker, J.C., Catoni, F., FEM-Simulation of CNC Crushing for Vitreous Bonded Diamond Grinding Wheels, 3rd Int. Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, 7th International Symposium on Advances in Abrasive Technology Bursa, Turkey – June 17-19: 283-287, 2004

[45] DesRuisseaux, N. R., Thermal aspects of grinding processes, Dissertation, University of Cincinnati, 1968

[46] DesRuisseaux, N. R., Zerkle, R. D., Thermal analysis of the grinding process, Jour. of Engineering for Industry, 92, 428-434, 1970

[47] Domala, K.-V., Salisbury, E.-J., Moon, K.-S., Sutherland, J.-W., A three- dimensional geometric model for the surface texture generated by a single pass of the wheel in a surface grinding process, ASME Manufacturing Science and Engineering, MED-2-1/MH-3-1: 363- 375, 1995

- [48] Eda, H., Ohmura, E.; Yamauchi, S., Submitted by I. Inasaki, Computer Visual Simulation on Structural Changes of Steel in Grinding Process and Experimental Verification, Annals of the CIRP 42/1, 389-392, 1993
- [49] Engineer, F., Guo, C., Malkin, S., Experimental measurement of fluid flow through the grinding zone, Journal of Engineering for Industry, 114: 61-66, 1992
- [50] Ernst, H. Grieb, D. A., Field, M., Machine tool Vibration Damper, U.S. Patent No. 2: 412,499, 1946
- [51] Ernst, H., Fundamental Aspects of Metal Cutting and Cutting Fluid Action, Annals of the New York Academy of Sciences, 53 : 936-961, 1951
- [52] Fawcett, S.-C., Dow, T.-A., Development of a model for precision contour grinding of brittle materials, Precision Engineering 13/4: 270-276, 1991
- [53] Fawcett, S.-C., Dow, T.-A., Influence of wheel speed on surface finish and chip geometry on precision contour grinding, Precision Engineering 14/3: 160-167, 1992
- [54] Finke, M., Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längsschleifens von Futterteilen, Dissertation, University of Dortmund, 2003
- [55] Flekkov, E. G., Coveney, P. V., From Molecular Dynamics to Dissipative Particle Dynamics, Phys. Rev. Letters, 83/9: 1775-1778, 1999
- [56] Fritsch, A., Schleifen von Cermets. Dissertation, University of Hannover, 1997
- [57] Fricker, D. C., Pearce, T. R. A., Harrison, A. J. L., Predicting the occurrence of grind hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers/B, Journal of Engineering Manufacture 218/10: 1339- 1356, 2004
- [58] Fuh, K. H., Wang, S. B., Force Modeling and Forecasting in Creep Feed Grinding Using Improved BP Neural Network, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37/8: 1167-1178, 1997
- [59] Gentzen, J., Anwendungspotentiale der Verfahren Schleifen, Superfinishen und Glattwalzen, In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch „Schleifen, Honen, Läppen und Polieren“, 61st ed., Vulkan Verlag: 89 103, 2004
- [60] Gerent, O., Entwicklung zu einem ganzheitlichen Prozessmodell für das Hochleistungs- Außenrund-Formschleifen. Dissertation, RWTH Aachen, 2001
- [61] Goerne, J., Simulationsmodell zur Prozessauslegung beim Schrägeinsteichschleifen, Dissertation, RWTH Aachen, 1986
- [62] Gong, Y.-D., Wang, B., Wang, W.-S., The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology, Journal of Materials Processing Technology 129/1-3: 123-126, 2002
- [63] Gottlob, G., Frühwirt, T., Horn, W., Expertensysteme, Springer Verlag, Wien, 1990
- [64] Gottwein, K., Die Messung der Schneidentemperatur beim Drehen von Flusseisen, Maschinenbau, IV: 1129-1135, 1925

- [65] Govekar, E., Baus, A., Gradišek, J., Klocke, F., Grabec, I., A New Method for Chatter Detection in Grinding, *Annals of the CIRP*, 51/1: 267-270, 2002
- [66] Grabec, I. Sachse, W., *Synergetics of Measurement, Prediction and Control*, Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 1997
- [67] Guo, C., Malkin, S., Analysis of fluid flow through the grinding zone, *Journal of Engineering for Industry*, 114: 427-434, 1992
- [68] Guo, C., Malkin, S., Heat transfer in grinding, *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 1: 16-27, 1992
- [69] Guo, C., Malkin, S., Analysis of Transient Temperatures in Grinding, *Journal of Engineering for Industry* 117: 571-577, 1995
- [70] Guo, C., Malkin, S., Inverse heat transfer analysis of grinding, *Jour. of Eng. for Industry*, Part 1: Methods, 118: 137-142, 1996
- [71] Guo, C., Malkin, S., Inverse heat transfer analysis of grinding, *Jour. of Eng. for Ind.*, Part 2: Applications, 118: 143-149, 1996
- [72] Guo, C., Wu, Y., Varghese, V., Malkin, S., Temperatures and energy partition for grinding with vitrified CBN wheels, *Annals of the CIRP*, 48/1: 247-250, 1999
- [73] Guo, C., Malkin, S., Energy partition and cooling during grinding, *Journal of Manufacturing Processes*, 2/3: 151-157, 2000
- [74] Guo, C.; Campomas, M.; McIntosh, D.; Becze, C.; Green, T., Optimization of continuous dress creep-feed form grinding process, *Annals of the CIRP* 52/1: 259-262, 2003
- [75] Gvinashvili, V., Webster, J., Rowe, B., Fluid Flow and pressure in the Grinding Wheel- Workpiece Interface, *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Sciences and Engineering*, 127, Feb.: 198-205, 2005
- [76] Hahn, R. S., On the nature of the grinding process, *Proc. 3rd Int. Machine Tool Design and Research Conference*, Birmingham: 129- 154, 1962
- [77] Haykin, S., *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, (2nd. ed.), Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998
- [78] Hecker, R.-L., Ramoneda, I.-M., Liang, S.-Y., Analysis of wheel topography and grit force for grinding process modeling, *Journal of Manufacturing Processes* 5/1: 13-23, 2003
- [79] Hecker, R.-L., Liang, S.-Y., Predictive modeling of surface roughness in grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43/8: 755-761, 2003
- [80] Heinzl, C., *Methoden zur Untersuchung und Optimierung der Kühlschmierung beim Schleifen*, Dissertation, University of Bremen, 1999
- [81] Heinzl, C., Grimme, D. (submitted by A. Moisan), Modeling of Surface Generation in Contour Grinding of Optical Molds, *Annals of the CIRP*, 55/1: 581-584, 2006
- [82] Hesselbach, J., Hoffmeister, H.-W., Maiz K., Machanova I., Surface grinding with cryogenics, *Production Engineering*, XI/2: 1-4, 2004

- [83] Hoffmeister, H.-W., Hohe Zerspanungsleistungen durch Schleifen mit CD (Continuous Dressing) – sichere, werkstoffangepasste und wirtschaftliche Prozeßführung, Dissertation, TU Braunschweig, 1996
- [84] Hoffmeister, H.-W., Weber, T., Simulation of Grinding by means of the Finite Element Analysis, 3rd International Machining & Grinding, Cincinnati, USA, 4.-7.10, 1999
- [85] Hoffmeister, H.-W., Weber Th., Temperaturfeldentwicklung beim Flachprofilschleifen, Kolloquium Umweltverträgliches Schleifen - Ökologie als Ökonomie der Zukunft, Ergebnisbericht des Verbundprojektes "Umweltverträgliches Schleifen" WZL Aachen, Mai 18-19: 187- 200, 2000
- [86] Hoffmeister, H.-W., Maiz, K., Machanova, I., Einfluss der Kühlschmierbedingungen beim Flachsleifen, In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 62nd ed., Vulkan Verlag: 11-20, 2005
- [87] Holian, B. L., Lomdahl, P. S., Plasticity induced by shock waves in nonequilibrium molecular- dynamics simulations, Science 280: 2085-2088, 1998
- [88] Hong, K. K., Lo, C. Y., An inverse analysis for the heat conduction during a grinding process, Journal of Materials Processing Technology 105: 87-94, 2000
- [89] Hoover, W. G., De Groot, A. J., Large- Scale Elastic-Plastic Indentation Simulations via Nonequilibrium Molecular Dynamics, Phys. Rev. A 10/42: 5844 – 5853, 1990
- [90] Hoover, W. G., Computational Statistical Mechanics, Studies in Modern Thermodynamics 11, Elsevier Science Publ., Oxford-New York Tokyo, 1991
- [91] Hryniewicz, P., Szeri, A. Z., Jahanmir, S., Application of lubrication theory to fluid flow in grinding: Part I-Flow between smooth surfaces, Journal of Tribology, 123: 94- 107, 2001
- [92] Hwang, T. W., Evans, C. J., Malkin, S., High Speed Grinding of Silicon Nitride With Electroplated Diamond Wheels, Part 2: Wheel Topography and Grinding Mechanisms, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122/1: 42-50, 2000
- [93] Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., Ohmori, G., An Atomistic Analysis of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning, Annals of the CIRP, 40/1: 551-554, 1991
- [94] Inasaki, I., Tönshoff, H. K., Howes, T. D., Abrasive Machining in the Future, Annals of the CIRP, 42/2: 723-732, 1993
- [95] Inasaki, I., Grinding process simulation based on the Wheel topography Measurement, Annals of the CIRP 45/1: 347-350, 1996
- [96] Inasaki, I., Application of the Simulation technologies for grinding operations, VDI Berichte 1276: 197-211, 1996
- [97] Inasaki, I., Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Processes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15: 730-736, 1999
- [98] Inasaki, I., Karpuschewski, B., Wehmeier, M., Grinding monitoring system based on power and accoustic emission, Annals of the CIRP, 49/1: 235-240, 2000

- [99] Jaeger, J. C., Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts, Proc. R. Soc. New South Wales, 76/3: 203-224, 1942
- [100] Jankowski, R., Constant cutting process model represents complex processes at peripheral grinding, Maschinenmarkt, 99/48: 32- 37, 1993
- [101] Jen, T. C., Lavine, A. S., A variable heat flux model of heat transfer in grinding: Model development, Journal of Heat Transfer, 117: 473-478, 1995
- [102] Jen, T. C., Lavine, A. S., A Variable Heat Flux Model of Heat Transfer in Grinding with Boiling, Journal of Heat Transfer, 118, 463-470, 1996
- [103] Jiao, Y., Lei, S., Wu, J., Pei, Z. J., Application of fuzzy adaptive networks in manufacturing: Waviness removal in grinding of wiresawn silicon wafers, Conference proceeding: ASME/MED, 14: 643-652, 2003
- [104] Jin, T., Cai, G. Q., Analytical thermal models of oblique moving heat source for deepgrinding and cutting, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123/1: 185-190, 2001
- [105] Jin, T., Stephenson, D. J., Corbett, J., Burn threshold of high carbon steel in high efficiency deep grinding, Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, 216: 357-364, 2002
- [106] Jin, T., Rowe, W. B., McCormack, D. F., Temperatures in Deep Grinding of Finite Workpieces, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 42/1: 53-59, 2002
- [107] Jin, T., Stephenson, D. J., Rowe, W. B., Estimation of the convection heat transfer coefficient of coolant within the grinding zone, Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, 217/3: 397-407, 2003
- [108] Jin, T., Stephenson, D. J., Three dimensional finite element simulation of transient heat transfer in high efficiency deep grinding, Annals of the CIRP 53/1: 259-262, 2004
- [109] Ju, Y., Farris, T. N., Chandrasekar, S., Theoretical analysis of heat partition and temperatures in grinding, Journal of Tribology, 120/4: 789-794, 1998
- [110] Karpuschewski, B., Wehmeier, M., Inasaki, I., Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors, Annals of the CIRP, 49/1: 235-240, 2000
- [111] Kassen, G., Simulation des Schleifprozesses, IndustrieAnzeiger91/24: 549, 1969
- [112] Kassen, G., Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges, Dissertation, RWTH Aachen, 1969
- [113] Kassen, G., Werner, G., Kinematische Kenngrößen des Schleifvorganges. Industrie Anzeiger 91: 2323-2326, 1969
- [114] Kempa, B., Zahnflankenprofilschleifen mit galvanisch-gebundenem CBN, Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [115] Kim, N. K., Guo, C., Malkin, S., Heat Flux Distribution and Energy Partition In Creep-Feed Grinding, Annals of the CIRP, 46/1: 227-232, 1997

- [116] Kleppmann, W., Taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. Carl Hanser Verlag, 2001
- [117] Klocke, F., Baus, A., Beck, T., Coolant induced forces in CBN high speed grinding with shoe nozzles, Annals of the CIRP, 49/1: 241- 244, 2000
- [118] Klocke, F., Modelling und simulation in grinding, 1st European Conference on Grinding, Aachen, 6.-7. November, Fortschritt- Berichte VDI Reihe 2 Fertigungstechnik: 8.1-8.27, 2003
- [119] Kloß, H., Santner, E., Dmitriev, A. I., Shilko, E. V., Psakhie, S. G., Popov, V. L., 2D und 3D Simulationsrechnungen mit der Methode der bewegten zellularen Automaten (bzA) zur Bewertung des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Werkstoffen, in Reibung, Schmierung und Verschleiß, Band 1, Tribologie- Fachtagung der GfT, Sept. 2002: 32/1-32/9, 2002
- [120] König, W., Schreirmüller, H., Sperling, F. , Werner, G., Younis, M., A survey of present State of High speed Grinding, Annals of the CIRP ,19/2: 275 284, 1971
- [121] König, W., Steffens, K., A Numerical Method to Describe the Kinematics of Grinding, Annals of the CIRP 31/1: 201-204, 1982
- [122] König, W., Knop, M., Prozessmodelle als Basis eines Schnitzwertoptimierungssystems für das Aussenrundeinstechschleifen, Prozessmodelle von trennenden und umformenden Fertigungsverfahren, Symposium zum Schwerpunktprogramm der Stiftung Volkswagenwerk, für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnologie, 7: 1-27, 1987
- [123] König, W.; Ferlemann, F., CBN grinding at five hundred m/s, Industrial Diamond Review, 51: 72-79, 1991
- [124] Kohlhoff, S., Schmauder, S., Gumbsch, P., Coupled Atomistic Continuum Calculations of Near Interface Cracking in Metal/ Ceramic Composites, Bonding, Structure and Mech. Prop. of Metal-Ceramic Interfaces, by Rühle et al., Pergamon Press, Oxford:63-70, 1990
- [125] Kohli, S. P., Guo, C., Malkin, S, Energy partition for grinding with aluminium oxide and CBN abrasive wheels, Journal of Engineering for Industry, 117: 160-168, 1995
- [126] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., Raff, L. M., Effect of tool geometry in nanometric cutting: a molecular dynamics simulation approach. Wear 219: 84-97, 1998
- [127] Komanduri, R., Chandrasekaran, N., Raff, L. M., MD simulation of indentation and scratching of single crystal aluminum. Wear 240: 113-143, 2000
- [128] Kopalinsky, E. M., A new approach to calculating the workpiece temperature distributions in grinding, Wear, 94: 295-322, 1984
- [129] Koshy, P., Ives, L.-K., Jahanmir, S., Simulation of diamond-ground surface, International Journal of Machine Tools and Manufacture 39/9: 1451-1470, 1999
- [130] Koshy, P., Iwasaki, A., Elbestawi, M.-A., Surface generation with engineered diamond grinding wheels: insights from simulation, Annals of the CIRP 52/1: 271-274, 2003

- [131] Kovach, J. A., Ben-David, A., Sterling, L., An expert grinding advisor for the surface grinding of superalloys, Conference proceeding: Grinding Fundamentals and Applications, The Winter Annual Meeting of the ASME, 39: 349-355, 1989
- [132] Kruszyński, B.W.; Midera, S., Forces in Generating Gear Grinding Theoretical and Experimental Approach, Annals of the CIRP 47/1: 287-290, 1998
- [133] Kruszyński, B.W., Lajmert, P., An Intelligent Supervision System for Cylindrical Traverse Grinding, Annals of the CIRP, 54/1: 305-308, 2005
- [134] Kun, L., Liao, T. W., Modelling of ceramic grinding processes. Part I. Number of cutting points and grinding forces per grit. Journal of Materials Processing Technology, 65 1-3: 1-10, 1997
- [135] Kwak, J.-S., Song, J.-B., Trouble Diagnosis of the Grinding Process by Using Acoustic Emission Signals, International Jour. of Machine Tools and Manufacture, 41/6: 899-913, 2001
- [136] Landman, U., Luedtke, W. D., Nitzan, A., Dynamics of Tip-Substrate Interactions in Atomic Force Microscopy, Surface Science 210: 177- 184, 1989
- [137] Lavine, A. S., A simple model for convective cooling during the grinding process, Journal of Engineering for Industry, 110: 1-6, 1988
- [138] Lavine, A. S., Malkin, S., Jen, T. C., Thermal aspects of grinding with CBN abrasives, Annals of the CIRP, 38/1: 557-560, 1989
- [139] Lavine, A. S., Jen, T. C., Thermal aspects of grinding: Heat transfer to workpiece, wheel, and fluid. Journal of Heat Transfer, 113: 296-303, 1991
- [140] Lavine, A. S., Jen, T. C., Coupled Heat Transfer to Workpiece, Wheel, and Fluid in Grinding, and the Occurrence of Workpiece Burn: Heat Transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 34: 983-992, 1991
- [141] Lavine, A. S., Thermal effect of heat generation at the shear planes, Annals of the CIRP, 40/1: 343-345, 1991
- [142] Lavine, A. S., An exact solution for surface temperature in down grinding, Journal of Heat and Mass Transfer, 43: 4447-4456, 2000
- [143] Law, S.-S., Wu, S.-M., Simulation Study of the Grinding Process, Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry: 972-978, 1973
- [144] Lee, C.W., Shin, Y.C., Fuzzy basis function networks of hierarchical structure for modelling manufacturing processes, Conference proceeding: ASME/DSC, 64: 767- 775, 1998
- [145] Lee, C. W., Shin, Y. C., Evolutionary Modelling and Optimization of Grinding Processes, International Journal of Production Research, 38/12: 2787-2813, 2000
- [146] Lee, C. W., Choi, T., Shin, Y. C., Intelligent Model-Based Optimization of the Surface Grinding Process for Heat-Treated 4140 Steel Alloys With Aluminum Oxide Grinding Wheels, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 125/1: 65-76, 2003

- [147] Liao, T. W., Chen, L. J., A Neural Network Approach for Grinding Processes: Modelling and Optimization, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 34/7: 919-937, 1994
- [148] Liao, T.W., Flexural Strength of Creep Feed Ground Ceramic: General Pattern, Ductile- Brittle Transition and MLP Modeling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38/4: 257-275, 1998
- [149] Li, J., Liao, D., Yip, S., Coupling Continuum to MD Simulation with Minimal Disturbance: Thermodyn. Field Estimator, Optimal Particle Controller and Buffer-Zone Feedback, *MRS*, 538, Boston, USA: 197, 1998
- [150] Lippock, C., Außenrund-Feinschleifen mit keramisch gebundenen CBN- Schleifscheiben, Dissertation, RWTH Aachen, 1989
- [151] Liu, H. X., Chen, T., Qu, L. S., Predicting Grinding Burn Using Artificial Neural Networks, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8/3: 235-237, 1997
- [152] Liu, W. J., Pei, Z. J., Xin, X. J., Finite element analysis for grinding and lapping of wire-sawn silicon wafers, *Journal of Materials Processing Technology* 129: 2-9, 2002
- [153] Lowin, R., Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück. Dissertation, University of Aachen, 1980
- [154] Maekawa, K., Itoh, A., Friction and tool wear in nano-scale machining - a molecular dynamics approach, *Wear* 188: 115-122, 1995
- [155] Mahdi, M., Zhang, L., Applied mechanics in grinding, Part 7: Residual stresses induced by the full coupling of mechanical deformation, thermal deformation and phase transformation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39: 1285- 1298, 1999
- [156] Makarov, P. V., Schmauder, S., et. Al., "Simulation of elastic-plastic deformation and fracture of materials at micro-, meso- and macrolevels", *Theoret. and Applied Fracture Mech.* 37: 183-244, 2001
- [157] Maksoud, T. M. A., Atia, M. R., Koura, M. M., Applications of artificial intelligence to grinding operations via neural networks, *Machining Science and Technology*, 7/3: 361-387, 2003
- [158] Malkin, S., Cook, N. H., The wear of grinding wheels - Part 1: Attritious wear, *Journal of Engineering for Industry*, 93: 1120–1128, 1971
- [159] Malkin, S., Lenz, E., Burning limit for surface and cylindrical grinding of steels, *Annals of the CIRP*, 27/1: 233-236, 1978
- [160] Malkin, S., *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1989
- [161] Mamalis, A. G., Grabchenko, A. I., Fedorovich, V. A., Grinko, S. A., Paulmier, D., Horvath, M., Development of an expert system of diamond grinding of superhard polycrystalline materials considering grinding wheel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17/7: 498-507, 2001
- [162] Mamalis, A. G., Kundrak, J., Manolakos, D. E., Gyani, K., Markopoulos, A., Thermal

modelling of surface grinding using implicit finite element techniques, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21/12: 929-934, 2003

[163] Maris, M., Thermische aspecten van de oppervlakteintegriteit bij het slijpen, Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, 1977

[164] Masters, T., Advanced Algorithms for Neural Networks: A C++ Sourcebook, John Wiley and Sons, Inc, New York, 1995

[165] Mayer Jr., J. E., Purushothaman, G., Gopalakrishnan, S., Model of grinding thermal damage for precision gear materials, Annals of the CIRP, 48/1: 251-254, 1999

[166] Merz, R., Konzept zur Auswahl der Abrichtbedingungen bei der Einsatzvorbereitung konventioneller Schleifscheiben mit Diamantprofilrollen, FBK- Produktionstechnische Berichte, 15, Eds.: G. Warnecke, Kaiserslautern, 1994

[167] Midha, P.S., Zhu, C.B., Trmal, G.J., Optimum selection of grinding parameters using process modelling and knowledge based system approach, Computer-Aided Production Engineering, 7th Int. Conf., Tennessee Technological Univ.: 189-198, 1991

[168] Moody, J., Darken, C. J., Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units, Neural Computation, 1: 281-294, 1989

[169] Moulik, P. N., Yang, H. T. Y., Simulation of thermal stresses due to grinding, International Journal of Mechanical Sciences, 43/3: 831-851, 2001

[170] Murray, P., Malkin, S., Effects of rotary dressing on grinding wheel performance, Trans. ASME, 100: 297-302, 1978

[171] Nathan, R. D., Vijayaraghavan, L., Krishnamurthy, R., Intelligent Estimation of Burning Limits to Aid Cylindrical Grinding Cycle Planning, International Journal of Vehicle Design, 8: 1/48-1/59, 2001

[172] Nguyen, T., Zhang, L. C., Modelling of the mist formation in a segmented grinding wheel system, Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 45: 21-28, 2005

[173] Ohishi, S., Furukawa, Y., Analysis of Workpiece Temperature and Grinding Burn in Creep Feed Grinding, Bulletin of JSME 28/242: 1775-1781, 1985

[174] Okuyama, S., Nakamura, Y., Kawamura S., Cooling Action of Grinding Fluid In Shallow Grinding, International Journal of Machine Tools and Manufacture 33/1: 13-23, 1991

[175] Okuyama S., Nishihara T., Kawamura S., Hanasaki S., Study on the Geometrical Accuracy in Surface Grinding - Thermal Deformation of Workpiece in Traverse Grinding, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., 28/4: 13-23, 1994

[176] Opitz, H., Studie des Aussenrundscheifens, Les Annales du CIRP, Vol. 127-31. [177] Ortiz, M., Knap, J., 1998, The Bridging of Atomistic and Continuum Spatial and Temporal Scales, MRS, 538, Dec., Boston, USA, 1992

[178] Osterhaus, G., Verfahrensübergreifende Simulation und Auslegung von Schleifprozessen. Dissertation, RWTH Aachen, 1994

[179] Outwater, J. O., Shaw, M. C., Surface temperature in grinding, Trans. ASME, 74:

73-83, 1952

[180] Pahlitzsch, G., Vergleichende Prüfungen der Härteprüfungen von Schleifkörpern, Schleif- Polier und Oberflächentechnik, 06/20: 41-53, 1943

[181] Paul, T., Hosch, H., Simulation der Randzonenbeeinflussung beim Schleifen unter Verwendung der Fuzzy Logic, Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung ZWF/CIM, 88/2: 67-70, 1993

[182] Paul, T., Karpuschewski, B., Simulation der Randzonenbeeinflussung beim Schleifen, VDI-Zeitschrift, 135/9: 94-98, 1993

[183] Paul, T., Konzept für ein schleiftechnologisches Informationssystem. Dissertation, University of Hannover, 1994

[184] Peters, J., Les Recherches Actuelles dans le Domaine de la Rectification, Annals of the CIRP 15/1: 21-33, 1967

[185] Peters, J., Contribution of CIRP Research to Industrial Problem in Grinding, Annals of the CIRP 33/2: 451-468, 1984

[186] Poggio, T., Girossi F., Networks for Approximation and Learning, Proceedings of the IEEE, 78: 1481-1497, 1990

[187] Pomey, J., Remarques sur les structures de l'acier en relation avec l'usinabilité, Annals of the CIRP, VIII: 29-32, 1961

[188] Rappaport, D. C., The Art of Molecular Dynamics Simulation, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1995

[189] Rentsch, R., Inasaki, I., Molecular dynamics simulation for abrasive processes, Annals of the CIRP, 43/1: 327-330, 1994

[190] Rentsch, R., Investigation of surface integrity by Molecular dynamics simulation, Annals of the CIRP, 44/1: 295-298, 1995

[191] Rentsch, R., Process modeling by means of molecular dynamics (MD), 2nd. Int. Conf. on Machining of Advanced Materials, Aachen, VDI-Berichte, 1276: 175-195, 1996

[192] Rentsch, R., Inasaki, I., Brinksmeier, E., Preuß, W., Riemer, O., , Influence of Material Characteristics on the Micromachining Process, 'Materials Issues in Machining-III' and 'The Physics of Machining Processes-III' by D. A. Stephenson, R. Stevenson, TMS, USA: 65-86, 1996

[193] Rentsch, R., Molecular Dynamics for abrasive process simulation, chapter 7 in Tribology of abrasive machining processes, eds. Marinescu, Rowe, Dimitrow, Inasaki, William Andrew Publ., NY, USA: 239-264, 2004

[194] Rentsch, R., Brinksmeier, E., Tribology aspects in state of the art MD cutting simulations, 8th. CIRP Int. Workshop on Modeling of Machining Operations, Chemnitz, Germany, May 2005: 401 – 408, 2005

[195] Rentsch, R., Inasaki, I., Effects of Fluids on the Surface Generation in Material Removal Processes – Molecular Dynamics Simulation, Annals of the CIRP, 55/1: 601-604, 2006

- [196] Rowe, W. B., Pettit, J. A., Boyle, A., Moruzzi, J. L., Avoidance of thermal damage in grinding and prediction of the damage threshold, *Annals of the CIRP*, 37/1: 327-380, 1988
- [197] Rowe, W. B., Morgan, M. N., Allanson, D. A., An advance in the modelling of thermal effects in the grinding process, *Annals of the CIRP*, 40/1: 339-342, 1991
- [198] Rowe, W. B., Yan, L., Inasaki, I., Malkin, S., Applications of Artificial Intelligence in Grinding, *Annals of the CIRP*, 43/2: 521-531, 1994
- [199] Rowe, W. B., Black, S. C. E., Mills, B., Morgan, M. N., Qi, H. S., Experimental investigation of heat transfer in grinding, *Annals of the CIRP*, 44/1: 329-332, 1995
- [200] Rowe, W. B., Morgan, M. N., Black, S. C. E., Mills, B., A simplified approach to thermal damage in grinding, *Annals of the CIRP*, 45/1: 299-302, 1996
- [201] Rowe, W. B., Li, Y., Chen, X., Mills, B., An Intelligent Multiagent Approach for Selection of grinding Conditions, *Annals of the CIRP* 46/1: 233-238, 1997
- [202] Rowe, W. B., Chen, X., Characterisation of the size effect in grinding and the sliced bread analogy, *Int. Journal of Production Research*, 35/3: 887-899, 1997
- [203] Rowe, W. B., Jin, T., Temperatures in High Efficiency Deep Grinding (HEDG), *Annals of the CIRP*, 50/1: 205-208, 2001
- [204] Rowe, W. B., Thermal analysis of high efficiency deep grinding, *Int. Journ. Machine Tools and Manufacture*, 41/1: 1-19, 2001
- [205] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J., Learning Internal Representations by Error Propagation, in Rumelhart, D.E. and McClelland, J. L., eds., *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, 1, Cambridge, MA, The MIT Press.: 318-362, 1986
- [206] Sakakura, M., Inasaki, I., A neural network approach to the decision-making process for grinding operations, *Annals of the CIRP*. 41/1: 353–356, 1992
- [207] Sakakura, M., Inasaki, I., Intelligent Data Base for Grinding Operations, *Annals of the CIRP*, 42/1: 379-382, 1993
- [208] Saljé, E., *Gesetzmäßigkeiten und Kennzahlen beim Schleifen*, Dissertation, RWTH Aachen, 1952
- [209] Sathyanarayanan, G., Lin, I. J., Ming, K. C., Neural Network Modelling and Multiobjective Optimization of Creep Feed Grinding of Superalloys, *International Journal of Production Research*, 30/10: 2422-2438, 1992
- [210] Schneider, M., *Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen*, Dissertation, University of Dortmund, 1999
- [211] Schulte, M., *Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln*. Dissertation, University of Dortmund, 2004
- [212] Schulte, M., *Angepasste Simulation ermöglicht Einschätzung der Werkstückeigenschaften beim Schleifen*, *IDR 39/II*: 141-148, 2005

- [213] Schumack, M. R., Chung, J., Schulz, W. W., Kannatey-Asibu Jr., E., Analysis of fluid flow under a grinding wheel, *Journal of Eng. For Industry*, 113: 190-197, 1991
- [214] Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis, *Annals of the CIRP*, 43/1: 51-54, 1994
- [215] Shimizu, J., Zhou, L., Eda, H., Molecular Dynamics Simulation of Material Removal Mechanism beyond Propagation Speed of Plastic Wave, *LEM21, JSME*: 309- 314, 2003
- [216] Shore, P., Billing, O., Puhasmagi, V., Standard Grinding Wheel Assessment Method to Support a Sophisticated Grinding Knowledge- Based System, *Proceedings of Advances in Abrasive Technology*, VI: 285-290, 2003
- [217] van der Smagt, P. P., Minimization Methods for Training Feedforward Networks, *Neural Networks*, 7: 1-11, 1994
- [218] Snoeys, R., Maris, M., Peters, J., Thermally induced damage in grinding, *Annals of the CIRP*, 27/2: 571-581, 1978
- [219] Spiegel, P., Einsatzvorbereitung kunstharzgebundener CBN-Schleifscheiben, *FBKProduktionstechnische Berichte Vol 15*, Eds.: G. Warnecke, Kaiserslautern, 1994
- [220] Starostin, N. P., Kondakov, A. A., Calculation of non-stationary temperature field in disk-block friction pair at smaller engagement coefficients, *Trenie i iznos* 24/3: 260- 265, 2003
- [221] Steffens, K., Thermomechanik des Schleifens, Dissertation, RWTH Aachen, 1983
- [222] Steffens, K., König, W., Closed loop simulation of grinding, *Annals of the CIRP*, 32/1: 255-258, 1983
- [223] Stephenson, D. J., Jin, T., Physical basics in grinding, 1st European Conference on Grinding, Aachen, Germany, 6-7 November, K. Werner, F. Klocke, E. Brinksmeier (eds.), *Fortschritts-Berichte, VDI Reihe 2/643*, VDI Verlag: 1301 1321, 2003
- [224] Susič, E., Grabec, I., Characterization of the Grinding Process by Acoustic Emission, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40/2: 225-238, 2000
- [225] Suto, T., Sata, T., Simulation of grinding process based on wheel surface characteristics, *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*: 15, 27-34, 1981
- [226] Takazawa, K., Effects of grinding variables on surface structure of hardened steel, *Bulletin of the Japan Society of Grinding Engineers*, 2, 1: 14-21, 1966
- [227] Tanaka, T., Simulation tracking on the wear process of grinding wheel by the fuzzy inference, *Conference proceeding: ASME and Inst. of Systems, Control and Information Engineers of Japan*, 2: 1023-1028, 1992
- [228] Tarasov, L. P., Detection, causes and prevention of injuries in Ground Surfaces, *Transactions of the American Society for Metals*, 136: 389-439, 1946
- [229] Taylor, F. W., , On the art of cutting Metal, *ASME Journal*, 28: 70, 1906
- [230] Tönshoff, H. K., Paul, T., Rationalisierungspotentiale mit schleiftechnischem Informationssystem ausschöpfen – Kopplung zwischen Experten- und Datenbanksystem,

Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Zwf, 11: 572-575, 1991

[231] Tönshoff, H. K., Peters, J., Inasaki, T., Paul, T., Modelling and Simulation of Grinding Processes, Annals of the CIRP, 41/2: 677-688, 1992

[232] Tönshoff, H. K., Paul, T., Czenkusch, C., Informationssystem zur Gestaltung und Optimierung von Schleifprozessen, VDI-Zeitschrift, 136/10: 82-86, 1994

[233] Tönshoff, H. K., Wobker, W.-G., Brunner, G., CBN Grinding with Small Wheels, Annals of the CIRP, 44/1: 311-316, 1995

[234] Tönshoff, H.K., Czenkusch, C., Brinksmeier, E., Heinzl, C., Modelling of grinding processes with fuzzy and neural nets compared to multiple regression, Conference proceeding: EUFIT 97, 5th Europ. Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, 3: 2064-2068, 1997

[235] Tönshoff, H. K., Friemuth, T., Becker, J. C., Process monitoring in grinding, Annals of the CIRP, 51/2: 1-21, 2002

[236] Trmal, G. J., Zhu, C. B., Midha, P. S., An expert system for grinding process optimisation, Journal of Materials Processing Technology, 33/4: 507-517, 1992

[237] Tsai, H. H., Hocheng, H., Investigation of the transient thermal deflection and stresses of the workpiece in surface grinding with the application of a cryogenic magnetic chuck, Journal of Materials Processing Technology 79: 177-184, 1998

[238] Tuerich, A., Werkzeug-Profilherstellung für das Verzahnungsschleifen, Dissertation, University of Hannover, 2002

[239] Vashishta, P., Bachlechner, M., et al., Multimillion atom simulations of crack propagation, fracture and nanoindentation, Ceramic Materials and Glasses, MRS Proc. 539, USA: 247, 1998

[240] Verkerk, J., Final report concerning CIRP cooperative work on the characterization of grinding wheel topography, Annals of the CIRP, 26/2: 385-395, 1977

[241] Vickerstaff, T. J., Diamond dressing – its effect on work surface roughness, Ind. Diamond Review, 30: 260-267, 1970

[242] Vinod-Jacob, D., Ramana, K. V., Rao, P. V. M., Automated manufacturability assessment of rotational parts by grinding, Int. Journal of Prod. Research, 42/3: 505-519, 2004

[243] Vishnupad, P., Shin, Y. C., Intelligent optimization of grinding processes using fuzzy logic, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, 212/B8: 647- 660, 1998

[244] Voll, M., Modelle zur thermischen Optimierung von Trockenschleifprozessen. Dissertation, TU Chemnitz, 2001

[245] Wang, Z., Willett, P., DeAguiar, P. R., Webster, J., Neural Network Detection of Grinding Burn from Acoustic Emission, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41/2: 283-309, 2001

[246] Wang, L., Qin, Y., Liu, Z. C., Ge, P. Q., Gao, W., Computer simulation of a

- workpiece temperature field during the grinding process, Proc. of the institution of mechanical engineers, Part B, 217/7: 953-959, 2003
- [247] Warnecke, G., Spiegel, P., Merz, R., Kinematically Defined Dressing Of Superabrasive Wheels, Transactions of NAMRI/ SME 19, 1991
- [248] Warnecke, G., Zitt, U., Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Processes, Annals of the CIRP 47/1: 265-270, 1998
- [249] Warnecke, G., Barth, C., Optimization of the Dynamic Behavior of Grinding Wheels for Grinding of Hard and Brittle materials Using the Finite Element Method, Annals of the CIRP 48/1: 261-264, 1999
- [250] Weber, Th., Simulation des Flachprofilschleifens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, Dissertation TU Braunschweig, 2001
- [251] Weinert, K., Schneider, M., Simulation of Tool-Grinding with Finite Element Method, Annals of the CIRP 49/1: 253-256, 2000
- [252] Weinert, K., Schulte, M., Kompensation der prozessbedingten Deformation beim Werkzeugschleifen, wt-online 93 7/8: 550-554, 2003
- [253] Weinert, K., Schulte, M., Profilschleifen hoch harter Cr- und PM Legierungen mit konventionellen Schleifmitteln, In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch „Schleifen, Honen, Läppen und Polieren“. 61st ed. Vulkan Verlag: 128-136, 2004
- [254] Weinert, K., Schulte, M., Kresing, I., Schleifsimulation – Unterstützung der Prozessauslegung. IDR Industrie Diamanten Rundschau 38/2: 156-162, 2004
- [255] Westkämper, E., Hoffmeister, H.-W., Weber, T., Grinding Process Simulation with FEM, WGP (eds.): Production Engineering, Research and Development, III/2: 45-48, 1996
- [256] Williams, J. A., Xie, Y., The generation of wear surfaces by the interaction of parallel grooves, Wear 155: 363-379, 1992
- [257] Winston, P.H., Artificial intelligence, Addison- Wesley Verlag Reading, 1993
- [258] Wittmann, M., Brinksmeier, E., Heinzel, C., Einfluss des Kühlschmierstoff-Zufuhrsystems auf die Wirkmechanismen im Schleifspalt, in proceedings of the 15th International Colloquium Tribology 2006, Automotive and Industrial Lubrication, Technische Akademie Esslingen, January 17-19, 2006
- [259] Wobker, H.-G., Schleifen keramischer Werkstoffe, Dissertation, University of Hannover, 1992
- [260] Yip, S., Wolf, D., Atomistic Concepts for Simulation of Grain Boundary Fracture, Materials Science Forum, 46: 77-168, 1989
- [261] Yoshikawa, H., Sata, T., Simulated Grinding Process by Monte Carlo Method, Annals of the CIRP 16: 297-302, 1968
- [262] Yoshikawa, H., Peklenik, J., Three dimensional simulation techniques of the grinding process – II, Effects of grinding conditions and wear on the statistical distribution of geometrical chip parameters, Annals of the CIRP, 18/1: 361-366, 1970

- [263] Zeppenfeld, C., Schnellhubschleifen von g-Titanaluminiden, Dissertation, RWTH Aachen, 2005
- [264] Zhang, L. C., Grindability of some metallic and ceramic materials in CFG regimes. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 34/8: 1045-1057, 1994
- [265] Zhang, L., Mahdi, M., Applied Mechanics in Grinding – IV. The Mechanism of Grinding Induced Phase Transformation, International Journal of Machine tools Manufacture, 35/10: 1397-1409, 1995
- [266] Zhang, L., Ali, Y., A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 44: 563-571, 2004
- [267] Zhou, X., Xi, F., Modelling and predicting surface roughness of the grinding process, International Journal of Machine Tools and Manufacture 42: 969-977, 2002
- [268] Zhu, C. B., Trmal, G. J., Midha, P. S., Development of a computer software system for data management and model evaluation in grinding, conference proc.: COMADEM Int. 93, Proc. of 5th Int. Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management: 235-240, 1993
- [269] Zitt, U.-R., Modellierung und Simulation von Hochleistungsschleifprozessen, Dissertation, University of Kaiserslautern, 1999
- [270] Klocke, F., "Modeling and Simulation of Grinding processes", Modelling and Simulation in Manufacturing Technology.
- [271] Kalpakjian S., Introduction to Manufacturing Processes, 1989
- [272] Olivo C.T., Machine Tool Technology and Manufacturing Processes, C Thomas Olivo and Associates
- [273] DeVries W.R., Analysis of Material Removal Processes, Springer – Verlag NY, 1991
- [274] Boothroyd G. & Knight W., Fundamentals of Machining and Machine Tools, 1/ Taylor Francis Inc, 1975
- [275] Jack Golten and Andy Verwer, Control System Design and Simulation, McGraw-Hill International, 1991
- [276] George Ellis, Control System Design Guide, Academic Press, 1991
- [277] Parker Hannifin Corporation, ServoController AT6450 Installation, Compumotor, 1997
- [278] Richard G. Budynas, Advance strength and Applied Stress Analysis, McGraw-Hill Inc. 1977
- [279] Lambert B.K., Milling: Methods and Machines, Society of manufacturing Engineers, Mfg.mtu.edu/marc/primers/milling/index.html/#millerequip.
- [280] The Cincinnati Milling Machine Co, A Treatise on Milling and Milling Machines,., Mfg.mtu.edu/marc/primers/milling/index.html/#millerequip.

[281] Αριστομένης Αντωνιάδης, Μηχανουργικά Τεχνολογία Τόμος Β: Κατεργασίες
Κοπής, εκδόσεις Τζιόλα

6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1. Δημοσιεύσεις στη Θερμική ανάλυση

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1942	Jaeger, J. C.	Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts	Proc.R. Soc. New South Wales	76/3 203-224	θερμική ανάλυση
1952	Outwater, J. O., Shaw, M. C.	Surface temperature in grinding	Trans. ASME	74 73-83	θερμική ανάλυση
1959	Carslaw, H., Jaeger, J. C.	Conduction of heat in solids	Oxford Science Publications		θερμική ανάλυση
1962	Hahn, R. S.	On the nature of the grinding process	Proc. 3rd Int. Machine Tool Design and Research Conference, Birmingham	129-154	θερμική ανάλυση (λόγος κατανομής Rws)
1964	Bei, J. Y.	Analysis and investigation on grinding temperatures	Journal of Shanghai Jiaotong University		θερμική ανάλυση
1966	Takazawa, K.	Effects of grinding variables on surface structure of hardened steel	Bulletin of the Japan Society of Grinding Engineers	2, 1 14-21	θερμική ανάλυση
1974	Decneut, A.	Verantwoorde Keuze van de Slijpvoorwaarden	Dissertation, Katholieke Universiteit te Leuven		θερμική ανάλυση
1977	Maris, M.	Thermische aspecten van de oppervlakteintegriteit bij het slijpen	Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven		θερμική ανάλυση ενεργειακά μοντέλα
1978	Brandin, H.	Pendel- und Tiefschleifen Vergleichende Untersuchung beim Schleifen von Rechteckprofilen	Dissertation TU Braunschweig		θερμική ανάλυση

1978	Snoeys R., Maris M., Peters J.	Thermally induced damage in grinding	Annals of the CIRP	27/2 571-581	Θερμική ανάλυση (τριγωνική κατανομή θερμότητας στη ζώνη επαφής)
1982	König, W., Steffens, K.	A Numerical Method to Describe the Kinematics of Grinding	Annals of the CIRP	31/1: 201-204	Θερμική ανάλυση Κινηματικο-γεωμετρική
1983	Steffens, K., König, W.	Closed loop simulation of grinding	Annals of the CIRP	32/1 255-258	Θερμική ανάλυση τοπογραφία τροχού
1984	Kopalinsky E. M.	A new approach to calculating the workpiece temperature distributions in grinding	Wear 94	295-322	Θερμική ανάλυση (προσδιορισμός ροής θερμότητας)
1985	Ohishi, S., Furukawa, Y.	Analysis of Workpiece Temperature and Grinding Burn in Creep Feed Grinding	Bulletin of JSME	28/242 1775-1781	Θερμική ανάλυση
1986	Choi, H.-Z.,	Beitrag zur Ursachenanalyse der Randzonenbeeinflussung beim Schleifen	Dissertation, University of Hannover		Θερμική ανάλυση (θερμοκρασίες κοπτικών)
1988	Lavine, A. S.	A simple model for convective cooling during the grinding process	Journal of Engineering for Industry	110 1-6	Θερμική ανάλυση ενεργειακά μοντέλα
1988	Lavine, A. S.	A simple model for convective cooling during the grinding process	Journal of Engineering for Industry	110/ 1-6	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1988	Rowe, W. B., Pettit, J. A., Boyle, A., Moruzzi, J.L.	Avoidance of thermal damage in grinding and prediction of the damage threshold	Annals of the CIRP	37/1 327-380	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1989	Chen, C., Jung, Y., Inasaki, I.,	Surface, Cylindrical and Internal Grinding of Advanced Ceramics: Grinding Fundamentals and Applications	Journal of Engineering for Industry	39, 201-211	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα Τοπομορφία τροχού
1989	Lavine, A. S., Malkin, S., Jen, T. C.	Thermal aspects of grinding with CBN abrasives	Annals of the CIRP	38/1 557-560	Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση Υγρό κοπής

1989	Malkin, S.,	Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives	Ellis Horwood Limited, Chichester		Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1991	Bifano, T. G., Fawcett, S. C.	Specific Grinding Energy as an In-Process Control Variable for Ductile-Regime Grinding	Journal of Precision Engineering	13, 4 256-262	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1991	Lavine, A. S., Jen, T. C.	Coupled Heat Transfer to Workpiece, Wheel, and Fluid in Grinding, and the Occurrence of Workpiece Burn: Heat Transfer	International Journal of Heat and Mass Transfer	34 983-992	θερμική ανάλυση
1991	Lavine, A. S.	Thermal effect of heat generation at the shear planes	Annals of the CIRP	40/1 343-345	θερμική ανάλυση
1991	Okuyama, S., Nakamura, Y., Kawamura S.	Cooling Action of Grinding Fluid In Shallow Grinding	International Journal of Machine Tools and Manufacture	33/1: 13-23	θερμική ανάλυση (συντελεστής μεταφοράς θερμότητας)
1991	Rowe, W. B., Morgan, M. N., Allanson, D. A.	An advance in the modelling of thermal effects in the grinding process	Annals of the CIRP	40/1: 339-342	θερμική ανάλυση
1992	Guo C., Malkin S.	Heat transfer in grinding	Journal of Materials Processing and Manufacturing Science	1 16-27	θερμική ανάλυση
1992	Tönshoff, H. K., Peters, J., Inasaki, T., Paul, T.	Modelling and Simulation of Grinding Processes	Annals of the CIRP	41/2 677-688	FEM Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση
2002	Jin, T., Stephenson, D. J., Corbett, J.	Burn threshold of high carbon steel in high efficiency deep grinding	Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture	216: 357-364	Ενεργειακά μοντέλα Μελέτη Αποβλήτου
1994	Okuyama S., Nishihara T., Kawamura S., Hanasaki S.	Study on the Geometrical Accuracy in Surface Grinding - Thermal Deformation of Workpiece in Traverse Grinding	Int. J Japan Soc. Prec. Eng.	28/4 13-23	Θερμική ανάλυση FEM

1995	Guo C., Malkin S.	Analysis of Transient Temperatures in Grinding	Journal of Engineering for Industry 117:	571-577	Θερμική ανάλυση FEM
1995	Jen, T. C., Lavine, A. S.	A variable heat flux model of heat transfer in grinding: Model development	Journal of Heat Transfer	117: 473-478	Θερμική ανάλυση
1995	Kohli, S. P., Guo, C., Malkin, S.	Energy partition for grinding with aluminium oxide and CBN abrasive wheels	Journal of Engineering for Industry	117 160-168	Θερμική ανάλυση (διανομή θερμότητας)
1995	Rowe, W. B., Black, S. C. E., Mills, B., Morgan, M. N., Qi, H. S.	Experimental investigation of heat transfer in grinding	Annals of the CIRP	44/1 329-332	Θερμική ανάλυση
1996	Guo, C., Malkin, S.	Inverse heat transfer analysis of grinding	Jour. of Eng. for Industry, Part 1: Methods	118 137-142	Θερμική ανάλυση
1996	Guo, C., Malkin, S.	Inverse heat transfer analysis of grinding	Jour. of Eng. for Ind., Part 2: Applications	118 143-149	Θερμική ανάλυση
1996	Jen, T. C., Lavine, A. S.	A Variable Heat Flux Model of Heat Transfer in Grinding with Boiling	Journal of Heat Transfer	118 463-470	Θερμική ανάλυση
1996	Rowe, W. B., Morgan, M. N., Black, S. C. E., Mills, B.	A simplified approach to thermal damage in grinding	Annals of the CIRP	45/1: 299-302	Θερμική ανάλυση
1996	Westkämper, E., Hoffmeister, H.-W., Weber, T.	Grinding Process Simulation with FEM	WGP (eds.): Production Engineering, Research and Development	III/2 45-48	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα FEM
1997	Kim, N. K., Guo, C., Malkin, S.	Heat Flux Distribution and Energy Partition In Creep-Feed Grinding	Annals of the CIRP	46/1 227-232	Θερμική ανάλυση
1998	Ju, Y., Farris, T. N., Chandrasekar, S.	Theoretical analysis of heat partition and temperatures in grinding	Journal of Tribology	120/4 789-794	Θερμική ανάλυση

1999	Guo, C., Wu, Y., Varghese, V., Malkin, S.	Temperatures and energy partition for grinding with vitrified CBN wheels	Annals of the CIRP	48/1: 247-250	Θερμική ανάλυση (συντελεστής συναγωγής)
1999	Hoffmeister, H.-W., Weber, T.	Simulation of Grinding by means of the Finite Element Analysis	3rd International Machining & Grinding, Cincinnati, USA	4.-7.10	Θερμική ανάλυση FEM
1999	Mayer Jr., J. E., Purushothaman, G., Gopalakrishnan, S.	Model of grinding thermal damage for precision gear materials	Annals of the CIRP	48/1 251-254	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1999	Schneider, M.	Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen	Dissertation, University of Dortmund		Θερμική ανάλυση Ενεργειακή ανάλυση FEM
2000	Demetriou, M. D., Lavine, A. S.	Thermal aspects of grinding: the case of upgrinding, and fluid	Journal of Manufacturing Science and Engineering	122 605-611	Θερμική ανάλυση
2000	Guo, C., Malkin, S.	Energy partition and cooling during grinding	Journal of Manufacturing Processes	2/3 151-157	Θερμική ανάλυση
2000	Hoffmeister, H.-W., Weber Th.	Temperaturfeldentwicklung beim Flachprofilschleifen, Kolloquium Umweltverträgliches Schleifen - Ökologie als Ökonomie der Zukunft	Ergebnisbericht des Verbundprojektes "Umweltverträgliches Schleifen" WZL Aachen	Mai 18-19: 187-200	Θερμική ανάλυση Υγρό κοπής
2000	Lavine, A. S.	An exact solution for surface temperature in down grinding	Journal of Heat and Mass Transfer	43 4447-4456	Θερμική ανάλυση
2001	Jin, T., Cai, G. Q.	Analytical thermal models of oblique moving heat source for deepgrinding and cutting	ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering	123/1 185-190	Θερμική ανάλυση
2001	Moulik, P. N., Yang, H. T. Y.	Simulation of thermal stresses due to grinding	International Journal of Mechanical Sciences	43/3: 831-851	Θερμική ανάλυση FEM
2001	Rowe, W. B., Jin, T.	Temperatures in High Efficiency Deep Grinding (HEDG)	Annals of the CIRP	50/1 205-208	Θερμική ανάλυση HEDG
2001	Rowe, W. B.	Thermal analysis of high	Int. Journ. Machine Tools and	41/1	Θερμική ανάλυση

		efficiency deep grinding	Manufacture	1-19	HEDG
2001	Weber, Th.	Simulation des Flachprofilschleifens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	Dissertation TU Braunschweig		Θερμική ανάλυση FEM
2003	Jin, T., Stephenson, D. J., Rowe, W. B.	Estimation of the convection heat transfer coefficient of coolant within the grinding zone	Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture	217/3: 397-407	Θερμική ανάλυση
2003	Stephenson, D. J., Jin, T.	Physical basics in grinding	1st European Conference on Grinding, Aachen, Germany, 6-7 November, K. Werner, F. Klocke, E. Brinksmeier (eds.), Fortschritts-Berichte	VDI Reihe 2/643, VDI Verlag: 1301-1321	Μελέτη αποβλίπτου Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα HEDG
2003	Weinert, K., Schulte, M.	Kompensation der prozessbedingten Deformation beim Werkzeugschleifen	wt-online 93 7/8	550-554	Θερμική ανάλυση Ενεργειακό μοντέλο FEM
2004	Fricker, D. C., Pearce, T. R. A., Harrison, A. J. L.	Predicting the occurrence of grind hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel	Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers/B, Journal of Engineering Manufacture 218/10	1339-1356	Θερμική ανάλυση
2004	Gentzen, J.	Anwendungspotentiale der Verfahren Schleifen, Superfinishen und Glattwalzen	In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch „Schleifen, Honen, Läppen und Polieren“, 61st ed.	Vulkan Verlag: 89-103	Θερμική ανάλυση Ενεργειακό μοντέλο FEM
2004	Hesselbach, J., Hoffmeister, H.-W., Maiz K., Machanova I.	Surface grinding with cryogenics	Production Engineering	XI/2 1-4	Θερμική ανάλυση Υγρό κοπής
2004	Jin, T., Stephenson, D. J.	Three dimensional finite element simulation of transient heat transfer in high efficiency deep grinding	Annals of the CIRP	53/1 259-262	Θερμική ανάλυση FEM HEDG
2004	Weinert, K.,	Profilschleifen hochharter Cr- und PM-	Jahrbuch „Schleifen, Honen,	128-136	Θερμική ανάλυση

	Schulte, M.	Legierungen mit konventionellen Schleifmitteln	Läppen und Polieren“. 61st ed. Vulkan Verlag		FEM
2004	Weinert, K., Schulte, M., Kresing, I.	Schleifsimulation – Unterstützung der Prozessauslegung	IDR Industrie Diamanten Rundschau	38/2: 156-162	Θερμική ανάλυση
2005	Chrysosouris, G., Tsirbas, K., Salonitis, K.	An Analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind Hardening	SME Jour. of Manu. Processes	7/1: 1-9	Θερμική ανάλυση FEM

Π.2. Δημοσιεύσεις στον υπολογισμό του αποβλίπτου κοπής κατά τη λείανση

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1968	Yoshikawa, H., Sata, T.	Simulated Grinding Process by Monte Carlo Method	Annals of the CIRP	16 297-302	Μελέτη αποβλίπτου Τοπογραφία τροχού
1996	Rentsch, R., Inasaki I., Brinksmeier, E., Preuß, W., Riemer, O.	Influence of Material Characteristics on the Micromachining Process	Materials Issues in Machining-III' and 'The Physics of Machining Processes-III' by D. A. Stephenson, R. Stevenson, TMS	USA: 65-86	Μελέτη αποβλίπτου
2000	Hwang, T. W., Evans, C. J., Malkin, S.	High Speed Grinding of Silicon Nitride With Electroplated Diamond Wheels, Part 2: Wheel Topography and Grinding Mechanisms	Journal of Manufacturing Science and Engineering	122/1 42-50	Μελέτη αποβλίπτου
2002	Jin, T., Stephenson, D. J., Corbett, J.	Burn threshold of high carbon steel in high efficiency deep grinding	Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture	216: 357-364	Ενεργειακά μοντέλα Μελέτη Αποβλίπτου
2003	Stephenson, D. J., Jin, T.	Physical basics in grinding	1st European Conference on Grinding, Aachen, Germany, 6-7 November, K. Werner, F. Klocke, E. Brinksmeier (eds.), Fortschritts-Berichte	VDI Reihe 2/643, VDI Verlag: 1301-1321	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα Μελέτη αποβλίπτου HEDG
2004	Rentsch, R.	Molecular Dynamics for abrasive process simulation	chapter 7 in Tribology of abrasive machining processes, eds. Marinescu, Rowe, Dimitrow, Inasaki, William Andrew Publ., NY	USA: 239-264	Μελέτη αποβλίπτου
2005	Arrazola, P.J., Villar, A., Ugarte, D., Meslin, F., Le Maitre, F., Marya.	Serrated Chip Prediction in Numerical Cutting Models	Proceedings: 8th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations	Chemnitz, Germany: 115-122	Μελέτη αποβλίπτου

2012	Klocke, F.	Modelling und simulation in grinding	1st European Conference on Grinding, Aachen, 6.-7. Fortschritt- Berichte VDI Reihe 2 Fertigungstechnik	8.1-8.27	Μελέτη αποβλήτου FEM
------	------------	--------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	-------------------------

Π.3. Δημοσιεύσεις στον υπολογισμό της ενέργειας κατά την λείανση

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1977	Maris, M.	Thermische aspekten van de oppervlakteintegriteit bij het slijpen	Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven		Θερμική ανάλυση ενεργειακά μοντέλα
1988	Lavine, A. S.	A simple model for convective cooling uring the grinding process	Journal of Engineering for Industry	110/1-6	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1988	Rowe, W. B., Pettit, J. A., Boyle, A., Moruzzi, J.L.	Avoidance of thermal damage in grinding and prediction of the damage threshold	Annals of the CIRP	37/1 327-380	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1989	Chen, C., Jung, Y., Inasaki, I.,	Surface,Cylindrical and Internal Grinding of Advanced Ceramics: Grinding Fundamentals and Applications	Journal of Engineering for Industry	39, 201-211	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα Τοπομορφία τροχού
1989	Lavine, A. S., Malkin, S., Jen, T. C.	Thermal aspects of grinding with CBN abrasives	Annals of the CIRP	38/1 557-560	Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση Υγρό κοπής
1989	Malkin, S.,	Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives	Ellis Horwood Limited, Chichester		Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1991	Bifano, T. G., Fawcett, S. C.	Specific Grinding Energy as an In-Process Control Variable for Ductile-Regime Grinding	Journal of Precision Engineering	13, 4 256-262	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα
1992	Tönshoff, H. K., Peters, J., Inasaki, T., Paul, T.	Modelling and Simulation of Grinding Processes	Annals of the CIRP	41/2: 677-688	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα FEM
1996	Westkämper, E., Hoffmeister, H.-W., Weber, T.	Grinding Process Simulation with FEM	WGP (eds.): Production Engineering, Research and Development	III/2 45-48	Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση FEM
1999	Mayer Jr., J. E., Purushothaman, G.,	Model of grinding thermal damage for precision gear materials	Annals of the CIRP	48/1 251-254	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα

	Gopalakrishnan, S.				
1999	Schneider, M.	Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen	Dissertation, University of Dortmund		Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση FEM
2002	Jin, T., Stephenson, D. J., Corbett, J.	Burn threshold of high carbon steel in high efficiency deep grinding	Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture	216: 357-364	Ενεργειακά μοντέλα Μελέτη Αποβλήτου
2003	Stephenson, D. J., Jin, T.	Physical basics in grinding	1st European Conference on Grinding, Aachen, Germany, 6-7 November, K. Werner, F. Klocke, E. Brinksmeier (eds.), Fortschritts-Berichte	VDI Reihe 2/643, VDI Verlag: 1301-1321	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα Μελέτη αποβλήτου HEDG
2003	Weinert, K., Schulte, M.	Kompensation der prozessbedingten Deformation beim Werkzeugschleifen	wt-online 93 7/8	550-554	Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση FEM
2004	Gentzen, J.	Anwendungspotentiale der Verfahren Schleifen, Superfinishen und Glattwalzen	In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch „Schleifen, Honen, Läppen und Polieren“, 61st ed.	Vulkan Verlag: 89-103	Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση FEM

Π.4. Δημοσιεύσεις στις οποίες έγινε χρήση πεπερασμένων στοιχείων FEM & MD για την ανάλυση της λείανσης

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1980	Lowin, R.	Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück	Dissertation, University of Aachen		FEM Ψυκτικό υγρό
1989	Landman, U., Luedtke, W. D., Nitzan, A.	Dynamics of Tip-Substrate Interactions in Atomic Force Microscopy	Surface Science	210 177- 184	εφαρμογές MD
1989	Yip, S., Wolf, D.	Atomistic Concepts for Simulation of Grain Boundary Fracture	Materials Science Forum	46 77-168	εφαρμογές MD
1990	Kohlhoff, S., Schmauder, S., Gumbsch, P.	Coupled Atomistic-Continuum Calculations of Near Interface Cracking in Metal/ Ceramic Composites, Bonding, Structure and Mech. Prop. of Metal-Ceramic Interfaces	By Rühle et al., Pergamon Press, Oxford	63-70	FEM (συνδυασμός με MD)
1991	Belak, J., Stowers, I. F.	The Indentation and Scraping of a Metal Surface: A Molecular Dynamics Study	Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic	Eds.: Singer, Pollock, ASI Series E, 220: 1-10.	εφαρμογές MD
1991	Hoover, W. G.	Computational Statistical Mechanics	Elsevier Science Publ., Oxford-New York Tokyo	Studies in Modern Thermodynamics 11	εφαρμογές MD
1991	Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., Ohmori, G.	An Atomistic Analysis of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning	Annals of the CIRP	40/1 551-554	εφαρμογές MD
1992	Tönshoff, H. K., Peters, J., Inasaki, T., Paul, T.	Modelling and Simulation of Grinding Processes	Annals of the CIRP	41/2 677-688	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα FEM

1992	Wobker, H.-G.	Schleifen keramischer Werkstoffe	Dissertation, University of Hannover		Θερμική ανάλυση FEM
1992	Boercker, D. B., Belak, J., Stowers, I. F., Donaldson, R. R., Siekhaus, W. J.	Simulation of Diamond Turning of Silicon Surfaces	Proc. of ASPE, Oct. 1992, Florida	USA: 45-48	εφαρμογές MD
1993	Inasaki, I., Tönshoff, H. K., Howes, T. D.	Abrasive Machining in the Future	Annals of the CIRP	42/2 723-732	εφαρμογές MD
1994	Okuyama S., Nishihara T., Kawamura S., Hanasaki S.	Study on the Geometrical Accuracy in Surface Grinding - Thermal Deformation of Workpiece in Traverse Grinding	Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.	28/4 13-23	Θερμική ανάλυση FEM
1994	Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H.	Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis	Annals of the CIRP	43/1 51-54	εφαρμογές MD
1995	Guo C., Malkin S.	Analysis of Transient Temperatures in Grinding	Journal of Engineering for Industry 117:	571-577	Θερμική ανάλυση FEM
1996	Hoffmeister, H.-W.	Hohe Zerspanungsleistungen durch Schleifen mit CD (Continuous Dressing) – sichere, werkstoffangepasste und wirtschaftliche Prozeßführung	Dissertation, TU Braunschweig		FEM
1996	Rentsch, R.	Process modeling by means of molecular dynamics (MD)	Int. Conf. on Machining of Advanced Materials, Aachen, VDI-Berichte	1276: 175-195	
1996	Westkämper, E., Hoffmeister, H.-W., Weber, T.	Grinding Process Simulation with FEM	WGP (eds.): Production Engineering, Research and Development	III/2 45-48	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα FEM

1998	Li, J., Liao, D., Yip, S.	Coupling Continuum to MD Simulation with Minimal Disturbance: Thermodyn. Field Estimator, Optimal Particle Controller and Buffer-Zone Feedback	MRS, 538, Boston, USA: 197		FEM (συνδυασμός με MD)
1998	Ortiz, M., Knap, J.	The Bridging of Atomistic and Continuum Spatial and Temporal Scales	MRS, 538, Dec., Boston, USA		FEM (συνδυασμός με MD)
1999	Hoffmeister, H.-W., Weber, T.	Simulation of Grinding by means of the Finite Element Analysis	3rd International Machining & Grinding, Cincinnati, USA	4.-7.10	Θερμική ανάλυση FEM
1999	Schneider, M.	Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen	Dissertation, University of Dortmund		Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα FEM
1999	Flekkov, E. G., Coveney, P. V.	From Molecular Dynamics to Dissipative Particle Dynamics	Phys. Rev. Letters	83/9: 1775-1778	εφαρμογές MD
2001	Kleppmann, W.	Taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren	Carl Hanser Verlag		FEM
2001	Weber, Th.	Simulation des Flachprofilschleifens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	Dissertation TU Braunschweig		Θερμική ανάλυση FEM
2001	Moulik, P. N., Yang, H. T. Y.	Simulation of thermal stresses due to grinding	International Journal of Mechanical Sciences	43/3: 831-851	Θερμική ανάλυση FEM
2002	Kloß, H., Santner, E., Dmitriev, A. I., Shilko, E. V., Psakhie, S. G., Popov, V. L.	2D und 3D Simulationsrechnungen mit der Methode der bewegten zellularen Automaten (bzA) zur Bewertung des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Werkstoffen, in Reibung, Schmierung und Verschleiß, Band 1	Tribologie Fachtagung der GfT, Sept. 2002	32/1-32/9	εφαρμογές MD

2003	Wang, L., Qin, Y., Liu, Z. C., Ge, P. Q., Gao, W.	Computer simulation of a workpiece temperature field during the grinding process	Proc. of the institution of mechanical engineers, Part B	217/7 953-959	FEM Υγρό κοπής
2003	Weinert, K., Schulte, M.	Kompensation der prozessbedingten Deformation beim Werkzeugschleifen	wt-online 93 7/8	550-554	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα FEM
2004	Denkena, B., Becker, J.C., Catoni, F.	3rd Int. Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds, 7th International Symposium on Advances in Abrasive Technology Bursa	Turkey – June 17-19	283-287	FEM
2004	Gentzen, J.	Anwendungspotentiale der Verfahren Schleifen, Superfinishen und Glattwalzen	In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch „Schleifen, Honen, Läppen und Polieren“, 61st ed.	Vulkan Verlag: 89-103	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα FEM
2004	Jin, T., Stephenson, D. J.	Three dimensional finite element simulation of transient heat transfer in high efficiency deep grinding	Annals of the CIRP	53/1 259-262	Θερμική ανάλυση FEM HEDG
2004	Schulte, M.	Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln	Dissertation, University of Dortmund		FEM
2004	Rentsch, R.	Molecular Dynamics for abrasive process simulation	chapter 7 in Tribology of abrasive machining processes, eds. Marinescu, Rowe, Dimitrow, Inasaki, William Andrew Publ., NY	USA: 239-264	εφαρμογές MD Μελέτη αποβλήτου
2004	Weinert, K., Schulte, M.	Profilschleifen hoch harter Cr- und PM-Legierungen mit konventionellen Schleifmitteln	In: Hoffmeister, H.- W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch „Schleifen, Honen, Läppen und Polieren“. 61st ed. Vulkan Verlag	128-136	FEM Θερμική ανάλυση

2005	Chryssolouris, G., Tsirbas, K., Salonitis, K.	An Analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind Hardening	SME Jour. of Manu. Processes	7/1: 1-9	FEM Θερμική ανάλυση
2005	Hoffmeister, H.-W., Maiz, K., Machanova, I.	Einfluss der Kühlschmierbedingungen beim Flachs Schleifen	In: Hoffmeister, H.-W., Tönshoff, H.-K. (eds.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 62nd ed.	Vulkan Verlag: 11-20	FEM
2005	Chryssolouris, G., Tsirbas, K., Salonitis, K.	An Analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind Hardening	SME Jour. of Manu. Processes	7/1: 1-9	Θερμική ανάλυση FEM
2012	Klocke, F.	Modelling und simulation in grinding	1st European Conference on Grinding, Aachen, 6.-7. November, Fortschritt- Berichte VDI Reihe 2 Fertigungstechnik	8.1-8.27	Μελέτη αποβλήτου FEM

Π.5. Δημοσιεύσεις με κινηματικό – γεωμετρικά μοντέλα λείανσης

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1982	König, W., Steffens, K.	A Numerical Method to Describe the Kinematics of Grinding	Annals of the CIRP	31/1: 201-204	Θερμική ανάλυση Κινηματικο-γεωμετρική
1983	Steffens, K.	Thermomechanik des Schleifens	Dissertation, RWTH Aachen		Κινηματικο-γεωμετρική
1986	Goerne, J.	Simulationsmodell zur Prozessauslegung beim Schrägeinsteichschleifen	Dissertation, RWTH Aachen		Κινηματικο-γεωμετρική
1991	Fawcett, S.-C., Dow, T.-A.	Development of a model for precision contour grinding of brittle materials	Precision Engineering 13/4	270- 276	Κινηματικο-γεωμετρική
1991	Warnecke, G., Spiegel, P., Merz, R.	Kinematically Defined Dressing Of Superabrasive Wheels	Transactions of NAMRI/ SME	19	Κινηματικο-γεωμετρική
1992	Fawcett, S.-C., Dow, T.-A.	Influence of wheel speed on surface finish and chip geometry on precision contour grinding	Precision Engineering 14/3	160-167	Κινηματικο-γεωμετρική
1994	Merz, R.	Konzept zur Auswahl der Abrichtbedingungen bei der Einsatzvorbereitung konventioneller Schleifscheiben mit Diamantprofilrollen	FBK-Produktionstechnische Berichte, 15, Eds.: G. Warnecke, Kaiserslautern		Κινηματικο-γεωμετρική
1994	Spiegel, P.	Einsatzvorbereitung kunstharzgebundener CBN-Schleifscheiben	FBKProduktionstechnische Berichte Vol 15, Eds.: G. Warnecke, Kaiserslautern		Κινηματικο-γεωμετρική
1995	Domala, K.-V., Salisbury, E.-J., Moon, K.-S., Sutherland, J.-W.	A three-dimensional geometric model for the surface texture generated by a single pass of the wheel in a surface grinding process	ASME Manufacturing Science and Engineering	MED-2-1/MH-3-1: 363-375	Κινηματικο-γεωμετρική
1996	Inasaki, I.	Grinding process simulation based on the Wheel topography Measurement	Annals of the CIRP	45/1: 347-350	Κινηματικο-γεωμετρική Τοπομορφία τροχού

1998	Chen, X., Rowe, W.-B., Mills, B., Allanson, D.-R.,	Analysis and simulation of the grinding process Part IV: Effects of wheel wear	International Journal of Machine Tools and Manufacture	38/1/2: 41-49	Κινηματικό-γεωμετρική
1998	Warnecke, G., Zitt, U.	Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Processes	Annals of the CIRP	47/1: 265-270	Κινηματικό-γεωμετρική
1999	Zitt, U.-R.	Modellierung und Simulation von Hochleistungsschleifprozessen	Dissertation, University of Kaiserslautern		Κινηματικό-γεωμετρική
2000	Cooper, W.-L., Lavine, A.-S.	Grinding Process Size Effect and Kinematics Numerical Analysis	Journal of Manufacturing Science and Engineering 122	59-69	κινηματικό-γεωμετρική
2000	Kempa, B.	Zahnflankenprofilschleifen mit galvanisch-gebundenem CBN	Dissertation, RWTH Aachen		Κινηματικό-γεωμετρική Τοπομορφία τροχού
2002	Tuerich, A.	Werkzeug-Profilherzeugung für das Verzahnungsschleifen	Dissertation, University of Hannover		Κινηματικό-γεωμετρική
2002	Zhou, X., Xi, F.	Modelling and predicting surface roughness of the grinding process	International Journal of Machine Tools and Manufacture	42: 969-977	Κινηματικό-γεωμετρική
2004	Becker, J.-C.	Bahngesteuertes Schleifen von Kurbelwellen	Dissertation IFW Hannover		Κινηματικό-γεωμετρική

Π.6. Δημοσιεύσεις με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ANN

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1986	Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J.	Learning Internal Representations by Error Propagation, in Rumelhart, D.E. and McClelland, J. L., eds., Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition	Cambridge, MA, The MIT Press.	318-362	ANN
1989	Moody, J., Darken, C. J.	Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units	Neural Computation	1 281-294	ANN
1990	Poggio, T., Girosi F.	Networks for Approximation and Learning	Proceedings of the IEEE	78 1481-1497	ANN
1992	Sakakura, M., Inasaki, I.	A neural network approach to the decision-making process for grinding operations	Annals of the CIRP	41/1 353–356	ANN
1994	Liao, T. W., Chen, L. J.	A Neural Network Approach for Grinding Processes: Modelling and Optimization	Int. Journal of Machine Tools and Manufacture	34/7 919-937	ANN
1994	van der Smagt, P. P.	Minimization Methods for Training Feedforward Networks	Neural Networks	7 1-11	ANN
1997	Grabec, I. Sachse, W.	Synergetics of Measurement, Prediction and Control, Springer Verlag	Heidelberg, Germany		ANN
1998	Haykin, S.	Neural Networks: A Comprehensive Foundation	Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ		ANN
1998	Liao, T.W.	Flexural Strength of Creep Feed Ground Ceramic: General Pattern, Ductile-Brittle Transition and MLP Modeling	International Journal of Machine Tools and Manufacture	38/4 257-275	ANN
1999	Heinzel, C.	Methoden zur Untersuchung und Optimierung der Kühlschmierung beim Schleifen	Dissertation, University of Bremen		ANN

1999	Inasaki, I.	Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Processes	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	15: 730-736	ANN Τοπογραφία τροχού
2002	Govekar, E., Baus, A., Gradišek, J., Klocke, F., Grabec, I.	A New Method for Chatter Detection in Grinding	Annals of the CIRP	51/1 267-270	ANN
2003	Lee, C. W., Choi, T., Shin, Y. C.	Intelligent Model-Based Optimization of the Surface Grinding Process for Heat-Treated 4140 Steel Alloys With Aluminum Oxide Grinding Wheels	ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering	125/1 65-76	ANN

Π.7. Δημοσιεύσεις λείανσης με υγρό κοπής

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1968	DesRuisseaux, N. R.	Thermal aspects of grinding processes	Dissertation, University of Cincinnati		Υγρό κοπής
1970	DesRuisseaux, N. R., Zerkle, R. D.	Thermal analysis of the grinding process	Jour. of Engineering for Industry	92, 428-434	Υγρό κοπής
1980	Lowin, R.	Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück	Dissertation, University of Aachen		Υγρό κοπής FEM
1989	Lavine, A. S., Malkin, S., Jen, T. C.	Thermal aspects of grinding with CBN abrasives	Annals of the CIRP	38/1 557-560	Ενεργειακά μοντέλα Θερμική ανάλυση Υγρό κοπής
1992	Engineer, F., Guo, C., Malkin, S.	Experimental measurement of fluid flow through the grinding zone	Journal of Engineering for Industry	114 61-66	Υγρό κοπής
1992	Guo, C., Malkin, S.	Analysis of fluid flow through the grinding zone	Journal of Engineering for Industry	114: 427-434	Υγρό κοπής
2000	Hoffmeister, H.-W., Weber Th.	Temperaturfeldentwicklung beim Flachprofilschleifen, Kolloquium Umweltverträgliches Schleifen - Ökologie als Ökonomie der Zukunft	Ergebnisbericht des Verbundprojektes "Umweltverträgliches Schleifen" WZL Aachen	Mai 18-19 187-200	Θερμική ανάλυση Υγρό κοπής
2001	Brinksmeier, E., Heinzl, C., Meyer, L.	Coolant Supply Conditions and Their Effect on the Workpiece Surface Layer in Grinding	Annals of the WGP	VIII/1 163-166	Υγρό κοπής
2003	Wang, L., Qin, Y., Liu, Z. C., Ge, P. Q., Gao, W.	Computer simulation of a workpiece temperature field during the grinding process	Proc. of the institution of mechanical engineers, Part B	217/7 953-959	FEM Υγρό κοπής
2004	Hesselbach, J., Hoffmeister, H.-W., Maiz K., Machanova I.	Surface grinding with cryogenics	Production Engineering	XI/2 1-4	Θερμική ανάλυση Υγρό κοπής

2005	Gviniashvili, V., Webster, J., Rowe, B.	Fluid Flow and pressure in the Grinding Wheel- Workpiece Interface	Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Sciences and Engineering	127, Feb.: 198-205	Υγρό κοπής
2005	Nguyen, T., Zhang, L. C.	Modelling of the mist formation in a segmented grinding wheel system	Int. J. of Machine Tools & Manufacture	45 21-28	Υγρό κοπής

Π.8. Δημοσιεύσεις που περιγράφουν τον λειαντικό τροχό και την τοπομορφία του

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
1968	Yoshikawa, H., Sata, T.	Simulated Grinding Process by Monte Carlo Method	Annals of the CIRP	16 297-302	Μελέτη αποβλίπτου Τοπογραφία τροχού
1970	Vickerstaff, T. J.	Diamond dressing – its effect on work surface roughness	Ind. Diamond Review	30 260-267	Τοπογραφία τροχού
1970	Yoshikawa, H., Peklenik, J.	Three dimensional simulation techniques of the grinding process – II, Effects of grinding conditions and wear on the statistical distribution of geometrical chip parameters	Annals of the CIRP	18/1: 361-366	Τοπογραφία τροχού
1981	Suto, T., Sata, T.	Simulation of grinding process based on wheel surface characteristics	Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering	15, 27-34	Τοπομορφία τροχού
1983	Steffens, K., König, W.	Closed loop simulation of grinding	Annals of the CIRP	32/1: 255-258	Θερμική ανάλυση Τοπογραφία τροχού
1989	Chen, C., Jung, Y., Inasaki, I.,	Surface Cylindrical and Internal Grinding of Advanced Ceramics: Grinding Fundamentals and Applications	Journal of Engineering for Industry	39, 201–211	Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα Τοπογραφία τροχού
1994	Osterhaus, G.	Verfahrensübergreifende Simulation und Auslegung von Schleifprozessen	Dissertation, RWTH Aachen		Τοπογραφία τροχού
1996	Chen, X., Rowe, W.-B.,	Analysis and Simulation of the Grinding Process Part I: Generation of the Grinding Wheel Surface	International Journal of Machine Tools and Manufacture	36 871-882	Τοπογραφία τροχού
1996	Chen, X., Rowe, W.-B.	Analysis and Simulation of the Grinding Process Part II: Mechanics of Grinding	Int. Journal of Machine Tools and Manufacture	36 883-896	Τοπογραφία τροχού
1996	Chen, X., Rowe, W.-B., Mills, B., Allanson, D.-R.	Analysis and simulation of the grinding process Part III: Comparison with experiment	International Journal of Machine Tools and Manufacture	36/8 897-906	Τοπογραφία τροχού

1996	Inasaki, I.	Application of the Simulation technologies for grinding operations	VDIBerichte	1276: 197-211	Τοπογραφία τροχού Κινηματικό-γεωμετρική
1997	Kim, N. K., Guo, C., Malkin, S.	Heat Flux Distribution and Energy Partition In Creep-Feed Grinding	Annals of the CIRP	46/1: 227-232	Τοπογραφία τροχού
1998	Chen, X., Rowe, W.-B., Mills, B., Allanson, D.-R.,	Analysis and simulation of the grinding process Part IV: Effects of wheel wear	International Journal of Machine Tools and Manufacture	38/1/2: 41-49	Κινηματικό-γεωμετρική Τοπογραφία τροχού
1999	Inasaki, I.	Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Processes	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	15: 730-736	ANN Τοπογραφία τροχού
2000	Badger, J., Torrance, A.	A comparison of two models to predict the grinding force from wheel surface topography	Int. Journal of Machine Tools and Manufacture	40: 1099-1120	Τοπογραφία τροχού
2000	Karpuschewski, B., Wehmeier, M., Inasaki, I.	Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors	Annals of the CIRP	49/1: 235-240	Τοπογραφία τροχού
2000	Kempa, B.	Zahnflankenprofilschleifen mit galvanisch-gebundenem CBN	Dissertation, RWTH Aachen		Κινηματικό-γεωμετρική Τοπογραφία τροχού
2001	Nathan, R. D., Vijayaraghavan, L., Krishnamurthy, R.	Intelligent Estimation of Burning Limits to Aid Cylindrical Grinding Cycle Planning	International Journal of Vehicle Design	8: 1/48-1/59	Τοπογραφία τροχού
2003	Aurich, J.-C., Braun, O., Warnecke, G.	Development of a Superabrasive Grinding Wheel With Defined Grain Structure Using Kinematic Simulation	Annals of the CIRP	52/1: 275-280	Τοπογραφία τροχού
2004	Chen, H., Zhang, D., Hagiwara, I.,	Parallel Molecular Dynamics Simulation of Nanoscale Grinding	Proc. of the 4th int. euspen conference May 31st-June 2nd	163-164	Τοπογραφία τροχού

Π.9. Δημοσιεύσεις που περιγράφουν τη Λείανση Μεγάλου Βάθους και Υψηλής Απόδοσης (HEDG)

Έτος	Συγγραφείς	Τίτλος Εργασίας	Περιοδικό δημοσίευσης, έκδοση	Τόμος/σελίδες	Περιγραφή
2001	Rowe, W. B., Jin, T.	Temperatures in High Efficiency Deep Grinding (HEDG)	Annals of the CIRP	50/1 205-208	HEDG Θερμική ανάλυση
2001	Moulik, P. N., Yang, H. T. Y.	Simulation of thermal stresses due to grinding	International Journal of Mechanical Sciences	43/3: 831-851	Θερμική ανάλυση FEM
2002	Jin, T., Stephson, D. J., Corbett, J.	Burn threshold of high carbon steel in high efficiency deep grinding	Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture	216 357-364	HEDG
2003	Stephenson, D. J., Jin, T.	Physical basics in grinding	1st European Conferenc on Grinding, Aachen, Germany, 6-7 November, K. Werner, F. Klocke, E. Brinksmeier (eds.), Fortschritts-Berichte	VDI Reihe 2/643, VDI Verlag: 1301-1321	Μελέτη αποβλίπτου Θερμική ανάλυση Ενεργειακά μοντέλα HEDG
2004	Jin, T., Stephson, D. J.	Three dimensional fine element simulation of transient heat transfer in high efficiency deep grinding	Annals of the CIRP	53/1 259-262	Θερμική ανάλυση FEM HEDG