



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

CNC - ΚΟΠΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ & ΑΝΤΟΧΗ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ



ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΕ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΦΑΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΜΗ06264

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΟΦΙΑ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Κατάλογος εικόνων	6
1. Εισαγωγή	7
2. Τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης (ΤΠ) και κατασκευής	8
2.1 Γενική ορολογία	8
2.2 Προσθετικές διεργασίες	11
2.3 Διαδικασίες αφαίρεσης	13
2.4 Κατεργασία CNC για ταχεία παραγωγή και κατασκευή	15
2.4.1 Επισκόπηση της CNC-RP	15
2.4.2 Στρατηγικές CNC-RP	17
2.4.3 Εξελιξείς στις διαδικασίες CNC-RP	26
3. Εργαλεία κοπής	35
3.1 Βελτίωση των εργασιών εκχόνδρισης	35
3.1.1 Πρόσθετοι προσανατολισμοί για εργασίες εκχόνδρισης	36
3.1.2 Προσομοίωση της διάρκειας πριονίσματος	38
3.2 Ενσωμάτωση εργαλείων σε εργασίες φινιρίσματος	41
3.2.1 Προσαρμοστικότητα των κοπτικών εργαλείων	42
3.3 Σχεδιασμός διαδικασιών κατεργασίας CNC	43
3.4 Προσανατολισμοί για κατεργασίες εκχόνδρισης σε CNC-RM	44
3.5 Πολλαπλά εργαλεία για εργασίες φινιρίσματος σε CNC-RM	48
3.6 Επιλογή εργαλείων φινιρίσματος	51
3.7 Types of CNC Cutting Tool Materials	58
4. Έξυπνα εργαλεία κοπής και έξυπνη κατεργασία	61
4.1 Προσεγγίσεις ανάπτυξης	63
4.2 Έξυπνα εργαλεία κοπής με βάση τη δύναμη	64
4.2.1 Έξυπνο εργαλείο κοπής με χρήση πιεζοηλεκτρικών ταινιών	64
4.2.2 Αισθητήρες επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW) ευφυούς κοπτικού εργαλείου καινοτομίας	65
4.2.3 Σχεδιασμός ευφών κοπτικών εργαλείων ευαίσθητων στη θερμοκρασία	66
4.2.4 Ταχεία συσκευή Servos (FTS)	67
5. Ανθεκτικότητα των κοπτικών εργαλείων	68

5.1 Κρίσιμες πρώτες ύλες (CRM)	71
5.2 Προσπάθειες επέκτασης της διάρκειας ζωής των εργαλείων	76
5.3 Προηγμένες τεχνικές κατεργασίας	80
5.3.1 Κατεργασία με υποβοήθηση λέιζερ (κατεργασία με θερμική υποβοήθηση)	80
5.3.2 Κρυογενική κατεργασία	82
5.2.3 Κατεργασία με υποβοήθηση κραδασμών	83
5.2.4 Κατεργασία με επιφανειακά ελαττώματα	84
5.4 Προστατευτικά επιχρίσματα	85
5.4.1 Επικαλύψεις διαμαντιού και άνθρακα τύπου διαμαντιού (DLC)	85
5.4.2 Ενώσεις μεταβατικών μετάλλων	86
5.4.3 Νανοσύνθετες εξαιρετικά ανθεκτικές επιστρώσεις	87
5.4.4 Επικαλύψεις θερμικής μόνωσης	87
5.5 Νέα εργαλεία και υλικά	88
6. Συμπεράσματα	90
Βιβλιογραφία	92

Περίληψη

Οι τάσεις της ταχείας κατασκευής (TK) – Rapid Manufacturing (RM) έχουν επηρεάσει πολυάριθμες εξελίξεις τεχνολογιών κυρίως σε προσθετικές διεργασίες. Ωστόσο, τα προβλήματα συμβατότητας υλικών και ακρίβειας των προσθετικών τεχνικών έχουν περιορίσει τη δυνατότητα κατασκευής προϊόντων τελικού χρήστη. Οι πιο καθιερωμένες μέθοδοι κατασκευής, όπως η κατεργασία με αριθμητικό έλεγχο από υπολογιστή (CNC), μπορούν να προσαρμοστούν για τη TK υπό ορισμένες συνθήκες. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στα διάφορα κοπτικά εργαλεία, στη διαδικασία επιλογής τους, στην επαγωγή έξυπνων κοπτικών εργαλείων και στη βελτίωση των κατεργασιών εκχόνδρισης και φινιρίσματος και στην ενσωμάτωση των κοπτικών εργαλείων στην κατεργασία CNC, ώστε να καταστεί βιώσιμη για εφαρμογές TK. Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η περαιτέρω προσαρμογή της κατεργασίας CNC στην ταχεία κατασκευή και πιστεύεται ότι η εφαρμογή των προτεινόμενων προσεγγίσεων θα επιταχύνει την παραγωγή, θα βελτιώσει την ποιότητα των τεμαχίων και θα καταστήσει τη διαδικασία πιο κατάλληλη για TK. Πραγματοποιείται περαιτέρω έρευνα για τη διερεύνηση της ανθεκτικότητας των κοπτικών εργαλείων και των υλικών και διατυπώνονται προτάσεις προς την κατεύθυνση της συντήρησης των εργαλείων.

Abstract

Rapid manufacturing (RM) trends have influenced numerous technological advancements, primarily in additive processes. However, material compatibility and precision issues have limited additive techniques' ability to manufacture end-user products. In certain instances, conventional manufacturing techniques such as Computer Numerical Control (CNC) machining can be adapted for RM. This thesis examines various cutting tools, their selection process, the introduction of smart cutting tools, the improvement of roughing and finishing operations, and the integration of cutting tools in CNC machining to make it viable for RM applications. The objective of this study is to further adapt CNC machining for use in rapid manufacturing. It is anticipated that implementing the suggested strategies will accelerate production, improve part quality, and make the process more suitable for RM. Further research is conducted to examine the durability of cutting tools and materials, and suggestions are made for preserving the tools.

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Ορολογίες της ταχείας πρωτοτυποποίησης (Fischer 2013).....	9
Εικόνα 2 Θεμελιώδεις διεργασίες παραγωγής (Onuh et al. 1999).....	11
Εικόνα 3 Κοινή ροή διεργασιών σε προσθετικές διεργασίες.....	12
Εικόνα 4 Ροή διαδικασίας κατεργασίας CNC (Nikam 2005).....	15
Εικόνα 5 Ρύθμιση για το CNC-RP (Wysk 2008).....	16
Εικόνα 6 Ορολογία του μοντέλου slice (Frank 2003).....	18
Εικόνα 7 (α) Εύρος ορατότητας για το τμήμα = [Θa, Θb] και (β) Εύρος ορατότητας για πολλαπλές αλυσίδες = [Θa, Θb], [Θc, Θd] (Frank et al. 2004).....	19
Εικόνα 8 Ανάλυση ορατότητας για τον προσδιορισμό των προσανατολισμών κοπής.....	20
Εικόνα 9 Λεπτοί ιστοί σε σχηματισμό (Renner 2008).....	22
Εικόνα 10 Ο προσδιορισμός του ορίου περιορισμού της διαδρομής εργαλείων.....	23
Εικόνα 11 Ακολουθία κατεργασίας σε διεργασίες CNC-RP (Frank 2007).....	24
Εικόνα 12 Προσέγγιση στερέωσης σε διεργασίες CNC-RP.....	25
Εικόνα 13 Καθορισμός κατάλληλου μήκους αποθέματος (Frank 2007).....	26
Εικόνα 14 Ανάπτυξη διαδικασιών CNC-RP.....	27
Εικόνα 15 (α) Σύνολο προσανατολισμών που προτείνονται από την ανάλυση ορατότητας, (β) Λύση με χρήση αρχικών γωνία 270ο (Renner 2008).....	29
Εικόνα 16 Οι παράμετροι σχεδιασμού της θυσιαστικής στήριξης αποτελούνται από το μήκος (I1, I2, I3, I4), το σχήμα (κυλινδρικό), το μέγεθος (r1, r2, r3, r4), την ποσότητα (4 στήριξεις) και τις θέσεις (Boonsuk et al. 2009).....	33
Εικόνα 17 Χοντρό βάθος κοπής σε πρόσθετους προσανατολισμούς προσέγγισης.....	37
Εικόνα 18 Μοντέλο Toy Jack (Frank et al. 2006).....	39
Εικόνα 19 (α) κατευθύνσεις κατεργασίας που χρησιμοποιούνται σε προσανατολισμούς ορατότητας και β) πρόσθετες προσανατολισμοί (10ο /190ο) για κατεργασίες εκχόνδρισης.....	41
Εικόνα 20 Σχηματισμός λεπτών ιστών και λεπτών χορδών (Petrzelka et al. 2010).....	45
Εικόνα 21 Πρώτη κατεργασία εκχόνδρισης (Frank 2007).....	46
Εικόνα 22 Μη κατεργασμένες περιοχές (Li et al. 2006).....	51
Εικόνα 23 Shell Mill.....	52
Εικόνα 24 Square End Mill.....	52
Εικόνα 25 Τα τρυπάνια διατίθενται σε πολλά τυποποιημένα μεγέθη.....	55
Εικόνα 26 Τα πριόνια κοπής έχουν πολλές εφαρμογές.....	57
Εικόνα 27 Κατανομή της παγκόσμιας αγοράς κοπτικών εργαλείων ανά τεχνολογία κοπής (α) και ανά υλικό τεμαχίου (β), όπως παρουσιάστηκε από την Dedalus Consulting (Diaz et al., 2013).....	74
Εικόνα 28 Σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία κατεργασίας. (α) Κατεργασία με θερμική υποβοήθηση [46]- (β) κρυογενική κατεργασία [47]- (γ) σχηματικό διάγραμμα για την απεικόνιση του μηχανισμού της κατεργασίας με υποβοήθηση δόνησης [48].....	81
Εικόνα 29 Παγκόσμια αγορά κοπτικών εργαλείων από τσιμεντοκαρβίδιο (Diaz et al., 2013).....	85

1. Εισαγωγή

Οι μέθοδοι ταχείας κατασκευής έχουν επηρεάσει σημαντικά την επανάσταση στις διαδικασίες κατασκευής τις τελευταίες δεκαετίες. Κατά την πρώιμη φάση εισαγωγής, η ταχεία πρωτοτυποποίηση (RP) χρησιμοποιήθηκε για να βοηθήσει στην ανάπτυξη νέων προϊόντων, ιδίως στην κατασκευή πρωτότυπων. Η μέθοδος επιτρέπει τη διενέργεια ανάλυσης και αξιολόγησης σε ένα φυσικό μοντέλο. Επιπλέον, μπορούν να γίνουν αλλαγές κατά τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης του προϊόντος και η τεχνολογία έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο. Σύμφωνα με τη ροή της διαδικασίας στην ανάπτυξη νέων προϊόντων, είναι εφικτή η βελτίωση του εξαρτήματος κατά τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης, επειδή το κόστος είναι χαμηλό και οι επιπτώσεις στις επόμενες διαδικασίες είναι λίγες. Αρκετές εξελίξεις, ιδίως στις προσθετικές διαδικασίες, οδήγησαν στην εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής για την παραγωγή τελικών προϊόντων και ο όρος αναβαθμίστηκε σε ταχεία κατασκευή (rapid manufacturing - RM) (Driscoll 2008, Eyers et al. 2010). Αυτά τα διακριτά οφέλη έχουν οδηγήσει σε σημαντικό ενδιαφέρον της βιομηχανίας για την εφαρμογή της τεχνολογίας. Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογία RP εξακολουθεί να αγωνίζεται για την αντιμετώπιση ζητημάτων όπως η ποιότητα και η ακρίβεια των εξαρτημάτων, τα υλικά, οι μέθοδοι επεξεργασίας και το κόστος. Απαιτούνται πρόσθετες βελτιώσεις και πιστεύεται ότι άλλες καθιερωμένες τεχνικές κατασκευής, όπως η κατεργασία, μπορούν να προσαρμοστούν για εφαρμογές RP και RM.

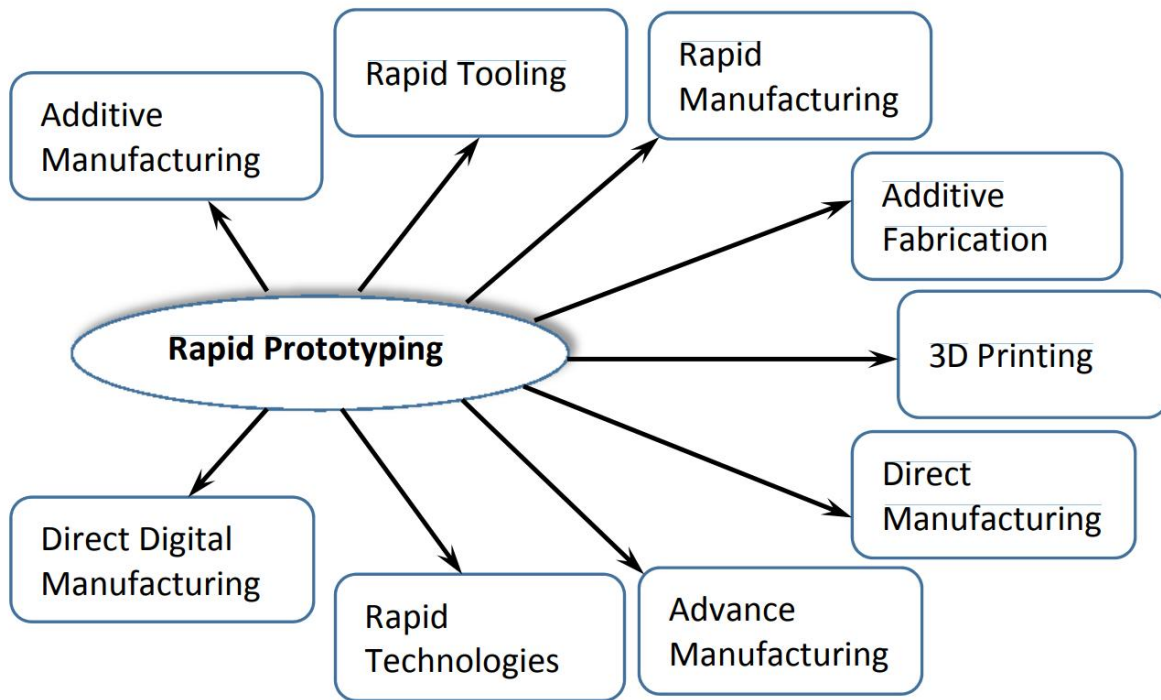
Η παρούσα εργασία έχει την ακόλουθη διάρθρωση: Το κεφάλαιο 2 αρχίζει με μια συζήτηση των προηγούμενων εξελίξεων που αφορούν τις διαδικασίες RP. Με βάση τις προσθετικές και τις αφαιρετικές διεργασίες, περιγράφονται πολυάριθμες διαδικασίες. Στη συνέχεια, αναφερομαστε στα διαφορα εργαλεία κοπής και πώς αυτά μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορες βιομηχανικές εγασίες. Έπειτα ειδική αναφορά γίνεται στα έξυπνα εργαλεία κοπής τα οποία και θα απασχολήσουν έντονα την επόμενη δεκαετία ενώ επιπρόσθετα αναφερόμαστε εκτενώς στην αντοχή και την ανθεκτικότητα των εργαλείων κοπής. Τέλος, πραγματοποιείται μία συζήτηση βασισμένη στα κρισιότερα ευρήματα της εργασίας.

2. Τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης (ΤΠ) και κατασκευής

2.1 Γενική ορολογία

Το RP είναι μια συλλογή τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων από αριθμητικές περιγραφές, όπως μοντέλα CAD. Η γρήγορη λειτουργία, η αυτοματοποίηση και ο υψηλός βαθμός προσαρμοστικότητας είναι τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τη μέθοδο (Noorani 2006). Η εισαγωγή της RP στη δεκαετία του 1980 προκάλεσε επανάσταση στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων (Karunakaran et al. 2000). Η εισαγωγή της πρώτης τεχνολογίας προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον από άλλες ομάδες, οι οποίες αργότερα πρότειναν μια σειρά άλλων καινοτόμων μεθόδων για τους σκοπούς της RP. Ως αποτέλεσμα, οι εφαρμογές επεκτάθηκαν ώστε να συμπεριλάβουν και άλλους τομείς που αναφέρονται με όρους όπως ταχεία πρωτοτυποποίηση, εργαλειοποίηση και κατασκευή (RPTM) (Chua et al. 2010). Η πλειονότητα των όρων δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει έναν συγκεκριμένο τομέα εφαρμογής. Η PM χρησιμοποιείται όταν η διαδικασία είναι ικανή να παράγει τελικά προϊόντα σε αντίθεση με τα απλά πρωτότυπα. Δεδομένου ότι το εξάρτημα κατασκευάζεται απευθείας, η PM ενδείκνυται κυρίως για παραγωγή χαμηλού όγκου. Η ταχεία πρωτοτυποποίηση και κατασκευή (RP&M) περιγράφει τον συνδυασμό των δύο τεχνολογιών. Το Σχήμα 1 παρουσιάζει διάφορους πρόσθετους όρους που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των διαδικασιών

RP.



Εικόνα 1 Ορολογίες της ταχείας πρωτοτυποποίησης (Fischer 2013)

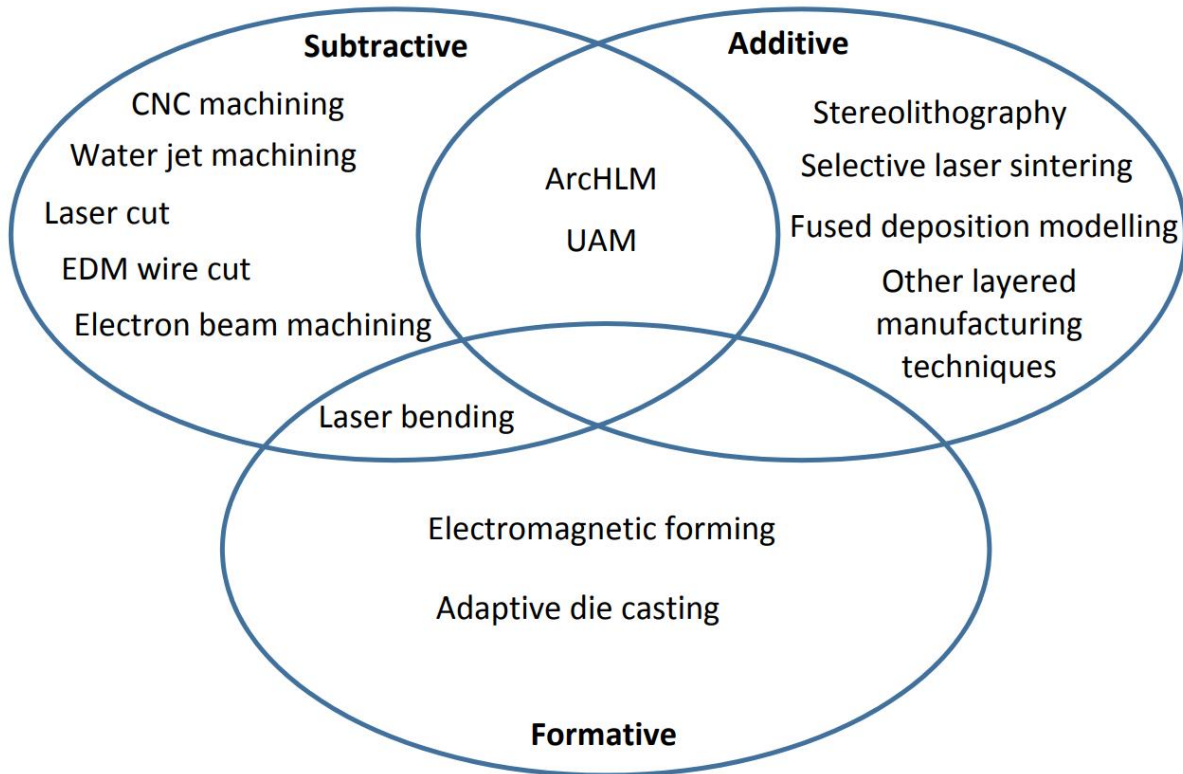
Υπάρχει ένας κοινός στόχος που μοιράζονται όλες οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για το RP, ο οποίος είναι η παραγωγή ακριβών εξαρτημάτων στον συντομότερο δυνατό χρόνο με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Σε γενικές γραμμές, τα οφέλη των τεχνολογιών RP μπορούν να εξεταστούν από διάφορες οπτικές γωνίες. Κατ' αρχάς, επιτρέπουν στους σχεδιαστές να ερμηνεύουν με φυσικό τρόπο τα σχέδιά τους και να πραγματοποιούν διαδικασίες επαλήθευσης. Από τη σκοπιά του σχεδιαστή, τα πρωτότυπα μπορούν να εξυπηρετήσουν δύο διαφορετικές λειτουργίες: την αξιολόγηση των αισθητικών ιδιοτήτων και τη δοκιμή της λειτουργικότητας των εξαρτημάτων (Lennings 2000).

Κατά συνέπεια, τα πρωτότυπα μπορούν να χωριστούν σε δύο διακριτές κατηγορίες. Η πρώτη είναι ένα μοντέλο στυλ που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αισθητικής αξίας των εξαρτημάτων. Η εξωτερική εμφάνιση είναι ζωτικής σημασίας και απαιτείται μια αξιόπιστη διαδικασία κατασκευής για τη δημιουργία του εξαρτήματος. Ο δεύτερος τύπος βασίζεται σε λειτουργικά πρωτότυπα τα οποία αναμένεται να αντέχουν στις δυνάμεις δοκιμής και να

ανταποκρίνονται με ακρίβεια στις καθορισμένες διαστάσεις του εξαρτήματος. Σε αυτή την περίπτωση, η μηχανουργική κατεργασία είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για την κατασκευή του πρωτοτύπου, επειδή μπορεί να επεξεργαστεί ανθεκτικά υλικά και να παράγει εξαρτήματα υψηλής ποιότητας (Salloum et al. 2009). Από την άλλη πλευρά, η ΕΠ βελτιώνει επίσης την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας μεταξύ των τμημάτων ενός οργανισμού. Η φύση ενός εύκολα ερμηνεύσιμου πρωτοτύπου διευκολύνει τη διασταυρούμενη επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μερών. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή έχει φέρει επανάσταση στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων. Επιτρέπει την πραγματοποίηση τεχνικών αλλαγών και τροποποιήσεων κατά τις πρώτες φάσεις του σχεδιασμού μειώνοντας το κόστος και τον χρόνο ανάπτυξης. Έτσι αποφεύγεται η σπατάλη πόρων και οι ανεπιθύμητες τροποποιήσεις κατά τα μεταγενέστερα στάδια, όταν το εξάρτημα είναι έτοιμο για παραγωγή. Επιπλέον, παραλληλίζει τις εργασίες που εμπλέκονται στην ανάπτυξη προϊόντων και μειώνει τη διάρκειά τους. Ο χρόνος και τα έξοδα ανάπτυξης προϊόντων μπορούν να μειωθούν έως και κατά 50% σε σύγκριση με τις διαδοχικές προσεγγίσεις (Chua et al. 2010).

Οι Onuh et al. (1999) χωρίζουν τις διαδικασίες παραγωγής σε τρεις διακριτές κατηγορίες με βάση τις αφαιρετικές, τις προσθετικές και τις διαμορφωτικές διαδικασίες. Κάτω από κάθε διεργασία υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων που κατασκευάζουν εξαρτήματα χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, αλλά βασίζονται σε μία από αυτές τις θεμελιώδεις διεργασίες. Οι αφαιρετικές διεργασίες παράγουν εξαρτήματα αφαιρώντας υλικό από το τεμάχιο εργασίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές, όπως η κατεργασία με CNC, η κοπή με λέιζερ, η κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων και η κατεργασία με υδροβολή. Αντίθετα, οι μορφοποιητικές διεργασίες περιλαμβάνουν την εφαρμογή δύναμης και πίεσης για τη δημιουργία ενός αντικειμένου. η ηλεκτρομαγνητική μορφοποίηση και η προσαρμοστική χύτευση σε μήτρα είναι μεταξύ των μεθόδων. Εν τω μεταξύ, οι προσθετικές διεργασίες κατασκευάζουν το τεμάχιο στρώμα προς στρώμα μέχρι να επιτευχθεί η τελική γεωμετρία. Ουσιαστικά, η πλειονότητα των μεθόδων προσθετικών διεργασιών αναγνωρίζονται ως τεχνολογίες RP. Λόγω των περιορισμών τους, άλλες αφαιρετικές και μορφοποιητικές τεχνικές δεν χαρακτηρίζονται ως εργαλεία RP. Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν βελτιώσει τις δυνατότητες κατεργασίας με CNC από την άποψη αυτή και η μέθοδος μπορεί να είναι εφαρμόσιμη στην εφαρμογή RM. Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφονται οι μέθοδοι RP που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο των προσθετικών και αφαιρετικών

κατηγοριών.

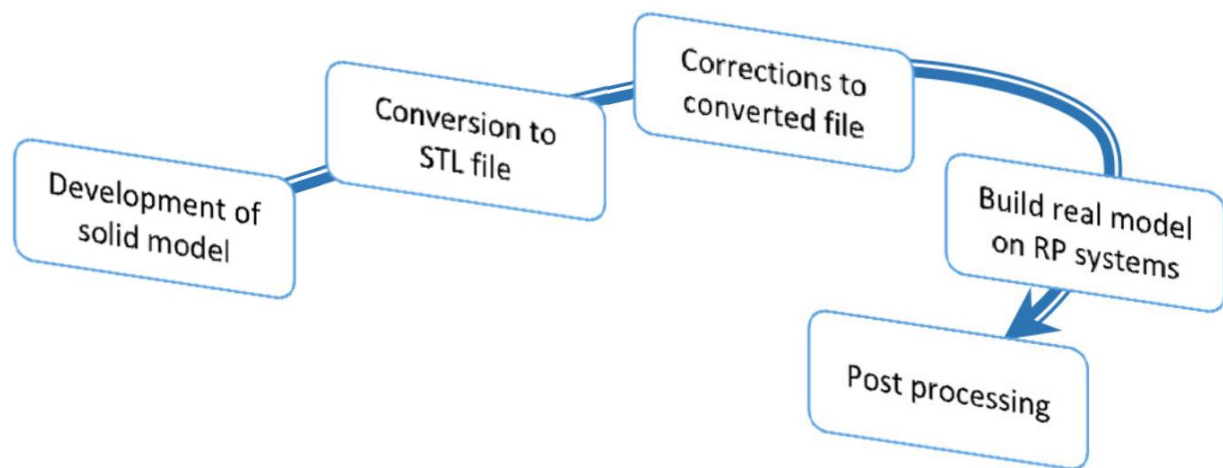


Εικόνα 2 Θεμελιώδεις διεργασίες παραγωγής (Onuh et al. 1999)

2.2 Προσθετικές διεργασίες

Η θεμελιώδης πτυχή των προσθετικών διεργασιών είναι η κατασκευή ενός εξαρτήματος με τη στοίβαξη στρώσεων διατομής "2,5 D" του μοντέλου (Boonsuk et al. 2009). Αυτές οι εργασίες στοίβαξης πραγματοποιούνται έως ότου διαμορφωθεί ολόκληρη η μορφή του εξαρτήματος. Η συντριπτική πλειονότητα των εμπορικών τεχνολογιών RP είναι προσθετικές διεργασίες. Στη διαδικασία RP χρησιμοποιούνται διάφορα τυποποιημένα βήματα για την κατασκευή του εξαρτήματος. Αρχικά, δημιουργείται ένα στερεό μοντέλο χρησιμοποιώντας μια εμπορική εφαρμογή CAD, όπως το AutoCAD, το NX, το Solid Works και πολλές άλλες. Για την κατασκευή του μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές, όπως η σάρωση εικόνας μαγνητικού συντονισμού (MRI), η αξονική τομογραφία υπολογιστή (CAT) και η χρήση

δεδομένων που παράγονται από ένα σύστημα ψηφιοποίησης (Urcraft et al. 2003). Το μοντέλο αναπαριστά την πλήρη γεωμετρία του εξαρτήματος, συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών και εξωτερικών χαρακτηριστικών. Το μοντέλο CAD μετατρέπεται στη συνέχεια σε μορφή STL (Standard Tessellation Language). Η μετατροπή μετατρέπει το τρισδιάστατο μοντέλο σε ένα σύνολο τριγωνικών όψεων. Εάν είναι απαραίτητο, γίνονται προσαρμογές στο μετατραπέυσα αρχείο, ώστε η αναπαράστασή του να είναι όσο το δυνατόν πιο παρόμοια με το αρχικό αντικείμενο. Το μοντέλο είναι πλέον έτοιμο για δημιουργία με χρήση οποιασδήποτε τεχνολογίας RP. Ξεκινώντας με κενό χώρο, στοιβάζονται συνεχή λεπτά στρώματα υλικού. Ανάλογα με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται, το μοντέλο ολοκληρώνεται μέσω μετα-επεξεργασίας, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει καθαρισμό και μετα-σκλήρυνση. Το διάγραμμα απεικονίζει μια τυπική ροή εργασίας στα συστήματα RP.



Εικόνα 3 Κοινή ροή διεργασιών σε προσθετικές διεργασίες

Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνολογίες RP με προσθετικές διεργασίες. Ουσιαστικά, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την αρχική μορφή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του αντικειμένου (Chua et al. 2010). Τα συστήματα με βάση τα υγρά, τα συστήματα με βάση τα στερεά και τα συστήματα με βάση τη σκόνη είναι οι τρεις κύριες κατηγορίες τεχνολογιών RP. Στην υποενότητα που ακολουθεί παρατίθενται παραδείγματα μεθόδων που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία και χρησιμοποιούνται ευρέως για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες.

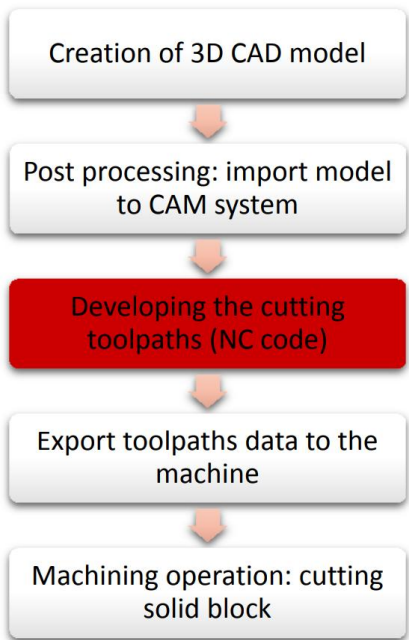
2.3 Διαδικασίες αφαίρεσης

Σε αντίθεση με τις προσθετικές διεργασίες, οι αφαιρετικές διεργασίες περιλαμβάνουν την αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο, σε αντίθεση με τη σταδιακή προσθήκη υλικού. Η διαδικασία αφαίρεσης υλικού μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κοπή ενός μικρού τμήματος του τεμαχίου με οποιονδήποτε τύπο κοπτικού εργαλείου. Παραδοσιακά, για τη διαδικασία κοπής χρησιμοποιούνται κατά πάσα πιθανότητα εργαλεία χειρός και σε αυτή την περίπτωση η ανθρώπινη δεξιότητα είναι απαραίτητη. Στη συνέχεια, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας CNC στις μηχανές κοπής βελτίωσε την αφαιρετική κατασκευή και ωρίμασε την τεχνολογία. Η τεχνολογία CNC έχει βελτιώσει τις αυτόματες δυνατότητες των μηχανών φρεζαρίσματος, κοπής με λέιζερ και κατεργασίας υψηλής ταχύτητας, μεταξύ άλλων.

Για την εφαρμογή RM, μια μηχανή φρεζαρίσματος CNC μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη εναλλακτική τεχνική. Χρησιμοποιεί μια αφαιρετική μέθοδο, σμιλεύοντας ένα μπλοκ υλικού με την αφαίρεση τεμαχίων μέχρι να δημιουργηθεί ολόκληρη η μορφή του μοντέλου (Lennings 2000). Ωστόσο, η πλειονότητα των προηγούμενων ερευνητών δεν αναγνώριζε τις μηχανές φρεζαρίσματος και τόννευσης CNC ως τεχνικές RP (Frank et al. 2003). Λόγω της μηχανικής προ-επεξεργασίας και του σχεδιασμού των ρυθμίσεων, αυτά ήταν τα κύρια εμπόδια που εμπόδιζαν τη μέθοδο αυτή να γίνει διαδικασία RP (Akula et al. 2006, Frank et al. 2010). Ωστόσο, η κατεργασία με CNC έχει τον υψηλότερο βαθμό ακρίβειας και επαναληψιμότητας. Η κατεργασία φινιρίσματος μπορεί να επιτύχει ακρίβεια έως και 0,0127 mm, η οποία είναι

σημαντικά υψηλότερη από άλλες συμβατικές διαδικασίες AM. Επιπλέον, η μηχανή είναι σε θέση να επεξεργάζεται μεγάλη ποικιλία υλικών και να παράγει πλήρως λειτουργικά εξαρτήματα.

Η εισαγωγή υβριδικών συστημάτων RP που συνδυάζουν αφαιρετικές διεργασίες με διεργασίες AM αποκάλυψε την ανάγκη για μηχανές CNC για τη βελτίωση των λειτουργιών. Η εφαρμογή της κατεργασίας με CNC ως διεργασία AM αναμένεται να αποφέρει πολλά πρόσθετα οφέλη. Η πιο ελκυστική πτυχή αυτής της διαδικασίας είναι η ικανότητά της να χειρίζεται μια μεγάλη ποικιλία υλικών, από μαλακά υλικά όπως αφρώδες χαρτόνι έως σκληρά υλικά όπως ο χάλυβας. Οι μεγάλες μηχανές μπορούν να φιλοξενήσουν μεγαλύτερα εξαρτήματα, καθιστώντας τις κατάλληλες για την κατασκευή αεροδιαστημικών εξαρτημάτων, για παράδειγμα. Αυτό παρέχει πλήρη έλεγχο με βάση τις απαιτήσεις της διαδικασίας, καθώς μπορείτε να επιλέξετε το επίπεδο ακρίβειας. Ωστόσο, η κατεργασία με CNC εξακολουθεί να παρεμποδίζεται από το ζήτημα της αυτοματοποίησης, ιδίως κατά τη φάση του σχεδιασμού πριν από την έναρξη των εργασιών κοπής. Τα συστήματα CAM χρησιμοποιούνται συνήθως για την εκτέλεση των καθηκόντων σχεδιασμού. Η μεταφορά του τρισδιάστατου μοντέλου σε ένα σύστημα CAM επιτρέπει την ανάπτυξη διαδρομών κοπτικών εργαλείων με την επιθυμητή ακρίβεια και επιφανειακό φινίρισμα. Πριν από αυτό, είναι απαραίτητο να καθοριστούν διάφορες παράμετροι και στρατηγικές κοπής, οι οποίες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνογνωσία των χειριστών CAM για την παραγωγή βέλτιστων εργασιών κοπής. Στο Σχήμα 4 απεικονίζονται τα τυπικά βήματα που απαιτούνται για την εκτέλεση των διεργασιών κατεργασίας. Το κόκκινο μπλοκ αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη φάση στη διαδικασία σχεδιασμού της κατεργασίας. Εκτός από τις στρατηγικές κοπής, τις παραμέτρους διεργασίας, την τοποθέτηση του εργαλείου και την επικοινωνία μέσω δικτύου, υπάρχουν πρόσθετες μεταβλητές που επηρεάζουν την ποιότητα της κατεργασίας (Akula et al. 2006).



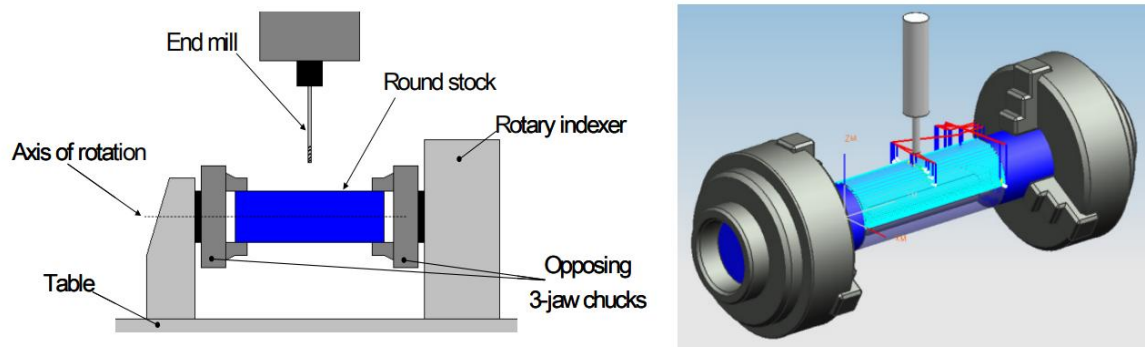
Εικόνα 4 Ροή διαδικασίας κατεργασίας CNC (Nikam 2005)

2.4 Κατεργασία CNC για ταχεία παραγωγή και κατασκευή

Στις διεργασίες RM, η περιορισμένη επιλογή υλικών και η ακρίβεια των προσθετικών διεργασιών ενθάρρυναν τη χρήση κατεργασιών CNC. Αντίθετα, η ελευθερία της γεωμετρίας του τεμαχίου είναι περιορισμένη, αλλά λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα και τις δυνατότητες της διαδικασίας, η τεχνολογία αυτή παραμένει μια βιώσιμη μέθοδος για την παραγωγή διακριτών εξαρτημάτων. Λόγω της αναγκαιότητας του χειροκίνητου σχεδιασμού της διαδικασίας, η ευρεία υιοθέτηση της κατεργασίας CNC για RM έχει παρεμποδιστεί. Ευτυχώς, οι πρόσφατες καινοτομίες παρήγαγαν μια νέα μέθοδο για την υιοθέτηση της διαδικασίας κατεργασίας CNC για PM&M, γνωστή ως CNC-RP.

2.4.1 Επισκόπηση της CNC-RP

Η CNC-RP είναι μια εξειδικευμένη τεχνική που έχει σχεδιαστεί για την κατασκευή πρωτοτύπων μέσω αφαιρετικών διεργασιών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί αφαίρεση υλικού με βάση στρώματα από πολλαπλούς προσανατολισμούς κατεργασίας σε ένα τεμάχιο με σταθερό άξονα περιστροφής (Frank et al. 2003). Όλες οι επιφάνειες του τεμαχίου κατεργάζονται με τη χρήση συμβατικού κατακόρυφου κέντρου κατεργασίας 3 αξόνων χωρίς την ανάγκη επαναπροσαρμογής. Χρησιμοποιώντας δύο αντίθετους δείκτες τέταρτου άξονα, επιτυγχάνεται ο επαναπροσανατολισμός του τεμαχίου. Στο σχήμα 5 απεικονίζεται ο μηχανισμός κατεργασίας και στερέωσης CNC-RP. Προκειμένου να αυτοματοποιηθεί σε κάποιο βαθμό ο σχεδιασμός της διαδικασίας, υιοθετείται μια στρατηγική κατεργασίας χωρίς χαρακτηριστικά. Προκειμένου να αυτοματοποιηθεί η κατεργασία CNC για εφαρμογές RP&M, είναι απαραίτητο να βρεθούν γενικές λύσεις που να το επιτρέπουν. Ως εκ τούτου, αναπτύσσεται ένα ενιαίο καθολικό σχέδιο που μπορεί να προσαρμοστεί για την κατεργασία όλων των εξαρτημάτων ανεξάρτητα από τα σχήματα και τις γεωμετρίες τους (Petrzelka et al. 2010).



Εικόνα 5 Ρύθμιση για το CNC-RP (Wysk 2008)

Οι θεμελιώδεις αρχές της λειτουργίας της CNC-RP μπορούν να εξεταστούν από τρεις εξέχουσες οπτικές γωνίες: προσανατολισμοί κοπής, σχεδιασμός τροχιάς εργαλείων και μέθοδος στερέωσης. Η κατεργασία του τεμαχίου από πολλαπλούς προσανατολισμούς γύρω από τον άξονα περιστροφής θα εξασφαλίσει την πλήρη αφαίρεση υλικού. Πριν από την ανάπτυξη των κατεργασιών κατεργασίας, πραγματοποιείται ανάλυση ορατότητας για τον καθορισμό των προσανατολισμών. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό των ορατών

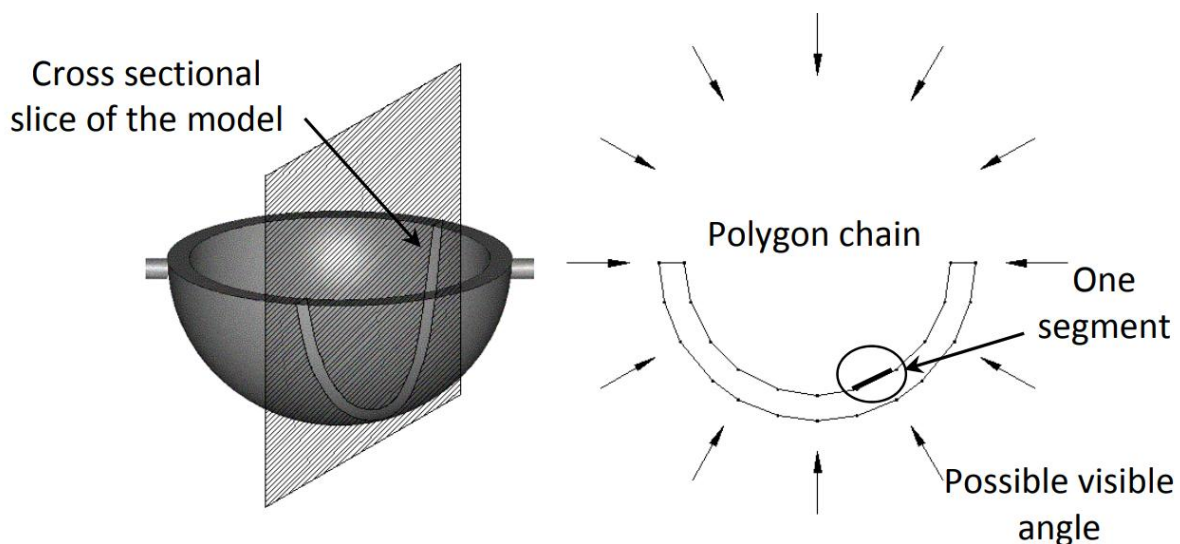
επιφανειών του τεμαχίου όταν κοιτάζουμε προς τα κάτω κατά μήκος του άξονα z, ο οποίος αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη κατεύθυνση του κοπτικού εργαλείου. Πολλαπλοί προσανατολισμοί είναι απαραίτητοι επειδή δεν είναι ορατές όλες οι επιφάνειες από έναν μόνο προσανατολισμό. Η κατεργασία εκτελείται σε κάθε προσανατολισμό με βάση διαδρομές εργαλείων με βάση στρώματα "2,5 D" χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του τεμαχίου. Η διαδικασία είναι σχεδόν πανομοιότυπη με την αρχή της στρωματοποίησης στην προσθετική RP, με τη διαφορά ότι οι διαδρομές εργαλείων σε κάθε στρώμα υποδεικνύουν την εναπομένουσα περιοχή κοιλότητας μετά την αφαίρεση του υλικού. Η επιλογή του κοπτικού εργαλείου για τις κατεργασίες διέπεται από μια τυποποιημένη μεθοδολογία. Βήματα επεξεργασίας της τροχιάς εργαλείων της μεθόδου CNC-RP. Τα μεγέθη τεμαχίων που μπορούν να κατεργαστούν εξαρτώνται από το μήκος των διαθέσιμων εργαλείων.

Στρογγυλό κυλινδρικό υλικό μπορεί να στερεωθεί μεταξύ των διατάξεων ευθυγράμμισης για χρήση ως τεμάχιο κατεργασίας. Μικροί κύλινδροι διαμορφώνονται και στα δύο άκρα του εξαρτήματος. Αυτά τα σχήματα χρησιμεύουν ως θυσιαστικά στηρίγματα για το εξάρτημα και κατεργάζονται ταυτόχρονα με το εξάρτημα- στη συνέχεια αφαιρούνται όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία. Οι διατάξεις ευθυγράμμισης που χρησιμοποιούνται για τη σύσφιξη του τεμαχίου είναι περιστρεφόμενες, γεγονός που επιτρέπει την κατεργασία από πολλαπλές κατευθύνσεις κοπής. Επιπλέον, αυτή η νέα μέθοδος στερέωσης εξαλείφει την ανάγκη επαναφοράς ενός σημείου αναφοράς κατά την επανασύσφιξη ενός τεμαχίου σε μια συμβατική μέγγενη. Κατά συνέπεια, παρέχει μια εύκολα προσβάσιμη περιοχή για το κοπτικό εργαλείο για την αποτελεσματική κατεργασία του εξαρτήματος. Οι μεγαλύτερες δυνατότητες της CNC-RP έγκεινται στον προγραμματισμό της διαδικασίας που επιδέχεται αυτοματοποίηση και μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τεχνικές γνώσεις. Ωστόσο, η χρησιμότητα του CNC-RP περιορίζεται όταν πρόκειται για εξαρτήματα με σοβαρά χαρακτηριστικά υποκοπής και περίπλοκα σχήματα.

2.4.2 Στρατηγικές CNC-RP

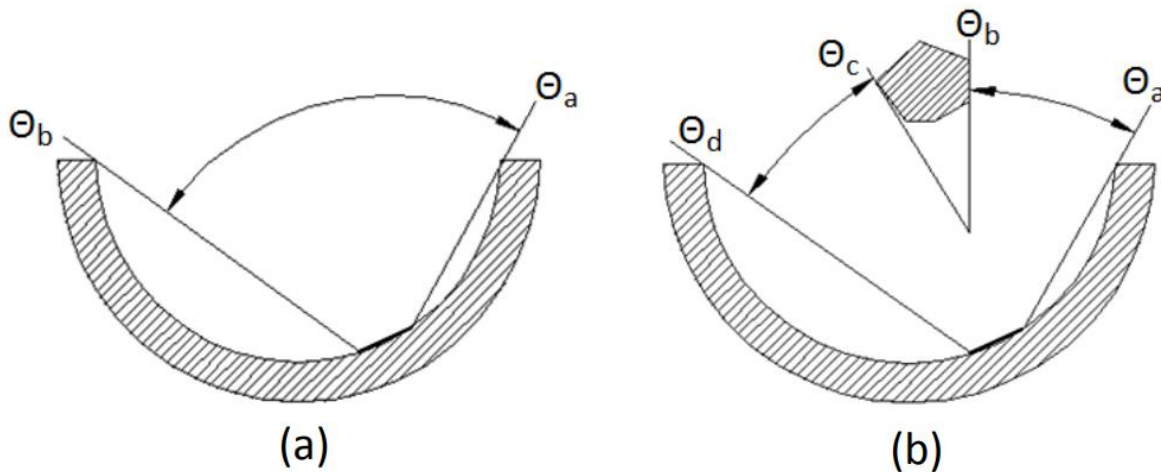
Κατευθύνσεις κοπής

Η μοναδική προσέγγιση της αξιοποίησης των συσκευών ευθυγράμμισης στο CNC-RP παρέχει στο σύστημα έναν τέταρτο άξονα κίνησης και επιτρέπει την περιστροφή του τεμαχίου γύρω από έναν άξονα σε διάφορους προσανατολισμούς. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, οι επιφάνειες εντός της γεωμετρίας του τεμαχίου εκτίθενται σε διάφορους από αυτούς τους προσανατολισμούς. Επομένως, απαιτούνται πολλαπλοί προσανατολισμοί για να διασφαλιστεί ότι τα εξαρτήματα κατεργάζονται πλήρως. Η δυσκολία έγκειται τώρα στον προσδιορισμό των τιμών προσανατολισμού και της απαιτούμενης ποσότητας. Πρόκειται για κρίσιμες παραμέτρους που πρέπει να προσδιοριστούν πριν από τον σχεδιασμό των κατεργασιών. Για την εκπλήρωση αυτών των καθηκόντων, πραγματοποιείται ανάλυση ορατότητας με βάση την οπτική επαφή με τις επιφάνειες και την τοπική γεωμετρία του τεμαχίου. Οι εργασίες ξεκινούν με την προετοιμασία τομών διατομής της γεωμετρίας του μοντέλου που αρχικά αποδόθηκαν σε μορφή STL. Κάθε φέτα περιέχει μια συλλογή πολυγωνικών αλυσίδων που αναπαριστούν τις ακμές διατομής του εξαρτήματος. Για κάθε πολυγωνική αλυσίδα παράγονται πολυάριθμα τμήματα από τις τριγωνικές όψεις που περιγράφουν την επιφάνεια του μοντέλου STL. Ένα τμήμα μπορεί να είναι ορατό από πολλές κατευθύνσεις και η ορατότητά του μπορεί να μεταφραστεί εντός συγκεκριμένων περιοχών. Η ορολογία για τη φέτα διατομής, την πολυγωνική αλυσίδα και τα τμήματα παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6 Ορολογία του μοντέλου slice (Frank 2003)

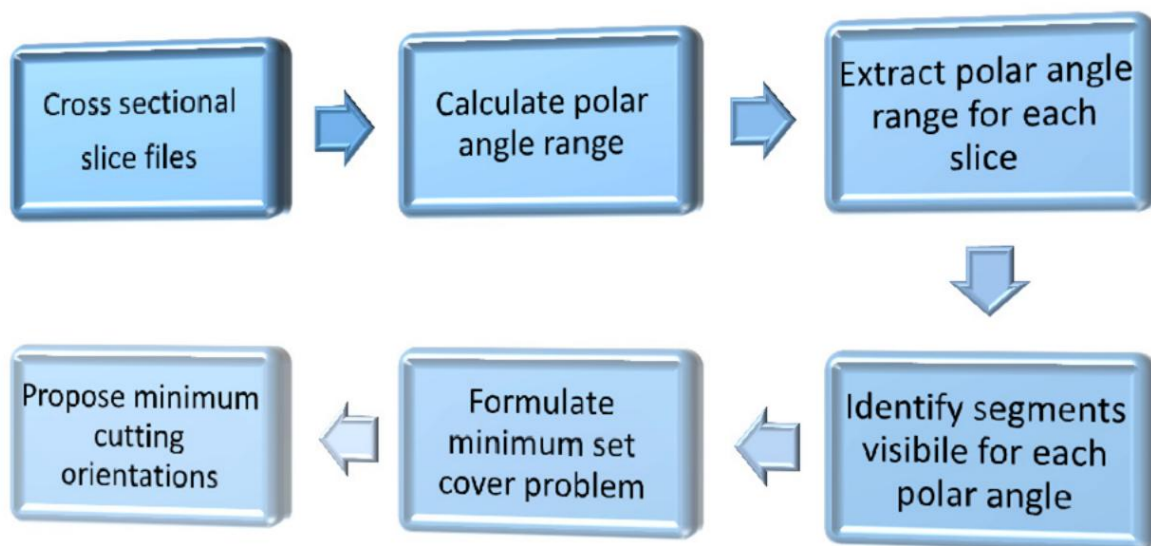
Αφού προετοιμαστεί το αρχείο φέτες, η χαρτογράφηση ορατότητας ξεκινά με τον υπολογισμό του εύρους της πολικής γωνίας για κάθε τμήμα σε μια αλυσίδα πολυγώνων. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 7(β), σε κάθε φέτα μπορεί να υπάρχουν πολλαπλές αλυσίδες που εμποδίζουν την ορατότητα ενός συγκεκριμένου τμήματος (Frank et al. 2004). Κατά συνέπεια, τα εύρη των γωνιών ορατότητας γίνονται μια συλλογή από εύρη. Με αυτή την αξιολόγηση, τα εύρη ορατότητας μπορούν να προσδιοριστούν για κάθε τμήμα μιας πολυγωνικής αλυσίδας και να επεκταθούν σε όλες τις φέτες που αποτελούν ένα μοντέλο STL. Στο επόμενο βήμα της ανάλυσης, προσδιορίζεται ένας επαρκής αριθμός προσανατολισμών για την κατεργασία όλων των επιφανειών του τεμαχίου. Αυτό είναι γνωστό ως το πρόβλημα της ελάχιστης κάλυψης συνόλου (Frank 2003). Πριν από αυτό, εξάγονται σύνολα περιοχών πολικών γωνιών που μοιράζονται από κάθε τμήμα φέτας. Τα δεδομένα αυτά τροποποιούνται για τον προσδιορισμό των συνόλων τμημάτων που είναι ορατά από κάθε πολική γωνία. Το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται για τη διατύπωση του προβλήματος κάλυψης συνόλου, το οποίο προτείνει τον ελάχιστο αριθμό προσανατολισμών που είναι απαραίτητοι για τη μηχανική επεξεργασία του στοιχείου.



Εικόνα 7 (α) Εύρος ορατότητας για το τμήμα = $[\Theta_a, \Theta_b]$ και (β) Εύρος ορατότητας για πολλαπλές αλυσίδες = $[\Theta_a, \Theta_b], [\Theta_c, \Theta_d]$ (Frank et al. 2004)

Η αναζήτηση του μικρότερου αριθμού περιστροφών του δείκτη είναι ένας από τους πρωταρχικούς στόχους των διαδικασιών CNC-RP. Ο χρόνος κοπής αναμένεται να αυξηθεί όσο αυξάνεται ο αριθμός των προσανατολισμών. Κατά συνέπεια, η λύση που διατυπώνεται στην ανάλυση ορατότητας προσανατολίζεται στην επίτευξη του ελάχιστου στόχου που καθορίζεται.

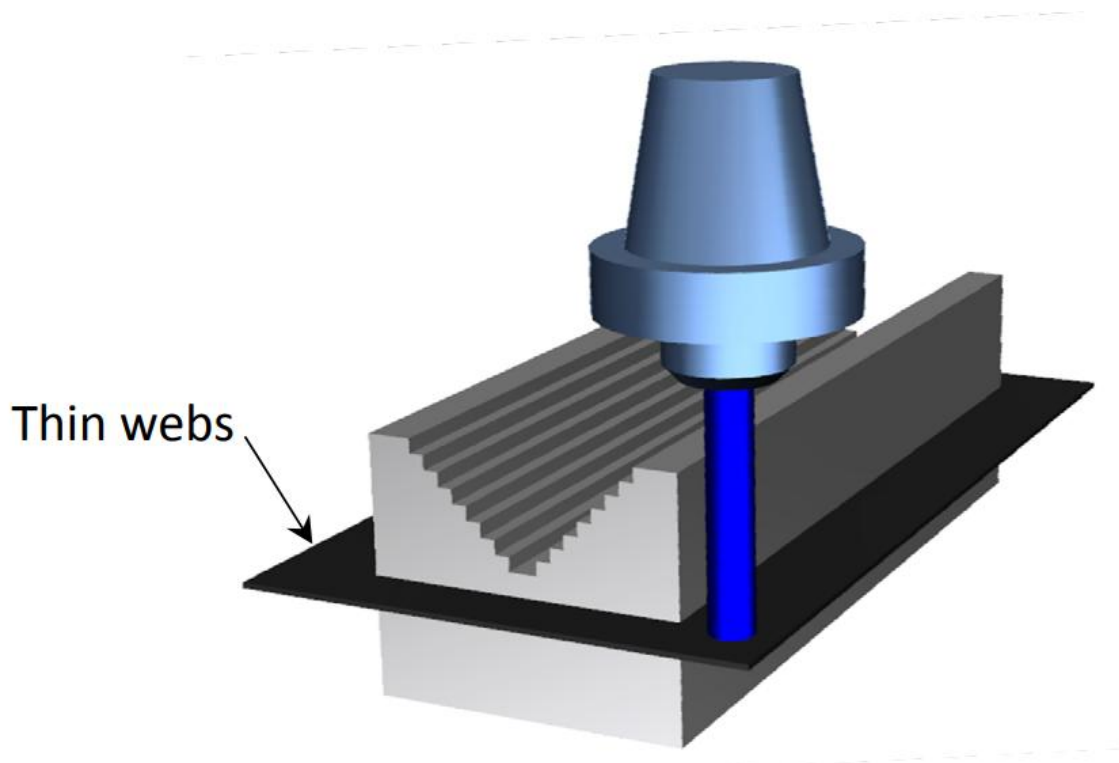
Πολυάριθμες εργασίες που εκτελούνται κατά την ανάλυση διευκολύνονται από τους αλγορίθμους ορατότητας. Το λογισμικό δημιουργήθηκε ειδικά για την επεξεργασία αρχείων φέτας και τη δημιουργία πολλαπλών παραμέτρων διεργασίας ως έξοδοι. Αυτές περιλαμβάνουν τον ελάχιστο αριθμό προσανατολισμών, το ελάχιστο μέγεθος αποθέματος και τα μέγιστα και ελάχιστα επίπεδα κοπής για κάθε προσανατολισμό (Frank 2003). Εκτός από την ακολουθία των εργασιών, το μήκος του εργαλείου και τη διάμετρο, υπάρχουν πρόσθετα κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον καθορισμό των προσανατολισμών κοπής. Το Σχήμα 8 είναι μια περίληψη της ανάλυσης ορατότητας που διεξήχθη για τον προσδιορισμό μιας σειράς προσανατολισμών κοπής.



Εικόνα 8 Ανάλυση ορατότητας για τον προσδιορισμό των προσανατολισμών κοπής

Η κατεργασία από πολλαπλούς προσανατολισμούς στο CNC-RP έχει αποδειχθεί ότι είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για την κατεργασία εξαρτημάτων χωρίς επαναπροσαρμογή του τεμαχίου. Οι αλγόριθμοι ορατότητας που αναπτύχθηκαν προσδιόρισαν το ελάχιστο σύνολο απαιτούμενων προσανατολισμών. Ωστόσο, πρέπει να αναλυθεί η κατανομή των προσανατολισμών για να αποφευχθεί ο σχηματισμός λεπτού ιστού. Λόγω της ακολουθίας της διαδικασίας και των κατευθύνσεων κοπής, οι λεπτοί ιστοί μπορούν να θεωρηθούν ως ένα λεπτό στρώμα υλικού που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής. Για παράδειγμα, όλες οι επιφάνειες ενός

εξαρτήματος μπορούν να κατεργαστούν σε δύο αντίθετες κατευθύνσεις κοπής. Κατά συνέπεια, οι αρχικές κατεργασίες κατεργασίας θα αφαιρέσουν το υλικό σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο κοπής. Στη συνέχεια, το εξάρτημα περιστρέφεται κατά 180 μοίρες για να παρέχει νέο προσανατολισμό για τη δεύτερη διαδικασία κατεργασίας. Καθώς η διαδικασία κοπής εξελίσσεται σε ορισμένα επίπεδα, ένα λεπτό στρώμα υλικού μπορεί να σχηματιστεί και να περιβάλλει το εξάρτημα. Κατά την κατεργασία, δεν είναι επιθυμητή η κοπή λεπτών υλικών επειδή τείνουν να τυλίγονται γύρω από τα κοπτικά εργαλεία και να χτυπούν το τεμάχιο. Στις χειρότερες περιπτώσεις, η διαδικασία διείδυσης διακόπτεται, με αποτέλεσμα κακή επιφανειακή επεξεργασία του εξαρτήματος. Η καλύτερη μέθοδος για την αποφυγή λεπτών ιστών είναι η κατεργασία του εξαρτήματος χρησιμοποιώντας τουλάχιστον τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς κοπής. Επιπλέον, η κατανομή αυτών των προσανατολισμών πρέπει να παρακολουθείται προσεκτικά για να αποφευχθεί ο σχηματισμός λεπτών ιστών. Εάν το σύνολο των προσανατολισμών που συνιστάται από την ανάλυση ορατότητας δεν συμμορφώνεται με την απαίτηση λεπτού ιστού, τότε απαιτούνται πρόσθετοι προσανατολισμοί για τις κατεργασίες εκχόνδρισης. Οι λεπτοί ιστοί που σχηματίζονται σε ένα κατεργασμένο τεμάχιο απεικονίζονται στο Σχήμα 9.

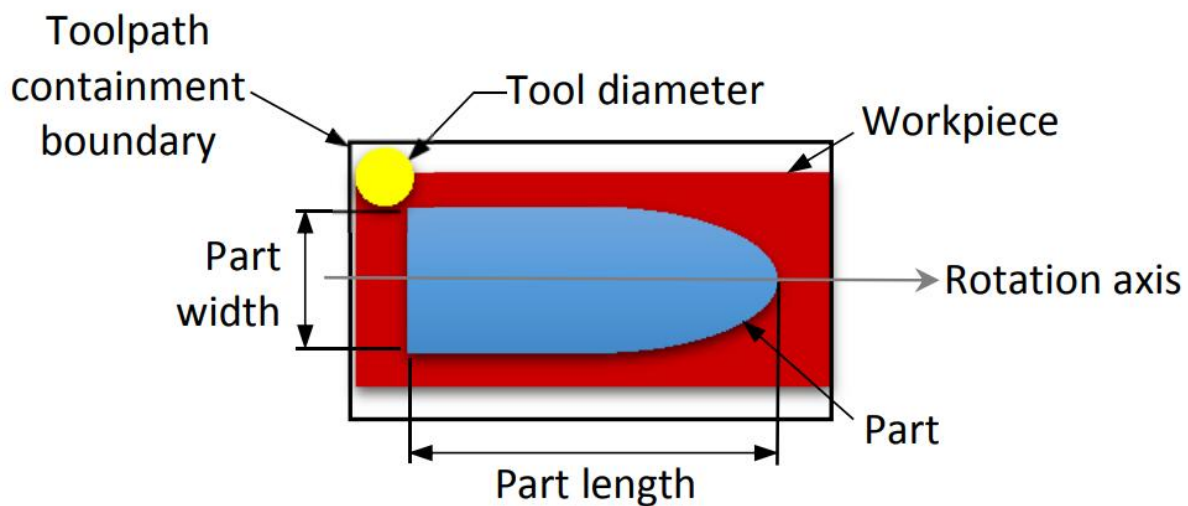


Σχεδιασμός τροχιάς εργαλείων

Το CNC-RP εκτελεί κατεργασίες χωρίς να απαιτείται επαναπροσαρμογή μεταξύ προσανατολισμών. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η διατήρηση της συνέχειας της διαδικασίας, καθώς οποιαδήποτε αστοχία των κοπτικών εργαλείων θα σταματήσει ολόκληρη την κατεργασία. Ως αποτέλεσμα, ο σχεδιασμός της διαδρομής εργαλείων πρέπει να αναπτύσσεται προσεκτικά μεταξύ των προσανατολισμών. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, τα κοπτικά εργαλεία πρέπει να φτάνουν στο τελικό στρώμα αποθέματος χωρίς να συγκρούονται. Ταυτόχρονα, το εξάρτημα πρέπει να κατεργάζεται σε ομοιόμορφα στρώματα κοπής. Οι διαδρομές εργαλείων στο CNC-RP βασίζονται κυρίως σε κινήσεις "2,5 D", στις οποίες το τεμάχιο διαμορφώνεται με βύθιση του εργαλείου προς το τεμάχιο και στη συνέχεια με οριζόντια κίνηση στους άξονες xy. Καθώς η διατομή του τεμαχίου εμφανίζεται σε 2Δ, είναι πολύ πιθανό να επιλεγεί μια επίπεδη φρεζάρα. Όσον αφορά τα επιφανειακά χαρακτηριστικά, τα παραγόμενα τεμάχια παρουσιάζουν το ίδιο φαινόμενο σκαλοπατιών με την πλειονότητα των διεργασιών AM. Ωστόσο, οι προηγμένες δυνατότητες των μηχανών CNC μειώνουν το πάχος στρώματος σε λιγότερο από 0,02 mm. Ως εκ τούτου, η εμφάνιση των σκαλοπατιών μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, αλλά ένα πολύ λεπτό πάχος στρώματος θα αυξήσει το χρόνο κατεργασίας. Η προσέγγιση χωρίς χαρακτηριστικά που υιοθετείται στη διαδικασία CNC-RP επηρεάζει δύο κρίσιμες αποφάσεις στο σχεδιασμό της τροχιάς εργαλείων: πρώτον, τη μέθοδο εκτέλεσης της κατεργασίας και, δεύτερον, την επιλογή του κοπτικού εργαλείου.

Ως αποτέλεσμα της γενίκευσης των περιοχών κοπής ώστε να καλύπτονται όλες οι επιφάνειες, οι διαδικασίες κατεργασίας έχουν γίνει λιγότερο περίπλοκες. Ως εκ τούτου, για την κατεργασία των ορατών επιφανειών απαιτείται μόνο μία κατεργασία σε έναν προσανατολισμό. Επιπλέον, ο φόρτος σχεδιασμού έχει μειωθεί, επιτρέποντας την ταχεία ανάπτυξη διαδρομών εργαλείων. Εναλλακτικά, το κοπτικό εργαλείο επιλέγεται με βάση το μικρότερο μέγεθος και το επαρκές μήκος του για να φτάσει στην πιο απομακρυσμένη ορατή επιφάνεια του εξαρτήματος. Για να εξασφαλιστεί μια διαδικασία χωρίς συγκρούσεις, το στέλεχος του εργαλείου πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο από τη διάμετρο της αυλακιάς. Η χρήση ενός εργαλείου μικρού μεγέθους θα

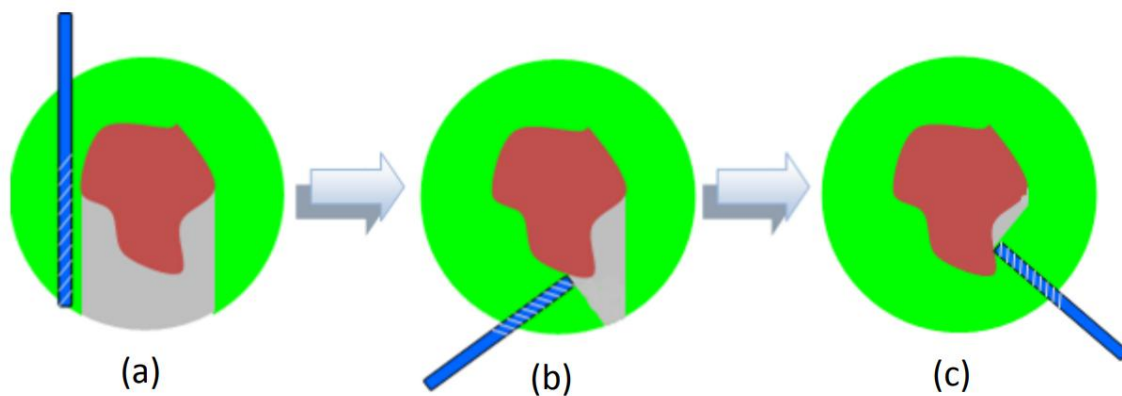
εξασφαλίσει την προσβασιμότητά του σε πολύπλοκες επιφάνειες. Ωστόσο, αναγνωρίζεται ότι αυτή δεν είναι η καλύτερη προσέγγιση, καθώς ένα μακρύ εργαλείο είναι επιρρεπές σε αστοχίες και οδηγεί σε μη αποδοτική κατεργασία. Επιπλέον, υπάρχει η τάση να αυξάνεται ο χρόνος κατεργασίας ως αποτέλεσμα της ανάγκης του μικρού εργαλείου για περισσότερα περάσματα και λεπτότερο πάχος στρώματος, το οποίο μειώνει την ποσότητα του υλικού που αφαιρείται. Παρόλα αυτά, οι παραχωρήσεις αυτές είναι αποδεκτές προκειμένου να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός της διαδικασίας και να υιοθετηθεί ένας βαθμός αυτοματοποίησης. Ο καθορισμός του ορίου περιορισμού είναι ένα επιπλέον κρίσιμο βήμα στην ανάπτυξη της τροχιάς εργαλείων. Η ρύθμιση αυτή περιορίζει τις κινήσεις του κοπτικού εργαλείου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής σε επιτρεπτές περιοχές. Ως εκ τούτου, εξαλείφει κάθε πιθανότητα σύγκρουσης με άλλο εξοπλισμό ρύθμισης. Ένας γενικός κανόνας για τον προσδιορισμό του ορίου είναι η επέκταση της περιοχής κοπής τουλάχιστον κατά τη διάμετρο του κοπτικού εργαλείου για το μήκος και το μέγιστο πλάτος του τεμαχίου (Frank 2003). Στο σχήμα 10 απεικονίζεται η οριοθέτηση αυτού του ορίου.



Εικόνα 10 Ο προσδιορισμός του ορίου περιορισμού της διαδρομής εργαλείων

Για τον προσδιορισμό της ακολουθίας εργασιών, επιλέγεται τυχαία ο πρώτος προσανατολισμός κοπής από το σύνολο λύσεων. Στη συνέχεια, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων προσανατολισμών για την επόμενη ακολουθία εργασιών.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11(α), η πρώτη λειτουργία κοπής εκτελείται σύμφωνα με τον προσανατολισμό που επιλέγεται από το σύνολο λύσεων. Ανάλογα με το μήκος του εργαλείου, η λειτουργία συνεχίζεται μέχρι το μέγιστο επίπεδο που μπορεί να επιτευχθεί. Είναι σημαντικό να αποφευχθεί η σύγκρουση του τεμαχίου με τον υποδοχέα του εργαλείου. Στη συνέχεια, η δεύτερη και η τρίτη κατεργασία αφαιρούν τυχόν εναπομείναν υλικό και ολοκληρώνουν το σχήμα του τεμαχίου. Αυτή η ακολουθία διεργασιών ικανοποιεί την απαίτηση αποφυγής λεπτού ιστού εκτός από την κατεργασία από τουλάχιστον τρεις προσανατολισμούς.



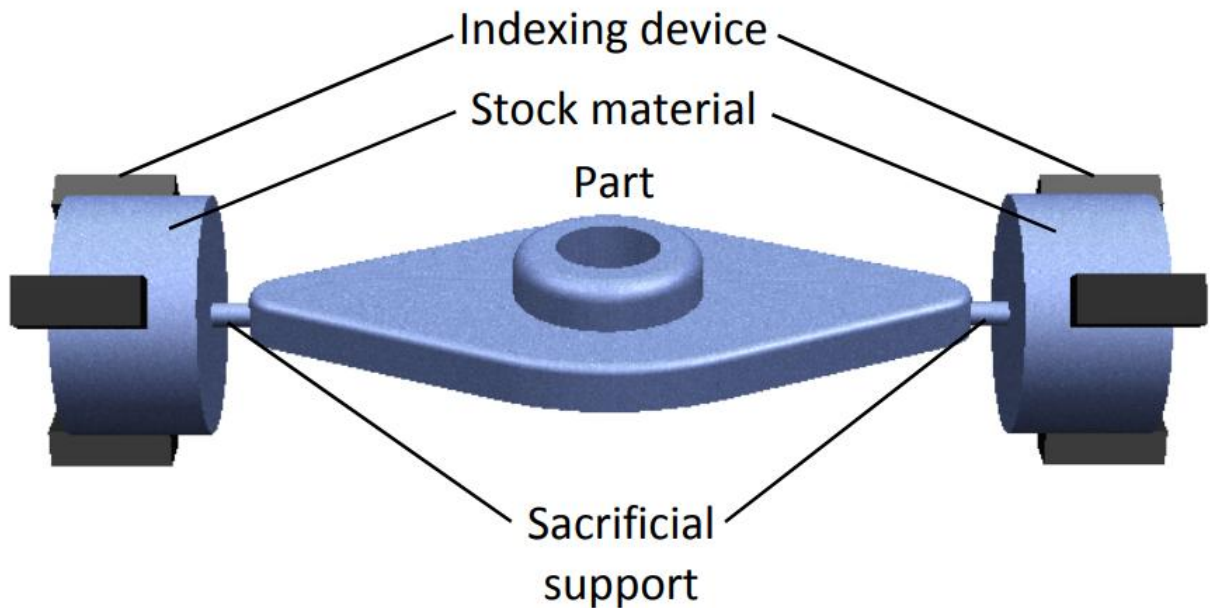
Εικόνα 11 Ακολουθία κατεργασίας σε διεργασίες CNC-RP (Frank 2007)

Στρατηγική στερέωσης

Στη συμβατική κατεργασία, μια μέγγενη χρησιμοποιείται συχνά ως διάταξη σύσφιξης για να αντέξει τις δυνάμεις που δημιουργούνται όταν το κοπτικό εργαλείο διεισδύει στο τεμάχιο. Αυτή η απλή μέθοδος σύσφιξης αποκρύπτει πολλές επιφάνειες, ιδίως το κάτω μέρος του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με τη μέγγενη. Ως εκ τούτου, το κοπτικό εργαλείο δεν μπορεί να κατεργαστεί αυτή την περιοχή και το τεμάχιο πρέπει να αποσυνδεθεί, να επαναπροσανατολιστεί και να επανασυνδεθεί. Η ρύθμιση του τεμαχίου και του συστήματος συντεταγμένων απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις. Τυχόν σφάλματα θα οδηγήσουν σε σφάλματα συντονισμού και ατέλειες στο κατεργαζόμενο εξάρτημα. Λόγω αυτών των ζητημάτων, η CNC-RP πρέπει να υιοθετήσει μια διαφορετική προσέγγιση της στερέωσης που είναι ικανή να ικανοποιεί πολλαπλές απαιτήσεις ανάλογα με τη φύση της εργασίας. Πρώτον, η μέθοδος στερέωσης πρέπει να μεγιστοποιεί την προσβάσιμη περιοχή, ώστε το κοπτικό εργαλείο να μπορεί να κατεργάζεται το

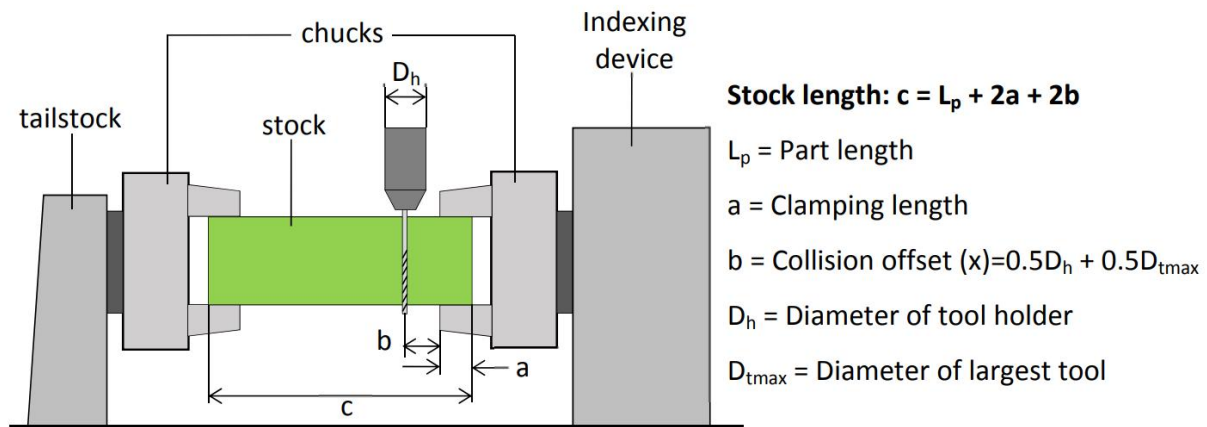
εξάρτημα με τον ελάχιστο δυνατό περιορισμό. Δεύτερον, η μέθοδος πρέπει να διευκολύνει την κατεργασία σε νέους προσανατολισμούς χωρίς να απαιτείται η δημιουργία νέου συστήματος συντεταγμένων. Το εξάρτημα πρέπει επίσης να συγκρατεί το τεμάχιο άκαμπτα ώστε να αντέχει τις δυνάμεις κοπής που δημιουργούνται κατά τις κατεργασίες.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις απαιτήσεις, το CNC-RP χρησιμοποιεί έναν κοινό μηχανισμό θυσιαστικής στήριξης στις διεργασίες AM. Οι στόχοι είναι η παροχή επαρκούς ακαμψίας και η αύξηση της προσβασιμότητας του εργαλείου στο τεμάχιο (Frank 2007). Σε αντίθεση με τις διεργασίες AM που προσθέτουν υλικό στο τεμάχιο, τα στηρίγματα δημιουργούνται ταυτόχρονα με το τεμάχιο και παραμένουν μέχρι να ολοκληρωθούν όλοι οι προσανατολισμοί της κατεργασίας (Frank et al. 2004). Στη συνέχεια, τα στηρίγματα διαχωρίζονται από το εξάρτημα μέσω λειτουργιών μετα-επεξεργασίας. Το μοντέλο CAD τροποποιείται πριν από την ανάπτυξη της τροχιάς εργαλείων με την προσθήκη μικρών κυλινδρικών αντικειμένων και στα δύο άκρα του τεμαχίου. Τα αντικείμενα αυτά χρησιμεύουν ως θυσιαστικά στηρίγματα που συνδέουν το εξάρτημα με το τεμάχιο. Σύσφιξη του τεμαχίου στις διατάξεις ευθυγράμμισης που παρέχουν τη μέγιστη δυνατή στήριξη για τις διεργασίες κατεργασίας. Στο σχήμα 12 απεικονίζονται τα θυσιαστικά στηρίγματα CNC-RP που χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 12 Προσέγγιση στερέωσης σε διεργασίες CNC-RP

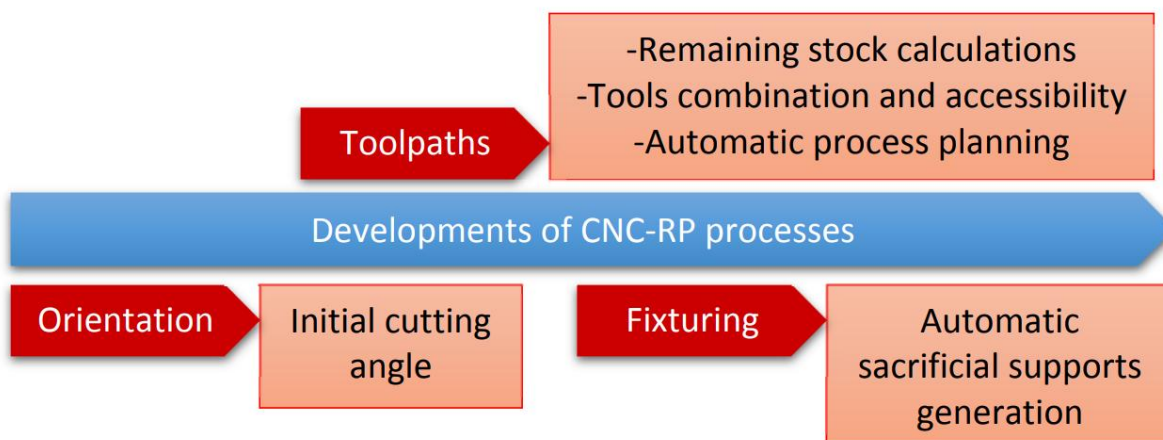
Ο μηχανισμός στερέωσης στο CNC-RP επιτρέπει συνεχείς εργασίες κοπής μεταξύ προσανατολισμών χωρίς την ανάγκη μετατόπισης του συστήματος συντεταγμένων της κατεργασίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψη και μια άλλη σκέψη κατά τον καθορισμό του μεγέθους και της ποσότητας των στηρίξεων. Η αύξηση αυτών των μεταβλητών θα αυξήσει την ακαμψία του τεμαχίου, ενώ θα μειώσει την προσβασιμότητά του στο εργαλείο. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί ο βέλτιστος αριθμός και το βέλτιστο μέγεθος των στηρίξεων. Οι τρέχουσες υλοποιήσεις καθορίζουν το μέγεθος της στήριξης με βάση τη μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση ενός απλού μοντέλου ομόκεντρης δοκού. Τα μεγέθη στήριξης που προτείνονται από αυτή την ανάλυση μπορούν ουσιαστικά να αντέξουν τις δυνάμεις κοπής και να παρέχουν ακαμψία στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Επιπλέον, το μήκος του τεμαχίου εργασίας καθορίζεται από τον άλλο εξοπλισμό που έχει στηθεί στο τραπέζι της μηχανής. Σε αυτά περιλαμβάνονται η διάμετρος του εργαλείου και της υποδοχής, η σύσφιξη και το μήκος του τεμαχίου. Οι διαστάσεις του τεμαχίου εργασίας είναι απαραίτητες για τη σωστή σύσφιξη, την αποφυγή συγκρούσεων και την ελαχιστοποίηση της σπατάλης υλικού. Στο σχήμα 13 απεικονίζεται η διάταξη του τεμαχίου εργασίας στο τραπέζι της μηχανής.



Εικόνα 13 Καθορισμός κατάλληλου μήκους αποθέματος (Frank 2007)

2.4.3 Εξελίξεις στις διαδικασίες CNC-RP

Ως αποτέλεσμα των δυνατοτήτων της μεθοδολογίας CNC-RP σε εφαρμογές RM, έχουν γίνει αρκετές εξελίξεις για την ενίσχυση των λειτουργιών και την αύξηση της προσαρμοστικότητας της διαδικασίας. Οι εξελίξεις αυτές μπορούν να ταξινομηθούν κυρίως με βάση τις θεμελιώδεις προσεγγίσεις που συζητήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Στο πλαίσιο των προσεγγίσεων προσανατολισμού κοπής και στερέωσης, υπάρχει μία εξέλιξη. Ωστόσο, οι περισσότερες εξελίξεις στον σχεδιασμό της τροχιάς εργαλείων έχουν οδηγήσει σε πολλαπλές προσεγγίσεις. Οι περισσότερες λύσεις προσπαθούν να βελτιώσουν τις φάσεις σχεδιασμού του CNC-RP, οι οποίες βελτιώνουν έμμεσα τις επακόλουθες διαδικασίες κατεργασίας.

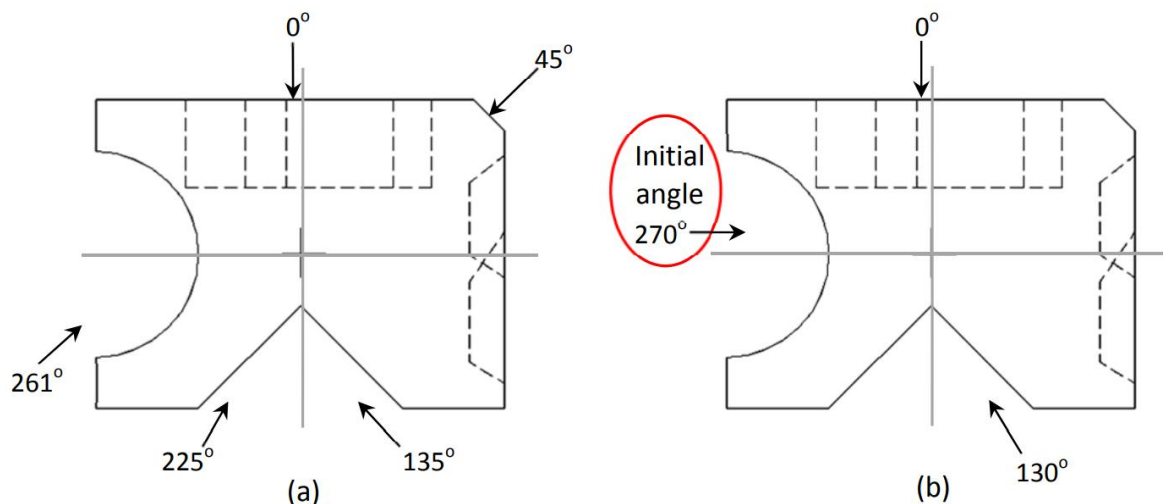


Εικόνα 14 Ανάπτυξη διαδικασιών CNC-RP

Βελτίωση των προσανατολισμών κοπής

Στη διαδικασία CNC-RP, ένα από τα σημαντικότερα στάδια κατεργασίας είναι η απομάκρυνση του χύδην υλικού κατά την πρώτη φάση των εργασιών κοπής. Αδιαμφισβήτητη είναι η αποτελεσματικότητα της ανάλυσης ορατότητας στον καθορισμό του προσανατολισμού κοπής. Με βάση τους προτεινόμενους προσανατολισμούς, το κοπτικό εργαλείο μπορεί να έχει πρόσβαση σε όλες τις επιφάνειες του εξαρτήματος. Ωστόσο, απαιτείται πρόσθετη αξιολόγηση για την εξέταση του προτεινόμενου συνόλου προσανατολισμών. Εάν οι γωνίες που δημιουργούνται από την ανάλυση έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν σε λεπτούς ιστούς, χρησιμοποιούνται πρόσθετοι προσανατολισμοί εκχόνδρισης, με αποτέλεσμα περιττή κατεργασία. Προκειμένου να παρακαμφθεί αυτό το ζήτημα, προτείνεται μια εναλλακτική λύση κατά την ανάλυση ορατότητας. Επέκταση του συνόλου των λύσεων με ταυτόχρονη ικανοποίηση του

περιορισμού αποφυγής λεπτών ιστών με τη χρήση μιας αρχικής παραμέτρου εισόδου γωνίας (Renner 2008). Η αρχική γωνία πρέπει να καθορίζεται από τη γωνία που καλύπτει την πλειονότητα των επιφανειών του τεμαχίου. Με βάση αυτή την τιμή, υπολογίζονται οι υπόλοιπες δύο γωνίες έτσι ώστε να αποφεύγονται οι λεπτοί ιστοί. Στη συνέχεια, αξιολογείται το σύνολο των προσανατολισμών ώστε να διασφαλίζεται ότι αποφεύγεται ο λεπτός ιστός και ότι πληρούνται οι απαιτήσεις των εργασιών φινιρίσματος. Εναλλακτικά προς την προσθήκη στους προσανατολισμούς εκχόνδρισης για την αποφυγή λεπτών ιστών, η αρχική γωνία εισόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση του συνόλου λύσεων. Κατά συνέπεια, η μέθοδος αυτή μειώνει επίσης το χρόνο που απαιτείται για την κατεργασία. Το Σχήμα 15 παρέχει μια απεικόνιση της εφαρμογής (β). Μια αρχική γωνία 270° διευκολύνει την εξάλειψη περιττών προσανατολισμών κοπής και προτείνει εναλλακτικές γωνίες που τηρούν τις προδιαγραφές για την κατεργασία του τεμαχίου από πολλαπλούς προσανατολισμούς. Η χρήση μιας αρχικής γωνίας αυξάνει τον αριθμό των παραγόμενων προσανατολισμών για τις κατεργασίες. Κατά συνέπεια, ο αριθμός των προσανατολισμών κοπής μπορεί να μειωθεί σε σύγκριση με τη λύση της ανάλυσης ορατότητας. Άλλες απαιτήσεις κατεργασίας, όπως η αποφυγή λεπτών ιστών και η αύξηση του μήκους επαφής του εργαλείου, παραμένουν ανεκπλήρωτες. Εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για πρόσθετη αξιολόγηση των προσανατολισμών που επιλέγονται για την αποφυγή του σχηματισμού λεπτών ιστών. Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των προσανατολισμών κοπής, οι κατεργασίες εκχόνδρισης εκτελούνται με προσανατολισμούς που είναι πιο κατάλληλοι για κατεργασίες φινιρίσματος. Η υπόθεση ότι ένας ελάχιστος αριθμός προσανατολισμών θα μειώσει το χρόνο κατεργασίας έχει αποτρέψει περαιτέρω βελτιώσεις στις κατεργασίες εκχόνδρισης.



Εικόνα 15 (α) Σύνολο προσανατολισμών που προτείνονται από την ανάλυση ορατότητας, (β) Λύση με χρήση αρχικών γωνία 270ο (Renner 2008)

Βελτιώσεις στον προγραμματισμό τροχιάς εργαλείων

Σε αντίθεση με τις προσθετικές διεργασίες, η CNC-RP χρησιμοποιεί μια σειρά προσανατολισμών για την αφαίρεση υλικού από κυλινδρικό υλικό. Καθώς το τεμάχιο περιστρέφεται σε νέο προσανατολισμό, η περιττή κοπή των προηγουμένως κατεργασμένων περιοχών μπορεί να καταστήσει τις εργασίες κοπής αναποτελεσματικές. Για την παράκαμψη αυτού του ζητήματος, αναπτύσσεται μια μέθοδος τριών βημάτων για τον υπολογισμό του εναπομένου αποθέματος. Πρώτον, το μοντέλο υποδιαιρείται σε έναν αριθμό τομών διατομής και αποδίδεται ένας συντελεστής ασφαλείας για την αποφυγή σύγκρουσης μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου. Στη συνέχεια, εκτελούνται οι βασικές λειτουργίες της τεχνικής, η προσέγγιση φέτας και η σκίαση. Οι πράξεις αυτές αποσκοπούν κυρίως στην ανακατασκευή του μοντέλου με την εξάλειψη των μη προσβάσιμων περιοχών, όπως οι μικρές οπές και οι σχισμές. Οι λειτουργίες Boolean χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των επαναληπτικών αλλαγών του αποθέματος και βοηθούν στη δημιουργία της τροχιάς εργαλείων αποφεύγοντας τις μη προσβάσιμες περιοχές κοπής. Μέσω της πολυεδρικής ανακατασκευής, τα τροποποιημένα δεδομένα φέτας μετατρέπονται σε μορφή STL και μπορούν στη συνέχεια να υποβληθούν σε επεξεργασία από μια εφαρμογή CAD/CAM (Petrzelka et al. 2010). Με την αποφυγή περιττών και περιττών εργασιών κοπής, η μέθοδος αυτή μειώνει το μήκος της διαδρομής εργαλείων έως και κατά 65%. Επιπλέον, το κοπτικό εργαλείο παραμένει σε επαφή με το τεμάχιο για τη συντριπτική πλειονότητα των εργασιών πρόχειρης κοπής.

Η χρήση ενός μόνο μεγέθους κοπτικού εργαλείου απλοποιεί τις εργασίες σχεδιασμού της τροχιάς εργαλείων, αλλά το αντιστάθμισμα είναι απaráδεκτο, καθώς αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας και περιορίζονται οι δυνατότητες της μηχανής CNC. Ως αποτέλεσμα, η εργασία κοπής επεκτείνεται ώστε να περιλαμβάνει πρόχειρες και τελικές κοπές με εργαλεία διαφόρων μεγεθών. Κατασκευάζονται δύο διαφορετικές διαδρομές εργαλείων εντός κάθε προσανατολισμού. Αρχικά εκτελείται μια κατεργασία εκχόνδρισης για την αφαίρεση του μεγαλύτερου μέρους του υλικού από το τεμάχιο. Η κατεργασία ξεκινά από την περιφέρεια του

κυλινδρικού αποθέματος και συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η πιο απομακρυσμένη επιφάνεια ή να κατεργαστεί πλήρως το απόθεμα (Frank 2007). Ανάλογα με τη διάμετρο του τεμαχίου, το εργαλείο εκχόνδρισης μπορεί να είναι μεγαλύτερο και πρέπει να έχει επαρκές μήκος για την εκτέλεση της κατεργασίας.

Κατά την κατεργασία σε μεγάλο βάθος κοπής, η επιφάνεια επαφής μήκους εργαλείου αυξάνεται. Κατά συνέπεια, οι παράμετροι κοπής πρέπει να διαχειρίζονται αποτελεσματικά για την αποφυγή αστοχίας του εργαλείου. Στη συνέχεια, η κατεργασία φινιρίσματος αφαιρεί τυχόν εναπομείναν υλικό και διασφαλίζει τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ποιότητας. Επιπλέον, το βάθος κοπής μειώνεται στην κεντρική ακτίνα του τεμαχίου. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία χωρίς χαρακτηριστικά, η κατεργασία φινιρίσματος χρησιμοποιεί τη μικρότερη διάμετρο εργαλείου για την κατεργασία όλων των υφιστάμενων χαρακτηριστικών. Καθώς και οι δύο λειτουργίες χρησιμοποιούν τις ίδιες περιοχές κοπής, υπάρχουν λίγες επιπτώσεις για τον σχεδιασμό της διαδρομής εργαλείων. Παρ' όλα αυτά, ο αριθμός των εργασιών αυξάνεται επειδή κάθε προσανατολισμός απαιτεί δύο εργασίες κοπής. Ο συνδυασμός διαφορετικών μεγεθών εργαλείων για τις κατεργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος έχει αναμφίβολα αυξήσει την αποδοτικότητα της κατεργασίας με CNC-RP. Ο συνδυασμός των σωστών μεγεθών των κοπτικών εργαλείων είναι μια άλλη μέθοδος που αναπτύχθηκε για τη βελτίωση της διαδικασίας. Τα μικρά εργαλεία μπορούν να έχουν πρόσβαση σε όλες σχεδόν τις περιοχές, αλλά έχουν χαμηλό ποσοστό αφαίρεσης υλικού.

Αντίθετα, τα μεγάλα εργαλεία αφαιρούν περισσότερο υλικό με ταχύτερο ρυθμό, αλλά δεν μπορούν να προσεγγίσουν μικρές περιοχές κοπής. Για την εξισορρόπηση του συνδυασμού μεγεθών εργαλείων, χρησιμοποιείται ο όγκος πρόσβασης εργαλείων (Tool Access Volume - TAV) για τον υπολογισμό της προσβάσιμης περιοχής για διάφορα μεγέθη κοπτικών εργαλείων. Με τη χρήση μιας άλλης μεθόδου που ονομάζεται Relative Delta Volume Clearance (RDVC), μπορεί να προσδιοριστεί η βέλτιστη επιλογή και αλληλουχία εργαλείων, δεδομένου του προσπελάσιμου όγκου που υπολογίζεται από το TAV (Lim et al. 2001). Η RDVC δημιουργήθηκε για να δημιουργήσει μια σχέση μεταξύ του TAV και των ποσοστών αφαίρεσης υλικού (MRR), καθώς και μεταξύ κάθε εργαλείου που χρησιμοποιείται σε ένα δεδομένο σύνολο κατεργασιών. Ως εκ τούτου, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του βέλτιστου συνδυασμού μεγέθους εργαλείου για κατεργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος. Καθώς η μέθοδος

χρησιμοποιεί μια στρατηγική διαδρομής εργαλείων βασισμένη σε στρώματα, μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε CNC-RP ειδικότερα. Μεγάλη προσπάθεια πρέπει να καταβληθεί για τον προσδιορισμό του εναπομένου όγκου μετά την ολοκλήρωση των κατεργασιών εκχόνδρισης, καθώς αυτός αντιπροσωπεύει το εναπομένον υλικό για τις κατεργασίες φινιρίσματος (Renner 2008). Χρησιμοποιώντας έναν γενετικό αλγόριθμο, προσδιορίζεται ο ελάχιστος συνολικός χρόνος κατεργασίας με βάση τις πληροφορίες που συλλέγονται από τις αναλύσεις TAV και RDVC σε συνδυασμό με ένα σύνολο προσανατολισμών κοπής.

Σε γενικές γραμμές, οι δύο προηγούμενες παράγραφοι επικεντρώθηκαν στην προσέγγιση των εργαλείων που υιοθετείται από τις διαδικασίες CNC-RP. Η εισαγωγή κατεργασιών εκχόνδρισης και φινιρίσματος με τα κατάλληλα μεγέθη κοπτικών εργαλείων μειώνει το συνολικό χρόνο κατεργασίας και βελτιώνει την αποδοτικότητα της διαδικασίας. Ο βέλτιστος συνδυασμός μεγεθών εργαλείων για τις κατεργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος είναι απαραίτητος για την ενίσχυση των διεργασιών κατεργασίας. Ωστόσο, η ενσωμάτωση των κοπτικών εργαλείων επικεντρώνεται αποκλειστικά στις διαστάσεις του εργαλείου και όχι στις γεωμετρίες του. Κατά συνέπεια, κατά τις κατεργασίες φινιρίσματος χρησιμοποιούνται εργαλεία επίπεδης φρεζας με τα μικρότερα βάθη κοπής για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική κατεργασία και τραχύ φινίρισμα σε ορισμένες επιφάνειες εξαρτημάτων. Επομένως, η περιορισμένη επιλογή γεωμετριών εργαλείων τείνει να περιορίζει την ικανότητα της κατεργασίας με CNC να παράγει εξαρτήματα υψηλής ποιότητας. Απώτερος στόχος είναι η αυτόματη εκτέλεση των εργασιών σχεδιασμού, ώστε οι διεργασίες κατεργασίας να λειτουργούν γρήγορα. Λόγω του γεγονότος ότι η CNC-RP αποτελείται από πολλαπλές διεργασίες, η αλληλεπίδραση μεταξύ CAD/CAM και διαφόρων αλγορίθμων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή παραγωγή πρωτοτύπων. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε ένα προσαρμοσμένο πρόγραμμα εντός ενός εμπορικά διαθέσιμου πακέτου CAD/CAM που παράγει αυτόματα κώδικα NC για την κατεργασία (Frank 2007). Το πρόγραμμα ενσωματώνει όλα τα στάδια επεξεργασίας, ξεκινώντας από το μοντέλο CAD και καταλήγοντας στη δημιουργία κωδικών κατεργασίας. Χρησιμοποιεί το πακέτο MasterCAM® ως βάση για την αυτοματοποίηση όλων των εργασιών σχεδιασμού της διαδικασίας. Στο πρώτο βήμα περιγράφεται η ανάλυση ορατότητας, συμπεριλαμβανομένου του προσδιορισμού των προσανατολισμών κοπής, της διαμέτρου του τεμαχίου και των επιπέδων κοπής. Ο καθορισμός του συστήματος συντεταγμένων και της ασφαλούς απόστασης εργασίας μεταξύ των εξαρτημάτων της μηχανής είναι το επόμενο

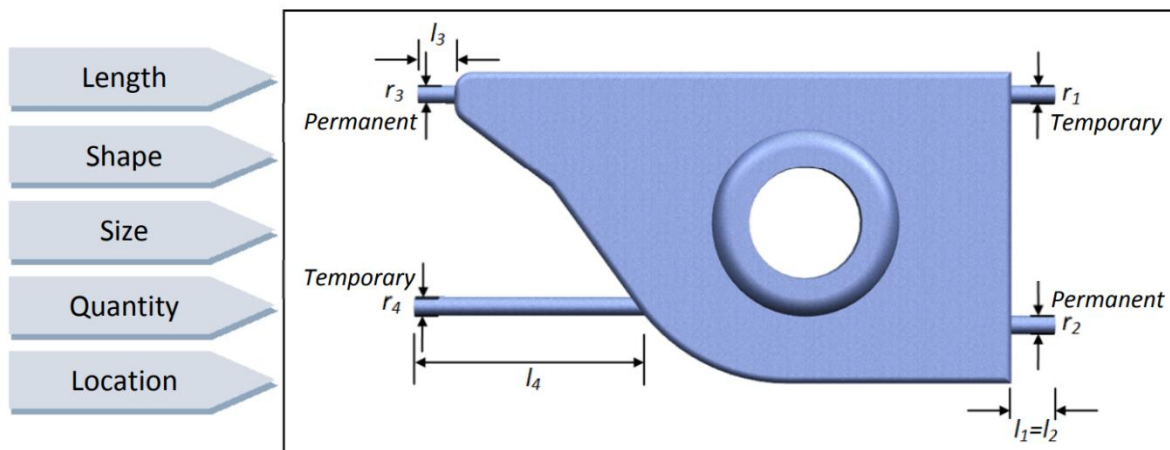
βήμα της διαδικασίας. Αυτό αποτελεί προϋπόθεση για την αποφυγή σύγκρουσης εργαλείων και τη διατήρηση της συνέχειας της διαδικασίας.

Η κύρια εστίαση του τρίτου βήματος είναι η δημιουργία θυσιαστικών χαρακτηριστικών στήριξης. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας είναι η ποσότητα, η διάμετρος και η θέση των κυλίνδρων στήριξης που είναι πιθανό να γίνουν μόνιμα ή προσωρινά στηρίγματα. Τέλος, αναπτύσσεται η διαδρομή εργαλείων της εργασίας. Για την ολοκλήρωση της εργασίας απαιτούνται πληροφορίες για το εργαλείο και τις παραμέτρους κοπής. Το αρχείο STL που παράγεται από το μοντέλο CAD αποτελεί την κύρια είσοδο για κάθε βήμα επεξεργασίας. Από το αρχικό έως το τρίτο βήμα επεξεργασίας, είναι απαραίτητη η είσοδος του χρήστη. Έχει καταγραφεί μια δεύτερη εφεύρεση που εκτελεί παρόμοιες εργασίες αλλά χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό σύστημα CAM, το ALPHACAM® (Agrawal et al. 2013). Το σύστημα που αναπτύχθηκε έχει τον ίδιο στόχο και αποσκοπεί στην ουσιαστική αυτοματοποίηση των εργασιών σχεδιασμού διεργασιών και στη μείωση της εξάρτησης από χειροκίνητους ελέγχους. Έχει αποδειχθεί ότι ο αυτοματοποιημένος σχεδιασμός διεργασιών μπορεί να επιτευχθεί συνδυάζοντας εμπορικά λογισμικά CAD/CAM με προσαρμοσμένους αλγόριθμους ή προγράμματα. Αυτό μπορεί να χρησιμεύσει ως βάση για τον καθορισμό απαιτήσεων αυτοματοποίησης για διαδικασίες CNC RP. Ο πρωταρχικός στόχος είναι να αποφευχθεί ο χειροκίνητος σχεδιασμός που δεν συνάδει με τους στόχους της ταχείας επεξεργασίας. Υπό αυτό το πρίσμα, οποιεσδήποτε νέες προσεγγίσεις που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση των κατεργασιών πρέπει επίσης να περιλαμβάνουν τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτέλεση της φάσης σχεδιασμού. Κατά συνέπεια, απαιτούνται προσαρμοσμένοι κώδικες και προγραμματισμός για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών και χρησιμεύουν ως εργαλεία επικοινωνίας με τον χρήστη. Επιπλέον, οι κώδικες αυτοί πρέπει να είναι συμβατοί με τα εμπορικά λογισμικά CAM. Η συμμόρφωση με αυτές τις απαιτήσεις θα επιτρέψει την αυτόματη κατασκευή των εργασιών κοπής και τη δημιουργία κωδικών κατεργασίας.

Βελτίωση της μεθόδου στερέωσης

Στις προσθετικές διεργασίες, η θυσιαστική στερέωση της CNC-RP είναι ο μηχανισμός στήριξης. Αντί να χρησιμοποιούνται για τη στήριξη υπερκείμενων δομών, τα στηρίγματα CNC-RP χρησιμεύουν για τη συγκράτηση και τη σύνδεση του εξαρτήματος με το υπόλοιπο τεμάχιο. Η

κοπή από διαφορετικούς προσανατολισμούς απαιτεί το εξάρτημα να εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι να στηρίζει το τεμάχιο και να παρέχει ακαμψία στο εξάρτημα και ο δεύτερος είναι να διατηρεί τις πληροφορίες θέσης του εξαρτήματος μεταξύ των προσανατολισμών. Αυτές είναι κρίσιμες απαιτήσεις για τη συνεχή κατεργασία του εξαρτήματος με το ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Το CNC-RP διαθέτει πλέον μια μέθοδο για την αυτοματοποίηση της δημιουργίας θυσιαστικών στηρίξεων, χάρη στις πρόσφατες εξελίξεις. Δεδομένου ότι το CNC-RP έχει σχεδιαστεί για να φιλοξενεί μεγάλη ποικιλία γεωμετριών τεμαχίων, η δομή στήριξης πρέπει να αναπτύσσεται με προσοχή. Έτσι, είναι δυνατή η δημιουργία δύο τύπων θυσιαστικών στηρίξεων που βασίζονται σε μόνιμες και προσωρινές στηρίξεις. Η μόνιμη στήριξη λειτουργεί ουσιαστικά ως διάταξη σύσφιξης που συγκρατεί το τεμάχιο καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας, ενώ η προσωρινή στήριξη χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του τεμαχίου, αλλά στη συνέχεια αφαιρείται με την ολοκλήρωση της κατεργασίας (Boonsuk et al. 2009). Κατά την προσπάθεια δημιουργίας ενός συστήματος αυτόματης δημιουργίας στήριξης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορες παράμετροι σχεδιασμού. Το σχήμα 16 απεικονίζει γραφικά τις παραμέτρους αυτές.



Εικόνα 16 Οι παράμετροι σχεδιασμού της θυσιαστικής στήριξης αποτελούνται από το μήκος (l_1 , l_2 , l_3 , l_4), το σχήμα (κυλινδρικό), το μέγεθος (r_1 , r_2 , r_3 , r_4), την ποσότητα (4 στηρίξεις) και τις θέσεις (Boonsuk et al. 2009).

Υπάρχουν δύο πιθανοί τύποι παραμόρφωσης σε θυσιαζόμενα στηρίγματα: κάμψη και στρέψη. Λόγω του μικρού μεγέθους της στήριξης, οι παραμορφώσεις είναι πιθανότερο να εμφανιστούν όταν εφαρμόζονται δυνάμεις κοπής στο τεμάχιο. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί το μήκος της στήριξης χωρίς να παρεμποδίζεται η προσβασιμότητα των κοπτικών εργαλείων. Το κυλινδρικό στηρίγμα χρησιμοποιείται συχνά επειδή είναι εύκολο να εντοπιστεί ανεξάρτητα από τους προσανατολισμούς και άλλες μεταβλητές. Το σχήμα αυτό, ωστόσο, δεν είναι κατάλληλο για ορισμένες γεωμετρίες τεμαχίων, όπως οι λεπτές πλάκες. Κατά τον καθορισμό του μεγέθους του στηρίγματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες. Σε αυτούς περιλαμβάνονται η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση, η διάμετρος του εξαρτήματος, το μήκος της στήριξης και τα υλικά. Για τη στήριξη του τεμαχίου απαιτούνται τουλάχιστον δύο μόνιμα στηρίγματα. Εάν, ωστόσο, αυτό δεν ανταποκρίνεται σε μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή παραμόρφωσης, απαιτούνται πρόσθετα στηρίγματα. Σε αυτή την καινοτομία, οι θέσεις των στηρίξεων επιλέγονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις ροπής που προκαλούνται από την απόσταση και τη δύναμη κοπής που ασκείται από το κέντρο μάζας της δοκού. Τελικά, η δυνατότητα αυτόματου σχεδιασμού επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση όλων αυτών των απαιτήσεων στο πακέτο MasterCAM® με τη χρήση μιας τυποποιημένης γλώσσας προγραμματισμού.

3. Εργαλεία κοπής

3.1 Βελτίωση των εργασιών εκχόνδρισης

Οι συμβατικές τεχνικές αφαίρεσης υλικού, όπως η κατεργασία, έχουν αποδειχθεί ότι μπορούν να εξυπηρετήσουν μια μεγάλη ποικιλία υλικών και εξαρτημάτων. Η επέκταση της χρήσης των φρεζομηχανών στη ΡΜ προέκυψε από τη βελτίωση των διαδικασιών κατεργασίας και του σχεδιασμού της διαδικασίας. Η χρήση ενός δείκτη 4ου άξονα ως διάταξη σύσφιξης επιτρέπει την περιστροφή του εξαρτήματος γύρω από έναν μόνο άξονα περιστροφής. Αυτή η ξεχωριστή μεθοδολογία δίνει στα εργαλεία την ευελιξία να αφαιρούν υλικό από ποικίλους προσανατολισμούς. Για να ενισχυθεί η χρήση των φρεζομηχανών ως εργαλείων RM, υπάρχουν ωστόσο ορισμένοι τομείς που μπορούν να βελτιωθούν. Η πρώτη βελτίωση επικεντρώνεται στις κατεργασίες εκχόνδρισης με την τροποποίηση του συνόλου των προσανατολισμών που χρησιμοποιούνται στην κατεργασία- αξιολογούνται οι επιπτώσεις όσον αφορά τον χρόνο κατεργασίας και την αποδοτικότητα της διαδικασίας. Η δεύτερη βελτίωση λαμβάνει υπόψη την ενσωμάτωση των εργαλείων κατά τις κατεργασίες φινιρίσματος, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί τύποι εργαλείων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής. Σε γενικές γραμμές, οι εν λόγω βελτιώσεις τείνουν να περιπλέκουν το έργο του σχεδιασμού της διαδικασίας, αλλά η πολυπλοκότητα αυτή μπορεί να μειωθεί με μελλοντικές καινοτομίες που διευκολύνουν τον ελάχιστο σχεδιασμό. Όλες αυτές οι βελτιώσεις βελτιώνουν τη διαδικασία υιοθέτησης εργασιών φρεζαρίσματος για την ταχεία παραγωγή εξαρτημάτων.

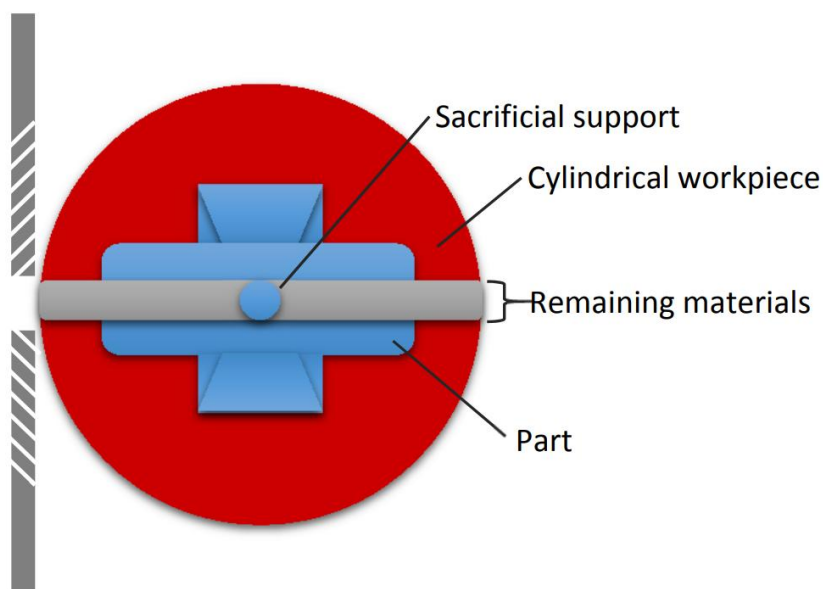
Οι κατεργασίες εκχόνδρισης είναι εκείνα τα τμήματα των διεργασιών κοπής που αφορούν κυρίως την αφαίρεση μεγάλης ποσότητας υλικού και χρησιμοποιούν τη μέγιστη δυνατή ισχύ της μηχανής (Arezzo et al. 2000). Οι αρχικές μέθοδοι του Frank (2007) συνδυάζουν συνήθως τις κατεργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος σε έναν ενιαίο προσανατολισμό. Ο προσανατολισμός ξεκινά με εργασίες εκχόνδρισης, ακολουθούμενες από εργασίες φινιρίσματος. Το μέγιστο βάθος

των κατεργασιών εκχόνδρισης καθορίζεται από το επιλεγμένο κοπτικό εργαλείο. Χρησιμοποιούνται τουλάχιστον τρεις προσανατολισμοί για την τήρηση του κανόνα που απαγορεύει τον σχηματισμό λεπτών ιστών. Επιπλέον, ο προσανατολισμός καθορίζεται με βάση την ανάλυση της ορατότητας του τεμαχίου σε σχέση με την προσβασιμότητα του εργαλείου (Frank et al. 2004). Ως εκ τούτου, οι προτεινόμενοι προσανατολισμοί είναι επίσης κατάλληλοι για εργασίες φινιρίσματος για την επίτευξη της τελικής γεωμετρίας του τεμαχίου. Αυτές είναι οι γενικές μέθοδοι κοπής που προέρχονται από προηγούμενες έρευνες και χρησιμοποιούνται για την καθιέρωση μηχανών CNC σε διεργασίες RM. Καθώς οι κατεργασίες εκχόνδρισης αφαιρούν το μεγαλύτερο μέρος του υλικού, είναι απαραίτητο να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία με την αναθεώρηση των προσανατολισμών κοπής, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος κατεργασίας. Η παρούσα προκαταρκτική ανάλυση διενεργείται για τον προσδιορισμό της επίδρασης των προσανατολισμών της πρόχειρης κοπής στους συνολικούς χρόνους κατεργασίας για την παραγωγή πανομοιότυπων τεμαχίων. Στόχος είναι η βελτίωση των κατεργασιών πρόχειρης κατεργασίας με την αύξηση του ποσοστού του συνολικού χρόνου κατεργασίας που αφιερώνεται στις πρόχειρες κοπές. Αυτό θα αυξήσει την ποσότητα του υλικού που αφαιρείται κατά τις κατεργασίες εκχόνδρισης και θα μειώσει έμμεσα το συνολικό χρόνο κατεργασίας, αφήνοντας τη μικρότερη δυνατή ποσότητα υλικού για φινίρισμα.

3.1.1 Πρόσθετοι προσανατολισμοί για εργασίες εκχόνδρισης

Σε γενικές γραμμές, η επινοηθείσα μέθοδος συνιστά πρόσθετα σύνολα προσανατολισμού για τις κατεργασίες εκχόνδρισης, ώστε να αυξηθεί η ποσότητα του υλικού που αφαιρείται. Καθώς οι απαιτήσεις ποιότητας και ακρίβειας του τεμαχίου δεν αποτελούν παράγοντα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας εκχόνδρισης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιθετικές παράμετροι κοπής (Sun et al. 2001). Η στρατηγική αυτή βασίζεται στην προσθήκη δύο αντίθετων προσανατολισμών που εκτελούν εργασίες εκχόνδρισης κατά την έναρξη της διαδικασίας κοπής. Στη συνέχεια, η διαδικασία συνεχίζεται εκτελώντας εργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος με βάση τους προσανατολισμούς ορατότητας. Η δημιουργία πρόσθετων προσανατολισμών για τις πρόχειρες κοπές είναι μια μέθοδος για την αύξηση της ποσότητας υλικού που αφαιρείται κατά τη διάρκεια των κατεργασιών εκχόνδρισης. Λόγω της χρήσης δύο αντίθετων προσανατολισμών, οι πρόχειρες

κοπές περιορίζονται στην επαπτόμενη ακμή των θυσιαζόμενων στηριγμάτων. Ως εκ τούτου, το εναπομένον μη κομμένο υλικό θα εμφανίζεται ως μια παχιά πλάκα στο κέντρο του κυλινδρικού τεμαχίου. Τελικά, θα εξαλειφθεί κατά τη διάρκεια των κατεργασιών εκχόνδρισης για τους καθορισμένους προσανατολισμούς ορατότητας. Στο Σχήμα 17 απεικονίζεται το βάθος κοπής έως την άκρη της θυσιαστικής στήριξης στις 0 και 180 μοίρες.



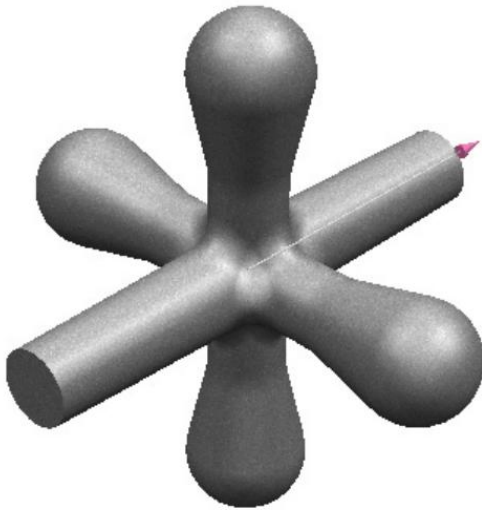
Εικόνα 17 Χοντρό βάθος κοπής σε πρόσθετους προσανατολισμούς προσέγγισης

Μετά την ολοκλήρωση των δύο πρόσθετων κατεργασιών εκχόνδρισης, όλες οι επόμενες κατεργασίες κοπής σε προσανατολισμούς ορατότητας προγραμματίζονται να κόβουν μόνο στο κέντρο του κυλινδρικού τεμαχίου. Επομένως, δεν είναι απαραίτητο οι πρόχειρες κοπές να φτάσουν στο μέγιστο δυνατό βάθος. Έτσι αποφεύγεται η παρατεταμένη επαφή του εργαλείου κατά την κατεργασία και μειώνεται η δύναμη του κοπτικού εργαλείου. Το NX7.5 επιλέχθηκε για την εικονική αναζήτηση βέλτιστων συνόλων πρόσθετων προσανατολισμών με τη χρήση εμπορικού λογισμικού CAD στην παρούσα μελέτη (Siemens PLM, 2009). Για κάθε προτεινόμενο σύνολο προσανατολισμών, το λογισμικό προσομοιώνει την κατεργασία και εκτιμά τον χρόνο κατεργασίας που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνόλων προσανατολισμού, οι κατευθύνσεις της κατεργασίας

αυξάνονται κατά 10 μοίρες από 0 έως 180 μοίρες. Οι προσανατολισμοί που υποδεικνύουν τον μικρότερο χρόνο κατεργασίας επιλέγονται για τις κατεργασίες εκχόνδρισης.

3.1.2 Προσομοίωση της διάρκειας πριονίσματος

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε εφαρμόζεται στο μοντέλο του γρύλου παιχνιδιού που παρουσιάζεται στο σχήμα 18. Αυτό μοιάζει με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενη μελέτη (Frank et al. 2006). Κατά συνέπεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιοι προσανατολισμοί κοπής, επιτρέποντας μια ισοδύναμη σύγκριση με τη μέθοδο που θα παρουσιαστεί εδώ. Πριν από την προσομοίωση, το λογισμικό χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του προγράμματος κατεργασίας. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τυποποιημένα σύνολα παραμέτρων κατεργασίας με βάση τις κατεργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος. Οι πρόσθετοι προσανατολισμοί που καθορίστηκαν είναι 0ο και 180ο, ενώ οι προσανατολισμοί ορατότητας είναι 45ο, 135ο, 225ο και 315ο. Η τιμή του πρόσθετου προσανατολισμού αυξάνεται κατά 10 μοίρες κατά τη διάρκεια της φάσης προσομοίωσης, ενώ οι προσανατολισμοί ορατότητας παραμένουν αμετάβλητοι. Ο χρόνος κατεργασίας καταγράφεται ενώ ο πρόσθετος προσανατολισμός μεταβάλλεται από 10ο/190ο σε 20ο/200ο σε 80ο/260ο. Δεδομένου ότι ο γρύλος-παιχνίδι θεωρείται αξονοσυμμετρικό αντικείμενο, οι αναλύσεις διεξάγονται μόνο μέχρι γωνία 80 μοιρών.



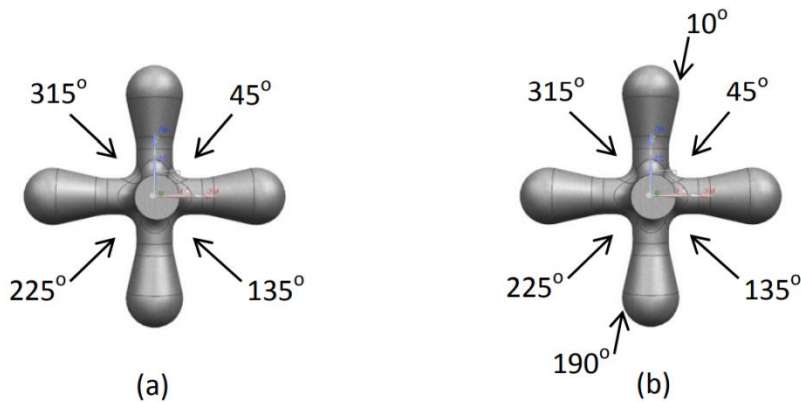
Εικόνα 18 Μοντέλο Toy Jack (Frank et al. 2006)

Εκτελείται μια σειρά προσομοιώσεων για τον προσδιορισμό των βέλτιστων προσανατολισμών για περαιτέρω κατεργασίες εκχόνδρισης. Ως εκ τούτου, το σύνολο προσανατολισμών 10ο /190ο υποδεικνύει τον μικρότερο χρόνο κατεργασίας και θεωρείται το βέλτιστο σύνολο προσανατολισμών για το συγκεκριμένο εξάρτημα. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση του συνολικού χρόνου κατεργασίας σε σύγκριση με τις κατεργασίες που εξαρτώνται αποκλειστικά από τους

προσανατολισμούς ορατότητας. Με αυτούς τους προσανατολισμούς ορατότητας, η κατεργασία διήρκεσε 9 ώρες και 44 λεπτά, ενώ η προσθήκη δύο προσανατολισμών για την εκχόνδριση μείωσε τον χρόνο κοπής κατά 28 λεπτά. Ο χρόνος που δαπανήθηκε για τις πρόχειρες κοπές είναι ένας παράγοντας που συμβάλλει σε αυτή τη μείωση. Οι κατεργασίες πρόχειρης κατεργασίας ολοκληρώθηκαν με τους προσανατολισμούς ορατότητας σε περίπου 1 ώρα και οκτώ λεπτά. Αντίθετα, η μέθοδος που αναπτύχθηκε απαιτούσε 1 ώρα και 27 λεπτά για την πρόχειρη κοπή του εξαρτήματος. Αυτό καταδεικνύει την επιρροή των κατεργασιών εκχόνδρισης και των προσανατολισμών στο συνολικό χρόνο που απαιτείται για την κατεργασία.

Orientations set	Total machining time (hour:min)
0° / 180°	09:43
10° / 190°	09:16
20° / 200°	09:49
30° / 210°	09:35
40° / 220°	09:25
50° / 230°	09:26
60° / 240°	09:35
70° / 250°	09:44
80° / 260°	09:35

Πίνακας1 Συνολικός χρόνος κατεργασίας που καταγράφεται σε πρόσθετους προσανατολισμούς που έχουν οριστεί



Εικόνα 19 (α) κατευθύνσεις κατεργασίας που χρησιμοποιούνται σε προσανατολισμούς ορατότητας και β) πρόσθετες προσανατολισμοί (10ο /190ο) για κατεργασίες εκχόνδρισης

3.2 Ενσωμάτωση εργαλείων σε εργασίες φινιρίσματος

Ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ζήτησης από τους κατασκευαστές, το RM θεωρείται πλέον βιώσιμη τεχνική παραγωγής. Για τους σκοπούς της εργαλειοποίησης, η κατεργασία CNC, ιδίως το φρεζάρισμα, χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή διακριτών εξαρτημάτων, όπως μήτρες και καλούπια. Έτσι, η διαδικασία μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να λειτουργήσει ως τεχνική RM. Η ποιότητα των μήτρων/καλούπια και των κατεργασμένων τεμαχίων καθορίζεται κυρίως από την επιφανειακή τραχύτητα και την ακρίβεια των τεμαχίων (Ryu et al. 2006). Κατά συνέπεια, οι κατάλληλες παράμετροι κοπής και οι επιλογές εργαλείων πρέπει να έχουν προτεραιότητα κατά τον προγραμματισμό των κατεργασιών κατεργασίας. Τα μεγάλα κοπτικά εργαλεία έχουν εξαιρετική απόδοση κατεργασίας αλλά δεν μπορούν να προσεγγίσουν μικρές περιοχές, ενώ τα μικρά κοπτικά εργαλεία μπορούν να καλύψουν όλες τις επιφάνειες αλλά έχουν χαμηλή απόδοση κοπής (Lim et al. 2001, Sun et al. 2001). Κατά την επιλογή μεταξύ επίπεδων και σφαιρικών ακροφρεζών, οι ίδιου είδους εκτιμήσεις είναι σημαντικές. Και οι δύο έχουν ξεχωριστές δυνατότητες και είναι κατάλληλες για διαφορετικούς τύπους εδάφους. Κατά συνέπεια, ο συνδυασμός μεγέθους και τύπου εργαλείου έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα του τεμαχίου και στην απόδοση κοπής. Οι διαφορετικοί προσανατολισμοί της κατεργασίας εκθέτουν διάφορους τύπους επιφάνειας στα κοπτικά εργαλεία. Εάν το κοπτικό εργαλείο δεν

είναι κάθετο στην επιφάνεια, οι επίπεδες επιφάνειες μπορεί να γίνουν κεκλιμένες. Η τρέχουσα μέθοδος χρησιμοποιεί το εργαλείο με τη μικρότερη διάμετρο και το απαιτούμενο μήκος για να φτάσει στις ορατές επιφάνειες του τεμαχίου. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο τις απλές διαδρομές εργαλείων "212 D", οπότε επιλέχθηκαν επίπεδες ακραίες φρέζες για τις κατεργασίες φινιρίσματος (Frank et al. 2004). Προς το παρόν δεν υπάρχουν σαφείς κατευθυντήριες γραμμές για την ενσωμάτωση διαφορετικών τύπων εργαλείων φινιρίσματος. Η εξάρτηση από ένα μόνο εργαλείο κοπής είναι αναποτελεσματική, διότι τείνει να αυξάνει τον χρόνο επεξεργασίας και, κατά συνέπεια, το κόστος παραγωγής (Soepardi et al. 2010). Προκειμένου να διευκολυνθεί η ενσωμάτωση εργαλείων στις κατεργασίες και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της PM, πρέπει να υπάρχει μια σαφής μέθοδος.

3.2.1 Προσαρμοστικότητα των κοπτικών εργαλείων

Αρχικά, διερευνήθηκε η επίδραση των επίπεδων και των ακροφρεζών με σφαιρική μύτη στην τραχύτητα της επιφάνειας κατά τις κατεργασίες φινιρίσματος. Γενικά, υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις ταξινομήσεις επιφάνειας που μπορεί να υπάρχουν σε ένα τεμάχιο όταν αυτό κόβεται προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Αυτές περιγράφονται ως επιφάνειες ελεύθερης μορφής (1), επίπεδες επιφάνειες (2) και κεκλιμένες επιφάνειες (3). Σε κάθε επιφάνεια εκτελούνται εργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος με διάφορα εργαλεία φινιρίσματος. Το δοκίμιο A χρησιμοποιεί έναν επίπεδο ακροχαρακτήρα τόσο για την εκχόνδριση όσο και για το φινίρισμα, ενώ το δοκίμιο B χρησιμοποιεί έναν επίπεδο ακροχαρακτήρα για την εκχόνδριση και έναν ακροχαρακτήρα με σφαιρική μύτη για το φινίρισμα. Παρόμοια με άλλες εφαρμογές κατεργασίας με CNC, είναι δυνατή η βελτίωση της επιφάνειας φινιρίσματος με ένα μόνο εργαλείο ελέγχοντας τις συνθήκες και τις παραμέτρους κοπής. Ωστόσο, επειδή η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί αυτόματη δημιουργία εργασιών σχεδιασμού, η πλειονότητα των παραμέτρων κατεργασίας παραμένει αμετάβλητη. Αυτό γίνεται για να διατηρηθούν στο ελάχιστο οι εργασίες σχεδιασμού, ώστε να μπορεί να εκτελεστεί γρήγορα ολόκληρη η διαδικασία. Η ταχύτητα της ατράκτου και οι ρυθμοί πρόωσης βασίζονται στο μέγεθος του εργαλείου, 8 mm για την ακατέργαστη κοπή και 6 mm για τη φινιρίσμα. Οι συνήθεις τιμές ρύθμισης για τις εργασίες φινιρίσματος αποτελούνται από ένα βήμα του εργαλείου κατά 20% και ένα βάθος κοπής 0,1 mm.

3.3 Σχεδιασμός διαδικασιών κατεργασίας CNC

Σε αρκετούς τομείς της μεταποίησης, τα ζητήματα αυτοματισμού παραμένουν άλυτα και είναι δύσκολο να εφαρμοστούν πλήρως (Bourell et al. 2009, Bourne et al. 2011). Παρά το ζήτημα αυτό, οι κατασκευαστές συνεχίζουν να απαιτούν ιδιαίτερα αυτοματοποιημένες διαδικασίες κατεργασίας προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικοί παράγοντας προϊόντα υψηλής ποιότητας στον συντομότερο δυνατό χρόνο. Αντίθετα, η κατεργασία με CNC απαιτεί εκτεταμένη εργασία κατά τη δημιουργία του προγράμματος κατεργασίας πριν από την ακριβή κατασκευή του τεμαχίου (Townsend et al. 2012). Η δημιουργία λειτουργιών και ο σχεδιασμός διαδρομών εργαλείων τείνουν να επιβραδύνουν τη διαδικασία και να οδηγούν σε αναποτελεσματικότητα (Liang et al. 1996). Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν δημιουργήσει υλικό υψηλής τεχνολογίας εξοπλισμένο με διάφορους τύπους λογισμικού. Έτσι, η αυτοματοποίηση μπορεί να ενσωματωθεί στις εργασίες σχεδιασμού διαδικασιών χρησιμοποιώντας μια ποικιλία μεθοδολογιών και εργαλείων. Είναι προφανές ότι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία κατεργασίας παράγει σωστά προγράμματα κατεργασίας χωρίς εκτεταμένες δοκιμαστικές εκτελέσεις. Αυτή είναι η θεμελιώδης αρχή της κατεργασίας CNC για εφαρμογές RM. Αποσκοπεί στην αυτόματη δημιουργία προγραμμάτων NC και στην αποφυγή του χρόνου προετοιμασίας που υπερβαίνει τον πραγματικό χρόνο κατεργασίας. Οι πρόσφατες εξελίξεις στα συστήματα CAD/CAM έχουν προκαλέσει την ευρεία υιοθέτηση αυτόματα παραγόμενων διαδρομών εργαλείων που απαιτούν λιγότερη εργασία. Ένα επαρκές επίπεδο αυτοματοποίησης μπορεί να επιτευχθεί στον προγραμματισμό της διαδικασίας με τον περιορισμό μερικών παραμέτρων της διαδικασίας. Η στρατηγική αυτή υιοθετείται στην αρχική μελέτη για την απλούστευση των εργασιών σχεδιασμού κατεργασιών CNC (Frank 2003). Για παράδειγμα, τα κριτήρια επιλογής εργαλείων έχουν εξορθολογιστεί με την επιλογή των μικρότερων διαθέσιμων μεγεθών και βασίζονται στην υπόθεση ότι το τεμάχιο στερείται χαρακτηριστικών. Έτσι, οι εργασίες αναγνώρισης χαρακτηριστικών μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση μικρών εργαλείων που μπορούν να προσεγγίσουν όλες τις γεωμετρίες του τεμαχίου. Με βάση τις προαναφερθείσες προτεινόμενες βελτιώσεις, οι εργασίες σχεδιασμού επανασχεδιάζονται ώστε να ενσωματώνουν αυτές τις μεθόδους με ελάχιστη εισαγωγή από τον χρήστη. Παρά την αυτόματη λειτουργία, αναμένεται ότι τα προγράμματα θα διατηρήσουν αρκετή ευελιξία ώστε να επιτρέπουν στο χρήστη να διαμορφώνει μερικές παραμέτρους κατά τη

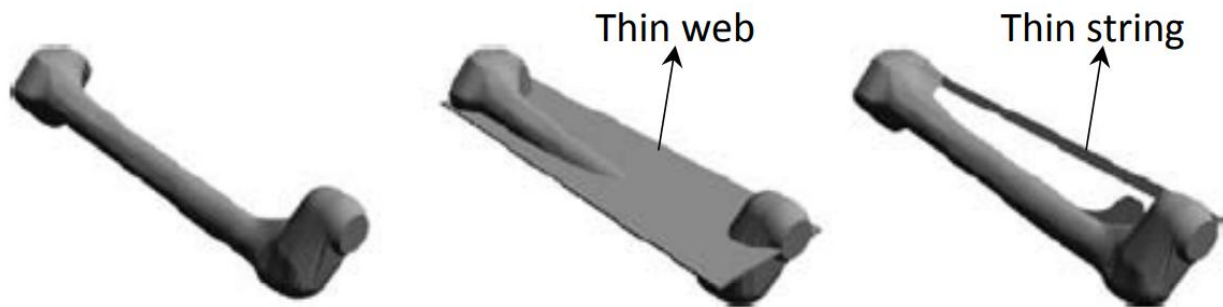
φάση του σχεδιασμού. Αυτό το χαρακτηριστικό θα ενισχύσει την ικανότητα του προγράμματος να προσαρμόζει ποικίλες γεωμετρίες και χαρακτηριστικά σε διακριτά μέρη.

3.4 Προσανατολισμοί για κατεργασίες εκχόνδρισης σε CNC-RM

Οι κατεργασίες εκχόνδρισης διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην κατεργασία και τη διαμόρφωση των εξαρτημάτων ως συστατικό των διεργασιών που περιλαμβάνουν την αφαίρεση μεγάλων ποσοτήτων υλικού. Κατά τη διάρκεια αυτών των εργασιών, η ακρίβεια των διαστάσεων και η ποιότητα της επιφάνειας λαμβάνονται λιγότερο υπόψη. Κατά συνέπεια, υπάρχει ένας βαθμός ευελιξίας στον καθορισμό των παραμέτρων κοπής κατά το σχεδιασμό της διαδικασίας (Anderberg et al. 2009). Η περιστροφή ενός τεμαχίου σε μια διάταξη δεικτοδότησης σε μια φρεζομηχανή CNC επιτρέπει στα εργαλεία να κόψουν το τεμάχιο από διάφορες γωνίες. Η αρχική μέθοδος εκτελούσε κατεργασίες εκχόνδρισης με βάση τους προσανατολισμούς που είχαν καθοριστεί για τις κατεργασίες φινιρίσματος. Αυτά τα σύνολα προσανατολισμών καθορίζονται από ένα πρόγραμμα που αναλύει τη γραμμή όρασης προς τις επιφάνειες που παρουσιάζονται στο τεμάχιο και καθορίζει τους προσανατολισμούς αναλόγως. Ανάλογα με την περιστροφή του τεμαχίου, ένας αριθμός επιφανειών είναι ορατός σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς. Ένας επαρκής αριθμός προσανατολισμών θα εκθέσει όλες τις επιφάνειες του τεμαχίου, επιτρέποντας την αποτελεσματική κοπή. Για τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού προσανατολισμών, αναπτύσσεται και υλοποιείται ο αλγόριθμος ορατότητας. Ο αλγόριθμος αναλύει το μοντέλο CAD στρώμα προς στρώμα για να προσδιορίσει ένα σύνολο τμημάτων ορατών από κάθε γωνία, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού προσανατολισμών που απαιτούνται για την έκθεση όλων των επιφανειών του εξαρτήματος (Frank et al. 2006). Στη συνέχεια, κάθε προσανατολισμός υποβάλλεται διαδοχικά σε κατεργασίες εκχόνδρισης και φινιρίσματος.

Κατά τον προσδιορισμό των προσανατολισμών κοπής, υπάρχει ένας πρόσθετος κανόνας που πρέπει να τηρείται ως μέρος των περιορισμών ορατότητας. Ιδιαίτερα κατά την αδρή κατεργασία, είναι πιθανό να σχηματιστούν λεπτοί ιστοί και χορδές υλικού εάν κάποιος από τους προσανατολισμούς κοπής, όπως 0° και 180° , είναι σε αντίθετες κατευθύνσεις (Renner 2008,

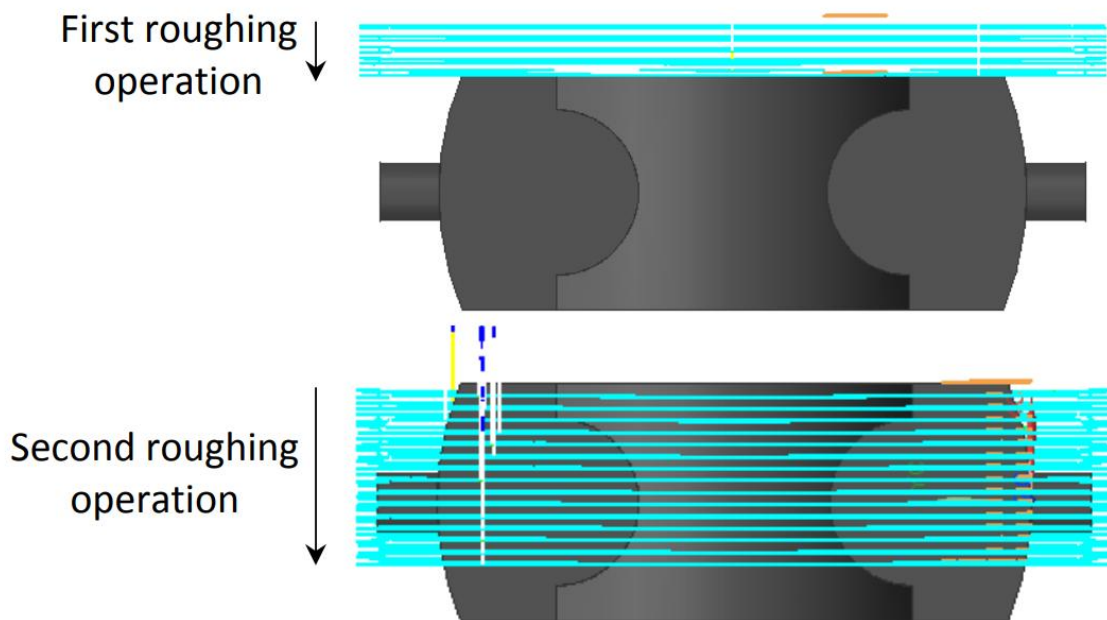
Petrzelka et al. 2010). Κατά το τελικό στάδιο της κοπής κατά τη διάρκεια των δεύτερων προσανατολισμών τραχείας κατεργασίας, παράγονται λεπτοί ιστοί. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ένας λεπτός ιστός μπορεί να προκύψει εάν η τροχιά εργαλείων εκχόνδρισης δεν καλύπτει επαρκώς το τεμάχιο σε ένα συγκεκριμένο στρώμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα υλικά λεπτών στρώσεων είναι πιθανό να τυλίγονται γύρω από το εργαλείο, κάτι που είναι ανεπιθύμητο στην κατεργασία. Στη χειρότερη περίπτωση, το εργαλείο μπορεί να σπάσει ή να αποτύχει κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, παρεμποδίζοντας έτσι τις εργασίες κοπής. Επιπλέον, τα λεπτά τμήματα ενδέχεται να παραμορφώσουν το τεμάχιο ως αποτέλεσμα των παραγόμενων δυνάμεων κοπής, γεγονός που μπορεί να έχει αντίκτυπο στην ακρίβεια. Η διατήρηση της συνέχειας της διεργασίας μεταξύ κάθε προσανατολισμού και εργασίας είναι απαραίτητη. Όλες οι συντεταγμένες κατεργασίας θα διαταραχθούν από οποιαδήποτε διαταραχή, προκαλώντας τη διακοπή της διαδικασίας. Στο σχήμα 20 απεικονίζεται ο σχηματισμός λεπτών ιστών και χορδών ως αποτέλεσμα των διαφόρων προσανατολισμών κατεργασίας. Επί του παρόντος, χρησιμοποιούνται τουλάχιστον τρεις προσανατολισμοί κατεργασίας για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων (Renner 2008). Επιπλέον, η κατανομή των γωνιών προσανατολισμού πρέπει να παρακολουθείται προσεκτικά για να αποφευχθεί η παρουσία τυχόν αντίθετων γωνιών στο σύνολο προσανατολισμού.



Εικόνα 20 Σχηματισμός λεπτών ιστών και λεπτών χορδών (Petrzelka et al. 2010)

Στην αρχική μέθοδο, η επιλογή του εργαλείου βασίζεται στο μέγιστο διαθέσιμο μήκος, ώστε η κοπή να μπορεί να φτάσει στις πιο απομακρυσμένες ορατές επιφάνειες του τεμαχίου (Frank 2007). Η διαδικασία εκχόνδρισης αποτελείται από δύο φάσεις. Η πρώτη φάση συνεπάγεται την αφαίρεση μεγάλων ποσοτήτων υλικού, ξεκινώντας από την περιφέρεια του κυλινδρικού τεμαχίου και καταλήγοντας στην πρώτη ορατή επιφάνεια του εξαρτήματος. Στην επόμενη

εργασία, η κοπή συνεχίζεται μέχρι το μέγιστο βάθος που μπορεί να φτάσει το κοπτικό, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος του τεμαχίου. Στο Σχήμα 21 απεικονίζεται ο βαθμός τεμαχισμού που χρησιμοποιεί αυτή η προηγούμενη μέθοδος (Frank 2007). Οι παράμετροι κοπής (ταχύτητες και πρόωση) καθορίζονται με βάση τη διάμετρο του εργαλείου και το υλικό του τεμαχίου. Ως συνήθης πρακτική στην κατεργασία, η τιμή της υποβιβασμού για τις κατεργασίες εκχόνδρισης είναι συνήθως σχετικά υψηλή, προκειμένου να αφαιρεθεί η μέγιστη ποσότητα υλικού. Ωστόσο, δεδομένου ότι το εργαλείο εκχόνδρισης κινείται στο μέγιστο βάθος, είναι απαραίτητη μια κατάλληλη τιμή υποβιβασμού σε σχέση με τη δύναμη που ασκείται καθώς αυξάνεται το μήκος επαφής. Αυτή η κατάσταση κοπής είναι ανεπιθύμητη, διότι αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας και εκτροπής του εργαλείου.



Εικόνα 21 Πρώτη κατεργασία εκχόνδρισης (Frank 2007)

Παρά το γεγονός ότι οι αρχικές προσεγγίσεις της πολυαξονικής κατεργασίας είναι αποτελεσματικές, πρέπει να βελτιωθούν για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Αναμφισβήτητα, οι προσανατολισμοί που προτείνονται από την ανάλυση ορατότητας επιτρέπουν την πλήρη κατεργασία των εξαρτημάτων. Ωστόσο, οι κατεργασίες εκχόνδρισης περιορίζονται στους προσανατολισμούς που χρησιμοποιούνται για τις κατεργασίες φινιρίσματος.

Μέχρι στιγμής έχει γίνει ελάχιστη συζήτηση σχετικά με τη βελτίωση των προσανατολισμών για τις κατεργασίες εκχόνδρισης.

Οι αρχικές στρατηγικές συνήθως περιορίζουν τον αριθμό των προσανατολισμών για να μειώσουν τον χρόνο σχεδιασμού και κατεργασίας (Frank et al. 2006). Παρ' όλα αυτά, ο περιορισμός αυτός είναι αμφισβητήσιμος λόγω του γεγονότος ότι ένας αριθμός άλλων παραγόντων επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο κατεργασίας. Κατά την κατασκευή καλουπιών και μήτρων, οι κατεργασίες εκχόνδρισης αφαιρούν τεράστιες ποσότητες υλικού, γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους κατεργασίας (Hatna et al. 1998). Για να είναι επιτυχής αυτή η εργασία, πρέπει να γίνεται αποτελεσματική διαχείριση των παραμέτρων κοπής και της ρύθμισης. Αντίθετα, στην αρχή της διαδικασίας, το κοπτικό εργαλείο απαιτείται να διεισδύσει στο υλικό στο μέγιστο βάθος του. Παρόλο που αυτή είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την αποτροπή του σχηματισμού λεπτού υλικού, η απόδοση του εργαλείου θα υποφέρει ως αποτέλεσμα. Τα μεγαλύτερα μήκη επαφής αυξάνουν την πιθανότητα αστοχίας και εκτροπής του εργαλείου.

Σίγουρα, οποιαδήποτε αστοχία θα έχει ως αποτέλεσμα τον τερματισμό της διαδικασίας και όλων των επόμενων εργασιών. Σκοπός της έρευνας που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο είναι η αξιολόγηση και η επικύρωση ορισμένων προσεγγίσεων που αποσκοπούν στη βελτίωση της επιλογής των προσανατολισμών για τις κατεργασίες εκχόνδρισης σε διεργασίες CNC/CRM. Στο πλαίσιο των απαιτήσεων ταχείας διεργασίας, ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή μεμονωμένων εξαρτημάτων είναι κρίσιμος. Ειδικά στην κατεργασία, ο χρόνος μπορεί να μοιραστεί μεταξύ σχεδιασμού και εκτέλεσης. Η πλειονότητα του χρόνου σχεδιασμού δαπανάται για την ανάπτυξη των κατεργασιών κατεργασίας, συμπεριλαμβανομένων των διαδρομών κοπής και των παραμέτρων κατεργασίας. Εν τω μεταξύ, ο χρόνος εκτέλεσης εξαρτάται από τις ρυθμίσεις του τεμαχίου εργασίας, την επαναπροσαρμογή και τον χρόνο κατεργασίας. Παρ' όλα αυτά, οι χρόνοι σχεδιασμού και εκτέλεσης συσχετίζονται στενά, καθώς κάθε απόφαση σχεδιασμού επηρεάζει άμεσα το χρόνο κατεργασίας. Ως αποτέλεσμα των επιπτώσεων στο κόστος παραγωγής και την αποδοτικότητα της διαδικασίας, η ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας έχει καταστεί κρίσιμο μέλημα. Πολυάριθμες εργασίες έχουν δημοσιευτεί με την πάροδο των ετών με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων κοπής στο σχεδιασμό της διαδικασίας (Bouzid 2005, Lavernhe et al. 2008, Palanisamy et al. 2007).

Για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής σε εφαρμογές CNCRM, ωστόσο, πρέπει να διαχειριστεί ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών. Ως εκ τούτου, τείνει να περιπλέκει τις εργασίες σχεδιασμού και να περιορίζει τον βαθμό αυτοματοποίησης που μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη φάση του σχεδιασμού. Σε αντίθεση με προηγούμενες προσεγγίσεις, η παρούσα έρευνα αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση των προσανατολισμών κοπής και όχι των παραμέτρων κατεργασίας. Κατά συνέπεια, τα βέλτιστα σύνολα προσανατολισμών για τις κατεργασίες εκχόνδρισης θα είναι εκείνα που υποδεικνύουν λιγότερο χρόνο κατεργασίας και αξιόπιστη αποδοτικότητα της διαδικασίας. Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στις επιπτώσεις και τη βιωσιμότητα της χρήσης διακριτών συνόλων προσανατολισμών για την εκχόνδριση που είναι ανεξάρτητα από τους προσανατολισμούς για την τελική κατεργασία. Χρησιμοποιώντας διάφορα δοκιμαστικά εξαρτήματα, διεξάγεται μια σειρά προσομοιώσεων. Η μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση των εργασιών εκχόνδρισης βασίζεται σε δύο κύριες προσεγγίσεις και σε έναν αριθμό πιθανών μεθόδων. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται ως προς τις επιδράσεις κάθε τεχνικής στον χρόνο κατεργασίας και στην αποδοτικότητα της διαδικασίας. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, συζητούνται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα και προτείνεται μια εφικτή και πρακτική μέθοδος. Η μέθοδος αυτή βελτιώνεται προκειμένου να ενσωματωθεί στη διαδικασία.

3.5 Πολλαπλά εργαλεία για εργασίες φινιρίσματος σε CNC-RM

Στη μηχανική της παραγωγής, η ποιότητα του φινιρίσματος της επιφάνειας έχει σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση των κατεργασμένων εξαρτημάτων και στο κόστος παραγωγής (Davim 2001). Η βελτίωση του φινιρίσματος της επιφάνειας έχει γίνει, επομένως, αντικείμενο μείζονος ενδιαφέροντος, ιδίως στον τομέα της ΡΜ. Οι πρόσφατες πρόοδοι στη χρήση κατεργασιών CNC για ταχείες διεργασίες έχουν οδηγήσει σε βελτίωση της ποιότητας των κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Σε αντίθεση με άλλες διεργασίες ΡΜ, η κατεργασία CNC είναι ικανή να κόβει σε πολύ μικρό βάθος, ελαχιστοποιώντας την εμφάνιση στρωμάτων στην επιφάνεια του εξαρτήματος. Αυτός είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που ενθαρρύνει τη χρήση της κατεργασίας

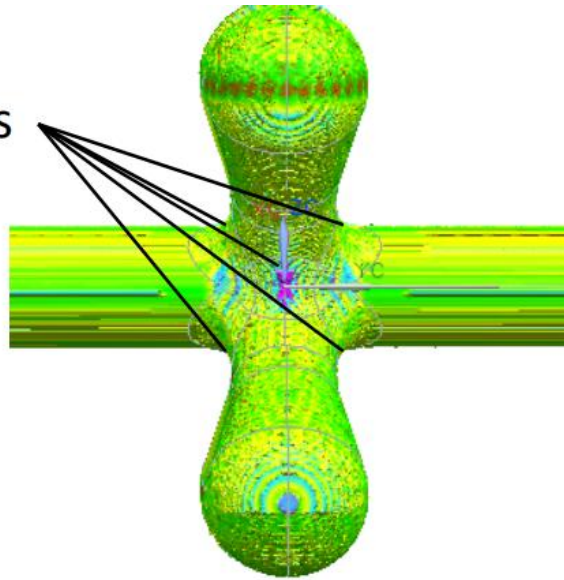
με CNC για την ταχεία παραγωγή πανομοιότυπων εξαρτημάτων. Η ανάλυση ορατότητας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανομής των κατεργασιών κατεργασίας, συμπεριλαμβανομένων των πρόχειρων και τελικών κοπών, σε πολλαπλούς προσανατολισμούς. Κατά τις κατεργασίες φινιρίσματος, το κοπτικό εργαλείο κατευθύνεται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση για να φτάσει σε όλες τις ορατές επιφάνειες του τεμαχίου. Πριν από αυτό το βήμα, το υλικό κόβεται πρόχειρα στον ίδιο προσανατολισμό. Ιστορικά, η επιλογή των κοπτικών εργαλείων για εργασίες φινιρίσματος διέπεται από μια γενική προσέγγιση. Για να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός της διαδικασίας, οι εργασίες αναγνώρισης χαρακτηριστικών έχουν παραλειφθεί. Αυτή η παλαιότερη μέθοδος προτείνει τα μικρότερα στρώματα διατομής για τις γεωμετρίες των εξαρτημάτων. Επιπλέον, η χρήση ενός μόνο εργαλείου με τη μικρότερη διάμετρο για εργασίες φινιρίσματος απλοποιεί τον σχεδιασμό της διαδικασίας. Το κοπτικό εργαλείο προγραμματίζεται για την κατεργασία όλων των ορατών περιοχών μεταξύ κάθε προσανατολισμού.

Έτσι, είναι απλός ο ορισμός παρόμοιων περιοχών κοπής, γεγονός που απλοποιεί την ανάπτυξη διαδρομών κοπτικών εργαλείων. Κατά συνέπεια, η γενική στρατηγική επιλογής εργαλείου αναμένεται να επιτρέψει την προσβασιμότητα του εργαλείου για την πλειονότητα των παρουσιαζόμενων σχημάτων και την αποτελεσματική τελική κοπή του τεμαχίου. Παρ' όλα αυτά, η στήριξη σε ένα μόνο εργαλείο κατά τις εργασίες τελικής κοπής τείνει να περιορίζει την ικανότητα της μηχανής CNC να παράγει επιφάνειες υψηλής ποιότητας στο τεμάχιο. Μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας, ένα από τα μειονεκτήματα είναι η παρουσία αισθητού φαινομένου σκάλας, ιδίως στις επιφάνειες περιγράμματος του τεμαχίου. Παρά το γεγονός ότι η κοπή πραγματοποιείται με μικρά βάθη κοπής, το φαινόμενο εξακολουθεί να εμφανίζεται λόγω της γεωμετρίας του επίπεδου ακροφρεζιού (Frank et al. 2002). Επιπλέον, ένα μικρό βάθος κοπής θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο χρόνο κατεργασίας και μη αποδοτική διαδικασία. Το πρόβλημα επιδεινώνεται όταν λαμβάνεται υπόψη η προσβασιμότητα του εργαλείου. Η ανάλυση κατεργασιμότητας που αναπτύχθηκε αποκαλύπτει ότι ορισμένες περιοχές μπορεί να μην είναι προσβάσιμες στο εργαλείο επίπεδης ακροφρέζας για την αφαίρεση υλικού (Li et al. 2006). Αυτό θα επηρεάσει τη διαστατική ακρίβεια του κατασκευασμένου τεμαχίου, καθώς δεν τηρεί το προκαθορισμένο μέγεθος και σχήμα του μοντέλου. Στο Σχήμα 22 απεικονίζονται μη κατεργασμένες περιοχές σε ένα μοντέλο ενός γρύλου παιχνιδιού. Με τη χρήση διαφορετικών γεωμετριών κοπτικών εργαλείων, είναι δυνατή η παράκαμψη αυτών των προβλημάτων. Μέχρι σήμερα, ωστόσο, δεν έχει αναπτυχθεί σαφής μέθοδος για την ενσωμάτωση διαφορετικών τύπων

εργαλείων για εργασίες φινιρίσματος σε διαδικασίες CNCRM. διαμέτρου εργαλείου για την ολοκλήρωση της κοπής (Frank et al. 2004).

Κατά συνέπεια, είναι πιο πιθανό να επιλεγεί ένας επίπεδος ακροχαρακτήρας, καθώς η διαδικασία αναλύει τις γεωμετρίες των τεμαχίων με βάση τα επίπεδα διατομής 2D. Επιπλέον, η χρήση ενός μόνο εργαλείου με τη μικρότερη διάμετρο για τις εργασίες φινιρίσματος απλοποιεί τον προγραμματισμό της διαδικασίας. Το κοπτικό εργαλείο είναι προγραμματισμένο να κατεργάζεται όλες τις ορατές περιοχές μεταξύ κάθε προσανατολισμού. Έτσι, είναι απλός ο ορισμός παρόμοιων περιοχών κοπής, γεγονός που απλοποιεί την ανάπτυξη διαδρομών κοπτικών εργαλείων. Κατά συνέπεια, η γενική στρατηγική επιλογής εργαλείων αναμένεται να επιτρέψει την προσβασιμότητα του εργαλείου για την πλειονότητα των παρουσιαζόμενων σχημάτων και την αποτελεσματική τελική κοπή του τεμαχίου. Παρ' όλα αυτά, η στήριξη σε ένα μόνο εργαλείο κατά τις εργασίες τελικής κοπής τείνει να περιορίζει την ικανότητα της μηχανής CNC να παράγει επιφάνειες υψηλής ποιότητας στο τεμάχιο. Μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας, ένα από τα μειονεκτήματα είναι η παρουσία αισθητού φαινομένου σκάλας, ιδίως στις επιφάνειες περιγράμματος του τεμαχίου. Παρά το γεγονός ότι η κοπή πραγματοποιείται με μικρά βάθη κοπής, το φαινόμενο εξακολουθεί να εμφανίζεται λόγω της γεωμετρίας του επίπεδου ακροφρεζιού (Frank et al. 2002). Επιπλέον, ένα μικρό βάθος κοπής θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο χρόνο κατεργασίας και μη αποδοτική διαδικασία. Το πρόβλημα επιδεινώνεται όταν λαμβάνεται υπόψη η προσβασιμότητα του εργαλείου. Η ανάλυση κατεργασιμότητας που αναπτύχθηκε αποκαλύπτει ότι ορισμένες περιοχές μπορεί να μην είναι προσβάσιμες στο εργαλείο επίπεδης ακροφρέζας για την αφαίρεση υλικού (Li et al. 2006). Αυτό θα επηρεάσει τη διαστατική ακρίβεια του κατασκευασμένου τεμαχίου, καθώς δεν τηρεί το προκαθορισμένο μέγεθος και σχήμα του μοντέλου. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται μη κατεργασμένες περιοχές σε ένα μοντέλο ενός γρύλου παιχνιδιού. Με τη χρήση διαφορετικών γεωμετριών κοπτικών εργαλείων, είναι δυνατή η παράκαμψη αυτών των προβλημάτων. Μέχρι σήμερα, ωστόσο, δεν έχει αναπτυχθεί καμία σαφής μέθοδος για την ενσωμάτωση διαφορετικών τύπων εργαλείων για εργασίες φινιρίσματος σε διαδικασίες CNCRM.

Non-machined regions



Εικόνα 22 Μη κατεργασμένες περιοχές (Li et al. 2006)

3.6 Επιλογή εργαλείων φινιρίσματος

Η χρήση του επίπεδου φρεζιού με τη μικρότερη διάμετρο ως κριτήριο για την επιλογή των εργαλείων φινιρίσματος έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες έρευνες. Αυτό επιτρέπει στο κοπτικό εργαλείο να κατεργάζεται την πλειονότητα των σχημάτων του τεμαχίου. Επιπλέον, αυτή η κοινή μέθοδος απλοποιεί τα καθήκοντα σχεδιασμού και διατηρεί τη φύση χωρίς χαρακτηριστικά των διαδικασιών CNC-RM. Υπάρχουν, ωστόσο, ορισμένα μειονεκτήματα που συνδέονται με τη χρήση ενός μόνο κοπτικού εργαλείου. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την τραχύτητα της επιφάνειας και την ποιότητα των κατεργασμένων εξαρτημάτων. Η εισαγωγή διαφόρων γεωμετριών κοπτικών εργαλείων θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση σε αυτό το ζήτημα. Ωστόσο, απαιτούνται σαφείς κατευθυντήριες γραμμές για τον καθορισμό των κατάλληλων περιοχών για συγκεκριμένα κοπτικά εργαλεία. Μεταξύ των κρίσιμων εργασιών που απαιτούνται είναι ο διαχωρισμός των περιοχών κοπής και η επιλογή των εργαλείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Κατά την επικύρωση της προτεινόμενης μεθόδου, αξιοποιούνται επίσης πλήρως οι δυνατότητες του συστήματος CAD/CAM για την εκτέλεση προσομοιώσεων και την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.



Εικόνα 23 Shell Mill

Τετράγωνο φρεζάκι

Κάθε μηχανουργείο θα έχει πολλά μεγέθη τετράγωνων φρεζών, καθώς είναι το πιο συνηθισμένο εργαλείο. Καθώς τόσο ο πυθμένας όσο και οι πλευρές μπορούν να κόψουν, αυτά τα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση της κορυφής και των πλευρών ενός εξαρτήματος, καθώς και για την αποκοπή κοιλιοτήτων.



Εικόνα 24 Square End Mill

Φρεζάκι με μύτες

Το Φρεζάκι με μύτες μοιάζει με το τετράγωνο φρεζάκι, αλλά το κάτω μέρος του εργαλείου έχει ελαφρώς στρογγυλεμένη άκρη. Αυτό δημιουργεί μια ελκυστική φιλεταρισμένη άκρη μεταξύ του πυθμένα μιας τσέπης και του πλευρικού τοιχώματος.

Σφαιρικός μύλος

Ένας σφαιρικός μύλος έχει εντελώς σφαιρικό πυθμένα. Η επιφάνεια αυτή έχει την ίδια διάμετρο με το ίδιο το όργανο. Αυτό καθιστά τον ακρομυλό με σφαίρα ιδανικό για τρισδιάστατη διαμόρφωση περιγράμματος και άλλες επιφανειακές εργασίες. Κατά την κατεργασία χαρακτηριστικών, σε αντίθεση με έναν τετράγωνο τελικό φρεζάτορα, αυτό το εργαλείο δεν αφήνει αιχμηρές γωνίες.

Τρυπάνι

Τα τρυπάνια είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τη δημιουργία οπών στα υλικά. Οι οπές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως για διάκενα, σπειρώματα, πρεσαρίσματα και εντοπισμό. Τα τρυπάνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλους αυτούς τους σκοπούς. Όπως και με άλλα εργαλεία, τα τρυπάνια διατίθενται σε τυποποιημένα μεγέθη. Όταν σχεδιάζουμε μια οπή για το εξάρτημά σας, πρέπει να ερευνούμε τα τυποποιημένα μεγέθη τρυπανιών για να κάνουμε τη διαδικασία κατεργασίας όσο το δυνατόν πιο απλή. Επιπλέον, σχεδιάζουμε τις οπές του εξαρτήματός ώστε να έχουν το ίδιο μέγεθος, όποτε είναι δυνατόν, για να αποφύγουμε περιττές αλλαγές εργαλείων.



Εικόνα 25 Τα τρυπάνια διατίθενται σε πολλά τυποποιημένα μεγέθη

Tap

Μετά τη διάνοιξη οπών, μπορεί να βιδώσουμε μερικές από αυτές. Παρόλο που υπάρχουν πολλοί τρόποι για να δημιουργήσουμε μια οπή με σπειρώμα, η διάνοιξη είναι ο πιο συνηθισμένος όρος. Τα κοπτικά taps το ίδιο τελικό αποτέλεσμα, αλλά με διαφορετικούς τρόπους. Κάθε ένας από αυτούς απαιτεί τη διάνοιξη μιας αρχικής οπής. Τα εσωτερικά σπειρώματα αυτής της οπής δημιουργούνται με την αφαίρεση πρόσθετου υλικού με τη χρήση taps. Καθώς αφαιρεί υλικό, παράγονται επίσης θραύσματα. Επειδή τα θραύσματα πρέπει κάπου να πάνε, μια διαμερής οπή μπορεί να είναι πιο κατάλληλη ένα κοπτικό tap.

Ένα tap διαμόρφωσης, από την άλλη πλευρά, δεν αφαιρεί υλικό, αλλά μάλλον διαμορφώνει το υλικό εν ψυχρώ σε σπειρώματα. Τα taps διαμόρφωσης απαιτούν μια αρχική οπή με ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο με συγκεκριμένα υλικά. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μη σιδηρούχα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο. Επειδή τα taps διαμόρφωσης

δεν παράγουν κομματάκια, δεν χρειάζεται να ανησυχούμε για κομματάκια που γεμίζουν τον πυθμένα της οπής κατά τη διαμόρφωση τυφλών οπών. Επιπλέον, τα διαμορφωμένα σπειρώματα θεωρούνται ισχυρότερα. Ωστόσο, οι κοπτικές βρύσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερη ποικιλία υλικών.

Φρέζα με λοξότμηση

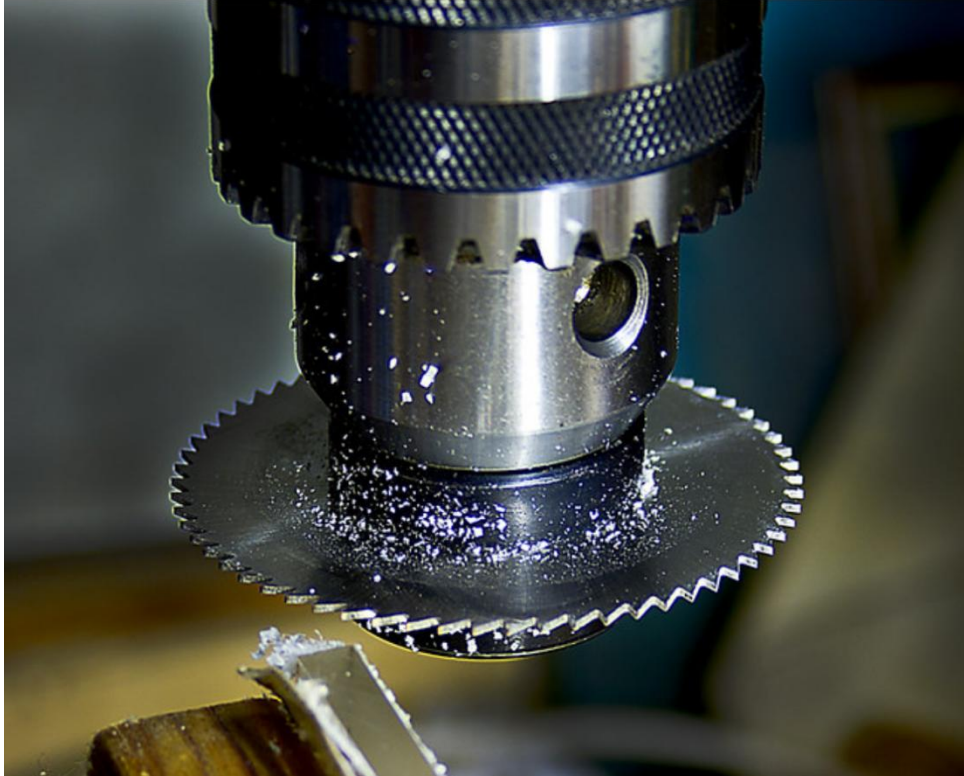
Αυτονόητο, ένα λοξοτριβείο δημιουργεί εξωτερικές λοξοτμήσεις σε αιχμηρές γωνίες. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατεργασία εσοχών. Οι συνήθεις διαθέσιμες γωνίες για τους μύλους λοξότμησης είναι 30, 45 και 60 μοίρες. Στην προκειμένη περίπτωση, αυτή η γνώση μπορεί να μας βοηθήσει να αποφασίσουμε πώς θα σχεδιάσουμε το εξάρτημά μας: θα χρησιμοποιήσουμε μία από αυτές τις τυπικές γωνίες.

Κοπήρας τύπου keyseat

Συνήθως, οι υποκοπές θα ήταν αδύνατο να δημιουργηθούν χωρίς μια πρόσθετη ρύθμιση για τον επαναπροσανατολισμό του εξαρτήματος. Παρόλα αυτά, οι κοπήρες keyseat μας επιτρέπουν να κατεργαστούμε εύκολα υποκοπές ή εγκοπές T με την τρέχουσα ρύθμιση. Αυτά τα εργαλεία μπορούν να περάσουν είτε εντελώς μέσα από ένα τεμάχιο για να δημιουργήσουν μια εγκοπή T είτε κατά μήκος της πλευράς ενός τεμαχίου για να δημιουργήσουν μια μονόπλευρη υποκοπή. Οι κοπήρες Keyseat διατίθενται είτε με ευθείες ακμές είτε με στρογγυλεμένες γωνίες για την παραγωγή μιας στρογγυλεμένης υποκοπής.

Πριόνι κοπής

Συνήθως, η ακτίνα της πραγματικής επιφάνειας κοπής είναι μεγαλύτερη, επιτρέποντάς του να κόβει βαθιές σχισμές ή ακόμη και να διασπά ένα εξάρτημα. Τα εργαλεία αυτά είναι εξαιρετικά χρήσιμα και έχουν πολυάριθμες εφαρμογές.



Εικόνα 26 Τα πριόνια κοπής έχουν πολλές εφαρμογές

Λιγότερο κοινά εργαλεία

Τα προαναφερθέντα εργαλεία έχουν πολυάριθμες εφαρμογές και είναι ευρέως διαθέσιμα παντού. Υπάρχει επίσης ένα πλήθος εργαλείων με πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Αν μπορείτε να το φανταστείτε, κάποιος πιθανώς έχει σχεδιάσει ένα εργαλείο γι' αυτό. Οι παρακάτω εκφράσεις είναι λιγότερο συχνές και δεν χρησιμοποιούνται απαραίτητα σε κάθε μέρος, αλλά εξακολουθούν να είναι χρήσιμες!

Τρυπάνια

Τα τρυπάνια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μιας οπής, αλλά είναι εξαιρετικά χρήσιμες για τη διεύρυνση μιας υπάρχουσας οπής στην απαιτούμενη διάμετρο. Μπορούν να κρατήσουν αυστηρότερες ανοχές από τα τρυπάνια και αφήνουν ένα ωραίο φινίρισμα επιφάνειας.

Μυτοκοπτικά εργαλεία

Τα μυτοκοπτικά εξυπηρετούν παρόμοια λειτουργία με τα φρεζάκια προσώπου, αλλά έχουν μία μόνο επιφάνεια κοπής τοποθετημένη σε μια ράβδος. Αυτή η ράβδος μπορεί να μετακινηθεί μέσα στο εργαλείο για να ρυθμίσει τη διάμετρο της κοπής.

Κόφτης εξωτερικής ακτίνας

Τα κοπτικά εξωτερικής ακτίνας είναι εξειδικευμένα εργαλεία που σας επιτρέπουν να προσθέσετε μια ακτίνα σε μια εξωτερική ακμή, όπως το χείλος μιας τσέπης.

Εργαλείο χάραξης

Η επιφάνεια ενός εξαρτήματος μπορεί να χαραχθεί με κείμενο ή τα περιγράμματα σχημάτων χρησιμοποιώντας εργαλεία χάραξης.

Εργαλείο κοπής

Τα εργαλεία βύθισης χρησιμοποιούνται για την προσθήκη βύθισης σε μια οπή που έχει διανοιχτεί με διάτρηση. Αυτά είναι επίσης κατάλληλα για την κοπή λοξών.

3.7 Types of CNC Cutting Tool Materials

Χάλυβας υψηλής ταχύτητας

Ο λευκός χάλυβας είναι ένας χάλυβας εργαλείων με υψηλή σκληρότητα, υψηλή αντοχή στη φθορά και υψηλή αντοχή στη θερμότητα, ο οποίος είναι επίσης γνωστός ως χάλυβας εργαλείων υψηλής ταχύτητας ή χάλυβας μπροστά. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή σύνθετων, ανθεκτικών στην κρούση μεταλλικών κοπτικών εργαλείων με λεπτές ακμές. Η διαδικασία κατασκευής των εργαλείων από χάλυβα υψηλής ταχύτητας είναι απλή και η όξυνσή τους είναι απλή. Παρά τη συνεχή εμφάνιση νέων υλικών εργαλείων, τα εργαλεία από χάλυβα

υψηλών ταχυτήτων εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν σημαντικό μέρος της κατεργασίας μετάλλων.

Τσιμεντοποιημένο καρβίδιο

Η μεταλλουργία σκόνης χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τσιμεντοκαρβιδίου από μια σκληρή ένωση πυρίμαχου μετάλλου και μετάλλου συγκόλλησης. Λόγω της πληθώρας των εξαιρετικών ιδιοτήτων του, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής σκληρότητας, της αντοχής στη φθορά, της καλής αντοχής και ανθεκτικότητας, της αντοχής στη θερμότητα και της αντοχής στη διάβρωση, ιδίως της υψηλής σκληρότητας και της αντοχής στη φθορά, παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητο στους 500 °C και διατηρεί την υψηλή σκληρότητά του στους 1000 °C. Επομένως, η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή. Η απόδοση κοπής του τσιμεντοποιημένου καρβιδίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη του χάλυβα υψηλής ταχύτητας και η διάρκεια ζωής του εργαλείου μπορεί να πολλαπλασιαστεί κατά πολλές έως δεκάδες. Ταυτόχρονα, η ταχύτητα κοπής μπορεί να πολλαπλασιαστεί κατά τέσσερις έως δέκα. Το τσιμεντοκαρβίδιο χρησιμοποιείται συνήθως ως υλικό εργαλείων και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατεργασία δύσκολων υλικών, όπως ο ανθεκτικός στη θερμότητα χάλυβας, ο ανοξειδωτος χάλυβας, ο χάλυβας υψηλού μαγγανίου και ο χάλυβας εργαλείων.

Διαμάντι

Μεταξύ όλων των γνωστών ορυκτών υλικών, το διαμάντι έχει την υψηλότερη σκληρότητα και την καλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Ο ρυθμός φθοράς του διαμαντιού όταν συνδυάζεται με διάφορα μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά είναι μεταξύ 1/50 και 1/800 εκείνου του τσιμεντοκαρβιδίου. Είναι το βέλτιστο υλικό για την παραγωγή κοπτικών εργαλείων. Ωστόσο, τα συνθετικά μονοκρυσταλλικά διαμάντια χρησιμοποιούνται συχνά ως κοπτικά εργαλεία. Η κοπτική ακμή του διαμαντένιου εργαλείου είναι εξαιρετικά αιχμηρή (πράγμα απαραίτητο για την κοπή τεμαχίων με πολύ μικρές διατομές), η τραχύτητα της ακμής είναι πολύ μικρή, ο συντελεστής τριβής είναι χαμηλός, η δημιουργία κόμβων τεμαχίων είναι δύσκολη κατά την κοπή και η ποιότητα της επιφάνειας κατεργασίας είναι υψηλή. Υπάρχουν τρεις τύποι κοπτικών διαμαντιών: φυσικοί μονοκρυσταλλοί, ολοκληρωμένοι τεχνητοί μονοκρυσταλλοί και σύνθετα

διαμάντια. Λόγω του υψηλού κόστους τους, τα κοπτικά εργαλεία από φυσικό διαμάντι χρησιμοποιούνται σπάνια στην πρακτική παραγωγή.

Κυβικό νιτρίδιο βορίου

Είναι ένα νέο συνθετικό υλικό που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1950 με πυροσυσσωμάτωση σκόνης κύβων CBN και μικρής ποσότητας φάσης σύνδεσης (Co.Ni ή tic, κασσίτερος, A1203) σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Διαθέτει υψηλή σκληρότητα, καλή αντοχή στη φθορά, εξαιρετική χημική σταθερότητα, πολύ μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα από τα διαμαντένια εργαλεία και καμία χημική αντίδραση με τα μέταλλα της ομάδας του σιδήρου στους 1200-1400 βαθμούς Κελσίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία χάλυβα. Ως εκ τούτου, τα εργαλεία PCBW χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία κατεργασίας για την αποτελεσματική επεξεργασία μαύρων, δύσκολα επεξεργάσιμων υλικών.

Κεραμικά

Τα κύρια πλεονεκτήματα των κεραμικών υλικών εργαλείων είναι η υψηλή σκληρότητα και η αντοχή τους στη φθορά, καθώς και η ελάχιστη μείωση της αντοχής σε κάμψη και της αντοχής στη φθορά σε υψηλές θερμοκρασίες. Διαθέτουν υψηλή χημική σταθερότητα, χαμηλή συγγένεια κεραμικού-μετάλλου και εξαιρετική αντοχή στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Δεν αλληλεπιδρά με τον χάλυβα σε καμία θερμοκρασία, συμπεριλαμβανομένης της τήξης. Ως εκ τούτου, η συγκόλληση του κοπτικού εργαλείου, η διάχυση και η φθορά από οξείδωση μειώνονται. Με χαμηλό συντελεστή τριβής, τα κομματάκια είναι λιγότερο πιθανό να προσκολληθούν στο μαχαίρι και οι όγκοι συσσώρευσης κομματιών είναι λιγότερο πιθανό να σχηματιστούν. Η υψηλή ευθραυστότητα, η χαμηλή αντοχή και ανθεκτικότητα και η χαμηλότερη αντοχή σε κάμψη σε σχέση με το τιμιεντοποιημένο καρβίδιο είναι τα μειονεκτήματα του κεραμικού κοπτικού.

4. Έξυπνα εργαλεία κοπής και έξυπνη κατεργασία

Τα έξυπνα εργαλεία και η έξυπνη κατεργασία έχουν τεράστιες δυνατότητες και προσελκύουν την προσοχή ως τεχνολογία κατεργασίας ακριβείας της επόμενης γενιάς, ιδίως στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0. (Hentz et al., 2013, Vogl et al., 2016, Peukert et al., 2015). Στη σύγχρονη προηγμένη μεταποίηση, η κατεργασία εξαρτημάτων με ολοένα αυξανόμενη ακρίβεια διαστάσεων/μορφής και λεπτότερη τραχύτητα επιφάνειας, ακόμη και απαίτηση λειτουργικότητας επιφάνειας, γίνεται μια ουσιαστική τάση. Στην κατεργασία υψηλής ακρίβειας,

η τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου με τέτοια υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα είναι απαραίτητη, και αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με "παθητικό" τρόπο, δηλαδή βασιζόμενοι στην ακρίβεια τοποθέτησης των ολισθητήρων χωρίς μέτρηση της συμπεριφοράς κοπής του εργαλείου και των συνθηκών διεργασίας. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν η δυναμική της κατεργασίας, οι μεταβολές της διαδικασίας και η πολυπλοκότητα, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν έξυπνα κοπτικά εργαλεία για μια σειρά από κατεργασίες υψηλής ακρίβειας υψηλής αξίας. Για παράδειγμα, η κατεργασία υπερ-ακρίβειας και η μικροκατεργασία, με επιφανειακή τραχύτητα συνήθως σε νανομετρική κλίμακα και χαρακτηριστικά/σχήματα σε επίπεδο μικρομέτρων, έχει μεγάλη ζήτηση, ιδίως για εξαρτήματα και προϊόντα υψηλής ακρίβειας με αυξημένη λειτουργικότητα και απόδοση. Η έξυπνη ακρίβεια και η "προληπτική" μικροκατασκευή θα είναι ο δρόμος του μέλλοντος (Cheng et al., 2013).

Με στόχο την υψηλή ποιότητα των επιφανειών και την ακρίβεια των διαστάσεων/μορφών, έχουν προταθεί ορισμένες μέθοδοι παρακολούθησης για την παρακολούθηση των δυνάμεων κοπής και των συνθηκών διεργασίας με υψηλή ακρίβεια. Οι μεταβολές των δυνάμεων κοπής είναι πολύ πιθανό να οφείλονται σε φθορά του εργαλείου ή σε άλλες συνθήκες διεργασίας και, επομένως, θα έχουν άμεσες επιπτώσεις στα αποτελέσματα της κατεργασίας (Tlusty et al., 1983, Teti et al., 2010). Η φθορά του εργαλείου ή η θραύση του εργαλείου μπορεί επίσης να αυξήσει τις δυνάμεις κοπής και τις δονήσεις στο σύστημα κατεργασίας, με αποτέλεσμα την κακή τραχύτητα της επιφάνειας, την απώλεια της μορφής και της διαστατικής ακρίβειας, ακόμη και τα σημάδια θραύσης στις κατεργασμένες επιφάνειες (Cheng et al., 2008). Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιες κατασκευαστικές ατέλειες ή ζημιές στο εργαλείο, σχεδιάζονται και αναπτύσσονται συσκευές μέτρησης των δυνάμεων κοπής και της δυναμικής κοπής. Για παράδειγμα, οι ερευνητές και οι βιομηχανικές εταιρείες αναπτύσσουν δυναμόμετρα για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής και της δυναμικής της διαδικασίας με υψηλή ακρίβεια και ευρύ εύρος ζώνης. Ωστόσο, τα δυναμόμετρα έχουν περιορισμούς στη βιομηχανική τους εφαρμογή, όπως το υψηλό κόστος τους και η έλλειψη αξιοπιστίας σε ένα αυστηρό περιβάλλον παραγωγής. Λόγω του μεγέθους και του βάρους τους, τα δυναμόμετρα δεν είναι κατάλληλα για μηχανές και διατάξεις εργαλείων με περιορισμένο χώρο. Ως αποτέλεσμα της μειωμένης ακαμψίας του συστήματος κατεργασίας του εργαλείου, το δυναμόμετρο θα μπορούσε επίσης να επηρεάσει τη διαδικασία και την απόδοση της κοπής (Stein et al., 2002).

Ορισμένα εξαρτήματα υψηλής αξίας πρέπει να κατεργάζονται σε περιβάλλον χωρίς ρύπους, γεγονός που απαγορεύει τη χρήση ψυκτικού υγρού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Ωστόσο, οι συνθήκες ξηρής κοπής θα οδηγούσαν σε φθορά του εργαλείου και υψηλές θερμοκρασίες κοπής, οι οποίες θα είχαν ως αποτέλεσμα κακή ποιότητα επιφάνειας και μειωμένη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Ορισμένα υλικά, όπως τα κράματα αλουμινίου και μαγνησίου, δεν είναι κατάλληλα για άμεση ξηρή κοπή, επειδή το κοπτικό εργαλείο είναι ευαίσθητο σε υπερβολική συσσώρευση ακμών (BUE). Για την πλήρη εκμετάλλευση και κατανόηση της μηχανικής κοπής και της διαδικασίας κατεργασίας, είναι απαραίτητη η εφαρμογή νέων τεχνολογιών αισθητήρων για κατεργασίες υψηλής ακρίβειας και μικροκατεργασίες.

4.1 Προσεγγίσεις ανάπτυξης

Τα έξυπνα κοπτικά εργαλεία είναι εξοπλισμένα με δυνατότητες αυτόνομης ανίχνευσης και αυτοεκμάθησης, καθώς και με ανίχνευση και ενεργοποίηση κατά τη διαδικασία, και θα έχουν πιθανότατα ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας των τεμαχίων και της τραχύτητας της επιφάνειας, τη μείωση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της παραγωγικής απόδοσης. Τα χαρακτηριστικά που τα διακρίνουν είναι το plug-and-play, η αυτόνομη λειτουργία, η αυτοελέγχου της κατάστασης, η αυτορρύθμιση της θέσης, η αυτοεκμάθηση και η συμβατότητα με περιβάλλοντα CNC υψηλής αυτοματοποίησης. Εξετάστηκαν τέσσερις τύποι ευφυών εργαλείων. Περιλαμβάνουν το έξυπνο κοπτικό εργαλείο που βασίζεται στη μέτρηση της δύναμης κοπής, το έξυπνο κοπτικό εργαλείο που προσανατολίζεται στη θερμοκρασία κοπής, το γρήγορο εργαλείο σερβομηχανισμού (FTS) και τα έξυπνα εξαρτήματα και οι έξυπνες δαγκάνες, τα οποία μπορούν να μετρήσουν τη δύναμη κοπής, τη θερμοκρασία κοπής, την τοποθέτηση του εργαλείου και την ενεργοποίηση κατά τη διαδικασία, μεμονωμένα ή σε συνδυασμό.

Το έξυπνο εργαλείο κοπής με βάση τη δύναμη χρησιμοποιεί ένα πιεζοηλεκτρικό φιλμ ως στοιχείο ανίχνευσης, βασιζόμενο κυρίως σε τεχνικές διακλάδωσης δύναμης και έμμεσης μέτρησης δύναμης. Ο αισθητήρας επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW) χρησιμοποιείται επίσης στην ανάπτυξη του ευφυούς κοπτικού εργαλείου ως εναλλακτική μέθοδος μέτρησης της δύναμης κοπής. Το ευφύες κοπτικό εργαλείο με βάση τη θερμοκρασία επικεντρώνεται στην

ανάπτυξη του εσωτερικά ψυχόμενου κοπτικού εργαλείου, το οποίο μειώνει τη θερμοκρασία κοπής γύρω από την κοπτική ακμή, προκειμένου να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και να βελτιώσει το φινίρισμα της επιφάνειας του τεμαχίου. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της θερμοκρασίας κοπής σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον κατεργασίας. Συνήθως, ένας γρήγορος σερβομηχανισμός εργαλείου χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου που λειτουργεί σε ένα δυναμικό σενάριο κοπής και ενεργοποίησης με υψηλή ακρίβεια ακρίβειας και ευρύ εύρος ζώνης, ιδίως για την ακριβή κατεργασία πολύπλοκων γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Ως συστατικά στοιχεία του συστήματος κατεργασίας, οι έξυπνες δαγκάνες και τα έξυπνα εξαρτήματα είναι απαραίτητα για την έξυπνη κατεργασία. δ Οι προοπτικές τους για την υλοποίηση και την εφαρμογή

Η έξυπνη κατεργασία έχει διακριτά κατασκευαστικά οφέλη που πιθανώς θα έχουν ως αποτέλεσμα:

- Μείωση του μήκους των διαδρομών εργαλείων και του χρόνου κατεργασίας,
- Βελτίωση του τελειώματος της επιφάνειας του εξαρτήματος,
- Βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής και της απόδοσης του κοπτικού εργαλείου,
- Κατεργασία σύνθετων γεωμετρικών στοιχείων, όπως δομές με λεπτά τοιχώματα, κοίλοι κύλινδροι και λεπτοί άξονες, με βελτιωμένη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα,
- Βελτιστοποίηση των διεργασιών υπό το πρίσμα της αυτόνομης ανίχνευσης,
- Αυτοεκμάθηση εντός της διαδικασίας και βελτίωση της απόδοσης,
- Δυναμική ανίχνευση της διαδικασίας κοπής, συμπεριλαμβανομένων των δυνάμεων κοπής, του σχηματισμού ροκανιδιών και των αλληλεπιδράσεων της ζώνης κοπής.

4.2 Έξυπνα εργαλεία κοπής με βάση τη δύναμη

4.2.1 Έξυπνο εργαλείο κοπής με χρήση πιεζοηλεκτρικών ταινιών

Γενικά, υπάρχουν τρεις τρόποι μέτρησης της δύναμης κοπής: παράκαμψη δύναμης, άμεση μέτρηση δύναμης και έμμεση μέτρηση δύναμης. Όσον αφορά τη μέθοδο άμεσης μέτρησης της δύναμης κοπής, μια μονάδα ανίχνευσης τοποθετείται απευθείας στη διαδρομή δύναμης για τη μέτρηση της συνολικής δύναμης διεργασίας. Αντίθετα, η έμμεση μέτρηση δύναμης χρησιμοποιεί μια τάση ανάλογη της δύναμης διεργασίας για τον προσδιορισμό της δύναμης. Για τη μέθοδο παράκαμψης δύναμης, ένα μέρος της δύναμης κοπής μετράται καθώς διέρχεται από τη μονάδα ανίχνευσης. Ένα έξυπνο εργαλείο κοπής ανιχνεύει τη δύναμη κοπής χρησιμοποιώντας τόσο τη μέθοδο παράκαμψης δύναμης όσο και την έμμεση μέτρηση δύναμης.

4.2.2 Αισθητήρες επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW) ευφυούς κοπτικού εργαλείου καινοτομίας.

Οι αισθητήρες που βασίζονται σε SAW διαδραματίζουν αυξανόμενο ρόλο στην ανίχνευση και τη μέτρηση, με εφαρμογές που κυμαίνονται από την ανίχνευση αερίων και ατμών έως τη μέτρηση παραμορφώσεων (Alfed et al., 2000, Mooussa et al., 1997). Μέσω της αρχής της έμμεσης μέτρησης δυνάμεων, η τεχνολογία αισθητήρων SAW έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση δυνάμεων κοπής. Για την ελαχιστοποίηση του πυροηλεκτρικού φαινομένου, η τοποθέτηση του αισθητήρα SAW είναι ζωτικής σημασίας. Στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη έξυπνων εργαλείων, οι αισθητήρες τοποθετούνται συνήθως στο στέλεχος του εργαλείου, ιδίως στα σημεία μέγιστης παραμόρφωσης. Στην κατεργασία, το στέλεχος του εργαλείου είναι συνήθως βιδωμένο στο ένα άκρο, με αποτέλεσμα να προεξέχει και να υπόκειται σε στατικές δυνάμεις κοπής που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία κατεργασίας. Εφόσον έχει καθοριστεί η σχέση μεταξύ της δύναμης κοπής και της παραμόρφωσης, ο αισθητήρας SAW είναι ικανός να μετρήσει τη δύναμη. Η χρήση της τεχνολογίας SAW για εφαρμογές έξυπνων εργαλείων και έξυπνης κατεργασίας προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Μπορεί να συμμετάσχει σε ασύρματη μετάδοση δεδομένων,
- Μπορεί να είναι χωρίς ρεύμα ή να τροφοδοτείται εξωτερικά,
- Ευαισθησία,

- Χρησιμοποιεί απόκριση υψηλής συχνότητας,
- Είναι πιθανό να οδηγήσει σε plug-and-produce - έξυπνη ενσωμάτωση και συνδεσιμότητα,
- Χαμηλές τιμές

Κατά συνέπεια, η τεχνολογία αισθητήρων SAW είναι εφαρμόσιμη για την παρακολούθηση της φθοράς του εργαλείου και των διαδικασιών κατεργασίας μέσω της μέτρησης της δύναμης κοπής εντός της διαδικασίας, η οποία είναι όλο και πιο επωφελής για την έξυπνη κατεργασία και την αυτοματοποίηση της παραγωγής υψηλής αξίας στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0.

Τα επιφανειακά ακουστικά κύματα είναι υπερηχητικά κύματα που ταξιδεύουν κατά μήκος της επιφάνειας στερεών αντικειμένων χρησιμοποιώντας την αρχή εκπομπής-λήψης που βασίζεται στην πιεζοηλεκτρική μεταγωγή. Στην άνω επιφάνεια ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού υποστρώματος, όπως ο χαλαζίας και το νιοβικό λίθιο, ένας αισθητήρας SAW αποτελείται συνήθως από μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων, γνωστών και ως ενδοψηφιακών μετατροπέων (IDT). Προκειμένου να παράγουν και να ανιχνεύουν επιφανειακά ακουστικά κύματα, οι IDTs έχουν σχεδιαστεί για να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια και αντίστροφα. Όταν η δύναμη κοπής εφαρμόζεται στο άκρο του εργαλείου, ο αισθητήρας αρχής τάσης SAW μπορεί να παράγει και να ανιχνεύει την αντίστοιχη τάση στο στέλεχος του εργαλείου.

4.2.3 Σχεδιασμός ευφρών κοπτικών εργαλείων ευαίσθητων στη θερμοκρασία

Κανονικά, η αύξηση της θερμοκρασίας κοπής οδηγεί σε πρόωρη αστοχία του εργαλείου ή σε υπερβολική φθορά του εργαλείου, με την πλειονότητα της φθοράς να εμφανίζεται στην κύρια πλευρά της παρειάς και στην πλευρά της τριβής του κοπτικού εργαλείου. Τέσσερις κύριοι μηχανισμοί φθοράς συνδέονται με την αστοχία του εργαλείου: οξείδωση, τριβή, πρόσφυση και διάχυση. Όλες αυτές οι φθορές οφείλονται στην ευαισθησία στη θερμοκρασία, ακόμη και υπό κανονικές συνθήκες κοπής (Trent et al., 2000, Seinfeld et al., 2013). Οι χαμηλές θερμοκρασίες κοπής (λόγω μαλακής κοπής ή υψηλής απόδοσης ψύξης) ευνοούν τις φθορές πρόσφυσης και τριβής. Εφόσον η θερμοκρασία κοπής είναι πάνω από ένα ορισμένο όριο, η θερμικά επαγόμενη φθορά, συμπεριλαμβανομένης της οξείδωσης και της διάχυσης, ενεργοποιείται και κυριαρχεί

στη συνολική φθορά. Η παραδοσιακή χρήση υγρού κοπής για την απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται από τη διαδικασία κοπής μπορεί επίσης να οδηγήσει σε ρύπανση του περιβάλλοντος, κινδύνους για την υγεία, επιμόλυνση της επιφάνειας και αύξηση του κόστους παραγωγής (Sun et al., 2011). Με τη χρήση ενός έξυπνου κοπτικού εργαλείου με εσωτερική ψύξη, τα προαναφερθέντα ζητήματα μπορούν να αποφευχθούν.

4.2.4 Ταχεία συσκευή Servos (FTS)

Οι σερβομηχανισμοί ταχείας διάταξης (FTS) διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην τόννευση ακριβείας επιφανειών με μικροδιαμορφωμένα χαρακτηριστικά ή ελεύθερης μορφής με τη χρήση κοπτικού εργαλείου με διαμάντι. Το σύστημα FTS αποτελείται συνήθως από έναν πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή (ή πηνία φωνής), μεντεσέδες κάμψης και έναν αισθητήρα ανάδρασης θέσης. Ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του συστήματος FTS και έχει σχεδιαστεί για να τοποθετεί το κοπτικό εργαλείο με ακρίβεια κατά τη διάρκεια εργασιών τόννευσης μικρής διαδρομής. Επιπλέον, ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής επιλέγεται ως κινητήριο στοιχείο λόγω της ικανότητάς του να ταλαντώνεται σε υψηλή συχνότητα.

Η στατική παραμόρφωση της δομής FTS που προκαλείται από τις δυνάμεις κοπής κατά την αδρή και τελική κατεργασία πρέπει να ελαχιστοποιηθεί προκειμένου να μειωθούν τα σφάλματα σχήματος και διαστάσεων του εξαρτήματος. Επομένως, απαιτείται υψηλή ακαμψία, η οποία επηρεάζει άμεσα την κατεργασμένη επιφάνεια, ιδιαίτερα στη διεύθυνση της πρόωσης. Η δομή FTS πρέπει να σχεδιάζεται με υψηλή φυσική συχνότητα και αντοχή στην κόπωση, ώστε να αποφεύγονται οι δονήσεις συντονισμού που προκαλούνται από τις δυνάμεις κοπής. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή δυσκαμψία της δομής FTS βοηθά στην ελαχιστοποίηση της πραγματικής διαδρομής του πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή. Επομένως, γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της υψηλής ακαμψίας και της μείωσης της διαδρομής του ενεργοποιητή (Huo et al., 2008).

5. Ανθεκτικότητα των κοπτικών εργαλείων

Πολλοί συγγραφείς έχουν ασχοληθεί με την ανθεκτικότητα των υλικών κοπής στα αντίστοιχα ερευνητικά τους πεδία. Το 2014, μια ομάδα συγγραφέων παρουσίασε στο συνέδριο ASME Congress, Congress of The American Society of Mechanical Engineers, μια μελέτη που εξετάζε την ανθεκτικότητα των μη επικαλυμμένων πλακιδίων που χρησιμοποιούνται στην ξηρή τόννευση. Η διάρκεια ζωής του εργαλείου προσδιορίστηκε με τη μέτρηση της φθοράς των πλευρών (VB) σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3685. Ακολουθώντας ένα δυναμικό μοντέλο, τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάρκεια ζωής του εργαλείου μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας (Batista et al., 2014). Το πρότυπο ISO 3685 χρησιμοποιήθηκε επίσης για την αξιολόγηση της δυνατότητας κατεργασίας του χάλυβα τόννευσης SAE 1020. Οι Diaz et al. (Diaz et al., 2013) εισήγαγαν μια νέα μέθοδο για την αξιολόγηση της κατεργασιμότητας αυτού του υλικού που παράγεται στη Βενεζουέλα (SAE 1020). Τα αποτελέσματα της κατεργασίας προσδιορίστηκαν από το μοντέλο Taylor, καθώς και η ποιότητα της επιφάνειας και ο τύπος του ροκανίσματος. Ο στόχος της μελέτης των Dhabale et al. (Chethan et al., 2019)) ήταν να εξεταστούν οι επιδράσεις των παραμέτρων της διεργασίας στο μέτρο απόδοσης, δηλαδή στον ρυθμό αφαίρεσης υλικού και στην τραχύτητα επιφάνειας, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Taguchi (τεχνική για τον καθορισμό του ελάχιστου αριθμού πειραμάτων που πρέπει να διεξαχθούν εντός του επιτρεπόμενου εύρους παραγόντων και επιπέδων) και την ανάλυση διακύμανσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταχύτητα της ατράκτου, η πρόωση και το βάθος κοπής είναι οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη επιρροή στον ρυθμό αφαίρεσης υλικού, ενώ η πρόωση και το βάθος κοπής είναι οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη επιρροή στην επιφανειακή τραχύτητα (Chethan et al., 2019)).

Οι Chethan et al. (Chethan et al., 2019)) περιέγραψαν επίσης τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διεργασίας κατά τη διαδικασία τόννευσης με τη μέθοδο Taguchi. Οι Dubovska κ.ά. (Dubovksa et al., 2014) παρουσίασαν έρευνα σχετικά με την ωστενιτική αντοχή των κοπτικών πλακών από ανοξείδωτο χάλυβα με επικάλυψη καρβιδίου. Το άρθρο περιέγραψε τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της διεργασίας τόννευσης για τον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 που χρησιμοποιείται σε εξειδικευμένες εφαρμογές, μαζί με τις κυρίαρχες λειτουργικές περιοχές. Σημαντική έρευνα διεξήχθη επίσης από τον Piescu (Piescu et al., 2011), ο οποίος περιέγραψε την ανθεκτικότητα των κοπτικών εργαλείων χρησιμοποιώντας μοντέλα παλινδρόμησης. Το επίκεντρο της μελέτης ήταν η εξέταση ενός εργαλείου με θερμικό ψεκασμό επικάλυψης. Χρησιμοποιώντας μοντέλα παλινδρόμησης, ο συγγραφέας Piescu (Piescu et al., 2011) περιέγραψε επίσης την ανθεκτικότητα των κοπτικών εργαλείων με επιμεταλλωμένες επιστρώσεις σε μεταγενέστερη μελέτη του. Η συμβολή του περιλάμβανε επίσης μια νέα πρόταση για την ανάλυση της διάρκειας ζωής των εργαλείων, η οποία περιελάμβανε γενικεύσεις του μοντέλου του Taylor σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3685 (Miani et al., 2000). Το 2015 δημοσιεύθηκε μια εργασία που περιγράφει τη μελέτη φρεζαρίσματος σκληρών υλικών (Inconel 718 και Inconel 625) (Nath et al., 2015). Οι παράμετροι της διεργασίας βελτιστοποιήθηκαν

λαμβάνοντας υπόψη το συμβιβασμό μεταξύ του ρυθμού αφαίρεσης υλικού και της διάρκειας ζωής του εργαλείου με τη χρήση ενός τυπικού μοντέλου βελτιστοποίησης κόστους. Επίσης, επικυρώθηκαν οι εκτιμώμενοι συντελεστές του εκτεταμένου μοντέλου διάρκειας ζωής του εργαλείου Taylor. Στην επόμενη εργασία, ο συγγραφέας Nicolich Nicolich et al., (2002) συγκρίνει δύο πειραματικές μεθόδους για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου στην τόννευση: Το πρότυπο ISO 3685 και η προτεινόμενη εδώ, η οποία επιτρέπει τη μεταβολή των παραμέτρων κοπής, ιδίως της ταχύτητας κοπής. Οι Petru et al. (Petru et al., 2015) εξέτασαν επίσης το ζήτημα του πειραματικού προσδιορισμού της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου κατά την κατεργασία. Προσδιόρισαν πειραματικά τη φθορά τριών τύπων κοπτικών εργαλείων κατά την κατεργασία του κράματος. Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, διαπιστώθηκε ότι ήταν πλεονεκτική η χρήση θετικής γεωμετρίας με κύρια γωνία κοπτικής ακμής 45° κατά την κατεργασία κραμάτων τιτανίου. Επιπλέον, τα στρογγυλά (μεγάλης ακτίνας) ένθετα είναι κατάλληλα για την κατεργασία κραμάτων τιτανίου, όπου η γωνία της κύριας κοπτικής ακμής μπορεί να μεταβληθεί με βάση το βάθος του υλικού που κατεργάζεται.

Το 2017 διεξήχθη έρευνα που περιγράφει τη μοντελοποίηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου για τη διαδικασία τόννευσης με βάση τις παραμέτρους κοπής και τη σκληρότητα. Στην παρούσα εργασία (Qehaja et al., 2017) παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της διάρκειας ζωής του εργαλείου κατά την τόννευση σκληρυμένου χάλυβα με διαφορετικά επίπεδα σκληρότητας. Οι Sadilek et al. (Sadilek et al., 2011), Cep et al. (Sadilek et al., 2014), Majernikova et al. (Majernikova et al., 2017) και Baka (Baksa et al., 2015) ασχολήθηκαν με το θέμα της παρακολούθησης της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Οι Chaus και Rudnitskii (Chaus et al., 2017) περιέγραψαν τα ευρήματα μιας μελέτης που εξέτασε την επίδραση των συνθηκών κοπής στη φθορά και την αντοχή των κοπτικών εργαλείων από χυτό μέταλλο. Το 2011, οι Gill et al. (Gill et al., 2011) παρουσίασαν έρευνα σχετικά με τη φθορά των πλευρών και την απόδοση της κατεργασίας. Οι Caballero κ.ά. (Caballero et al., 2017), Hao κ.ά. (Hao et al., 2018), Jaworski κ.ά. (Jaworski et al., 2016), κ.ά. (Lalbondre et al., 2013) περιέγραψαν εξαντλητικές μελέτες της κατεργασιμότητας των κραματωμένων χαλύβων όσον αφορά την αντοχή των κοπτικών εργαλείων. Ο Che-Haron (Neshta et al., 2018) περιέγραψε επίσης το ζήτημα της διάρκειας ζωής των εργαλείων που σχετίζεται με τη διαδικασία τόννευσης. Η παρούσα μελέτη διερεύνησε τις επιδράσεις της φθοράς του εργαλείου και της ακεραιότητας της επιφάνειας στην κατεργασία του κράματος τιτανίου Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo υπό συνθήκες

ξηρής κοπής. Στα (Neshta et al., 2018) και (Ren et al., 2019), συζητείται επίσης το ζήτημα της διάρκειας ζωής του εργαλείου κατά την ξηρή τόννευση με διαμάντια των κραμάτων τιτανίου. (Kamruzzaman et al., 2018)

Οι Kamruzzaman et al. συζήτησαν ένα παρόμοιο θέμα (κατεργασιμότητα και διάρκεια ζωής του εργαλείου) στην εργασία τους. Η παρούσα μελέτη περιγράφει την ανθεκτικότητα ενός υπερκράματος με βάση το νικέλιο μετά από τόννευση με επικαλυμμένα ένθετα καρβιδίου. Οι Antonialli et al. (Antonialli et al., 2015) συζήτησαν τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και τη φθορά του εργαλείου κατά την κωνική τόννευση ενός υπερκράματος με βάση το νικέλιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κωνική τόννευση ήταν ανεπιτυχής όσον αφορά τη διάρκεια ζωής του εργαλείου, παρά το γεγονός ότι αποφεύχθηκε ο μηχανισμός αυλάκωσης της επικάλυψης του εργαλείου, ο οποίος οδήγησε σε φθορά εγκοπής. Οι Priarone κ.ά. (Priarone et al., 2016) και Da Silva κ.ά. (Da Silva et al., 2017) συζήτησαν την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής του εργαλείου μετά τη διαδικασία τόννευσης χρησιμοποιώντας διάφορες μορφές ψύξης και την αρχή της ελάχιστης ποσότητας λιπαντικού.

5.1 Κρίσιμες πρώτες ύλες (CRM)

Σε μια εποχή παγκοσμιοποίησης και έντονου ανταγωνισμού, είναι εξαιρετικά σημαντικό για τις βιομηχανίες να μειώνουν ταυτόχρονα το κόστος παραγωγής και να αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Για να παραμείνουν βιώσιμες, πρέπει επίσης να διαθέτουν μια άψογη αλυσίδα εφοδιασμού που περιλαμβάνει ένα κρίσιμο στοιχείο για την προμήθεια κρίσιμων πρώτων υλών (CRM) Nicolich et al., 2002).

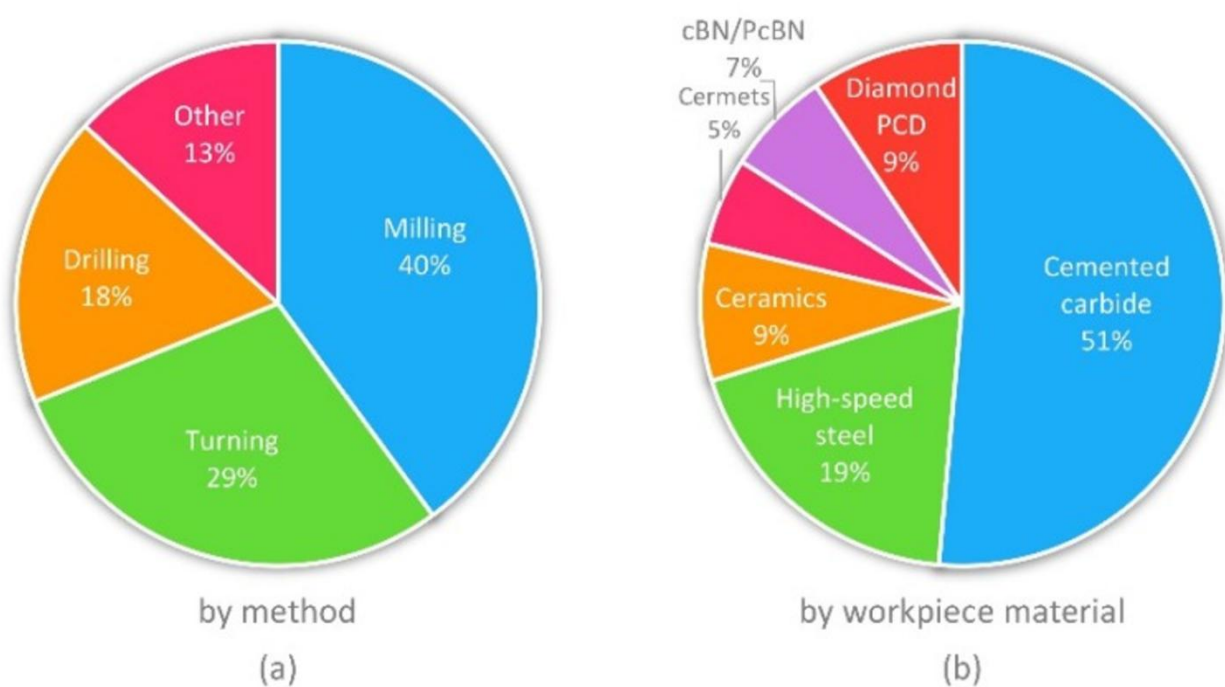
Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η υπεραφθονία των εισαγωγών κρίσιμων πρώτων υλών (CRMs), ιδίως στον κλάδο της μηχανουργίας (εδώ, αναφερόμαστε σε μέταλλα που είναι απαραίτητα για τις βιομηχανίες της ΕΕ, όπως το βολφράμιο, το χρώμιο και το νιόβιο, για να αναφέρουμε μερικά), έχει φτάσει σε ανησυχητικό επίπεδο, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλος βαθμός εξάρτησης από μονοπωλιακούς προμηθευτές αυτών των CRMs. Η ΕΕ έχει ήδη ξεκινήσει διάφορες εκστρατείες, συμπεριλαμβανομένης της "Πρωτοβουλίας για τις πρώτες ύλες" (RMI), για να μετριάσει αυτό το προβλεπόμενο πρόβλημα.

Το ζήτημα των CRM πρέπει να προσεγγιστεί με επιστημονική αυστηρότητα με την επιδίωξη πολλαπλών παράλληλων δράσεων, δηλαδή: (1) βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής των CRM (αύξηση της βιώσιμης εξόρυξης, μείωση του κόστους εξόρυξης, αύξηση της αποδοτικότητας των υλικών, αύξηση της ασφάλειας κ.λπ.), (2) εντοπισμός κατάλληλων υποψηφίων για τη μερική ή πλήρη αντικατάσταση των CRM και (3) αύξηση της ανακύκλωσής τους.

Στο πλαίσιο αυτό, είναι επιθυμητή η ανάπτυξη νέων υλικών με ανώτερα χαρακτηριστικά ή καλύτερες επιδόσεις από τα υπάρχοντα υλικά, προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής των προϊόντων και, κατά συνέπεια, να μειωθεί το κόστος των προϊόντων. Το κόστος των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη μεταποιητική βιομηχανία, ιδίως για την κατεργασία εξαρτημάτων υψηλής αξίας, όπως πτερύγια στροβίλων, εξαρτήματα αυτοκινήτων και αεροδιαστημικής, εξαρτήματα μηχανών και βιοϊατρικά εμφυτεύματα, είναι σημαντικό και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το συνολικό κόστος κατασκευής και, κατά συνέπεια, την τελική τιμή του προϊόντος. Το κόστος των εργαλείων περιλαμβάνει όχι μόνο το κόστος που σχετίζεται με την επανατοποθέτηση των εργαλείων, αλλά και το κόστος που σχετίζεται με τον αυξημένο χρόνο κύκλου που προκαλείται από την εκφόρτωση και επανατοποθέτηση του νέου εργαλείου. Ως αποτέλεσμα, δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη υλικών (ιδίως για κοπτικά εργαλεία) που μπορούν να αντέξουν υψηλότερα φορτία κοπής από τα σημερινά επιτεύξιμα όρια κατεργασίας.

Τα κοπτικά εργαλεία που εξετάζονται σε αυτό το άρθρο έχουν σχεδιαστεί για όλες τις μηχανικές κατεργασίες με φόρτιση επαφής, όπως φρεζάρισμα, διάτρηση, τórνευση, ακόνισμα, λοξότμηση, φρεζάρισμα, φρεζάρισμα, αυλάκωση κ.λπ. Η τρέχουσα ανάπτυξη νέων υλικών για κοπτικά εργαλεία παρέμεινε μια υποτονική διαδικασία, ιδίως λόγω της υψηλής αρχικής επένδυσης, αλλά υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη πιο βιώσιμων μεθόδων για τη μείωση του κινδύνου της αλυσίδας εφοδιασμού.

Το τσιμεντοκαρβίδιο είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για κοπτικά εργαλεία. Τα κοπτικά εργαλεία καρβιδίου κατασκευάζονται συνήθως με ένα μείγμα βολφραμίου και κοβαλτίου (το συνδετικό υλικό που συγκρατεί το καρβίδιο βολφραμίου), με πολυάριθμες παραλλαγές στο μέγεθος των κόκκων καρβιδίου και στην αναλογία καρβιδίου προς συνδετικό υλικό. Με την πάροδο του χρόνου, έχουν αναπτυχθεί προτιμώμενα μείγματα για την επίτευξη αποτελεσματικότητας σε διάφορα βάθη κοπής, πλάτη και υλικά τεμαχίων. Στο Σχήμα 27α,β απεικονίζεται η κατανομή των κοπτικών εργαλείων στην παγκόσμια αγορά το 2018 ανά μέθοδο κοπής και υλικό τεμαχίου, αντίστοιχα. Φαίνεται ότι το φραιζάρισμα, η τórνευση και η διάτρηση είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διαδικασίες στις πρωτογενείς κατεργασίες και ότι τα εργαλεία για τις εν λόγω διαδικασίες αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 87% της συνολικής αγοράς εργαλείων. Όσον αφορά το υλικό κοπής, τα τσιμεντοκαρβίδια αντιπροσωπεύουν το πενήντα τοις εκατό της αγοράς, ακολουθούμενα από τον χάλυβα υψηλής ταχύτητας. Τα κεραμικά, τα cermets και τα υπερσκληρά υλικά, όπως το πολυκρυσταλλικό διαμάντι (PCD) και το πολυκρυσταλλικό κυβικό νιτρίδιο του βορίου (PCBN), αντιπροσωπεύουν το υπόλοιπο της αγοράς για τα υλικά εργαλείων. Τα δύο βασικά συστατικά των προαναφερθέντων εργαλείων από καρβίδιο, το βολφράμιο και το κοβάλτιο, προσδιορίστηκαν προηγουμένως (το 2011) ως δύο από τις 14 βασικές πρώτες ύλες (βλ. σχήμα 27) για τις βιομηχανίες της ΕΕ. Τα τελευταία χρόνια, το 2014 και το 2017, παρέμειναν στον εν λόγω κατάλογο λόγω της οικονομικής τους σημασίας και του κινδύνου διακοπής του εφοδιασμού τους. Οι γνωστές γονοτοξικές και καρκινογόνες ιδιότητες του Co αποτελούν επίσης κινητήρια δύναμη για την υποκατάστασή του. Προκειμένου να αποφευχθεί η πλήρης διακοπή λειτουργίας των επιχειρήσεων κατεργασίας λόγω έλλειψης πρώτων υλών για κοπτικά εργαλεία, έχει καταστεί επιτακτική ανάγκη για την ΕΕ να αναπτύξει εναλλακτικές λύσεις για τα υπάρχοντα υλικά κοπτικών εργαλείων.



Εικόνα 27 Κατανομή της παγκόσμιας αγοράς κοπτικών εργαλείων ανά τεχνολογία κοπής (α) και ανά υλικό τεμαχίου (β), όπως παρουσιάστηκε από την Dedalus Consulting (Diaz et al., 2013).

Ίσως ο πιο άμεσος αντίκτυπος της νέας εποχής της ψηφιακής κατασκευής (Chethan et al., 2019)) στα μελλοντικά κοπτικά εργαλεία είναι η δυνητική χρήση των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής για τη δημιουργία εργαλείων οιονεί δικτυωτού σχήματος με γεωμετρικές δομές και απαιτητικές υποδομές, καθώς και η δυνατότητα παραγωγής υπολειπόμενων διακριτών δομών και προαιρετικών υλικών με διαβαθμισμένες ιδιότητες (4D εκτύπωση). Ένα από τα τέσσερα θέματα που ορίζονται από τον χάρτη πορείας για την κοπή υψηλής απόδοσης (HPC) (Chethan et al., 2019)) είναι η χρήση ολοκληρωμένων εργαλείων στην παραγωγή παρτίδων υψηλού επιπέδου με βάση τη μείωση του χρόνου κύκλου και τη βελτίωση της ποιότητας. Το θέμα αυτό αναπτύχθηκε περαιτέρω και επινοήθηκε ο όρος "έξυπνη εργαλειοποίηση" (Chethan et al., 2019)) για να περιγράψει την ενσωμάτωση ενεργοποιητών αισθητήρων (Dubonksa et al., 2014) εντός του κοπτικού εργαλείου ως ένα βήμα προς τα εμπρός στην παρακολούθηση της διαδικασίας του εργαλείου, επιτρέποντας στους χρήστες να συλλέγουν τα απαραίτητα δεδομένα για τη δημιουργία ακριβέστερων ψηφιακών διδύμων για τις διαδικασίες κατεργασίας.

Η χρήση της διάτρησης με χαμηλής συχνότητας δονήσεις (LFVAD) (Iliescu et al., 2011) για τη βελτίωση της ποιότητας της κατεργασίας εύθραυστων υλικών, όπως τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP), μέσω ενός μηχανισμού διακοπτόμενης κοπής είναι ένα παράδειγμα των πρόσθετων λειτουργιών που διατίθενται στο εμπόριο εν προκειμένω.

Εκτός από τις εν λόγω μεταβολές στους μηχανισμούς κατεργασίας, υπάρχει συνεχές ενδιαφέρον για την επιτυχή υλοποίηση νέων υλικών επικάλυψης εργαλείων και την ανάπτυξη βελτιωμένων τεχνολογιών κοπής, όπως η κοπή με υποβοήθηση λέιζερ και η κρυογενετική υποβοήθηση. Το αν ο πρωταρχικός μηχανισμός φθοράς του εργαλείου διέπεται από την υψηλή φυσική σκληρότητα του τεμαχίου ή την υψηλή χημική συγγένεια καθορίζει το σκεπτικό πίσω από τη χρήση αυτών των μεθόδων. Στην πρώτη περίπτωση, η θέρμανση με λέιζερ πριν από το κοπτικό εργαλείο μπορεί να μειώσει την αντίσταση στην κοπή, καθιστώντας το τεμάχιο πιο προσιτό στην κοπή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το κρυογονικό περιβάλλον καθυστερεί την κινητική των χημικών αντιδράσεων, αποτρέποντας έτσι τη χημική φθορά λόγω διάχυσης.

Υπάρχει μια ποικιλία υφιστάμενων επικαλύψεων που προστατεύουν τα κοπτικά εργαλεία που λειτουργούν υπό ακραίες συνθήκες. Το πλέον επιθυμητό χαρακτηριστικό των επικαλύψεων εργαλείων είναι η υψηλή σκληρότητα και ανθεκτικότητα για υψηλή απόδοση φθοράς, καθώς και η θερμική και χημική σταθερότητα για να αντέχουν σε ακραία περιβάλλοντα κοπής, ιδίως κατά την κατεργασία υψηλής ταχύτητας. Η πλειονότητα των ευρέως χρησιμοποιούμενων επικαλύψεων δεν περιέχει CRM- ωστόσο, οι πολυστοιχειακές επικαλύψεις και οι επικαλύψεις υψηλής εντροπίας που έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες ακραίες συνθήκες μπορεί να περιέχουν CRM (Iliescu et al., 2011). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, τα μισά από τα πυρίμαχα μέταλλα της ομάδας χαρακτηρίζονται ως CRMs. Τα μέταλλα μετάπτωσης είναι μία από τις μεγαλύτερες ομάδες χημικών στοιχείων στον περιοδικό πίνακα. Ωστόσο, η ποσότητα του υλικού που απαιτείται για μια επίστρωση είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη που απαιτείται για παρόμοια CRM που χρησιμοποιούνται χύμα σε κοπτικά εργαλεία. Επιπλέον, ο νανο- και μικροδομικός σχεδιασμός των προστατευτικών επικαλύψεων, όπως τα νανοσύνθετα και οι πολυστρωματικές στρώσεις, εμποδίζει τη χρήση συγκεκριμένων CRM σε επικαλύψεις.

Πρόσφατες μελέτες εξέτασαν μια σειρά από τεχνικοεπιστημονικές δράσεις που μπορούν να αναληφθούν για την αντιμετώπιση των προβλημάτων των CRM σε κοπτικά εργαλεία-συγκεκριμένα, για να επιτευχθούν τα εξής:

1. *Επέκταση της διάρκειας ζωής των εργαλείων μέσω βελτιωμένων τεχνικών αφαίρεσης υλικού, όπως η υποβοήθηση με λείζερ, η κρυογενετική υποβοήθηση, η υποβοήθηση με δονήσεις και η χρήση προστατευτικών επιστρώσεων.*
2. *Ανάπτυξη και σύνθεση νεότερων υλικών που μπορούν να αντικαταστήσουν επαρκώς μερικώς ή πλήρως τα CRM που χρησιμοποιούνται στα εργαλεία.*
3. *Συμμετοχή αυστηρής μοντελοποίησης και προσομοίωσης στο σχεδιασμό των εργαλείων και χρήση ψηφιακών διδύμων για ακριβέστερες προβλέψεις στη σημερινή εποχή της ψηφιακής παραγωγής.*
4. *Βελτίωση της τριβολογικής απόδοσης των εργαλείων και 5. Βελτίωση των τριβολογικών επιδόσεων των εργαλείων.*

5.2 Προσπάθειες επέκτασης της διάρκειας ζωής των εργαλείων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την αύξηση της διάρκειας ζωής και της απόδοσης των εργαλείων σε εφαρμογές κατεργασίας, όπως η τροποποίηση του βασικού υλικού καρβιδίου βολφραμίου (WC)-Co του εργαλείου, η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας και η χρήση προστατευτικών επιστρώσεων. Οι τεχνικές αυτές αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Τα τσιμεντοκαρβίδια είναι το πιο διαδεδομένο και παλαιότερο υλικό εργαλείων κονιομεταλλουργίας. Τα πυροσυσσωματωμένα καρβίδια χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και αντοχή στην τριβή και αποτελούνται από ένα ή περισσότερα καρβίδια μετάλλων υψηλής τήξης και ένα μεταλλικό συνδετικό υλικό (Miani et al., 2000). Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, τα πυροσυσσωματωμένα καρβίδια χωρίζονται σε τρεις ομάδες: αυτά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κατεργασίας μετάλλων, εργαλείων διαμόρφωσης πλαστικών και εργαλείων εξόρυξης. Το κύριο συστατικό των τσιμεντοποιημένων καρβιδίων είναι το WC, το οποίο, ανάλογα με τον κατασκευαστή και την ομάδα εφαρμογής του υλικού, μπορεί να κυμαίνεται από 50 έως 90 τοις εκατό κατά βάρος. Άλλα συστατικά περιλαμβάνουν καρβίδια τιτανίου (TiC), τανταλίου (TaC) και νιόβιου (NbC), των οποίων τα ποσοστά κατά βάρος κυμαίνονται από 0% έως 35%. Αυτά τα καρβίδια είναι ικανά να διαλύουν το ένα το άλλο και μια

σημαντική ποσότητα καρβιδίου βολφραμίου. Συνήθως, το υπόλοιπο της σύνθεσης είναι κοβάλτιο. Το κοβάλτιο έχει σχετικά υψηλό σημείο τήξης 1493 βαθμούς Φαρενάιτ και υψηλό βαθμό διαβρεξιμότητας με την πλειονότητα των συστατικών των πυροσυσσωματωμένων υλικών εργαλείων. Μια τέτοια μικροδομή, η οποία είναι χαρακτηριστική των πυροσυσσωματωμένων καρβιδίων, επιτρέπει την παρουσία μιας όλκιμης δεσμευτικής φάσης- επιπλέον, η σκληρή και εύθραυστη φάση καρβιδίου επιτρέπει τη σύνδεση αντίθετων ιδιοτήτων σε ένα ενιαίο υλικό, όπως υψηλή αντοχή στην τριβή και σκληρότητα σε συνδυασμό με υψηλή αντοχή και μέτρια όλκιμότητα. Η χημική σύνθεση καθορίζει την αντοχή στην τριβή σε πολλές εφαρμογές καρβιδίου.

Τα τσιμεντοποιημένα καρβίδια δύο συστατικών του τύπου WC-Co με χαμηλή περιεκτικότητα σε κοβάλτιο διαθέτουν τη μεγαλύτερη αντοχή στην τριβή. Εάν δεν υπάρχουν κρούσεις κατά τη λειτουργία και η τριβή είναι ο κύριος μηχανισμός φθοράς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτοί οι τύποι. Η καθολικότητα του WC-Co είναι άμεσο αποτέλεσμα των εξαιρετικών μηχανικών και τριβολογικών ιδιοτήτων του. Η τεχνολογική διαδικασία λήψης των τσιμεντοποιημένων καρβιδίων χαρακτηρίζεται από σχετικά απλό σχηματισμό, θερμοκρασίες πυροσυσσώματωσης χαμηλότερες από τα κεραμικά υλικά και ηλεκτρική αγωγιμότητα- τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν θετικό αντίκτυπο στη δυνατότητα διαμόρφωσης προϊόντων με πολύπλοκες γεωμετρίες χρησιμοποιώντας διαβρωτική επεξεργασία, καθώς και στην απλότητα εφαρμογής επικαλύψεων κατά της φθοράς και της διάβρωσης. Το μειονέκτημα αυτού του υλικού είναι ότι τα κοπτικά εργαλεία από τσιμεντοκαρβίδια λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες κοπής και τείνουν να οξειδώνονται σε θερμοκρασίες άνω των 400 βαθμών Κελσίου. Το βολφράμιο, το τιτάνιο, το ταντάλιο ή άλλα μεταλλικά στοιχεία υψηλής τήξης αποτελούν το 75 έως 94 % του βάρους των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων καρβιδίων, ενώ το κοβάλτιο, το νικέλιο, το μολυβδαίνιο και περιστασιακά άλλα μέταλλα χρησιμοποιούνται ως συνδετική μήτρα.

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε κοβάλτιο του WC-Co αυξάνει την ανθεκτικότητά του, ενώ η μείωση της περιεκτικότητας σε κοβάλτιο και η μείωση του μεγέθους των κόκκων του καρβιδίου αυξάνει την αντοχή του στη φθορά. Η αντικατάσταση του WC με κυβικά καρβίδια (TiC, NbC και TaC) βελτιώνει την αντοχή στη φθορά και την αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση. Η μικροδομή του καρβιδικού τσιμέντου WC-Co αποτελείται από σωματίδια καρβιδίου βολφραμίου σε συνδυασμό με κοβάλτιο, τα οποία λαμβάνονται μέσω πυροσυσσώματωσης με

συμμετοχή υγρής φάσης. Κατά την κατεργασία ενός εξαιρετικά πλαστικού υλικού, όπως ο καθαρός σίδηρος, με το συμβατικό καρβίδιο με τσιμέντο WC-Co, ένα τσιπ έχει την τάση να προσκολλάται στην επιφάνεια τριβής του κοπτικού εργαλείου, με αποτέλεσμα σοβαρή φθορά λόγω πρόσφυσης. Αυτό συμβαίνει επειδή το κοβάλτιο έχει χαμηλότερο σημείο τήξης από το WC. Κατά την κατεργασία του χάλυβα, η παρουσία κοβαλτίου στα τσιμεντοκαρβίδια προκαλεί την προσκόλληση του τεμαχίου στη λεπίδα κοπής. Η χημική αλληλεπίδραση μεταξύ της επιφάνειας της οδόντωσης και του καυτού ροκανιδιού προκαλεί φθορά κρατήρα. Η διάχυση του υλικού του εργαλείου στο τσιπ ή η πρόσφυση μεταξύ τσιπ και εργαλείου, ακολουθούμενη από θραύση κάτω από την προσκολλημένη διεπιφάνεια εντός του υλικού του εργαλείου, είναι οι δύο μηχανισμοί που οδηγούν σε φθορά του εργαλείου. Αύξηση της χημικής σταθερότητας του υλικού του εργαλείου, μείωση της διαλυτότητας του τεμαχίου ή παροχή προστασίας φραγμού με κράμα ή επίστρωση του υποστρώματος (Nath et al., 2015). Στην κοπτική ακμή, οι μεγάλες κλίσεις θερμοκρασίας προκαλούν ρωγμές από θερμικό σοκ. Το κοβάλτιο και το καρβίδιο του βολφραμίου έχουν πολύ διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, γεγονός που εξηγεί γιατί οι λεπίδες μπορεί να εμφανίσουν ρωγμές κατά τη λειτουργία. Κατά συνέπεια, τα τσιμεντοκαρβίδια χρησιμοποιούνται συχνά ως υποστρώματα επικάλυψης.

Ωστόσο, διεξάγονται έρευνες για υλικά WC-Co χωρίς επικάλυψη που προορίζονται για μηχανική κατεργασία. Το καρβίδιο χωρίς κοβάλτιο είναι ένα παράδειγμα που συνάδει με την ιδέα της μείωσης της χρήσης κρίσιμων υλικών στα τσιμεντοκαρβίδια. Τα πρώτα καρβίδια χωρίς κοβάλτιο εξήχθησαν από μικροκόνεις με συμβατικές τεχνικές (Petru et al., 2015). Τα υλικά αυτά παρουσίαζαν μεγαλύτερη ευθραυστότητα από το τσιμεντοποιημένο καρβίδιο WC-Co παρά την υψηλή σκληρότητα και αντοχή στην τριβή. Για το καρβίδιο βολφραμίου χωρίς συνδετικό υλικό, η πυροσυσσωμάτωση έγινε σε στερεά φάση, η οποία, για τη συμβατική πυροσυσσωμάτωση χωρίς πίεση, απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες πυροσυσσωμάτωσης ή/και μεγαλύτερους χρόνους πυροσυσσωμάτωσης, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη κόκκων στο πολυκρυσταλλικό υλικό. Η εφαρμογή νανοκονιαμάτων και τεχνικών πυροσυσσωμάτωσης υπό πίεση (πυροσυσσωμάτωση με πλάσμα σπινθήρα, πυροσυσσωμάτωση υπό θερμή πίεση) βελτίωσε τις ιδιότητες των τσιμεντοκαρβιδίων χωρίς κοβάλτιο (Majernikova et al., 2017). Η προσθήκη ελεύθερου άνθρακα σε WC χωρίς συνδετικό υλικό μειώνει τον σχηματισμό εύθραυστων φάσεων W₂C, Co₃W₃C και οξειδίων (Chaus et al., 2008).

Η πυροσυσσωμάτωση με πλάσμα σπινθήρα (SPS, επίσης γνωστή ως "τεχνολογία πυροσυσσωμάτωσης με υποβοήθηση πεδίου") και η πυροσυσσωμάτωση με θερμή πρέσα μειώνουν την ανάπτυξη κόκκων και το πορώδες σε πυροσυσσωματωμένα υλικά στερεάς φάσης λόγω του μικρότερου χρόνου πυροσυσσωμάτωσης και της πίεσης (Gill et al., 2011). Η προσθήκη κεραμικών κόνεων σε σύνθετα υλικά είναι μια άλλη ιδέα που έχει αναπτυχθεί σε σχέση με τα τσιμεντοποιημένα καρβίδια. Στην περίπτωση του ZrO_2 , απαιτείται πρόσθετη ενίσχυση λόγω των τάσεων που προκύπτουν από τον μετασχηματισμό της φάσης ZrO_2 . Συνήθως προστίθενται με τη μορφή οξειδίων, καρβιδίων και νιτρίδιων σε ένα εύρος από 5% έως 15% κατά βάρος (Caballero et al., 2017). Η έννοια αυτή συνάδει με την αντικατάσταση των κρίσιμων υλικών W και Co. Η πρόσφατη εντατική ανάπτυξη σύνθετων υλικών με μήτρα WC ή WC-Co διευκολύνθηκε από τη μέθοδο SPS (Hao et al., 2018). Υπάρχουν ήδη συγκεκριμένες περιπτώσεις βιομηχανικής εφαρμογής τέτοιων λύσεων.

Υπάρχει σύνδεση μεταξύ της έρευνας για τη μείωση της κατανάλωσης τσιμεντοκαρβιδίων και των προσπαθειών για την αύξηση της ανθεκτικότητάς τους. Στο WC-Co (Jaworski et al., 2016), εισάγονται υπερσκληρά υλικά όπως το διαμάντι και το κυβικό νιτρίδιο του βορίου (cBN). Τα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από υπερλεπτόκοκκα καρβίδια καρβιδίου βολφραμίου/κοβαλτίου (WC-Co) τσιμεντοποιημένων καρβιδίων και 30 vol.% cBN κατασκευάστηκαν κυρίως με τη χρήση τεχνικών FAST (τεχνολογία πυροσυσσωμάτωσης με υποβοήθηση πεδίου). Ως υλικό της επόμενης γενιάς για χρήση σε ακμές κοπτικών εργαλείων, τα σύνθετα υλικά WC-Co/cBN χαρακτηρίζονται από βέλτιστο συνδυασμό σκληρότητας και ανθεκτικότητας. Η παραγωγή μιας καλά συνδεδεμένης διεπιφάνειας μεταξύ της μήτρας WC-Co και των σωματιδίων cBN είναι η πιο δύσκολη πτυχή των σύνθετων υλικών με πυροσυσσωμάτωση (Neshta et al., 2018).

Η σκλήρυνση με φουρκέτες χρησιμοποιείται κυρίως για καρβίδιο βολφραμίου χωρίς συνδετικό υλικό. Υπάρχουν γνωστές μελέτες που χρησιμοποίησαν whiskers SiC_w , $Si_3N_4_w$ και Al_2O_3 . Η συμμετοχή των Whiskers έφθασε το 10% κατ' όγκο (Ren et al., 2019). Στη βιβλιογραφία περιγράφεται η σκλήρυνση με χρήση νανοσωλήνων και γραφενίου για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των καρβιδίων με τσιμέντο. Η μελέτη καθόρισε ότι η θερμική καταπόνηση είναι η κύρια αιτία αστοχίας των εργαλείων σήραγγας ασπίδας από τσιμεντοκαρβίδιο όταν η σήραγγα ασπίδας εκτελείται σε ανομοιόμορφο μαλακό και σκληρό έδαφος (Kamruzzaman et al., 2018).

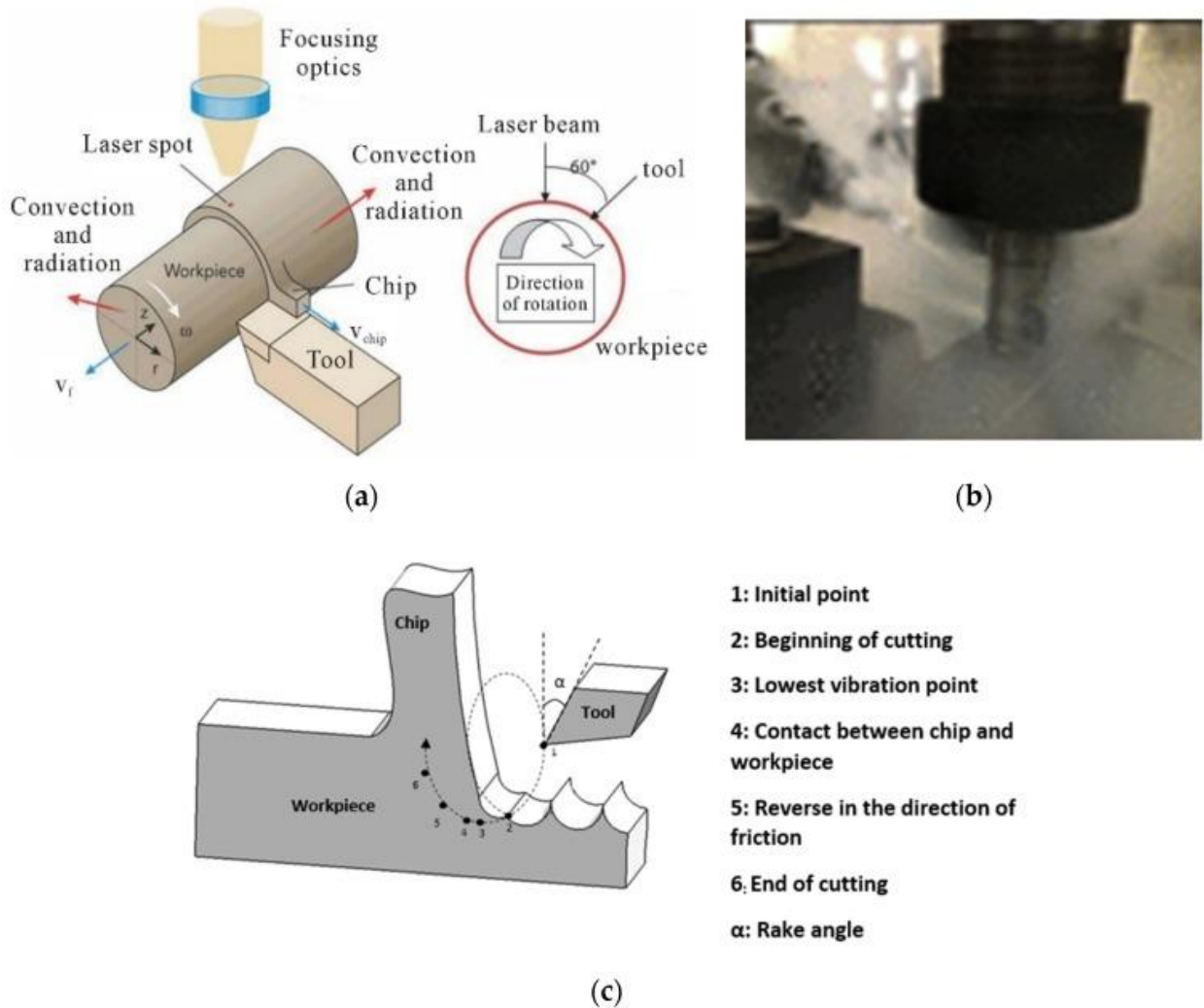
5.3 Προηγμένες τεχνικές κατεργασίας

Η αδιάλειπτη κατεργασία "δύσκολα κοπτόμενων υλικών", όπως τα υπερκράματα με βάση το νικέλιο που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια των στροβίλων, απαιτεί μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου (Antoniali et al., 2015). Λόγω της κακής θερμοχημικής σταθερότητάς τους, τα παραδοσιακά εργαλεία καρβιδίου περιορίζονται σε ταχύτητες μεταξύ 30 και 70 m/min- ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές ταχύτητες πρόωσης λόγω της υψηλής ανθεκτικότητάς τους. Η προηγμένη μοντελοποίηση θα μπορούσε να συμβάλει στη βελτίωση της κακής θερμοχημικής σταθερότητας των εργαλείων από τσιμεντοκαρβίδιο. Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (Priarone et al., 2016) και οι νέες τεχνικές κατεργασίας έχουν δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για την παραγωγή σύνθετων μορφών εργαλείων. Η παρούσα ενότητα παρέχει μια σύντομη περίληψη των πρόσφατων προσπαθειών για την αύξηση της διάρκειας ζωής των εργαλείων με τη μείωση του φορτίου στο κοπτικό εργαλείο ή την καθυστέρηση της γνωστής διαδρομής του μηχανισμού επιταχυνόμενης φθοράς. Σε κάθε περίπτωση, βελτιώνεται η ποιότητα του κατεργασμένου εξαρτήματος.

5.3.1 Κατεργασία με υποβοήθηση λέιζερ (κατεργασία με θερμική υποβοήθηση)

Σε μια προσπάθεια να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που θέτουν τα δύσκολα στην κατεργασία υλικά, η υποβοήθηση με λέιζερ έχει ενσωματωθεί στη μηχανική μικροκατεργασία σε παγκόσμια κλίμακα. Από το 1982, το 2006, το 2013, το 2011, το 2014, το 2016 και το 2017 στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν εκδοθεί επτά σημαντικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας σχετικά με τη χρήση υποβοήθησης με λέιζερ κατά τη διάρκεια της μηχανικής μικροκατεργασίας (Chethan et al., 2019). Όλα αυτά τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας συνδέονται με μια ενιαία αλυσίδα μιας διάσημης πλέον διαδικασίας γνωστής ως θερμικά υποβοηθούμενη μηχανική κατεργασία (thermal-assisted machining, TAM). Η TAM βασίζεται στην προθέρμανση της ζώνης κοπής του υλικού που κόβεται πριν από το κοπτικό εργαλείο, όπως απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 28α. Η μέθοδος αυτή μειώνει τη φυσική σκληρότητα του τεμαχίου, καθιστώντας το πιο επιδεκτικό στην

κοπή, μειώνοντας την ειδική ενέργεια κοπής (δηλαδή το έργο που επιτελεί το εργαλείο για την αφαίρεση ενός μοναδιαίου όγκου του υλικού).



Εικόνα 28 Σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία κατεργασίας. (α) Κατεργασία με θερμική υποβοήθηση [46]- (β) κρυογενική κατεργασία [47]- (γ) σχηματικό διάγραμμα για την απεικόνιση του μηχανισμού της κατεργασίας με υποβοήθηση δόνησης [48].

5.3.2 Κρυογενική κατεργασία

Η κρυογενική κατεργασία περιλαμβάνει την κατάψυξη του κοπτικού εργαλείου σε ακραίες θερμοκρασίες περίπου 196 °C με τη χρήση υγρού αζώτου ή υγρού διοξειδίου του άνθρακα (Chethan et al., 2019)). Η κρυογενική κατεργασία εξυπηρετεί δύο σκοπούς: (i) αυξάνει τη σχετική διαβάθμιση σκληρότητας μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου και (ii) καθυστερεί την κινητική οποιασδήποτε χημικής διάχυσης που θα μπορούσε να προκαλέσει τριβοχημική φθορά του εργαλείου. Ο S. Rakesh τόνισε πόσο φιλική προς το περιβάλλον, μη τοξική και μη εκρηκτική είναι η κρυογενική τεχνολογία.

Η χρήση υγρού αζώτου για την πρόψυξη του τεμαχίου, την ψύξη του τσιπ και την ψύξη του κοπτικού εργαλείου και της ζώνης κοπής είναι παραδείγματα του τρόπου με τον οποίο η κρυογονική ψύξη έχει εφαρμοστεί σε εργασίες κοπής. Πολυάριθμες μελέτες έχουν συγκρίνει τις συμβατικές τεχνικές κοπής με τις στρατηγικές κρυογονικής ψύξης. Ωστόσο, οι μελέτες που διεξήχθησαν σε μια προσπάθεια προσδιορισμού της καλύτερης τεχνικής αποκάλυψαν πολυάριθμες ασυνέπειες, καθώς τα προαναφερθέντα συμπεράσματα υπόκεινταν σε αλλαγές με βάση τα ζεύγη εργαλείου-εργασίας, τις συνθήκες κοπής και τις γενικές παραμέτρους αξιολόγησης.

Η βιβλιογραφία σχετικά με τα κοπτικά εργαλεία από καρβίδιο βολφραμίου στην κρυογενική κατεργασία είναι σημαντικά λιγότερο εκτεταμένη από τη βιβλιογραφία σχετικά με τα χαλύβδινα εργαλεία και μόνο λίγες εργασίες εξετάζουν μια παράμετρο αξιολόγησης της διάρκειας ζωής (Hao et al., 2018). Στο πλαίσιο αυτό, όλες αυτές οι μελέτες καταδεικνύουν ότι η κρυογενική κατεργασία έχει θετικές επιδράσεις τόσο στην αντοχή του εργαλείου όσο και στην επιφανειακή επεξεργασία του προϊόντος. Η κρυογονική κατεργασία των υλικών είχε σημαντικά ευεργετικά αποτελέσματα, όπως αυξημένη αντοχή στη φθορά, μειωμένες παραμένουσες τάσεις, αυξημένη σκληρότητα και αυξημένη αντοχή στην κόπωση.

Οι Seah et al. (Seah et al., 2013) διεξήγαγαν μια σειρά δοκιμών για να διερευνήσουν τις επιδράσεις της ψυχρής και κρυογονικής κατεργασίας σε μη επικαλυμμένα ένθετα WC για ανθρακούχο χάλυβα ASSAB 760. Απέδειξαν ότι τα κρυοκατεργασμένα ένθετα παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά από τα ανεπεξέργαστα και ανακτημένα ένθετα σε διάφορες

ταχύτητες κοπής. Επιπλέον, ανακάλυψαν ότι η ψυχρή και η κρυογονική κατεργασία αύξησαν σημαντικά την αντίσταση του κοπτικού ενθέματος στην αφαίρεση των ροκανιδιών, η οποία έγινε όλο και πιο σημαντική όσο αυξανόταν η ταχύτητα κοπής.

Οι Yong et al. (Yong et al., 2017) έψυξαν τα μη επικαλυμμένα ένθετα WC στους 184,5 °C για 24 ώρες και στη συνέχεια τα θέρμαναν σε θερμοκρασία δωματίου, διατηρώντας τον ίδιο ρυθμό 0,28 °C/min κατά την αύξηση και τη μείωση της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιώντας ανεπεξέργαστα και κρυοεπεξεργασμένα ένθετα, επινόησαν μια σειρά από κατεργασίες φρεζαρίσματος όψης χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες κοπής, διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους επεξεργασίας σταθερές. Η πρώτη αφορούσε τα κρυοεπεξεργασμένα ένθετα, τα οποία γενικά είχαν καλύτερες επιδόσεις από τα αντίστοιχα μη επεξεργασμένα, και η δεύτερη αφορούσε την αύξηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου κατά 28%-38% που σημειώθηκε κατά την κρυογενετική επεξεργασία σε υγρή κατεργασία σε σύγκριση με την ξηρή κατεργασία.

Οι (Sreeramareddy et al., 2019) διερεύνησαν τη φθορά του εργαλείου, τις δυνάμεις κοπής και το φινίρισμα της επιφάνειας των εξαρτημάτων που κατεργάστηκαν με ένα ένθετο WC με επικάλυψη πολλαπλών στρωμάτων που είχε υποστεί κρυογενετική κατεργασία. Απέδειξαν ότι η κρυογονική επεξεργασία μείωσε τη φθορά της πλευράς του ένθετου, τις δυνάμεις κοπής και την επιφανειακή τραχύτητα του τεμαχίου που κατεργάστηκε με μη επεξεργασμένα ένθετα.

Οι μελέτες αυτές υποδηλώνουν ότι η κρυογονική επεξεργασία εργαλείων από καρβίδιο είναι ικανή να βελτιώσει την παραγωγικότητα και την ποιότητα του τελικού προϊόντος, καθώς παρέχει μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά και στο φινίρισμα της επιφάνειας. Έχουν αναφερθεί βελτιώσεις στην ερυθρή σκληρότητα των κρυογενικά επεξεργασμένων ενθέτων, που οδηγούν σε χαμηλή φθορά των πλευρών.

Η μεγαλύτερη αντοχή του συνδετικού υλικού μετά την κρυογενετική κατεργασία, σύμφωνα με τον Bryson (Bryson et al., 2020), ήταν υπεύθυνη για την αύξηση της αντοχής στη φθορά και, κατά συνέπεια, για τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του εργαλείου.

5.2.3 Κατεργασία με υποβοήθηση κραδασμών

Η βιβλιογραφία περιγράφει την κατεργασία με υποβοήθηση κραδασμών (VAM) ως διεργασία διακοπτόμενης κοπής. Τα αναφερόμενα οφέλη περιλαμβάνουν χαμηλό ποσοστό φθοράς του εργαλείου, μειωμένο σχηματισμό γρεζιών στο τεμάχιο και μεγαλύτερα βάθη κοπής.

Λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από το υλικό και το σύστημα, οι τεχνικές κατεργασίας με υποβοήθηση υπερήχων ταξινομούνται ως τεχνικές κατεργασίας χαμηλών ταχυτήτων. Επιπλέον, υπάρχουν δύο τρόποι εφαρμογής της υποβοήθησης από δονήσεις: I μονοαξονική κίνηση του εργαλείου (1D VAM), κατά την οποία το εργαλείο δονείται σε επίπεδο παράλληλο προς την επιφάνεια του τεμαχίου και ii) ελλειπτική κίνηση του εργαλείου (Hao et al., 2018) (EVAM), κατά την οποία το εργαλείο δονείται με ελλειπτική κίνηση. Και οι δύο τεχνικές μπορεί να βασίζονται σε συντονισμό ή να μην βασίζονται σε συντονισμό.

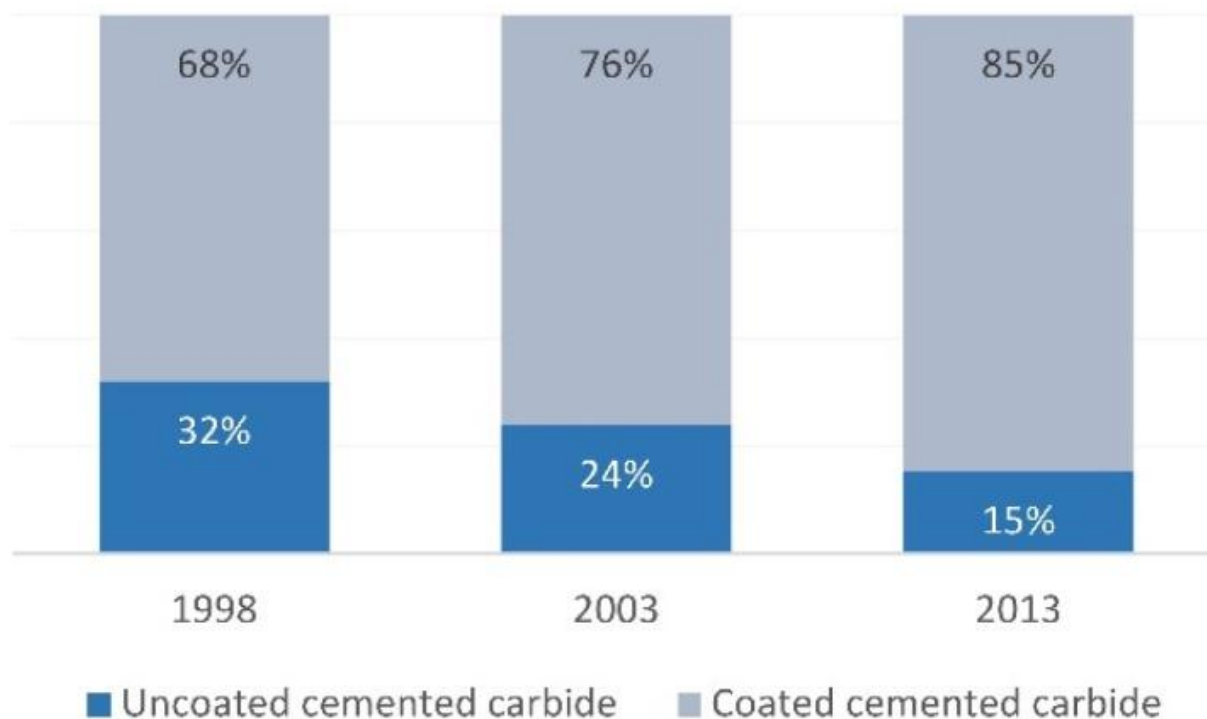
Το σύστημα συντονισμού λειτουργεί σε διακριτές συχνότητες, συνήθως μεγαλύτερες από 20 kHz, με πλάτη μικρότερα από 6 m, ενώ το σύστημα μη συντονισμού λειτουργεί σε συχνότητες μεταξύ 1 και 40 kHz με πλάτη 10 φορές μεγαλύτερα από το σύστημα συντονισμού. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 28γ, η ταλαντωτική κίνηση του εργαλείου προδιαγράφεται από μια συνάρτηση κουνήματος ή το εργαλείο δονείται σε υψηλή συχνότητα.

5.2.4 Κατεργασία με επιφανειακά ελαττώματα

Έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος κατεργασίας επιφανειακών ατελειών (SDM) συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κατεργασίας πορώδους (Ren et al., 2019) και της κατεργασίας προεπεξεργασίας με παλμικό λέιζερ, με την κατεργασία ενός τεμαχίου με τη δημιουργία επιφανειακών ατελειών σε βάθος μικρότερο από το πάχος του άκοπου τεμαχίου, ακολουθούμενη από μια συμβατική κατεργασία. Η SDM διευκολύνει την παραμόρφωση με διάτμηση του υλικού με ελάχιστη ενέργεια εισόδου. Λόγω του μεγάλου ποσοστού συγκέντρωσης τάσεων στη ζώνη κοπής σε αντίθεση με το υπέδαφος, οι παραμένουσες τάσεις στην κατεργασμένη επιφάνεια μπορούν να μειωθούν.

5.4 Προστατευτικά επιχρίσματα

Πολλαπλοί τύποι μηχανισμών αστοχίας, όπως η αποκόλληση, η τριβή, η οξείδωση, η διάχυση κ.λπ., προκαλούνται από την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Η αστοχία προκαλείται από αλληλεπιδράσεις στη διεπιφάνεια μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου ή του εργαλείου και του περιβάλλοντος, αντίστοιχα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η προστασία ενός εργαλείου μέσω επιφανειακής επεξεργασίας με τη δημιουργία μιας πρόσθετης διεπιφάνειας ή επίστρωσης με προσαρμοσμένα χαρακτηριστικά. Στο σχήμα 29 απεικονίζεται η κατανομή των κοπτικών εργαλείων από τσιμεντοκαρβίδιο χωρίς επικάλυψη και με επικάλυψη, με εμφανή την αύξηση των τελευταίων από χρονική άποψη.



Εικόνα 29 Παγκόσμια αγορά κοπτικών εργαλείων από τσιμεντοκαρβίδιο (Diaz et al., 2013).

5.4.1 Επικαλύψεις διαμαντιού και άνθρακα τύπου διαμαντιού (DLC)

Λόγω των ισχυρών μη πολικών ομοιοπολικών δεσμών C-C (sp^3 δεσμοί) και του μικρού μήκους δεσμών, το διαμάντι είναι το υλικό με την υψηλότερη εγγενή σκληρότητα. Ανήκει στην

κατηγορία των υπερσκληρών υλικών, με σκληρότητα 70-100 GPa (Ren et al., 2019). Στους 300 K, το διαμάντι έχει την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου, 20 W/cmK, και τον χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής, $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Είναι αδρανές σε οξέα και αλκάλια σε θερμοκρασία δωματίου και είναι ανθεκτικό σε θερμικό σοκ. Ανάλογα με το βαθμό στίλβωσης και τον προσανατολισμό των κρυσταλλογραφικών επιπέδων, η τοπογραφία της επιφάνειας ενός διαμαντιού μπορεί να κυμαίνεται από μια εξαιρετικά λεία επιφάνεια με συντελεστή τριβής μόλις 0,1 στον αέρα έως μια πολύ τραχιά επιφάνεια με προεξέχουσες ακμές (Hao et al., 2018). Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, το διαμάντι έχει τεράστιες εφαρμογές στον τομέα της τριβολογίας, ιδίως ως επίστρωση για κοπτικά εργαλεία. Οι τεχνικές χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) είναι βέλτιστες για τη σύνθεση πολυκρυσταλλικών υμενίων διαμαντιού (αλλά όχι αποκλειστικές)- οι πιο συνηθισμένες είναι η CVD με υποβοήθηση θερμού νήματος (HFCVD), η CVD με υποβοήθηση πλάσματος συνεχούς ρεύματος (DC PACVD), η CVD με πλάσμα μικροκυμάτων (MPCVD) και η CVD με υποβοήθηση φλόγας καύσης (CFACVD). Ωστόσο, η συντριπτική πλειονότητα των μετάλλων και των κεραμικών έχουν συντελεστή θερμικής διαστολής που είναι σημαντικά μεγαλύτερος από εκείνον των αδαμαντένιων επικαλύψεων. Αυτό συχνά οδηγεί σε παραμένουσες τάσεις και περαιτέρω αποκόλληση των επικαλύψεων, περιορίζοντας τον αριθμό των υλικών του τεμαχίου που μπορούν να κοπούν με κοπτικά εργαλεία με επικάλυψη διαμαντιού.

5.4.2 Ενώσεις μεταβατικών μετάλλων

Στη βιομηχανία εργαλείων κοπής και διαμόρφωσης, τα νιτρίδια μετάλλων μετάπτωσης (TMN), τα καρβίδια (TMC) και τα βορίδια (TMB) χρησιμοποιούνται ευρέως ως σκληρές προστατευτικές επιστρώσεις. Οι εξαιρετικές ιδιότητές τους, όπως η υψηλή σκληρότητα, η χημική αδράνεια, οι ηλεκτρονικές ιδιότητες, το υψηλό σημείο τήξης και η θερμική σταθερότητα σε σκληρά περιβάλλοντα, προκαλούν το ενδιαφέρον του κοινού (οξειδωση, ακτινοβολία κ.λπ.). Αυτό οφείλεται κυρίως στην ποικιλομορφία των χημικών δεσμών. Ο Holleck (Holleck et al., 2019) ταξινόμησε τις ιδιότητες των νιτρίδιων, καρβιδίων και βοριδίων TM από χαμηλές προς υψηλές με βάση τον επικρατούντα τύπο δεσμού τους. Έτσι, η βέλτιστη επίστρωση για μια εφαρμογή

μπορεί να επιλεγεί με βάση τις σημαντικότερες ιδιότητες και την καταλληλότερη μέθοδο εναπόθεσης.

Νέες, πιο σύνθετες συνθέσεις επικαλύψεων, όπως οι τριμερείς και τετραμερείς ενώσεις, που παρουσιάζουν ανώτερες και ειδικές ιδιότητες, έχουν προταθεί ως μέσο για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων που αφορούν την απόδοση σε ακραίες συνθήκες (π.χ. θερμική σταθερότητα και αντοχή στην οξείδωση). Το TM είναι ένα μέταλλο μετάπτωσης, όπως Ti, Cr, Zr, Nb, Hf, Ta, V, κ.λπ., και οι τριμερείς ενώσεις TMN που περιέχουν Al του τύπου $TMxAl_{1-x}N$ αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα.

5.4.3 Νανοσύνθετες εξαιρετικά ανθεκτικές επιστρώσεις

Οι νανοσύνθετες (nc) επιστρώσεις αποτελούνται από σωματίδια νανομετρικού μεγέθους (συνήθως MeN, MeC) ενσωματωμένα σε άμορφες ή κρυσταλλικές μήτρες. Αυτές οι επικαλύψεις έχουν συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον λόγω της ανώτερης σκληρότητάς τους, η οποία μπορεί να επιτρέψει στα σύγχρονα κοπτικά εργαλεία να ξεπεράσουν τις προκλήσεις τους. Η βελτίωση του μεγέθους των κόκκων τους είναι η αιτία της σκληρότητάς τους. Λόγω των διαχωρισμένων σε νανοκλίμακα φασικών περιοχών τους, μεγέθους περίπου 5-10 nm, αυτές οι λεγόμενες "κεραμικές επιστρώσεις τρίτης γενιάς" αντιπροσωπεύουν μια νέα κατηγορία υλικών που παρουσιάζουν όχι μόνο εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, αλλά και εξαιρετικές ηλεκτρονικές, μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες. Ο αυξημένος όγκος των ορίων των κόκκων είναι η πιο ευρέως αποδεκτή εξήγηση για τις βελτιωμένες επιδόσεις τους, καθώς τα όρια των κόκκων εμποδίζουν την κίνηση και την ενεργοποίηση των εξαρθρώσεων.

5.4.4 Επικαλύψεις θερμικής μόνωσης

Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, παράγεται σημαντική ποσότητα θερμότητας στη ζώνη κοπής. Η ροή θερμότητας εισέρχεται στο κοπτικό εργαλείο από τρεις διαφορετικές ζώνες: την πρωτογενή ζώνη διάτμησης (πλαστική παραμόρφωση και ιξώδης διάχυση), τη δευτερογενή

ζώνη διάτμησης (ενέργεια τριβής και πλαστικής διάτμησης) και την τριβή τριβής της κοπτικής επιφάνειας στην παρειά του ένθετου εργαλείου. Η διάχυση της θερμότητας στο τεμάχιο ή στο σώμα του εργαλείου έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην αντοχή και την απόδοσή του. Υπάρχουν πολυάριθμες επικαλύψεις θερμικού φραγμού που, όταν εφαρμόζονται σε μεταλλικές επιφάνειες, επιτρέπουν τη λειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, η συντριπτική πλειονότητα αυτών των επικαλύψεων έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές χωρίς άμεσα εφαρμοζόμενο υψηλό μηχανικό φορτίο, όπως αεριοστρόβιλοι ή εξαρτήματα αεροκινητήρων. Στην περίπτωση των κοπτικών εργαλείων, η επίδραση της επικάλυψης στην κατανομή της θερμότητας στη διεπιφάνεια εργασίας είτε δεν είναι γνωστή είτε έχει μελετηθεί ανεπαρκώς.

5.5 Νέα εργαλεία και υλικά

Οι υψηλές ταχύτητες κοπής συνδέονται συχνά με υψηλή απόδοση. Η κατεργασία HSC (high-speed cutting) βασίζεται σε κεραμικά υλικά εργαλείων (Hao et al., 2018). Τα κεραμικά εργαλεία είναι τρεις έως δέκα φορές πιο ανθεκτικά από τα εργαλεία από πυροσυσσωματωμένο καρβίδιο και μπορούν να λειτουργήσουν σε ταχύτητες κοπής τουλάχιστον αρκετές φορές ταχύτερες. Τα κεραμικά υλικά συνδέονται με την εξέλιξη της "σκληρής κατεργασίας" και των τεχνικών ξηρής κοπής. Η HSM (κατεργασία υψηλής ταχύτητας) αναπτύχθηκε λόγω της ανάγκης να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή εξαρτημάτων, να εξαλειφθούν οι ανακρίβειες που προκαλούνται από τη χρήση χειροκίνητων κατεργασιών φινιρίσματος και να μειωθεί το κόστος κατασκευής. Η HSM επιτρέπει επίσης την ταχεία και αποτελεσματική επεξεργασία σκληρών υλικών (ανοξείδωτοι χάλυβες, ανθεκτικά κράματα τιτανίου, χάλυβες εργαλείων), καθώς και την επεξεργασία καλουπιών και στοιχείων καλουπιών με υψηλό βαθμό ακρίβειας σχήματος και επιφάνειας και χαμηλή τραχύτητα.

Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα συμβάλλουν στην απλούστευση των κατασκευαστικών εργασιών κατά τη φάση του σχεδιασμού. Επιπλέον, η κατεργασία υψηλής ταχύτητας εξασφαλίζει υψηλή απόδοση αφαίρεσης, συντομότερους χρόνους παραγωγής, χαμηλότερες δυνάμεις κοπής και μικρότερη παραμόρφωση του τεμαχίου λόγω της σημαντικής απαγωγής θερμότητας μέσω των τεμαχίων. Τα προαναφερθέντα οφέλη καθιστούν αναγκαία την υψηλή ακαμψία και ακρίβεια του

συστήματος εργαλειομηχανών: το εργαλείο, η κατεργασία με υψηλές ταχύτητες ατράκτου και τα ειδικά κοπτικά εργαλεία (κατάλληλα υλικά εργαλείων και επιστρώσεις).

Συνεπώς, τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα εργαλεία αποτελούν έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την κατεργασία υψηλών ταχυτήτων και πρέπει να εξασφαλίζουν την ανθεκτικότητα των εργαλείων. Το μεγαλύτερο ζήτημα είναι η επιβλαβής επίδραση της υψηλής ταχύτητας κοπής στην αντοχή της λεπίδας. Η υψηλή σκληρότητα και η αντοχή στην τριβή είναι τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των υλικών των εργαλείων για τις κοπτικές λεπίδες, έτσι ώστε το εργαλείο να μην απαιτεί συχνή αναγέννηση. Το υλικό κοπής πρέπει να έχει υψηλή αντοχή σε δυναμικά φορτία και σε εύθραυστη θραύση. Το τελευταίο θα προστατεύσει τη λεπίδα κοπής από την αποκόλληση (που προκαλείται, για παράδειγμα, από την ετερογένεια των ιδιοτήτων του υλικού ή την έλλειψη σταθερότητας της ατράκτου). Λόγω της θέρμανσης του εργαλείου κατά τη λειτουργία, το υλικό πρέπει να διατηρεί τις ιδιότητές του σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Για το λόγο αυτό, ένας υψηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι μια επιθυμητή ιδιότητα του υλικού, καθώς είναι πάντα δυνατή η χρήση υγρών ψύξης κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Τα υγρά ψύξης είναι προβληματικά επειδή περιέχουν σωματίδια από συχνά επιβλαβή συστατικά του τεμαχίου κατεργασίας. Μερικές φορές, τα οργανικά υγρά (τα οποία σήμερα αντικαθίστανται από συνθετικά) μπορεί να μολυνθούν από βακτήρια. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του υλικού του εργαλείου είναι η χημική του αντοχή, η οποία εξαλείφει την πιθανότητα χημικής αντίδρασης με το κατεργαζόμενο υλικό και κατά συνέπεια τη διαβρωτική καταστροφή του. Εκτός από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, τα υλικά που προορίζονται για κοπτικές λεπίδες πρέπει να υφίστανται αποτελεσματική κατεργασία ώστε να εξασφαλίζεται το κατάλληλο σχήμα και οι σωστές διαστάσεις, ιδίως για τις λεπίδες εργαλείων. Σε υψηλές ταχύτητες κοπής, όλα τα κεραμικά κοπτικά εργαλεία έχουν εξαιρετική αντοχή στη φθορά. Διατίθενται διάφορες ποιότητες κεραμικών για διάφορες εφαρμογές.

6. Συμπεράσματα

The development of civilization imposes the necessity of new solutions. New factors have to be taken into consideration which have not been considered properly to date. The basic factors are, of course, health and the human environment and the availability of resources; thus, the use of CRMs should be avoided as much as possible. Certain types of materials have been and are being used despite their harmful effects. The reason for this is the lack of substitutes. This is the driving force behind undertaking research work into new and better solutions. When searching for new substitutes, toxic, allergenic and carcinogenic materials or materials that can work only in the harmful environment of lubricating and cooling liquids should be avoided.

Limiting the use of harmful cooling liquids is possible because of the higher thermal resistance of new cutting materials. Lower friction and wear materials reduce energy consumption and enhance the lifetime of used tools, thus saving materials and allowing a reduction of the used lubricants, or even enabling the use of dry machining. Coolant and lubricant costs account for 16% of the total machining cost, and tool costs only account for 4%. Therefore, the avoidance of cooling will have a high benefit and impact by the reduction of lubricant costs due to low-wear and low-friction ceramics. Human contact with harmful compounds may occur at various stages; e.g., material preparation or treatment with a blade made of this material (in the form of an inhaled aerosol), or as a result of the utilization of the tool material.

In summary, every approach discussed in this study should result in the better quality of the machined parts, improve the machining performance and reduce the use of CRMs. However, in view of the conscious use of raw materials, it is clear that the different strategies should be combined together in a synergistic manner with a new way of thinking regarding the final products through the eco-friendly design of materials, tools and production methods to foster the integration of good practices and habits in the circular economy.

Βιβλιογραφία

1. A Saiful. Design And Analysis Of The Internally Cooled Smart Cutting Tools With The Applications To Adaptive Machining. Phd Thesis, Brunel University, 2013.
2. Agrawal, A., Soni, R.K. And Dwivedi, N., 2013. Development Of Integrated Cnc- Rp System Through Cad/Cam Environment. International Journal Of Mechanical And Production Engineering Research And Development (Ijmpred), 3(5), Pp. 1-10.
3. Akula, S. And Karunakaran, K., 2006. Hybrid Adaptive Layer Manufacturing: An Intelligent Art Of Direct Metal Rapid Tooling Process. Robotics And Computer-Integrated Manufacturing, 22(2), Pp. 113-123.
4. Anderberg, S., Beno, T. And Pejryd, L., 2009. Cnc Machining Process Planning Productivity - A Qualitative Survey, B.G Rosén, Ed. In: Proceedings Of The International 3rd Swedish Production Symposium, Göteborg, Sweden 2009, Pp. 228- 235.
5. Antonialli, A.Í.S.; Magri, A.; Diniz, A.E. Tool life and tool wear in taper turning of a nickel-based superalloy. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016, 87, 2023–2032.
6. Arezoo, B., Ridgway, K. And Al-Ahmari, A., 2000. Selection Of Cutting Tools And Conditions Of Machining Operations Using An Expert System. Computers In Industry, 42(1), Pp. 43-58.
7. Atzeni, E. And Salmi, A., 2012. Economics Of Additive Manufacturing For End-Usable Metal Parts. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 62(9-12), Pp. 1147-1155.
8. Au, S. And Wright, P.K., 1993. Comparative Study Of Rapid Prototyping Technology. American Society Of Mechanical Engineers, Design Engineering Division (Publication), 66, Pp. 73-82.
9. B Peukert, S Benecke, J Clavell, Et Al. Addressing Sustainability And Flexibility In Manufacturing Via Smart Modular Machine Tool Frames To Support Sustainable Value Creation. The 22nd CIRP Conference On Life Cycle Engineering, 2015, 29: 514–519.

10. Bak, D., 2003. Rapid Prototyping Or Rapid Production? 3d Printing Processes Move Industry Towards The Latter. *Assembly Automation*, 23(4), Pp. 340-345.
11. Bakša, T.; Kroupa, T.; Hanzl, P.; Zetek, M. Durability of cutting tools during machining of very hard and solid materials. *Procedia Eng.* 2015, 100, 1414–1423.
12. Baptista, R. And Antune Simoes, J., 2000. Three And Five Axes Milling Of Sculptured Surfaces. *Journal Of Materials Processing Technology*, 103(3), Pp. 398- 403.
13. Batista, M.; Davim, P.; Salguero, J.; Gomez-Parra, A.; Marcos, M. Taylor's Model Based Analysis of Turning Inserts Tool-Life in the Dry Turning of UNS R56400 Alloy. In *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*; American Society of Mechanical Engineers: New York, NY, USA, 2014.
14. Bonfá, M.M.; Costa, É.S.; Sales, W.F.; Amorim, F.L.; Maia, L.H.A.; Machado, Á.R. Evaluation of tool life and workpiece surface roughness in turning of AISI D6 hardened steel using PCBN tools and minimum quantity of lubricant (MQL) applied at different directions. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 103, 971–984.
15. Bouzid, W., 2005. Cutting Parameter Optimization To Minimize Production Time In High Speed Turning. *Journal Of Materials Processing Technology*, 161(3), Pp. 388- 395.
16. Burns, M., 1993. *Automated Fabrication: Improving Productivity In Manufacturing*. 1 Edn. New Jersey: Prentice Hall.
17. Caballero, J.E.; V-Niño, E.D. Wear evaluation of flank in burins of high speed steel modified with titanium ions. *J. Phys. Conf. Ser.* 2017, 935, 1–5.
18. Campbell, I., Bourell, D. And Gibson, I., 2012. Additive Manufacturing: Rapid Prototyping Comes Of Age. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), Pp. 255-258. Cgtech, 2012. Vericut 7.2: Release Notes.
19. Cep, R.; Janáček, A.; Martinický, B.; Sadílek, M. Cutting tool life tests of ceramic inserts for car engine sleeves. *Vjesnik* 2011, 18, 203–209.
20. Chaus, A.S.; Rudnitskii, F.I. Influence of cutting conditions of cast-metal cutting tools on their wear and durability: Analysis of cutting conditions of tools. *J. Frict. Wear* 2007, 28, 416–421.
21. Chaus, A.S.; Rudnitskii, F.I. Influence of cutting conditions of cast-metal cutting tools on their wear and durability. Part 2. Durability test results. *J. Frict. Wear* 2008, 29, 151–155.

22. Che-Haron, C.H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. *J. Mater. Process. Technol.* 2001, 118, 231–237.
23. Chen, J., Huang, Y. And Chen, M., 2005. A Study Of The Surface Scallop Generating Mechanism In The Ball-End Milling Process. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 45(9), Pp. 1077-1084.
24. Chen, T. And Shi, Z., 2008. A Tool Path Generation Strategy For Three-Axis Ball-End Milling Of Free-Form Surfaces. *Journal Of Materials Processing Technology*, 208(1), Pp. 259-263.
25. Chethan, Y.D.; Ravindra, H.V.; Krishnegowda, Y.T. Optimization of machining parameters in turning Nimonic-75 using machine vision and acoustic emission signals by Taguchi technique. *Measurement* 2019, 144, 144–154.
26. Chua, C.K., Leong, K.F. And Lim, C.S., 2010. *Rapid Prototyping: Principles And Applications*. 3 Edn. Singapore: World Scientific.
27. D H Huo, K Cheng. A Dynamics-Driven Approach To The Design Of Precision Machine Tools For Micro-Manufacturing And Its Implementation Perspectives. *Proc. ImechE, Part B: J. Engineering Manufacture*, 2008, 222: 1–13.
28. Da Silva, R.B.; Sales, W.F.; Costa, E.S.; Ezugwu, E.O.; Bonney, J.; Da Silva, M.B.; Machado, Á.R. Surface integrity and tool life when turning of Ti-6Al-4V with coolant applied by different methods. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 93, 1893–1902.
29. Danjou, S. And Köhler, P., 2010. Improving Part Quality And Process Efficiency In Layered Manufacturing By Adaptive Slicing. *Virtual And Physical Prototyping*, 5(4), Pp. 183-188.
30. Davim, J.P., 2001. A Note On The Determination Of Optimal Cutting Conditions For Surface Finish Obtained In Turning Using Design Of Experiments. *Journal Of Materials Processing Technology*, 116(2), Pp. 305-308.
31. Degarmo, E.P., Black, J.T. And Kohser, R.A., 2003. *Materials And Processes In Manufacturing*. 9 Edn. Us: John Wiley & Sons.
32. Díaz, R.C.; Krahmer, D.M.; vila Rondón, R. Application of ISO 3685 in the evaluation of the machinability of steel SAE 1020 during the turning process. *Rev. Tec. Fac. Ing. Univ.* 2011, 34, 194–202. 8. Dhabale, R.; Jatti, V.S.; Singh, T.P. Optimization of turning

- process during machining of AlMg1SiCu using Taguchi method and ANOVA. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2013,
33. Dickens, P., Pridham, M., Cobb, R., Gibson, I. And Dixon, G., 1992. Rapid Prototyping Using 3-D Welding, *Proceedings Of The 3rd Symposium On Solid Freeform Fabrication 1992*, Dtic Document, Pp. 280-290.
 34. Dubovska, R.; Majerik, J.; Chochlikova, H. Investigation of Durability $T = f(v_c)$ in Turning of the AISI 304 Austenitic Stainless Steel using the CNMG 120408 Coated Carbide Insert. *Adv. Mater. Res.* 2014, 941, 1633–1643.
 35. E M Trent, P K Wright. *Metal Cutting*. 4th Ed. Butterworth- Heinemann, Woburn Massachusetts, July 2000.
 36. Elbestawi, M., Chen, L., Becze, C. And El-Wardany, T., 1997. High-Speed Milling Of Dies And Molds In Their Hardened State. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 46(1), Pp. 57-62.
 37. Engin, S. And Altintas, Y., 2001. Mechanics And Dynamics Of General Milling Cutters: Part I: Helical End Mills. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 41(15), Pp. 2195-2212.
 38. Esan, A.O., Khan, M.K., Qi, H.S. And Naylor, C., 2013. Integrated Manufacturing Strategy For Deployment Of Cadcam Methodology In A Smme. *Journal Of Manufacturing Technology Management*, 24(2), Pp. 257-273.
 39. Eyers, D. And Dotchev, K., 2010. Technology Review For Mass Customisation Using Rapid Manufacturing. *Assembly Automation*, 30(1), Pp. 39-46.
 40. Fischer, F., 2013-Last Update, Keynote Slides: Additive Manufacturing Summit [Homepage Of Stratasys], [Online]. Available:[Http://Www.Slideshare.Net/360mnbsu/Fred-Fischer-Takingshape360](http://www.slideshare.net/360mnbsu/Fred-Fischer-Takingshape360).
 41. Frank, M., Drs. Sanjay B. Joshi And Wysk, R.A., 2003. Rapid Prototyping As An Integrated Product/Process Development Tool An Overview Of Issues And Economics. *Journal Of The Chinese Institute Of Industrial Engineers*, 20(3), Pp. 240-246.
 42. Frank, M., Joshi, S.B. And Wysk, R.A., 2002. Cnc-Rp: A Technique For Using Cnc Machining As A Rapid Prototyping Tool In Product/Process Development,
 43. Frank, M.C., 2003. The Development Of A Rapid Prototyping Process Using Computer Numerical Controlled Machining, Phd Thesis, The Pennsylvania State University.

44. Frank, M.C., 2007. Implementing Rapid Prototyping Using Cnc Machining (Cnc-Rp) Through A Cad/Cam Interface, D. L. Bourell, J. J. Beaman, R. H. Crawford, H. L. Marcus, C. C. Seepersad And K. L. Wood, Eds. In: Proceedings Of The Solid Freeform Fabrication Symposium 2007, Pp. 112-123.
45. Frank, M.C., Peters, F.E. And Karthikeyan, R., 2010. Additive/Subtractive Rapid Pattern Manufacturing For Casting Patterns And Injection Mold Tooling, D. L. Bourell, J. J. Beaman, R. H. Crawford, H. L. Marcus And C. C. Seepersad, Eds. In: Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Tx , August 9 2010, Pp. 242-255.
46. Frank, M.C., Wysk, R.A. And Joshi, S.B., 2003. Rapid Prototyping Using Cnc Machining, Proceedings Of Asme Design Engineering Technical Conference And Computers Information In Engineering Conference, Chicago, Il, September 2-6 2003, Asme, Pp. 245-254.
47. Frank, M.C., Wysk, R.A. And Joshi, S.B., 2004. Rapid Planning For Cnc Milling--A New Approach For Rapid Prototyping. Journal Of Manufacturing Systems, 23(3), Pp. 242-255.
48. Frank, M.C., Wysk, R.A. And Joshi, S.B., 2006. Determining Setup Orientations From The Visibility Of Slice Geometry For Rapid Computer Numerically Controlled Machining. Journal Of Manufacturing Science And Engineering, 128, Pp. 228.
49. G W Vogl, M A Donmez, A Archenti. Diagnostics For Geometric Performance Of Machine Tool Linear Axes. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 377–380.
50. Galantucci, L., Lavecchia, F. And Percoco, G., 2009. Experimental Study Aiming To Enhance The Surface Finish Of Fused Deposition Modeled Parts. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 58(1), Pp. 189-192.
51. Gibson, I., Rosen, D.W. And Stucker, B., 2010. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping To Direct Digital Manufacturing. Us: Springer. Grabcad, 2014-Last Update, Grabcad Workbench [Homepage Of A Stratasys Company], [Online]. Available: [Http://Grabcad.Com/Library](http://Grabcad.Com/Library)
52. Gill, S.S.; Singh, H.; Singh, R.; Singh, J. Flank wear and machining performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts. Mater. Manuf. Process. 2011, 26, 1430–1441.

53. Gill, S.S.; Singh, J.; Singh, H.; Singh, R. Investigation on wear behaviour of cryogenically treated TiAlN coated tungsten carbide inserts in turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2011, 51, 25–33.
54. Gu, D., Meiners, W., Wissenbach, K. And Poprawe, R., 2012. Laser Additive Manufacturing Of Metallic Components: Materials, Processes And Mechanisms. *International Materials Reviews*, 57(3), Pp. 133-164.
55. H Moussa, C Andrew, W Wojtek. *Acoustic Wave Sensors: Design, Sensing Mechanisms And Applications*. *Smart Mater. Struct*, 1997, 6: 647–657.
56. Hao, X.; Chen, X.; Xiao, S.; Li, L.; He, N. Cutting performance of carbide tools with hybrid texture. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 97, 3547–3556.
57. Holub, M.; Jankovych, R.; Andrs, O.; Kolibal, Z. Capability assessment of CNC machining centres as measuring devices. *Measurement* 2018, 118, 52–60.
58. Iliescu, M. Cutting tool durability regression models in turning Inox 18-8 thermal sprayed coating. *ACAD J. Manuf. Eng.* 2011, 9, 61–66.
59. Iliescu, M. Regression models of process parameters interdependence in turning S12Mn2Si metallized coatings. *Wseas Trans. Syst.* 2011, 10, 319–330.
60. J B Hentz, V K Nguyen, W Maeder, Et Al. An Enabling Digital Foundation Towards Smart Machining. 8th CIRP Conference On Intelligent Computation In Manufacturing Engineering, 2013, 12: 240–245.
61. J L Stein, K Huh. Monitoring Cutting Forces In Turning: A Model: Base Approach. *Manuf. Sci. Eng., Trans. ASME.* 2002, 124: 27–31.
62. J Tlusty, G Andrews. A Critical Review Of Sensors For Unmanned Machining. *Annals Of The CIRP*, 1983, 32 (2): 611–622.
63. J. Fowler And D. Montgomery, Eds. In: *Proceedings Of The 11th Annual Industrial Engineering Research Conference*, Orlando, FL, May 19-22 2002, Citeseer, Pp. 19-22.
64. Jaworski, J.; Trzepieci ński, T. Research on durability of turning tools made of low-alloy high-speed steel. *Met. Mater.* 2016, 54, 17–25.
65. K Cheng, D H Huo. *Micro Cutting: Fundamentals And Applications*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, October 2013.
66. K Cheng. *Machining Dynamics: Theory, Applications And Practices*. Springer, London, 2008.

67. Kamruzzaman, M.; Rahman, S.S.; Ashraf, M.Z.I.; Dhar, N.R. Tool life and workpiece surface integrity when turning an RR1000nickel-based superalloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 98, 2461–2468.
68. Kruth, J.P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L. And Rombouts, M., 2005. Binding Mechanisms In Selective Laser Sintering And Selective Laser Melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), Pp. 26-36.
69. Kulkarni, P., Marsan, A. And Dutta, D., 2000. A Review Of Process Planning Techniques In Layered Manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), Pp. 18-35.
70. Kumar, S. And Pityana, S., 2011. Laser-Based Additive Manufacturing Of Metals. *Advanced Materials Research*, 227, Pp. 92-95.
71. Kuragano, T., 1992. Fredam System For Design Of Aesthetically Pleasing Free- Form Objects And Generation Of Collision-Free Tool Paths. *Computer-Aided Design*, 24(11), Pp. 573-581.
72. Lalbondre, R.; Krishna, P.; Mohankumar, G.C. Machinability studies of low alloy steels by face turning method: An experimental investigation. *Procedia Eng.* 2013, 64, 632–641.
73. Lan, H., 2009. Web-Based Rapid Prototyping And Manufacturing Systems: A Review. *Computers In Industry*, 60(9), Pp. 643-656.
74. Lim, T., Corney, J., Ritchie, J. And Clark, D., 2001. Optimizing Tool Selection. *International Journal Of Production Research*, 39(6), Pp. 1239-1256.
75. Liu, G., 2007. Automated Cutter Size And Orientation Determinations For Multi-Axis Sculptured Part Milling, Master Thesis, Concordia University.
76. Luo, X. And Frank, M.C., 2010. A Layer Thickness Algorithm For Additive/Subtractive Rapid Pattern Manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 16(2), Pp. 100-115.
77. Luo, X., Li, Y. And Frank, M.C., 2013. A Finishing Cutter Selection Algorithm For Additive/Subtractive Rapid Pattern Manufacturing. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9-12), Pp. 2041-2053.
78. Majernikova, J.; Spisak, E. Increasing durability of cutting tools. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2017, 11, 141–146.
79. Masood, S. And Song, W., 2004. Development Of New Metal/Polymer Materials For Rapid Tooling Using Fused Deposition Modelling. *Materials & Design*, 25(7), Pp. 587-594.

80. Miani, F.; Guseo, R.; Mortarino, C.; Meneghello, R. A new proposal for tool-life analysis: Response surface modelling of the flank wear progression. In Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, La Baule, Nantes, France, 3–5 July 2000; pp. 3–5.
81. Nath, C.; Brooks, Z.; Kurfess, T.R. Machinability study and process optimization in face milling of some super alloys with indexable copy face mill inserts. *J. Manuf. Process.* 2015, 20, 88–97.
82. Neshta, A.; Kryvoruchko, D.; Hatala, M.; Ivanov, V.; Botko, F.; Radchenko, S.; Mital, D. Technological Assurance of High-Efficiency Machining of Internal Rope Threads on Computer Numerical Control Milling Machines. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2018, 140, 1–8.
83. Nicolich, M. Experimental Test for Tool-Life Prediction in Turning. *CISM Cour. L* 2002, 437, 185–192.
84. Onuh, S. And Yusuf, Y., 1999. Rapid Prototyping Technology: Applications And Benefits For Rapid Product Development. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 10(3), Pp. 301-311.
85. P Alfred. A Review Of Wireless SAW Sensors. *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, 2000, 47: 317–322.
86. Pal, D. And Ravi, B., 2007. Rapid Tooling Route Selection And Evaluation For Sand And Investment Casting. *Virtual And Physical Prototyping*, 2(4), Pp. 197-207.
87. Palanisamy, P., Rajendran, I. And Shanmugasundaram, S., 2007. Optimization Of Machining Parameters Using Genetic Algorithm And Experimental Validation For End-Milling Operations. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 32(7-8), Pp. 644-655.
88. Pande, S.S. And Kumar, S., 2008. A Generative Process Planning System For Parts Produced By Rapid Prototyping. *International Journal Of Production Research*, 46(22), Pp. 6431-6460.
89. Petru, J.; Schiffner, J.; Zlamal, T.; Cep, R.; Kratochvil, J.; Stancekova, D. Wear progress of exchangeable cutting inserts during Ti (6) Al (4) V alloy machining. In Proceedings of the 24th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 3–5 June 2015; pp. 1147–1155.

90. Priarone, P.C.; Klocke, F.; Faga, M.G.; Lung, D.; Settineri, L. Tool life and surface integrity when turning titanium aluminides with PCD tools under conventional wet cutting and cryogenic cooling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 85, 807–816.
91. Qehaja, N.; Kyçyku, A. Tool life modeling based on cutting parameters and work material hardness in turning process. *Scientific proceedings XIV international congress. Mach. Technol. Mater.* 2017, 11, 356–359.
92. R Teti, K Jemielniak, G O'Donnell, Et Al. Advanced Monitoring Of Machining Operations. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59: 717–739.
93. Relvas, C. And Simoes, J., 2004. Optimization Of Computer Numerical Control Set- Up Parameters To Manufacture Rapid Prototypes. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 218(8), Pp. 867-874.
94. Ren, Z.; Qu, S.; Zhang, Y.; Sun, F.; Li, X.; Yang, C. Machining performance of PCD and PCBN tools in dry turning titanium alloy Ti-6Al-0.6 Cr-0.4 Fe-0.4 Si-0.01 B. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 102, 2649–2661.
95. Renner, A., 2008. Computer Aided Process Planning For Rapid Prototyping Using A Genetic Algorithm, Master Thesis, Iowa State University.
96. Rosochowski, A. And Matuszak, A., 2000. Rapid Tooling: The State Of The Art. *Journal Of Materials Processing Technology*, 106(1), Pp. 191-198.
97. Sadílek, M.; Kratochvíl, J.; Petr ůu, J.; Cep, R.; Zl ů ámal, T.; Stan ů ceková, D. Cutting tool wear monitoring with the use of impedance layers. *Vjesnik* 2014, 21, 639–644.
98. Seah K.H.W., Rahaman M., Yong K.H. Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers-Part B. J. Eng. Manuf.* 2003;217:29–43. doi: 10.1243/095440503762502260.
99. Spencer, J., Dickens, P. And Wykes, C., 1998. Rapid Prototyping Of Metal Parts By Three-Dimensional Welding. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 212(3), Pp. 175-182.
100. Sun, G., Sequin, C.H. And Wright, P.K., 2001. Operation Decomposition For Freeform Surface Features In Process Planning. *Computer-Aided Design*, 33(9), Pp. 621-636.

101. Suwanprateeb, J., 2007. Comparative Study Of 3dp Material Systems For Moisture Resistance Applications. *Rapid Prototyping Journal*, 13(1), Pp. 48-52.
102. Tan, K., Chua, C., Leong, K., Cheah, C., Cheang, P., Abu Bakar, M. And Cha, S., 2003. Scaffold Development Using Selective Laser Sintering Of Polyetheretherketone-Hydroxyapatite Biocomposite Blends. *Biomaterials*, 24(18), Pp. 3115-3123.
103. Verma, J.K.; Bartarya, G.; Bhaskar, J. Effect of Minimum Quantity Lubrication on Tool Wear and Surface Integrity During Hard Turning of EN31 Steel. In *Advances in Forming, Machining and Automation*; Shunmugam, M., Kanthababu, M., Eds.; Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering; Springer: Singapore, 2019.
104. X Sun, R Bateman, K Cheng, Et Al. Design And Analysis Of An Internally Cooled Smart Cutting Tool For Dry Cutting. *Proc. Imeche, Part B: J. Engineering Manufacture*, 2011, 226: 585–591.
105. Xu, X., Wang, L. And Newman, S.T., 2011. Computer-Aided Process Planning—A Critical Review Of Recent Developments And Future Trends. *International Journal Of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1), Pp. 1-31.
106. Yan, Y., Li, S., Zhang, R., Lin, F., Wu, R., Lu, Q., Xiong, Z. And Wang, X., 2009. *Rapid Prototyping And Manufacturing Technology: Principle, Representative Technics, Applications, And Development Trends*. Tsinghua Science & Technology, 14, Pp. 1-12.
107. Yang, Z., Wysk, R.A., Joshi, S. And Frank, M.C., 2009. Conventional Machining Methods For Rapid Prototyping And Direct Manufacturing. *International Journal Of Rapid Manufacturing*, 1(1), Pp. 41-64.
108. Yip, W.S.; To, S. Tool life enhancement in dry diamond turning of titanium alloys using an eddy current damping and a magnetic field for sustainable manufacturing. *J. Clean. Prod.* 2017, 168, 929–939.