

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΑΞΗ
ΜΕΡΟΣ Ι

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Συνοπτική ανάλυση περιεχομένων

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια αποτύπωσης μιας γενικότερης άποψης της βιομηχανικής παραγωγής, κυρίως από την οικονομική πλευρά, καθώς και μια σύντομη συζήτηση μιας μεθόδου-πλαισίου για την λήψη αποφάσεων στην βιομηχανική παραγωγή. Η εφαρμογή ενός τέτοιου πλαισίου στον ακαδημαϊκό χώρο ή στην βιομηχανική πράξη απαιτεί:

- α. επιστημονικά θεμελιωμένους ορισμούς των βασικών κριτηρίων, που χρησιμοποιούνται κατά την λήψη αποφάσεων στην παραγωγή.
- β. την ανάπτυξη τεχνοοικονομικών μοντέλων, τα οποία θα συνδυάζουν βασικές τεχνικές παραμέτρους της παραγωγής με αντίστοιχα οικονομικά μεγέθη.

Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει την κατά το δυνατόν επιστημονική τεκμηρίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων στην βιομηχανική παραγωγή και διευκολύνει τον ποσοτικό προσδιορισμό των επιπτώσεων κάθε απόφασης. Οι επιστήμη του μηχανικού έχει κάνει αρκετή πρόοδο, σε ότι αφορά την ανάλυση πολλών τεχνικών προβλημάτων, συχνά όμως οι αναλύσεις αυτές δεν λαμβάνουν υπ' όψη τα σχετικά οικονομικά μεγέθη και για τον λόγο αυτό έχουν καθαρά ακαδημαϊκό χαρακτήρα και είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στην βιομηχανική πρακτική. Η χρησιμότητα του παρουσιαζόμενου στο πρώτο κεφάλαιο πλαισίου λήψης αποφάσεων έγκειται στην προσπάθεια ποσοτικοποίησης ιδιοτήτων των συστημάτων παραγωγής: όπως της ευελιξίας και της ποιότητας, με την ταυτόχρονη δυνατότητα να συμπεριληφθούν στην λήψη των *τεχνολογικών* αποφάσεων και *οικονομικά μεγέθη*.

Το υπόλοιπο μέρος του βιβλίου ασχολείται με την συστηματική παρουσίαση και ανάλυση θεμάτων σχετικών με την βιομηχανική παραγωγή και τα συστήματα παραγωγής. Η σειρά παρουσίασης, που ακολουθείται, είναι παράλληλη με αυτή που ακολουθείται κατά τον σχεδιασμό και την λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής (Διεργασίες–Μηχανές–Προγραμματισμός–Σχεδιασμός–Λειτουργία). Το δεύτερο κεφάλαιο αφιερώνεται στις παραγωγικές διεργασίες, που αποτελούν την βάση κάθε συστήματος παραγωγής. Συχνά τα συστήματα παραγωγής προσεγγίζονται με έναν «διαγραμματικό» τρόπο, που

αγνοεί τις συνθήκες και την τεχνολογία των παραγωγικών διεργασιών. Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν δίνεται μια σύντομη περιγραφή των σημαντικότερων παραγωγικών διεργασιών, έτσι ώστε ο αναγνώστης να είναι σε θέση να καταλάβει καλύτερα την θεματολογία των συστημάτων παραγωγής –που τις περισσότερες φορές είναι συνυφασμένη με προβλήματα παραγωγικών διεργασιών.

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός και οι εργαλειομηχανές εκτελούν παραγωγικές διεργασίες και ως εκ τούτου οι δυνατότητες και οι περιορισμοί των παραγωγικών διεργασιών εξαρτώνται, κατά κύριο λόγο, από τον σχεδιασμό και την λειτουργία της μηχανής, η οποία εκτελεί την συγκεκριμένη παραγωγική διεργασία. Στο κεφάλαιο 3 παρατίθεται μια συνοπτική ανασκόπηση των διαδικασιών σχεδιασμού, ελέγχου και αυτοματισμού των εργαλειομηχανών και του μηχανολογικού εξοπλισμού. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι μια γενική θεώρηση της επιστημονικής γνώσης και της βιομηχανικής πρακτικής για τις μηχανές, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα συστήματα παραγωγής, επειδή οι τελευταίες αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία των συστημάτων αυτών.

Μετά την εξοικείωση του αναγνώστη με τις παραγωγικές διεργασίες και τις μηχανές, κρίνεται απαραίτητη η συζήτηση σχετικά με τον τεχνολογικό προγραμματισμό (process planning) των παραγωγικών διεργασιών (Κεφάλαιο 4), ο οποίος παρέχει τις απαραίτητες οδηγίες για την κατασκευή/παραγωγή προϊόντων. Ο τεχνολογικός προγραμματισμός προϋποθέτει γνώσεις των δυνατοτήτων των διεργασιών και των μηχανών που τις εκτελούν και κατά συνέπεια, αποτελεί την γέφυρα μεταξύ του μηχανολογικού σχεδιασμού και της παραγωγικής διαδικασίας.

Το κεφάλαιο 5 ασχολείται με τον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό των συστημάτων παραγωγής (design and planning of a manufacturing system), που αναφέρεται στην επιλογή διεργασιών, μηχανών και της συνολικής διάταξης ενός συστήματος παραγωγής. Υπό μια έννοια, το αντικείμενο του σχεδιασμού ενός συστήματος παραγωγής είναι ο προσδιορισμός της ροής υλικού και πληροφορίας, τα οποία τελικά υπαγορεύουν την αρχιτεκτονική του συστήματος παραγωγής.

Από πρακτική άποψη, ο σχεδιασμός ενός συστήματος παραγωγής είναι συνυφασμένος με την λειτουργία του. Για τον σχεδιασμό ενός συστήματος, απαιτούνται κάποιες αρχικές παραδοχές σχετικά με την λειτουργία του, ενώ η τελευταία εξαρτάται κατά πολύ από τον σχεδιασμό του. Από ακαδημαϊκή άποψη, πάντως, είναι χρήσιμος ο διαχωρισμός των θεμάτων σχεδιασμού και λειτουργίας, ώστε να γίνει δυνατή η συστηματική προσέγγιση των συστημάτων παραγωγής. Με την λογική αυτή το Κεφάλαιο 6, ασχολείται με την λειτουργία και τον χρονοπρογραμματισμό (scheduling) των συστημάτων παραγωγής, λαμβάνοντας υπ' όψη ότι, όσον αφορά την λειτουργία και τον χρονοπρογραμματισμό των συστημάτων παραγωγής, υπάρχει πληθώρα ακαδημαϊκής βιβλιογραφίας, η οποία λόγω κυρίως της θεωρητικής αντιμετώπισης των θεμάτων, έχει μέχρι τώρα σχετικά μικρή επίδραση στην βιομηχανική πρακτική. Στο κεφάλαιο 6 επιχειρείται ένας «συμβιβασμός» μεταξύ θεωρίας και πράξης

στην συζήτηση των θεμάτων αυτών, όπως εξ' άλλου επιχειρείται και σ' ολόκληρο το βιβλίο.

1.2 Σύντομη οικονομική ανασκόπηση (Economic Perspective)

Η βιομηχανική παραγωγή, η οποία μπορεί να ορισθεί ως ο μετασχηματισμός πρώτων υλών και πληροφορίας σε αγαθά, αποτελεί μια από τις βασικές παραγωγικές δραστηριότητες κάθε έθνους. Η παραγωγικότητα ενός έθνους, μετρούμενη ως το ακαθάριστο εθνικό προϊόν ανά εργαζόμενο, αποτελεί μια σχετική ένδειξη όχι μόνο του συνόλου της οικονομικής δραστηριότητας ενός έθνους αλλά και της αποτελεσματικότητας της βιομηχανίας του στον βαθμό, που η βιομηχανική παραγωγή συμμετέχει σημαντικά στην διαμόρφωση του εθνικού προϊόντος (Σχ. 1.1). Είναι προφανές βέβαια, ότι στοιχεία για την παραγωγικότητα –επειδή συμπεριλαμβάνουν και τομείς της οικονομίας όπως της παροχής υπηρεσιών και της γεωργίας– δεν αντανακλούν αποκλειστικά την βιομηχανική παραγωγή. Μια άλλη σχετική ένδειξη για την οικονομική ευρωστία ενός έθνους είναι η «αύξηση της παραγωγικότητας» –δείκτης, ο οποίος ορίζεται ως η αύξηση του ακαθαρίστου εθνικού προϊόντος (Α.Ε.Π) ανά μονάδα χρόνου εργασίας (Σχ.1.2). Γενικά, χώρες με σχετικά χαμηλή παραγωγικότητα έχουν υψηλή αύξηση παραγωγικότητας. Όταν, όμως, φθάσουν σ' ένα σχετικά υψηλό επίπεδο παραγωγικότητας, τότε είναι σχετικά δύσκολη η περαιτέρω αύξηση της παραγωγικότητάς τους, επειδή η τελευταία εξαρτάται κυρίως από την καινοτομία, τον εκσυγχρονισμό και την υιοθέτηση νέας τεχνολογίας. Γι' αυτό είναι γενικά αποδεκτό, ότι η έρευνα και η τεχνολογική ανάπτυξη αποτελούν σημαντικούς παράγοντες με μακροπρόθεσμη επίδραση στην αύξηση της παραγωγικότητας.

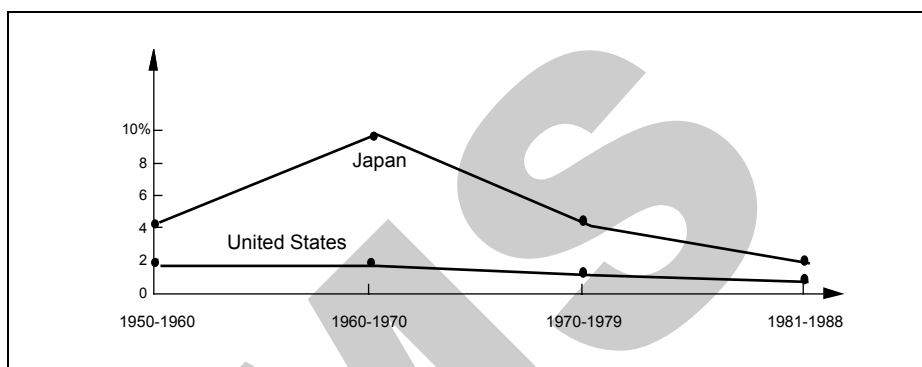


United States = Ηνωμένες Πολιτείες
W. Germany = Δ. Γερμανία

Japan = Ιαπωνία

Σχήμα 1.1 Σύγκριση Παραγωγικότητας Βιομηχανικά Αναπτυγμένων Χωρών
(Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν ανά Εργαζόμενο για το έτος 1988 σε Δολάρια)

Τα βιομηχανικώς αναπτυγμένα έθνη, διαθέτουν ένα σημαντικό μέρος των εσόδων τους. (Σχ. 1.3 και Σχ 1.4) στην έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη. Ας σημειωθεί εδώ, ότι σημασία δεν έχουν μόνο τα δαπανούμενα ποσά αλλά επίσης και ο αριθμός των απασχολουμένων ατόμων στην έρευνα και στην τεχνολογική ανάπτυξη (Σχ. 1.5). Η διεθνής θέση και κατάσταση του βιομηχανικού δυναμικού ενός έθνους, είναι δυνατόν να αξιολογηθεί, εξετάζοντας επίσης τον λόγο εξαγωγών–εισαγωγών για το συγκεκριμένο έθνος (Σχ. 1.6). Εδώ θα πρέπει να προστεθεί, ότι οι βιομηχανικές μονάδες είναι συστήματα παραγωγής κατά κανόνα «ανοικτά», δηλαδή η λειτουργία τους επηρεάζεται και από παράγοντες εξωγενείς πέραν των ορίων ελέγχου της διοίκησης της επιχείρησης. Εξ αιτίας, π.χ της κεφαλαιοεντατικής φύσης τους, οι παραγωγικές βιομηχανίες εξαρτώνται και από τις διεθνείς οικονομικές εξελίξεις, καθώς επίσης και από την εγχώρια αποταμιευτική συμπεριφορά (Σχ. 1.7).



United States= Ηνωμένες Πολιτείες

Japan = Ιαπωνία

Σχήμα 1.2 *Αύξηση Παραγωγικότητας Εκφρασμένη ως Αύξηση του ΑΕΠ ανά Ώρα Εργασίας*

Industry	United States	Japan	West Germany
Aircraft	2.89	0.11	0.86
Computers/business machines	1.05	6.49	0.85
Communications equipment	0.65	8.37	1.19
Scientific instruments	0.63	5.95	1.43
Drugs	1.20	0.29	1.73
Electricity transmission equipment	0.92	4.40	2.02

Source: O.E.C.D.
1988

Industry = Βιομηχανία

Aircraft = Αεροπορική

Computers/business machines = Ηλεκτρονικοί

Υπολογιστές & εξοπλισμός Επιχειρήσεων

Communications equipment =

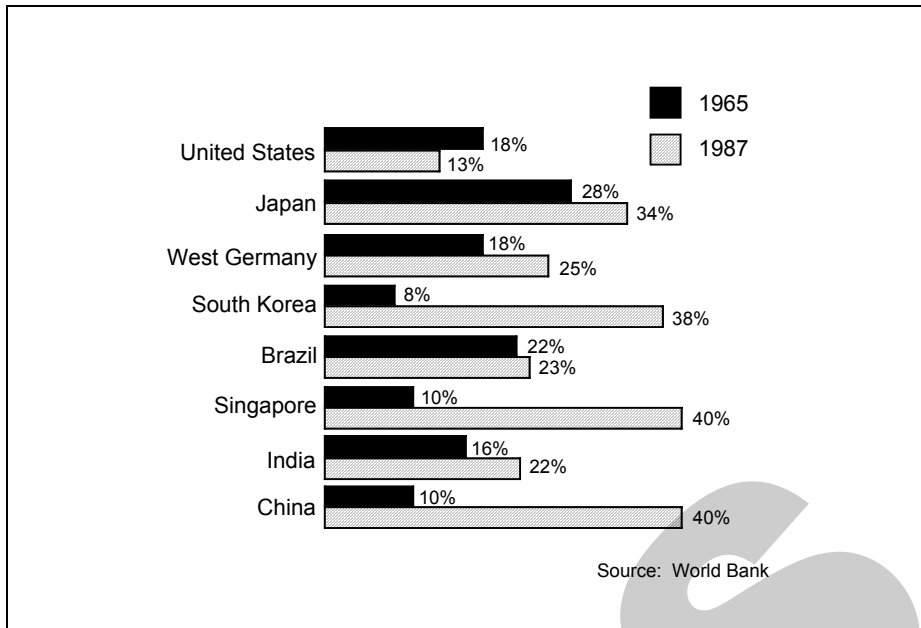
Τηλεπικοινωνιακός Εξοπλισμός

Scientific instruments = Επιστημονικά όργανα

Drugs = Φάρμακα

Electricity transmission equipment = Εξοπλισμός μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

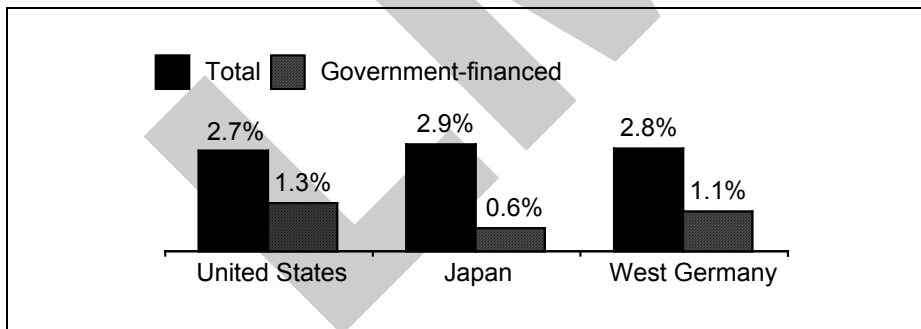
Σχήμα 1.3 *Λόγος Εξαγωγών/Εισαγωγών για Μερικές Βιομηχανικά Αναπτυγμένες Χώρες*



United States = Ηνωμένες Πολιτείες
 Japan = Ιαπωνία
 W. Germany = Δ. Γερμανία
 S. Korea = Ν. Κορέα

Brazil = Βραζιλία
 Singapore = Σιγκαπούρη
 India = Ινδία
 China = Κίνα

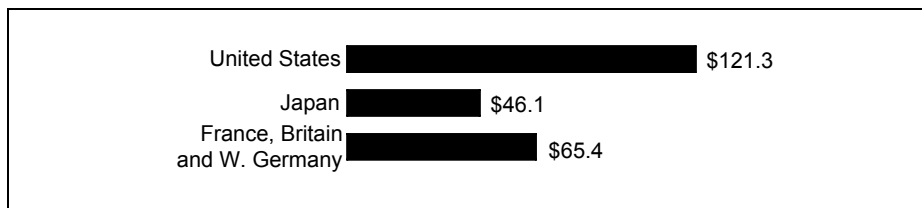
Σχήμα 1.4 Αποταμιεύσεις ως Ποσοστό του ΑΕΠ



Total = Σύνολο
 Government-financed = Κρατική χρηματοδότηση
 United States = Ηνωμένες Πολιτείες

Japan = Ιαπωνία
 W. Germany = Δ. Γερμανία

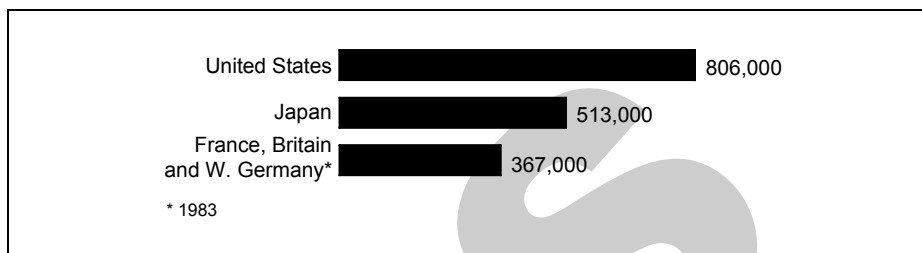
Σχήμα 1.5 Δαπάνες για Έρευνα και Ανάπτυξη ως Ποσοστό του ΑΕΠ



United States = Ηνωμένες Πολιτείες
Japan = Ιαπωνία
France = Γαλλία

Britain = Βρετανία
W. Germany = Δ. Γερμανία

Σχήμα 1.6 Δαπάνες για Έρευνα και Ανάπτυξη σε Εκατομμύρια Δολάρια (1987)



United States = Ηνωμένες Πολιτείες
Japan = Ιαπωνία
France = Γαλλία

Britain = Βρετανία
W. Germany = Δ. Γερμανία

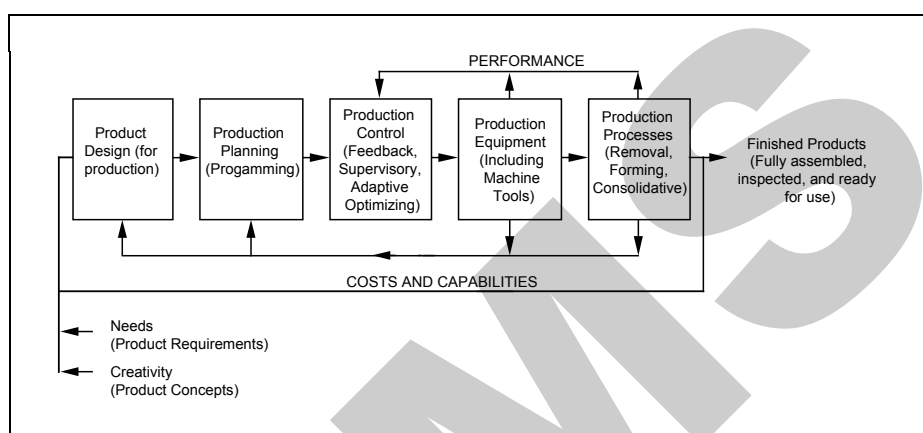
Σχήμα 1.7 Αριθμός Επιστημόνων και Μηχανικών που Ασχολούνται με Έρευνα και Ανάπτυξη (1987)

Τα παραπάνω στοιχεία οδηγούν εκτός των άλλων και στο συμπέρασμα, ότι η βιομηχανική παραγωγή παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην οικονομική ζωή μιας χώρας. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την παγκόσμια αναζήτηση υψηλότερου βιοτικού επιπέδου, πιέζει για γρήγορη αύξηση της παραγωγικότητας στα συστήματα παραγωγής, η οποία αναμφισβήτητα θα οδηγήσει στην ανάπτυξη νέας και καλύτερης παραγωγικής/κατασκευαστικής τεχνολογίας. Συνεπώς, η μελέτη θεμάτων σχετικών με τα συστήματα παραγωγής αποκτά αξιόλογη σημασία και σπουδαιότητα στο βιομηχανικό, αλλά και στο ακαδημαϊκό περιβάλλον.

1.3 Μεθοδολογία-πλαίσιο λήψεως αποφάσεων σε συστήματα παραγωγής (A Decision Making Framework for Manufacturing Systems)

Η παραγωγή μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύστημα (Σχ. 1.8), στο οποίο ο

σχεδιασμός του προϊόντος [1] είναι η «είσοδος» (input) και τα τελικά προϊόντα είναι η «έξοδος» (output) του συστήματος. Η μελέτη των συστημάτων παραγωγής απαιτεί τον συνδυασμό πολλών ειδικοτήτων, που προέρχονται τόσο από τις επιστήμες του μηχανικού, όσο και από την διοίκηση των επιχειρήσεων. Γι αυτό και επιβάλλεται κάποια διαίρεση του όλου πεδίου των συστημάτων παραγωγής, που να επιτρέπει την επιστημονική προσέγγιση των προβλημάτων που συναντώνται. Η βιομηχανική παραγωγή, λοιπόν, μπορεί να υποδιαιρεθεί στις *παραγωγικές διεργασίες* –που μεταβάλλουν την μορφή, το σχήμα ή τις φυσικές ιδιότητες των υλικών– στον *μηχανολογικό/ηλεκτρολογικό/ηλεκτρονικό εξοπλισμό* και στις *εργαλειομηχανές* –που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των παραγωγικών διεργασιών– και στα *συστήματα παραγωγής* –που είναι συνδυασμοί παραγωγικού εξοπλισμού και ανθρώπων, συνδεδεμένων με μια κοινή ροή υλικών και πληροφορίας.



Product Design (for Production) = Σχεδιασμός Προϊόντος (για Παραγωγή)
 Production Planning (Programming) = Προγραμματισμός Παραγωγής
 Production Control = Έλεγχος Παραγωγής
 Feedback = Ανάδραση
 Supervisory = Επίβλεψη
 Adaptive = Προσαρμοστική
 Optimizing = Βελτιστοποίηση
 Production Processes = Παραγωγικές Διεργασίες
 Removal = αφαίρεση
 Forming = Σχηματισμός

Consolidative = Συμπυκνωτικά
 Finished Products = Τελικά Προϊόντα
 Fully assembled = Πλήρως συναρμολογημένα
 Inspected and ready for use = Επιθεωρημένα και έτοιμα προς χρήση
 Costs And Capabilities = Κόστος και Δυνατότητες
 Product Requirements = Απαιτήσεις Προϊόντος
 Needs = Ανάγκες
 Creativity = Εφευρηματικότητα
 Product Concepts = Αρχικός Σχεδιασμός Προϊόντος

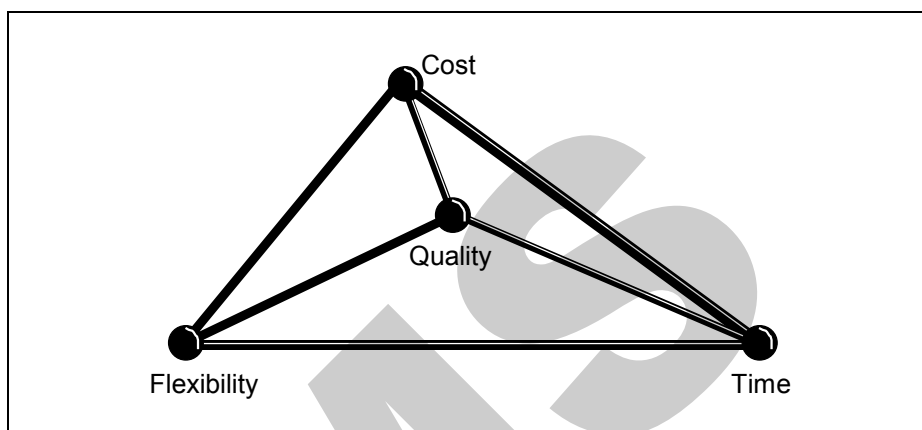
Σχήμα 1.8 Η Παραγωγική Διαδικασία σαν Ένα Σύστημα

Η σύνδεση που υπάρχει ανάμεσα στον σχεδιασμό και την παραγωγή πρέπει επίσης να ληφθεί υπ' όψη, καθώς το αρχικό στάδιο παραγωγής είναι πάντα ο σχεδιασμός του προϊόντος, που γίνεται με την βοήθεια είτε ενός σχεδίου είτε ενός αρχείου CAD ή με άλλη μέθοδο προσδιορισμού των γνωρισμάτων και

των χαρακτηριστικών του έτοιμου ή ημιέτοιμου προϊόντος που πρόκειται να παραχθεί.

Οι αποφάσεις, που αφορούν τον σχεδιασμό και την λειτουργία των συστημάτων παραγωγής, απαιτούν πλήρη τεχνική κατάρτιση και προηγούμενη εμπειρία καθώς και την ικανοποίηση συγκεκριμένων οικονομικών στόχων. Έτσι ο συνδυασμός τεχνικών και οικονομικών/διοικητικών γνώσεων είναι απαραίτητος για την δημιουργία ενός πλαισίου λήψης αποφάσεων στην παραγωγή.

Υπάρχουν τέσσερις γενικές ιδιότητες (*attributes*), που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη στην διαδικασία λήψης αποφάσεων: *κόστος, χρόνος, ποιότητα, και ευελιξία* (Σχ 1.9).



Cost = Κόστος
Quality = Ποιότητα

Flexibility = Ευελιξία
Time = Χρόνος

Σχήμα 1.9 Το Τετράεδρο Παραγωγής

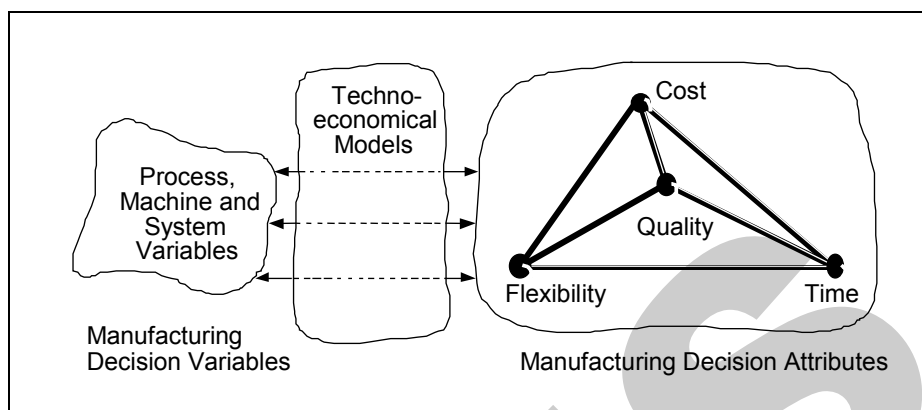
Οι κατηγορίες αυτές προσδιορίζονται σε κάθε πρόβλημα ξεχωριστά, ανάλογα με τους ιδιαίτερους σκοπούς, στόχους και κριτήρια.

Ο σκοπός (*objective*) είναι ένα χαρακτηριστικό, που μπορεί να ελαχιστοποιείται ή να μεγιστοποιείται. Ο στόχος (*goal*) είναι μια συγκεκριμένη τιμή ή μια σειρά τιμών για ένα χαρακτηριστικό και κριτήριο (*criterion*) είναι μια ιδιότητα, που εκτιμάται κατά την διαδικασία λήψης μιας απόφασης.

Ένας συγκεκριμένος σκοπός ως προς το κόστος μπορεί να είναι ελαχιστοποίηση του κόστους ανά κομμάτι. Επίσης ένας σκοπός ως προς την ποιότητα μπορεί να είναι ελαχιστοποίηση της απόκλισης μιας διάστασης ενός κομματιού από την προδιαγραφόμενη. Ένας στόχος ως προς τον χρόνο μπορεί να είναι «να παράγει το σύστημα όχι λιγότερα από 120 και όχι περισσότερα από 123 κομμάτια την ώρα». Τέλος ένα κριτήριο ευελιξίας, που λαμβάνεται υπ' όψη κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος παραγωγής, είναι η ευκολία με την οποία το σύστημα μπορεί να αναδιατάσσεται για την παραγωγή ενός νέου είδους κομματιού. Σε μια διαδικασία λήψης αποφάσεων δεν παίζουν ρόλο όλες

οι παραγωγικές ιδιότητες και όπως φαίνεται από το παράδειγμα κάθε κατηγορία ιδιοτήτων παίρνει διαφορετική μορφή μέσα στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Μια απόφαση στον χώρο της παραγωγής σημαίνει ουσιαστικά την επιλογή τιμών συγκεκριμένων μεταβλητών απόφασης, που αφορούν τον σχεδιασμό ή την λειτουργία μιας παραγωγικής διεργασίας, μιας εργαλειομηχανής ή και ενός ολόκληρου συστήματος παραγωγής (Σχ. 1.10).



Process Machines and System Variables=
Μεταβλητές Διεργασιών, Μηχανών και
Συστήματος
Techno-economical=Τεχνοοικονομικά
Models =Μοντέλα
Cost = Κόστος
Quality = Ποιότητα

Flexibility = Ευελιξία
Time = Χρόνος
Manufacturing Decision Variables= Μεταβλητές
Αποφάσεων Παραγωγής
Manufacturing Decision Attributes=
Ιδιότητες/Κριτήρια Αποφάσεων Παραγωγής

Σχήμα 1.10 Αντιστοίχιση των Ιδιοτήτων του Συστήματος Παραγωγής με τις Μεταβλητές της Διαδικασίας Λήψης Αποφάσεων

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων βασίζεται σε προκαθορισμένες απαιτήσεις, που εκφράζονται με τις τιμές των σχετικών ιδιοτήτων (attributes). Επομένως, η διαδικασία λήψης αποφάσεων μπορεί να θεωρηθεί ως η προσπάθεια αντιστοίχισης των επιθυμητών τιμών των ιδιοτήτων με τις τιμές των μεταβλητών απόφασης. Για να είναι η αντιστοίχιση αυτή, η επιστημονικά θεμελιωμένη, θα πρέπει να βασίζεται σε επιστημονικά προσδιοριζόμενα τεχνοοικονομικά μοντέλα. Αυτή η αντιστοίχιση (mapping) ουσιαστικά αποτελεί μια διαδικασία μοντελοποίησης, όπου οι ιδιότητες (attributes) συσχετίζονται με τα επίπεδα των διαφορετικών μεταβλητών απόφασης (decision variables).

Η διάταξη των ιδιοτήτων σε τετράεδρο σχήμα, τονίζει την αλληλοσυσχέτισή τους. Δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του κόστους, του χρόνου, της ευελιξίας και της ποιότητας. Η τελική απόφαση επηρεάζεται και από τις τέσσερις βασικές ιδιότητες καθώς και από τις μεταξύ τους σχέσεις. Ο προσδιορισμός της σχέσης αυτής γίνεται με την ποσοτική εκτίμηση των ιδιο-

τήτων αυτών: όσο περισσότερο προσδιορισμένες είναι αυτές ποσοτικά, τόσο πιο εύκολο είναι να βρούμε τις σχέσεις τους και να πάρουμε τις κατάλληλες αποφάσεις. Στην βιομηχανία σήμερα, η πλειοψηφία των ποσοτικών εκτιμήσεων της παραγωγής αναφέρεται σε μεγέθη που σχετίζονται με το *κόστος* και τον *χρόνο*. Στις Η.Π.Α δόθηκε έμφαση στο *κόστος* και τον *χρόνο* (ή *ρυθμό παραγωγής*) με την ευρεία διάδοση συστημάτων μαζικής παραγωγής κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1960. Γι' αυτό η σχέση *κόστους* και *ρυθμού παραγωγής* έχει μελετηθεί αρκετά. Στην δεκαετία του '70 με την είσοδο της Ιαπωνίας και της Γερμανίας στην παγκόσμια αγορά, η *ποιότητα* του προϊόντος έγινε σημαντικό χαρακτηριστικό ανταγωνισμού και οι προβλέψεις δείχνουν, ότι από την δεκαετία του 90 και μετά η *ευελιξία* θα γίνει το μεγαλύτερο όπλο ανταγωνισμού στην βιομηχανική παραγωγή. Έτσι, παρόλο που οι ιδιότητες *κόστος* και *χρόνος* παραμένουν ιδιαίτερα σημαντικές για τη λήψη οποιασδήποτε απόφασης στην παραγωγή, θα πρέπει να δίδεται έμφαση στην εξεύρεση ποσοτικών ορισμών για την *ποιότητα* και την *ευελιξία*, έτσι ώστε να καθορίζονται οι κατάλληλες σχέσεις μεταξύ των τεσσάρων κατηγοριών των ιδιοτήτων και να επιτυγχάνονται αποτελεσματικές λύσεις των προβλημάτων παραγωγής.

Στις επόμενες ενότητες θα συζητηθούν περιληπτικά οι τέσσερις κατηγορίες ιδιοτήτων με την βοήθεια μερικών απλών παραδειγμάτων.

1.3.1 Κόστος (Cost)

Το κόστος παραγωγής περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες.

- *Εξοπλισμός (Equipment and facility costs)*. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει το κόστος του απαραίτητου για την λειτουργία των παραγωγικών διεργασιών εξοπλισμού, των εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για την στέγαση του εξοπλισμού, την υποδομή του εργοστασίου κ.λ.π.
- *Υλικά (Materials)*. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει το κόστος των πρώτων υλών για την παραγωγή ενός προϊόντος, των εργαλείων και των βοηθητικών υλικών του συστήματος, όπως είναι π.χ. τα ψυκτικά και τα λιπαντικά έλαια των μηχανών.
- *Εργασία (Labor)*. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει το κόστος της άμεσης εργασίας, που είναι απαραίτητη για την λειτουργία του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων.
- *Ενέργεια (Energy)*, που απαιτείται για την εκτέλεση των διαφορετικών διεργασιών. Σε ορισμένες βιομηχανίες το κόστος αυτό μπορεί να είναι ασήμαντο συγκρινόμενο με άλλους παράγοντες.
- *Συντήρηση, εκπαίδευση (Maintenance and training)*. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει την εργασία, τα ανταλλακτικά κ.λ.π. που χρησιμοποι-

ούνται στην συντήρηση του εξοπλισμού, και των συστημάτων καθώς και την εκπαίδευση πάνω στα νέα τεχνολογικά συστήματα.

- *Γενικά έξοδα της επιχείρησης (Overhead)*. Είναι ένα ποσοστό του κόστους που δεν μπορεί να αποδοθεί κατ' ευθείαν στην λειτουργία του συστήματος παραγωγής αλλά στηρίζει την υποδομή του.
- *Κόστος κεφαλαίου (The cost of capital)*, το οποίο μπορεί να μην είναι άμεσα διαθέσιμο εντός της επιχείρησης και γι' αυτό τον λόγο θα πρέπει να γίνεται δανεισμός του κάτω από συγκεκριμένους όρους.

Η παραπάνω ταξινόμηση αποτελεί ένα γενικό πλαίσιο, σύμφωνα με το οποίο ζητήματα κόστους μπορούν να αντιμετωπισθούν στο παραγωγικό περιβάλλον, με την υιοθέτηση ενός συστηματικού τρόπου υπολογισμού του κόστους υλοποίησης των διαφορετικών λύσεων.

Παράδειγμα

Για να διευκρινίσουμε την έννοια ενός «τεχνοοικονομικού» μοντέλου και την συσχέτιση του με τις ιδιότητες παραγωγής (manufacturing attributes), θεωρούμε την παρακάτω σχέση, η οποία περιγράφει το κόστος μιας διεργασίας παραγωγής (στο συγκεκριμένο παράδειγμα τórνευσης) ενός κυλινδρικού εξαρτήματος [2].

$$\text{Cost per Workpiece} = \left[\frac{\text{Machine Rate} + \text{Labor Rate} + \text{Overhead Rate}}{\text{Operating Time per Workpiece}} \right] \times \left[\text{Feeding Time} + \text{Rapid Feeding Time} + \frac{\text{Portion of tool insert replacement time per workpiece}}{\text{No. of workpieces bet. tool insert changes}} \right] + \left[\frac{1}{\text{No. of workpieces bet. tool insert changes}} \times \text{Cost per tool insert} \right]$$

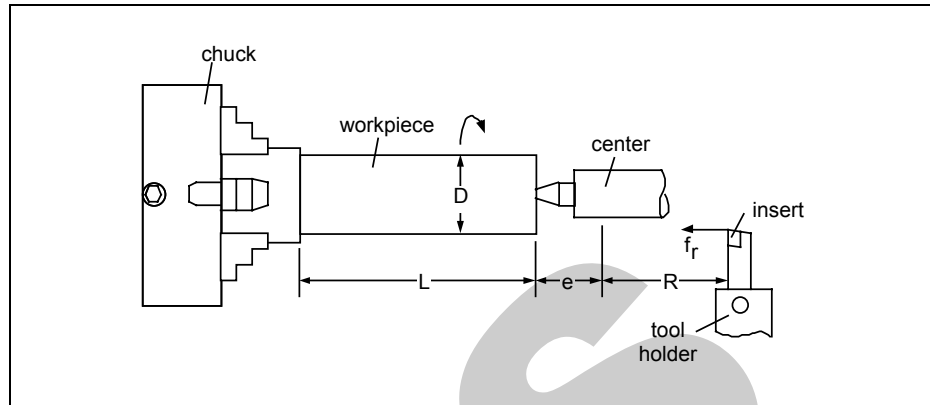
Cost per Workpiece = Κόστος ανά καταγεραζόμενο κομμάτι
 Machine Rate = Ρυθμός εργαλειομηχανής
 Labor Rate = Ρυθμός εργατών
 Overhead Rate = Ρυθμός γενικών εξόδων
 Feeding Time = Χρόνος τροφοδοσίας
 Rapid Feeding Time = Χρόνος ταχυτροφοδοσίας
 Portion of tool insert replacement time per workpiece = Μερίδιο του χρόνου αντικατάστασης

κοπτικού ανά καταγεραζόμενο κομμάτι
 Operating time per Workpiece = Χρόνος λειτουργίας ανά καταγεραζόμενο κομμάτι
 No. of workpieces bet. (between) tool insert changes = Αριθμός καταγεραζόμενων κομματιών μεταξύ δύο αλλαγών κοπτικού
 Cost per tool insert = Κόστος ανά κοπτικό εργαλείο

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στο κόστος ανά καταγεραζόμενο κομμάτι/εξάρτημα είναι οι μηχανές, η εργασία και τα γενικά έξοδα της επιχείρησης. Η συμβολή αυτών των παραγόντων είναι ανάλογη του χρόνου λειτουργίας, που αποτελείται από τον χρόνο κοπής υλικού, τον χρόνο γρήγορης κίνησης του εργαλείου και τον χρόνο αντικατάστασης του εργαλείου (Σχ 1.11).

Το εργαλείο είναι ένα αντικαθιστούμενο πλακίδιο, που το κόστος του είναι ένας τέταρτος παράγοντας που συμβάλλει στο κόστος ανά καταγεραζόμενο κομμάτι.

Το συγκεκριμένο «τεχνοοικονομικό μοντέλο» χρησιμοποιεί την μηχανική της κοπής και την γεωμετρία της διεργασίας τórνευσης. Υλικό αφαιρείται από το προς κατεργασία κομμάτι, το οποίο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα συμμετρίας του. Η αφαίρεση υλικού γίνεται από το κοπτικό εργαλείο, που μετακινείται κατά μήκος της αξονικής και ακτινικής διεύθυνσης του κατεργαζόμενου κομματιού.



Chuck= Συγκρατητής Εξαρτήματος (Τσοκ)
Workpiece= Εξάρτημα προς κατεργασία
Models =Μοντέλα

Center= Κέντρο
Insert= Κοπτικό
Tool holder= Συγκράτηση κοπτικού

Σχήμα 1.11 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κατεργασίας Τórνευσης

Οι μεταβλητές απόφασης της διαδικασίας είναι δύο τυπικοί παράμετροι της κατεργασίας: η πρόωση f_r [mm/rev], που συνήθως εκφράζεται ως μήκος ανά περιστροφή και η ταχύτητα κοπής v [m/min]. Αυτές οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνονται υπ' όψη στην ιδιότητα παραγωγής κόστος, η οποία εκφράζεται σε [\$/piece] σύμφωνα με το τεχνοοικονομικό μοντέλο που ακολουθεί:

$$C = M[T_F + T_{RF} + T_{IR}] + \frac{1}{N_{IR}}[C_1]$$

Όπου:

$$T_F = \frac{D(L+e)}{318f_r v},$$

$$T_{RF} = \frac{R}{r},$$

$$T_{IR} = \frac{DL_{td}}{318f_r v T},$$

$$\frac{1}{N_{IR}} = \frac{DL}{318f_r v T}$$

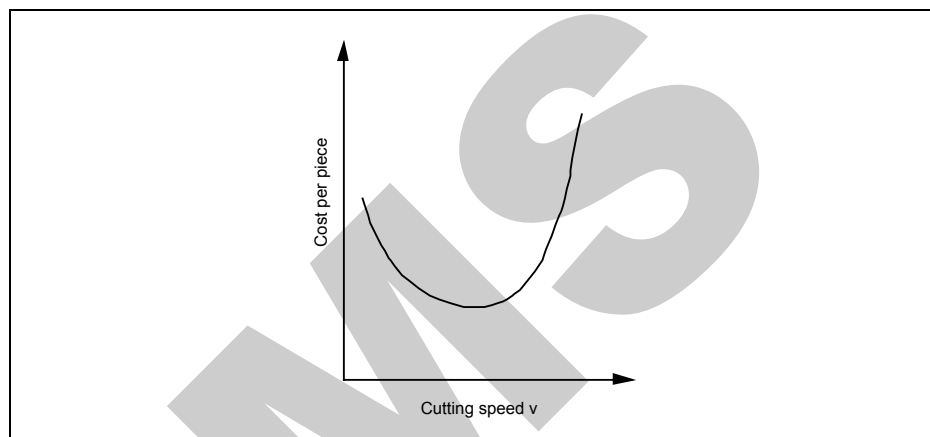
Η σημασία του κάθε όρου είναι:

C	Κόστος τόννευσης ενός κατεργαζόμενου κομματιού [\\$]
f_r	Πρόωση ανά περιστροφή [mm/περιστροφή]
v	Ταχύτητα κοπής [m/min].
M	Μηχανή + εργασία + γενικά έξοδα (κόστος) του τόννου [\$/min]
T_F	Χρόνος πρόωσης ανά κατεργαζόμενο κομμάτι [min].
T_{RF}	Χρόνος ταχείας πρόωσης ανά κατεργαζόμενο κομμάτι [min].
T_{IR}	Χρόνος αντικατάστασης πλακιδίου (στο εργαλείο) ανά κατεργαζόμενο κομμάτι υπό την προϋπόθεση, ότι ο χρόνος αντικατάστασης μοιράζεται εξ ίσου στα κατεργαζόμενα κομμάτια [min]
N_{IR}	Αριθμός των κατεργαζόμενων κομματιών ανάμεσα σε διαδοχικές αντικαταστάσεις πλακιδίου
C_1	Κόστος πλακιδίου κοπής [\\$]
D	Διάμετρος του κατεργαζόμενου κομματιού [mm]
L	Μήκος των κατεργαζόμενων κομματιών [mm]
e	Επιπλέον μήκος μεταφοράς εργαλείου με πρόωση f_r [mm]
R	Συνολική εγκάρσια απόσταση ταχυσκίνησης εργαλείου ανά κομμάτι [mm]
r	Ταχύτητα εγκάρσιας ταχυσκίνησης [mm/min]
t_d	Χρόνος αντικατάστασης πλακιδίου στο εργαλείο [min]
T	Χρόνος ζωής εργαλείου [min]

Με δεδομένα: το κατεργαζόμενο κομμάτι, το πλακίδιο του εργαλείου και την πρόωση, το κόστος [\$/piece] της τόννευσης, αλλά και άλλων μηχανουργικών κατεργασιών είναι ουσιαστικά μια συνάρτηση [2] της ταχύτητας κοπής v (Σχ. 1.12). Καθώς η ταχύτητα κοπής αυξάνεται, ο ρυθμός αφαίρεσης του υλικού αυξάνεται και το κόστος της μηχανουργικής κατεργασίας (τόννευσης) μειώνεται, αφού γίνεται δυνατή η παραγωγή περισσότερων κομματιών στην μονάδα του χρόνου. Ωστόσο το κόστος της μηχανουργικής κατεργασίας εξαρτάται και από την φθορά του εργαλείου. Τα πλακίδια του εργαλείου θα πρέπει να αντικαθίστανται περιοδικά, δημιουργώντας ένα επιπλέον κόστος από την αγορά νέων πλακιδίων και την απώλεια χρόνου για την εισαγωγή των νέων πλακιδίων στον εργαλειοφορέα. Η φθορά του εργαλείου είναι συνάρτηση του χρόνου και της ταχύτητας κοπής (Σχ. 1.13) και ως εκ τούτου είναι αντικείμενο επιστημονικοτεχνικής ανάλυσης, τα αποτελέσματα της οποίας εισέρχονται σ' ένα τεχνοοικονομικό μοντέλο (Σχ. 1.12). Το θέμα εδώ είναι, ότι το κόστος τόννευσης ή γενικότερα το κόστος μιας μηχανουργικής κατεργασίας είναι μια οικονομική ιδιότητα της παραγωγής (*manufacturing attribute*), της οποίας όμως η ακριβής εκτίμηση απαιτεί την επιστημονικοτεχνική ανάλυση ενός τεχνικού προβλήματος, όπως αυτό της φθοράς. Είναι ακριβώς ο τρόπος φθοράς του εργαλείου που καθορίζει το σχήμα της καμπύλης του κόστους (Σχ. 1.12). Καθώς η ταχύτητα κοπής αυξάνεται πέραν ενός σημείου, η φθορά του εργαλείου

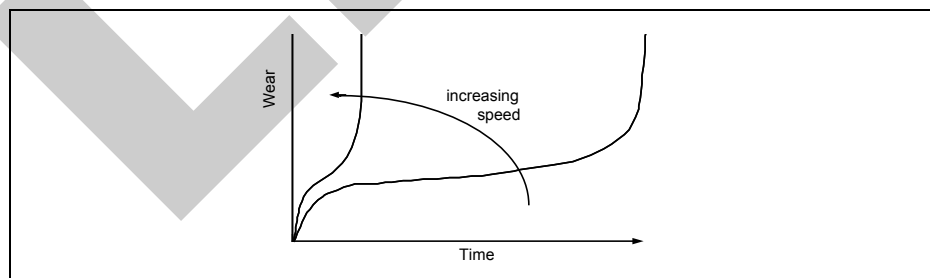
αυξάνεται δραστικά και οδηγεί σε συχνότερες αντικαταστάσεις του εργαλείου και σε μεγαλύτερο κόστος εργαλείου. Επομένως, το κόστος ανά κομμάτι αυξάνεται από μια ταχύτητα και μετά, εξ αιτίας της «αλματώδους» φθοράς του εργαλείου.

Το προηγούμενο παράδειγμα δείχνει, πως προκειμένου να χειρισθούμε προβλήματα παραγωγής και να πάρουμε τις κατάλληλες αποφάσεις, θα πρέπει να τα μελετήσουμε από τεχνικής, οικονομικής και γενικότερα επιχειρησιακής άποψης ταυτόχρονα. Η φθορά του εργαλείου είναι ένα καθαρά τεχνικό ζήτημα, που απαιτεί επιστημονική ανάλυση και τεχνική καινοτομία, που μπορεί ωστόσο να αποδειχθούν ατελέσφορες αν δεν πραγματοποιηθούν υπό το πρίσμα ενός επιχειρηματικού σκοπού, όπως η μείωση του κόστους. Κατά τον ίδιο τρόπο ο υπολογισμός του κόστους μιας παραγωγικής διεργασίας, χωρίς τις κατάλληλες τεχνικές γνώσεις και αντίληψη, είναι ανακριβής και δεν οδηγεί σε σωστές επιχειρηματικές αποφάσεις.



Cost per piece = Κόστος ανά κομμάτι / εξάρτημα Cutting speed = ταχύτητα κοπής

Σχήμα 1.12 Το Κόστος Κατεργασίας ως Συνάρτηση της Ταχύτητας Κοπής



Wear = Φθορά

Time = Χρόνος

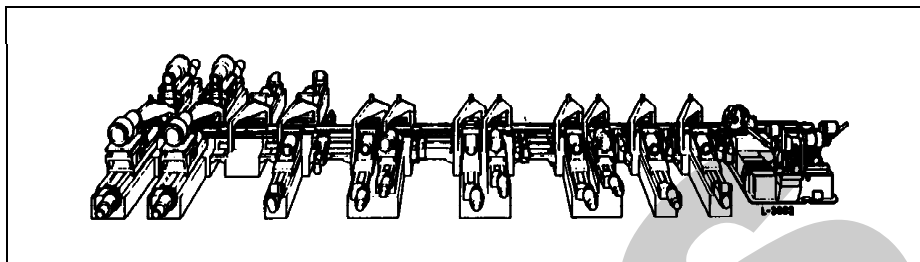
Increasing speed = Αυξανόμενη ταχύτητα

Σχήμα 1.13 Η Φθορά του Εργαλείου ως συνάρτηση του Χρόνου και της Ταχύτητας Κοπής

1.3.2 Χρόνος (Time)

Στην παραγωγή ο όρος και οι ιδιότητες του χρόνου αναφέρονται στο:

- πόσο γρήγορα ένα σύστημα παραγωγής μπορεί να ανταποκριθεί σε αλλαγές σχεδιασμού προϊόντων, ζήτησης κ.λ.π. δηλαδή στην ταχύτητα ή τον χρόνο απόκρισης του συστήματος (θα συζητηθεί αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο, στην ενότητα της ευελιξίας) και
- πόσο γρήγορα (ή σε πόσο χρόνο) ένα προϊόν μπορεί να παραχθεί από το σύστημα, δηλαδή ο ρυθμός παραγωγής του συστήματος.

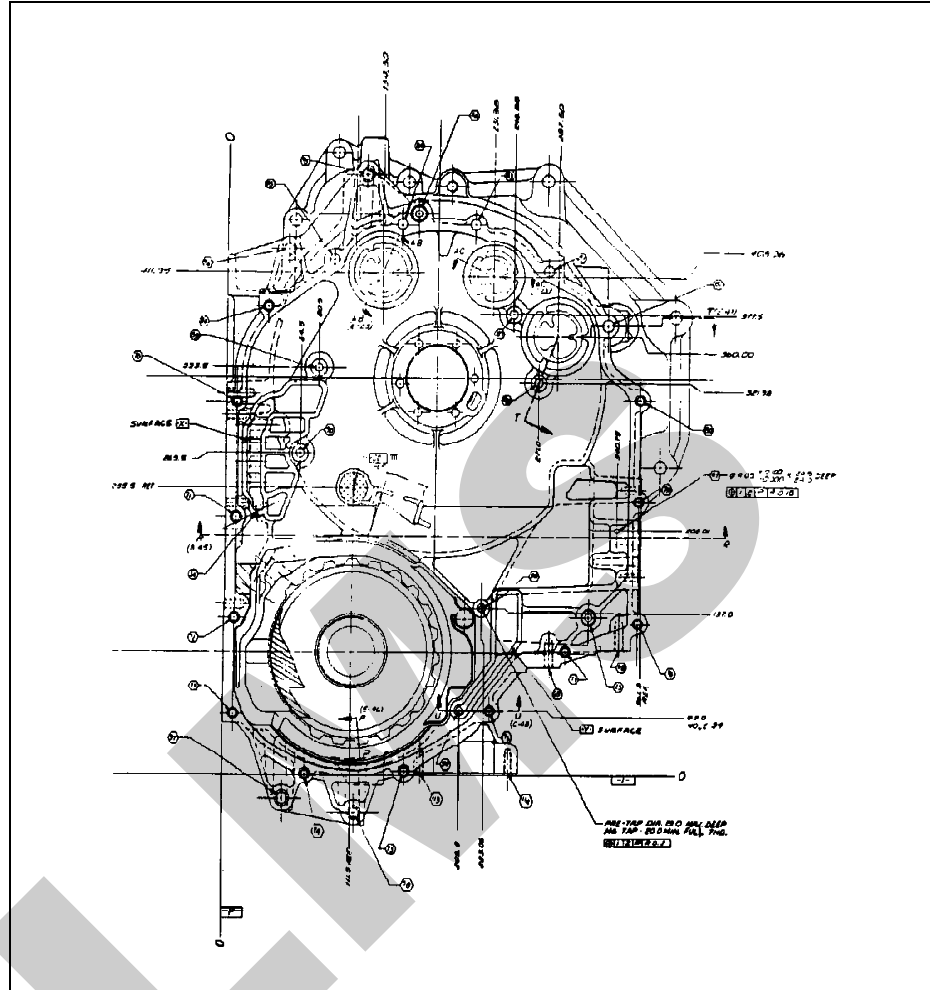


Σχήμα 1.14 Ένα Παράδειγμα Αυτοματοποιημένης Γραμμής Παραγωγής (Αυτοκινητοβιομηχανία)

Ο ρυθμός παραγωγής επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα όλες τις υπόλοιπες ιδιότητες. Υψηλότερος ρυθμός παραγωγής συνήθως, έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος αλλά πιθανόν επίσης χαμηλότερη ποιότητα. Επιπλέον πολλές φορές, για να επιτευχθεί ένας υψηλός ρυθμός παραγωγής, καταφεύγουμε σε ιδιαίτερα αυτοματοποιημένα συστήματα, που πιθανόν να επηρεάζουν αρνητικά την ευελιξία του συστήματος. Ένα παράδειγμα τέτοιου αυτοματισμού συναντάται σε μια γραμμή παραγωγής αυτοκινητοβιομηχανίας (Σχ. 1.14), η οποία λόγω της πλήρους αυτοματοποίησης της μεταφοράς του κομματιού και όλων των μηχανουργικών κατεργασιών παρέχει ρυθμούς παραγωγής της τάξεως του ενός κομματιού ανά 20 secs, ακόμη και για ιδιαίτερα πολύπλοκα κομμάτια (Σχ 1. 15). Εξ αιτίας της πλήρους αυτοματοποίησης, το σύστημα αυτό δεν είναι καθόλου ευέλικτο, αφού και μικρές αλλαγές στην γεωμετρία του υπό επεξεργασία κομματιού οδηγούν σε επώδυνες από άποψη χρόνου αλλαγές στο πολύπλοκο σύστημα αυτοματοποίησης.

Ο θεωρητικός ρυθμός παραγωγής ενός συστήματος ή κύκλος, αναφέρεται σε κομμάτια (θεωρητικά) παραγόμενα στην μονάδα του χρόνου, όταν μια μηχανή ή σύστημα λειτουργεί χωρίς διακοπές ή καθυστερήσεις. Ο ρυθμός αυτός περιορίζεται μόνο από τους φυσικούς περιορισμούς μιας διεργασίας ή από την στιβαρότητα των μηχανών. Ο πραγματικός ρυθμός παραγωγής ενός συστήματος (*system yield*) είναι ο αριθμός των πραγματικά και ποιοτικά αποδεκτών κομματιών παραγόμενων στην μονάδα του χρόνου. Στον υπολογισμό του ενσωματώνονται οι τυπικές καθυστερήσεις κατά την διάρκεια της παραγωγής

αλλά και οι απρόβλεπτες διακοπές, όπως οι βλάβες των μηχανών. Η συνολική απόδοση του συστήματος είναι ο λόγος του *πραγματικού* ρυθμού παραγωγής προς τον *θεωρητικό*, εκφραζόμενος ως ποσοστό (%) του θεωρητικού.

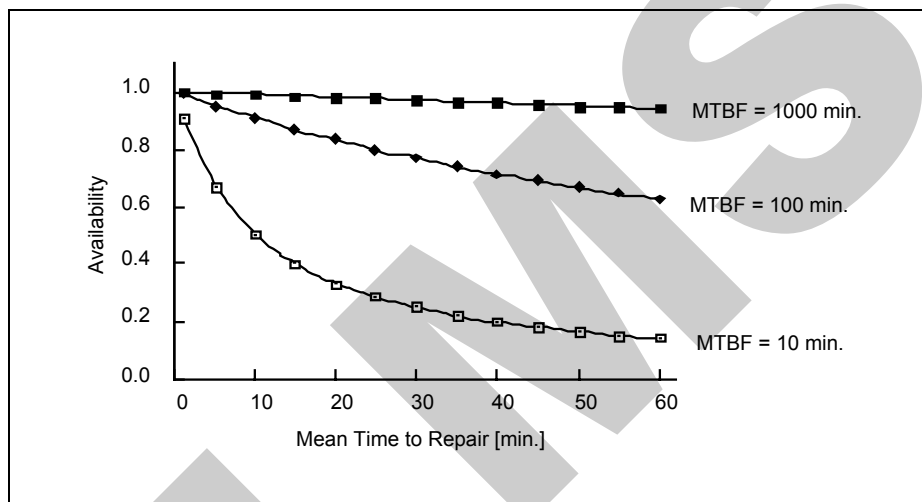


Σχήμα 1.15 Πολύπλοκο Εξάρτημα που παράγεται (με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής) από μια (πλήρως αυτοματοποιημένη) Γραμμή Παραγωγής

Οι πραγματικοί ρυθμοί παραγωγής, που μπορεί να επιτευχθούν σ' ένα σύστημα παραγωγής, επηρεάζονται σημαντικά από την αξιοπιστία του εξοπλισμού και την γενική δομή του συστήματος. Η εκτίμηση αυτών των επιρροών απαιτεί τον ορισμό κάποιων μεγεθών και όρων. Ο *ρυθμός βλαβών* (failure rate) λ ενός (μηχανικού, ηλεκτρικού ή ηλεκτρονικού) εξαρτήματος ορίζεται ως ο αριθμός των βλαβών που παρουσιάζει το συγκεκριμένο εξάρτημα σε μια προ-

καθορισμένη χρονική περίοδο. Ο αντίστροφος αριθμός του ρυθμού βλαβών λ ορίζεται ως ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (Mean Time Between Failure/MTBF). Η αξιοπιστία είναι η πιθανότητα ένα σύστημα ή ένα εξάρτημα να εκτελέσει τις απαιτούμενες από αυτό λειτουργίες υπό σταθερές συνθήκες σε μια ορισμένη περίοδο χρόνου (t) και δίδεται από την σχέση $R = e^{-\lambda t}$. Για ένα δεδομένο ρυθμό βλαβών λ , η αξιοπιστία μειώνεται όσο αυξάνεται η χρονική περίοδος. Για παράδειγμα, εάν ο ρυθμός βλαβών λ ενός δεδομένου εξαρτήματος είναι 0,0001 ανά ώρα, η αξιοπιστία του εξαρτήματος για μια περίοδο 8 ωρών είναι $R(8) = e^{-(0.0001 \cdot 8)} = 99\%$, ενώ η αξιοπιστία του για μια περίοδο 20 ωρών είναι $R(20) = e^{-(0.0001 \cdot 20)} = 90\%$. Η διαθεσιμότητα (A) ορίζεται ως το πηλίκο του μέσου χρόνου μεταξύ βλαβών (MTBF) δια του αθροίσματος του μέσου χρόνου μεταξύ βλαβών (MTBF) και του μέσου χρόνου επισκευών (Mean Time To Repair/MTTR):

$$A = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF}$$



Availability = Διαθεσιμότητα
Mean Time to Repair [min.] = Μέσος χρόνος
επισκευής σε [min.]

Mean Time Return Failure (MTBF) = Μέσος
χρόνος μεταξύ βλαβών

Σχήμα 1.16 Η Διαθεσιμότητα σαν συνάρτηση του Μέσου Χρόνου Επισκευής

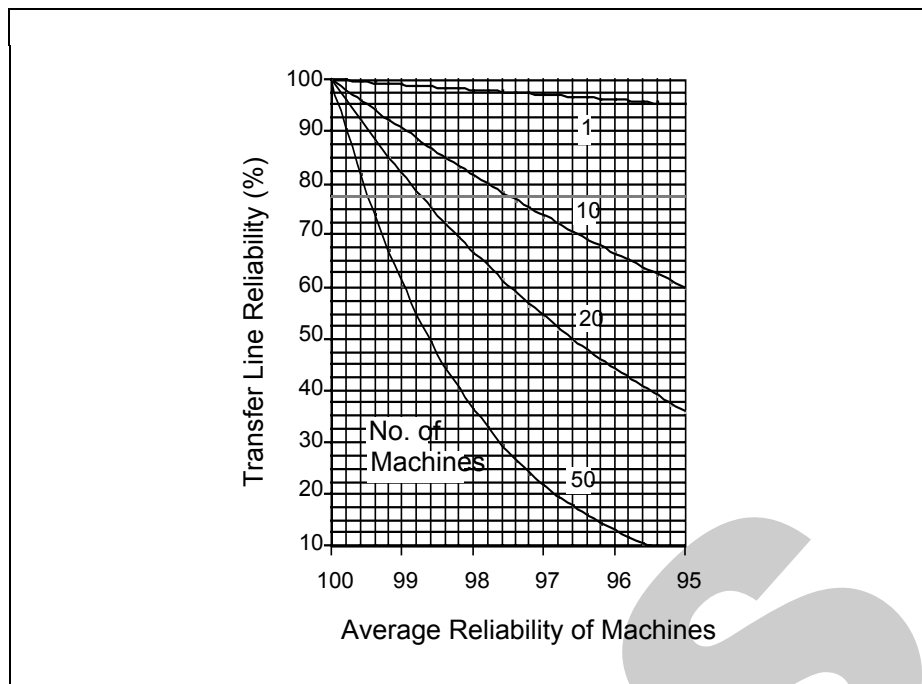
Ο πραγματικός ρυθμός παραγωγής ενός συστήματος παραγωγής δίδεται από το γινόμενο της διαθεσιμότητάς του (A) επί τον θεωρητικό ρυθμό παράγωγής (ή κύκλο) του. Η διαθεσιμότητα ενός συστήματος είναι συνάρτηση της αξιοπιστίας του (ή του αριθμού βλαβών) και του μέσου χρόνου επισκευών του συστήματος. Η αξιοπιστία του συστήματος, με την σειρά της, συναρτάται με την δομή, με την ροή των υλικών εντός του συστήματος και με την αξιοπιστία των εξαρτημάτων και των μηχανών που απαρτίζουν το σύστημα. Για παράδειγμα,

σε μια γραμμή παραγωγής, όπου η ροή των υλικών είναι σειριακή, η αξιοπιστία του συστήματος δίδεται από το γινόμενο της αξιοπιστίας των σε σειρά τοποθετημένων μηχανών: $R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$. Εάν η αξιοπιστία κάθε μηχανής R_i είναι 98%, τότε η συνολική αξιοπιστία ενός συστήματος 10 μηχανών τοποθετημένων σε σειρά σε μια γραμμή παραγωγής είναι $(0.98)^{10} = 82\%$. Προφανώς, η αξιοπιστία ενός συστήματος μπορεί να είναι πολύ διαφορετική από την αξιοπιστία ενός τμήματος (ή μιας μηχανής) του.

Η διαθεσιμότητα (A) συσχετίζεται καλύτερα με την συνολική συμπεριφορά του συστήματος σε βλάβες από ό,τι η αξιοπιστία, διότι ενσωματώνει και τον μέσο χρόνο επισκευών. Η διαθεσιμότητα ενός συστήματος (Σχ.1.16) με μεγάλο μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών (MTBF) δεν είναι ευαίσθητη στον μέσο χρόνο επισκευών (MTTR), ενώ αντίθετα η διαθεσιμότητα ενός συστήματος με μικρό μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών (MTBF) είναι πολύ ευαίσθητη στον μέσο χρόνο επισκευών (MTTR).

Παράδειγμα

Θεωρείστε μια γραμμή παραγωγής, η οποία αποτελείται από μηχανές συνδεδεμένες σε σειρά. Αυτός ο τύπος συστήματος παραγωγής χρησιμοποιείται, συνήθως, για υψηλό όγκο παραγωγής ενός συγκεκριμένου κομματιού. Δύο είναι οι παράγοντες που προσδιορίζουν τον σχεδιασμό της γραμμής παραγωγής: Ο απαιτούμενος ρυθμός παραγωγής και ο σχεδιασμός των κομματιών που θα παραχθούν. Ο σχεδιασμός του κομματιού μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα άθροισμα γεωμετρικών χαρακτηριστικών, που πρέπει να παραχθούν από τις μηχανές της γραμμής παραγωγής. Προκειμένου να τηρηθεί ο ρυθμός παραγωγής, κάθε εξάρτημα θα πρέπει να δαπανά μόνο ένα συγκεκριμένο μέγιστο χρονικό διάστημα σε κάθε μηχανή. Εντός αυτού του συγκεκριμένου χρονικού περιορισμού, η προσπάθεια και ο κύριος σκοπός του σχεδιαστή της γραμμής παραγωγής είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των χαρακτηριστικών, που παράγονται σε κάθε μηχανή. Έτσι ελαχιστοποιείται ο αριθμός των απαιτούμενων μηχανών, πράγμα επιθυμητό, όχι μόνο γιατί ελαττώνεται το συνολικό κόστος της γραμμής παραγωγής αλλά διότι, επίσης, αυξάνεται σημαντικά η αξιοπιστία της γραμμής παραγωγής [19], καθώς ο αριθμός των μηχανών μειώνεται (Σχ. 1.17). Η συνολική αξιοπιστία μιας γραμμής παραγωγής είναι το γινόμενο των αξιοπιστιών των μηχανών που την απαρτίζουν (εφ' όσον οι μηχανές είναι τοποθετημένες σε σειρά). Όμως, εάν η γραμμή παραγωγής περιέχει αποθηκευτικούς χώρους (buffers) μεταξύ των διάφορων μηχανών, τότε η λειτουργία κάθε μηχανής είναι σχετικά ανεξάρτητη από τις πιθανές βλάβες των διπλανών της. Είναι λοιπόν δυνατό να έχουμε μια γραμμή παραγωγής, που ταυτόχρονα να είναι και μεγάλου μήκους και αξιόπιστη –αλλά μόνο στην περίπτωση κατάλληλων ενδιάμεσων μεταξύ μηχανών αποθεμάτων (work in process), που βέβαια ανεβάζουν το κόστος λειτουργίας του συστήματος.

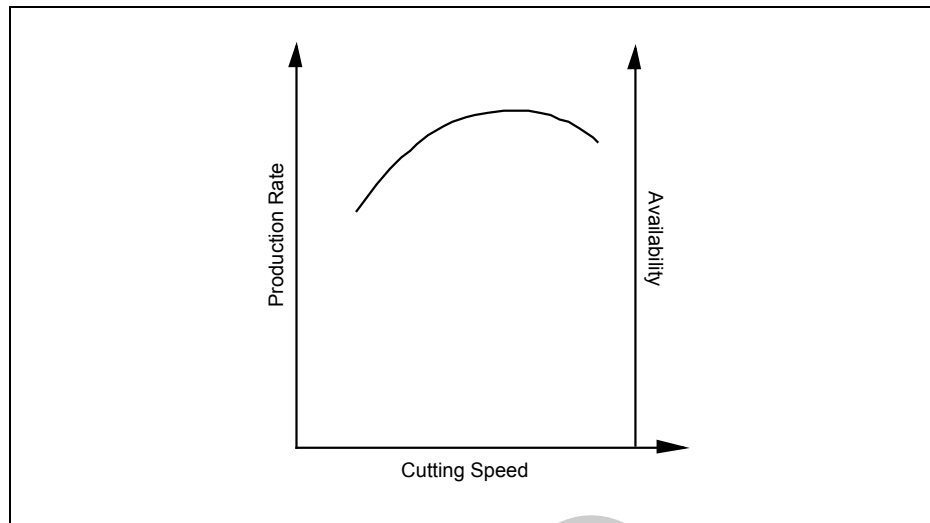


Transfer Line Reliability (%) = Αξιοπιστία
Γραμμής Παραγωγής Τύπου Transfer Line
Average Reliability of Machines (%) = Μέση Τιμή

Αξιοπιστίας Μηχανών
No of Machines = Αριθμός Μηχανών

Σχήμα 1.17 Η Αξιοπιστία του Συστήματος σε σχέση με την Αξιοπιστία των Μηχανών σε μια Γραμμή Παραγωγής

Ο πραγματικός ρυθμός παραγωγής μιας γραμμής παραγωγής δεν μπορεί ποτέ να είναι τόσο μεγάλος, όσο ο θεωρητικός ρυθμός παραγωγής. Όμως είναι δυνατόν να προσεγγίσει τον θεωρητικό, εάν η διαθεσιμότητα κάθε μηχανής βελτιωθεί. Η διαθεσιμότητα και ο ρυθμός παραγωγής μιας μηχανής είναι συνάρτηση της ταχύτητας λειτουργίας της (π.χ. η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου και η πρόωση του εργαλείου, στην περίπτωση του τόρνου). Στις μηχανουργικές κατεργασίες ο ρυθμός παραγωγής μιας εργαλειομηχανής αρχικά αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας κοπής και οδηγεί σε αυξημένο ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Όμως, πέραν ενός συγκεκριμένου σημείου, η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε αυξανόμενη συχνότητα αλλαγών των εργαλείων, εξαιτίας της φθοράς τους και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού παραγωγής (Σχ. 1.18). Εφ' όσον ο πραγματικός ρυθμός παραγωγής είναι το γινόμενο της διαθεσιμότητας και του θεωρητικού ρυθμού παραγωγής (σταθερά) η μορφή της καμπύλης διαθεσιμότητας και ταχύτητας λειτουργίας, θα πρέπει να είναι παρόμοια με αυτή του ρυθμού παραγωγής και επίσης της ταχύτητας (Σχ. 1.18). Γενικά η διαθεσιμότητα μιας γραμμής παραγωγής μεγιστοποιείται σε μια ταχύτητα λειτουργίας, που είναι μικρότερη της μέγιστης δυνατής ταχύτητας.



Production Rate = Ρυθμός Παραγωγής
Cutting Speed = Ταχύτητα Κοπής

Availability = Διαθεσιμότητα

Σχήμα 1.18 Ο Ρυθμός Παραγωγής/Διαθεσιμότητα σαν Συνάρτηση της Ταχύτητας Λειτουργίας για μια Μηχανή

Με δεδομένη την συμπεριφορά κάθε μηχανής (Σχ. 1.18), η συμπεριφορά του ρυθμού παραγωγής της γραμμής παραγωγής –υποθέτοντας, ότι δεν έχει αποθηκευτικούς χώρους– μπορεί να προβλεφθεί. Εάν λ , R και A αντιστοιχούν στον συνολικό ρυθμό βλαβών της γραμμής παραγωγής, την αξιοπιστία και την διαθεσιμότητα και λ_i , R_i και A_i είναι οι ρυθμοί βλαβών των μεμονωμένων μηχανών, οι αξιοπιστίες και οι διαθεσιμότητες σε μια γραμμή μεταφοράς με n μηχανές, τότε ισχύει:

$$R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$$

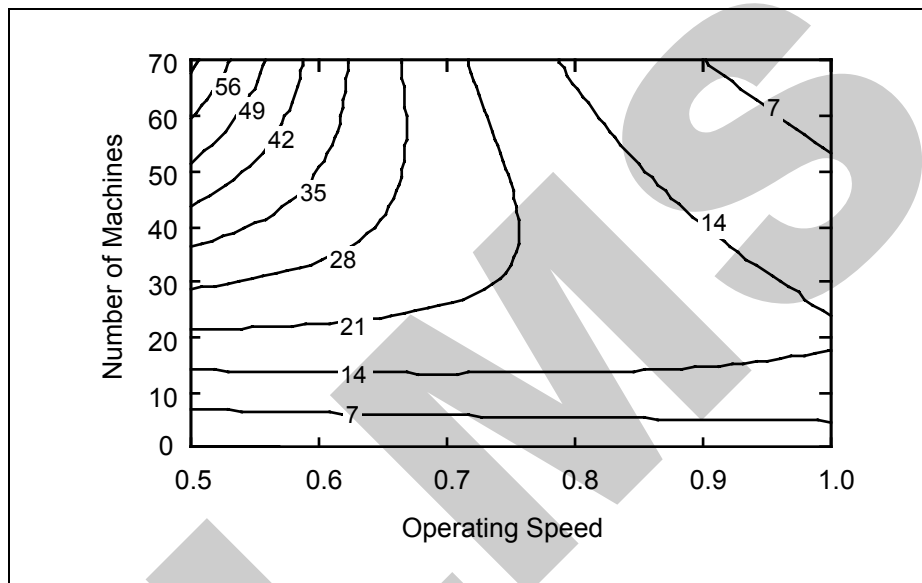
$$e^{-\lambda t} = e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 t} \times \dots \times e^{-\lambda_n t}$$

$$\therefore \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

Για δεδομένο μέσο χρόνο επισκευών (MTTR),

$$\begin{aligned} A &= \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \\ &= \frac{1/\lambda}{1/\lambda + MTTR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)}{1} + MTTR} \\
 &= \frac{1}{1 + MTTR(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)} \\
 &\cong \left(\frac{1/\lambda_1}{1/\lambda_1 + MTTR} \right) \times \left(\frac{1/\lambda_2}{1/\lambda_2 + MTTR} \right) \times \dots \times \left(\frac{1/\lambda_n}{1/\lambda_n + MTTR} \right) \\
 &= A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n
 \end{aligned}$$



Number of Machines = Αριθμός Μηχανών

Operating Speed = Ταχύτητα Λειτουργίας

Σχήμα 1.19 Διαγράμματα Σταθερού Ρυθμού Παραγωγής σε μια Γραμμή Παραγωγής (Parts Per Hour/κομμάτια ανά ώρα)

Η σχέση αυτή δείχνει, ότι η συμπεριφορά των μεμονωμένων μηχανών του Σχήματος 1.18 μπορεί να συσχετισθεί με την διαθεσιμότητα και τον ρυθμό παραγωγής όλης της γραμμής παραγωγής. Ο συνολικός ρυθμός παραγωγής, που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση, μπορεί να παρουσιασθεί σαν συνάρτηση του αριθμού των μηχανών και της ταχύτητας λειτουργίας (Σχ.1.19). Στο Σχήμα 1.19, όλες οι ταχύτητες λειτουργίας έχουν διαιρεθεί με την μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα. Η κανονικοποιημένη τιμή, που προκύπτει, λέγεται σχετική

ταχύτητα. Μια σχετική ταχύτητα μεγέθους (0.6) σημαίνει, ότι κάθε μηχανή της γραμμής παραγωγής λειτουργεί με το 60% της μέγιστης ταχύτητάς της. Ενώ αυτό μπορεί να αποφέρει έναν χαμηλότερο θεωρητικό ρυθμό παραγωγής, απ' ό,τι αν λειτουργεί στο 100% της μέγιστης ταχύτητας, στην πραγματικότητα η διαθεσιμότητα κάθε μηχανής μπορεί να βελτιωθεί λειτουργώντας στην ταχύτητα αυτή (Σχ. 1.18) και έτσι ο συνολικός ρυθμός παραγωγής της γραμμής παραγωγής μπορεί να βελτιωθεί. Κάθε γραμμή στο Σχήμα 1.19 είναι μια καμπύλη σταθερού ρυθμού παραγωγής.

Για παράδειγμα, ακολουθώντας την καμπύλη 28 PPH (Parts Per Hour/ κομμάτια ανά ώρα) από αριστερά προς τα δεξιά βλέπουμε, ότι μια γραμμή παραγωγής από 29 μηχανές που λειτουργούν σε σχετική ταχύτητα 0,5 μπορεί να παράγει το ίδιο με μια γραμμή παραγωγής με 70 μηχανές που λειτουργεί με σχετική ταχύτητα 0.67. Τα πλεονέκτημα, όταν χρησιμοποιούμε 70 μηχανές, είναι η μεγαλύτερη ευελιξία του συστήματος ως προς τον ρυθμό παραγωγής. Είναι δυνατό να αυξήσουμε τον ρυθμό παραγωγής στα 56 PPH με 70 μηχανές (μια οριζόντια γραμμή με αριθμό μηχανών 70 τέμνει την καμπύλη των 56 PPH), αλλά δεν είναι δυνατόν να κάνουμε το ίδιο με 29 μηχανές. Το παράδειγμα αυτό τονίζει την σημασία της ποσοτικής κατανόησης των ιδιοτήτων της παραγωγής (manufacturing attributes) για την λήψη αποφάσεων, όπως στην περίπτωση αυτή που αποφασίζεται ο αριθμός των μηχανών και το μέγεθος των ταχυτήτων.

1.3.3 Ευελιξία (Flexibility)

Για πολλές δεκαετίες το κόστος και ο ρυθμός παραγωγής ήταν τα σημαντικότερα κριτήρια απόδοσης στην παραγωγή και οι βιομηχανίες στηρίζονταν σε συστήματα μαζικής παραγωγής, προκειμένου να επιτύχουν τις οικονομίες κλίμακας. Όμως, καθώς το βιοτικό επίπεδο βελτιώνεται, τόσο περισσότερο η εποχή της μαζικής παραγωγής αντικαθίσταται από την εποχή της «πολυτεμαχισμένης» αγοράς (markt niche). Το κλειδί για την δημιουργία προϊόντων, που μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ενός συνεχώς διαφοροποιούμενου αγοραστικού κοινού, είναι ο σύντομος κύκλος ανάπτυξης προϊόντων, ο οποίος οδηγεί σε εμπορεύματα χαμηλού κόστους και υψηλής ποιότητας και σε ποσότητες που να ικανοποιούν την ζήτηση. Κατά συνέπεια, η ευελιξία πρέπει να αποτελεί μια σημαντική ιδιότητα της παραγωγής, που αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία.

Όμως δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ευελιξία στην διαδικασία λήψης αποφάσεων, εάν τούτη δεν είναι ποσοτικά ορισμένη. Η «ποσοτικοποίηση» (quantification) της ευελιξίας ήταν και παραμένει να είναι αντικείμενο ακαδημαϊκής έρευνας, αλλά οι βιομηχανικές εφαρμογές είναι ολιγάριθμες. Η ακαδημαϊκή έρευνα είχε εστιάσει σε συστήματα παραγωγής με μοναδιαίο μέγεθος παρτίδας (one-of-a-kind) ή σε συστήματα που παράγουν διαφορετικές παρτίδες με ολιγάριθμα κομμάτια (small lot size) –περιπτώσεις που συναντώνται κατά κανόνα στην αεροδιαστημική βιομηχανία αλλά όχι σε συστήματα

μαζικής παραγωγής, όπως αυτά της αυτοκινητοβιομηχανίας. Αυτό οφείλεται στο ότι η συζήτηση γύρω από την ευελιξία είχε επικεντρωθεί στην ικανότητα ενός συστήματος παραγωγής να παράγει έναν αριθμό διαφορετικών προϊόντων γρήγορα και οικονομικά. Όμως υπάρχουν και άλλες όψεις της ευελιξίας [3], οι οποίες είναι εξίσου σημαντικές για ένα σύστημα παραγωγής:

- *Ευελιξία μηχανών (Machine flexibility)*: Η ευκολία να γίνονται αλλαγές, οι οποίες είναι απαραίτητες για την παραγωγή κομματιών διαφορετικού τύπου.
- *Ευελιξία διεργασιών (Process flexibility)*: Η ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων τύπων κομματιών –πιθανώς, χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά– με διαφορετικούς τρόπους.
- *Ευελιξία προϊόντων (Product flexibility)*: Η ικανότητα προσαρμογής του συστήματος στην παραγωγή νέων τύπων προϊόντων, πολύ οικονομικά και γρήγορα.
- *Ευελιξία ροής (Routing flexibility)*: Η ικανότητα αποκατάστασης των βλαβών και συνέχισης της παραγωγής.
- *Ευελιξία ποσότητας (Volume flexibility)*: Η ικανότητα επικερδούς λειτουργίας του συστήματος με διαφορετικές ποσότητες παραγωγής.
- *Ευελιξία ανάπτυξης (Expansion flexibility)*: Η ικανότητα εύκολης ανάπτυξης του συστήματος.
- *Ευελιξία λειτουργίας (Operation flexibility)*: Η ικανότητα να αλλάζει η σειρά των διαφόρων λειτουργιών για κάθε τύπο κομματιών.
- *Ευελιξία παραγωγής (Production Flexibility)*: Ο συνολικός αριθμός τύπων κομματιών που το σύστημα παραγωγής μπορεί να παράγει.

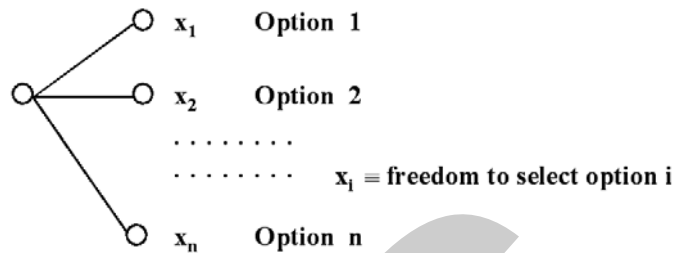
Ένας διαφορετικός τρόπος προσέγγισης της ευελιξίας [4] είναι η ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίζει αφ' ενός εξωτερικές αλλαγές (π.χ. εργασίες που πρέπει να γίνουν από το σύστημα) και αφ' ετέρου εσωτερικές αλλαγές (π.χ. βλάβες μηχανών). Για τον πρώτο τύπο ευελιξίας ένας τρόπος μέτρησης είναι η πιθανότητα να παρουσιασθεί και να εκτελεσθεί μια εργασία από το σύστημα. Για τον δεύτερο τύπο, το προτεινόμενο μέτρο είναι ο λόγος του πραγματικού ρυθμού παραγωγής (με διαταράξεις, όπως βλάβες) διά του θεωρητικού ρυθμού παραγωγής (χωρίς διαταράξεις).

Επιπλέον για την ευελιξία μιας εργαλειομηχανής έχουν προταθεί και άλλοι τρόποι μέτρησης, όπως ο αριθμός των κομματιών που παράγονται ανά ώρα ρύθμισης (για την υποδοχή του συγκεκριμένου τύπου κομματιού) της μηχανής, ενώ για την ευελιξία λειτουργίας [5] έχει προταθεί ως μέτρο (αναφέρεται συνολικά σε όλες τις μηχανές του συστήματος) ο λόγος του συνολικού χρόνου προετοιμασίας των μηχανών διά του θεωρητικού χρόνου (χωρίς βλάβες κ.λ.π.) παραγωγής.

Η προσομοίωση με την βοήθεια δικτύων Petri [6] μπορεί να χρησιμεύσει για εκτιμήσεις των χρόνων που χρειάζεται ένα σύστημα για να προσαρμόζεται σε τυχαίες διαταράξεις, χρόνοι που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως μέτρο ευε-

λιξίας.

Μια αυστηρότερη μαθηματική ποσοτικοποίηση της ευελιξίας [7, 8] βασίζεται στην υπόθεση, ότι η ευελιξία θα πρέπει να είναι μια συνάρτηση του αριθμού των διαθέσιμων επιλογών και των σχετικών ελευθεριών βάσει των οποίων καθίσταται δυνατή η επιλογή τούτων. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σ' έναν τρόπο μέτρησης της ευελιξίας ταυτόσημο της έκφρασης της εντροπίας στην θερμοδυναμική και στην θεωρία της πληροφορίας. Ο υπολογισμός της ευελιξίας κατ' αυτόν τον τρόπο γίνεται ως εξής:



Option = Εκλογή

Freedom to select option i = Ελευθερία επιλογής της εκλογής i

$$\text{Δείκτης ευελιξίας } FI = -(x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2 + \dots + x_n \ln x_n)$$

Ο δείκτης ευελιξίας χαρακτηρίζει τον βαθμό ευελιξίας μιας μηχανής, μιας διεργασίας ή ενός συστήματος, υποθέτοντας n διαθέσιμες εκλογές και την ελευθερία x_i επιλογής της εκλογής i . Όμως ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται μόνο στις περιπτώσεις όπου οι προτιμήσεις, ανάμεσα σε πολλές εκλογές, μπορούν να ποσοτικοποιηθούν.

Μια εναλλακτική μαθηματική προσέγγιση [9] υιοθετεί την άποψη, πως η ευελιξία ενός συστήματος ή μιας μηχανής θα πρέπει να προσδιορίζεται σε σχέση με μια «ομάδα εργασιών αναφοράς» (reference task set). Το μέτρο ευελιξίας προκύπτει ως ο σταθμισμένος μέσος όρος απόδοσης, με τον οποίο ένα σύστημα παραγωγής ή μια μηχανή εκτελούν την «ομάδα εργασιών αναφοράς», όπου κάθε μια εργασία της ομάδας αναφοράς σταθμίζεται ανάλογα με την σχετική της σημασία.

$$E = \frac{\int_{\tau \in T} e(A, \tau) w(\tau) d\tau}{W(T)}$$

Όπου: E \equiv σταθμισμένη μέση τιμή απόδοσης,
 τ \equiv μια ξεχωριστή εργασία,
 A \equiv το σύστημα ή η μηχανή παραγωγής,
 T \equiv η ομάδα εργασιών αναφοράς,
 $w(\tau)$ \equiv το βάρος/σημασία της εργασίας τ ,
 $W(T)$ \equiv το άθροισμα των βαρών των εργασιών στο T ,
 $e(A, \tau)$ \equiv ένας βαθμός απόδοσης μεταξύ 0 και 1, που δείχνει πόσο καλά το A εκτελεί το τ .

Το μέτρο αυτό μπορεί να υπολογίζει την ευελιξία, που μια επιχείρηση χρειάζεται πραγματικά, μέσω των βαρών $w(\tau)$ αλλά και της επιλογής της ομάδας των εργασιών αναφοράς T , που μπορεί να περιλαμβάνει μόνο συγκεκριμένες εργασίες που ενδιαφέρουν την συγκεκριμένη επιχείρηση.

«Δείκτες ευστροφίας» (Versatility indices), για την επιλογή συστημάτων συναρμολόγησης έχουν επίσης προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία [10]. Ο δείκτης ευστροφίας μιας διαδικασίας συναρμολόγησης (V_p) ορίζεται ως ο αριθμός των σχεδιαστικών αλλαγών ανά έτος στο υπό συναρμολόγηση προϊόν, ενώ ο δείκτης ευστροφίας ενός συστήματος συναρμολόγησης (V_s) ορίζεται ως ο αριθμός των αναδιαμορφώσεων ανά έτος, που μπορεί το σύστημα να υποστεί, προκειμένου να συναρμολογήσει ένα νέο προϊόν. Η ταύτιση των δεικτών, V_p και V_s , οδηγεί στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος συναρμολόγησης.

Τέλος η αξιολόγηση της ευελιξίας ενός συστήματος παραγωγής γίνεται με την βοήθεια τεχνικών, που υπολογίζουν την χρηματική ρευστότητα (discounted cash flow, DCF). Μια προσέγγιση είναι να ποσοτικοποιηθεί και να εκφρασθεί σε χρηματικοοικονομική ροή η ωφέλεια –όπως οι μικρότεροι χρόνοι αναμονής– που προκύπτει από την εφαρμογή ευέλικτων συστημάτων [11.12], ενώ μια διαφορετική προσέγγιση είναι ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων μιας κλασικής ανάλυσης χρηματοοικονομικών ροών με μια ξεχωριστή αποτίμηση των ωφελειών από την εφαρμογή ευέλικτων συστημάτων ή μηχανών [13].

Τα μέτρα της ευελιξίας, που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, αντανακλούν δυο διαφορετικές θεωρήσεις του προβλήματος της ευελιξίας. Σύμφωνα με την πρώτη άποψη, η ευελιξία είναι μια εσωτερική ιδιότητα ενός συστήματος παραγωγής, όπως για παράδειγμα το μήκος και το πλάτος είναι εσωτερικές ιδιότητες ενός ορθογωνίου. Τα μέτρα, που προκύπτουν από την θεώρηση αυτή, υπολογίζουν την ευελιξία σαν μια συνάρτηση εξαρτώμενη αποκλειστικά από τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής. Ένα παράδειγμα αυτής της προσέγγισης είναι ο εντροπικός δείκτης ευελιξίας FI , ο οποίος αξιολογεί ένα σύστημα με βάση το πλήθος των εκλογών –όπως π.χ. τον αριθμό των τύπων ενός κομματιού που το σύστημα μπορεί να παράγει. Σύμφωνα με την δεύτερη άποψη, η ευελιξία είναι μια σχετική ιδιότητα, η οποία δεν εξαρτάται μόνο από το σύστημα παραγωγής αλλά και από τις εξωτερικές απαιτήσεις που θέτουμε στο σύστημα παραγωγής: η ευελιξία του συστήματος δεν χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των διαφορετικών κομματιών που το σύστημα (ή και μια μηχανή) θα μπορούσε να παράγει, αλλά από τον λόγο του αριθμού των διαφορετικών παραγομένων κομματιών προς εκείνον των ζητούμενων. Οι μετρήσεις [11-13] της ευελιξίας, που βασίζονται στην ανάλυση των χρηματοοικονομικών ροών (DCF), απηχούν την δεύτερη άποψη, εφ' όσον για τον υπολογισμό του κόστους και των εσόδων απαιτούνται προβλέψεις για τα πραγματικά παραγόμενα προϊόντα του συστήματος.

Οι δύο θεωρήσεις της ευελιξίας έχουν η κάθε μια τα δικά της πλεονεκτήματα. Θεωρώντας την ευελιξία σαν μια εσωτερική ιδιότητα ενός συστήματος παραγωγής, αποφεύγεται η ανάγκη για προβλέψεις και εκτιμήσεις των εξωτερικών απαιτήσεων, που προβλέπεται ότι θα ζητηθούν από το σύστημα. Κατά

συνέπεια, η μέτρηση της ευελιξίας γίνεται ευκολότερα. Από την άλλη μεριά, οποιοσδήποτε υπολογισμός της ευελιξίας, που παραλείπει τις εξωτερικές απαιτήσεις, εμπεριέχει τον κίνδυνο να μην έχει στενή σχέση με την πραγματικότητα. Ο τελικός υπολογισμός, που θα προκύψει, μπορεί να είναι άνευ πρακτικής σημασίας, εκτός και αν υπάρχει σαφής εκ των προτέρων εκτίμηση για το τι είδους και πόση ευελιξία χρειάζεται. Υπό αυτή την έννοια, μέτρα ευελιξίας, που λαμβάνουν υπ' όψη τους τις εξωτερικές απαιτήσεις, υπερτερούν.

Οι παρατηρήσεις αυτές μπορεί να αποτελέσουν την βάση μιας γενικότερης προσέγγισης στο πρόβλημα μέτρησης της ευελιξίας. Οι προσεγγίσεις, που αναφέρθηκαν έως εδώ, είτε έχουν ελλείψεις στην θεωρητική τους θεμελίωση είτε έχουν δυσκολία στην πρακτική εφαρμογή τους. Ένα γενικότερο μέτρο, που είναι εύκολο να υπολογισθεί σε πραγματικές καταστάσεις παραγωγής, βασίζεται στην θεώρηση, ότι η ευελιξία ενός συστήματος παραγωγής καθορίζεται από την ευαισθησία του στις αλλαγές. Όσο μειώνεται η ευαισθησία, τόσο αυξάνει η ευελιξία.

Υψηλή ευελιξία ή χαμηλή ευαισθησία επιφέρει τρία βασικά πλεονεκτήματα, που μπορεί να συσχετισθούν με τις βασικές κατηγορίες ευελιξίας που συζητήθηκαν έως εδώ:

- *Ευελιξία προϊόντος* (Product flexibility), που επιτρέπει σ' ένα σύστημα παραγωγής να παράγει πολλούς τύπους κομματιών με τον ίδιο εξοπλισμό. Βραχυπρόθεσμα αυτό σημαίνει, ότι το σύστημα έχει την ικανότητα, χρησιμοποιώντας μικρές παρτίδες προϊόντων, να προσαρμόζεται με μικρό κόστος στις απαιτήσεις αλλαγών για διάφορα προϊόντα. Μακροπρόθεσμα, ο εξοπλισμός του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον κύκλο ζωής πολλαπλών προϊόντων, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της επένδυσης.
- *Ευελιξία λειτουργίας* (Operation flexibility), που αναφέρεται στην δυνατότητα του συστήματος να παράγει μια γκάμα προϊόντων χρησιμοποιώντας διαφορετικές μηχανές, υλικά και διαδικασίες. Αυτό προκύπτει από την ευελιξία της κάθε διαδικασίας και μηχανής, την ευελιξία του σχεδιασμού προϊόντων και την ευελιξία της δομής του ίδιου του συστήματος παραγωγής. Η ευελιξία αυτή δίδει ανοχή σε βλάβες (breakdown tolerance) –παρέχει, δηλαδή, την δυνατότητα να παραμένει το επίπεδο παραγωγής σχετικά υψηλό, παρά τις πιθανές βλάβες των μηχανών ή την απουσία των χειριστών. Αυτό επηρεάζει ιδιαίτερα την μαζική παραγωγή, όπου ένας μεγάλος αριθμός από ίδια ή παρόμοια εξαρτήματα πρέπει να παραχθούν και η παραγόμενη ποσότητα είναι συχνά ο σημαντικότερος δείκτης επιτυχίας της παραγωγής.
- *Ευελιξία της χωρητικότητας* (capacity flexibility), που επιτρέπει σ' ένα σύστημα παραγωγής ν' αλλάζει τους όγκους παραγωγής διαφορετικών προϊόντων και έτσι να προσαρμόζεται στις αλλαγές της ζήτησης, ενώ η λειτουργία του παραμένει επικερδής. Αυτό αντανακλά την δυνατότητα του συστήματος παραγωγής να *συστέλλει* ή να *διαστέλλει* τον

όγκο παραγωγής του. Έχει παραδοσιακά θεωρηθεί σημαντικό για συστήματα, που παράγουν προϊόντα κατόπιν παραγγελίας (make-to-order), αλλά είναι επίσης σημαντικό στην μαζική παραγωγή (mass production), όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Καθώς η ευελιξία είναι αντιστρόφως ανάλογη της ευαισθησίας σε αλλαγές, η μέτρηση της ευελιξίας πρέπει να μετρά το κόστος της αλλαγής (Penalty of Change, POC). Εάν μια αλλαγή μπορεί να γίνει χωρίς κόστος, τότε το σύστημα έχει την μέγιστη ευελιξία και το $POC = 0$. Εάν, αντιθέτως, η αλλαγή έχει πολύ μεγάλο κόστος, τότε το σύστημα είναι πολύ άκαμπτο και το POC πρέπει να είναι πολύ μεγάλο.

Ένα σημαντικό πρακτικό ερώτημα, που αφορά την ευελιξία είναι το εξής: «Πόσο ευέλικτο σύστημα πρέπει να απαιτήσω τώρα, έτσι ώστε να εξοικονομήσω σε πιθανές αλλαγές στο μέλλον»; Η ερώτηση αυτή αφορά μελλοντικές απαιτήσεις, οι οποίες δεν μπορούν να προβλεφθούν με βεβαιότητα και ως εκ τούτου οι πιθανές αλλαγές στο μέλλον πρέπει να εκφραστούν με πιθανοθεωρητικούς όρους και να συνυπολογισθούν στο POC. Ένα σύστημα, το οποίο μπορεί μόνο να προσαρμόζεται σε αλλαγές που ποτέ δεν πρόκειται να συμβούν δεν είναι χρήσιμο και δεν πρέπει να θεωρείται ευέλικτο.

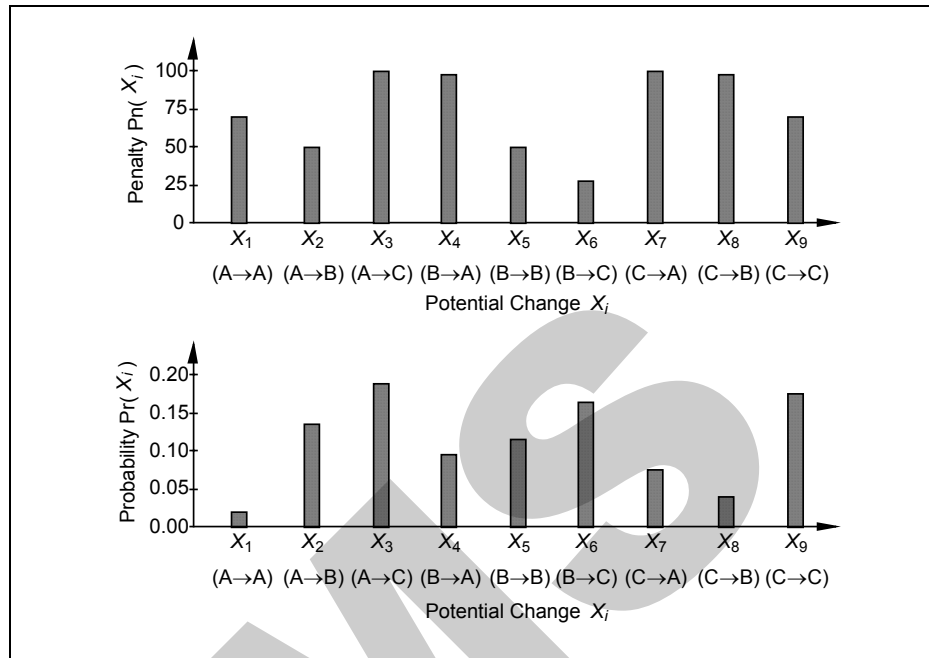
Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι το μέτρο ευελιξίας POC πρέπει να συνυπολογίζει και το κόστος της αλλαγής (penalty of change) και την πιθανότητα του να συμβεί η αλλαγή (probability of change) αυτή:

$$POC = \text{Κόστος} \times \text{Πιθανότητα} \quad (\text{Penalty} \times \text{Probability})$$

Όσο μικρότερο είναι το POC, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευελιξία. Εάν το κόστος των αλλαγών είναι χαμηλό, τότε το POC είναι χαμηλό, δηλαδή η ευελιξία είναι υψηλή. Εάν η πιθανότητα για αλλαγή είναι χαμηλή, τότε το POC και πάλι θα είναι χαμηλό, ακόμη και αν το κόστος για την αλλαγή είναι σχετικά υψηλό. Αυτό μας δείχνει, πως ένα σύστημα δεν πρέπει να θεωρείται μη ευέλικτο όταν έχει υψηλό κόστος για αλλαγή, η οποία έχει μικρή πιθανότητα να συμβεί. Με την ίδια λογική, ένα σύστημα δεν πρέπει να θεωρείται πολύ περισσότερο ευέλικτο από ένα άλλο, όταν έχει πολύ μικρό κόστος για αλλαγές αλλά οι αλλαγές αυτές έχουν μικρή πιθανότητα να συμβούν.

Η τιμή του POC βασίζεται σε δύο δεδομένα: Στο κόστος για πιθανή αλλαγή και στην πιθανότητα για αλλαγή, όπου είναι μια μετάβαση από μια κατάσταση (state) σε μια άλλη. Η φύση μιας κατάστασης εξαρτάται από τον τύπο της ευελιξίας που έχουμε θεωρήσει: για την ευελιξία του προϊόντος, μια κατάσταση μπορεί να είναι ο τύπος του προϊόντος που παράγεται από το σύστημα. Για την ευελιξία λειτουργίας του συστήματος μπορεί να είναι η λειτουργική κατάσταση ενός συστήματος (π.χ. πλήρης ή μερική λειτουργία). Για την ευελιξία της χωρητικότητας μπορεί να είναι ο ρυθμός παραγωγής κ.ο.κ. Το κόστος και η πιθανότητα μπορεί να θεωρηθούν σαν συναρτήσεις μιας διακριτής μεταβλητής X , που αντιπροσωπεύει την πιθανή αλλαγή. Η i -οστή τιμή του X είναι X_i . Π.χ. με τρεις καταστάσεις A , B και C , οι δυνατές τιμές του X είναι $X_1(A \rightarrow A)$, $X_2(A \rightarrow B)$, $X_3(A \rightarrow C)$, $X_4(B \rightarrow A)$, $X_5(B \rightarrow B)$,

$X_6(B \rightarrow C)$, $X_7(C \rightarrow A)$, $X_8(C \rightarrow B)$ και $X_9(C \rightarrow C)$, όπου $(A \rightarrow A)$ σημαίνει ότι το σύστημα παραμένει στην ίδια κατάσταση A , $(A \rightarrow B)$ σημαίνει ότι το σύστημα αλλάζει από την κατάσταση A στην κατάσταση B και ούτω καθ' εξής (Σχ. 1.20).



Penalty $Pn(X_i) = \text{Κόστος } Pn(X_i)$

Potential Change $X_i = \text{Πιθανή Αλλαγή } X_i$

Probability $Pr(X_i) = \text{Πιθανότητα } Pr(X_i)$

Σχήμα 1.20 Το Κόστος και η Πιθανότητα Αλλαγής ως Συνάρτηση των Πιθανών Αλλαγών

Το κόστος αλλαγής, POC , ορίζεται ως:

$$POC = \sum_{i=1}^D Pn(X_i)Pr(X_i)$$

- Όπου:
- D \equiv το πλήθος των πιθανών αλλαγών,
 - X_i \equiv η i -οστή πιθανή αλλαγή,
 - $Pn(X_i)$ \equiv το κόστος της i -οστής πιθανής αλλαγής,
 - $Pr(X_i)$ \equiv η πιθανότητα της i -οστής πιθανής αλλαγής.

Η από την παραπάνω εξίσωση προκύπτουσα τιμή του POC μπορεί να ερμηνευθεί σαν η αναμενόμενη τιμή (expected value) του κόστους που θα παρουσιασθεί σε περίπτωση αλλαγής.

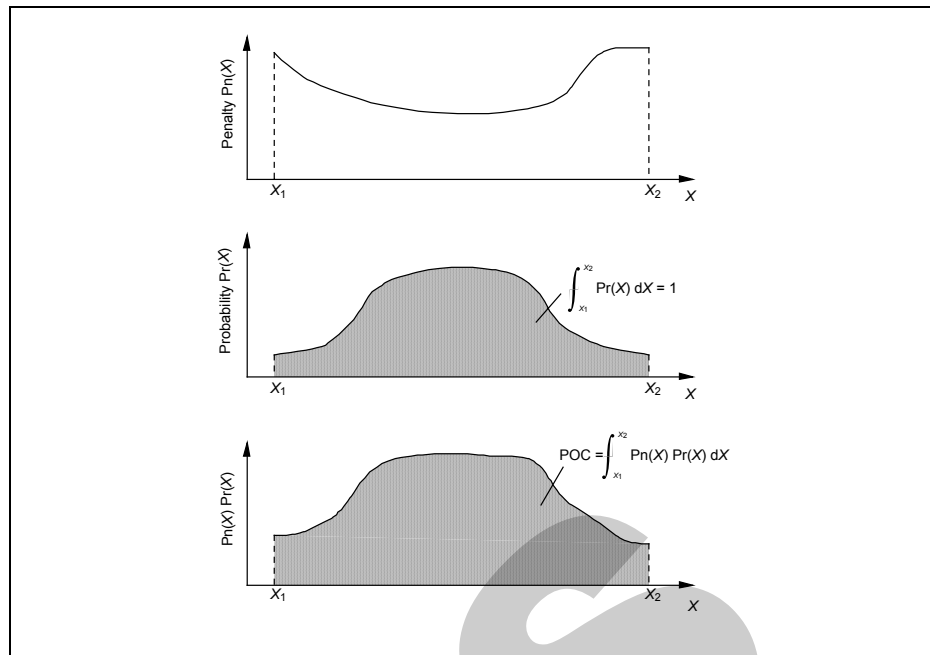
Ο υπολογισμός του POC μπορεί να θεωρηθεί σαν μια λήψη απόφασης με ένα κριτήριο και με αβεβαιότητα (single attribute decision making under uncertainty), όπου X_i είναι τα πιθανά μελλοντικά σενάρια, $Pn(X_i)$ είναι χαρακτηριστικές τιμές για κάθε μελλοντικό σενάριο και $Pr(X_i)$, η πιθανότητα να συμβεί το μελλοντικό σενάριο. Η ποσότητα POC θα μπορούσε τότε να θεωρηθεί ως η αναμενόμενη τιμή ή *χρησιμότητα* (utility) του συστήματος παραγωγής. Κατά την σύγκριση ενός αριθμού εναλλακτικών συστημάτων παραγωγής, η διαδικασία λήψης της απόφασης επιλέγει την εναλλακτική λύση με την καλύτερη *χρησιμότητα* –στην προκειμένη περίπτωση, την χαμηλότερη (λεπτομέρειες στο Κεφάλαιο 6).

Επιστρέφοντας στον ορισμό του κόστους αλλαγής POC , παρατηρούμε, ότι στην γενική περίπτωση ένα σύστημα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα συνεχόμενο πεδίο καταστάσεων και όχι μια σειρά από ξεχωριστές καταστάσεις. Σ' αυτήν την περίπτωση ο αριθμός των πιθανών μεταβάσεων είναι απεριόριστος και η γκάμα των πιθανών αλλαγών X μπορεί να θεωρηθεί συνεχής. Τότε, το κόστος για πιθανή αλλαγή παρίσταται από μια συνεχή κατανομή $Pn(X)$, ενώ η πιθανότητα μιας αλλαγής συμβολίζεται από μια συνεχή πιθανότητα κατανομής, που περιγράφεται από την συνάρτηση $Pr(X)$. Το γινόμενο των συναρτήσεων αυτών, δηλαδή το $Pn(X)Pr(X)$, είναι μια κατανομή του «κανονικοποιημένου» κόστους κατανομής, το ολοκλήρωμα του οποίου είναι η αναμενόμενη αξία του κόστους (Σχ. 1.21) η οποία παρέχει μια μέτρηση της ευελιξίας του συστήματος.

$$POC = \int_{X_1}^{X_2} Pn(X)Pr(X)dX$$

Όπου: X_1 ≡ η χαμηλότερη τιμή της μεταβλητής της πιθανής αλλαγής X ,
 X_2 ≡ η υψηλότερη τιμή της μεταβλητής της πιθανής αλλαγής X ,
 $Pn(X)$ ≡ η κατανομή του κόστους της πιθανής αλλαγής,
 $Pr(X)$ ≡ η κατανομή της πιθανότητας της πιθανής αλλαγής.

Η μέτρηση της ευελιξίας με την μορφή του κόστους αλλαγής, POC , είναι σχετικά απλή: με την βοήθεια του όρου $Pr(X_i)$ ή $Pr(X)$, το POC μετρά την απαίτηση για ευελιξία αντί του «τυφλού» υπολογισμού μιας ευελιξίας, που μπορεί να μην χρειάζεται. Το POC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια «ποσοτικοποιημένη» ιδιότητα παραγωγής κατά την λήψη αποφάσεων.



Penalty $Pn(X)$ = Κόστος $Pn(X)$

Probability $Pr(X)$ = Πιθανότητα $Pr(X)$

Σχήμα 1.21 Το Κόστος Αλλαγής, POC , ως Ολοκλήρωμα του Γινόμενου του Κόστους και της Πιθανότητας

Παράδειγμα

Το κόστος αλλαγής εφαρμόζεται στην εκτίμηση των τριών (3) τύπων της παραγωγικής ευελιξίας: *ευελιξία του προϊόντος*, *ευελιξία της λειτουργίας* και *ευελιξία χωρητικότητας*. Θεωρούμε την εκτίμηση της ευελιξίας του προϊόντος για δύο συστήματα παραγωγής το Α και το Β. Η ευελιξία του προϊόντος αντανακλά την ικανότητα του συστήματος να παράγει μια γκάμα προϊόντων με τον ίδιο εξοπλισμό. Προκειμένου να ποσοτικοποιήσουμε τον συγκεκριμένο τύπο της ευελιξίας και να δώσουμε την κατάλληλη τιμή στο κόστος αλλαγής, POC , πρέπει να ορίσουμε την πιθανότητα και το κόστος. Σ' αυτή την περίπτωση, η αντίστοιχη αλλαγή είναι μια αλλαγή στο προϊόν που κατασκευάζεται. Ας υποθέσουμε, ότι υπάρχει 70% πιθανότητα το επόμενο προϊόν που θα παραχθεί να είναι το προϊόν 1 και 30% πιθανότητα να είναι το προϊόν 2. Ας υποθέσουμε, επίσης, ότι το προϊόν 1 μοιάζει περισσότερο στο σταθερό προϊόν που κατασκευάζεται και γι' αυτό μπορεί να προσαρμοσθεί στο σύστημα Α μόνο με \$20 εκ. δολάρια σε τροποποιήσεις, σε αντίθεση με \$50 εκ. δολάρια σε τροποποιήσεις για το προϊόν 2. Το σύστημα Β είναι ένα δεδομένο σύστημα, το οποίο πρέπει να αντικατασταθεί τελείως με κόστος \$80 εκ. δολάρια για να

διευθετήσει οποιαδήποτε αλλαγή προϊόντος. Εκτιμώντας την ευελιξία σαν το γινόμενο του κόστους επί την πιθανότητα, έχουμε:

$$POC_A = \$20 \text{ εκ. δολ.} \times 70\% + \$50 \text{ εκ. δολ.} \times 30\% = \$29 \text{ εκ. δολ.}$$

για το σύστημα A και

$$POC_B = \$80 \text{ εκ. δολ.} \times 70\% + \$80 \text{ εκ. δολ.} \times 30\% = \$80 \text{ εκ. δολ.}$$

για το σύστημα B. Το κόστος αλλαγής, POC , είναι πολύ χαμηλότερο για το σύστημα A απ' ό τι για το σύστημα B, το οποίο σημαίνει πως το σύστημα A έχει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία προϊόντος από το σύστημα B.

Η ίδια μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί στον υπολογισμό άλλων τύπων ευελιξίας. Η ευελιξία της λειτουργίας δείχνει την δυνατότητα του συστήματος να παρέχει εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής εξαρτημάτων και να αντιμετωπίζει τυχόν βλάβες. Το κόστος αλλαγής εκφράζεται ως ο μέσος όρος μείωσης του ρυθμού παραγωγής, που προκαλείται από μια αλλαγή λειτουργίας. Ας υποθέσουμε, ότι η μείωση στον ρυθμό παραγωγής είναι 10 κομμάτια/ανά ώρα για το σύστημα A και 20 κομμάτια/ώρα για το σύστημα B. Χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η πιθανότητα για αλλαγές, κάποιος θα κατέληγε στο συμπέρασμα, ότι το σύστημα A έχει μεγαλύτερη ευελιξία λειτουργίας από το σύστημα B, αφού οι δαπάνες είναι λιγότερες για το σύστημα A απ' ό τι για το σύστημα B. Όμως λαμβάνοντας υπ' όψη τις πιθανότητες των αλλαγών, η πιθανότητα να συμβεί βλάβη είναι 20% για το σύστημα A και 5% για το σύστημα B, οπότε:

$$POC_A = 10 \text{ κομμάτια/ώρα} \times 20\% = 2 \text{ κομμάτια/ώρα}$$

για το σύστημα A και

$$POC_B = 20 \text{ κομμάτια/ώρα} \times 5\% = 1 \text{ κομμάτι/ώρα}$$

για το σύστημα B. Γι' τον λόγο αυτόν, το σύστημα B έχει περισσότερη λειτουργική ευελιξία από το σύστημα A.

Η ευελιξία χωρητικότητας αντανάκλα την δυνατότητα του συστήματος να διαστέλλεται ή να συστέλλεται ή να μικραίνει, προκειμένου να καλύπτει τις αλλαγές της ζήτησης του προϊόντος. Έστω ότι η πρόβλεψη για την ζήτηση του προϊόντος δείχνει πως θα παρουσιασθεί μια αύξηση από 100 κομμάτια/ώρα σε 115 κομμάτια/ώρα με πιθανότητα 50%, σε 150 κομμάτια/ώρα με πιθανότητα 30% και σε 200 κομμάτια/ώρα με πιθανότητα 20%. Το σύστημα A αντιμετωπίζει αυτές τις αλλαγές με κόστος \$0 δολάρια, \$50 εκ. δολάρια και \$100 εκ. δολάρια αντίστοιχα, όπου οι χρηματικές τιμές εκπροσωπούν το κόστος της απόκτησης του πρόσθετου εξοπλισμού, ο οποίος απαιτείται για να καλύψει την αυξημένη ζήτηση. Το κόστος των αλλαγών για το σύστημα B είναι: \$5 εκ. δολάρια, \$40 εκ. δολάρια και \$120 εκ. δολάρια αντίστοιχα, οπότε:

$$\begin{aligned} POC_A &= \$0 \text{ εκ. δολ.} \times 50\% + \$50 \text{ εκ. δολ.} \times 30\% + \$100 \times 20\% \text{ εκ. δολ.} \\ &= \$35 \text{ εκ. δολ.} \end{aligned}$$

για το σύστημα A και

$$\begin{aligned} POC_A &= \$5 \text{ εκ. δολ.} \times 50\% + \$40 \text{ εκ. δολ.} \times 30\% + \$120 \times 20\% \text{ εκ. δολ.} \\ &= \$38.5 \text{ εκ. δολ.} \end{aligned}$$

για το σύστημα B. Επομένως, το σύστημα A έχει περισσότερη ευελιξία χωρητικότητας από το σύστημα B.

1.3.4 Ποιότητα (Quality)

Η ποιότητα του προϊόντος σχετίζεται με την ικανοποίηση του πελάτη και είναι συχνά δύσκολο να ορισθεί με ποσοτικούς όρους. Η ικανοποίηση του πελάτη εξαρτάται όχι μόνο από τα πραγματικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, αλλά και από το εάν το προϊόν αποδεικνύεται χρήσιμο, από την εύκολη ή δύσκολη συντήρησή του και από ένα πλήθος παραγόντων, οι οποίοι είναι υποκειμενικοί και γι' αυτό είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. Ωστόσο, η ικανοποίηση του πελάτη μπορεί να εκτιμηθεί με βάση δύο κύριους παράγοντες: τον σχεδιασμό και την παραγωγή του.

Στην παραγωγή, η ποιότητα συνήθως αναφέρεται στο πόσο καλά η παραγωγική διαδικασία ικανοποιεί τις σχεδιαστικές προδιαγραφές των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του προϊόντος. Η ποιότητα του προϊόντος, ουσιαστικά, είναι το σύνολο της ποιότητας των ξεχωριστών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: προδιαγραφές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφές των φυσικών/χημικών ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν το προϊόν.

Η ποιότητα που αναφέρεται στα συστήματα παραγωγής, έχει πολλές διαφορετικές όψεις. Όταν τα ίδια κομμάτια ή προϊόντα παράγονται μαζικά, η ορθή επανάληψη της παραγωγικής διαδικασίας γίνεται σημαντική, εφ' όσον το κάθε παραγόμενο αντικείμενο πρέπει να συμμορφώνεται κατά τον ίδιο τρόπο στις προδιαγραφές. Αυτή η όψη της ποιότητας είναι το αντικείμενο εκτεταμένων μελετών, στην περιοχή του στατιστικού ποιοτικού ελέγχου. Ωστόσο, καθώς η παραγόμενη ποσότητα των προϊόντων μειώνεται, ή τα συστήματα παραγωγής παράγουν μόνο ένα είδος προϊόντος, τα εργαλεία, που βασίζονται σε στατιστικές μεθόδους, ίσως χρειασθεί να προσαρμοσθούν –εφ' όσον το πλήθος των δεδομένων, που συνήθως χρησιμοποιείται για την εξαγωγή στατιστικών μέτρων της ποιότητας, μπορεί να μην είναι διαθέσιμο.

Μια άλλη όψη της ποιότητας αφορά τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Εάν αμέσως μετά την εισαγωγή του στην αγορά, ένα προϊόν δεν γίνεται αποδεκτό, αυτό πρέπει να οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στον σχεδιασμό και τα χαρακτηριστικά του προϊόντος και όχι στην διαδικασία παραγωγής του. Εξ άλλου, η ποιότητα κατασκευής μπορεί να γίνει εμφανής μετά από μια χρονική περίοδο, όταν θα παρουσιασθεί φθορά των εξαρτημάτων του προϊόντος.

Εφ' όσον η ποιότητα παραγωγής αντανάκλα την ικανοποίηση των προδιαγραφών από την παραγωγική διαδικασία εντός των προκαθορισμένων κατά τον σχεδιασμό ανοχών, είναι σημαντικό να τονίσουμε, ότι οι ανοχές μπορεί να

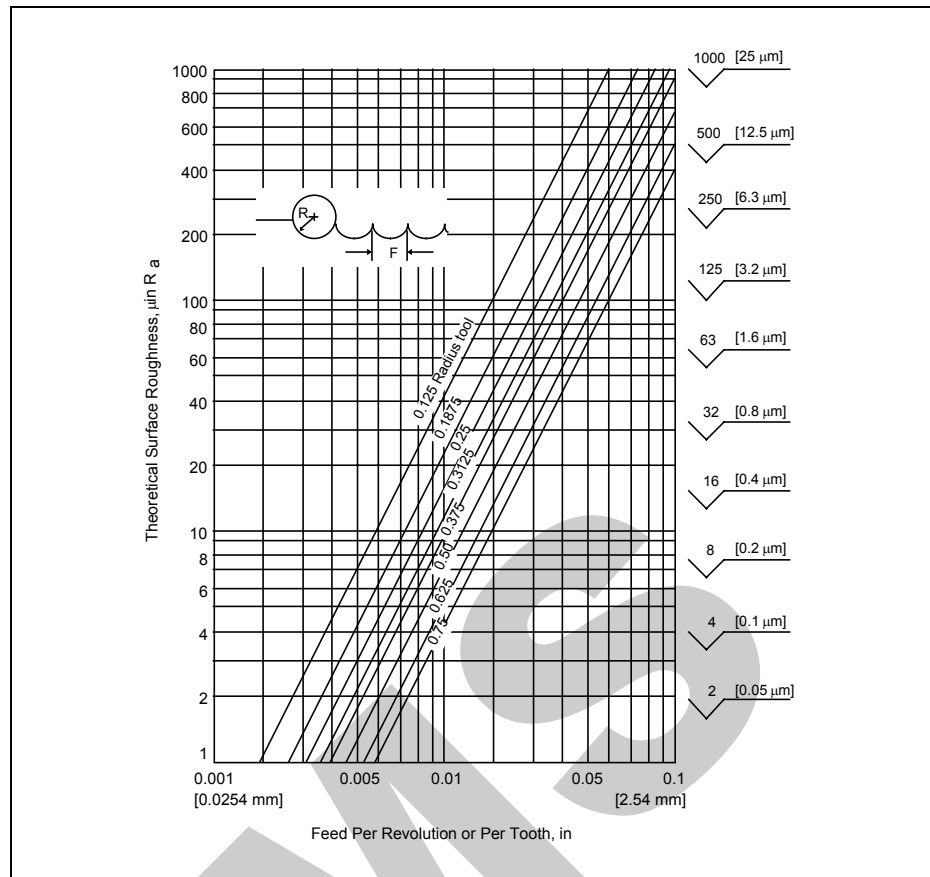
υπερτιμηθούν ή να υποτιμηθούν. Η υπερτίμηση των ανοχών οδηγεί σε επιπλέον δαπάνες στην παραγωγή και σε υπερβολική «πίεση» στο σύστημα παραγωγής, ενώ μια υποτίμηση των ανοχών μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη λειτουργία ενός προϊόντος.

Η ποσοτικοποίηση της ποιότητας είναι σημαντική για την παραγωγή, εφ' όσον αντανακλά την απόδοση της παραγωγικής διαδικασίας και διευκολύνει τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της ποιότητας στις άλλες παραγωγικές ιδιότητες. Η ποιότητα μπορεί να εκτιμηθεί από ένα συνολικό, γενικό επίπεδο προϊόντος μέχρι και σε επίπεδο στοιχειωδών εξαρτημάτων. Όσο γενικότερη είναι η θεώρηση της ποιότητας, τόσο δυσκολότερα ποσοτικοποιείται και συνεπώς βασίζεται στις αναφορές των πελατών/χρηστών του προϊόντος και σε υποκειμενικές κρίσεις. Αντίθετα, τα βασικά χαρακτηριστικά εξαρτημάτων όπως οι διαστάσεις ή/και οι φυσικές ιδιότητες τους –όπως η σκληρότητα και η αντοχή– είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθούν και παρέχουν έναν ευκολότερο τρόπο μέτρησης της ποιότητας, που βοηθά την επιθεώρηση και τον έλεγχο κατά την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας ή αμέσως μετά το πέρας αυτής.

Δύο κοινά μέτρα ποιότητας σε γενικό, συνολικό επίπεδο προϊόντος είναι: α) τα επί τοις εκατό ελαττωματικά, που δείχνουν το ποσοστό των εξαρτημάτων που έχουν παραχθεί εκτός προδιαγραφών και β) το κόστος εγγύησης, που προκύπτει από τα ελαττωματικά προϊόντα. Και τα δύο μέτρα είναι σχετικά εύκολο να καθορισθούν και ως εκ τούτου μπορούν να χρησιμεύσουν στον συνυπολογισμό του κόστους παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, όμως, δεν βοηθούν στην κατανόηση εσωτερικών προβλημάτων ποιότητας του συστήματος παραγωγής, αλλά παρέχουν μια σφαιρική εκτίμηση των ικανοτήτων του. Ο δείκτης ποιότητας διεργασίας C_p είναι προσανατολισμένος στις διεργασίες που πραγματοποιούνται εσωτερικά σ' ένα σύστημα παραγωγής και ορίζεται ως:

$$C_p = \frac{\text{ανοχή}}{6 \times \text{τυπική απόκλιση}}$$

Η *ανοχή* (tolerance) ορίζεται ως το διάστημα των τιμών, μέσα στο οποίο τα ιδιαίτερα διαστασιακά χαρακτηριστικά του προϊόντος είναι αποδεκτά και η *τυπική απόκλιση* (standard deviation) προέρχεται από την κατανομή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών ή διαστάσεων, όπως αυτές παράγονται από την συγκεκριμένη διεργασία. Το μέτρο αυτό είναι προσανατολισμένο στην διεργασία και μπορεί να χρησιμοποιείται για την σύγκριση ανάμεσα σε διεργασίες. Όμως, είναι δύσκολο να ερμηνευθεί φυσικά και να βοηθήσει στον συνυπολογισμό και άλλων ιδιοτήτων (π.χ. του κόστους) ενός συγκεκριμένου συστήματος παραγωγής. Η *συνάρτηση απώλειας ποιότητας* [13], η οποία θα εξηγηθεί παρακάτω με την βοήθεια παραδείγματος, είναι ένας τρόπος μέτρησης της απώλειας που εμφανίζεται, όταν τα χαρακτηριστικά της ποιότητας ενός προϊόντος αποκλίνουν από την τιμή, που έχει οριστεί ως στόχος εντός ή εκτός καθορισμένων ανοχών.

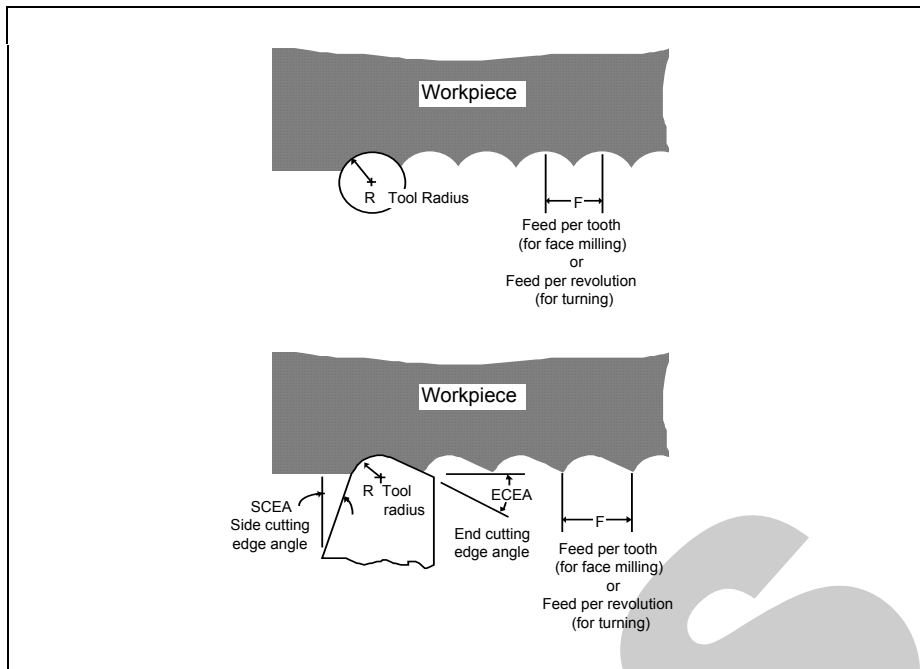


Feed Per Revolution or Per Tooth, in =
Τροφοδοσία ανά Περιστροφή ή ανά Οδόντα σε
ίντσες

Theoretical Surface Roughness, $\mu\text{in } R_a$ =
Θεωρητική Επιφανειακή Τραχύτητα σε μικρο-
ίντσες R_a

Σχήμα 1.22 Η θεωρητική Ποιότητα Επιφάνειας ως Συνάρτηση της Πρόωσης για Κατεργασία Φρέζας ή Τόρνου με Στρογγυλές Κοπτικές Ακμές

Μέτρα της ποιότητας –όπως το κόστος εγγύησης ή ακόμα και ο δείκτης ποιότητας διεργασίας C_p ή η συνάρτηση απώλειας ποιότητας– έχουν έναν συνολικό χαρακτήρα και δεν συνδέονται αναγκαστικά με την φυσική σημασία της διεργασίας. Όμως, η ποιότητα της επιφάνειας συχνά συνδέεται περισσότερο με την φυσική έννοια μιας διεργασίας. Είναι ιδιαίτερα σημαντική για την βιομηχανία κατεργασίας μετάλλου και την μηχανουργική βιομηχανία και μετράται με την χρήση ηλεκτρομηχανικών συσκευών. Στις διεργασίες αφαίρεσης υλικού, η ποιότητα επιφάνειας σχετίζεται άμεσα [2] με την πρόωση (Σχ. 1.22), που είναι μια τυπική μεταβλητή στην διαδικασία λήψης αποφάσεων, η οποία πρέπει να επιλεγεί πριν ξεκινήσει η διαδικασία.



R , Tool Radius = R , ακτίνα κοπτικού εργαλείου
 Feed per tooth (for face milling) = Τροφοδοσία ανά οδόντα (για μετωπικό φρεζάρισμα)
 Feed per revolution (for turning) = Τροφοδοσία ανά περιστροφή (για τόννευση)

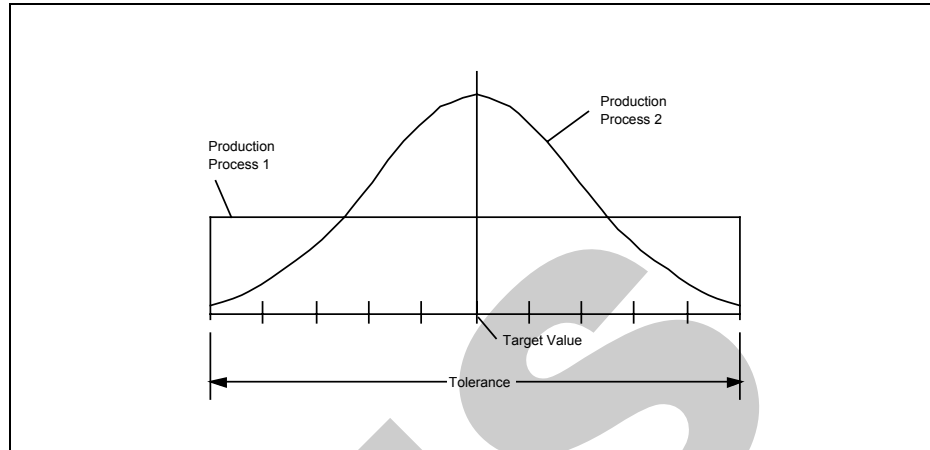
Side cutting edge angle (SCEA) = Πλευρική γωνία κοπής (για μετωπικό φρεζάρισμα)
 End cutting edge angle (ECEA) = Τελική γωνία κοπής

Σχήμα 1.23 Θεωρητικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά της Τραχύτητας της Επιφάνειας για Κατεργασίες Τόρνον και Φρέζας

Αυτό, γιατί ο μηχανισμός δημιουργίας της επιφάνειας στην μηχανουργική κατεργασία είναι τέτοιος, ώστε η ποιότητα επιφάνειας [2] καθορίζεται από την ταχύτητα της σχετικής κίνησης (Σχ. 1.23) του εργαλείου και του κομματιού (βλέπε Κεφάλαιο 2). Είναι, ωστόσο, ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε, ότι η πρόωση επηρεάζει όχι μόνο την επιφανειακή ποιότητα αλλά και τον ρυθμό παραγωγής και το κόστος της κατεργασίας. Μεγαλύτερες προώσεις παράγουν περισσότερα εξαρτήματα ανά μονάδα χρόνου με χειρότερη, όμως, ποιότητα επιφάνειας. Επιπλέον, μεγαλύτερες προώσεις μπορεί να προκαλέσουν μεγαλύτερη φθορά στα εργαλεία και έτσι να αυξήσουν το κόστος λειτουργίας της διεργασίας. Έτσι βλέπουμε, ότι στην περίπτωση των μηχανουργικών κατεργασιών, ένας συνυπολογισμός μεταξύ διαφορετικών ιδιοτήτων βοηθούν την προσαρμογή της διεργασίας, ώστε η τελευταία να ανταποκρίνεται στους διαφορετικούς κατά περίπτωση στόχους.

Παράδειγμα

Το Σχήμα 1.24 [14] δείχνει δυο διαφορετικές διεργασίες, οι οποίες παράγουν το ίδιο προϊόν αλλά με διαφορετικές κατανομές ενός ιδιαίτερου χαρακτηριστικού της ποιότητας.



Production Process 1 = Παραγωγική Διαδικασία 1 Tolerance = Ανοχή
 Production Process 2 = Παραγωγική Διαδικασία 2 Target Value= Τιμή Στόχος

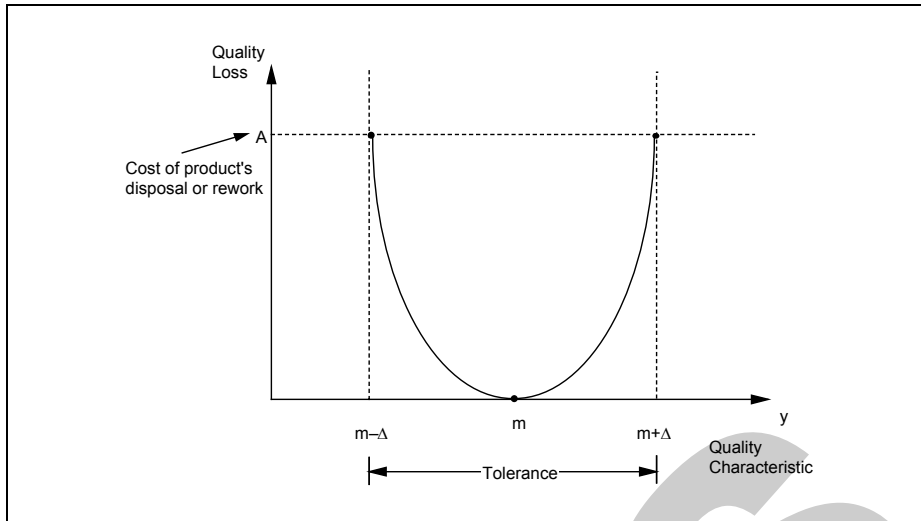
Σχήμα 1.24 Οι Κατανομές ενός Χαρακτηριστικού Ποιότητας για τις Διαδικασίες Παραγωγής 1 και 2

Υποθέτοντας ότι η ανοχή είναι 10 μονάδες και η τυπική απόκλιση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας 2,89 και 1,67 αντίστοιχα, οι δείκτες ποιότητας διεργασίας C_p για τις δύο προαναφερθείσες διεργασίες μπορούν να υπολογισθούν ως ακολούθως:

$$C_{p1} = \frac{10}{6 \times 2,89} = 0.56 \text{ για την παραγωγική διεργασία 1}$$

$$C_{p2} = \frac{10}{6 \times 1,67} = 1.00 \text{ για την παραγωγική διεργασία 2}$$

Εναλλακτικά, μια συνάρτηση απώλειας ποιότητας $L(y)$ μετρά την απώλεια που προκύπτει, όταν ένα χαρακτηριστικό ποιότητας (y) αποκλίνει από μια προκαθορισμένη τιμή m (Σχ. 1.25).



Quality Loss = Απόλεια Ποιότητας
 Cost of product's disposal or rework = Κόστος απόρριψης ή επανεπεξεργασίας προϊόντος

Tolerance = Ανοχή
 Quality Characteristic = Χαρακτηριστικό Ποιότητας

Σχήμα 1.25 Η Συνάρτηση Απόλειας Ποιότητας

Με A συμβολίζεται η απώλεια λόγω ελαττωματικού εξαρτήματος, η οποία αντιπροσωπεύει την χρηματική αξία αναπαραγωγής ή επισκευής του [14]. Εάν σ' ένα προϊόν που παράγεται, η τιμή του χαρακτηριστικού y της ποιότητας είναι ακριβώς ίδια με την τιμή του στόχου m , τότε δεν υπάρχει απώλεια για το εξάρτημα. Κάποιος μπορεί να υποθέσει, ότι η απώλεια ποιότητας αυξάνει εκθετικά (Σχ. 1.25), καθώς το χαρακτηριστικό ποιότητας του προϊόντος απομακρύνεται από την προκαθορισμένη τιμή m . Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων, η συνάρτηση της απώλειας ποιότητας μπορεί να γραφεί με την μορφή σειράς Taylor:

$$L(y) = L(m) + \frac{L'(m)}{1!}(y - m) + \frac{L''(m)}{2!}(y - m)^2 + \dots$$

ή αγνοώντας όρους ανώτερης τάξης,

$$L(y) = L(m) + \frac{L'(m)}{1!}(y - m) + \frac{L''(m)}{2!}(y - m)^2$$

Μια και δεν υπάρχει απώλεια στην τιμή m , $L(m)=0$. Επιπλέον, μια και η απώλεια στα $y = m - \delta$ και $y = m + \delta$ (όπου δ , μικρός θετικός αριθμός) θα πρέπει να είναι μικρή και θετική, υποθέτουμε ότι $L'(m) = 0$. Οπότε:

$$L(y) = (m) + \frac{L''(m)}{2!}(y - m)^2 = K(y - m)^2$$

Όταν το χαρακτηριστικό ποιότητας y είναι στο όριο της ανοχής και αποκλίνει κατά Δ από την τιμή στόχο, έστω $y = m + \delta$, τότε η τιμή της συνάρτησης απώλειας είναι A :

$$L(m + \Delta) = K(m + \Delta - m)^2 = K\Delta^2 = A$$

Οπότε, $K = A/\Delta^2$ και

$$L(y) = \frac{A}{\Delta^2}(y - m)^2$$

Το ακόλουθο αριθμητικό παράδειγμα αποσαφηνίζει τον παραπάνω ορισμό της συνάρτησης απώλειας ποιότητας.

Έστω ότι το κόστος ελαττωματικού είναι $A = \$2$ και η ανοχή 10 (από το οποίο συνεπάγεται, ότι $\Delta = 5$ και έστω ότι θεωρούμε δύο διαδικασίες 1 και 2 με διασπορά (variance) από τον στόχο $(y - m)^2$ ίση με $2,89^2$ και $1,67^2$ αντίστοιχα. Τότε, η συνάρτηση απώλειας για τις δύο διαδικασίες υπολογίζεται ως:

$$L_1 = \frac{2}{5^2} \times 2,89 = \$0,69 \text{ ανά κομμάτι για την διαδικασία 1}$$

$$L_2 = \frac{2}{5^2} \times 1,67^2 = \$0,22 \text{ ανά κομμάτι για την διαδικασία 2}$$

Βιβλιογραφία

1. —, *NSF Report on Research Priorities for Proposed NSF Strategic Manufacturing Research Institute*. Dr. E.M. Merchant, Workshop Chairman. March 11-12, 1987.
2. —, *Machining Data Handbook, 3rd Edition, Vol. 2*, Metcut Research Associates Inc., 1980.
3. Browne, J., K. Rathmill, S.P. Sethi and K.E. Stecke, "Classification of Flexible Manufacturing Systems," *The FMS Magazine* (April 1984), pp. 114–117.
4. Buzacott, J.A., "The Fundamental Principles of Flexibility in Flexible Manufacturing Systems," *Proceedings of the First International Conference on Flexible Manufacturing Systems* (1982), Amsterdam, N. Holland, pp. 13–22.
5. Falkner, C.H., "Flexibility in Manufacturing Plants," *Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference of Flexible Manufacturing Systems: Operations Research Models and Applications* (1986). K.E. Stecke and R. Suri, Editors. pp. 95–106.
6. Barad, M. and D. Sipper, "Flexibility in Manufacturing Systems: Definitions and Petri Net Modelling," *International Journal of Production Research* (Vol. 26, No. 2, 1988), pp. 237–248.
7. Kumar, V., "Entropic Measures of Manufacturing Flexibility," *International Journal of Production Research* (Vol. 25, No. 7, 1987), pp. 957–966.
8. Kumar, V., "On Measurement of Flexibility in Flexible Manufacturing Systems: An Information–Theoretic Approach," *Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference of Flexible Manufacturing Systems: Operations Research Models and Applications* (1986). K.E. Stecke and R. Suri, Editors. pp. 131–143.
9. Brill, P.H. and M. Mandelbaum, "On Measures of Flexibility in Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research* (Vol. 27, No. 5, 1989), pp. 747–756.
10. Makino, H., "Versatility Index – An Indicator for Assembly System Selection," *Annals of the CIRP* (Vol. 39, No. 1, 1990), pp. 15-18.
11. Primrose, P.L. and R. Leonard, "Conditions Under Which Flexible Manufacturing is Financially Viable," *Proceedings of the Third International Conference on Flexible Manufacturing Systems* (1984), pp. 121–132.
12. Son, Y.K. and S.P. Chan, "Quantifying Opportunity Costs Associated With Adding Manufacturing Flexibility," *International Journal of Production Research* (Vol. 28, No. 7, 1990), pp. 1183-1194.
13. Srinivasan, V. and R.A. Millen, "Evaluating Flexible Manufacturing Systems as a Strategic Investment," *Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems: Operations Research Models and Applications* (1986). K.E. Stecke and R. Suri, Editors. pp. 83-93.
14. Taguchi, G., E.A. Elsayed and T. Hsiang, *Quality Engineering in Production Systems*, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1989.

15. Dertouzos, M.L., R.K. Lester, R.M. Solow and The MIT Commission on Industrial Policy, *Made in America: Regaining the Productive Edge*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1989.
16. —, *World Economic Survey 1990, Current Trends and Policies in the World Economy*, United Nations, New York, 1990.
17. —, *Economic Survey of Europe in 1989-1990*, United Nations, New York, 1990.
18. —, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Fourth Edition*, Society of Manufacturing Engineers. Charles Wick, Editor-in-Chief. 1987.
19. Bloch, H.P. and F.K. Geitner, *An Introduction to Machinery Reliability Assessment*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
20. Feigenbaum, A.V., *Total Quality Control*, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1983.
21. Phadke, M.S., *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.

LMS

2 ΣΥΝΟΨΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Μία παραγωγική διεργασία ορίζεται ως η χρήση ενός ή περισσότερων φυσικών μηχανισμών για την μεταβολή του σχήματος ή/και της μορφής ενός υλικού. Οι παραγωγικές διεργασίες μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω σε *διεργασίες διακριτών κομματιών (Discrete Parts)* και σε *συνεχείς (Continuous) διεργασίες*. Η μεταλλουργική βιομηχανία, στην οποία παράγονται πολλά ξεχωριστά εξαρτήματα, χρησιμοποιεί παραγωγικές διεργασίες διακριτών κομματιών. Οι χημικές διεργασίες –που χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, στις βιομηχανίες παραγωγής φιλμ ή νημάτων– χρησιμοποιούν συνεχείς παραγωγικές διεργασίες. Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε κυρίως με τις παραγωγικές διεργασίες διακριτών κομματιών.

Οι παραγωγικές διεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε κατηγορίες:

1. *Διεργασίες σχηματισμού ή αρχικού σχηματισμού (Forming or Primary Forming Processes)* –διεργασίες, στις οποίες ένα σχήμα παράγεται από υλικό που βρίσκεται σε τηγμένη ή αέρια κατάσταση ή από στερεά σωματίδια ακαθορίστου σχήματος. Κατά την διάρκεια των διεργασιών αρχικού σχηματισμού, δημιουργούνται κατά κανόνα δυνάμεις συνοχής μεταξύ των σωματιδίων.
2. *Διεργασίες Διαμόρφωσης (Deforming Processes)* –διεργασίες, οι οποίες μετατρέπουν το αρχικό σχήμα ενός στερεού σε ένα άλλο σχήμα χωρίς ν' αλλάξουν την μάζα ή την σύνθεση του υλικού. Κατά την διάρκεια αυτών των διεργασιών, διατηρείται η συνοχή ανάμεσα στα σωματίδια.
3. *Διεργασίες αφαίρεσης υλικού (Removing Processes)* –διεργασίες, στις οποίες πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού κατά την εξέλιξη της διεργασίας. Η συνοχή ανάμεσα στα σωματίδια καταστρέφεται.
4. *Διεργασίες συνένωσης (Joining Processes)* –διεργασίες, οι οποίες ενώνουν μεμονωμένα κομμάτια για τον σχηματισμό υποσυναρμο-

λογήσεων ή τελικών προϊόντων. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν και τις προσθετικές διεργασίες όπως την πλήρωση και τον εμποτισμό κομματιών. Η συνοχή ανάμεσα στα σωματίδια αυξάνεται.

5. *Διεργασίες τροποποίησης των ιδιοτήτων του υλικού (Material Properties Modification Processes)* –διεργασίες, οι οποίες εσκεμμένα μεταβάλλουν τις ιδιότητες ενός κομματιού, ώστε να επιτευχθούν επιθυμητά χαρακτηριστικά χωρίς να μεταβληθεί το σχήμα του.

Αυτές οι κατηγορίες διεργασιών εφαρμόζονται σε μια ποικιλία τεχνικών υλικών, τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν σε μέταλλα (Metals), κεραμικά (Ceramics), πολυμερή (Polymers) και σύνθετα (Composites) υλικά. Ο Πίνακας 2.1 δείχνει τις εφαρμογές των διαφορετικών διεργασιών στα διαφορετικά υλικά.

		PROCESSES				
		Forming	Deforming	Removing	Joining	Modifying
MATERIALS	Metals	XX	XX	XX	XX	XX
	Ceramics	XX	--	X	--	--
	Polymers	XX	X	X	X	--
	Composites	XX	--	X	X	--

XX: Widely used
X : Seldom used
-- : Not used

Processes = Διεργασίες
Forming = Σχηματισμού
Deforming = Διαμόρφωσης
Removing = Αφαίρεσης Υλικού
Joining = Συνένωσης
Modifying = Τροποποίησης
Materials = Υλικά

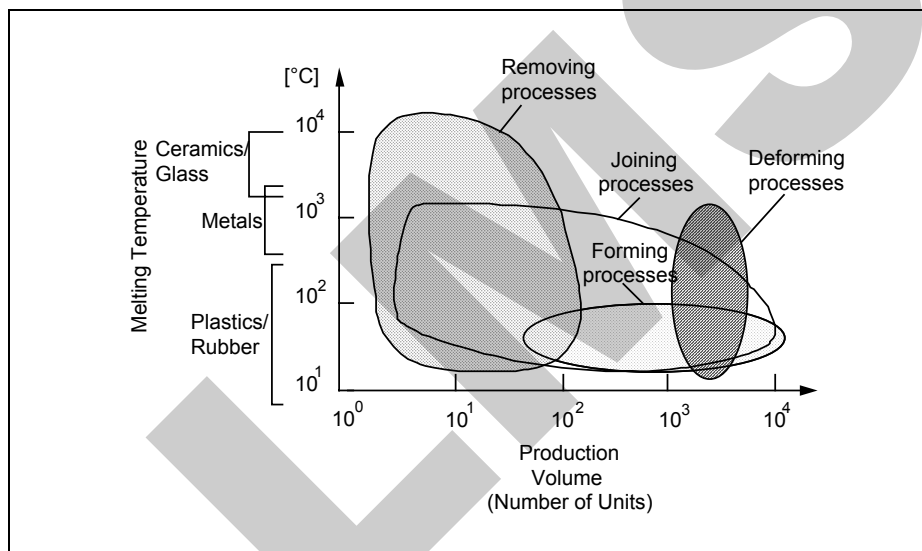
Metal = Μέταλλα
Ceramics = Κεραμικά
Polymers = Πολυμερή
Composites = Σύνθετα
XX: Widely used = Χρησιμοποιούνται ευρέως
X : Seldom used = Χρησιμοποιούνται σπάνια
-- : Not used = Δεν χρησιμοποιούνται

Πίνακας 2.1 Τα Υλικά και οι Διεργασίες

Η επιλογή της διεργασίας, που θα εφαρμοσθεί σ' ένα συγκεκριμένο υλικό, εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων που επηρεάζουν το κόστος, την παραγωγικότητα (Production Rate), την ευελιξία (Flexibility) και την ποιότητα (Part Quality). Πιθανότατα οι δυο σπουδαιότεροι παράγοντες (Σχ. 2.1) είναι:

Το μέγεθος της παρτίδας (Lot Size) των εξαρτημάτων που θα παραχθούν. Μικρές παρτίδες απαιτούν ευέλικτες διεργασίες –όπως οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού, οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά κ.τ.λ. Οι μεγάλες παρτίδες επιτρέπουν την χρήση διεργασιών αρχικού σχηματισμού ή διαμόρφωσης. Από την στιγμή που το κόστος παραγωγής των εργαλείων που απαιτούν οι διεργασίες αυτές είναι μεγάλο, απαιτείται η παραγωγή μιας μεγάλης παρτίδας κομματιών για την απόσβεση του κόστους αυτού.

Οι φυσικές ιδιότητες του υλικού (π.χ. σημείο τήξης). Τα μέταλλα έχουν σχετικά υψηλές θερμοκρασίες τήξης και γι' αυτό συνήθως η επεξεργασία τους γίνεται σε στερεά μορφή με την χρήση διεργασιών διαμόρφωσης και αφαίρεσης υλικού. Τα πολυμερή και τα σύνθετα υλικά έχουν αρκετά χαμηλότερα σημεία τήξης, επιτρέποντας την χρήση διεργασιών αρχικού σχηματισμού, όπου το υλικό βρίσκεται συνήθως σε υγρή φάση. Παρ' όλ' αυτά, συχνά απαιτούνται δευτερεύουσες επεξεργασίες –συχνότερα λείανση, για την επίτευξη της επιθυμητής διαστασιολογικής ακρίβειας και επιφανειακής ποιότητας. Επειδή αυτά τα υλικά περιέχουν οπλισμό από τρυχαείς ίνες (Fibers, Fillers), συχνά παρουσιάζουν ασυνεχή συμπεριφορά, όταν η επεξεργασία τους γίνεται με συμβατικές μηχανουργικές διεργασίες. Τα κεραμικά είναι ψαθυρά υλικά, γεγονός, που καθιστά δύσκολη την επεξεργασία τους σε στερεά μορφή με συμβατικές μηχανουργικές τεχνικές. Για την επεξεργασία των κεραμικών χρησιμοποιούνται διεργασίες αρχικού σχηματισμού για την παραγωγή του βασικού σχήματος του κομματιού και στην συνέχεια χρησιμοποιούνται δευτερεύουσες διεργασίες (συνήθως μηχανουργικές), για την επίτευξη του τελικού σχήματος καθώς και της ποιότητας της επιφάνειας.



Melting Temperature = Θερμοκρασία Τήξης

Production Volume = Όγκος Παραγωγής

Number of Units = Αριθμός Μονάδων

Ceramics = Κεραμικά

Glass = Γυαλί

Metals = Μέταλλα

Plastics = Πλαστικά

Rubber = Ελαστικά

Forming Processes = Διεργασίες Σχηματισμού

Deforming Processes = Διεργασίες Διαμόρφωσης

Removing Processes = Διεργασίες Αφαίρεσης Υλικού

Joining Processes = Διεργασίες Συνένωσης

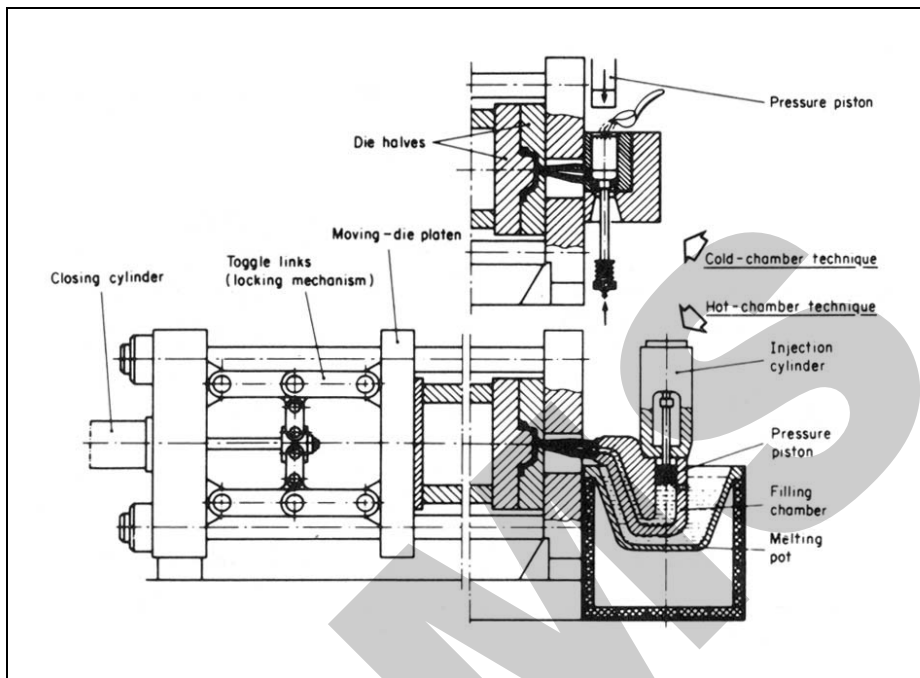
Σχήμα 2.1 Η Επίδραση του Σημείου Τήξης και του Μεγέθους της Παραγωγής στην Εφαρμογή των Παραγωγικών Διεργασιών

2.2 Διεργασίες Αρχικού Σχηματισμού (Primary Forming Processes)

Οι διεργασίες αρχικού σχηματισμού παράγουν την τελική μορφή του κομματιού είτε μέσω της στερεοποίησης ενός υγρού ή ατμών είτε μέσω της συσσωμάτωσης κόκκων. Οι διεργασίες σχηματισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε όλες τις κατηγορίες των τεχνικών υλικών. Από τις διεργασίες αρχικού σχηματισμού, η χύτευση (Casting) εφαρμόζεται ευρύτατα στην βιομηχανία. Με τον όρο χύτευση περιγράφεται μια οικογένεια εφαρμογών, στις οποίες τηγμένο μέταλλο εισάγεται σ' ένα καλούπι (Mold) και στην συνέχεια στερεοποιείται. Διεργασίες χύτευσης μετάλλων χρησιμοποιούνται, όταν παράγονται κομμάτια μεγάλου μεγέθους –που πιθανόν έχουν πολύπλοκα σχήματα και εσωτερικές κοιλότητες και παρουσιάζουν συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή, ψαθυρότητα ή σκληρότητα, που καθιστούν δύσκολη την παραγωγή τους με άλλες μεθόδους. Οι διεργασίες χύτευσης παρουσιάζουν περιορισμούς, όσον αφορά την επιφανειακή ποιότητα, το πορώδες του υλικού και κατ' επέκταση την αντοχή των παραγόμενων κομματιών. Γενικά οι διεργασίες χύτευσης χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σχετικά μεγάλων παρτίδων, έτσι ώστε να μπορεί να δικαιολογηθεί το υψηλό κεφάλαιο που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός χυτηρίου. Παρ' όλ' αυτά πρέπει να σημειωθεί, ότι κάποιες διεργασίες χύτευσης δεν χαρακτηρίζονται ως διεργασίες εντάσεως κεφαλαίου και επένδυσης.

Η χύτευση σε μήτρες (Die Casting) είναι μια ευρύτατα διαδεδομένη διεργασία, στην οποία το τηγμένο υλικό εισέρχεται στην κοιλότητα της μήτρας με πίεση, που κυμαίνεται από 0,7 ως 700 Mpa (0,1 ως 100 ksi). Ανάμεσα στα κομμάτια που παράγονται με την μέθοδο αυτή συγκαταλέγονται καρμπυρατέρ, κινητήρες, εργαλεία και παιχνίδια [1]. Το βάρος των περισσότερων χυτών κυμαίνεται από 90 gr έως περίπου 25 kg. Οι μηχανές χύτευσης μπορεί να είναι οριζόντιες ή κάθετες. Στις μηχανές αυτές απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων δυνάμεων σύσφιξης κατά την διάρκεια της χύτευσης, προκειμένου να παραμένουν κλειστές οι μήτρες. Οι μηχανές κατατάσσονται σύμφωνα με την δύναμη σύσφιξης που μπορούν να προσδώσουν, η οποία κυμαίνεται από 25 έως 3.000 τόνους. Η χύτευση σε μήτρες χωρίζεται σε διεργασίες θερμού θαλάμου (Hot Chamber) και ψυχρού θαλάμου (Cold Chamber). Η διεργασία θερμού θαλάμου περιλαμβάνει την χρησιμοποίηση ενός εμβόλου [2], το οποίο παγιδεύει ένα συγκεκριμένο όγκο τηγμένου μετάλλου και τον πιέζει μέσα στην κοιλότητα της μήτρας (Σχ. 2.2). Το μέταλλο παραμένει υπό πίεση, έως ότου στερεοποιηθεί μέσα στην μήτρα, η οποία ψύχεται με την κυκλοφορία νερού ή λαδιού. Ανάλογα με το μέγεθος του κομματιού, ο ρυθμός παραγωγής μπορεί να φθάσει σε υψηλές τιμές της τάξης των 18.000 κομματιών την ώρα. Τα κράματα χαμηλού σημείου τήξης –όπως ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος και ο μόλυβδος– χυτεύονται ευρέως με την μέθοδο αυτή, αφού δεν επιφέρουν φθορές στην μηχανή, η οποία είναι κατασκευασμένη από ατσάλι και χυτοσίδηρο. Όταν χυτεύονται υλικά όπως ο μπρούτζος, το μαγνήσιο ή το

αλουμίνιο, χρησιμοποιούνται διεργασίες και μηχανές ψυχρού θαλάμου, εξ αιτίας του υψηλού σημείου τήξης των υλικών αυτών [2], καθώς και της διαβρωτικής επίδρασης που έχουν στον σίδηρο και στο ατσάλι. Στην μηχανή ψυχρού θαλάμου (Σχ. 2.3) χρησιμοποιείται μια «κουτάλα» για την μετάγγιση του τηγμένου υλικού στον κύλινδρο έγχυσης (Injection Cylinder). Ο κύλινδρος έγχυσης δεν είναι θερμαινόμενος και το μέταλλο εισάγεται στην κοιλότητα με πιέσεις, που κυμαίνονται από 20 έως 70 Mpa (ksi).

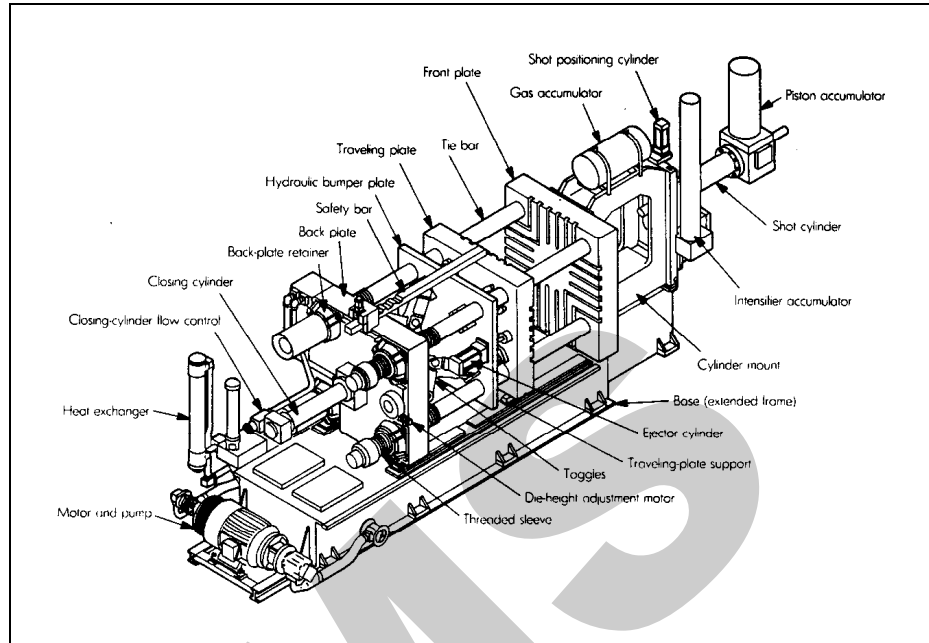


Cold-Chamber Technique = Τεχνική Ψυχρού Θαλάμου	Toggle Links = Σύνδεσμοι
Pressure Piston = Πιστόνι Συμπίεσης	Locking Mechanism = Μηχανισμός Ασφάλισης
Die Halves = Τμήματα Καλουπιού	Closing Cylinder = Κύλινδρος Κλεισίματος Καλουπιού
Hot-Chamber Technique = Τεχνική Θερμού Θαλάμου	Injection Cylinder = Κύλινδρος Έγχυσης
Moving-Die Platen = Έμβολο Μετακινούμενου Καλουπιού	Pressure Piston = Έμβολο Συμπίεσης
	Filling Chamber = Θάλαμος Πλήρωσης
	Melting Pot = Δοχείο Τήξης

Σχήμα 2.2 Μηχανές Χύτευσης Ψυχρού και Θερμού Θαλάμου [2]

Η φυγοκεντρική χύτευση (*Centrifugal Casting*) είναι μια άλλη πολύ σημαντική μέθοδος χύτευσης, με την οποία παράγονται κοίλα κυλινδρικά κομμάτια όπως σωλήνες, κάνες όπλων και κολώνες φωτισμού [2]. Η περιγραφή της διεργασίας παρουσιάζεται στο (Σχ. 2.4). Το τηγμένο μέταλλο εισέρχεται σ' ένα περιστρεφόμενο καλούπι κατασκευασμένο από ατσάλι, σίδηρο ή γραφίτη, το οποίο φέρει συνήθως εσωτερική ανθεκτική επένδυση, η οποία εξασφαλίζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ο άξονας περιστροφής του καλουπιού μπορεί να είναι [2]

κάθετος (Σχ. 2.4) ή οριζόντιος (Σχ. 2.5). Με την χρήση αυτής της μεθόδου μπορούν να παραχθούν χυτά καλής ποιότητας και διαστασιολογικής ακρίβειας. Τα παραγόμενα κομμάτια είναι κυλινδρικά με διάμετρο, που κυμαίνεται από 13 mm έως 3 m και με πάχος τοιχώματος, που ποικίλει από 6–125 mm.



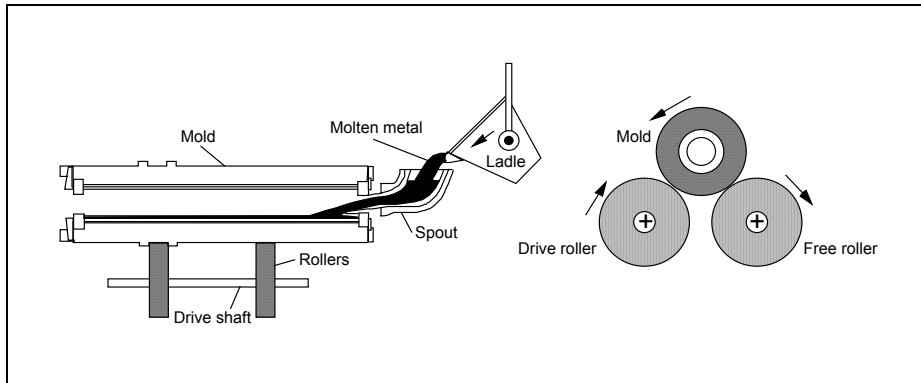
Hydraulic Unit = Υδραυλική Μονάδα
Height Adjustment = Ρύθμιση Ύψους
Die-Closing Section = Τμήμα Κλεισίματος του Καλουπιού
Ejection Unit = Μονάδα Εξαγωγής

Injection Cylinder = Κύλινδρος Έγχυσης
Moving-Head Platen = Έμβολο Μετακινούμενης Κεφαλής
Closing Shafts = Άξονες Κλεισίματος

Σχήμα 2.3 Μηχανή Χύτευσης Ψυχρού Θαλάμου [2]

Οι μήτρες (Dies) για κομμάτια με πολύπλοκα χαρακτηριστικά ή μεγάλα μεγέθη είναι συχνά δύσκολο να σχεδιασθούν και να κατασκευασθούν. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η χύτευση σε άμμο (Sand Casting) για την παραγωγή κομματιών, που ποικίλουν από μπιανιέρες χυτοσιδήρου μέχρι μηχανές αυτοκινήτων. Στην χύτευση σε άμμο κατασκευάζεται ένα πρότυπο του κομματιού, που πρόκειται να παραχθεί, από ένα μπλοκ αφρώδους υλικού. Το πρότυπο αυτό τοποθετείται σε ένα δοχείο και περιβάλλεται από λεπτόκοκκη πεπιεσμένη άμμο. Στην συνέχεια τηγμένο μέταλλο μεταγγίζεται στο πρότυπο, προκαλώντας την αποσύνθεση του αφρώδους υλικού, το οποίο, υποχωρώντας, αφήνει την κοιλότητα που δημιουργείται να πληρωθεί από το μέταλλο. Μετά την αφαίρεση της άμμου απομένει το μεταλλικό κομμάτι. Με την χύτευση σε άμμο είναι δυνατόν να κατασκευασθούν εσωτερικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι αδύνατο να παραχθούν με την χύτευση σε μήτρες. Μειονέκτημα της

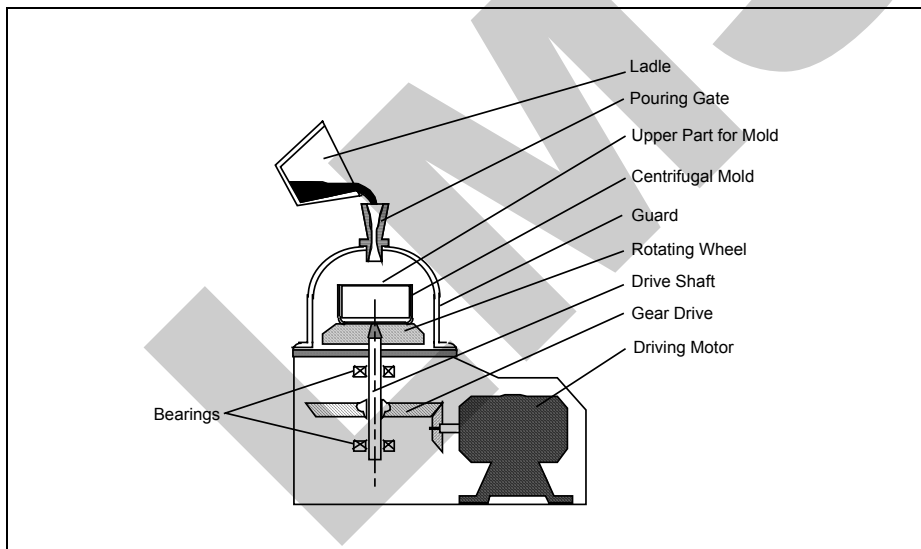
μεθόδου είναι, ότι κάθε φορά πρέπει να κατασκευασθεί ένα ξεχωριστό πρότυπο για κάθε κομμάτι που θα παραχθεί.



Mold = Μήτρα
 Molten Material = Τηγμένο Υλικό
 Ladle = “Κουτάλα”
 Spout = Στόμιο Εκροής

Rollers = Περιστρεφόμενοι Κύλινδροι (Ράουλα)
 Drive Roller = Οδηγός Κύλινδρος
 Free Roller = Ελεύθερος Κύλινδρος
 Drive Shaft = Κινητήριος Άξονας

Σχήμα 2.4 Φυγοκεντρική Χύτευση

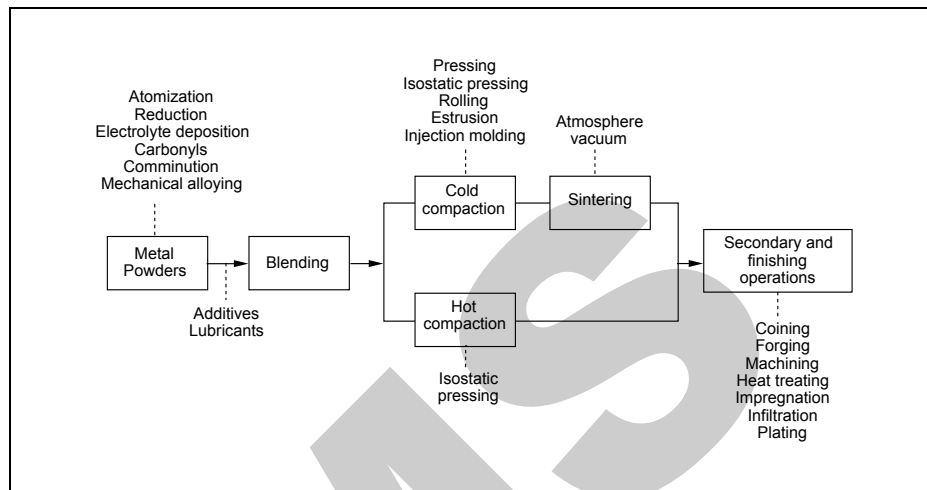


Ladle = “Κουτάλα”
 Pouring Gate = Θύρα Εισαγωγής
 Upper Part of Mold = Άνω Μέρος του Καλουπιού
 Centrifugal Mold = Φυγοκεντρικό Καλούπι
 Guard = Περίβλημα

Rotating Wheel = Περιστρεφόμενος Τροχός
 Drive Shaft = Κινητήριος Άξονας
 Gear Drive = Κινητήριο Γρανάζι
 Driving Motor = Κινητήρας
 Bearings = Έδρανα

Σχήμα 2.5 Μηχανή Οριζόντιας Φυγοκεντρικής Χύτευσης

Η επικαλυπτική χύτευση (*Investment Casting*) είναι μια παρόμοια διεργασία με την χύτευση σε άμμο, στην οποία ένα κεραμικό υλικό επικαλύπτει ένα κέρινο πρότυπο. Όταν επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος της επικάλυψης, απομακρύνεται το κερί με θέρμανση, αφήνοντας ένα κεραμικό κέλυφος γύρω από μια κοιλότητα. Το τηγμένο μέταλλο μεταγγίζεται στην κοιλότητα και ψύχεται. Στην συνέχεια απομακρύνεται το κεραμικό κέλυφος και παράγεται το μεταλλικό κομμάτι. Η επικαλυπτική χύτευση έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την παραγωγή πτερυγίων για τουρμπίνες από κράματα με υψηλό σημείο τήξης.



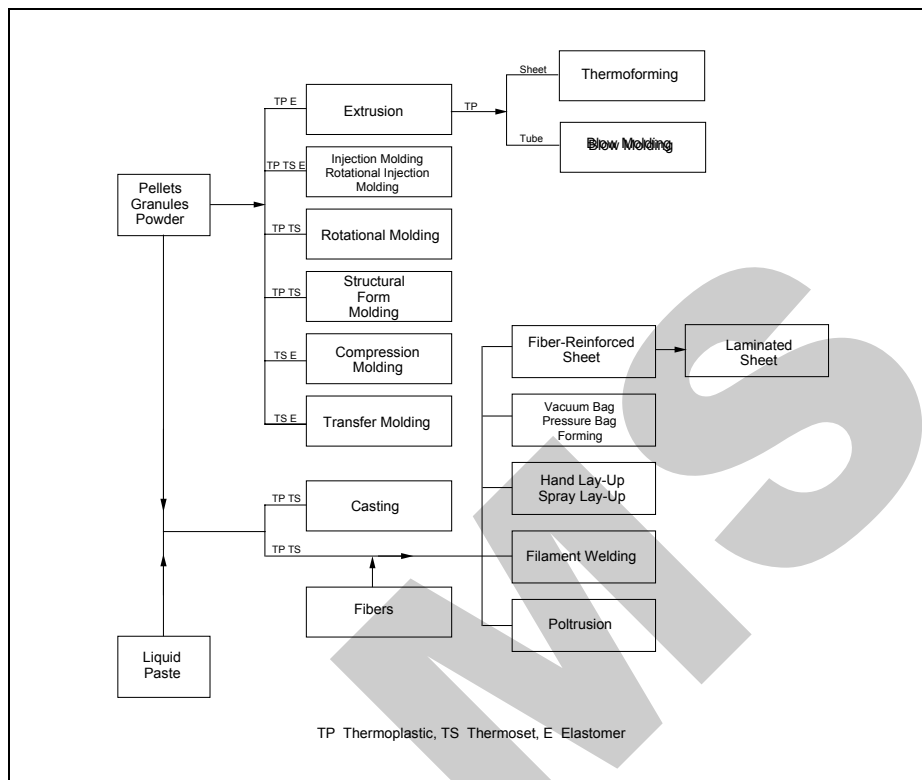
Atomization Reduction = Ψεκασμός
 Electrolyte Deposition = Ηλεκτρολυτική
 Εναπόθεση
 Carbonyls Comminution = Κονιοποίηση
 Καρβονυλίων
 Mechanical Alloying = Μηχανική Κραματοποίηση
 Metal Powders = Μεταλλικές Σκόκες
 Additives = Πρόσθετα
 Lubricants = Λιπαντικά
 Blending = Μίξη
 Pressing = Συμπίεση
 Isostatic Pressing = Ισοστατική Συμπίεση
 Rolling = Εξέλαση
 Estrusion = Διέλαση
 Injection Molding = Χύτευση με Εξαναγκασμένη

Έγχυση
 Cold Compaction = Ψυχρή Συμπύκνωση
 Hot Compaction = Θερμή Συμπύκνωση
 Atmosphere Vacuum = Ατμοσφαιρικές Συνθήκες
 Sintering = Πυροσυσσωμάτωση
 Forging = Σφυρηλάτηση
 Machining = Μηχανική Επεξεργασία
 Heat Treating = Θερμική Επεξεργασία
 Impregnation = Εμποτισμός
 Infiltration = Διήθηση
 Plating = Επιμετάλλωση
 Secondary and Finishing Operations =
 Δευτερεύουσες διεργασίες και διεργασίες
 φινιρίσματος

Σχήμα 2.6 Η Αλληλουχία των Διεργασιών στην Κονιομεταλλουργία

Στην χύτευση μετάλλων, η πρώτη ύλη βρίσκεται σε μορφή τήγματος και το υλικό παίρνει το σχήμα του κομματιού που θα παραχθεί κατά την διάρκεια της διαδικασίας στερεοποίησης. Στην *κονιομεταλλουργία (Powder Metallurgy)*, η οποία ανήκει επίσης στην κατηγορία των διεργασιών αρχικού σχηματισμού, η πρώτη ύλη είναι σκόνη, η οποία συμπιέζεται σε κατάλληλες μήτρες και στην συνέχεια πυροσυσσωμάτωναται (θερμαίνεται χωρίς να τηχθεί). Κατά την δι-

άρκεια της πυροσυσσωμάτωσης (sintering), οι στερεοί μεταλλικοί κόκκοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω τοπικής συγκόλλησης χωρίς να λιώσουν. Η κονιομεταλλουργία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή κομματιών όπως γρανάζια, κάμες, κουζινέτα, κοπτικά εργαλεία και φίλτρα [1]. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η αλληλουχία των διαδικασιών, που εμπλέκονται για την κατασκευή κομματιών με την μέθοδο της κονιομεταλλουργίας.



Pellets = Σφαιρίδια

Granules = Κόκκοι

Powder = Σκόνη

Liquid Paste = Υγρή Πάστα

Extrusion = Διέλαση

Injection Molding = Χύτευση με Εξαναγκασμένη Έγχυση

Rotational Injection Molding = Περιτροφική Χύτευση με Εξαναγκασμένη Έγχυση

Rotational Molding = Περιτροφική Χύτευση

Structural Form Molding =

Compression Molding = Χύτευση υπό Πίεση

Transfer Molding = Χύτευση με Μετάγγιση

Casting = Χύτευση

Fibers = Ίνες

Thermoforming = Διαμόρφωση εν Θερμώ

Blow Molding = Χύτευση δια Εμφυσήσεως

Fiber – Reinforced Sheet = Φύλλο Ενισχυμένο Με Ίνες

Vacuum Bag = Σάκος Κενού

Pressure Bag Forming = Σάκος Πίεσης Διαμόρφωσης

Hand Lay – Up = Χειρονακτική Τοποθέτηση

Spray Lay – Up = Τοποθέτηση με Σπρέι

Filament Welding = Συγκόλληση με την χρήση πρόσθετου υλικού σε μορφή ίνας

Laminated Sheet = Τεμαχισμένο Φύλλο

Thermoplastic = Θερμοπλαστικά

Thermoset = Θερμοσκληρυνόμενα

Elastomer = Ελαστομερή

Σχήμα 2.7 Διαδικασίες Διαμόρφωσης για Πλαστικά, Ελαστομερή και Σύνθετα Υλικά

Οι διεργασίες αρχικού σχηματισμού χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή κομματιών από πολυμερή και σύνθετα υλικά. Σχεδόν όλες οι τεχνικές επεξεργασίας αυτών των υλικών ανήκουν στην κατηγορία των διεργασιών αρχικού σχηματισμού και παρουσιάζουν ομοιότητες με αυτές των μετάλλων και των κεραμικών. Γενικά, τα πλαστικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έγχυση σε καλούπια, να μορφοποιηθούν, να κατεργασθούν μηχανικά και να συνενωθούν. Επειδή η επεξεργασία τους γίνεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές των μετάλλων, οι διεργασίες αρχικού σχηματισμού είναι ιδιαίτερα συμφέρουσες για την κατασκευή κομματιών από πλαστικά και σύνθετα υλικά.

Η παραγωγική διαδικασία για τα πλαστικά και τα σύνθετα υλικά ξεκινάει, συνήθως, με την πρώτη ύλη να βρίσκεται στην μορφή σφαιριδίων ή σκόνης. Η πρώτη ύλη τήκεται, πριν ξεκινήσει η κυρίως διεργασία σχηματισμού. Οι πλαστικές πρώτες ύλες είναι επίσης διαθέσιμες με την μορφή φύλλων, δίσκων, ράβδων και σωλήνων. Σε πολλές περιπτώσεις τα πλαστικά, που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σύνθετων υλικών, βρίσκονται αρχικά σε υγρή μορφή. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται οι διαφορετικές διεργασίες σχηματισμού, που χρησιμοποιούνται για τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομερή υλικά [1,3,4].

Οι διεργασίες αρχικού σχηματισμού για πλαστικά και σύνθετα υλικά ανήκουν σε μια από τις δυο ακόλουθες κατηγορίες: *χύτευση (Casting)* και *επεξεργασία με τήξη (Melt Processing)*. Ο όρος *χύτευση* περιγράφει την διαδικασία πλήρωσης ενός καλουπιού λόγω βαρύτητας, ενώ ο όρος *επεξεργασία με τήξη* περιγράφει τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούν εξωτερικά επιβαλλόμενη πίεση για την επεξεργασία πολυμερών με υψηλό ιξώδες, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, ώστε να ρέουν υπό την επίδραση της βαρύτητας [1,3,4].

Όλες οι τεχνικές επεξεργασίας με τήξη των πολυμερών έχουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά:

- Η πρώτη ύλη βρίσκεται, συνήθως, σε μορφή κόκκων, κομμένη, συμπιεσμένη σε κύβους, σε φύλλα ή στην περίπτωση ανακυκλωμένου υλικού, τεμαχισμένη και μερικές φορές σε μορφή συμπιεσμένου αποβλήτου.
- Η θέρμανση είναι εν μέρει εξωτερική και εν μέρει εσωτερική.
- Η εσωτερική θερμότητα παράγεται από το έργο της ιξώδους τριβής.
- Γενικά η υπερθέρμανση μπορεί να προκαλέσει μόνιμη βλάβη.
- Υπάρχει μια σημαντική μεταβολή του όγκου κατά την ψύξη, η οποία οφείλεται στις ανακατατάξεις των μορίων και στην δημιουργία δευτερευόντων δεσμών μεταξύ τους. Επειδή η επεξεργασία με τήξη είναι μια διεργασία εξαρτώμενη από τον χρόνο, η συστολή αυξάνεται με την αργή ψύξη, την χαμηλότερη πίεση έγχυσης και τον μικρότερο χρόνο έγχυσης.

- Οι ρυθμοί παραγωγής επηρεάζονται κυρίως από τον χρόνο στερεοποίησης.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά όπως και τα θερμοπλαστικά μπορεί να είναι σε μορφή κόκκων και να επεξεργάζονται όπως οι σκόνες ή μπορεί να μετατρέπονται σε θερμοπλαστικά μέσω της θέρμανσης. Η κύρια διαφορά είναι, ότι όταν τα θερμοπλαστικά ψύχονται, το σχήμα τους παραμένει σταθερό, ενώ τα θερμοσκληρυνόμενα πρέπει να παραμείνουν σε θερμαινόμενο καλούπι για αρκετό χρόνο, για να ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός και ο σχηματισμός των διασταυρούμενων δεσμών (Cross-linking), έτσι ώστε το σχήμα τους να αποκτήσει καθορισμένη μορφή. Μερικά πολυμερή μπορούν να απομακρυνθούν από το καλούπι αμέσως μόλις το σχήμα τους σταθεροποιηθεί και στην συνέχεια η πλήρης δημιουργία των δεσμών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κατά την διάρκεια της ψύξης, είτε με την τοποθέτησή τους σε ξεχωριστό φούρνο. Άλλες φορές η δημιουργία των δεσμών αρχίζει αμέσως με την θέρμανση. Στην συνέχεια το προπολυμερές πρέπει να εισαχθεί σε ψυχρό καλούπι και το καλούπι πρέπει να ακολουθήσει ένα κύκλο θέρμανσης-ψύξης για κάθε κομμάτι, γεγονός, που οδηγεί σε πολύ μεγάλο χρόνο παραγωγής (Cycle Time).

Στην ορολογία της βιομηχανίας των πλαστικών μια διεργασία χύτευσης (Molding) αναφέρεται σε μια διεργασία με τήξη, η οποία πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός καλουπιού (Mold) και είναι αντίστοιχη με την διεργασία χύτευσης των μετάλλων. Οι πιο διαδεδομένες διεργασίες χύτευσης είναι η *χύτευση υπό πίεση (Compression Molding)*, η *χύτευση με μετάγμιση (Transfer Molding)*, η *χύτευση με εξαναγκασμένη έγχυση (Injection Molding)*, η *εξώθηση (Extrusion)*, η *χύτευση εξαναγκασμένης έγχυσης με αντίδραση (Reaction Injection Molding)*, η *περιστροφική έγχυση (Rotational Molding)*, το *Calendering* και η *περιστροφική τήξη (Melt Spinning)*. Επίσης χρησιμοποιούνται εξειδικευμένες τεχνικές, στις οποίες τα πολυμερή υπό μορφή σωματιδίων (σφαιρίδια, σκόνες κλπ.) επεξεργάζονται όπως και στην κονιομεταλλουργία [1,4].

Τα ενισχυμένα πλαστικά ή σύνθετα υλικά είναι εξαιρετικά σημαντικά, γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εξαρτημάτων, που να ικανοποιούν συγκεκριμένες σχεδιαστικές απαιτήσεις όπως υψηλές σχέσεις αντοχής-βάρους και ακαμψίας-βάρους. Εξ αιτίας της ειδικής τους κατασκευής, τα σύνθετα υλικά απαιτούν ειδικές μεθόδους επεξεργασίας, ώστε να μετατραπούν σε χρήσιμα προϊόντα. Η ενίσχυση στα σύνθετα υλικά μπορεί να αποτελείται από ίνες (Fibers), υφαντά (Woven Fabrics), ελαφρά συστρεμμένες ίνες (Rov-ing) ή συνεχείς ίνες (Continuous Fibers). Προκειμένου να επιτευχθεί καλή συνοχή μεταξύ των ινών ενίσχυσης και της βάσης του πολυμερούς, είναι απαραίτητο να εμποτιστεί και να επενδυθεί η ενίσχυση με ένα πολυμερές. Όταν ο εμποτισμός γίνεται σαν ξεχωριστό βήμα, τα μερικώς στεγνά φύλλα που προκύπτουν ονομάζονται *prepregs*, *ογκώδες χυτό μίγμα (Bulk Molding Compound, BMC)* ή *μίγμα χυτών φύλλων (Sheet Molding Compound, SMC)*. Η χύτευση υπό πίεση (Compression Molding) είναι μια διεργασία αρχικού σχηματισμού, που χρησιμοποιείται συχνά στην κατασκευή σύνθετων υλικών, κατά την οποία

το υλικό τοποθετείται μεταξύ δύο μητρών και συμπιέζεται. Το υλικό μπορεί να βρίσκεται σε άμορφη κατάσταση με ένα ιξώδες μίγμα πολυμερών, ινών και προσθετικών. Τα μήκη των ινών γενικά κυμαίνονται από 3–50 μm . Τα μίγματα χυτών φύλλων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην χύτευση υπό πίεση.

2.2.1 Χαρακτηριστικά των διεργασιών αρχικού σχηματισμού (Characteristics of Primary Forming Processes)

Κόστος (Cost)

Η δυνατότητα εφαρμογής των διεργασιών αρχικού σχηματισμού συχνά περιορίζεται από το υψηλό κόστος και την έλλειψη ευελιξίας των απαραίτητων εργαλείων. Το κόστος της κατασκευής των μητρών και των καλουπιών είναι της τάξης των \$10.000 έως \$ 100.000 και συχνά απαιτούνται εβδομάδες έως μήνες για τον σχεδιασμό και την κατασκευή τους. Παρ' όλ' αυτά, το κόστος των μητρών διαμοιράζεται στο κόστος παραγωγής μιας παρτίδας κομματιών. Για τον λόγο αυτό, οι διεργασίες αρχικού σχηματισμού είναι οικονομικές, όταν το μέγεθος της παρτίδας είναι μεγάλο (της τάξεως των 1.000 κομματιών και άνω). Επίσης οι διεργασίες σχηματισμού συχνά δεν απαιτούν εξειδικευμένους εργάτες, διότι οι κινήσεις των εργαλείων και των κομματιών που παράγονται δεν χρειάζεται να προγραμματίζονται, οπότε το κόστος εργασίας είναι μειωμένο σε σχέση με άλλες διεργασίες.

Ρυθμός Παραγωγής (Production Rate)

Οι διεργασίες σχηματισμού μπορούν να πετύχουν υψηλούς ρυθμούς παραγωγής με κύκλους παραγωγής από δευτερόλεπτα ως λεπτά, ανάλογα με το πάχος του κομματιού. Γενικά, οι διεργασίες χύτευσης, οι οποίες χρησιμοποιούν μόνιμα μεταλλικά καλούπια, έχουν μικρότερους κύκλους παραγωγής από τις διεργασίες που χρησιμοποιούν αναλώσιμα αφρώδη, κεραμικά ή κέρινα καλούπια. Ωστόσο, τα αναλώσιμα καλούπια μπορούν να αναπαράγουν περίπλοκα σχήματα και εσωτερικά χαρακτηριστικά, που τα μόνιμα καλούπια αδυνατούν να παράγουν. Ο χρόνος προετοιμασίας για τις διεργασίες αρχικού σχηματισμού είναι της τάξης των 8 ωρών, γεγονός που καθιστά την χύτευση απαγορευτική για την παραγωγή μικρής ποσότητας προϊόντων.

Ποιότητα κομματιών (Part Quality)

Με την χρήση των μόνιμων καλουπιών τα κομμάτια που παράγονται μπορούν να επιτύχουν επιφανειακή ποιότητα της τάξης του 1 μm έως 2m R_a , παρ' όλο που τα τυπικά χυτά κομμάτια απαιτούν δευτερεύουσες επεξεργασίες όπως λείανση ή ηλεκτροδιάβρωση (EDM), για την βελτίωση της επιφανειακής ποιότητας. Οι διεργασίες χύτευσης σε άμμο μπορούν να παράγουν κομμάτια με επι-

φανειακή τραχύτητα μέχρι και 25 μm R_a . Εκτός από την τραχύτητα της επιφάνειας, η παρουσία φυσαλίδων αέρα στο χυτό εξ αιτίας του εγκλωβισμού τους κατά την ροή του τηγμένου υλικού, καθώς και η διαστασιολογική ακρίβεια είναι επίσης προβλήματα, που εμφανίζονται σε κομμάτια που παράχθηκαν με διεργασίες αρχικού σχηματισμού. Η ποιότητα των παραγόμενων κομματιών μπορεί, επίσης, να επηρεασθεί από παραμέτρους της διεργασίας όπως η θερμοκρασία της μήτρας, ο χρόνος και ο ρυθμός ψύξης, καθώς και ο σχεδιασμός ή τα χαρακτηριστικά του καλουπιού –π.χ. οι εισαγωγές και οι οδηγοί σωλήνες του λιωμένου υλικού, καθώς και τα κανάλια ψύξης της μήτρας.

Ευελιξία (Flexibility)

Η ευελιξία των διεργασιών σχηματισμού περιορίζεται από την ίδια την κινηματική των διεργασιών αυτών, οι οποίες περιορίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε μόνο μια γεωμετρία κομματιού να μπορεί να παραχθεί από μια δεδομένη γεωμετρία καλουπιού και η γεωμετρία του κομματιού να μην μπορεί να αλλάξει μέσω της σχετικής κίνησης μεταξύ του παραγόμενου κομματιού και του καλουπιού. Παρ' όλ' αυτά, οι διεργασίες σχηματισμού είναι ικανές να παράγουν κομμάτια με πολύπλοκες γεωμετρίες, ειδικά εσωτερικά χαρακτηριστικά και με πάχη τοιχωμάτων που μπορούν να κυμαίνονται από τιμές μικρότερες του 1 mm έως 100 mm.

	Cost	Production Rate	Quality	Flexibility
Forming Processes	High Tooling/ Low Labor Cost	High	Medium to Low	Low

Cost = Κόστος

Production Rate = Παραγωγικότητα

Quality = Ποιότητα

Flexibility = Ευελιξία

Forming Processes = Διεργασίες Σχηματισμού

Tooling Cost = Κόστος Εργαλείων

Labor Cost = Κόστος Εργασίας

Low = Χαμηλό/ή

Medium = Μεσαίο/α

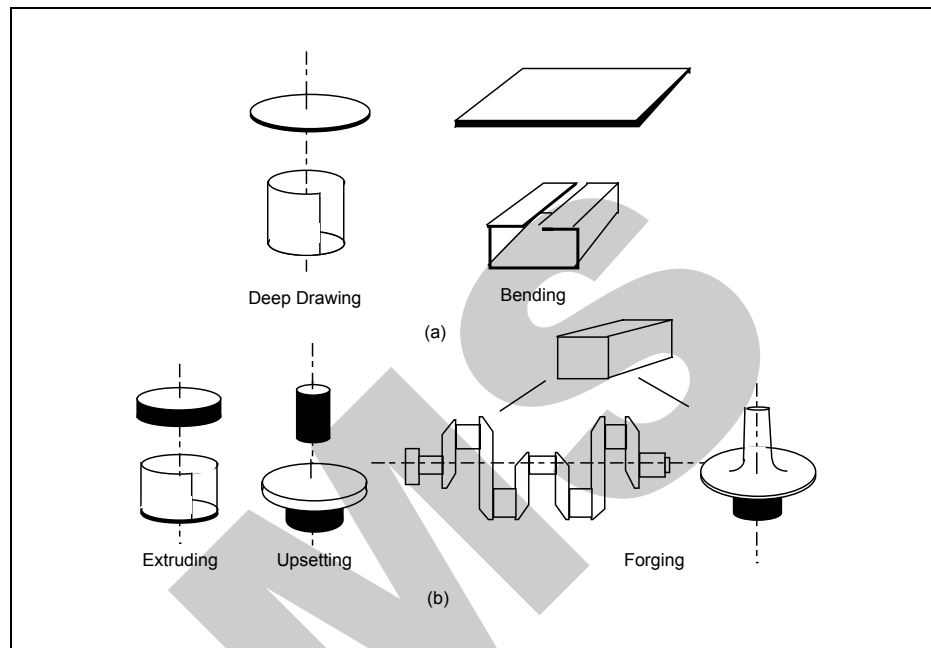
High = Υψηλό/ή

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά των Διεργασιών Αρχικής Διαμόρφωσης

2.3 Διεργασίες Διαμόρφωσης (Deforming Processes)

Οι διεργασίες διαμόρφωσης παρουσιάζουν ποικιλία εφαρμογών στην βιομηχανία. Εξαρτήματα αυτοκινήτων, βιομηχανικός εξοπλισμός, εργαλειομηχανές, καθώς και εργαλεία χειρός (σφυριά, πένσες, κατσαβίδια κ.λ.π.) είναι μερικές από τις βιομηχανικές εφαρμογές των διεργασιών διαμόρφωσης. Δοχεία, μεταλλικά κουτιά και κονσέρβες, αλλά και στοιχεία σύνδεσης όπως βίδες, παξιμάδια, μπουλόνια και ήλοι είναι κομμάτια που παράγονται με την χρήση των διεργασιών διαμόρφωσης.

Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα υλικά στις διεργασίες αυτές είναι το ασάλι, ανθρακούχοι χάλυβες, ανοξείδωτοι χάλυβες, χάλυβες θερμικής αντοχής, καθώς και μη σιδηρούχα βαριά και ελαφριά κράματα όπως αλουμινίου, ψευδαργύρου και χαλκού, τιτάνιο και θερμικά ανθεκτικά κράματα νικελίου. Η σημασία των διεργασιών διαμόρφωσης μπορεί να γίνει περισσότερο κατανοητή, αν λάβουμε υπ' όψη, ότι ένα αυτοκίνητο μεσαίου μεγέθους φέρει περίπου από 50 έως 70 κιλά χάλυβα σε κομμάτια κατασκευασμένα με την μέθοδο της ψυχρής διαμόρφωσης.



Deep Drawing = εξέλαση
Bending = κάμψη
Extruding = διέλαση

Upsetting = σύνθλιψη
Forging = σφυρηλάτηση

Σχήμα 2.8 Τεχνικές Διαμόρφωσης Φύλλου και Όγκου

Γενικά, οι διεργασίες διαμόρφωσης, που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία μετάλλου μπορούν να ταξινομηθούν σε μεθόδους διαμόρφωσης όγκου (bulk or massive deforming methods) [5] –όπως διέλαση (extrusion), σύνθλιψη (upsetting) ή σφυρηλάτηση (forging)– και μεθόδους διαμόρφωσης μεταλλικών φύλλων (sheet metal forming) –όπως η εξέλαση (deep drawing) και η κάμψη (bending) (Σχ. 2.8). Ανεξάρτητα από τον τύπο της μεθόδου διαμόρφωσης, οι τάσεις που απαιτούνται για την διαμόρφωση είναι αρκετά υψηλές και κυμαίνονται από 50 έως 25.000 N/mm² (7-360 ksi), ανάλογα με την μέθοδο και το υλικό. Επειδή ολόκληρο το κομμάτι ή τουλάχιστον ένα μεγάλο μέρος του παραμορφώνεται, τα φορτία που προκύπτουν από μια διεργασία

διαμόρφωσης είναι επίσης πολύ υψηλά. Για παράδειγμα, σε μια πρέσα σφυρηλάτησης τα φορτία μπορεί να φθάσουν έως 750 MN ή 85 ktons. Συγκρίνοντας τα παραπάνω με τον βαρύτερο εξοπλισμό των διεργασιών αφαίρεσης υλικού, όπως μια μεγάλη πλάνη, τα φορτία είναι μερικές τάξεις μεγέθους (20 kN ή 2.3 tons) μικρότερα από αυτά που απαιτούνται για τις διεργασίες διαμόρφωσης.

Οι διεργασίες διαμόρφωσης, που έχουν εφαρμογή στην βιομηχανία, μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους [5]. Ο σκοπός της ταξινόμησης αυτής είναι να διευκολύνει την εκπαίδευση ανθρώπων στις διάφορες διεργασίες και να παρέχει ομοιόμορφη, αξιόπιστη και γρήγορη επικοινωνία σε θέματα που αφορούν διαδικασίες διαμόρφωσης, καθώς επίσης να παρέχει ακριβείς ορισμούς των διαφόρων διεργασιών για την χρησιμοποίησή τους στον τεχνολογικό προγραμματισμό (Process Planning).

Ένας τρόπος ταξινόμησης των διεργασιών είναι με βάση την θερμοκρασία κατά την διεργασία διαμόρφωσης. Χρησιμοποιώντας το κριτήριο αυτό, μπορούν να ταξινομηθούν σε θερμές διεργασίες διαμόρφωσης –οι οποίες πραγματοποιούνται εφ’ όσον το κομμάτι έχει θερμανθεί– και διεργασίες ψυχρής διαμόρφωσης, οι οποίες πραγματοποιούνται χωρίς θέρμανση. Η τάση (stress) είναι ένα άλλο κριτήριο ταξινόμησης, το οποίο αναφέρεται στο μέγεθος της φόρτισης του υλικού, όταν πραγματοποιείται η διεργασία διαμόρφωσης. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, οι διεργασίες διαμόρφωσης ταξινομούνται σε 5 μεγάλες κατηγορίες:

1. Διαμόρφωση με θλίψη (compressive forming)– η πλαστική παραμόρφωση του στερεού σώματος επιτυγχάνεται μέσω μονοαξονικής ή πολυαξονικής θλιπτικής φόρτισης.
2. Διαμόρφωση με εφελκυσμό (tensile forming)– η πλαστική παραμόρφωση του στερεού σώματος επιτυγχάνεται μέσω μονοαξονικής ή πολυαξονικής εφελκυστικής φόρτισης.
3. Διαμόρφωση με συνδυασμό εφελκυσμού και θλίψης (Combined tensile and compressive forming)– η πλαστική παραμόρφωση του στερεού σώματος επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού θλιπτικών και εφελκυστικών φορτίσεων.
4. Διαμόρφωση με κάμψη (bending)– η πλαστική παραμόρφωση του στερεού σώματος επιτυγχάνεται μέσω καμπτικής φόρτισης.
5. Διαμόρφωση με διάτμηση (shearing)– η πλαστική παραμόρφωση του στερεού σώματος επιτυγχάνεται μέσω διατμητικής φόρτισης.

Οι παραπάνω κατηγορίες διεργασιών μπορούν επίσης να υποδιαιρεθούν βάσει κριτηρίων κινηματικής του εργαλείου και του κομματιού. Οι περιορισμοί ενέργειας, δύναμης και διαδρομής στις μηχανές διαμόρφωσης θα συζητηθούν λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.

2.3.1 Χαρακτηριστικά των διεργασιών διαμόρφωσης (Characteristics of Deforming Processes)

Κόστος (Cost)

Οι διεργασίες διαμόρφωσης έχουν σχετικά υψηλό κόστος εργαλείων, παρόμοιο με τις διεργασίες αρχικού σχηματισμού εξ αιτίας της περίπλοκης γεωμετρίας των μητρών που απαιτείται. Επειδή τα φορτία διαμόρφωσης είναι πολύ μεγάλα (έως 750 MN), οι μήτρες, που χρησιμοποιούνται, είναι μεγάλου μεγέθους, βάρους και κόστους. Οι διεργασίες διαμόρφωσης συνδέονται άμεσα με τις διεργασίες αφαίρεσης υλικού, αφού οι μήτρες, που χρησιμοποιούνται, κατασκευάζονται συνήθως με τέτοιες διεργασίες εξ αιτίας του μικρού τους αριθμού (μόνο ένα τις περισσότερες φορές) και της υψηλής ακρίβειας που απαιτείται. Επειδή το κόστος των μητρών (έως \$250.000 για κάθε μήτρα) και του μηχανικού εξοπλισμού (έως \$200.000 για κάθε μηχανή) είναι υψηλό, οι διεργασίες διαμόρφωσης εφαρμόζονται συνήθως σε παρτίδες αρκετά μεγάλες, ώστε να συμφέρει οικονομικά η χρήση εργαλείων και μηχανών υψηλού κόστους. Η κάθε μήτρα διαμόρφωσης έχει συνήθως διάρκεια ζωής αρκετών εκατομμυρίων κομματιών, επομένως το υψηλό κόστος κατασκευής της κατανέμεται σε έναν μεγάλο αριθμό παραγόμενων κομματιών, έτσι ώστε το συνολικό κόστος παραγωγής ανά κομμάτι να παραμένει μικρό για μεγάλες παρτίδες. Τέλος, στις διεργασίες διαμόρφωσης δεν απαιτούνται, συνήθως, εργάτες υψηλής εξειδίκευσης, οπότε το κόστος εργασίας (labor cost) είναι σχετικά χαμηλό συγκριτικά με άλλες παραγωγικές διεργασίες.

Παραγωγικότητα (Production Rate)

Για μεγάλες παρτίδες, οι διεργασίες διαμόρφωσης έχουν παραγωγικότητα ως και 5.000 κομματιών ανά ώρα. Παρόμοια με τις διεργασίες αρχικού σχηματισμού, οι μήτρες διαμόρφωσης απαιτούν χρόνους προετοιμασίας ως και αρκετές ώρες, κάτι που καθιστά τις διεργασίες διαμόρφωσης μη πρακτικές στην παραγωγή μικρών παρτίδων προϊόντων.

Ποιότητα κομματιών (Part Quality)

Το εύρος των ποιοτήτων επιφανείας, που επιτυγχάνεται μέσω των διεργασιών διαμόρφωσης, είναι παρόμοιο με αυτό των διεργασιών αρχικού σχηματισμού, με ελάχιστες τραχύτητες επιφανειών έως 0,8 μm R_a για διέλαση και ψυχρή εξέλαση (cold rolling). Παρ' όλα αυτά, οι διεργασίες "εν θερμώ", όπως η θερμή εξέλαση (hot rolling), κατά τις οποίες το κομμάτι προθερμαίνεται σε θερμοκρασίες ανόπτησης, οδηγούν συνήθως σε πολύ υψηλότερες επιφανειακές τραχύτητες (ως και 50 μm R_a), οπότε είναι απαραίτητη κάποια δευτερεύουσα διεργασία φινιρίσματος. Ένα πλεονέκτημα των κομματιών, που παράγονται με διαμόρφωση, είναι, ότι η διεργασία αυτή προκαλεί σκλήρυνση του κομμα-

τιού με αποτέλεσμα την αύξηση της μηχανικής αντοχής του. Όμως, εκτεταμένη παραμόρφωση του υλικού μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία ρωγμών στο κομμάτι.

Ευελιξία (Flexibility)

Οι διεργασίες διαμόρφωσης παρουσιάζουν σχετικά μικρή ευελιξία σε σχέση με άλλες διεργασίες, αφού η κινηματική των μηχανών διαμόρφωσης περιορίζεται από την διαδρομή, την δύναμη και την ενέργεια (θα συζητηθούν στο Κεφάλαιο 3). Η γεωμετρία του κομματιού εξαρτάται απόλυτα από την γεωμετρία της μήτρας, όπως και στην περίπτωση του αρχικού σχηματισμού. Επειδή οι μήτρες διαμόρφωσης πρέπει να κινούνται ως προς το κατεργαζόμενο κομμάτι, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που είναι δυνατόν να δημιουργηθούν στο κομμάτι, είναι περιορισμένα.

	Cost	Production Rate	Quality	Flexibility
Deforming Processes	High Tooling/ Low Labor Cost	High	Medium to Low	Low

Cost = Κόστος

Production Rate = Παραγωγικότητα

Quality = Ποιότητα

Flexibility = Ευελιξία

Deforming Processes = Διεργασίες Διαμόρφωσης

Tooling Cost = Κόστος Εργαλείων

Labor Cost = Κόστος Εργασίας

Low = Χαμηλό/ή

Medium = Μεσαίο/α

High = Υψηλό/ή

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά των Διεργασιών Διαμόρφωσης

2.4 Διεργασίες Αφαίρεσης Υλικού (Removing Processes)

Οι διεργασίες μηχανικής αφαίρεσης υλικού αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο στην βιομηχανική κατασκευαστική πρακτική. Αυτές οι διεργασίες παρέχουν μεγάλη ευελιξία, αφού η γεωμετρία του κομματιού προσδιορίζεται από την μορφή του εργαλείου και την κινηματική του εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο κομμάτι. Ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα αυτών των διεργασιών.

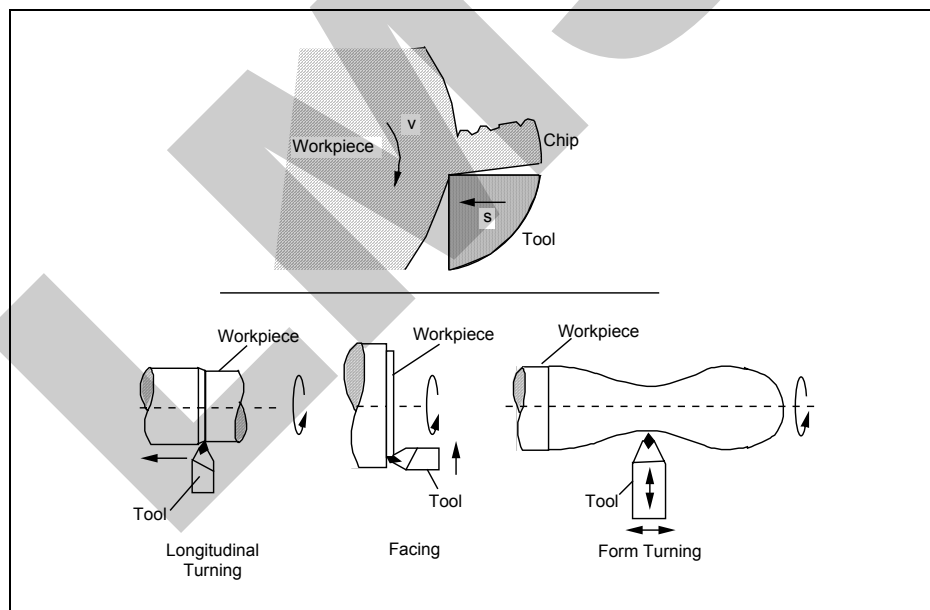
Υπάρχουν τέσσερις τύποι μηχανισμών αφαίρεσης υλικού:

- Μηχανικός (mechanical)– οι μηχανικές τάσεις, που ασκούνται από το κοπτικό εργαλείο, υπερβαίνουν το όριο αντοχής του υλικού.
- Θερμικός (thermal)– η θερμική ενέργεια, που παρέχεται από μια θερμική πηγή, λιώνει ή/και εξατμίζει τον όγκο του υλικού, που πρόκειται ν' αφαιρεθεί.

- Ηλεκτροχημικός (electrochemical)– ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, που δημιουργούνται από την δράση ενός ηλεκτρικού πεδίου, καταστρέφουν τους ατομικούς δεσμούς στο υλικό, που πρόκειται ν' αφαιρεθεί.
- Χημικός (chemical)– χημικές αντιδράσεις καταστρέφουν τους ατομικούς δεσμούς του υλικού, που πρόκειται ν' αφαιρεθεί.

Οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού έχουν μεγαλύτερη ευελιξία, όσον αφορά στο μέγεθος της παρτίδας, στην γεωμετρία του κατεργαζόμενου κομματιού και στην τελική ποιότητα που επιτυγχάνεται σε σχέση με άλλες παραγωγικές διεργασίες.

Από τις διεργασίες αφαίρεσης υλικού, οι διεργασίες τόννευσης (turning processes) είναι οι ευρύτερα διαδεδομένες (Σχ. 2.9). Στην τόννευση, το κομμάτι περιστρέφεται προσδίδοντας την κύρια κίνηση κοπής, ενώ το εργαλείο κινείται κατά μήκος του κομματιού δημιουργώντας την απαιτούμενη πρόωση. Με βάση την διεύθυνση της πρόωσης μπορούμε να διαχωρίσουμε την τόννευση σε κατά μήκος τόννευση (longitudinal turning), μετωπική τόννευση (facing) και τόννευση μορφής (form turning) [2]. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει αξονική πρόωση, στην δεύτερη ακτινική και στην τρίτη ταυτόχρονα αξονική και ακτινική πρόωση. Οι σύγχρονες εργαλειομηχανές, που εκτελούν τέτοιου είδους διεργασίες, έχουν διάφορα επίπεδα αυτοματισμού, περιλαμβανομένου και αυτού της εφαρμογής διαφόρων μεθόδων αριθμητικού ελέγχου μέσω υπολογιστή (CNC).



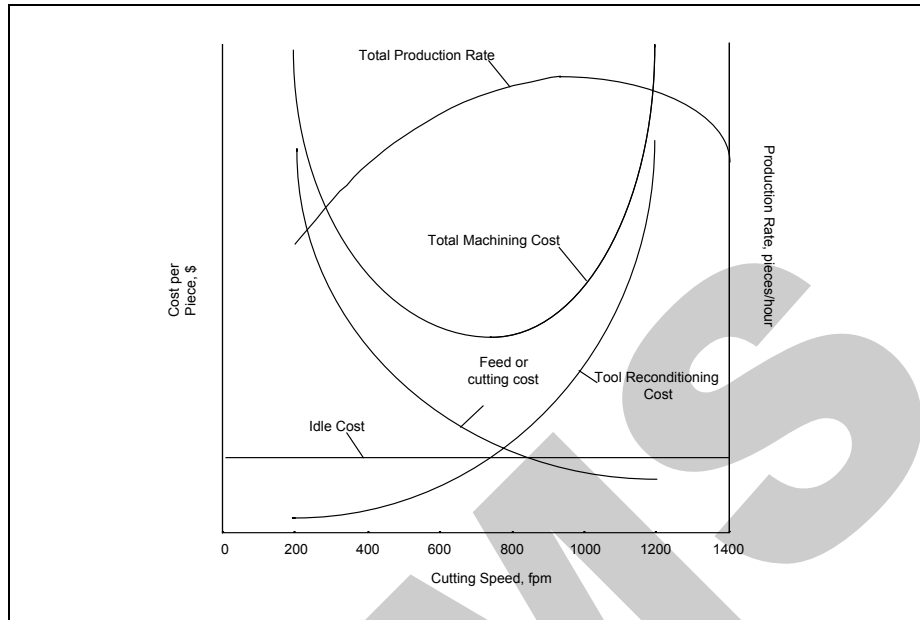
Workpiece = κομμάτι
Chip = απόβλητο
Tool = εργαλείο

Longitudinal turning = τόννευση κατά μήκος
Facing = μετωπική τόννευση
Form turning = τόννευση μορφής

Σχήμα 2.9 Διεργασίες Τόννευσης

Τα χαρακτηριστικά του αυτοματισμού των εργαλειομηχανών θα συζητηθούν στο Κεφάλαιο 3.

Οι εργασίες κοπής έχουν διερευνηθεί εκτενώς ως προς το κόστος τους, λόγω της ευρείας χρήσης τους στην βιομηχανία. Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται οι σχέσεις, που υπάρχουν ανάμεσα στην ταχύτητα κοπής, την παραγωγικότητα και το κόστος ανά κομμάτι για μια τυπική μηχανουργική διεργασία [6].



Cost per piece = κόστος ανα κομμάτι

Cutting Speed = ταχύτητα κοπής

Total production rate = συνολικός ρυθμός παραγωγής

Total machining cost = συνολικό κόστος

διεργασίας αφαίρεσης υλικού

Idle cost = Κόστος αναμονής

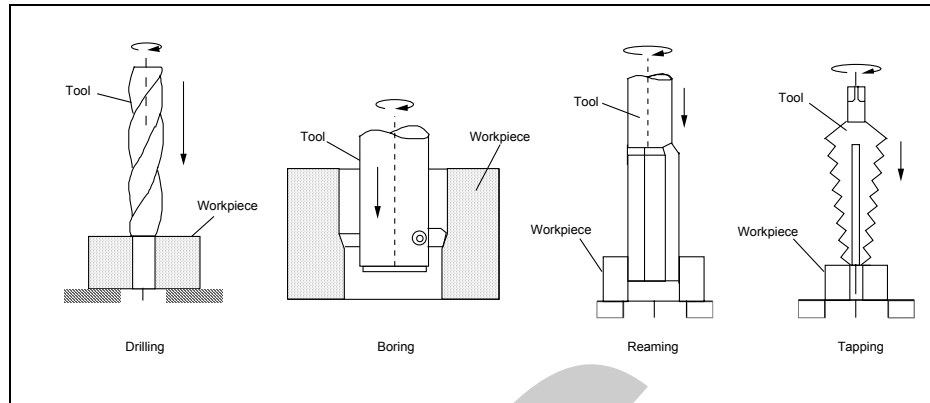
Tool reconditioning cost = Κόστος συντήρησης εργαλείων

Feed or cutting cost = Κόστος κοπής

Σχήμα 2.10 Κόστος Αφαίρεσης Υλικού και Παραγωγικότητα

Η διάτρηση (drilling) είναι μια σημαντική κατηγορία διεργασιών, στις οποίες η κοπή δεν οφείλεται στην περιστροφική κίνηση του κομματιού αλλά στην περιστροφική κίνηση του εργαλείου (Σχ. 2.11). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται διεργασίες όπως η εσωτερική διάνοιξη οπών (boring), το αλεξουάρ (reaming) και η διάνοιξη σπειρώματος (tapping) [2]. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η πρόωση κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής πραγματοποιείται είτε από την κίνηση του κομματιού είτε από την κίνηση του κοπτικού εργαλείου. Εξ αιτίας της φύσης της διεργασίας, το απόβλητο δημιουργείται σε κλειστό χώρο και πρέπει περιοδικά να απομακρύνεται από την οπή, με συνέπεια η διεργασία να παρουσιάζει μικρή παραγωγικότητα. Προκειμένου να ξεπερασθεί το πρόβλημα της χαμηλής παραγωγικότητας,

χρησιμοποιούνται μηχανές πολλαπλών διατρητικών κεφαλών, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της παραγωγικότητας χωρίς την αύξηση της ταχύτητας κοπής του κάθε μεμονωμένου τρυπανιού.

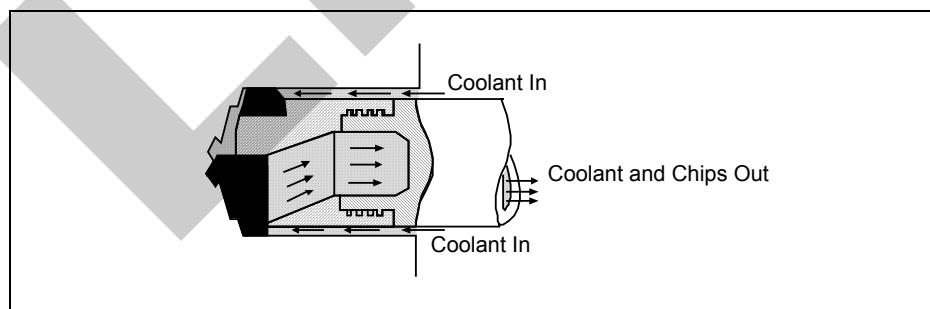


Tool = εργαλείο
Workpiece = κομμάτι
Drilling = διάτρηση

Boring = εσωτερική διάνοιξη οπών
Reaming = αλεξουάρ
Tapping = διάνοιξη σπειρώματος

Σχήμα 2.11 Διεργασίες Διάτρησης

Η βαθιά διάτρηση (deep hole drilling) είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση διάτρησης (Σχ. 2.12), στην οποία ο λόγος διαμέτρου ως προς το μήκος των διανοιγόμενων οπών μπορεί να είναι και μεγαλύτερος του 1:200. Αυτή η διεργασία απαιτεί ειδικό σχεδιασμό κοπτικών εργαλείων, ώστε να υπάρχουν εσωτερικά κανάλια, που να διευκολύνουν την εξαγωγή του αποβλήτου από τις βαθιές οπές. Οι μηχανές για τις διεργασίες αυτές πρέπει να έχουν σχεδιασθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι κατάλληλες για μακριά και λεπτά κοπτικά εργαλεία, τα οποία μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα ευστάθειας.

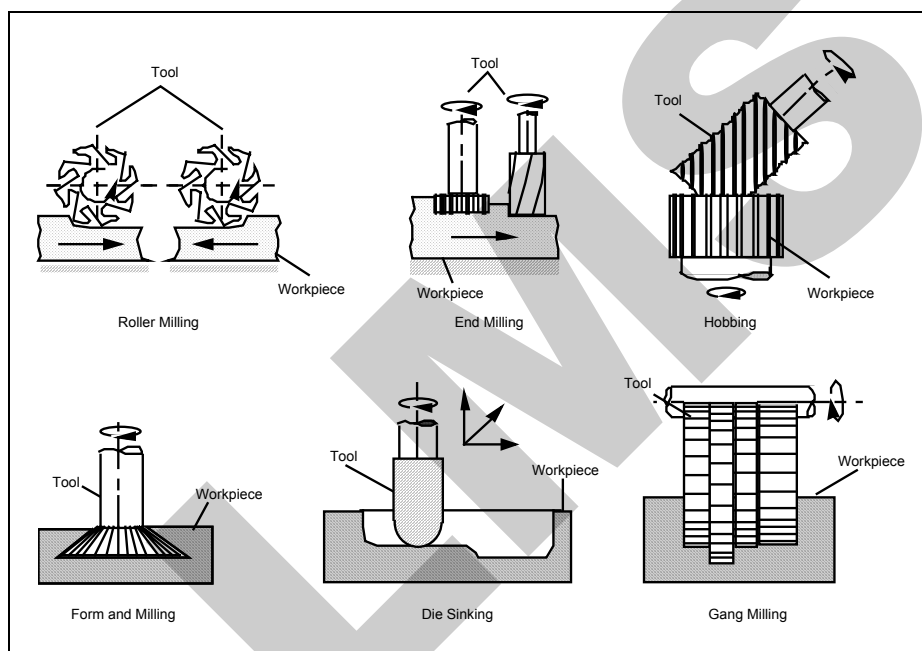


Coolant in = Εισαγωγή ψυκτικού υγρού

Coolant and Chips out = Εξαγωγή ψυκτικού υγρού και αποβλήτων

Σχήμα 2.12 Βαθεία διάτρηση (μέθοδος BTA)

Το φρεζάρισμα (milling) είναι παρόμοια διεργασία με την διάτρηση, λόγω του ότι η κύρια περιστροφική κοπτική κίνηση παράγεται από το κοπτικό εργαλείο. Στο φρεζάρισμα, όμως, η πρόωση δεν έχει την αξονική διεύθυνση του κοπτικού, αλλά την κάθετη διεύθυνση ως προς τον άξονα του κοπτικού εργαλείου. Στο Σχήμα 2.13 φαίνονται οι συνηθέστερες διεργασίες φρεζαρίσματος. Το πλαγιομετωπικό φρεζάρισμα (roller milling) και το μετωπικό φρεζάρισμα (end milling) είναι διεργασίες γενικής χρήσης για την παραγωγή κάθε είδους επίπεδων επιφανειών. Η κοπή γραναζιών (hobbing) χρησιμοποιείται για την κατασκευή γραναζιών. Το φρεζάρισμα με εργαλεία ειδικής γεωμετρίας (form end milling) είναι μια διεργασία, που εφαρμόζεται στην βιομηχανία παραγωγής εργαλειομηχανών για την κατασκευή εξαρτημάτων όπως οι γλίστρες. Η διεργασία «die sinking» χρησιμοποιείται για την κατασκευή μητρών διαμόρφωσης, ενώ κατά την διεργασία «gang milling», μια ποικιλία κοπτικών εργαλείων τοποθετείται πάνω στον ίδιο περιστρεφόμενο άξονα με σκοπό την διαμόρφωση κάποιας σύνθετης γεωμετρίας.



Tool = εργαλείο

Workpiece = κομμάτι

Roller milling = πλαγιομετωπικό φρεζάρισμα

End milling = μετωπικό φρεζάρισμα

Hobbing = κοπή γραναζιών

Form end milling = φρεζάρισμα με εργαλεία ειδικής γεωμετρίας

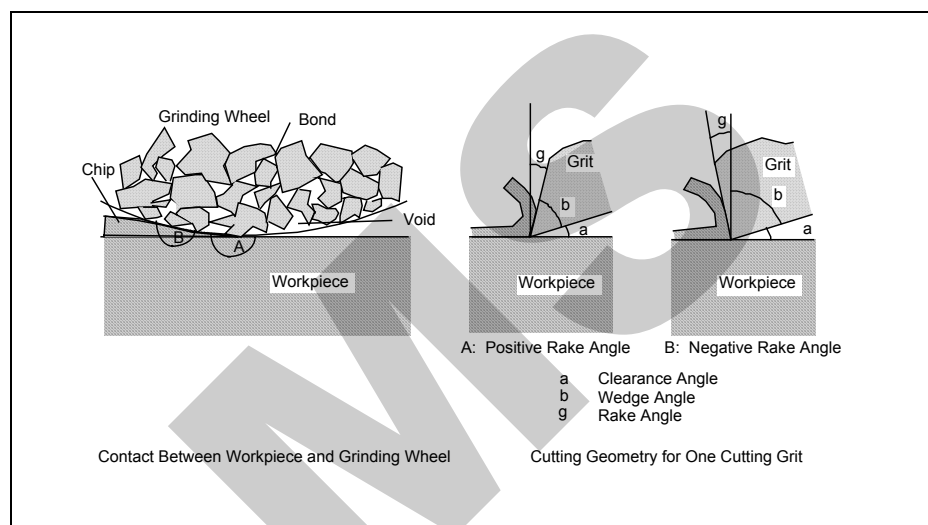
Die sinking

Gang milling

Σχήμα 2.13 Διεργασίες Φρεζαρίσματος

Η κοπή με εργαλεία μονής κοπτικής ακμής (single-cutting edge) και καθορισμένης γεωμετρίας μπορεί να δημιουργήσει μια μεγάλη ποικιλία σχημάτων,

από στερεά συμμετρικά εκ περιστροφής μέχρι και πρισματικά κομμάτια. Τα παραγόμενα από τέτοιες διεργασίες κομμάτια, ωστόσο δεν ικανοποιούν πάντα τις απαιτήσεις της ποιότητας επιφάνειας και της διαστασιακής ακρίβειας. Προκειμένου να ικανοποιήσουμε αυτές τις απαιτήσεις, εφαρμόζουμε διεργασίες άλλου είδους, στις οποίες το κοπτικό εργαλείο έχει πολλές ακμές. Σε αυτές τις διεργασίες δίδεται έμφαση περισσότερο στην επίτευξη υψηλής ποιότητας επιφάνειας και ακρίβειας διαστάσεων του παραγόμενου κομματιού, παρά στην επίτευξη υψηλών ρυθμών αφαίρεσης υλικού. Επίσης, με την χρήση αυτών των διεργασιών δίδεται η δυνατότητα επεξεργασίας πολύ σκληρών υλικών. Οι περισσότερες διεργασίες αυτής της κατηγορίας είναι οι διεργασίες λείανσης (grinding processes). Το Σχήμα 2.14 δείχνει τον τρόπο επαφής του τροχού λείανσης με το κομμάτι, καθώς και την γεωμετρία κοπής για μία κοπτική ακμή ή κόκκο.

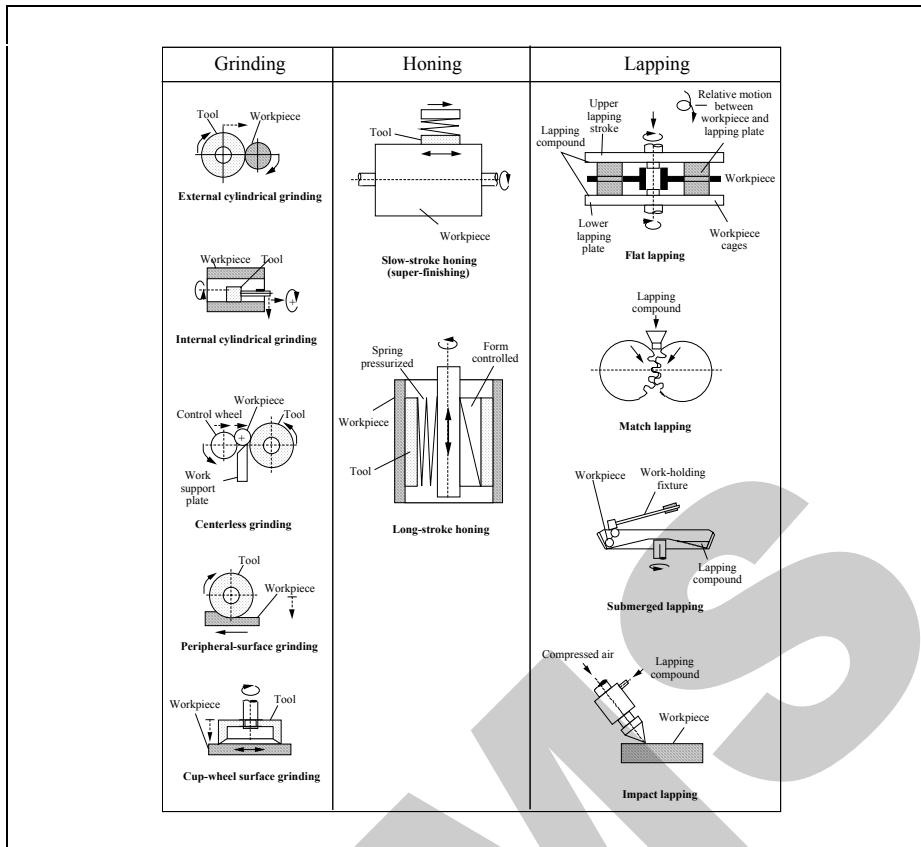


Workpiece = κομμάτι
 Chip = απόβλητο
 Grinding wheel = λειαντικός τροχός
 Bond = συνδετικό υλικό
 Void = κενό
 Grit = κόκκος
 Clearance Angle = γωνία ελευθερίας

Wedge angle = γωνία σφήνας
 Rake angle = γωνία κοπής
 Positive/Negative rake angle = θετική/αρνητική γωνία κοπής
 Contact between workpiece and grinding wheel = επαφή μεταξύ κομματιού και λειαντικού τροχού
 Cutting geometry for one cutting grit = γεωμετρία κοπής για ένα κόκκο

Σχήμα 2.14 Ο Βασικός Μηχανισμός της Διεργασίας Λείανσης

Δύο άλλες οικογένειες διεργασιών υψηλής ακρίβειας, που έχουν τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά με την λείανση, είναι το γυάλισμα (Honing) και η λείανση με λειαντικό μίγμα (Lapping). Με την εφαρμογή των παραπάνω διεργασιών [2], μπορεί να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας και η ακρίβεια των διαστάσεων, αλλά όχι η μορφή του κομματιού, καθώς τα κοπτικά εργαλεία δεν οδηγού-



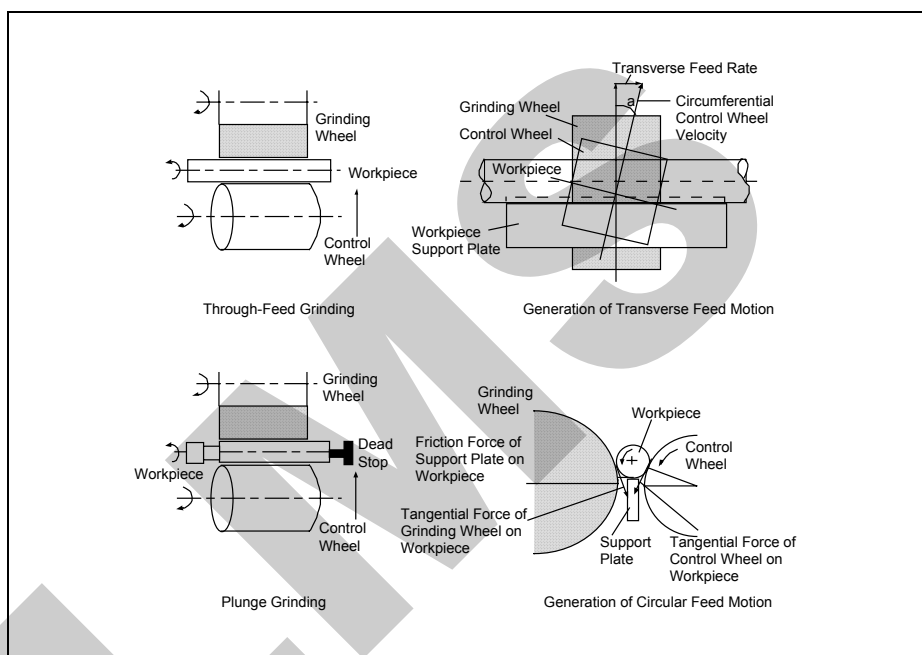
Grinding = Λείανση
 Honing = Γυάλισμα
 Lapping = Λείανση με λειαντικό μίγμα
 Tool = Εργαλείο
 Workpiece = Κομμάτι
 External cylindrical grinding = Εξωτερική κυλινδρική λείανση
 Internal cylindrical grinding = Εσωτερική κυλινδρική λείανση
 Control wheel = Τροχός ελέγχου
 Work support plate = Ελασμα υποστήριξης κομματιού
 Centerless grinding = Άκεντρη λείανση
 Peripheral-surface grinding = Επιφανειακή λείανση με την περιφερειακή επιφάνεια του τροχού
 Cup-wheel surface grinding = Επιφανειακή λείανση με την μετωπική επιφάνεια του τροχού
 Slow-stroke honing (super finishing) = Γυάλισμα αργής παλινδρόμησης (φινίρισμα υψηλής ποιότητας)

Spring pressurized = Υπο πίεση ελατηρίων
 Form controlled = Υπο έλεγχο σχήματος
 Long stroke honing = Γυάλισμα μακράς παλινδρόμησης
 Lapping compound = Λειαντικό μίγμα
 Upper/lower lapping plate = Άνω/κάτω πλάκα λείανσης
 Workpiece cages = κλωβοί επεξεργαζόμενων κομματιών
 Relative motion between workpiece and lapping plate = σχετική κίνηση μεταξύ κομματιού και λειαντικής πλάκας
 Flat lapping = Επίπεδη λείανση με λειαντικό μίγμα
 Match lapping = λείανση συναρμογής με λειαντικό μίγμα
 Work-holding fixture = Σύστημα συγκράτησης κομματιού
 Submerged lapping = λείανση με βύθιση στο λειαντικό μίγμα
 Compressed air = Πεπιεσμένος αέρας
 Impact lapping = λείανση με κρούση του λειαντικού μίγματος με το κομμάτι

Σχήμα 2.15 Διεργασίες Λείανσης, Γυάλισματος και Λείανσης με λειαντικό μίγμα

νται, όταν έρχονται σε επαφή με το κομμάτι. Το Σχήμα 2.15 παρουσιάζει, γενικά, τις διάφορες τεχνικές λείανσης, του γυαλίσματος (Honing) και της λείανσης με λειαντικό μίγμα (Lapping), καθώς και την αντίστοιχη κινηματική της κάθε διεργασίας.

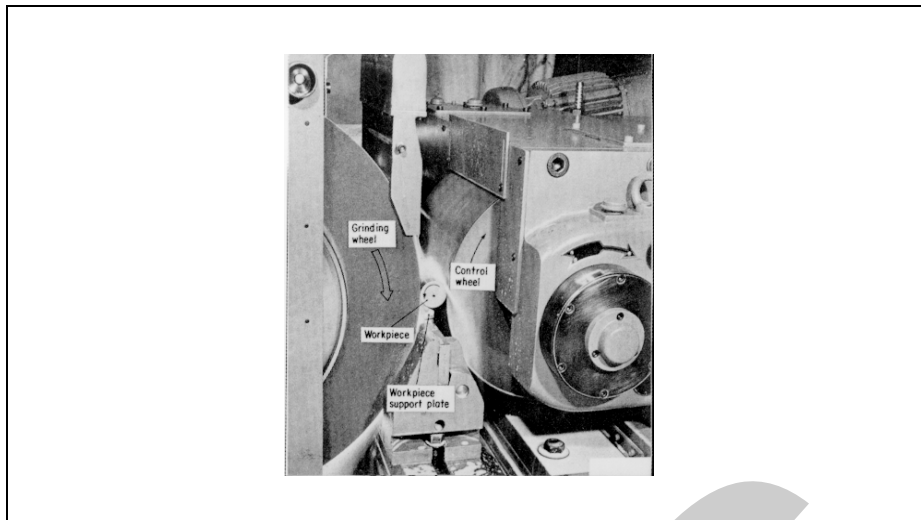
Η εξωτερική κυλινδρική λείανση (external cylindrical grinding) είναι ίσως μια από τις περισσότερο διαδεδομένες τεχνικές για την παραγωγή συμμετρικών εκ περιστροφής κομματιών. Μια άλλη διαδικασία λείανσης είναι η άκεντρη κυλινδρική λείανση (centerless cylindrical grinding), η οποία είναι ιδιαίτερης σημασίας για την αυτοκινητοβιομηχανία [2]. Στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές, που χρησιμοποιούνται στην άκεντρη λείανση για την εξασφάλιση της πρόωσης. Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η άκεντρη λείανση, όπως αυτή υλοποιείται στην βιομηχανική πρακτική.



Grinding wheel = λειαντικός τροχός
 Workpiece = Κομμάτι
 Control wheel = Τροχός ελέγχου
 Through-feed grinding = Λείανση εγκάρσιας πρόωσης
 Workpiece support plate = Έλασμα υποστήριξης κομματιού
 Transverse feed rate = Ρυθμός εγκάρσιας πρόωσης
 Circumferential control wheel velocity = Περιφερειακή ταχύτητα τροχού ελέγχου
 Generation of Transverse Feed Motion = Δημιουργία εγκάρσιας πρόωσης
 Dead stop = Τέρμα

Plunge grinding = Λείανση βύθισης
 Friction force of support plate on workpiece = Δύναμη τριβής του ελάσματος υποστήριξης στο κομμάτι
 Tangential force of grinding wheel on workpiece = Εφαπτομενική δύναμη του λειαντικού τροχού στο κομμάτι
 Tangential force of control wheel on workpiece = Εφαπτομενική δύναμη του τροχού ελέγχου στο κομμάτι
 Generation of Circular feed motion = Δημιουργία κυκλικής πρόωσης

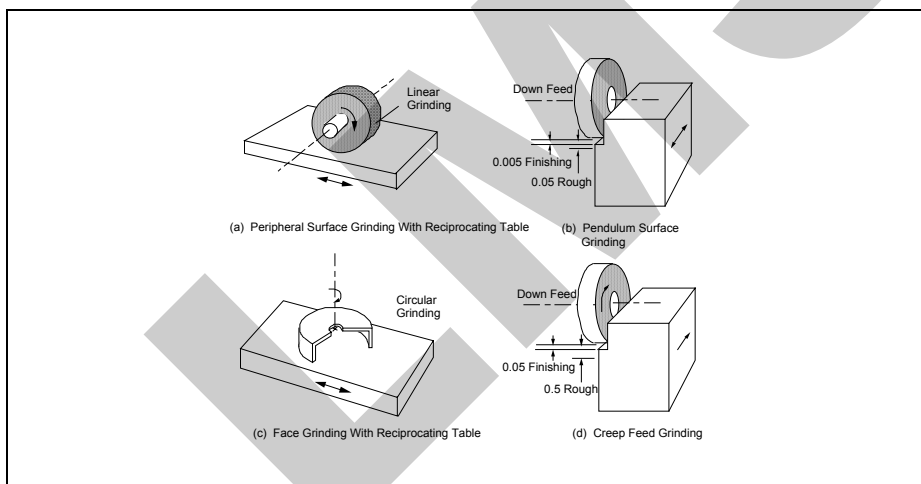
Σχήμα 2.16 Διεργασία Άκεντρης Λείανσης



Grinding wheel = λειαντικός τροχός
 Workpiece = Κομμάτι
 Control wheel = Τροχός ελέγχου

Workpiece support plate = Έλασμα υποστήριξης κομματιού

Σχήμα 2.17 Άκεντρη Λείανση [2]



Linear grinding = Κατά μήκος λείανση
 Peripheral surface grinding with reciprocating table = Επιφανειακή λείανση με την περιφερειακή επιφάνεια του τροχού σε τραπέζι παλινδρόμησης
 Down feed = πρόωση βάθους
 Finishing = Γυάλισμα, φινιρίσμα
 Rough = Ξεχόνδρισμα

Pendulum surface grinding = Παλινδρομική επιφανειακή λείανση
 Circular grinding = Κυκλική λείανση
 Face grinding with reciprocating table = Μετωπική λείανση σε τραπέζι παλινδρόμησης
 Creep feed grinding = Λείανση μεγάλης πρόωσης

Σχήμα 2.18 Διεργασίες Επιφανειακής Λείανσης

Η επιφανειακή λείανση (surface grinding) είναι επίσης μεγάλης σημασίας διεργασία, για την επίτευξη υψηλής διαστασιακής ακρίβειας και επιφανειακής ποιότητας σε επίπεδες επιφάνειες [2]. Το Σχ. 2.18 δείχνει διάφορες τεχνικές επιφανειακής λείανσης.

2.4.1 Χαρακτηριστικά των Διεργασιών Αφαίρεσης υλικού (Characteristics of Material Removal Processes)

Κόστος (Cost)

Το κόστος των μηχανών και των απαιτούμενων εργαλείων, που χρησιμοποιούνται στις διεργασίες αφαίρεσης υλικού είναι μικρό, συγκρινόμενο με το αντίστοιχο κόστος των διεργασιών αρχικού σχηματισμού ή διαμόρφωσης. Τυπικά, οι μηχανές κοστίζουν από \$10.000-\$80.000, για χειροκίνητο εξοπλισμό ή για εργαλειομηχανές CNC, αντίστοιχα, ενώ τα κοπτικά εργαλεία κοστίζουν από \$1-\$100 το καθένα. Όμως το επίπεδο της εξειδίκευσης, που χρειάζεται για τον προγραμματισμό της μηχανής ή τον χειροκίνητο προσδιορισμό της κινηματικής μεταξύ εργαλείου και κομματιού, είναι σχετικά υψηλό, άρα και το κόστος εργασίας για την χρήση διεργασιών αφαίρεσης υλικού είναι αντίστοιχα υψηλό. Έτσι, οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού είναι προτιμότερο να εφαρμόζονται για μικρό έως μεσαίο όγκο παραγωγής, με μέγεθος παρτίδας, που να κυμαίνεται από ένα μέχρι και μερικές εκατοντάδες κομμάτια.

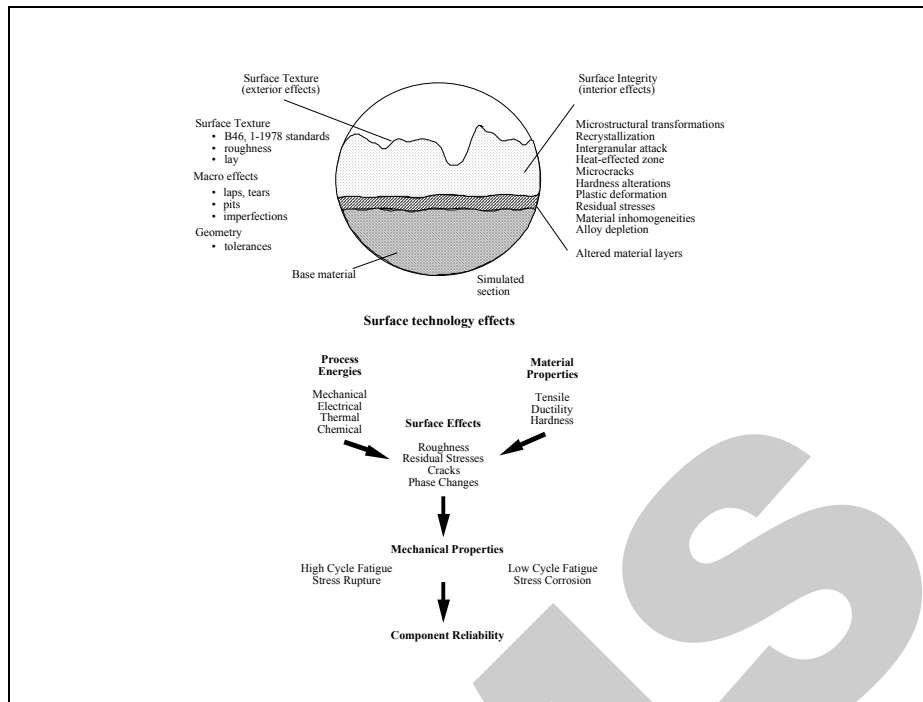
Παραγωγικότητα (Production Rate)

Ο ρυθμός παραγωγής των διεργασιών αφαίρεσης υλικού είναι πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο των διεργασιών χύτευσης ή διαμόρφωσης, αφού το κοπτικό εργαλείο χρειάζεται να κάνει πολλά περάσματα στην επιφάνεια του κομματιού για να δημιουργήσει το τελικό σχήμα. Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού εξαρτάται από την απαιτούμενη ποιότητα επιφάνειας, το υλικό του κομματιού, το υλικό του κοπτικού εργαλείου και το ψυκτικό που χρησιμοποιείται. Για τους χάλυβες, οι ρυθμοί αφαίρεσης υλικού κυμαίνονται από 1 mm³/min, για διεργασίες λείανσης, έως 10 cm³/min, για διεργασίες φρεζαρίσματος. Ο χρόνος, που απαιτείται για την προετοιμασία και το δέσιμο του κομματιού (από αρκετά λεπτά μέχρι και μία ώρα), είναι γενικά πολύ μικρότερος σε σχέση με τον χρόνο, που απαιτείται στις διαδικασίες αρχικού σχηματισμού και διαμόρφωσης.

Ποιότητα παραγόμενων κομματιών (Part Quality)

Η επιφανειακή ποιότητα και η τεχνολογία επιφανειών αποτελούν, προφανώς, πολύ σημαντικά θέματα στις διεργασίες αφαίρεσης υλικού. Μερικοί από τους διαφορετικούς παράγοντες, που μπορούν να επηρεάσουν την υφή (texture) και την «ακεραιότητα» (integrity) της επιφάνειας [6], σκιαγραφούνται στο Σχήμα

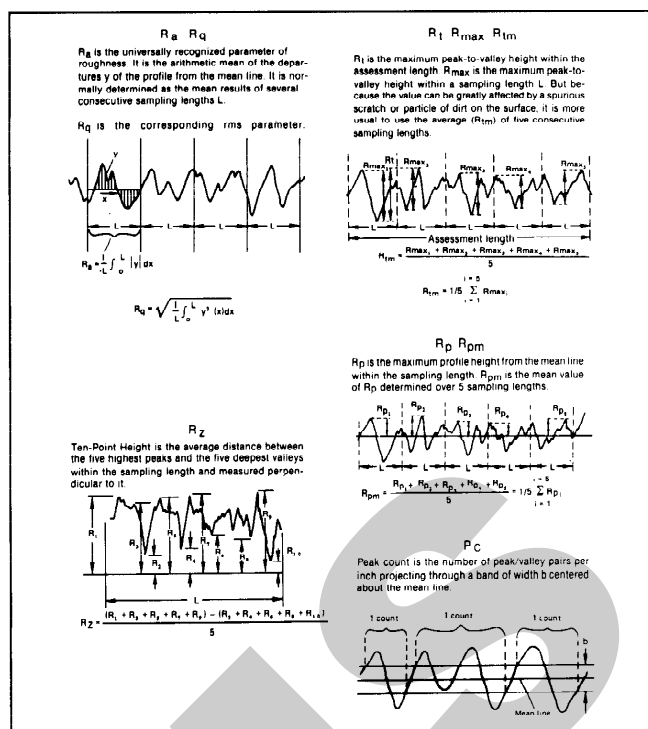
2.19. Η υφή της επιφάνειας μπορεί να περιγραφεί με όρους τραχύτητας, με



Surface texture (exterior effects) = Επιφανειακή υφή (εξωτερικά φαινόμενα)
 Standards = Πρότυπα
 Roughness = Τραχύτητα
 Lay
 Macro effects = Μακροσκοπικά φαινόμενα
 Laps = πτυχές
 Tears = σχισμές
 Pits = κοιλότητες
 Imperfections = ατέλειες
 Tolerances = ανοχές
 Base material = υλικό βάσης
 Surface integrity (interior effects) = ακεραιότητα επιφάνειας (εσωτερικά φαινόμενα)
 Microstructural transformations = Μετασηματισμοί μικροδομής
 Recrystallisation = Ανακρυστάλλωση
 Intergranular attack = διαταραχή μεταξύ των κόκκων του υλικού
 Heat affected zone = ζώνη θερμικής επιρροής
 Microcracks = μικρορωγμές
 Hardness alterations = Αλλαγές στη σκληρότητα
 Plastic deformation = Πλαστική παραμόρφωση
 Residual stresses = Παραμένουσες τάσεις
 Material inhomogeneities = Ανομοιογένειες του υλικού

Alloy depletion = απόλεια κράματος
 Altered material layers = Τροποποιημένα στρώματα υλικού
 Simulated section = Εξομοίωση τομής
 Surface technology effects = Φαινόμενα τεχνολογίας επιφανειών
 Process energies = Ενέργειες διεργασίας
 Mechanical = Μηχανική
 Electrical = Ηλεκτρική
 Thermal = Θερμική
 Chemical = Χημική
 Material = Υλικό
 Properties = Ιδιότητες
 Tensile = Ολκιμότητα
 Ductility = Ολκιμότητα
 Hardness = Σκληρότητα
 Cracks = Ρωγμές
 Phase changes = Αλλαγές φάσης
 High Cycle Fatigue = Κόπωση υψηλών συχνοτήτων
 Low Cycle Fatigue = Κόπωση χαμηλών συχνοτήτων
 Stress rupture = Θράνηση λόγω τάσεων
 Stress corrosion = Τάσεις διάβρωσης
 Component reliability = αξιοπιστία εξαρτήματος

Σχήμα 2.19 Χαρακτηριστικά Κατεργασμένης Επιφάνειας

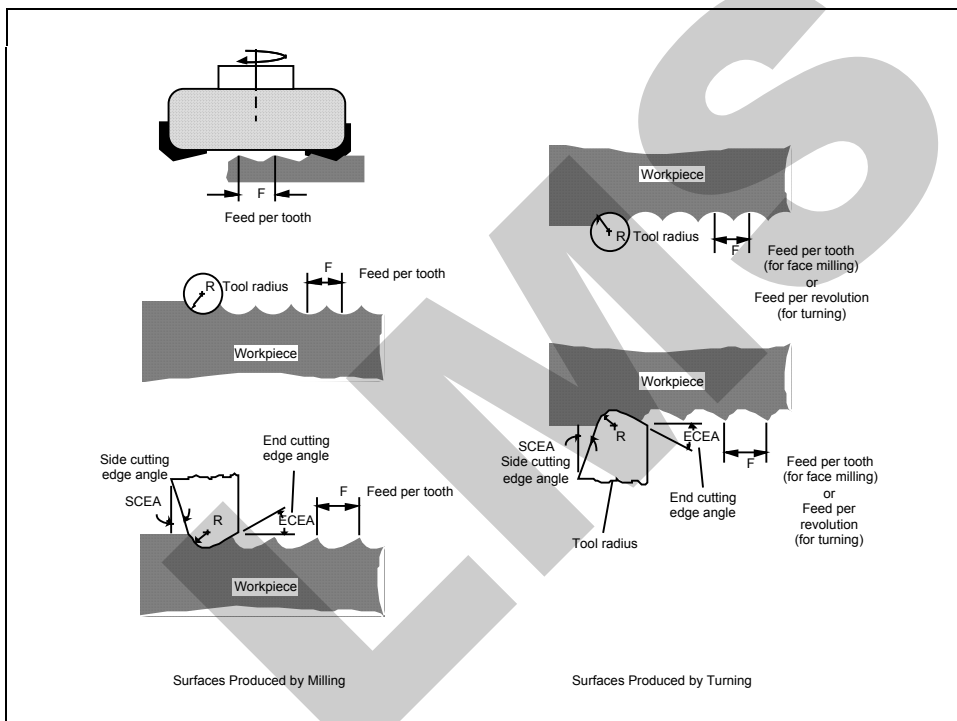


Ra is the universally recognized parameter of roughness. It is the arithmetic mean of the departures y of the profile from the mean line. It is normally determined as the mean results of several consecutive sampling lengths L . Rq is the corresponding RMS parameter. = Η Ra είναι η διεθνώς αναγνωρισμένη παράμετρος της ταχύτητας. Είναι ο αριθμητικός μέσος των αποστάσεων y του προφίλ της επιφάνειας από την γραμμή του μέσου. Συνήθως προσδιορίζεται ως η μέση τιμή από αρκετά διαδοχικά διαστήματα δειγματοληψίας εύρους L . Το Rq είναι η αντίστοιχη παράμετρος σε RMS. Ten-Point Height is the average distance between the five highest peaks and the five deepest valleys within the sampling length and measured perpendicular to it. = Το ύψος 10 σημείων είναι η μέση απόσταση μεταξύ των πέντε υψηλότερων κορυφών και των πέντε χαμηλότερων κοιλάδων μέσα στο μήκος δειγματοληψίας. Το ύψος αυτό μετράται σε διεύθυνση κάθετη του μήκους δειγματοληψίας. Rt is the maximum peak to valley height within the assessment length. Rmax is the maximum peak to valley height within a sampling length L . But because the value can be greatly affected by a

spurious scratch or particle of dirt on the surface, it is more usual to use the average (R_{tm}) of five consecutive sampling lengths. = Το R_t είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ κορυφής και κοιλάδας μέσα στο μήκος αξιολόγησης. Το R_{max} είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ κορυφής και κοιλάδας μέσα σε ένα μήκος δειγματοληψίας L . Επειδή όμως η τιμή αυτή μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από κάποια ψευδοαμυχή ή κόκκο βρωμιάς πάνω στην επιφάνεια, χρησιμοποιείται συνήθως η μέση τιμή (R_{tm}) από πέντε διαδοχικά μήκη δειγματοληψίας. Rp is the maximum profile height from the mean line within the sampling length. Rpm is the mean value of Rp determined over 5 sampling lengths. = Το Rp είναι το μέγιστο ύψος του προφίλ της επιφάνειας από την γραμμή του μέσου μέσα στο μήκος δειγματοληψίας. Το Rpm είναι η μέση τιμή του Rp που προσδιορίζεται σε 5 διαφορετικά μήκη δειγματοληψίας. Peak count is the number of peak/valley pairs per inch projecting through a band of width b centered about the mean line. = Η μέτρηση κορυφών είναι ο αριθμός των ζευγών κορυφής/κοιλάδας ανα ίντσα, τα οποία προεξέχουν μιάς ζώνης πλάτους b με κέντρο την ουδέτερη γραμμή.

Σχήμα 2.20 Χαρακτηριστικά Ποιότητας Επιφάνειας

μακροσκοπικά φαινόμενα –όπως ατέλειες– και με γεωμετρικούς όρους –όπως οι ανοχές. Από την άλλη μεριά, η ακεραιότητα της επιφάνειας σχετίζεται περισσότερο με φαινόμενα της μικροδομής –όπως μικρορωγμές και εναπομείνουσες εντατικές καταστάσεις. Τα επιφανειακά φαινόμενα δημιουργούνται τόσο από την ίδια την διεργασία, όσο και από τις ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού. Τα φαινόμενα αυτά έχουν άμεση επίδραση στα μηχανικά χαρακτηριστικά του κομματιού και κατ' επέκταση στην αξιοπιστία του. Το Σχήμα 2.20 ορίζει μερικά από τα χαρακτηριστικά επιφανειακής ποιότητας, που χρησιμοποιούνται διεθνώς στα βιομηχανικά πρότυπα [6]. Ο Πίνακας 2.4 συνοψίζει την επιφανειακή τραχύτητα, που μπορεί να επιτευχθεί από διάφορες διεργασίες, περιλαμβανομένων και των κοινώς χρησιμοποιούμενων διεργασιών αφαίρεσης υλικού –όπως διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση– καθώς επίσης και των διεργασιών αρχικού σχηματισμού –όπως η επικαλυπτική χύτευση και η χύτευση σε καλούπια.



Workpiece = Κομμάτι
 Feed per tooth = Πρόωση ανα δόντι
 Tool radius = Ακτίνα εργαλείου
 Face milling = Μετωπικό φρεζάρισμα
 Turning = Τόρνευση
 Side Cutting Edge Angle (SCEA) = Γωνία Πλευρικής Κοπτικής Ακμής

End Cutting Edge Angle (ECEA) = Γωνία Τελικής Κοπτικής Ακμής
 Surfaces produced by milling = Επιφάνειες που δημιουργούνται από φρεζάρισμα
 Surfaces produced by turning = Επιφάνειες που δημιουργούνται από τόρνευση

Σχήμα 2.21 Δημιουργία Επιφανειών κατά το Φρεζάρισμα και την Τόρνευση

Roughness average, R_a - microinches, min (micrometers, mm)

PROCESS	2000 (50)	1000 (25)	500 (12.5)	250 (6.3)	125 (3.2)	63 (1.6)	32 (0.80)	16 (0.40)	8 (0.20)	4 (0.10)	2 (0.05)	1 (0.025)	0.5 (0.012)
Flame cutting	[Bar chart showing typical roughness ranges for flame cutting]												
Snagging	[Bar chart showing typical roughness ranges for snagging]												
Sewing	[Bar chart showing typical roughness ranges for sewing]												
Planing, shaping	[Bar chart showing typical roughness ranges for planing and shaping]												
Drilling	[Bar chart showing typical roughness ranges for drilling]												
Chemical milling	[Bar chart showing typical roughness ranges for chemical milling]												
Elect. discharge mach.	[Bar chart showing typical roughness ranges for electrical discharge machining]												
Milling	[Bar chart showing typical roughness ranges for milling]												
Broaching	[Bar chart showing typical roughness ranges for broaching]												
Reaming	[Bar chart showing typical roughness ranges for reaming]												
Electron beam	[Bar chart showing typical roughness ranges for electron beam]												
Laser	[Bar chart showing typical roughness ranges for laser]												
Electrochemical	[Bar chart showing typical roughness ranges for electrochemical]												
Boring, turning	[Bar chart showing typical roughness ranges for boring and turning]												
Barrel finishing	[Bar chart showing typical roughness ranges for barrel finishing]												
Electrolytic grinding	[Bar chart showing typical roughness ranges for electrolytic grinding]												
Roller burnishing	[Bar chart showing typical roughness ranges for roller burnishing]												
Grinding	[Bar chart showing typical roughness ranges for grinding]												
Honing	[Bar chart showing typical roughness ranges for honing]												
Electropolish	[Bar chart showing typical roughness ranges for electropolish]												
Polishing	[Bar chart showing typical roughness ranges for polishing]												
Lapping	[Bar chart showing typical roughness ranges for lapping]												
Superfinishing	[Bar chart showing typical roughness ranges for superfinishing]												
Sand casting	[Bar chart showing typical roughness ranges for sand casting]												
Hot rolling	[Bar chart showing typical roughness ranges for hot rolling]												
Forging	[Bar chart showing typical roughness ranges for forging]												
Perm mold casting	[Bar chart showing typical roughness ranges for permanent mold casting]												
Investment casting	[Bar chart showing typical roughness ranges for investment casting]												
Extruding	[Bar chart showing typical roughness ranges for extruding]												
Cold rolling, drawing	[Bar chart showing typical roughness ranges for cold rolling and drawing]												
Die casting	[Bar chart showing typical roughness ranges for die casting]												

The ranges shown above are typical of the process listed.

Higher or lower values may be obtained under special conditions.

■ Average application

▨ Less frequent application

Flame cutting = κοπή με φλόγα

Snagging = λιμάρισμα

Sawing = πριόνισμα

Planing = πλάνισμα

Shaping = διαμόρφωση

Drilling = διάτρηση

Chemical milling = χημικό φρεζάρισμα

Electrical Discharge Machining =

ηλεκτροδιάβρωση

Milling = φρεζάρισμα

Broaching = γλύφανση

Reaming = αλεξούδα

Electron beam = κοπή με δέσμη ηλεκτρονίων

Laser = κοπή με δέσμη laser

Electrochemical = αφαίρεση υλικού με

ηλεκτροχημικό τρόπο

Boring = διάνοιξη οπών

Turning = τόννευση

Barrel finishing = φινίρισμα

Electrolytic grinding = ηλεκτρολυτική λείανση

Roller burnishing = στίλβωση με κύλιση

Grinding = λείανση

Honing = γυάλισμα

Electropolish = γυάλισμα με ηλεκτρισμό

Polishing = γυάλισμα

Lapping = λείανση με λειαντικό μίγμα

Superfinishing = φινίρισμα υψηλής ποιότητας

Sand casting = χύτευση στην άμμο

Hot rolling = διέλαση εν θερμώ

Forging = σφυρηλάτηση

Perm mold casting =

Investment casting = επικαλυπτική χύτευση

Extruding = εξέλαση

Cold rolling = διέλαση εν θερμώ

Drawing = εξόλκευση

Die casting = χύτευση σε καλούπι

Πίνακας 2.4 Ποιότητα Επιφανείας για διάφορες Μηχανουργικές Διεργασίες

Ο Πίνακας 2.4 δείχνει, ότι οι διεργασίες, που βασίζονται στην αφαίρεση υλικού με την χρήση θερμότητας όπως η κοπή με την βοήθεια φλόγας, παρέχουν συνήθως επιφάνειες κατώτερης ποιότητας (με επιφανειακή τραχύτητα ως και $25 \mu\text{m } R_a$) σε σύγκριση με διεργασίες, που βασίζονται στην μηχανική αφαίρεση υλικού (με τραχύτητα ως και $0.05 \mu\text{m } R_a$). Το Σχήμα 2.21 σκιαγραφεί τον μηχανισμό σχηματισμού των επιφανειών κατά το φρεζάρισμα και την τόννευση [6]. Το σχήμα αυτό, δεν δείχνει μόνο τον τρόπο που δημιουργούνται οι επιφάνειες, αλλά επίσης παρέχει κάποιες ενδείξεις για το πως μπορεί να επιτευχθεί καλή ποιότητα επιφάνειας, ρυθμίζοντας παραμέτρους όπως η πρόωση ανά δόντι ή η πρόωση ανά περιστροφή.

Ευελιξία (Flexibility)

Οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού κατατάσσονται ανάμεσα στις πιο ευέλικτες παραγωγικές διαδικασίες. Επειδή η γεωμετρία του τελικού κομματιού εξαρτάται από την γεωμετρία και την κινηματική του εργαλείου ως προς το κομμάτι, οι διαδικασίες αφαίρεσης υλικού μπορούν να παράγουν κομμάτια με μεγάλο εύρος μεγεθών, σχημάτων και επιφανειακής ποιότητας. Ο Πίνακας 2.4 δείχνει, ότι οι διεργασίες όπως το φρεζάρισμα, η τόννευση και η λείανση κινούνται σε ένα μεγάλο εύρος των ποιοτήτων επιφάνειας, που μπορούν να επιτευχθούν γενικά, γεγονός, που δείχνει την ευελιξία και την κεντρική τους θέση στην βιομηχανική πρακτική [6]. Ο μηχανισμός δημιουργίας της επιφάνειας στην τόννευση και το φρεζάρισμα (Σχ. 2.21) επεξηγεί την μεγάλη ευελιξία των διεργασιών αυτών ως προς την δυνατότητα δημιουργίας μιας μεγάλης ποικιλίας ποιοτήτων επιφάνειας, μέσω της επιλογής των παραμέτρων της διεργασίας.

Ένας άλλος λόγος, που εξηγεί την ευελιξία των διεργασιών αφαίρεσης υλικού, είναι ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας των μηχανών που χρησιμοποιούνται για τις διεργασίες αυτές. Τα σύγχρονα, αριθμητικά ελεγχόμενα κέντρα κατεργασίας έχουν ως και 9 μεταφορικούς και περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας για δεδομένο συνδυασμό εργαλείου-κομματιού. Ακόμη και σε διεργασίες διάτρησης, οι οποίες περιορίζονται σε ένα βαθμό ελευθερίας, μπορούμε να επιτύχουμε πολλές οπές διαφορετικού βάθους χωρίς να αλλαχθούν εργαλεία.

	Cost	Production Rate	Quality	Flexibility
Removing Processes	Medium Tooling/ High Labor Cost	Medium (Milling) to Low (Grinding)	High	High

Cost = Κόστος

Production Rate = Παραγωγικότητα

Quality = Ποιότητα

Flexibility = Ευελιξία

Removing Processes = Διεργασίες Αφαίρεσης
Υλικού

Tooling Cost = Κόστος Εργαλείων

Labor Cost = Κόστος Εργασίας

Low = Χαμηλό/ή

Medium = Μεσαίο/α

High = Υψηλό/ή

Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά των Διεργασιών Αφαίρεσης Υλικού

2.5 Διαδικασίες σύνδεσης (Joining Processes)

Οι διεργασίες σύνδεσης περιλαμβάνουν πλήθος διεργασιών όπως συγκόλληση (welding), χαλκοκόλληση (brazing), συγκόλληση με κόλληση ή καλαί (soldering), σύνδεση με κόλλες (adhesive bonding) και μηχανική σύνδεση (mechanical joining) [1, 4, 7]. Κάθε μια από αυτές αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των σύγχρονων παραγωγικών διαδικασιών, καθώς τα περισσότερα προϊόντα είναι αδύνατον να κατασκευασθούν απ' ευθείας σαν ένα κομμάτι. Οι διεργασίες σύνδεσης προσφέρουν την δυνατότητα κατασκευής των επί μέρους κομματιών ενός προϊόντος, τα οποία στην συνέχεια συναρμολογούνται σε ένα τελικό προϊόν. Με τον τρόπο αυτόν, το τελικό προϊόν μπορεί να κατασκευασθεί ευκολότερα και φθηνότερα, από του να κατασκευασθεί απ' ευθείας σαν ένα κομμάτι. Πολλά προϊόντα πρέπει να αποσυναρμολογούνται για συντήρηση ή επισκευή, οπότε είναι χρήσιμο να συνδέονται με τρόπο, που να διευκολύνει την αποσυναρμολόγηση και την επανασυναρμολόγησή τους. Επίσης, με τις διεργασίες σύνδεσης είναι δυνατόν το τελικό προϊόν να έχει κομμάτια με χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που να διαφέρουν από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των περισσότερων κομματιών, που το αποτελούν.

Πολλές διεργασίες σύνδεσης χρησιμοποιούν μηχανικά συστήματα πρόσδεσης (mechanical fasteners) όπως μπουλόνια (bolts), παξιμάδια (nuts) και βίδες (screws). Οι συνδέσεις, που γίνονται με μηχανικά συστήματα πρόσδεσης δεν είναι, συνήθως, μόνιμες και χρησιμοποιούνται σε προϊόντα και μηχανές, που πρέπει να αποσυναρμολογούνται για συντήρηση ή επισκευή. Στις διεργασίες υγρής κατάστασης, όπως η συγκόλληση, είναι απαραίτητη η μερική τήξη των υλικών για την επίτευξη της σύνδεσης. Στις διεργασίες αυτές απαιτείται η εφαρμογή θερμότητας ή/και πίεσης, προκειμένου να γίνει μόνιμη σύντηξη ή συνένωση των δύο κομματιών. Η επιλογή μιας διεργασίας από άλλες εξαρτάται από παράγοντες όπως ο σχεδιασμός της σύνδεσης, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, το μέγεθος, το σχήμα και το πάχος των κομματιών που θα συνδεθούν.

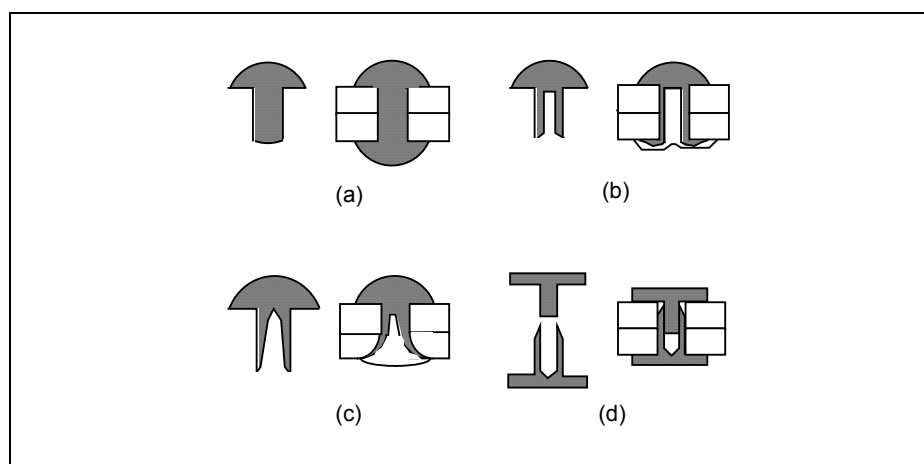
Η μηχανική σύνδεση (mechanical joining) χρησιμοποιείται συχνά εξ αιτίας του οικονομικού οφέλους, που προκύπτει από την παραγωγή των συνιστώντων μερών του τελικού προϊόντος και της τελικής συναρμολόγησής τους με μηχανικά μέσα. Σε μερικές περιπτώσεις απαιτούνται κινητές αρθρώσεις όπως μεντεσέδες, συρόμενοι μηχανισμοί για συρτάρια και πόρτες, ρυθμιζόμενα στοιχεία και εξαρτήματα συγκράτησης (fixtures). Η σύνδεση με πρόσδεση (fastening) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μηχανικής σύνδεσης. Ποικιλία εξαρτημάτων πρόσδεσης χρησιμοποιείται, ευρέως, όπως βίδες, παξιμάδια, μπουλόνια και πείροι. Η μηχανική συναρμολόγηση (Mechanical Assembly) χρησιμοποιείται για την σύνδεση των διαφορετικών εξαρτημάτων. Στις περιπτώσεις, που χρησιμοποιούνται προσδέτες για την σύνδεση, πρέπει να δημιουργηθούν οπές, στις οποίες θα τοποθετηθούν τα εξαρτήματα αυτά. Οι συνδέσεις μπορεί να υποβληθούν σε διατμητικά και εφελκυστικά φορτία και για αυτό θα πρέπει να σχεδιασθούν έτσι, ώστε να ανθίστανται στα φορτία αυτά. Η διάνοιξη οπών, η οποία είναι μια τυπική διαδικασία αφαίρεσης υλικού, μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της σύνδεσης καθώς και να επηρεάσει την ευκολία συναρμολόγησης.

Οι οπές μπορούν, επίσης, να δημιουργηθούν μέσω διεργασιών, οι οποίες δεν απαιτούν αφαίρεση υλικού –όπως η χύτευση, η σφυρηλάτηση, η διέλαση και η κονιομεταλλουργία. Τα μπουλόνια και οι βίδες μπορούν να δεθούν με παξιμάδια ή μπορεί να σχηματίσουν από μόνα τους το σπείρωμα με χύτευση ή διαμόρφωση πάνω στο υλικό, που πρόκειται να συνδεθεί (self tapping). Η αυτοπρόσδεση (self tapping) είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και οικονομική στην εφαρμογή της σε πλαστικά εξαρτήματα, στα οποία η ανάγκη για κατασκευή σπειρώματος ή χρήση παξιμαδιών μπορεί να εξαλειφθεί. Μπορούν να διατυπωθούν ορισμένοι εμπειρικοί κανόνες για την εφαρμογή των μηχανικών συνδέσεων [1]:

- Η χρήση λιγότερων αλλά μεγαλύτερων προσδετών είναι γενικά οικονομικότερη από την χρησιμοποίηση πολλών και μικρότερων.
- Η συναρμογή των κομματιών, που πρόκειται να συναρμολογηθούν, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο χαλαρή, προκειμένου το κόστος να είναι μικρό και να διευκολυνθεί η διεργασία συναρμολόγησης.
- Πρέπει να χρησιμοποιούνται τυποποιημένοι προσδέτες, όπου αυτό είναι δυνατόν.
- Οι οπές των προσδετών δεν πρέπει να βρίσκονται κοντά σε άκρες ή γωνίες του εξαρτήματος, ώστε να αποφευχθεί θραύση του υλικού, όταν το εξάρτημα καταπονείται.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος μόνιμης ή ημιμόνιμης μηχανικής σύνδεσης είναι η ήλωση (riveting). Εκατοντάδες χιλιάδες ήλοι χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και συναρμολόγηση ενός μεγάλου αεροσκάφους. Η εφαρμογή ενός ήλου γίνεται με την τοποθέτηση του μέσα στην οπή και στην συνέχεια με την παραμόρφωση του άκρου του που προεξέχει με θλίψη. Η ήλωση πραγματοποιείται είτε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε εν θερμώ με την χρησιμοποίηση ειδικών εργαλείων ή εκρηκτικών στην κοιλότητα του ήλου. Στο Σχήμα 2.22 παρατίθενται μερικά παραδείγματα ηλώσεων και προτείνονται κάποιες γενικές αρχές σχεδιασμού σχετικά με τις ηλώσεις.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι συναρμολόγησης εξαρτημάτων, χωρίς την χρήση προσδετών, όπως η σύνδεση με συρρίκνωση (shrink fitting) και η σύνδεση με πίεση (press fitting). Η σύνδεση με συρρίκνωση βασίζεται στην διαφορετική θερμική διαστολή και συστολή δύο εξαρτημάτων. Κατά τον τύπο αυτό σύνδεσης, χρησιμοποιείται ένα εξωτερικό εξάρτημα με υψηλό συντελεστή θερμικής διαστολής και ένα εσωτερικό εξάρτημα με μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής. Τα δύο κομμάτια θερμαίνονται και στην συνέχεια συναρμολογούνται. Καθώς τα συναρμολογούμενα κομμάτια ψύχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το εξωτερικό κομμάτι σφίγγει γύρω από το εσωτερικό. Τυπικές εφαρμογές της διαδικασίας αυτής είναι η τοποθέτηση γραναζιών ή κάμας σε άξονα. Στην σύνδεση με πίεση το ένα εξάρτημα τοποθετείται με την εφαρμογή δύναμης πάνω στο άλλο, κάτι που συνήθως οδηγεί σε υψηλή αντοχή σύνδεσης.

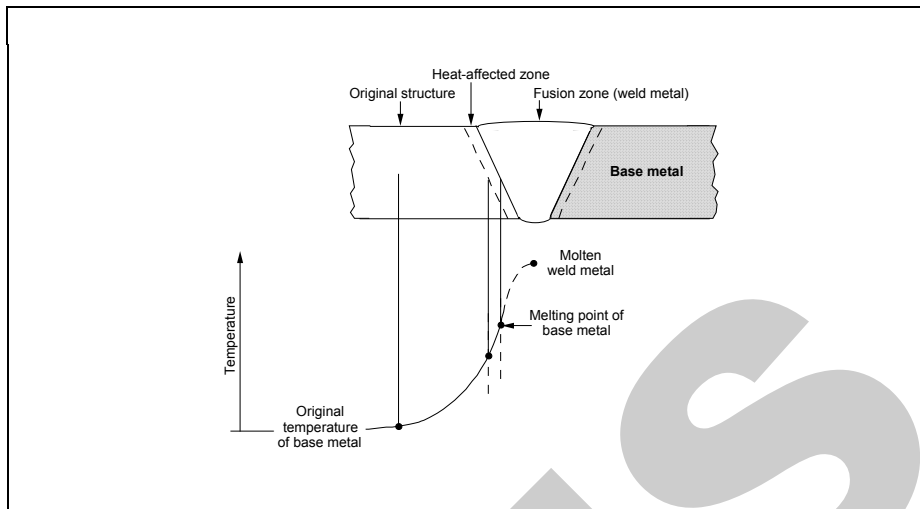


Σχήμα 2.22 Παραδείγματα Ηλώσεων: Συμπαγής (α), Σωληνωειδής (β), Διχαλωτή (γ) και Θλιπτική (δ)

Η συγκόλληση (welding) έχει ευρύτατη εφαρμογή στην βιομηχανία [1, 7]. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες διεργασίες συγκόλλησης είναι οι διεργασίες συγκόλλησης με σύντηξη –όπως η ηλεκτροσυγκόλληση (arc welding) με αναλώσιμα ή μη ηλεκτρόδια, η οξυγονοκόλληση (oxyfuel gas welding), η συγκόλληση ηλεκτρικής αντίστασης (resistance welding), η συγκόλληση δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam welding) και η συγκόλληση δέσμης laser (laser beam welding). Επιπλέον, υπάρχουν διάφορες διεργασίες συγκόλλησης στερεάς κατάστασης (solid-state) όπως η ψυχρή συγκόλληση (cold welding), η συγκόλληση με υπέρηχους (ultrasonic welding) και η συγκόλληση τριβής (friction welding), κατά τις οποίες η σύνδεση πραγματοποιείται χωρίς την σύντηξη των συνδεόμενων εξαρτημάτων.

Στις διεργασίες συγκόλλησης με σύντηξη, η περιοχή σύνδεσης [1, 7] αποτελείται από τρεις ζώνες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23. Αυτές οι τρεις ζώνες είναι η μεταλλική βάση (base metal), δηλαδή το εξάρτημα που θα συγκολληθεί, η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη της μεταλλικής βάσης (heat affected zone – HAZ) και το μέταλλο συγκόλλησης (weld metal), το οποίο βρίσκεται στην περιοχή της συγκόλλησης, που λιώνει κατά την διεργασία. Η κατάσταση του μετάλλου (metallurgy) και οι ιδιότητες της δεύτερης και της τρίτης ζώνης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των συνδεομένων μετάλλων, την διεργασία της συγκόλλησης, τα προστιθέμενα μέταλλα συγκόλλησης (όταν χρησιμοποιούνται) και των μεταβλητών της διεργασίας. Μια σύνδεση, που δημιουργείται χωρίς την χρησιμοποίηση προστιθέμενου μετάλλου, ονομάζεται αυτογενής (autogenous). Η ζώνη συγκόλλησης στην περίπτωση αυτή αποτελείται από το τηγμένο και επαναστερεοποιημένο μέταλλο της βάσης. Μια σύνδεση με προστιθέμενο μέταλλο (filler metal), έχει μια κεντρική ζώνη, η οποία α-

ποτελείται από ένα μείγμα μετάλλων, στο οποίο συμμετέχει η μεταλλική βάση και τα προστιθέμενα μέταλλα. Μετά την εφαρμογή θερμότητας και την εισαγωγή του προστιθέμενου μετάλλου (όταν υπάρχει) στην περιοχή συγκόλλησης, η συγκολλημένη σύνδεση αφήνεται να ψυχθεί με φυσικό τρόπο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Original structure = αρχική δομή

Heat affected zone = ζώνη θερμικής επιρροής
Fusion zone (weld metal) = ζώνη σύντηξης (του μετάλλου συγκόλλησης)

Base metal = μέταλλο βάσης

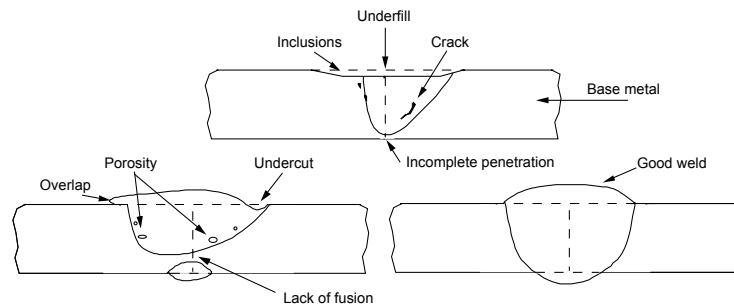
Melting point = σημείο τήξης

Molten = τηγμένο

Original temperature of base metal = αρχική θερμοκρασία του μετάλλου βάσης

Σχήμα 2.23 Χαρακτηριστικά μιας τυπικής Περιοχής Συγκόλλησης με Σύντηξη στην περίπτωση της Οξυγονοκόλλησης και της Ηλεκτροκόλλησης

Η διαδικασία στερεοποίησης στις διεργασίες συγκόλλησης με σύντηξη είναι παρόμοια με αυτή της χύτευσης. Το μέταλλο της συγκόλλησης είναι ένα χυτό κομμάτι, το οποίο, επειδή έχει ψυχθεί αργά, αποτελείται από μεγάλους κόκκους. Συνεπώς, η δομή αυτή παρουσιάζει χαμηλή αντοχή, ανθεκτικότητα και ολκιμότητα (ductility). Η σωστή επιλογή της σύστασης του προστιθέμενου μετάλλου ή των θερμικών διεργασιών, που θα γίνουν μετά την συγκόλληση, μπορούν να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες της σύνδεσης. Η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη είναι μια περιοχή της μεταλλικής βάσης με μικροδομή διαφορετική από αυτή του μετάλλου πριν την συγκόλληση, αφού έχει υποστεί υψηλές θερμοκρασίες για ορισμένο χρονικό διάστημα κατά την διάρκεια της διεργασίας. Τα τμήματα της μεταλλικής βάσης, που βρίσκονται μακριά από την πηγή θερμότητας, δεν υπόκεινται σε αλλαγές δομής κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Η αντοχή και η σκληρότητα της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης εξαρτώνται εν μέρει από το πως είχε αναπτυχθεί η αντοχή και η σκληρότητα στο συγκεκριμένο κράμα πριν από την συγκόλληση.



Underfill = έλλειψη προστιθέμενου μετάλλου
 Inclusions = εγκλείσματα
 Crack = ρωγμή
 Base metal = μέταλλο βάσης
 Incomplete penetration = ημιτελής διείσδυση

Overlap = επικάλυψη
 Porosity = ύπαρξη πόρων
 Undercut = υποκοπή
 Lack of fusion = έλλειψη σύντηξης
 Weld = συγκόλληση

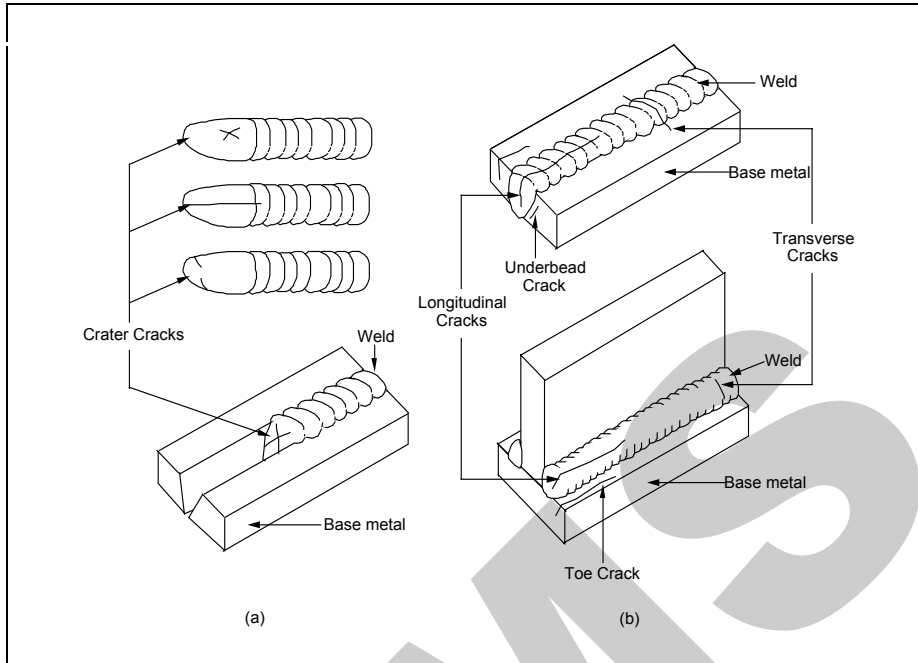
Σχήμα 2.24 Παραδείγματα Διαφόρων Ελαττωμάτων στην Συγκόλληση με Σύντηξη

Η ποιότητα μιας σύνδεσης με συγκόλληση είναι δυνατόν να επηρεασθεί από ένα πλήθος παραγόντων όπως είναι ο εγκλωβισμός αερίων, τα οποία εκλύονται κατά την διάρκεια της επαναστερεοποίησης της περιοχής συγκόλλησης δημιουργώντας πόρους (porosity), οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά την διάρκεια της συγκόλλησης και οι ανεπιθύμητες προσμίξεις [1, 7]. Οι περισσότερες συνδέσεις με συγκόλληση εμπεριέχουν πόρους, οι οποίοι παίρνουν συνήθως την μορφή σφαιρικών ή διαμηκών θυλάκων. Η δημιουργία πόρων στις συγκολλήσεις μπορεί να μειωθεί με την σωστή επιλογή ηλεκτροδίων και προστιθέμενων μετάλλων, με καλύτερες τεχνικές συγκόλλησης, όπως με προθέρμανση της περιοχής συγκόλλησης ή με την αύξηση του ρυθμού παροχής θερμότητας, με τον σωστό καθαρισμό και την πρόληψη της εισροής ανεπιθύμητων προσμείξεων στην ζώνη της συγκόλλησης.

Η ποιότητα της συγκόλλησης επηρεάζεται, επίσης, από την εγκλωβισμένη σκουριά, η οποία αποτελείται συνήθως από μείγματα οξειδίων και υλικών επικάλυψης των ηλεκτροδίων, που παγιδεύονται στην ζώνη συγκόλλησης. Συνδέσεις με συγκόλληση κακής ποιότητας μπορούν να προκύψουν ακόμη και όταν έχουμε πλήρη διείσδυση της συγκόλλησης. Το προφίλ της συγκόλλησης είναι σημαντικό, γιατί επηρεάζει την αντοχή και την εμφάνιση της συγκόλλησης, ενώ μπορεί να δείξει πιθανή ημιτελή σύντηξη, εγκλωβισμό προσμείξεων κ.λ.π. Το Σχήμα 2.24 δείχνει διάφορα παραδείγματα [1,7] προβληματικών προφίλ συγκόλλησης σύντηξης.

Οι ρωγμές αποτελούν ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα ποιότητας στις συγκολλήσεις. Μπορούν να παρουσιαστούν σε διάφορες περιοχές και διευθύνσεις στην περιοχή συγκόλλησης και είναι, συνήθως, το αποτέλεσμα συνδυ-

ασμού θερμοκρασιακών διαφορών, που προκαλούν θερμικές τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης, διαφοροποιήσεων της σύνθεσης του υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης κ.λ.π. Στο Σχήμα 2.25 φαίνονται διάφοροι τύποι ρωγμών, που μπορεί να εμφανισθούν σε συγκολλήσεις.



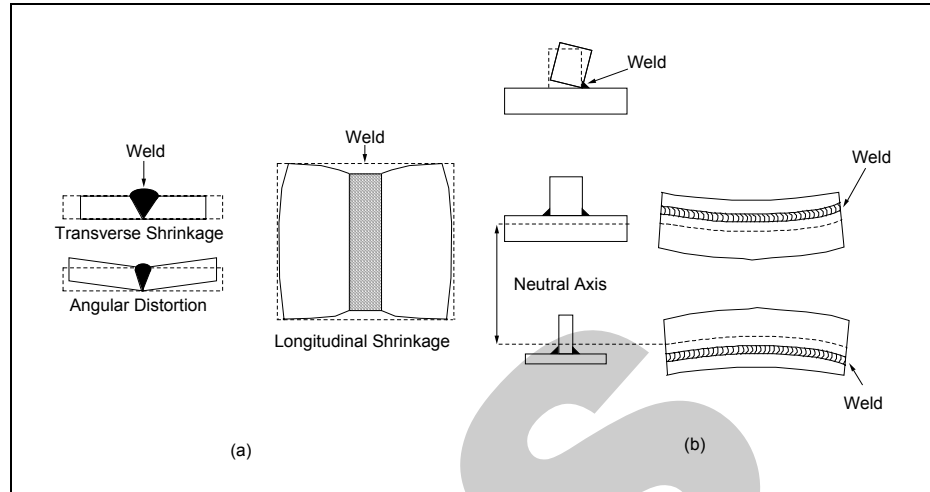
Weld = συγκόλληση
Base metal = μέταλλο βάσης
Crater cracks = ρωγμές σχήματος κρατήρα
Transverse cracks = εγκάρσιες ρωγμές

Longitudinal cracks = διαμήκειες ρωγμές
Underbead crack = ρωγή κάτω από την συγκόλληση
Toe crack = ρωγή στην βάση

Σχήμα 2.25 Τύποι Ρωγμών στις Συγκολλήσεις Τήξης, που οφείλονται σε Θερμικές Τάσεις, οι οποίες αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της Στερεοποίησης και της Συστολής της Ζώνης Συγκόλλησης και της Συγκολλημένης Δομής. Ρωγμές σχήματος Κρατήρα (α) και Διάφοροι Τύποι Ρωγμών στις Συγκολλήσεις Ελασμάτων και στις Συνδέσεις σχήματος T (β)

Παραμένουσες τάσεις είναι πιθανόν να παρουσιασθούν στα συγκολλημένα κομμάτια εξ αιτίας της διαστολής και της συστολής της περιοχής συγκόλλησης, φαινόμενα, που προκαλούνται από την τοπική θέρμανση και ψύξη. Το Σχήμα 2.26 δείχνει κάποιες από τις παραμορφώσεις, που μπορεί να παρουσιασθούν εξ αιτίας των τάσεων που παραμένουν στην σύνδεση. Τέτοιου είδους προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν με προθέρμανση της μεταλλικής βάσης ή των εξαρτημάτων που θα συγκολληθούν, πράγμα, που θα μειώσει τον ρυθμό ψύξης και συνεπώς το μέγεθος των θερμικών τάσεων. Συχνά χρησιμοποιούν-

ται μέθοδοι εξομάλυνσης τάσεων με σκοπό την μείωση των παραμενουσών τάσεων. Στις μεθόδους αυτές, η θερμοκρασία και ο απαιτούμενος χρόνος εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων, που έχουν συσσωρευτεί.



Weld = συγκόλληση
Neutral axis = Ουδέτερος άξονας
Longitudinal shrinkage = διαμήκης συρρίκνωση

Transverse shrinkage = εγκάρσια συρρίκνωση
Angular distortion = γωνιακή διαστρέβλωση

Σχήμα 2.26 Παραμόρφωση εξαρτημάτων μετά την συγκόλληση: Μετωπική Σύνδεση Ελασμάτων (butt joint) (α) και Συγκολλήσεις Προφίλ (fillet weld) (β). Η παραμόρφωση δημιουργείται λόγω των διαφορετικών συντελεστών διαστολής και συστολής των κομματιών, που απαρτίζουν την συναρμολόγηση. Η στρέβλωση μπορεί να μειωθεί ή και να εξαλειφθεί με το σωστό δέσιμο των κομματιών πριν συγκολληθούν

Ως συγκολλητικότητα (weldability) ενός υλικού, ορίζεται η ικανότητά του να συγκολληθεί σε μια συγκεκριμένη κατασκευή, η οποία έχει ορισμένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά και με τρόπο, που να ικανοποιεί τις λειτουργικές απαιτήσεις της κατασκευής. Αφού η συγκολλητικότητα εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων, είναι πολύ δύσκολο να γίνουν γενικεύσεις. Ο κατάλογος που ακολουθεί [1, 7], αναφέρεται στην συγκολλητικότητα μερικών μετάλλων, παρ' όλο που μπορεί να ποικίλει, εάν χρησιμοποιούνται ειδικές μέθοδοι συγκόλλησης:

- Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες (plain carbon steels): πολύ καλή συγκολλητικότητα στους χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, μέτρια ως καλή για χάλυβες μέτριας περιεκτικότητας σε άνθρακα, φτωχή για χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.

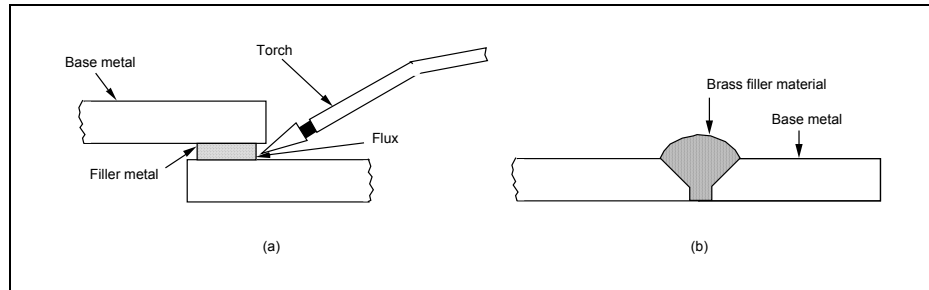
- Κράματα χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας (low alloy steels): εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την σύνθεσή τους.
- Κράματα χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας (high alloy steels): γενικά καλή κάτω από καλά ελεγχόμενες συνθήκες.
- Ανοξείδωτοι και νικελιούχοι χάλυβες (stainless steels and nickel alloys): ικανοί για συγκόλληση με ποικίλες διεργασίες.
- Κράματα αλουμινίου και χαλκού (aluminum and copper alloys): συγκολλησίμα με υψηλούς ρυθμούς εισαγωγής θερμότητας.
- Κράματα μαγνησίου (magnesium alloys): συγκολλούνται με την χρήση προστατευτικού αερίου και άλλων προστατευτικών μέσων.
- Κράματα τιτανίου και τανταλίου (titanium alloys and tantalum): συγκολλησίμα με την χρήση προστατευτικών αερίων.
- Βολφράμιο και μολυβδένιο (tungsten and molybdenum): συγκολλούνται σε καλά ελεγχόμενες συνθήκες.
- Κολόμβιον (columbium): καλή συγκολλητικότητα
- Βηρύλλιο (beryllium): συγκολλείται σε καλά ελεγχόμενες συνθήκες.

Η συγκόλληση στερεάς κατάστασης (solid-state welding), όπως ήδη αναφέρθηκε, περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες όπως την ψυχρή συγκόλληση και την συγκόλληση με υπερήχους.

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διεργασία είναι η συγκόλληση με ακτίνες laser (laser beam welding), η οποία χρησιμοποιεί ως πηγή θερμότητας μια εστιασμένη ακτίνα πολωμένου, μονοχρωματικού φωτός μεγάλης ισχύος. Επειδή η ακτίνα έχει μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, παρουσιάζει μεγάλη διεισδυτική ισχύ και μπορεί να κατευθυνθεί, να σχηματισθεί και να εστιασθεί με ακρίβεια στο επεξεργαζόμενο κομμάτι [1, 7]. Η συγκόλληση με Laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μεγάλη ποικιλία υλικών με πάχη μέχρι και 25 mm, ενώ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε κομμάτια με μικρό πάχος. Οι ταχύτητες συγκόλλησης κυμαίνονται από 40 mm/sec μέχρι και 1,3 m/sec για μέταλλα με μικρό πάχος. Εξ αιτίας της φύσης της διεργασίας, μπορεί να πραγματοποιηθεί συγκόλληση σε σημεία όπου δεν υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης για συγκόλληση με άλλες μεθόδους. Οι παραγόμενες συγκολλήσεις είναι καλής ποιότητας, με ελάχιστη συρρίκνωση και στρέβλωση, ενώ μπορούν να επιτευχθούν μεγάλοι λόγοι βάθους προς πλάτος, της τάξης του 30:1.

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam welding), όπως και η συγκόλληση με ακτίνα Laser, χρησιμοποιεί την θερμότητα, που παράγεται από μια λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας. Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα κατά την πρόσπτωση τους στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Σε αντίθεση, όμως, με την συγκόλληση με Laser, η διεργασία αυτή απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για την εστίαση της δέσμης των ηλεκτρονίων πάνω στο εξάρτημα, παρουσία κενού. Η διεισδυτικότητα της ακτί-

νας και ο λόγος βάθους προς πλάτος εξαρτώνται από το περιβάλλον της διεργασίας: Όσο μεγαλύτερο το κενό, τόσο μεγαλύτερη η διείσδυση και ο λόγος βάθους προς πλάτος.



Base metal = μέταλλο βάσης
Torch = φλόγιστρο
Flux = ροή

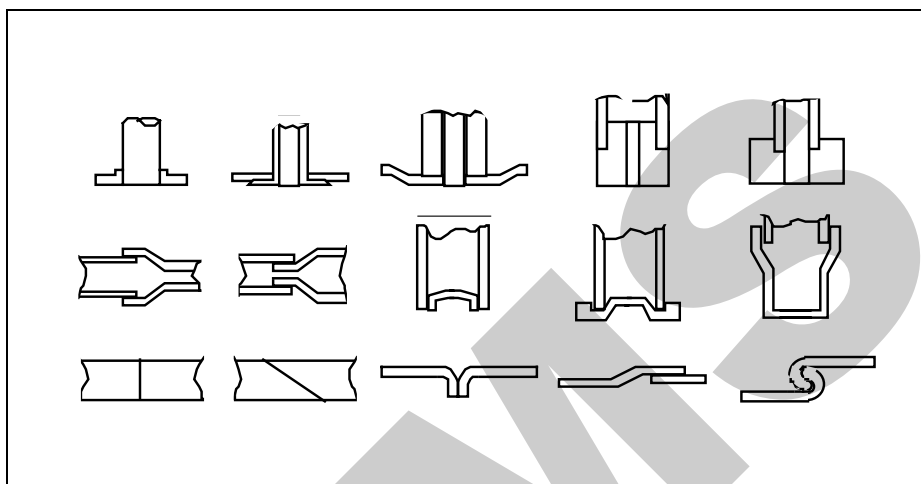
Filler metal = προστιθέμενο μέταλλο
Brass filler material = μπρούντζος ως προστιθέμενο μέταλλο

Σχήμα 2.27 Συγκολλήσεις με Μπρούντζο

Η συγκόλληση με μπρούντζο (brazing) είναι μια διεργασία σύνδεσης, στην οποία το προστιθέμενο μέταλλο τοποθετείται ανάμεσα ή πάνω από τις επιφάνειες που θα συγκολληθούν. Η θερμοκρασία, η οποία είναι συνήθως πάνω από 450°C , χρησιμοποιείται για την τήξη μόνο του προστιθέμενου μετάλλου και όχι των επιφανειών που θα συγκολληθούν. Στην συνέχεια το τηγμένο μέταλλο γεμίζει με τριχοειδή διάχυση (capillarity) τον χώρο ανάμεσα στις επιφάνειες, που θα συγκολληθούν. Μετά την ψύξη και την στερεοποίηση του προστιθέμενου μετάλλου, επιτυγχάνεται ισχυρή σύνδεση. Η αντοχή της σύνδεσης στην συγκόλληση με μπρούντζο, εξαρτάται από τον σχεδιασμό της σύνδεσης και την συνάφεια που επιτυγχάνεται στις περιοχές επαφής του κομματιού και του προστιθέμενου μετάλλου [1, 7]. Συνεπώς, οι επιφάνειες, που θα συγκολληθούν, θα πρέπει να καθαρισθούν προσεκτικά με χημικό ή μηχανικό τρόπο, ώστε να επιτευχθεί πλήρης αξιοποίηση των τριχοειδών ιδιοτήτων των υλικών. Υπάρχουν πολλά είδη προστιθέμενων υλικών σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών συγκόλλησης και ποικιλία σχημάτων όπως σύρμα, δακτύλιοι και πλακίδια. Το Σχήμα 2.27 δείχνει την διεργασία συγκόλλησης με μπρούντζο, ενώ στο Σχήμα 2.28 φαίνονται διάφορα συνήθη σχέδια συνδέσεων, που πρόκειται να συγκολληθούν με τις διεργασίες αυτές. Γενικά, η διεργασία συγκόλλησης με μπρούντζο χρησιμοποιείται για την σύνδεση διαφορετικών μετάλλων, που πρέπει να συναρμολογηθούν με καλή αντοχή σύνδεσης όπως, π.χ., τα καρβίδια πάνω στα χαλύβδινα κοπτικά εργαλεία.

Η συγκόλληση με κόλληση (καλάι) (soldering) είναι μια διεργασία παρόμοια με την συγκόλληση με μπρούντζο, με την εξαίρεση, ότι το προστιθέμενο μέταλλο (solder) τήκεται, συνήθως, κάτω από τους 450°C . Όπως και στην συγκόλληση με μπρούντζο (brazing), το προστιθέμενο μέταλλο γεμίζει τον χώρο μεταξύ των υπό συγκόλληση επιφανειών μέσω της τριχοειδούς διάχυσης.

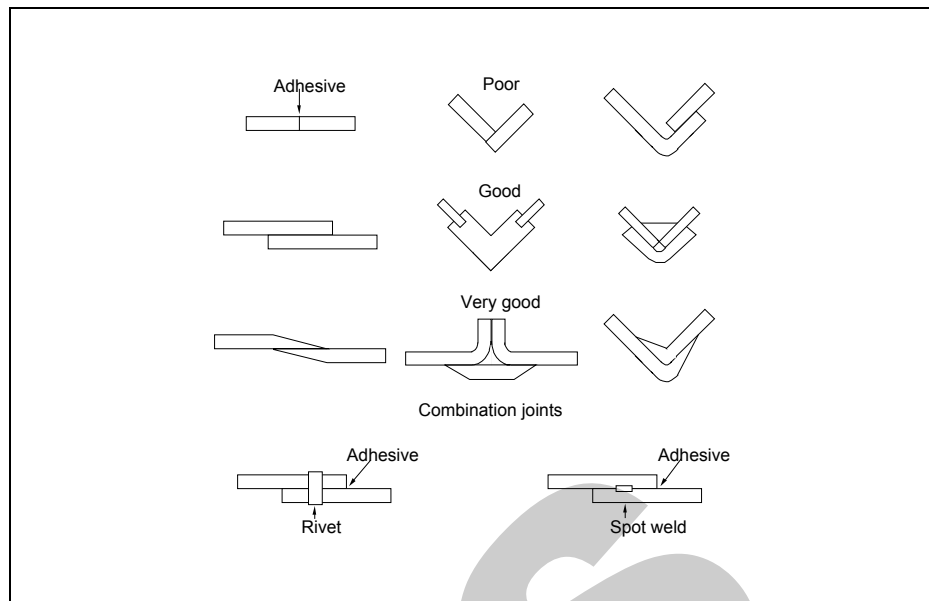
Η θερμική πηγή, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή, είναι συνήθως ένα σίδερο κόλλησης ή κολλητήρι (soldering iron), φλόγιτρο ή ένας φούρνος. Η συγκόλληση αυτού του τύπου χρησιμοποιείται εκτενώς στην βιομηχανία ηλεκτρονικών, καθώς και σε αεροστεγείς συσκευασίες δοχείων, που περιέχουν υγρά. Σε αντίθεση με τους συνδέσμους της συγκόλλησης με μπρούντζο, οι σύνδεσμοι της συγκόλλησης αυτού του τύπου (solder) έχουν πολύ μικρή χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, επειδή οι κολλήσεις δεν έχουν μεγάλη αντοχή, δεν χρησιμοποιούνται σε τμήματα κατασκευών που φέρουν φορτία. Ο χαλκός και τα ευγενή μέταλλα, όπως ο χρυσός και το ασήμι, είναι εύκολο να συγκολληθούν με την μέθοδο αυτή, όπως επίσης και φύλλα κασσιτέρου για δοχεία τροφίμων.



Σχήμα 2.28 Σχέδια Συνδέσμων που χρησιμοποιούνται συνήθως σε Διαδικασίες Συγκόλλησης με Μπρούντζο [1]

Στις διεργασίες συγκόλλησης με μπρούντζο (brazing) και κασσίτερο (soldering), σε αντίθεση με τις υπόλοιπες διεργασίες συγκόλλησης, τα υλικά, που πρόκειται να συνδεθούν, δεν είναι απαραίτητο να θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι είναι δυνατόν να κολληθούν ευαίσθητα ή περίπλοκα κομμάτια ή κομμάτια φτιαγμένα από δύο ή περισσότερα υλικά με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες, πάχη και διατομές.

Στην βιομηχανική πρακτική, τα εξαρτήματα συχνά συγκολλούνται με διεργασίες συγκόλλησης, που χρησιμοποιούν κόλλες (adhesives) παρά με μεθόδους τήξης –ειδικά στην συναρμολόγηση εξαρτημάτων από πλαστικά και σύνθετα υλικά. Η συγκόλληση με κόλλες (adhesive bonding) χρησιμοποιείται ευρύτατα στην αεροδιαστημική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην βιομηχανία συσκευών και στην παραγωγή οικοδομικών προϊόντων. Το Σχήμα 2.29 δείχνει έναν αριθμό συνδέσεων, που πραγματοποιήθηκαν με σύνδεση κόλλας και την διαφορά μεταξύ ενός καλού και ενός κακού σχεδιασμού της σύνδεσης [1].



Adhesive = κόλλα
 Poor = μη επαρκές
 Combination joints = συνδυασμοί συνδέσμων

Rivet = ήλος
 Spot weld = σημειακή συγκόλληση (πόντα)

Σχήμα 2.29 Διάφορα Σχέδια Συνδέσμων με κόλλες. (Να σημειωθεί, πως η καλή σχεδίαση απαιτεί μεγάλη επιφάνεια επαφής μεταξύ των μελών που πρόκειται να συγκολληθούν)

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κολλητικών υλικών (adhesives): φυσικές κόλλες όπως το άμυλο, οργανικές κόλλες όπως το πυριτιούχο νάτριο και το χλωρίδιο του οξειδίου του μαγνησίου και συνθετικές οργανικές κόλλες όπως τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. Οι κόλλες είναι διαθέσιμες σε διάφορες μορφές όπως υγρές, σε πάστα, σε διάλυμα, σε γαλάκτωμα, σε σκόνη, σε ταινία ή σε μεμβράνη. Μια μεγάλη ποικιλία όμοιων και ανόμοιων μεταλλικών και μη υλικών, καθώς επίσης και εξαρτήματα διαφορετικού σχήματος, μεγέθους και πάχους μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με κόλλες. Η σύνδεση με κόλλες μπορεί να συνδυασθεί, επίσης, με μηχανική σύνδεση με σκοπό την περαιτέρω ενίσχυση της σύνδεσης. Πολύ λεπτά και εύθραυστα κομμάτια μπορούν να συνδεθούν με κόλλες, χωρίς να προκύψει σημαντική αύξηση του βάρους τους [1]. Πορώδη υλικά και υλικά με διαφορετικά μεγέθη και ιδιότητες μπορούν επίσης να συνδεθούν. Συνήθως, η σύνδεση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες, κυμαινόμενες μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος έως και 200⁰ C και έτσι δεν υπάρχουν σημαντικές παραμορφώσεις ή μεταβολή των αρχικών ιδιοτήτων των συνδεόμενων εξαρτημάτων. Οι κόλλες προσφέρουν μια σύνδεση, που κατανέμει το φορτίο σε όλη την επιφάνεια επαφής των συνδεόμενων εξαρτημάτων, εξαλείφοντας έτσι τις συγκεντρωμένες τάσεις και

παρέχοντας κατασκευαστική ακεραιότητα στα μέρη τα οποία συνδέονται.

2.5.1 Χαρακτηριστικά των διεργασιών σύνδεσης (Characteristics of Joining Processes)

Κόστος (Cost)

Το κόστος κεφαλαίου και το κόστος των εργαλείων, που απαιτούν οι περισσότερες διεργασίες σύνδεσης, είναι σχετικά χαμηλό συγκρινόμενο με άλλες διεργασίες, αφού το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού, που χρησιμοποιείται, έχει χαμηλό κόστος. Μια τυπική μηχανή συγκόλλησης κοστίζει από 5.000 έως 50.000 \$. Παρ' όλ' αυτά, το επίπεδο της τεχνικής κατάρτισης των χειριστών είναι υψηλό –ειδικά στις περιπτώσεις, που τα συνδεόμενα τμήματα έχουν περίπλοκα γεωμετρικά σχήματα. Επομένως, το εργατικό κόστος, που αφορά τις διεργασίες συνένωσης, μπορεί να είναι υψηλό. Αλλά κόστη, που αφορούν εργαλεία όπως ακροφύσια συγκόλλησης (Welding Nozzles) και υλικά (κόλλες, κολλητικά πλακίδια και αέρια), είναι σχετικά χαμηλά.

Ρυθμοί Παραγωγής (Production Rate)

Οι διεργασίες σύνδεσης ανήκουν στην κατηγορία των εργασιών εντάσεως εργασίας, ειδικά, όταν τα συνδεόμενα εξαρτήματα έχουν πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι περισσότερες διεργασίες συγκόλλησης απαιτούν κάποια προετοιμασία των επιφανειών, που θα συνδεθούν, για την ελαχιστοποίηση της τραχύτητάς τους, καθώς και κάποιο χρονικό διάστημα μετά την σύνδεση για το στέγνωμα ή την ψύξη της συγκόλλησης. Αυτοί οι παράγοντες έχουν σαν αποτέλεσμα την χαμηλή παραγωγικότητα των διεργασιών σύνδεσης σε σύγκριση με άλλες διεργασίες όπως οι διεργασίες σχηματισμού, διαμόρφωσης και αφαίρεσης υλικού.

Ποιότητα Κομματιών (Part Quality)

Η ποιότητα των συνδέσεων περιορίζεται από την έλλειψη αποτελεσματικών μεθόδων για την εκτίμηση της ποιότητάς τους. Στην συγκόλληση με τήξη, η δημιουργία της περιοχής του τηγμένου υλικού (Weld Pool) συνοδεύεται από την ανάπτυξη μιας θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (Heat Affected Zone), στην οποία η μικροδομή του υλικού έχει μεταβληθεί εξ αιτίας της αναπτυσσόμενης θερμότητας. Άλλου είδους συνήθη ελαττώματα στις συγκολλήσεις αποτελούν η παγίδευση αερίων ή/και κατάλοιπων στην συγκόλληση, η ημιτελής τήξη ή διείσδυση της συγκόλλησης, η δημιουργία ρωγμών, η καταστροφή των επιφανειών και οι απομένουσες τάσεις. Παρ' όλ' αυτά, η αποτελεσματική χρήση των τεχνικών σύνδεσης μπορεί να παράγει συνδέσεις με μηχανική αντοχή, που υπερβαίνει αυτή των συνδεόμενων εξαρτημάτων.

Ευελιξία (Flexibility)

Οι διεργασίες σύνδεσης έχουν, επίσης, υψηλό βαθμό ευελιξίας ως προς την γεωμετρία των κομματιών και το μέγεθος των παραγομένων παρτίδων. Επειδή τα περισσότερα εργαλεία συγκόλλησης έχουν αρκετούς βαθμούς ελευθερίας, είναι δυνατόν να συγκολληθούν εξαρτήματα με μεγάλο εύρος μεγεθών και σχημάτων.

	Cost	Production Rate	Quality	Flexibility
Joining Processes	Low Capital/ High Labor Cost	Medium (Welding) to Low (Adhesives)	Medium to Low	High

Cost = Κόστος

Production Rate = Παραγωγικότητα

Quality = Ποιότητα

Flexibility = Ευελιξία

Joining Processes = Διεργασίες Σύνδεσης

Tooling Cost = Κόστος Εργαλείων

Labor Cost = Κόστος Εργασίας

Low = Χαμηλό/ή

Medium = Μεσαίο/α

High = Υψηλό/ή

Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά των Διεργασιών Σύνδεσης

2.6 Διεργασίες τροποποίησης των ιδιοτήτων του υλικού (Modifying Material Properties Processes)

Οι παραγωγικές διεργασίες, που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, αναφέρονται κυρίως στην αλλαγή του σχήματος των κατεργαζόμενων κομματιών. Εφ' όσον, όμως, όλες οι παραγωγικές διεργασίες συνοδεύονται από αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολλών φαινομένων όπως μηχανικών, θερμικών, ακουστικών και ηλεκτρομαγνητικών, εμφανίζονται συνεχώς και δευτερεύουσες επιδράσεις όπως η μεταβολή της δομής και της σύνθεσης του υλικού, οι οποίες αποτελούν ακούσια αποτελέσματα. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν διεργασίες, που ως σκοπό έχουν την εσκεμμένη μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού με ταυτόχρονη διατήρηση της βασικής γεωμετρίας του κομματιού.

Η λειτουργικότητα πολλών διεργασιών εξαρτάται συχνά από τις φυσικές ιδιότητες των προς επεξεργασία υλικών. Οι θερμικές και οι επιφανειακές μέθοδοι επεξεργασίας (*Heat and Surface Treatment*) μπορούν να επηρεάσουν ουσιαστικά τις ιδιότητες των υλικών. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα πρακτικές στα μεταλλικά υλικά. Η θερμική επεξεργασία επιτρέπει την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων μέσα σε κάποια συγκεκριμένα όρια και συνήθως χρησιμοποιείται για την δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για την εφαρμογή περαιτέρω παραγωγικών διεργασιών, καθώς και για την τελική χρήση του εξαρτήματος.

Η *εξομάλυνση τάσεων (Stress Relieving)* χρησιμοποιείται για την μείωση και εξισορρόπηση των εσωτερικών τάσεων των κομματιών, οι οποίες αναπτύσσονται από την εφαρμογή διεργασιών σχηματισμού ή από άνιση κατανομή της θερμότητας. Αυτές οι εσωτερικές ή απομένουσες τάσεις προκαλούν, συνήθως, ελαστική παραμόρφωση του υλικού και αν το εξάρτημα υποστεί φορτίσεις σε διευθύνσεις ίδιες με αυτές των εναπομενουσών τάσεων, το όριο ελαστικότητας μπορεί να ξεπερασθεί και το εξάρτημα να αστοχήσει. Για την εξομάλυνση των τάσεων σε ένα εξάρτημα, μπορεί να εφαρμοσθεί μια διεργασία ανόπτησης (Annealing) σε υψηλές θερμοκρασίες, η οποία επιφέρει μείωση του ορίου ροής του υλικού χωρίς αλλαγή της κρυσταλλικής του δομής. Στον χάλυβα, η ανόπτηση πραγματοποιείται, συνήθως, σε θερμοκρασίες της τάξης των 500⁰ C έως 650⁰ C, αν και η διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη θερμοκρασία. Η ψύξη σε θερμοκρασίες 250–300 °C πραγματοποιείται καλύτερα σε φούρνους και στην συνέχεια το εξάρτημα ψύχεται με αέρα. Στην *ανόπτηση ανακρυστάλλωσης (Recrystallization Annealing)*, δημιουργείται μια νέα κρυσταλλική δομή, προκειμένου να αντισταθμίσει την σκλήρυνση του υλικού, που μπορεί να προκύψει από διάφορες διεργασίες σχηματισμού. Η εσωτερική δομή, που δημιουργείται, θα πρέπει να έχει πολύ καλή διάταξη κόκκων, έτσι ώστε να βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και να ευνοεί την εφαρμογή περαιτέρω διεργασιών σχηματισμού. Στην ανόπτηση ανακρυστάλλωσης η θερμοκρασία εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών και είναι συνήθως της τάξης των 600–700⁰ C.

Οι θερμικές διεργασίες όπως η *ανόπτηση γι' αποκατάσταση (Recovery Annealing)*, η *εξομάλυνση τάσεων*, η *ανόπτηση ανακρυστάλλωσης* και η *ήπια ανόπτηση (Soft Annealing)* μπορούν επίσης να εφαρμοσθούν στο αλουμίνιο και στα κράματά του. Οι θερμοκρασίες είναι βέβαια χαμηλότερες από αυτές, που χρησιμοποιούνται για την θερμική επεξεργασία των χαλύβων, παρ' όλο που τα αποτελέσματα είναι παρόμοια.

2.6.1 Χαρακτηριστικά των διεργασιών τροποποίησης των ιδιοτήτων του υλικού (Characteristics of Modifying Processes)

Κόστος (Cost)

Το κόστος κεφαλαίου και το κόστος λειτουργίας του εξοπλισμού, που απαιτείται για την εφαρμογή θερμικών και επιφανειακών μεθόδων επεξεργασίας, μπορεί να είναι υψηλό λόγω του ότι οι σύγχρονοι φούρνοι έχουν αρκετά μεγάλο κόστος –της τάξης των αρκετών εκατοντάδων χιλιάδων δολαρίων. Ο έλεγχος των σύγχρονων φούρνων με την χρήση υπολογιστή μειώνει το εργατικό κόστος, γιατί δεν απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό για τον έλεγχο των παραμέτρων της διεργασίας. Το κόστος των καυσίμων ή/και της ηλεκτρικής ενέργειας, που καταναλώνεται στους φούρνους, είναι σχετικά υψηλό σε σύγκριση με το κόστος λειτουργίας άλλων εργαλειομηχανών.

Ρυθμοί Παραγωγής (Production Rate)

Στις θερμικές διεργασίες, όπου απαιτείται η ανύψωση της θερμοκρασίας του κομματιού, ένα σημαντικό μέρος του χρόνου της διεργασίας καταναλώνεται στην θέρμανση, στην διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας και τέλος στην ψύξη του κομματιού σε θερμοκρασία δωματίου. Επίσης, η προθέρμανση των συμβατικών φούρνων μπορεί να χρειασθεί αρκετές ώρες. Για τον λόγο αυτό, οι θερμικές κατεργασίες είναι πιθανό να καταλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος του ολικού χρόνου παραγωγής ενός κομματιού. Όμως, η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων κομματιών, που έχουν υποστεί θερμικές κατεργασίες, είναι δυνατόν να περιορίσει την ανάγκη για χρησιμοποίηση ακριβότερων υλικών.

Ποιότητα Κομματιών (Part Quality)

Οι θερμικές και οι επιφανειακές μέθοδοι επεξεργασίας χρησιμοποιούνται, συνήθως, για την βελτίωση της ποιότητας των κομματιών μέσω της σκλήρυνσης του υλικού τους (σκληρότητα έως και 65 Rockwell C), της εξομάλυνσης των εναπομενουσών τάσεων και της επένδυσης του κομματιού με ένα υλικό, που να έχει επιθυμητές ιδιότητες. Η περιοχή, που υποβάλλεται σε επεξεργασία, εκτείνεται συνήθως από 0,05–1 mm κάτω από την επιφάνεια του κομματιού. Η ακατάλληλη θερμική κατεργασία, οποιουδήποτε μεταλλικού κράματος, μπορεί να οδηγήσει σε ελαττώματα όπως τον σχηματισμό χονδροειδών κόκκων και το κάψιμο ή την απανθράκωση της επιφάνειας. Οι χονδροειδείς (τραχείς) κόκκοι μπορεί να σχηματισθούν εξ αιτίας της υπερθέρμανσης ή της εκτεταμένης παραμονής στην θερμοκρασία ανόπτησης. Η επιφανειακή ή επιδερμική απανθράκωση εμφανίζεται στους χάλυβες ως αποτέλεσμα της διάχυσης του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, εξαιτίας των παρατεταμένων χρόνων ανόπτησης. Συχνά η καμένη επιφάνεια είναι ένα ελάττωμα, που δεν μπορεί να διορθωθεί. Οι θερμικές διεργασίες, που πραγματοποιούνται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμη οξείδωση στα όρια των κόκκων, γεγονός, που αποδυναμώνει την συνοχή τους και μειώνει την αντοχή, καθιστώντας το υλικό άχρηστο.

Ευελιξία (Flexibility)

Οι θερμικές και επιφανειακές μέθοδοι επεξεργασίας μπορούν να εφαρμοσθούν σε κομμάτια ποικίλης γεωμετρίας και μεγέθους, επειδή δεν υπάρχει επαφή μεταξύ κάποιου εργαλείου με το κομμάτι. Όμως, στις περισσότερες συμβατικές διεργασίες, το μέγεθος του προς επεξεργασία κομματιού περιορίζεται από το μέγεθος του φούρνου, που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της διεργασίας. Κάποιες πολύ εξελιγμένες μέθοδοι όπως η επεξεργασία επιφανειών με Laser, εξαλείφουν αυτόν τον περιορισμό, εφαρμόζοντας επάνω στο κομμάτι μια θερμική πηγή, όπως η ακτίνα Laser και σαρώνοντάς την κατά μήκος της επιφάνειας του κομματιού.

	Cost	Production Rate	Quality	Flexibility
Modifying Processes	Medium to High Capital/Low Labor Cost	Low	High	Medium to High

Cost = Κόστος
 Production Rate = Παραγωγικότητα
 Quality = Ποιότητα
 Flexibility = Ευελιξία
 Modifying Processes = Διεργασίες Τροποποίησης των Ιδιοτήτων του Υλικού

Tooling Cost = Κόστος Εργαλείων
 Labor Cost = Κόστος Εργασίας
 Low = Χαμηλό/ή
 Medium = Μεσσαίο/α
 High = Υψηλό/ή

Πίνακας 2.7 Χαρακτηριστικά των Διεργασιών Τροποποίησης των Ιδιοτήτων του Υλικού

2.7 Σύγκριση των ιδιοτήτων των διεργασιών (Process Attribute Comparison)

	FORMING	DEFORMING	REMOVING	JOINING	MODIFYING
COST	High Tooling/ Low Labor Cost	High Tooling/Low Labor Cost	Medium Tooling/ High Labor Cost	Low Capital/ High Labor Cost	Medium to High Capital/ Low Labor Cost
PRODUCTION RATE	High	High	Medium (Milling) to Low (Grinding)	Medium (Welding) to Low (Adhesives)	Low
QUALITY	Medium to Low	Medium to Low	Medium to High	Medium to Low	High
FLEXIBILITY	Low	Low	High	High	Medium to High

Cost = Κόστος
 Production Rate = Παραγωγικότητα
 Quality = Ποιότητα
 Flexibility = Ευελιξία
 Forming Processes = Διεργασίες Σχηματισμού
 Deforming Processes = Διεργασίες Διαμόρφωσης Υλικού
 Removing Processes = Διεργασίες Αφαίρεσης
 Joining Processes = Διεργασίες Σύνδεσης

Modifying Processes = Διεργασίες Τροποποίησης των Ιδιοτήτων του Υλικού
 Welding = Συγκόλληση
 Aghesives = Κόλλες
 Tooling Cost = Κόστος Εργαλείων
 Labor Cost = Κόστος Εργασίας
 Low = Χαμηλό/ή
 Medium = Μεσσαίο/α
 High = Υψηλό/ή

Πίνακας 2.8 Χαρακτηριστικά των Κατηγοριών των Παραγωγικών Διεργασιών

Η δυνατότητα εφαρμογής της κάθε κατηγορίας παραγωγικών διεργασιών σε σχέση με τα κριτήρια που σχηματίζουν το τετράεδρο παραγωγής, το οποίο συ-

ζητήθηκε στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.8. Από την σύγκριση προκύπτει, ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ των παραγωγικών ιδιοτήτων σε κάθε παραγωγική διεργασία. Η επιλογή της κατάλληλης διεργασίας συχνά εξαρτάται από την ισορροπία και των τεσσάρων κριτηρίων και βασίζεται στις απαιτήσεις για την κατασκευή ενός επιθυμητού προϊόντος κατά τρόπο αποτελεσματικό και επικερδή. Για παράδειγμα, αν η πρώτη προτεραιότητα είναι η παραγωγικότητα, τότε θα πρέπει να επιλεγούν διεργασίες αρχικού σχηματισμού και διαμόρφωσης. Εάν, όμως, πρόκειται να παραχθούν διαφορετικοί τύποι εξαρτημάτων σε μικρές παρτίδες στις ίδιες εγκαταστάσεις, τότε οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού ή συνένωσης κρίνονται καταλληλότερες. Τέλος, αν η ποιότητα των παραγόμενων κομματιών είναι πρώτης προτεραιότητας, τότε οι διεργασίες αφαίρεσης υλικού ή μεταβολής των ιδιοτήτων του υλικού θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως δευτερεύουσες διεργασίες.

LMS

Βιβλιογραφία

1. Kalpakjian, S., *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
2. Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
3. Kalpakjian, S., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1997.
4. Schey, J., *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw-Hill, New York, 1987.
5. Lange, K., *Handbook of Metal Forming*, Mc Graw Hill, New York, 1985.
6. Chryssolouris, G., *Laser Machining: Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York, 1991.
7. ———, *Machining Data Handbook*, 3rd Edition, Vol 2, Metcut Research Associates Inc., 1980.
8. Schwartz, M.M., *Metal Joining Manual*, McGraw-Hill, New York, 1979.
9. Edgar, C., *Fundamentals of Manufacturing Processes and Materials*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1965.
10. Lindberg, R., *Processes and Materials of Manufacture*, Allyn and Bacon Inc., Boston, MA, 1977.
11. Niebel, B., A. Draper and R. Wysk, *Modern Manufacturing Process Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1989.
12. Shaw, M., *Metal Cutting Principles*, The Technology Press, Cambridge, MA, 1954.
13. Walker, J., *Machining Fundamentals*, Goodheart-Willcox Co., South Holland, IL, 1977.
14. *Plastics Product Design Handbook*, ed. E. Miller, Marcel Dekker Inc., New York, 1983.
15. *Stamping Design Thru Maintenance*, ed. Kerl Keyes, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1983.
16. Paul, F., Jacobs, *Stereolithography and other RP&M techniques*, ASME Press, 1992, New York, ISBN 0-87263-467-1.
17. Kruth, J.P., *Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques*, Annals of the CIRP Vol.40/2/91 pp. 603-614.
18. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4th edition, Vol. 2, SME, 1985.

LMS

3 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (MACHINE TOOLS AND MANUFACTURING EQUIPMENT)

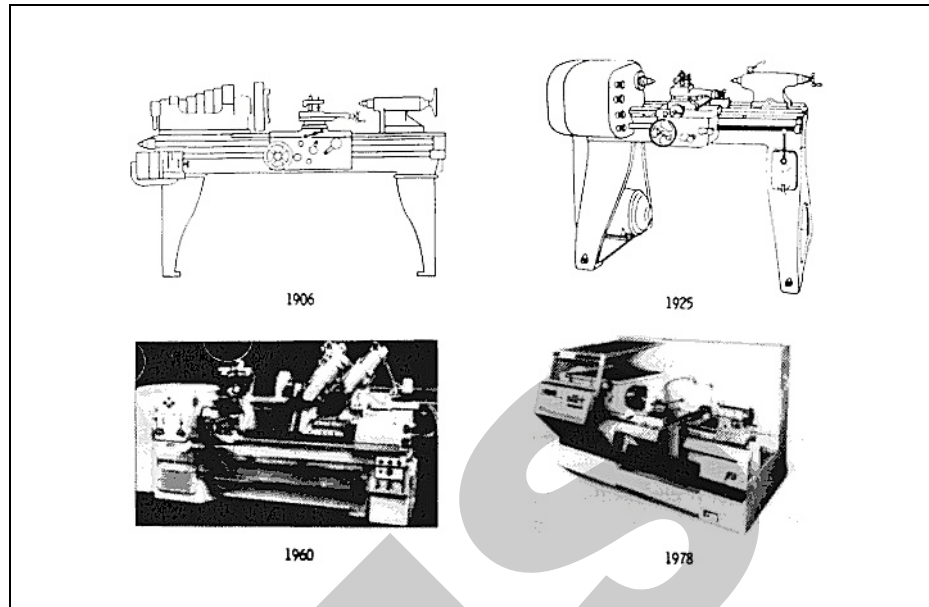
3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στον εξοπλισμό των συστημάτων παραγωγής και ειδικότερα στις εργαλειομηχανές (machine tools). Βρίσκεται μετά το κεφάλαιο των παραγωγικών διεργασιών (manufacturing processes) διότι οι μηχανές αποτελούν βασικά την "ενσωμάτωση" των διεργασιών και προηγείται των κεφαλαίων των συστημάτων παραγωγής (manufacturing systems), επειδή οι εργαλειομηχανές αποτελούν τα "δομικά στοιχεία" των συστημάτων αυτών.

Ο όρος "τεχνολογικός εξοπλισμός της παραγωγής" (manufacturing equipment) περιλαμβάνει ένα πλήθος εξαρτημάτων και μηχανών, από εξαρτήματα χειρονακτικών εργασιών μέχρι σύνθετα αυτοματοποιημένα μηχανουργικά κέντρα, τα οποία συναντώνται στις μοντέρνες παραγωγικές διαδικασίες. Το κεφάλαιο αυτό δίνει έμφαση στις εργαλειομηχανές, επειδή αποτελούν τα σημαντικότερα στοιχεία των συστημάτων παραγωγής διακριτών εξαρτημάτων. Γίνεται μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση της βιομηχανίας κατασκευής των εργαλειομηχανών και περιγραφή των διαφορετικών τύπων και κατηγοριών των εργαλειομηχανών. Στη συνέχεια ακολουθεί ο σχεδιασμός και η ανάλυση των εργαλειομηχανών, όπου περιγράφονται τα κυριότερα εξαρτήματα αυτών όπως πλαίσια (frames), οδηγοί (guideways), εδράσεις (guideways/ bearings), μεταδόσεις κίνησης (drives). Η τελευταία παράγραφος του κεφαλαίου επικεντρώνεται στον έλεγχο και στον αυτοματισμό των εργαλειομηχανών, στον αριθμητικό έλεγχο (numerical control), στον προγραμματισμό παραγωγής των εξαρτημάτων, τον έλεγχο των διαδικασιών και στους αισθητήρες (sensing devices).

Το κεφάλαιο αυτό δεν εμβαθύνει σε όλα τα πιθανά θέματα που αφορούν τις μηχανές και γενικότερα τον παραγωγικό εξοπλισμό αλλά αποσκοπεί στην περιληπτική καταγραφή των βασικότερων θεμάτων και στην παράθεση των θεμελιωδών εννοιών που χρησιμοποιούνται στο χώρο της παραγωγής.

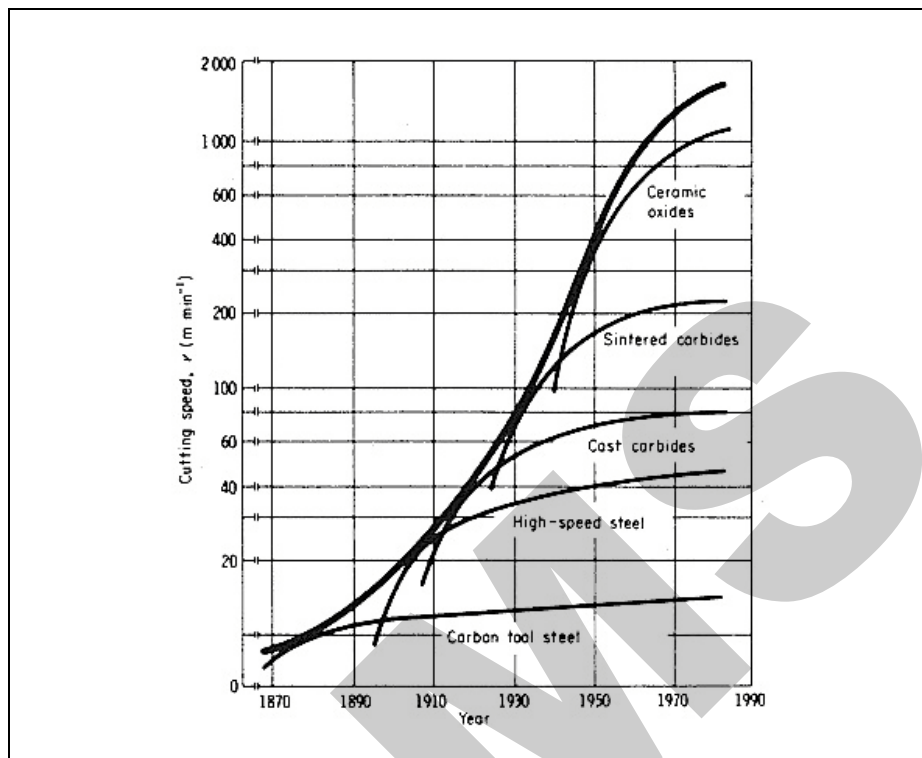
Ο τεχνολογικός εξοπλισμός της παραγωγής και ειδικότερα οι εργαλειομηχανές, χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική παραγωγή για περισσότερο από 100 χρόνια. Η εξέλιξη τους την περίοδο αυτή ήταν αξιοσημείωτη.



Σχήμα 3.1 Η Ιστορική Εξέλιξη του Τόρνου

Πράγματι, λαμβάνοντας υπ' όψη το παράδειγμα του τόρνου, (Σχ. 3.1) μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι στη πρώτη δεκαετία του 20ου αιώνα η ισχύς, σε ένα τυπικό τόρνο, μεταφερόταν από έναν κινητήρα μη ενσωματωμένο στην εργαλειομηχανή. Η διάταξη αυτή ανάγκαζε τη μηχανή να παραμένει σταθερή ως προς την τοποθέτηση της εμποδίζοντας την εύκολη αλλαγή της θέσης της. Στη δεκαετία του 1920 ενσωματώθηκε ο κινητήρας στη μηχανή, οπότε αφ' ενός επέτρεψε την εύκολη επανατοποθέτηση της μηχανής στη περίπτωση αναδιοργάνωσης του εργοστασίου, αλλά αφ' ετέρου δημιουργήθηκε μια συμπαγής μηχανή, η οποία μπορούσε να επιτύχει έναν υψηλότερο ρυθμό παραγωγής. Στη δεκαετία του 1960 οι εργαλειομηχανές παράγονταν με πλήρες εσωτερικό πλαίσιο, το οποίο εξασφάλιζε μεγαλύτερη εσωτερική ακαμψία και συχνά περιελάμβαναν ταμπλό και γραφίδα για τη μεταφορά ενός σύνθετου σχήματος πάνω στο κατεργαζόμενο εξάρτημα. Οι τόρνοι που χρησιμοποιήθηκαν στις δεκαετίες 1970 και 1980 ήταν αριθμητικά ελεγχόμενοι και είχαν τη δυνατότητα να προγραμματίζονται με τη βοήθεια υπολογιστών. Είναι φανερό ότι υπάρχει μια σαφής αλληλεπίδραση μεταξύ παραγωγικών διεργασιών και των εργαλειομηχανών που τις πραγματοποιούν. Η εξέλιξη των παραγωγικών διεργασιών σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των υλικών επηρέασαν και επηρεάζουν την πρόοδο των εργαλειομηχανών. Για παράδειγμα, η χρήση νέων υλικών στη

κατασκευή κοπτικών εργαλείων (Σχ. 3.2) έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της ταχύτητας κοπής στις παραγωγικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Συνεπώς, οι εργαλειομηχανές πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες κατεργασίας και μεγαλύτερους ρυθμούς παραγωγής.



Ceramic oxides = Κεραμικά οξειδία
 Sintered carbides = Πυροσσωματωμένα καρβίδια
 Cast carbides = Χυτά καρβίδια
 High-speed steel = Χάλυβας για κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων
 Carbon tool steel = Εργαλεία ανθρακούχου χάλυβα

Σχήμα 3.2 Η Ιστορική Εξέλιξη των Υλικών των Εργαλείων και των Ταχυτήτων Κοπής

Ο τεχνολογικός εξοπλισμός της παραγωγής (manufacturing equipment) και ειδικότερα οι εργαλειομηχανές (machine tools) είναι ο κρίσιμος συνδετικός κρίκος ανάμεσα στα ενδιάμεσα προϊόντα που προκύπτουν από την επεξεργασία των πρώτων υλών και στα τελικά, διακριτά (discrete) εξαρτήματα και εξαρτήματα. Τα εξαρτήματα αυτά συναρμολογούνται είτε για να αποτελέσουν το τελικό προϊόν ή να συνεχίσουν σ' άλλες μηχανές, οι οποίες θα κατασκευάσουν τα τελικά προϊόντα. Επομένως, σχεδόν κάθε παραγόμενο προϊόν

δημιουργείται είτε άμεσα είτε έμμεσα από τις εργαλειομηχανές [1]. Ο τεχνολογικός εξοπλισμός των παραγωγικών συστημάτων και οι βιομηχανίες κατασκευής εργαλειομηχανών είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για τη βιομηχανική ανταγωνιστικότητα και παραγωγικότητα μιας χώρας σε διεθνές επίπεδο και αυτό οφείλεται στο ότι αποτελούν τον κορμό της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Λιγότερο από το 30% της παγκόσμιας παραγωγής εξαγόταν πριν 30 χρόνια, ενώ από το 1976 οι εξαγωγές ήταν κοντά στο 43% της παραγωγής και τώρα είναι κοντά στο μισό (Πιν. 3.1).

	1968	1972	1976	1980	1984	1985	1986
Ηνωμένες Πολιτείες							
Μέρος παγκόσμιας παραγωγής	26,3%	14,2%	16,3%	18,2%	12,0%	12,4%	9,7%
Εξαγωγές/Εγχώρια παραγωγή	12,6%	18,8%	23,6%	15,3%	15,5%	16,6%	19,8%
Εισαγωγές/Εγχώρια κατανάλωση	9,8%	10,0%	16,4%	23,3%	38,0%	43,4%	49,2%
Σύνολο αποστολών (εκατ. \$)	1722,8	1269,3	2178,2	4812,4	2412,5	2717,8	2830,0
Μερίδιο παγκοσμίων εξαγωγών	10,0%	7,6%	8,5%	7,3%	4,8%	4,7%	4,1%
Δυτική Γερμανία							
Μέρος παγκόσμιας παραγωγής			18,3%	17,9%	14,0%	14,5%	17,8%
Εξαγωγές/Εγχώρια παραγωγή	68,3%	55,7%	70,2%	62,6%	59,6%	62,2%	60,2%
Εισαγωγές/Εγχώρια κατανάλωση	21,4%	22,1%	27,7%	32,8%	35,3%	23,3%	34,8%
Σύνολο αποστολών (εκατ. \$)			2450,0	4750,0	2803,8	3168,6	5210,1
Μερίδιο παγκοσμίων εξαγωγών	28,9%	27,4%	28,5%	24,8%	22,3%	20,3%	22,9%
Ιαπωνία							
Μέρος παγκόσμιας παραγωγής	7,5%	7,5%	7,9%	14,5%	22,3%	24,3%	24,2%
Εξαγωγές/Εγχώρια παραγωγή	10,6%	13,4%	34,9%	37,9%	38,9%	41,1%	41,3%
Εισαγωγές/Εγχώρια κατανάλωση	18,6%	12,2%	9,3%	8,5%	6,2%	6,6%	5,6%
Σύνολο αποστολών (εκατ. \$)	488,9	675,6	1058,9	3830,3	4474,6	5316,7	7081,6
Μερίδιο παγκοσμίων εξαγωγών	3,6%	7,6%	7,2%	13,2%	21,5%	22,6%	21,4%

Πίνακας 3.1 Οι Κύριες Χώρες Παραγωγής Εργαλειομηχανών (Source: NMTBA. *The Economic Handbook of the Machine Tool Industry. 1986-87*)

3.2 Τύποι Εργαλειομηχανών (Machine Tool Types)

Γενικά, μια εργαλειομηχανή ορίζεται σαν μια μη φορητή μηχανή με μια ενσωματωμένη και ολοκληρωμένη πηγή ισχύος η οποία προκαλεί την κίνηση ενός εργαλείου σε σχέση με το κατεργαζόμενο εξάρτημα, προκειμένου η εργαλειομηχανή να παράγει μια προκαθορισμένη γεωμετρική μορφή ή σχήμα. Αυτός ο

περιοριστικός ορισμός αντιπροσωπεύει, αρχικά, τις δυο κύριες κατηγορίες των μηχανών: μηχανές διαμόρφωσης ή σχηματισμού (deforming or forming machines) και μηχανές αφαίρεσης ή κοπής υλικού (removing or cutting machines). Ωστόσο οι μηχανές που χρησιμοποιούνται στις αρχικές διεργασίες σχηματισμού (forming processes) –όπως η χύτευση (casting)– και για τις διεργασίες σύνδεσης (joining processes) –όπως η συγκόλληση ή συναρμολόγηση– μπορούν επίσης να θεωρηθούν εργαλειομηχανές.

Προκειμένου οι εργαλειομηχανές να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά στις παραγωγικές διεργασίες, πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένα κριτήρια. Στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής δίδεται μεγάλη σημασία στην ποιότητα, που θεωρείται ως ο βασικότερος παράγοντας στον σχεδιασμό, στην ανάπτυξη, στην συλλογή στοιχείων και στην λειτουργία των εργαλειομηχανών. Η ποιότητα των εργαλειομηχανών χωρίζεται σε δυο κατηγορίες:

- α) την *ακρίβεια* της γεωμετρικής και κινηματικής συμπεριφοράς αυτών υπό στατική, δυναμική ή θερμική φόρτιση και
- β) την *αξιοπιστία* ή συμπεριφορά της μηχανής για μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Η συντήρηση, η πρόσβαση στον χώρο εργασίας της μηχανής, και η ασφάλεια σχετίζονται με τα προηγούμενα χαρακτηριστικά. Οι σύγχρονες εργαλειομηχανές έχουν σχεδιασθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν με ακρίβεια της τάξης μικρών (microns) σε ένα μεγάλο εύρος φορτίων, που μπορεί να είναι μέχρι και μερικοί τόνοι. Αυτή η απαιτούμενη ακρίβεια, σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητα με την οποία πρέπει τα στοιχεία της εργαλειομηχανής να κινηθούν για να επιτύχουν τους απαιτούμενους ρυθμούς παραγωγής, αποτελεί μια συνεχή πρόκληση για βελτίωση της σχεδίασης και της κατασκευής των εργαλειομηχανών.

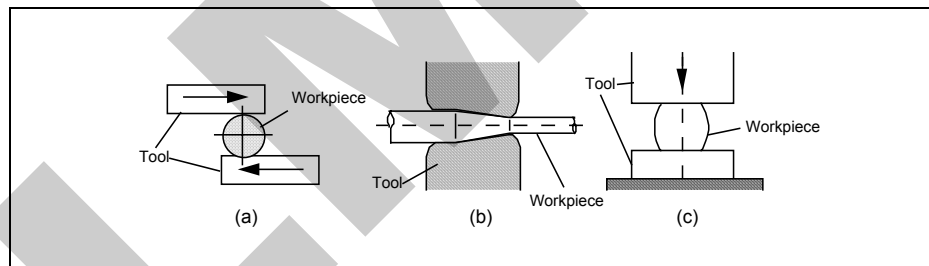
Το κόστος είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας, εφόσον οι μηχανές συνήθως είναι επένδυση υψηλού κεφαλαίου, η οποία μπορεί να φθάσει την τάξη των δεσκατομμυρίων δραχμών για συστήματα μαζικής παραγωγής όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Συχνά το κόστος και η ποιότητα της μηχανής καθορίζονται από το βαθμό αυτοματισμού της. Οι υπεραυτοματοποιημένες μηχανές μπορεί να είναι αναξιόπιστες, ενώ οι λιγότερο αυτοματοποιημένες μπορεί να έχουν χαμηλότερους ρυθμούς παραγωγής. Ωστόσο ο βαθμός της αυτοματοποίησης συνήθως καθορίζει και το βαθμό ευελιξίας. Οι αυτοματοποιημένες μηχανές/συστήματα, όπως οι γραμμές παραγωγής, παρέχουν ένα πολύ υψηλό ρυθμό παραγωγής. Έχουν όμως περιορισμένη ευελιξία ως προς το πλήθος των διαφορετικών προϊόντων και των διαδικασιών. Επιπλέον το μέγεθος της αυτοματοποίησης των εργαλειομηχανών πρέπει να είναι ο συνδυασμός του κόστους, της ποιότητας (ειδικότερα της αξιοπιστίας) και της ευελιξίας. Γενικά το εύρος παραγωγής διαφορετικών προϊόντων στις μηχανές αφαίρεσης υλικού για μέταλλα είναι μεγάλο και έχει σχέση με τη δυναμικότητα της μηχανής. Αυτή καθορίζεται από τις μέγιστες και ελάχιστες διαστάσεις των εξαρτημάτων που μπορεί να χειρισθεί η μηχανή και το μέγεθος ακρίβειας των διαφορετικών αξόνων κίνησης της μηχανής.

Οι μηχανές πρέπει συνήθως να ικανοποιούν τους κανονισμούς ασφαλείας και προστασίας του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, οι εργαλειομηχανές που προκαλούν υψηλά επίπεδα θορύβου μπορεί να απαιτηθεί να είναι ηχομονωμένες για την ασφάλεια και την προστασία του περιβάλλοντος. Θέματα σχετικά με την ασφάλεια έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το σχεδιασμό μιας εργαλειομηχανής. Ωστόσο, οι θεωρίες για την ασφάλεια συχνά έχουν αρνητική επίδραση στην αποτελεσματικότητα ή στην παραγωγικότητα μιας εργαλειομηχανής.

3.1.1 Μηχανές Διαμόρφωσης (Machines for Deforming)

Οι περισσότερες μηχανές διαμόρφωσης (deforming machines) χρησιμοποιούνται στην μεταλλουργική βιομηχανία. Οι διεργασίες διαμόρφωσης εφαρμόζονται περισσότερο στα μέταλλα, όπου η διαμόρφωση γίνεται με τη χρήση εργαλείων που απαρτίζονται από δύο ή περισσότερα μέρη. Μια μηχανή συγκεντρώνει όλα τα εργαλεία για τη διαμόρφωση του κατεργαζόμενου εξαρτήματος, παρέχει την απαιτούμενη δύναμη, ενέργεια και ροπή για τη διαδικασία και εξασφαλίζει την κατάλληλη καθοδήγηση των εργαλείων. Βασιζόμενες στη σχετική κίνηση των εργαλείων, οι μηχανές διαμόρφωσης [2] χωρίζονται σε δυο ομάδες: στις μηχανές με ευθύγραμμη σχετική κίνηση (Σχ. 3.3) και στις μηχανές με μη ευθύγραμμη σχετική κίνηση (Σχ. 3.4). Οι μηχανές που δεν ανήκουν σε καμία απ' αυτές τις δύο κατηγορίες, θεωρούνται συνήθως μηχανές για ειδική χρήση.

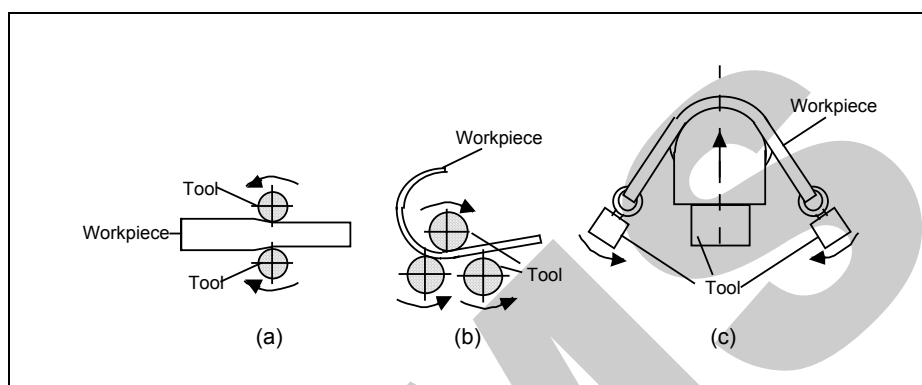


Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα
Tool = Εργαλείο

Σχήμα 3.3 Γραμμική Κίνηση Εργαλείου α) με Κύλιση (Rolling), β) με Διέλαση (Drawing), γ) με Μορφοποίηση (Upsetting)

Οι μηχανές διαμόρφωσης χωρίζονται σε μηχανές των οποίων η λειτουργία [3] στηρίζεται στον έλεγχο της δύναμης που ασκείται σε αυτές, στον έλεγχο της μετατόπισης και στον έλεγχο της ενέργειας (Σχ. 3.5). Στις μηχανές των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στην ενέργεια όπως η πτώση σφύρας οδηγούμενη με ιμάντα (belt-operated drop hammer) (Σχ. 3.6), το χαρακτηριστικό γνώρισμα

είναι η διαθέσιμη δυναμική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε έργο στο κατεργαζόμενο εξάρτημα. Η διαδικασία διαμόρφωσης ολοκληρώνεται όταν αυτή η μετατροπή ενέργειας τελειώσει [3]. Αυτές οι μηχανές χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος, μεγάλο μέγεθος και απλό χειρισμό. Η παραγωγικότητά τους είναι χαμηλή, ενώ η ταχύτητα διαμόρφωσης είναι υψηλή. Η ακρίβεια των εξαρτημάτων που είναι φτιαγμένα από την πτώση της σφύρας είναι σχετικά μικρή και η ευελιξία της μηχανής εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία τα εργαλεία μπορούν να αλλαχθούν για να παράγουν εξαρτήματα με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Οι σφύρες, που χρησιμοποιούνται ειδικά στη σφυρηλάτηση (forging), μπορούν να επεξεργασθούν μια ποικιλία σχεδίων για να διευκολύνουν τη διαδικασία σχηματισμού (Σχ. 3.7).



Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα
Tool = Εργαλείο

Σχήμα 3.4 Μη Γραμμική Μετατόπιση Εργαλείου α) με Κύλιση, β) με Κάμψη (Bending), γ) Stretch-Forming

Οι κοχλιωτές πρέσες (screw presses) είναι επίσης μηχανές (Σχ. 3.8), που η λειτουργία τους καθορίζεται από τον έλεγχο ενέργειας και συνήθως καθοδηγούνται από ένα σφόνδυλο (flywheel), του οποίου η περιστροφική κίνηση μετατρέπεται σε ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου (ram) στο πλαίσιο της μηχανής με τη βοήθεια ενός κοχλία-οδηγού (lead screw). Η κίνηση συνήθως ρυθμίζεται από ένα τριπλό δίσκο τοποθετημένο στο επάνω μέρος της μηχανής μαζί με τον ηλεκτροκινητήρα. Στην κίνηση επιστροφής του εμβόλου ο αντίθετος δίσκος-οδηγός έρχεται σε επαφή με το σφόνδυλο και κατά συνέπεια οι σχέσεις μετάδοσης δημιουργούν ένα εμπόδιο, καθώς ο σφόνδυλος πρέπει να επιταχύνει από μια σχεδόν στάσιμη κατάσταση. Σχεδιασμοί τετραπλού ή μονού δίσκου (Σχ. 3.9) επιχειρούν [3] να αποφύγουν τα μειονεκτήματα του συμβατικού τριπλού δίσκου (Σχ. 3.8). Γενικά οι κοχλιωτές πρέσες έχουν μεγαλύτερο κόστος από τις σφύρες αλλά παρέχουν εξαρτήματα

Functional principle	Energy constrained				Movement constrained				Force constrained
	Drop hammer	Pressure-assisted hammer	Dual-action hammer	Screw press	Eccentric press	Crank press	Toggle press	Modified toggle press	
Basic law	$E = m g h$ $\frac{1}{2} m v^2$	$E = m g h$ $+ A \int p(h) dh$ $\frac{1}{2} m v^2$	$E = A \int p(h) dh$ $= \frac{1}{2} r^2 (\omega_0^2 + \omega^2)$	$E = \frac{1}{2} J \omega^2$ $v = \frac{r}{2} \omega$	$A m r (1 - \cos \alpha)$ for $r \ll l$	$A m r (1 - \cos \alpha)$ for $r \ll l$	$A = f(a, r, \dots)$	$A = f(a, r, \dots)$	$F = pA$
Displacement / time relationship of ram									
Main advantages of functional principles	Low capital cost High forming velocity	Reduced overall height High forming velocity	High forming velocity High forming energy	High component accuracy High forming energy	High output Adjustable stroke	High output Long stroke	High force at end of stroke Low working velocity	Low working velocity Rapid return stroke	Variable displacement / time relationship of ram

t time
 v velocity
 m mass of ram
 m_u mass of upper ram
 m_l mass of lower ram
 E forming energy
 J moment of inertia
 ω angular velocity
 r crank radius
 l connecting-rod length
 a crank angle
 h stroke
 A piston area
 p hydraulic/pneumatic pressure
 F forming force

Functional principle = Αρχή λειτουργίας

Basic law = Βασικός νόμος

Displacement/time relationship of ram = Σχέση μετατόπισης/χρόνου της κεφαλής

Main advantages of functional principles = Κύρια πλεονεκτήματα των αρχών λειτουργίας

Energy constrained = Περιορισμός ενέργειας

Movement constrained = Περιορισμός μετατόπισης

Force constrained = Περιορισμός δύναμης

Drop hammer = Σφύρα με πτώση

Pressure-assisted hammer = Σφύρα με εφαρμογή πίεσης

Dual-action hammer = Σφύρα διπλής δράσης (ή διπλού άξονα)

Screw press = Κοχλιωτή πρέσα

Eccentric press = Εκκεντροφόρος πρέσα

Crank press = Στροφαλοφόρος πρέσα

Toggle press = Αρθρωτή πρέσα

Modified toggle press = Τροποποιημένη αρθρωτή πρέσα

Hydraulic press = Υδραυλική πρέσα

Low capital cost = Χαμηλό κόστος κεφαλαίου

High forming velocity = Υψηλή ταχύτητα διαμόρφωσης

Reduced overall height = Μειωμένο συνολικό ύψος

High forming energy = Υψηλή ενέργεια διαμόρφωσης

High component accuracy = Υψηλή ακρίβεια

παραγομένων εξαρτημάτων

High output = Υψηλή απόδοση

Adjustable stroke = Ρυθμιζόμενη διαδρομή εμβόλου

Long stroke = Μεγάλη διαδρομή εμβόλου

High force at end of stroke = Υψηλή αναπτυσσόμενη δύναμη στο τέλος της διαδρομής του εμβόλου

Low working velocity = Χαμηλή ταχύτητα κατεργασίας

Rapid return stroke = Ταχεία επαναφορά εμβόλου

Variable displacement/time relationship of ram = Μεταβλητή σχέση μετατόπισης/ χρόνου της κεφαλής

t time (χρόνος)

v velocity (ταχύτητα)

m mass of ram (μάζα κεφαλής)

m_u mass of upper ram (μάζα άνω κεφαλής)

m_l mass of lower ram (μάζα κάτω κεφαλής)

E forming energy (ενέργεια διαμόρφωσης)

J moment of inertia (ροπή αδρανείας)

ω angular velocity (γωνιακή ταχύτητα)

r crank radius (ακτίνα στροφάλου)

l connecting-rod length (μήκος διωστήρα)

a crank angle (γωνία στροφάλου)

h stroke (μήκος διαδρομής εμβόλου)

A piston area (επιφάνεια εμβόλου)

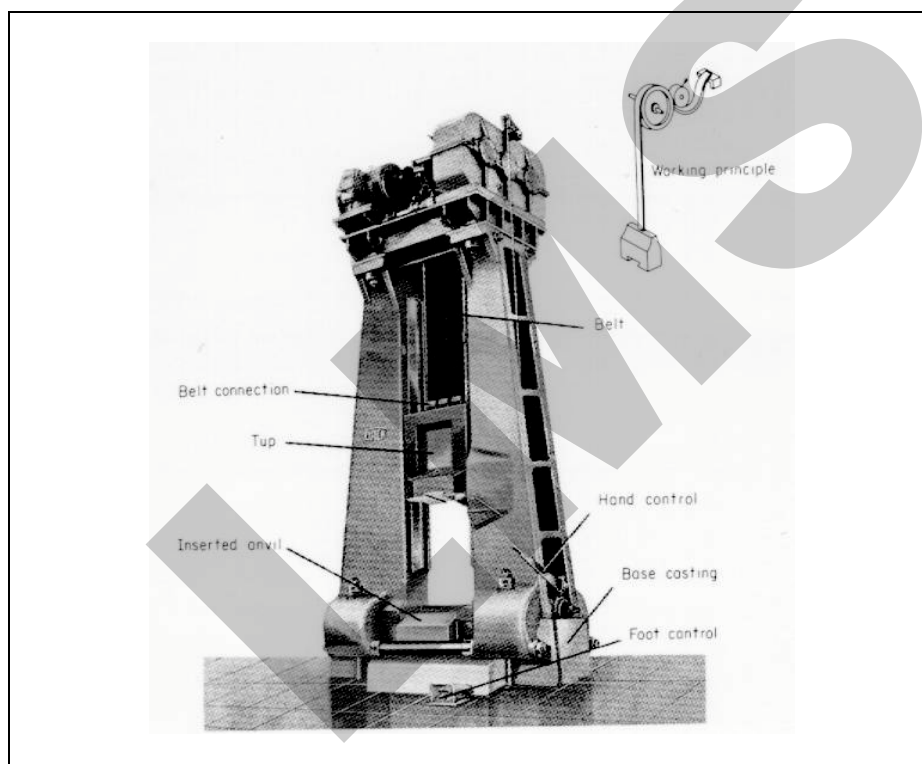
p hydraulic/pneumatic pressure (υδραυλική/πνευματική πίεση)

F forming force (δύναμη διαμόρφωσης)

Σχήμα 3.5 Οι Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Μηχανών Σχηματισμού [3]

καλύτερης ποιότητας.

Οι έκκεντρες πρέσες (eccentric presses) (Σχ. 3.10) ανήκουν στην κατηγορία των μηχανών διαμόρφωσης που η λειτουργία τους στηρίζεται στον έλεγχο της κίνησης. Η ένταση της κρούσης της μηχανής καθορίζεται διαμέσου της εκκεντρότητας της κάμας (cam). Στις στροφαλοφόρες πρέσες (crank-presses), που ανήκουν στην ίδια κατηγορία, η πορεία του εμβόλου καθορίζεται από τη γεωμετρία (Σχ. 3.11) της στροφαλοφόρου ατράκτου (crank shaft). Οι στροφαλοφόρες πρέσες πετυχαίνουν υψηλούς ρυθμούς παραγωγής, που συνήθως είναι περίπου χίλια χτυπήματα ανά λεπτό. Το εύρος δυνατότητας διαφορετικών κρούσεων συνήθως μειώνεται με σκοπό να επιτύχουμε πιο απλή μηχανική κατασκευή, μεγαλύτερη δυσκαμψία και υψηλότερη ταχύτητα παραγωγής. Οι στροφαλοφόρες πρέσες συνήθως χρησιμοποιούνται στην εξέλαση, βαθειά διέλαση, διεργασίες με κάμψη, ενώ οι έκκεντρες πρέσες συνήθως χρησιμοποιούνται για κάμψη και χάραξη, όπου χρειάζεται μόνο ένα μικρό χτύπημα.



Belt connection = Σύνδεση ιμάντα

Tup = Εξάρτημα Σφύρας

Inverted anvil = Ενσωματωμένο αμόνι

Belt = Ιμάντας

Hand control = Έλεγχος χειρός

Base casting = Χυτή έδραση

Foot control = Έλεγχος ποδιού

Working principle = Αρχή λειτουργίας

Σχήμα 3.6 Πτώση Σφύρας Οδηγούμενη με Ιμάντα [3]

Distinguishing features	Belt-operated drop-forge hammer		Chain-operated drop-forge hammer	Board-operated drop-forge hammer	Piston-lifted drop-forge hammer	Power-assisted drop-forge hammer	Dual-action drop-forge hammer
	a Winding motion	b Slip motion	Winding motion	Slip motion	Steam, pneumatic or hydraulic operation		Steam or pneumatic operation
1 Work capacity $E = \frac{1}{2} m v^2$	mgh	mgh	mgh	mgh	mgh	$mgh + A \int p(h) dh$	$A \int p(h) dh$
2 Coupling	Brake linings	Pulleys, rollers	Friction coupling	Board rollers	(Valve)		
3 Lifting element	Belt		Chain	Board	Piston rod		Piston rod
4 Pressure element					Piston rod		Steel belt
5 Energy store	Flywheel				Pressure tank		

A piston area
 p pressure
 m mass of tup
 h height of drop
 v velocity
 g gravitational acceleration

Distinguishing features = Χαρακτηριστικά διάκρισης

Work capacity = Ενέργεια λειτουργίας

Coupling = Σύζευξη

Lifting element = Στοιχείο ανύψωσης

Pressure element = Στοιχείο πίεσης

Energy store = Αποθήκευση ενέργειας

Belt-operated drop-forge hammer = Σφύρα πτώσης οδηγούμενη από ιμάντα

Winding motion = Κίνηση περιέλιξης

Slip motion = Κίνηση ολίσθησης

Brake linings = Χιτώνια φρένων

Pulleys = Τροχαλίες

Rollers = Κύλιστρα

Belt = Ιμάντας

Flywheel = Σφόνδυλος

Chain-operated drop-forge hammer = Σφύρα πτώσης οδηγούμενη από αλυσίδα

Friction coupling = Σύζευξη τριβής

Chain = Αλυσίδα

Board-operated drop-forge hammer = Σφύρα πτώσης οδηγούμενη από μεταλλική πλάκα

Board rollers = Κύλιστρα μεταλλικής πλάκας

Board = Μεταλλική πλάκα

Piston-lifted drop-forge hammer = Σφύρα πτώσης ανυψούμενη με έμβολο

Piston rod = Βάκτρο (εμβόλου)

Power-assisted drop-forge hammer = Σφύρα πτώσης με την βοήθεια πρόσθετης ισχύος

Steam = Ατμός

Pneumatic = Πνευματικός

Hydraulic = Υδραυλικός

Operation = Λειτουργία

Valve = Βαλβίδα

Dual-action drop-forge hammer = Σφύρα πτώσης διπλής δράσης

Steel belt = Μεταλλικός ιμάντας

Pressure tank = Δεξαμενή πίεσης

A piston area (επιφάνεια εμβόλου)

p pressure (πίεση)

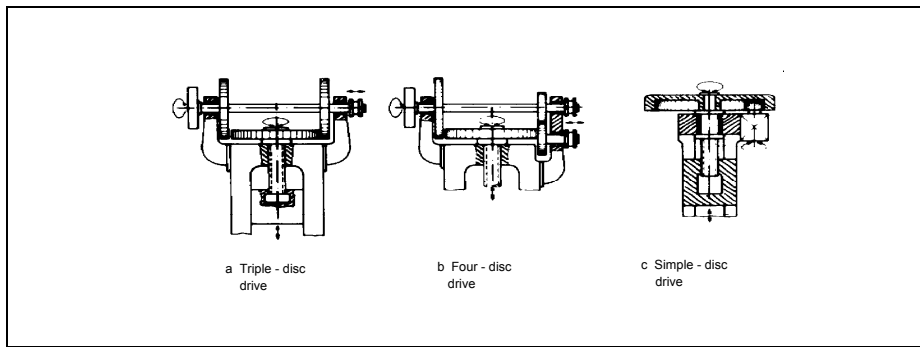
m mass of tup (μάζα εξαρτήματος σφύρας)

h height of drop (ύψος πτώσης)

v velocity (ταχύτητα)

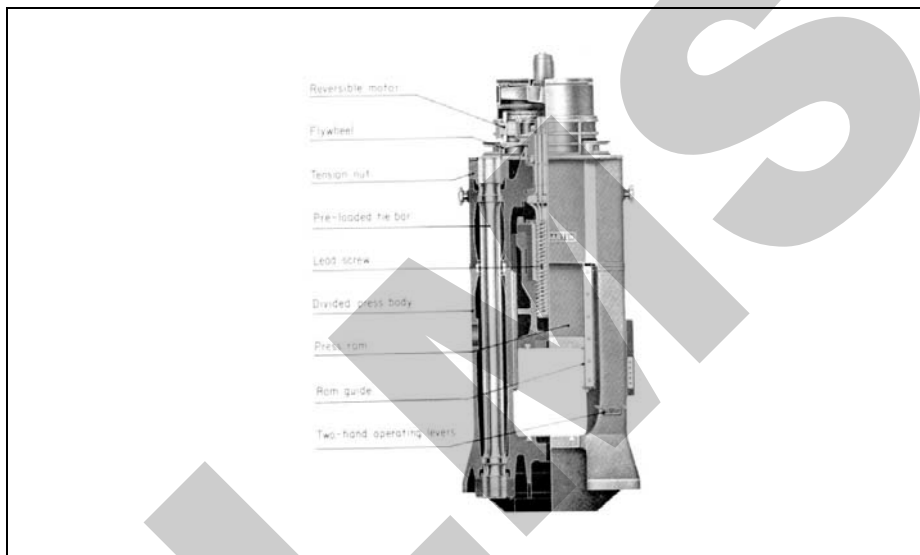
g gravitational acceleration (επιτάχυνση βαρύτητας)

Σχήμα 3.7 Διάφοροι Τύποι Σφυρών Σφυρηλάτησης



Triple-disc drive = Τριπλός οδηγός σφονδύλου
 Four-disc drive = Τετραπλός οδηγός σφονδύλου
 Single-disc drive = Απλός οδηγός σφονδύλου

Σχήμα 3.8 Οδηγοί Σφονδύλων για Κοχλιωτές Πρέσες [3]



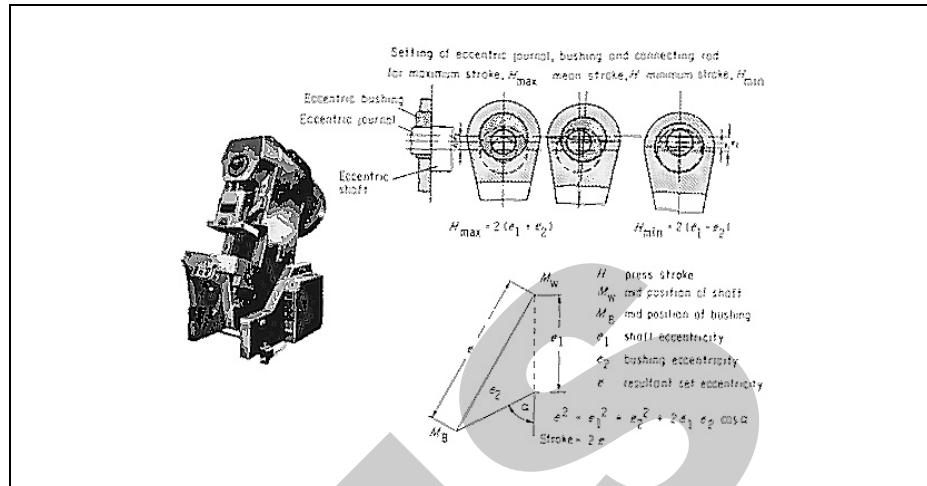
Reversible motor = Αντιστρεπτός κινητήρας
 Flywheel = Σφόνδυλος
 Tension nut = Παξιμάδι προέντασης
 Pre-loaded tie bar = Προεντεταμένη δοκός σύνδεσης
 Lead screw = Κύριος κοχλίας

Divided press body = Διαϊρούμενο σώμα πρέσας
 Press ram = Έμβολο πρέσας
 Ram guide = Οδηγός εμβόλου
 Two-hand operating levers = Μοχλοί λειτουργίας δυο χεριών

Σχήμα 3.9 Οι Κοχλιωτές Πρέσες με απευθείας Οδηγό Μηχανής

Οι πρέσες με σφήνα (wedge presses) (Σχ. 3.12, 3.13) που λειτουργούν μηχανικά ή υδραυλικά μπορεί να ασκήσουν υψηλές δυνάμεις. Η κίνηση για την διαμόρφωση δημιουργείται από μια σφήνα που είναι τοποθετημένη μεταξύ του

άνω μέρους του κυρίου σώματος και του εμβόλου. Εξαιτίας της μεγάλης περιοχής επαφής μεταξύ της σφήνας και του εμβόλου καθώς και της ογκώδους δομής του κυρίου σώματος, οι πρέσες αυτές είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για άνισα κατανεμημένα φορτία. Είναι μηχανές βαριάς χρήσεως (heavy duty machines) με πολύ χαμηλή παραγωγικότητα (30 με 70 χτυπήματα το λεπτό) αλλά με πολύ υψηλή δύναμη διαμόρφωσης [3].

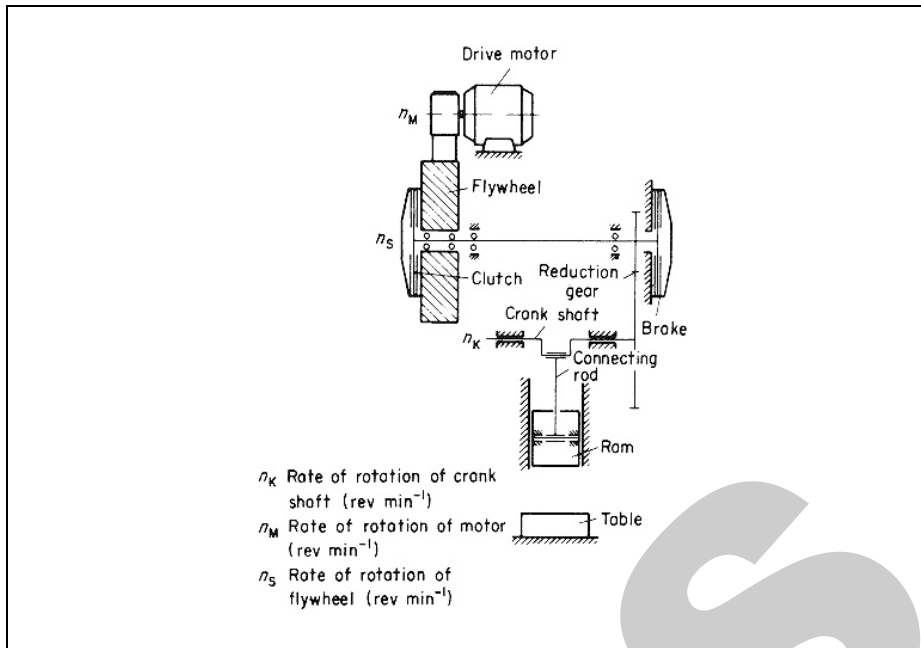


Setting = Τοποθέτηση
 Eccentric = Έκκεντρος
 Journal = Τμήμα ατράκτου μέσα σε ρουλεμάν
 Bushing = Τριβέας
 Connecting rod = Διωστήρας
 Shaft = Ατράκτος
 Stroke = Διαδρομή (εμβόλου)

H press stroke (διαδρομή συμπίεσης)
 M_w mid position of shaft (μέση θέση ατράκτου)
 M_B mid position of bushing (μέση θέση τριβέα)
 e_1 shaft eccentricity (εκκεντρότητα ατράκτου)
 e_2 bushing eccentricity (εκκεντρότητα τριβέα)
 e resultant set eccentricity (συνισταμένη εκκεντρότητα)

Σχήμα 3.10 Κεκλιμένη Έκκεντρη Πρέσα Μεταβλητής Διαδρομής

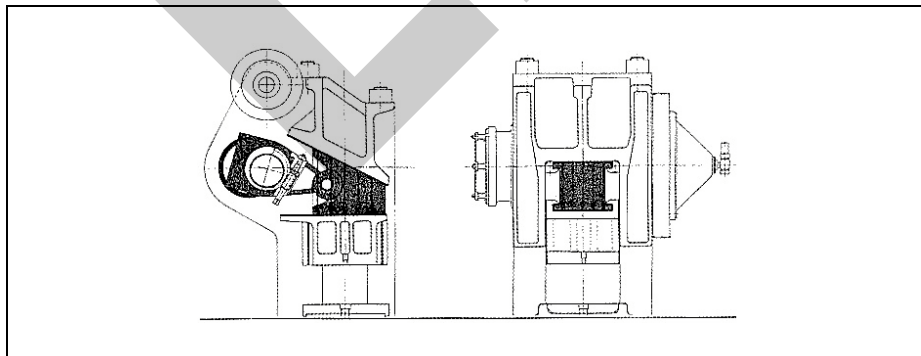
Η πιο διαδεδομένη μηχανή διαμόρφωσης (Σχ. 3.14) είναι η υδραυλική πρέσα (hydraulic press). Η αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στον έλεγχο της ασκούμενης δύναμης και παρέχει ακριβή έλεγχο της δύναμης καθ' όλη την διαδικασία διαμόρφωσης. Τα πλαίσια (frames) των υδραυλικών πρέσων είναι παρόμοια με εκείνα των μηχανικών πρέσων και συνήθως περιλαμβάνουν πολλά υδραυλικά συστήματα οδήγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολύπλοκες διεργασίες διαμόρφωσης και κοπής όπως οι διαδικασίες fine blanking (Σχ. 3.15), όπου πολλαπλές λειτουργίες πραγματοποιούνται μεταξύ του εργαλείου και του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος σ' ένα μόνο χτύπημα. Οι υδραυλικές πρέσες έχουν μεγάλο κόστος, είναι ανθεκτικές, απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση, αλλά παρέχουν μεγάλης ακριβείας διεργασίες με πολύπλοκες γεωμετρίες.



Drive motor = Ηλεκτροκινητήρας
 Flywheel = Σφόνδυλος
 Reduction gear = Μειωτήρας
 Clutch = Συμπλέκτης
 Crank shaft = Στροφαλοφόρος
 Brake = Πέδη (φρένο)
 Connecting rod = Διωστήρας
 Ram = Έμβολο

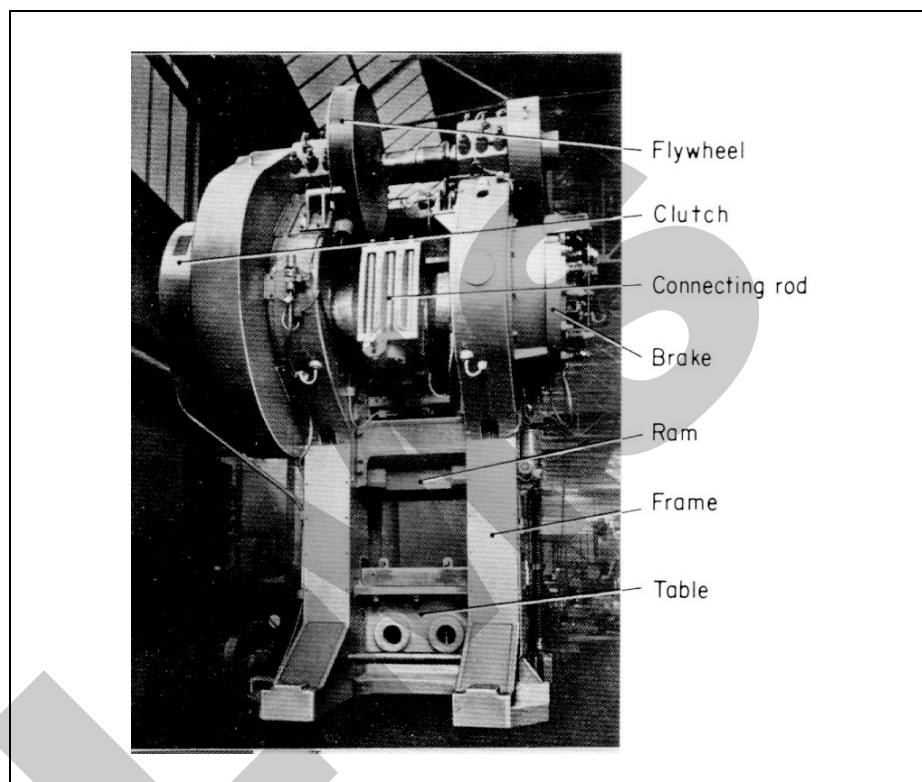
Table = Τράπεζα
 n_K rate of rotation of crank shaft (ρυθμός περιστροφής του στροφαλοφόρου, στροφές ανά λεπτό)
 n_M rate of rotation of motor (ρυθμός περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα, στροφές ανά λεπτό)
 n_S rate of rotation of flywheel (ρυθμός περιστροφής του σφονδύλου, στροφές ανά λεπτό)

Σχήμα 3.11 Κίνηση Στροφαλοφόρου Πρέσας



Σχήμα 3.12 Πρέσα Σφυρηλάτησης με κίνηση Σφήνας [3]

Άλλος τύπος μηχανών διαμόρφωσης υλικού είναι οι μηχανές διέλασης συρμάτων (wire drawing machines) που χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τη διάμετρο των συρμάτων ως 0,01 mm. Η διαμόρφωση πραγματοποιείται στο καλούπι διέλασης, που συνήθως είναι φτιαγμένο από καρβίδιο ή διαμάντι ανάλογα με την εφαρμογή. Το σύρμα με τη βοήθεια ενός τύμπανου τεντώνεται και τραβιέται διαμέσου του καλουπιού μειώνοντας τη διάμετρό του και τελικά το επεξεργαζόμενο σύρμα τυλίγεται πάνω στο τύμπανο (Σχ. 3.16).



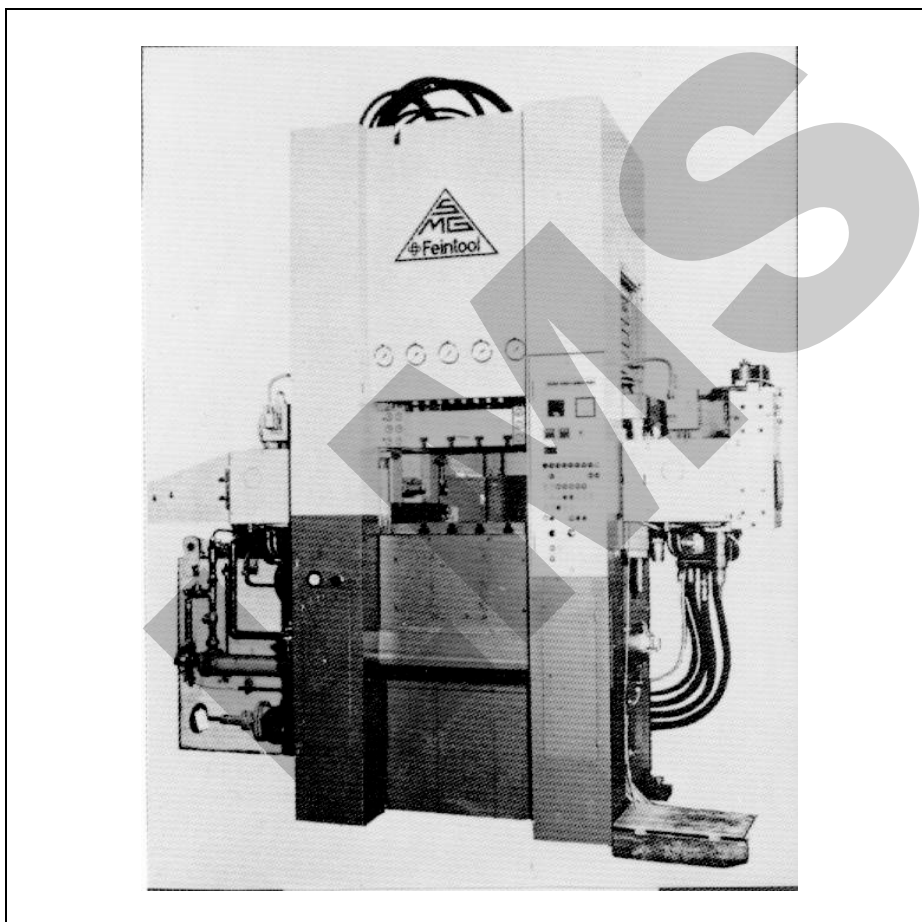
Flywheel = Σφόνδυλος
Clutch = Συμπλέκτης
Connecting rod = Διωστήρας
Brake = Πέδη (φρένο)

Ram = Έμβολο
Frame = Πλαίσιο
Table = Τράπεζα

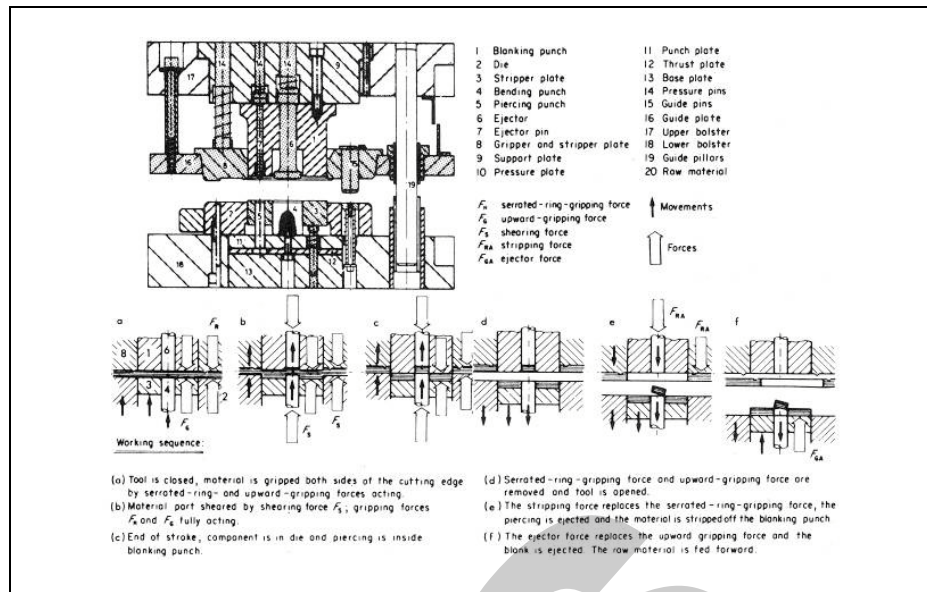
Σχήμα 3.13 Πρέσα με Σφήνα

Στο άλλο άκρο των μηχανών διαμόρφωσης είναι οι μηχανές εξέλασης (Σχ. 3.17), που ωθούν το υλικό μέσω μιας μήτρας εξέλασης για να διαμορφώσουν ράβδους (bars) και σωλήνες (tubes) σε μια ποικιλία σχημάτων.

Οι μηχανές κάμψης (bending) και εξέλασης (rolling) χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία μεταλλικών ελασμάτων (Σχ. 3.18 και 3.19). Ένα αδιαμόρφωτο μεταλλικό έλασμα συσφίγγεται, αρχικά, ανάμεσα στο άνω και κάτω μέρος της μπάρας σύσφιξης και κάμπτεται στην επιθυμητή γωνία [3] μέσω μιας δοκού κάμψης (Σχ. 3.18). Οι περιστροφικές μηχανές διέλασης (Σχ. 3.19) περιλαμβάνουν τρεις κυλίνδρους, δυο από τους οποίους οδηγούνται, ενώ ο τρίτος είναι σε μια σταθερή θέση. Οι οδηγούμενοι κύλινδροι, που βρίσκονται πιο χαμηλά, ρυθμίζονται σύμφωνα με την επιθυμητή ακτίνα για την κάμψη και το πάχος του ελάσματος. Αυτές οι μηχανές συνήθως χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μεγάλων κυλινδρικών δοχείων, δοχείων πίεσεως κ.λ.π.



Σχήμα 3.14 Υδραυλική Πρέσα [3]



Blanking punch = Έμβολο με εσωτερικό κενό

Die = Μήτρα

Stripper plate = Έλασμα αποσύνδεσης

Bending punch = Έμβολο κάμψης

Piercing punch = Έμβολο διάτμησης

Ejector = Εκτοξευτήρας

Ejector pin = Πείρος εκτοξευτήρα

Gripper and stripper plate = Έλασμα συγκράτησης και αποσύνδεσης

Support plate = Έλασμα υποστήριξης

Pressure plate = Έλασμα πίεσης

Punch plate = Διάτρητο έλασμα

Thrust plate = Έλασμα ώθησης

Base plate = Έλασμα βάσης

Pressure pins = Πείροι πίεσης

Guide pins = Οδηγοί πείροι

Guide plate = Έλασμα οδηγός

Upper bolster = Άνω έδραση

Lower bolster = Κάτω έδραση

Guide pillars = Στήλες οδηγοί

Raw material = Ακατέργαστο υλικό

Movement = Κίνηση

Force = Δύναμη

F_R serrated-ring-gripping force (καθοδική δύναμη)

F_G upward-gripping force (ανοδική δύναμη)

F_S shearing force (διατμητική δύναμη)

F_{RA} stripping force (δύναμη αποσύνδεσης)

F_{GA} ejector force (δύναμη εκτόξευσης)

Working sequence = Σειρά εκτέλεσης εργασιών

(a) Tool is closed, material is gripped both sides of

the cutting edge by serrated-ring- and upward-gripping forces acting = Κλείνεται το εργαλείο και το υλικό συγκρατείται στις δύο πλευρές των ακμών κοπής από ανοδικές και καθοδικές ενεργούσες δυνάμεις

(b) Material part sheared by shearing force F_S ; gripping forces F_R and F_G fully acting = Το υλικό υπόκειται σε πλήρη διάτμηση από την διατμητική δύναμη F_S . Οι δυνάμεις συγκράτησης F_R και F_G σε πλήρη δράση

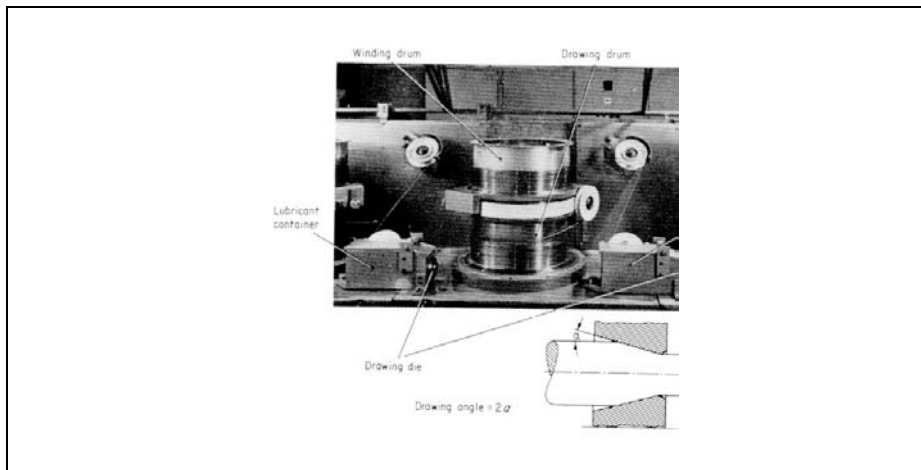
(c) End of stroke; component is in die and piercing is inside blanking punch = Πέρασ της διαδρομής. Το εξάρτημα βρίσκεται στην μήτρα και η διάτρηση στον ζουμπά με το εσωτερικό κενό

(d) Serrated-ring-gripping force and upward-gripping force are removed and tool is opened = Απομακρύνονται οι ανοδικές και καθοδικές δυνάμεις συγκράτησης και ανοίγεται το εργαλείο

(e) The stripping force replaces the serrated-ring-gripping force, the piercing is ejected and the material is stripped off the blanking punch = Η δύναμη αποσύνδεσης αντικαθιστά την καθοδική δύναμη συγκράτησης, πραγματοποιείται η διάτμηση και αποσυνδέεται το υλικό από τον ζουμπά με το εσωτερικό κενό

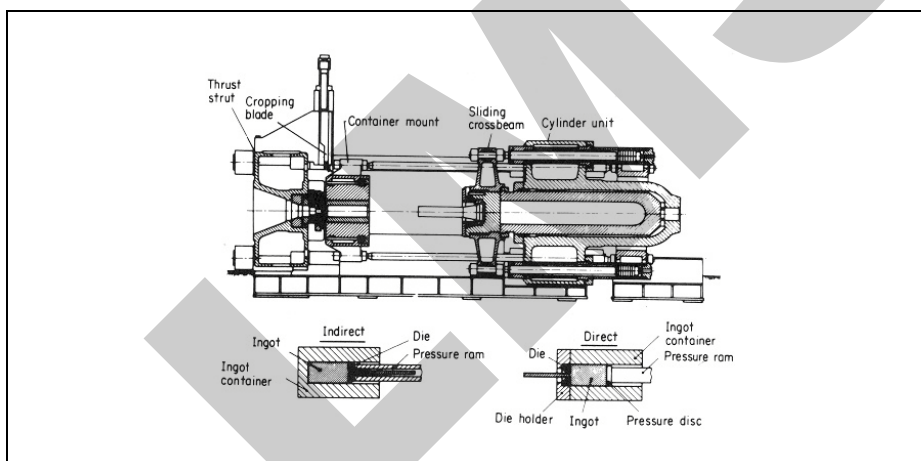
(f) The ejector force replaces the upward-gripping force and the blank is ejected. The raw material is fed forward = Η δύναμη εκτόξευσης αντικαθιστά την ανοδική δύναμη συγκράτησης και απομακρύνεται το κενό τμήμα. Συνεχίζεται η τροφοδότηση με ακατέργαστο υλικό

Σχήμα 3.15 Η Σειρά Εκτέλεσης των Εργασιών του Εργαλείου της Πρέσας fine-blanking [3]



Winding drum = Τύμπανο περιέλιξης
 Drawing drum = Τύμπανο τεντώματος
 Lubricant container = Δοχείο λιπαντικών
 Drawing die = Καλούπι διέλασης
 Drawing angle = Γωνία έλξης

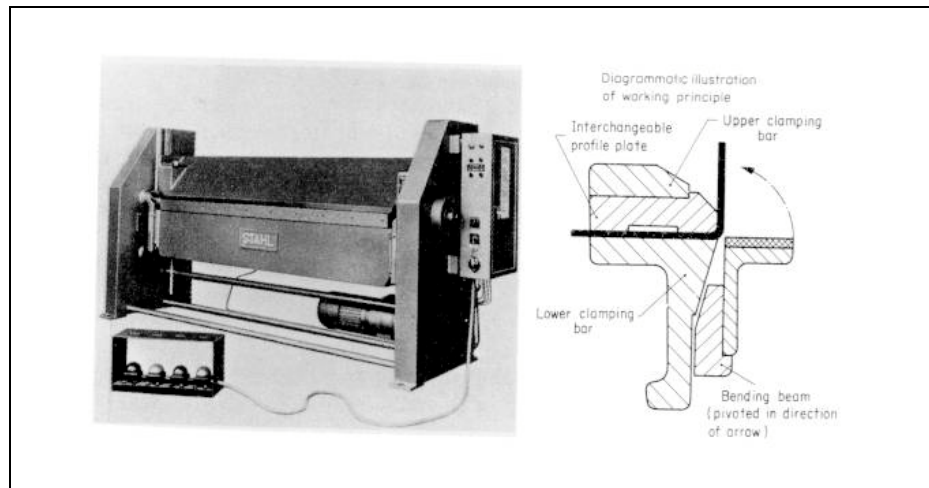
Σχήμα 3.16 Μηχανή Διέλασης πολλαπλών συρμάτων



Thrust strut = Λάμα στήριξης
 Cropping blade = Λεπίδα κοπής
 Container mount = Στήριξη θαλάμου
 Sliding crossbeam = Χιαστή ολισθαίνουσα δοκός
 Cylinder unit = Μονάδα κυλίνδρου
 Ingot container = Θάλαμος εισαγωγής χυτού μεταλλικού υλικού, με διατομή αυτής του θαλάμου
 Ingot = Χυτό μεταλλικό υλικό σε προκαθορισμένο

σχήμα για επακόλουθη θερμική κατεργασία
 Indirect = Έμμεσος
 Die = Μήτρα
 Pressure ram = Έμβολο πίεσης
 Direct = Άμεσος
 Die holder = Συγκρατητής μήτρας
 Pressure disc = Δίσκος πίεσης

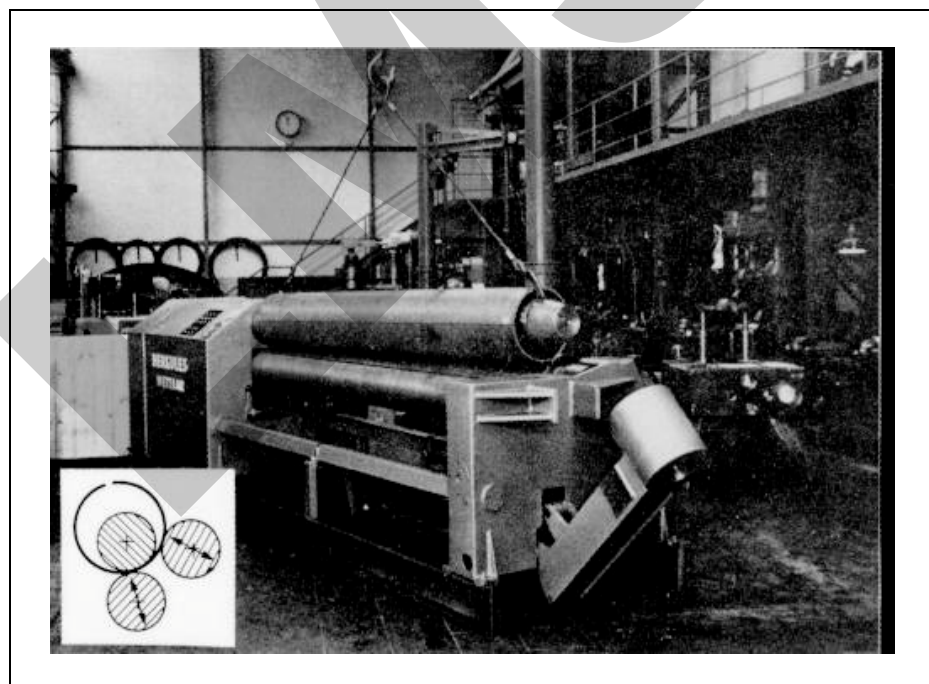
Σχήμα 3.17 Μηχανή Διέλασης



Diagrammatic Illustration = Διαγραμματική Απεικόνιση
 Working principle = Αρχή λειτουργίας
 Interchangeable profile plate = Εναλλάξιμη πλάκα συγκράτησης του προφίλ

Upper clamping bar = Άνω πρόβολος πρόσδεσης
 Lower clamping bar = Κάτω πρόβολος πρόσδεσης
 Bending beam (pivoted in direction of arrow) = Δοκός κάμψης (περιστρεφόμενη κατά την διεύθυνση του βέλους)

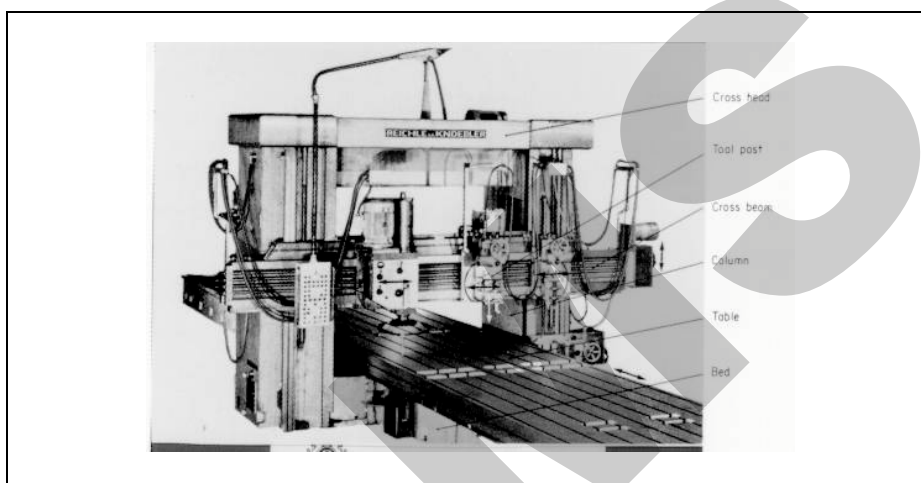
Σχήμα 3.18 Μηχανή Διαμόρφωσης με Κάμψη



Σχήμα 3.19 Περιστροφική Μηχανή Διέλασης

3.1.2 Μηχανές αφαίρεσης υλικού (Machines for Material Removal)

Οι μηχανές αφαίρεσης υλικού είναι ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται περισσότερο συχνά στα συστήματα παραγωγής. Περιλαμβάνουν μηχανές βασισμένες σε μηχανικούς (*mechanical*), θερμικούς (*thermal*), ηλεκτροχημικούς (*electrochemical*), και χημικούς (*chemical*) μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού. Ο όρος εργαλειομηχανή αναφέρεται συχνά μόνο στις μηχανές αφαίρεσης υλικού, που χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: στις μηχανές που χρησιμοποιούν εργαλεία με *μονή κοπτική ακμή* (π.χ. τρνίρισμα, φρεζάρισμα κ.λ.π.) και σ' αυτές που χρησιμοποιούν εργαλεία με *πολλαπλές κοπτικές ακμές* (λείανση). Οι μηχανές με τις *μονές κοπτικές ακμές* μπορούν να χωρισθούν, ανάλογα με την κίνηση της κοπής, σε *περιστροφικές* (*rotational*) και σε *ευθύγραμμα* (*translational*) *κινούμενες μηχανές*.



Cross head = Εγκάρσια κεφαλή
Tool post = Εργαλειοφορείο
Cross beam = Εγκάρσια δοκός

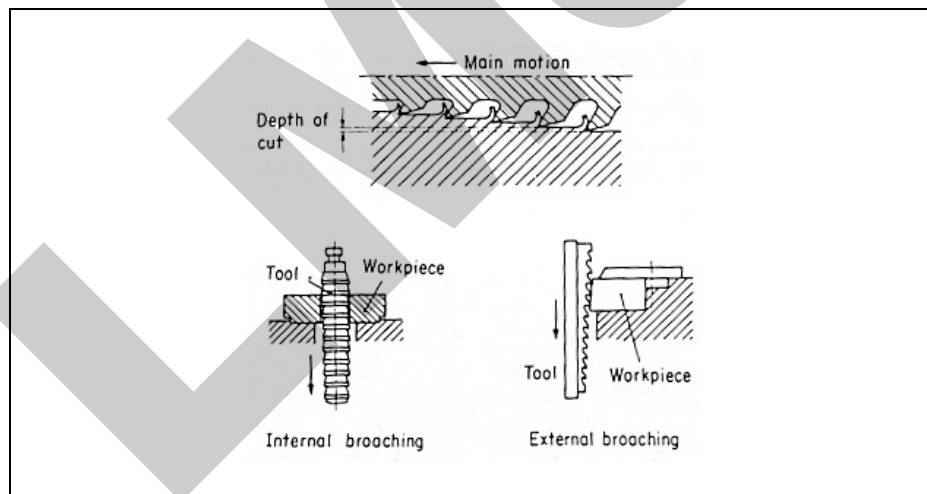
Column = Στήλη
Table = Τράπεζα
Bed = Υπόβαθρο (π.χ. στήριξης τραπεζής)

Σχήμα 3.20 Μηχανή Gantry ή Γεφυροπλάνη

Οι εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού περιλαμβάνουν ένα *πλαίσιο* που υποστηρίζει τις σχετικές κινήσεις ανάμεσα στο εργαλείο και το επεξεργαζόμενο εξάρτημα έτσι ώστε να μπορεί να ολοκληρωθεί η κοπή. Επίσης περιλαμβάνουν κύριους και δευτερεύοντες κινητήρες που παρέχουν την *κύρια κοπτική κίνηση* αλλά και τη *σχετική κίνηση* ανάμεσα στο εργαλείο και το επεξεργαζόμενο εξάρτημα. Περιλαμβάνουν ακόμη *βοηθητικές* συσκευές που παρέχουν ροή ψυκτικών υγρών και άλλες βοηθητικές αλλά απαραίτητες λειτουργίες για τη μηχανή. Τέλος, η μηχανή περιλαμβάνει *μονάδες ελέγχου* που συντονίζουν την κίνηση των αξόνων, ώστε οι κινήσεις του εργαλείου, του επεξεργαζόμενου

εξαρτήματος και της προκύπτουσας κίνησης κοπής να παράγουν με ακρίβεια τα απαιτούμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξαρτήματος.

Οι μηχανές στις οποίες η κύρια κίνηση κοπής γίνεται με ευθύγραμμη κίνηση περιλαμβάνουν τις μηχανές πλανίσματος (planing), μορφοποίησης (shaping) και γλύφανσης (broaching). Οι μηχανές Gantry ή γεφυροπλάνες (Σχ 3.20) αποτελούν τυπικά παραδείγματα εργαλειομηχανών, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μεγάλων και επίπεδων επιφανειών. Τα επεξεργαζόμενα εξαρτήματα είναι συνήθως μακριά και βαριά, όπως στην αεροδιαστημική βιομηχανία και στην ίδια τη βιομηχανία εργαλειομηχανών. Εφόσον η ταχύτητα κοπής καθορίζεται απ' την ταχύτητα τραπέζιου (table speed), ο κύριος κινητήρας (ηλεκτρομηχανικός ή υδραυλικός) πρέπει να υποστηρίζει μια σχετική ευρεία γκάμα ταχυτήτων για την κάλυψη διαφορετικών τύπων υλικών. Επίσης το τραπέζι θα πρέπει να μπορεί να κινείται με υψηλότερες ταχύτητες οι οποίες απαιτούνται για τις ανενεργές κινήσεις του ώστε να μεγιστοποιείται ο ρυθμός παραγωγής και η παραγωγικότητα. Οι γεφυροπλάνες (gantry planing machines) συνήθως χρησιμοποιούνται στην παραγωγή παρτίδων με μικρό μέγεθος ή για την παραγωγή ενός είδους προϊόντων, ενώ οι μηχανές γλύφανσης, λόγω της υψηλής τους τιμής και της δυσκολίας να κατασκευασθεί το εργαλείο γλύφανσης, (Σχ. 3.21), χρησιμοποιούνται κυρίως στη μαζική παραγωγή. Οι μηχανές γλύφανσης χρησιμοποιούνται για εσωτερική και για εξωτερική γλύφανση (Σχ. 3.21) και είναι διαθέσιμες σε οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη (Σχ. 3,22).

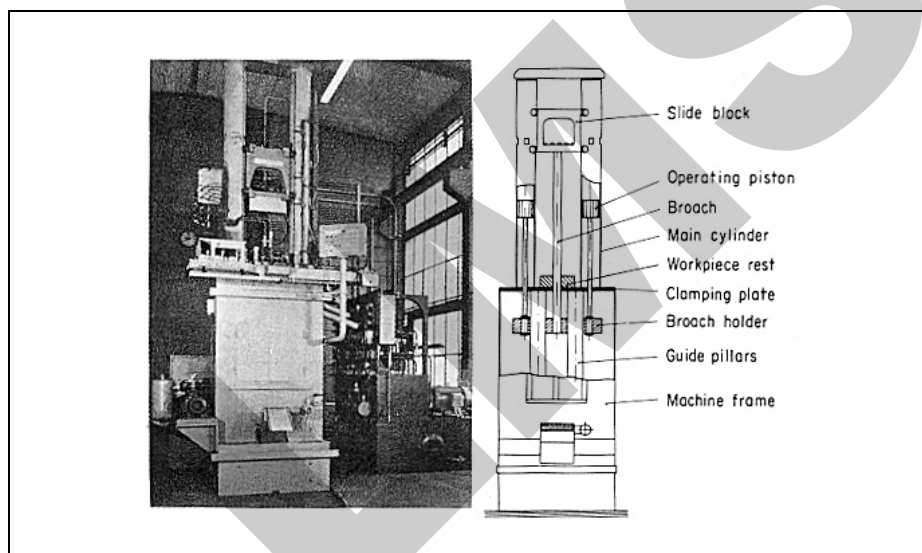


Main motion = Κύρια κίνηση
 Depth of cut = Βάθος κοπής
 Tool = Εργαλείο
 Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα

Internal = Εσωτερικός
 External = Εξωτερικός
 Broaching = Γλύφανση

Σχήμα 3.21 Απομάκρυνση Αποβλήτου με Γλύφανση

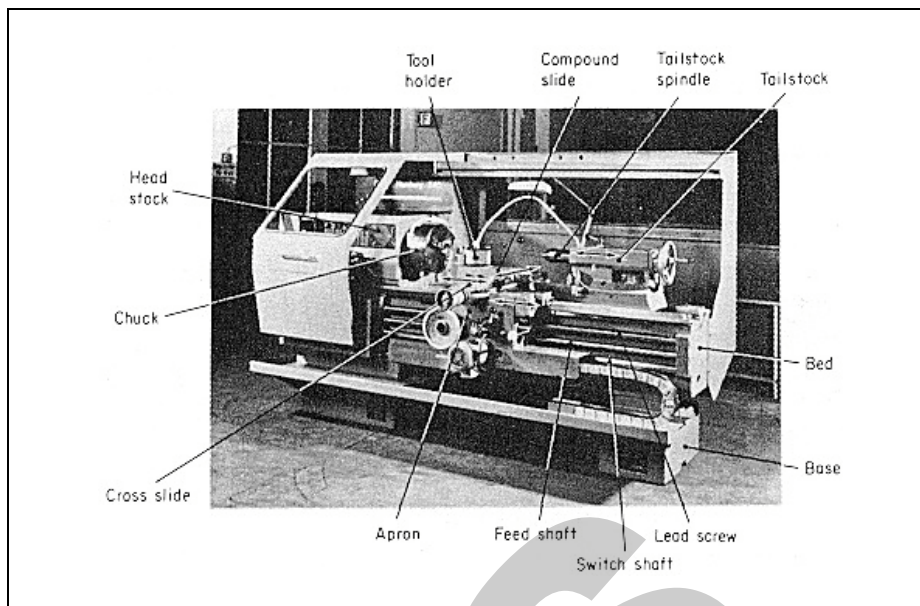
Μια μηχανή ευρείας χρήσεως με περιστροφική κοπτική κίνηση, είναι ο τόννος (Σχ. 3.23). Ο τόννος μπορεί να πραγματοποιήσει μια ποικιλία διεργασιών τόννευσης, όπως εξωτερικό και εσωτερικό τρνίρισμα (turning), τρύπημα (boring) και άνοιγμα σπειρώματος (threading). Ο ατέρμονας κοχλίας (lead screw) της μηχανής έχει υψηλή ακρίβεια και συνήθως χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σπειρωμάτων. Ο άξονας εισόδου, που καθορίζει τη διαδρομή καθ' όλο το μήκος του χρησιμοποιείται για να εξασφαλίζει την κίνηση της πρόωσης της μηχανής. Οι τόννοι Universal είναι σχετικά ευέλικτες μηχανές που μπορούν να παράγουν ποικιλία σχημάτων τα οποία καθορίζονται απ' τη σχετική κίνηση του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος και του εργαλείου, αλλά για χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής. Για να βελτιωθούν αυτοί οι ρυθμοί παραγωγής, που στους τόννους είναι χαμηλοί λόγω των συχνών αλλαγών των εργαλείων, οι εργαλειομηχανές (Σχ. 3.24) περιλαμβάνουν περιστρεφόμενες διατάξεις (turrets) για αυτόματη αλλαγή εργαλείων. Αυτό επιτρέπει τη χρησιμοποίηση μιας γκάμας κοπτικών εργαλείων για το ίδιο επεξεργαζόμενο εξάρτημα, που ελαττώνει τους χρόνους παραγωγής χωρίς απαραίτητα να μειώνει την ευελιξία του τόννου (Σχ. 3.25).



Slide block = Ολισθαίνον τμήμα (μπλοκ)
 Operating piston = Έμβολο λειτουργίας
 Broach = Εργαλείο γλύφανσης
 Main cylinder = Κύριος κύλινδρος
 Workpiece rest = Υπόβαθρο εναπόθεσης εξαρτήματος προς κατεργασία

Clamping plate = Πλάκα σύσφιξης
 Broach holder = Συγκρατητής εργαλείου γλύφανσης
 Guide pillars = Στήλες οδηγού
 Machine frame = Πλαίσιο μηχανής

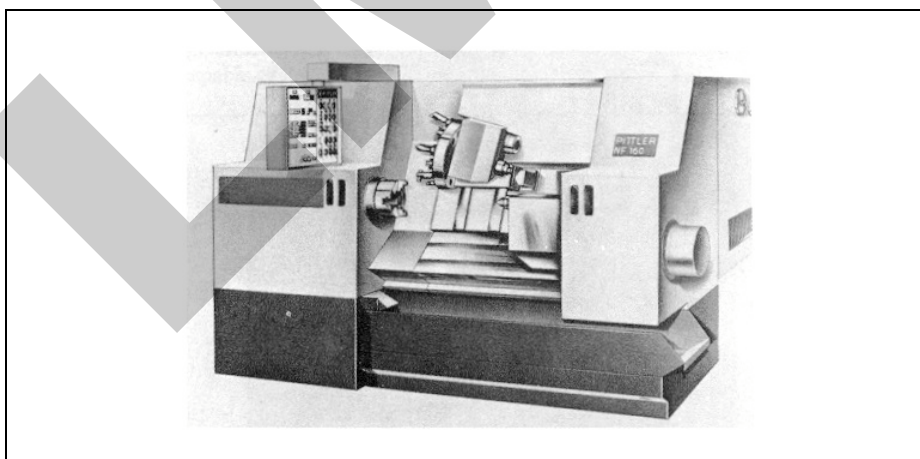
Σχήμα 3.22 Μηχανή Κάθετης Εσωτερικής Γλύφανσης



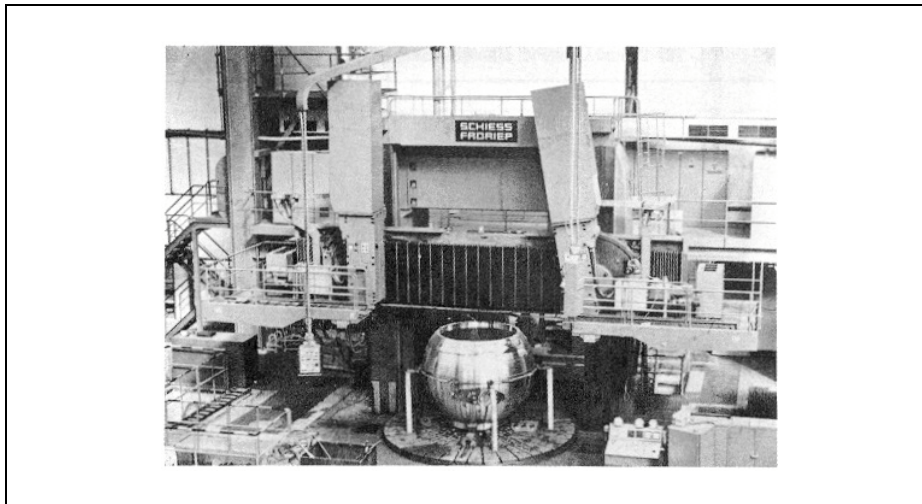
Tool holder = Συγκρατητής εργαλείου
 Compound slide = Σύνθετος ολισθητήρας (γλίστρα)
 Tailstock = Κεντροφορέας
 Spindle = Άτρακτος
 Head stock = Κεφαλή στήριξης
 Chuck = Σφιγκτήρας

Cross slide = Χιαστός ολισθητήρας (γλίστρα)
 Apron = Ποδιά
 Feed shaft = Άξονας τροφοδοσίας
 Switch shaft = Άξονας διακλάδωσης
 Lead screw = Κύριος κοχλίας
 Base = Βάση
 Bed = Υπόβαθρο (κρεβάτι)

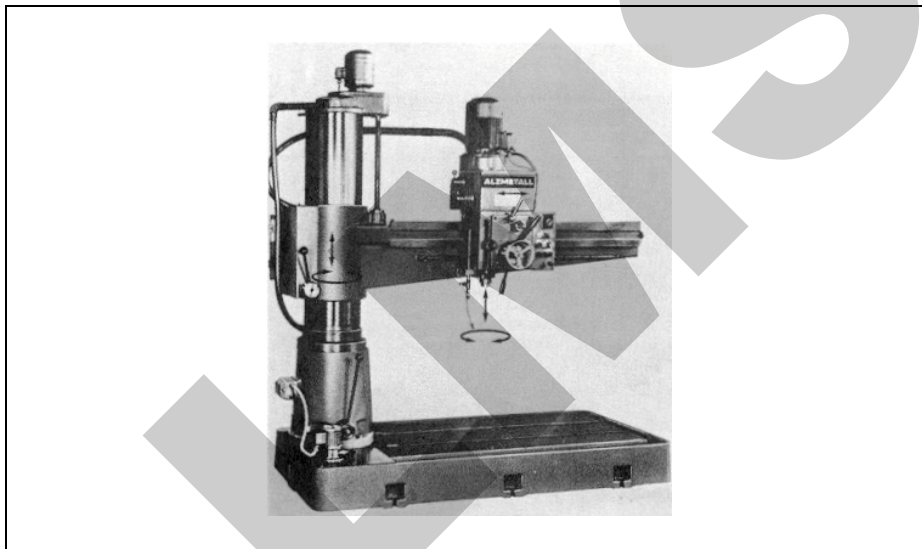
Σχήμα 3.23 Τόρνος



Σχήμα 3.24 Αριθμητικά Ελεγχόμενος Αυτόματος Τόρνος με Περιστρεφόμενη Διάταξη (turret) για Αυτόματη Αλλαγή Εργαλείων



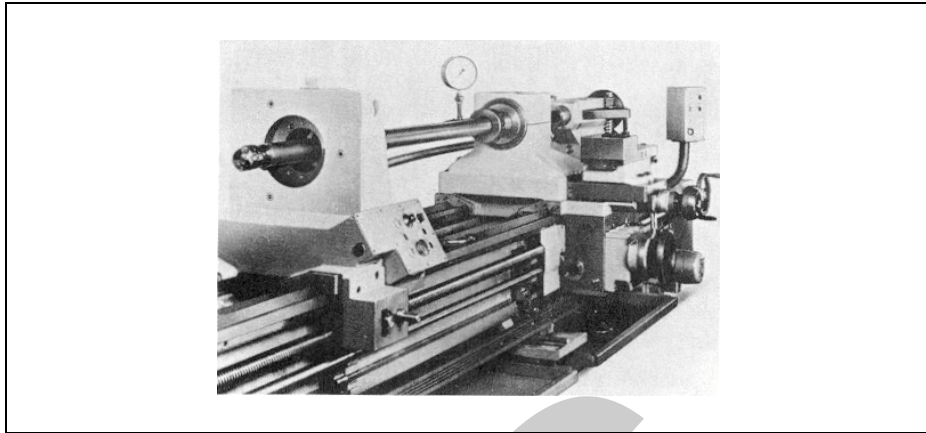
Σχήμα 3.25 Κάθετος Τόρνος



Σχήμα 3.26 Ακτινικό Δράπανο Κατακόρυφης Διάτρησης

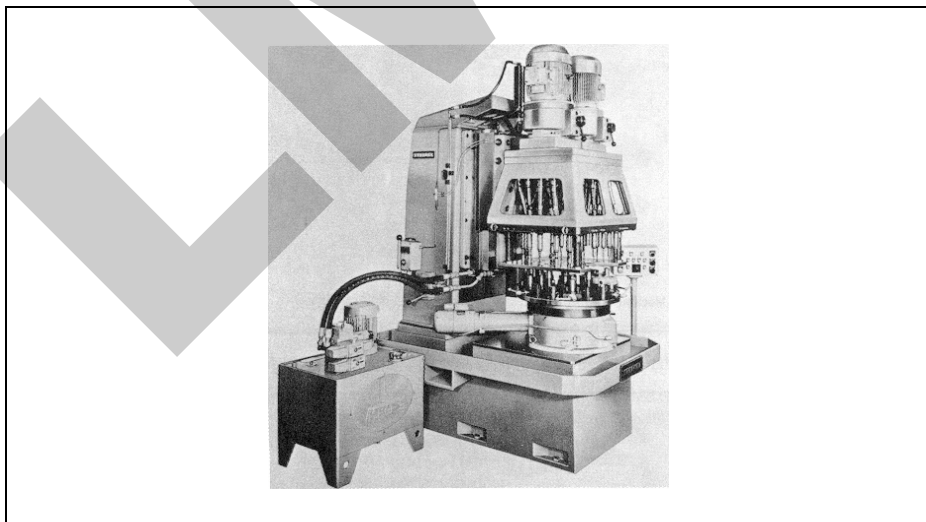
Μια κατηγορία εργαλειομηχανών, για την παραγωγή συμμετρικών εκ περιστροφής γεωμετρικών χαρακτηριστικών, είναι οι μηχανές διάτρησης (drilling and boring equipment). Αυτές οι μηχανές ποικίλουν από τις πιο απλές, χειροκίνητες, που συνήθως χρησιμοποιούνται για επιδιορθώσεις, ως τις εργαλειομηχανές κατακόρυφης διάτρησης (radial drilling presses) που χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερα εξαρτήματα (Σχ 3.26). Κατά τη διάτρηση, η πε-

ριοχή που σχηματίζεται το απόβλητο είναι περιορισμένη, κάτι που κάνει τη διάτρηση σχετικά αργή διαδικασία σε σύγκριση με το τρνίρισμα.

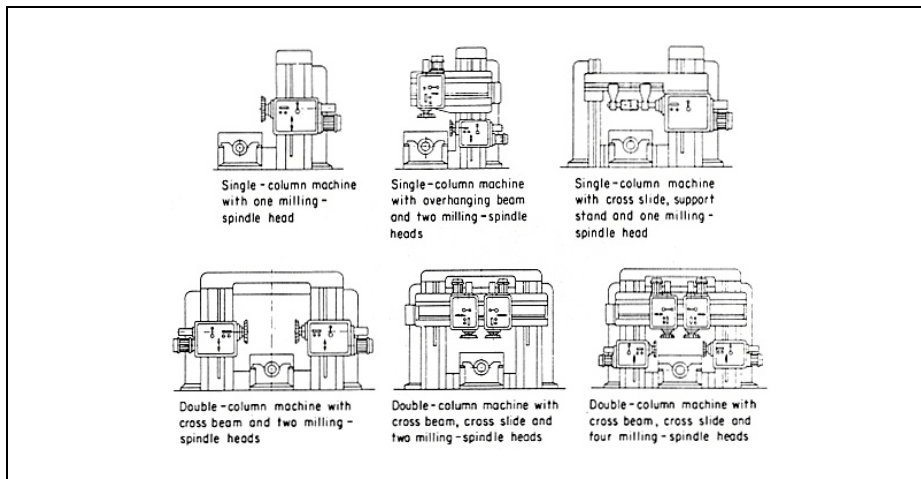


Σχήμα 3.27 Συγκράτηση για Διεργασία Βαθιάς Διάτρησης

Ο σχηματισμός του αποβλήτου επίσης περιορίζει τη δημιουργία των οπών με μεγάλο λόγο βάθους προς διάμετρο. Προκειμένου να ξεπερασθεί αυτός ο περιορισμός, υπάρχουν τεχνικές για την εξαγωγή του αποβλήτου από το βάθος της οπής, οι οποίες εισάγουν ψυκτικό υγρό υπό υψηλή πίεση, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια στις διαστάσεις (Σχ. 3.27). Η παραγωγικότητα της διάτρησης μπορεί να αυξηθεί όταν χρησιμοποιούνται μηχανές που έχουν πολλά τρυπάνια, ικανές να ανοίγουν πολλές οπές συγχρόνως (Σχ. 3.28).



Σχήμα 3.28 Μηχανή Διάτρησης Πολλαπλών Τρυπανιών



Single-column machine with one milling-spindle head = Οριζόντια φρέζα μονής στήλης, μιας ατράκτου

Single-column machine with overhanging beam and two milling-spindle heads = Φρέζα μονής στήλης με πρόβολο και δύο ατράκτους

Single-column machine with cross slide, support stand and one milling-spindle head = Οριζόντια φρέζα μονής στήλης με γεφυρωτή γλίστρα, υποστήριξη και μία άτρακτο

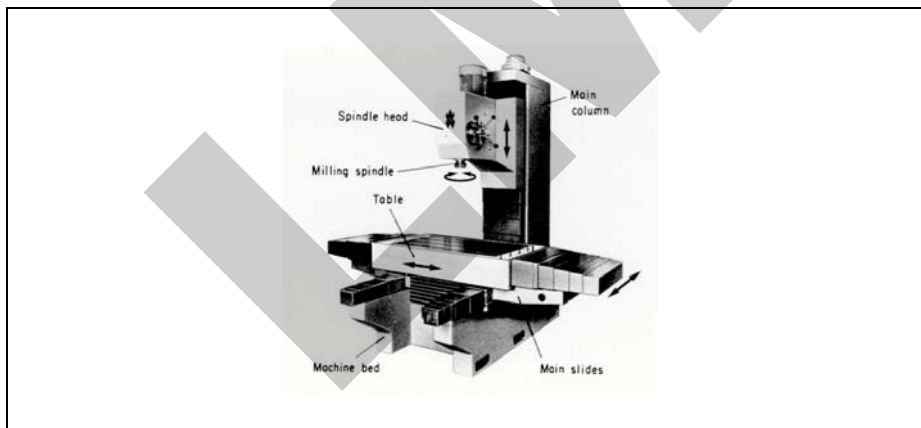
Double-column machine with cross beam and

two milling-spindle heads = Οριζόντια φρέζα διπλής στήλης με γέφυρα και δύο ατράκτους

Double-column machine with cross beam, cross slide and two milling-spindle heads = Φρέζα διπλής στήλης με γέφυρα, γεφυρωτή γλίστρα και δύο ατράκτους

Double-column machine with cross beam, cross slide and four milling-spindle heads = Φρέζα διπλής στήλης με γέφυρα, γεφυρωτή γλίστρα και τέσσερις ατράκτους.

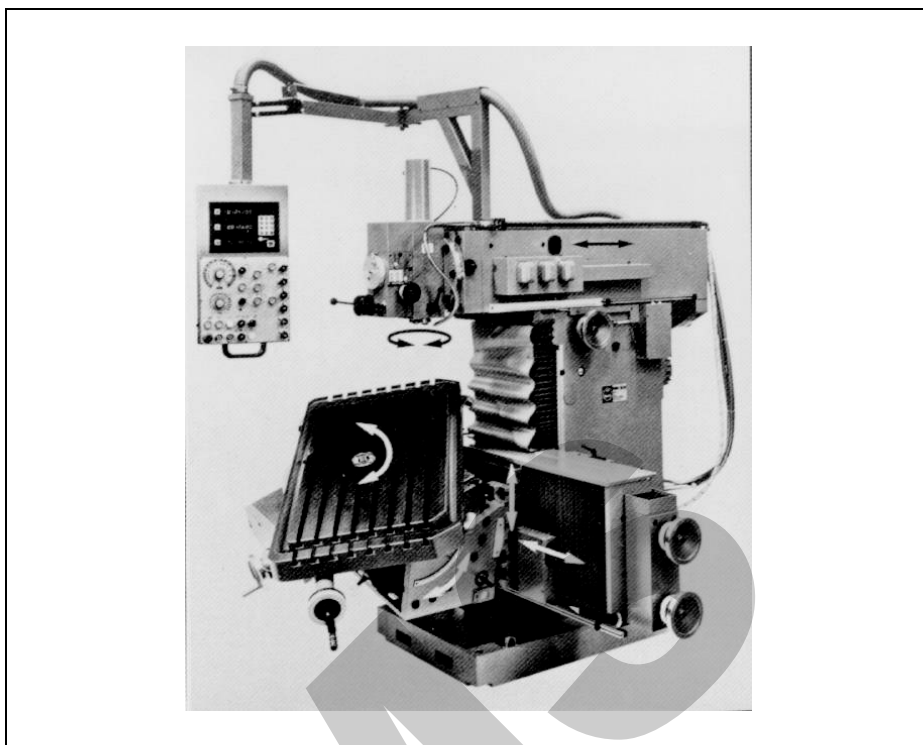
Σχήμα 3.29 Στοιχεία για Φρέζες Μονής και Διπλής Στήλης



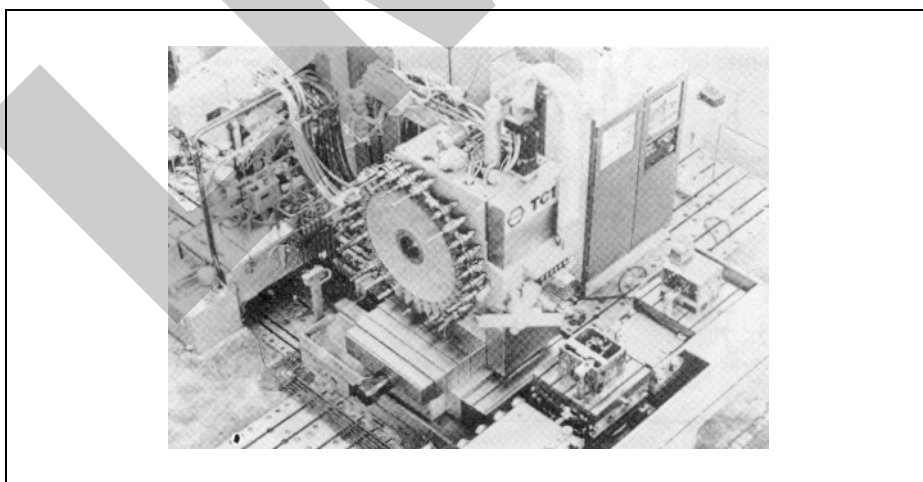
Spindle head = Κεφαλή ατράκτου
Milling spindle = Άτρακτος φρεζαρίσματος
Table = Τράπεζα

Machine bed = Υπόβαθρο (κρεβάτι) εργαλειομηχανής
Main column = Κορμός εργαλειομηχανής
Main slides = Κύριες γλίστρες

Σχήμα 3.30 Μηχανή Φρεζαρίσματος

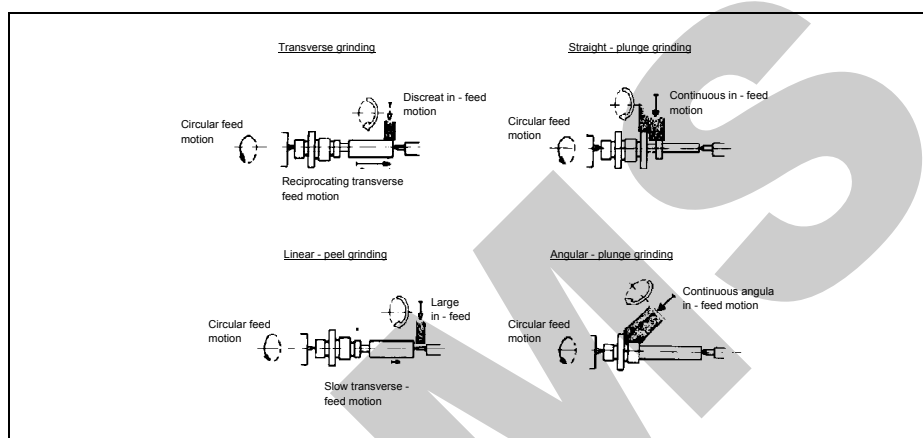


Σχήμα 3.31 Φρέζα Universal



Σχήμα 3.32 Κέντρο Κατεργασίας με Αυτόματη Μονάδα Αλλαγής Εργαλείων [3]

Στο φρεζάρισμα η κύρια κίνηση κοπής είναι επίσης περιστροφική, αλλά η πρόωση δεν είναι προς την κατεύθυνση του κοπτικού εργαλείου, αλλά κάθετα προς αυτό. Οι φρέζες (Σχ. 3.29) χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τόσο για την παραγωγή μικρών παρτίδων όσο και για μαζική παραγωγή. Διαφορετικοί τύποι φρεζών (Σχ. 3.30) παρέχουν ποικιλία ταχυτήτων παραγωγής, ευελιξίας και στιβαρότητας, που απαιτείται ειδικά για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας. Λόγω του αριθμού των αξόνων κατά τους οποίους γίνεται η σχετική κίνηση μεταξύ του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος και του εργαλείου (Σχ. 3.31), οι μηχανές φρεζαρίσματος παρέχουν ευελιξία σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τη γεωμετρία του εξαρτήματος. Γι' αυτό τα κέντρα κατεργασίας (Σχ. 3.32) είναι βασικά φρέζες με επιπρόσθετες μονάδες για την αλλαγή των εργαλείων ώστε να παρέχουν μεγάλο βαθμό ευελιξίας και υψηλό ρυθμό παραγωγής. Επομένως τα κέντρα κατεργασίας είναι σημαντικό εξάρτημα των *ευέλικτων συστημάτων παραγωγής* τα οποία θα συζητηθούν αργότερα.



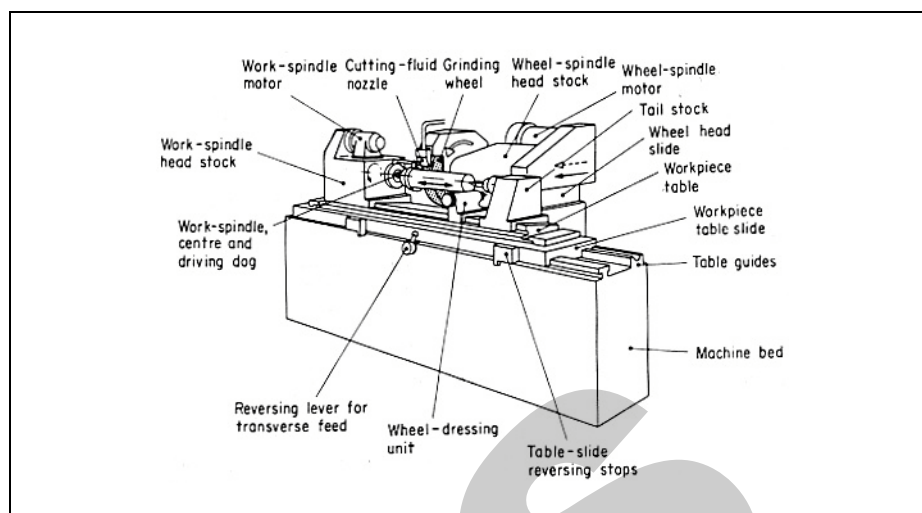
Transverse grinding = Εγκάρσια λείανση
 Straight-plunge grinding = Λείανση βύθισης
 Linear-peel grinding = Λείανση ξεχονδρίσματος
 Angular-plunge grinding = Γωνιακή λείανση βύθισης
 Circular feed motion = Περιστροφική κίνηση

πρόωσης
 Discreet in-feed motion = Διακριτή πρόωση
 Reciprocating transverse feed motion = Εγκάρσια παλινδρομική πρόωση
 Continuous in-feed motion = Συνεχής πρόωση
 Large in-feed = Μεγάλη πρόωση

Σχήμα 3.33 Τεχνικές Εξωτερικής Κυλινδρικής Λείανσης

Οι διεργασίες λείανσης διαφόρων τύπων (grinding, honing and lapping) χρησιμοποιούνται (Κεφ. 2) για να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια και υψηλή ποιότητα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Αυτές οι διεργασίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατασκευές υψηλής ακρίβειας, όπου η ποιότητα και η ακρίβεια είναι περισσότερο σημαντικές από το ρυθμό παραγωγής. Η εξωτερική λείανση περιλαμβάνει ένα πλήθος διεργασιών (Σχ. 3.33), η πλειοψηφία των οποίων πραγματοποιείται με μια εξωτερική κυλινδρική λειαντική μηχανή (Σχ. 3.34), όπου

η γωνία της τράπεζας εργασίας και της κεφαλής του λειαντικού τροχού ρυθμίζονται αναλόγως του υπό επεξεργασία εξαρτήματος (Σχ. 3.35).

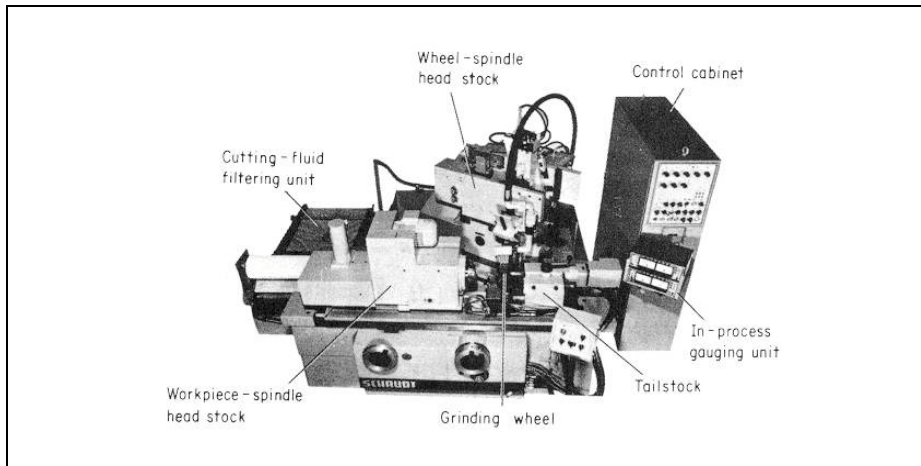


Work-spindle motor = Κινητήρας ατράκτου εξαρτήματος
 Cutting-fluid nozzle = Ακροφύσιο υγρού λίπανσης
 Grinding-wheel = Τροχός λείανσης
 Wheel-spindle head stock = Κορμός κεφαλής της ατράκτου του λειαντικού τροχού
 Wheel-spindle motor = Κινητήρας της ατράκτου του λειαντικού τροχού
 Tail stock = Κουκουβάγια
 Wheel head slide = Ολισθητήρας (γλίστρα) κεφαλής
 Workpiece table = Τράπεζα εργασίας

Table guides = Οδηγοί τράπεζας (εργασίας)
 Machine bed = Υπόβαθρο εργαλειομηχανής
 Table-slide reversing stops = Σημεία αναστροφής της φοράς κίνησης της τράπεζας
 Wheel-dressing unit = Μονάδα ανανέωσης της επιφάνειας του λειαντικού τροχού
 Reversing lever for transverse feed = Μοχλός αναστροφής της φοράς κίνησης της τράπεζας
 Work-spindle centre and driving dog = Κέντρο ατράκτου εργασίας και οδηγός κίνησης
 Work-spindle head stock = Κορμός κεφαλής της ατράκτου εργασίας

Σχήμα 3.34 Η Βασική Σχεδίαση της Εξωτερικής Κυλινδρικής Μηχανής Λείανσης

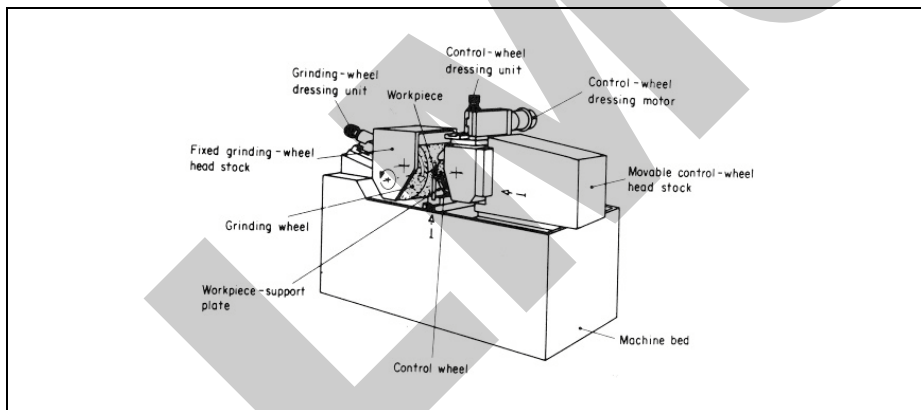
Όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, ποιότητα και υψηλός ρυθμός παραγωγής, χρησιμοποιείται συνήθως άκεντρη (centerless) λείανση. Η διαδικασία αυτή είναι έτσι σχεδιασμένη, ώστε το υπό κατεργασία εξάρτημα να στηρίζεται πάνω σε μια βάση. Ένας τροχός κυλινδρικός από συνθετικό ελαστικό ή ελαστικοποιημένο πλαστικό, τοποθετείται απέναντι από τον λειαντικό τροχό. Αυτή η γεωμετρική διάταξη επιτρέπει την κατά μήκος λείανση (through-feed grinding) ή την κατακόρυφη λείανση (plunge grinding) των εξαρτημάτων. Όταν η διαδικασία χρησιμοποιείται για λείανση κατά μήκος, η ευθύγραμμη κίνηση πρόωσης δημιουργείται μέσω γωνιακής περιστροφής του τροχού που ελέγχει την κίνηση. Οι μηχανές άκεντρης λείανσης (Σχ. 3.36) είναι ακριβότερες από τις μηχανές εξωτερικής λείανσης και συναντώνται σε συστήματα μαζικής παραγωγής ειδικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία.



Wheel-spindle head stock = Κορμός κεφαλής της ατράκτου του λειαντικού τροχού
 Control cabinet = Μονάδα ελέγχου
 In-process gauging unit = Ενσωματωμένη μονάδα μέτρησης κατά την διάρκεια της διεργασίας
 Tail stock = Κουκουβάγια

Grinding-wheel = Τροχός λείανσης
 Work-spindle head stock = Κορμός κεφαλής της ατράκτου εργασίας
 Cutting-fluid filtering unit = Μονάδα καθαρισμού του υγρού λίπανσης

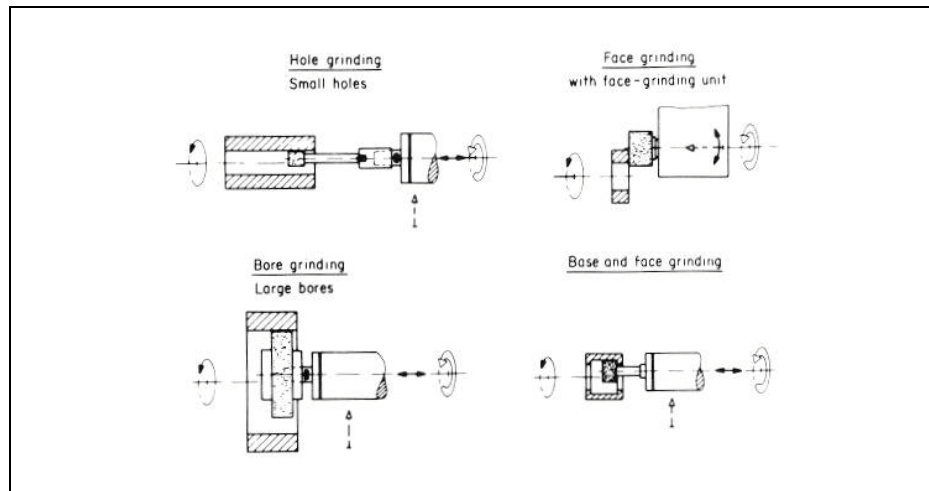
Σχήμα 3.35 Universal Μηχανή Εξωτερικής Κυλινδρικής Λείανσης



Grinding-wheel dressing unit = Μονάδα ανανέωσης της επιφάνειας του λειαντικού τροχού
 Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα
 Control-wheel dressing unit = Μονάδα ανανέωσης της επιφάνειας του λειαντικού τροχού
 Control-wheel dressing motor = Κινητήρας της μονάδας ανανέωσης της επιφάνειας του ελεγχόμενου λειαντικού τροχού
 Movable control-wheel head stock = Κινητός

κορμός κεφαλής του ελεγχόμενου λειαντικού τροχού
 Machine bed = Υπόβαθρο εργαλειομηχανής
 Control wheel = Τροχός ελέγχου
 Workpiece-support plate = Πλάκα υποστήριξης του κατεργαζόμενου εξαρτήματος
 Grinding wheel = Τροχός λείανσης
 Fixed grinding-wheel head stock = Σταθερός κορμός κεφαλής λειαντικού τροχού

Σχήμα 3.36 Τα Βασικά Μέρη της Ακεντρης Μηχανής Λείανσης



Hole grinding = Λείανση οπών

Small holes = Μικρές οπές

Face grinding with face-grinding unit = Μετωπική λείανση με λειαντικό μετωπικό εξάρτημα

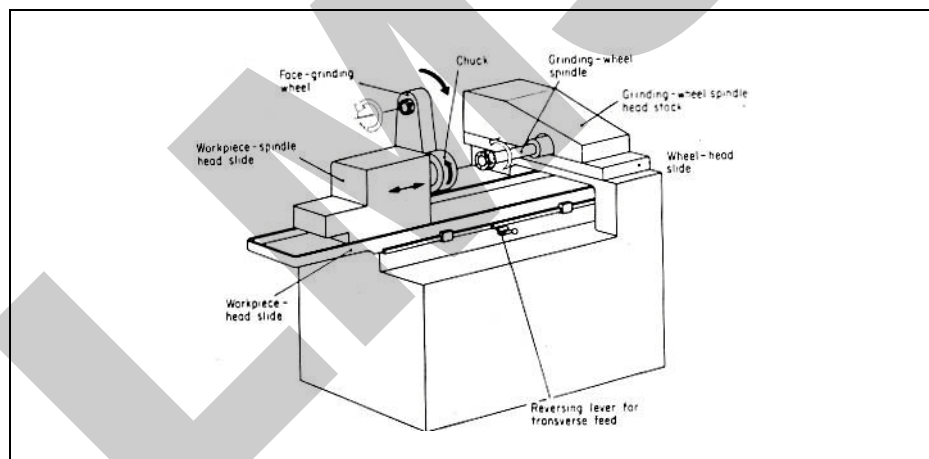
Bore grinding = Λείανση εσωτερικής κυλινδρικής

κούλοτητας

Large bores = Μεγάλης διαμέτρου εσωτερικές κυλινδρικές κούλοτητες

Base and face grinding = Βασική και μετωπική λείανση

Σχήμα 3.37 Τεχνικές Εσωτερικής Λείανσης



Face-grinding wheel = Μετωπικός λειαντικός τροχός

Chuck = Σφιγκτήρας

Grinding-wheel spindle = Άτρακτος λειαντικού τροχού

Grinding-wheel spindle head stock = Κορμός κεφαλής της ατράκτου του λειαντικού τροχού

Wheel-head slide = Ολισθητήρας (γλίστρα)

κεφαλής

Reversing lever for transverse feed = Μοχλός αναστροφής της φοράς της κίνησης της τράπεζας

Workpiece-head slide = Ολισθητήρας (γλίστρα) κεφαλής κατεργαζόμενου εξαρτήματος

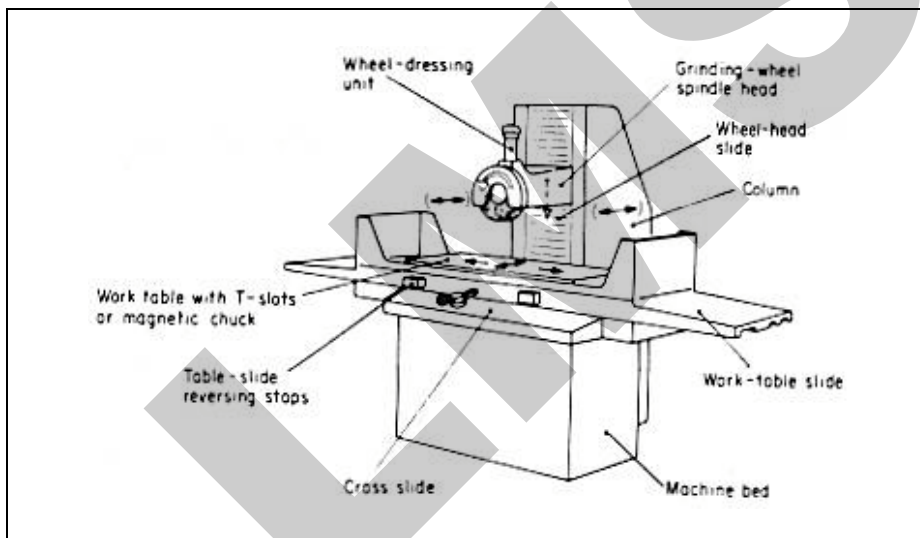
Workpiece-spindle head slide = Ολισθητήρας (γλίστρα) κεφαλής ατράκτου του κατεργαζόμενου

εξαρτήματος

Σχήμα 3.38 Τα Βασικά Μέρη της Εσωτερικής Κυλινδρικής Λειαντικής Μηχανής

Οι τεχνικές εσωτερικής λείανσης (Σχ. 3.37) είναι πολύ σημαντικές στις βιομηχανίες εδράνων. Η διεργασία έχει περιορισμούς ως προς τη δυναμική της ευστάθειας, διότι το μέγεθος του λειαντικού τροχού και της ατράκτου που υποστηρίζει, περιορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξαρτήματος που πρέπει να λειανθεί. Ο σχεδιασμός (Σχ. 3.38) μιας εσωτερικής κυλινδρικής λειαντικής μηχανής συνήθως παρέχει τη δυνατότητα της πλάγιας πρόωσης στην επιφάνεια που τοποθετείται το προς επεξεργασία εξάρτημα. Για να αντιμετωπισθεί η δυναμική αστάθεια της ατράκτου που στηρίζει το λειαντικό τροχό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα προσαρμοζόμενες μονάδες αυτομάτου ελέγχου (θα συζητηθούν σε επόμενο κεφάλαιο).

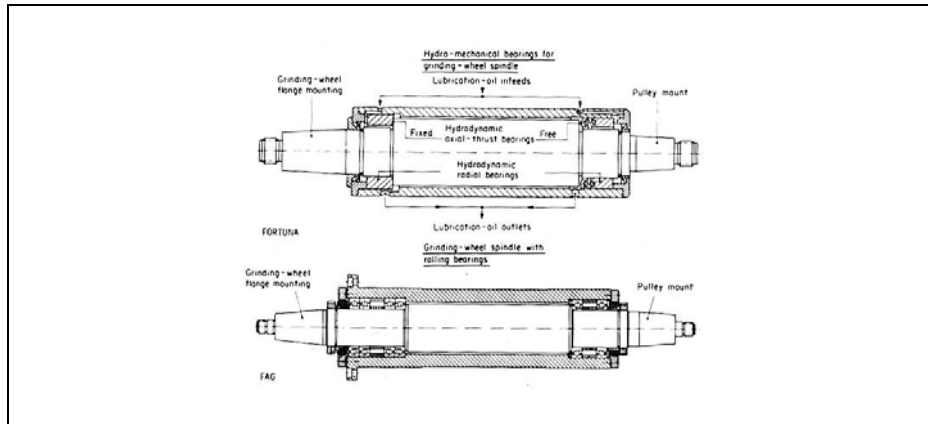
Για τη λείανση επιπέδων επιφανειών και των εξαρτημάτων με επιφανειακή διαμόρφωση χρησιμοποιούνται τεχνικές επιφανειακής λείανσης με τις κατάλληλες μηχανές για επιφανειακή λείανση (Σχ. 3.39). Ο σχεδιασμός αυτών των μηχανών περιλαμβάνει μια τράπεζα, που κινείται κατά μήκος της μηχανής και είναι τοποθετημένη σε ολισθητήρες. Οι κινητήρες για την κίνηση της τράπεζας μπορεί να είναι συνδυασμός ηλεκτρομηχανικών και υδραυλικών μονάδων ή κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC).



Wheel-dressing unit = Μονάδα ανανέωσης της επιφάνειας του λειαντικού τροχού
 Wheel-head slide = Ολισθητήρας (γλίστρα) κεφαλής
 Column = Στήλη
 Work-table slide = Ολισθητήρας (γλίστρα) τράπεζας εργασίας
 Machine bed = Υπόβαθρο (κρεβάτι)

εργαλειομηχανής
 Cross slide = Εγκάρσιος ολισθητήρας (γλίστρα)
 Table-slide reversing stops = Σημεία αναστροφής της φοράς κίνησης της τράπεζας
 Work table with T-slots or magnetic chuck = Τράπεζα εργασίας με σχισμές σχήματος T ή μαγνητικό σφιγκτήρα

Σχήμα 3.39 Η Βασική Σχεδίαση Επιφανειακής Λειαντικής Μηχανής



Grinding wheel = Τροχός λείανσης
 Grinding-wheel spindle = Άτρακτος λειαντικού τροχού
 Flange = Κολάρο (φλάντζα)
 Mounting = Πλαίσιο στήριξης
 Hydro-mechanical bearings = Υδρομηχανικά έδρανα
 Hydrodynamic axial-thrust bearings = Υδροδυναμικά αξονικά ωστικά έδρανα

Hydrodynamic radial bearings = Υδροδυναμικά ακτινικά έδρανα
 Rolling bearings = Έδρανα κύλισης
 Fixed = Σταθερός
 Free = Ελεύθερος
 Lubrication-oil infeeds = Είσοδοι λιπαντικού ελαίου
 Lubrication-oil outlets = Έξοδοι λιπαντικού ελαίου
 Pulley = Τροχαλία

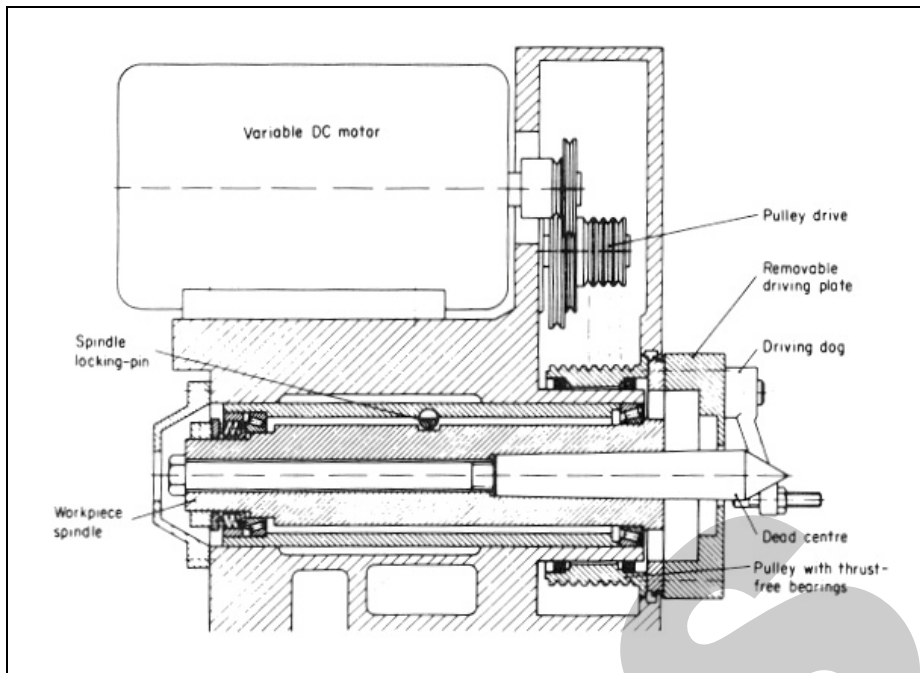
Σχήμα 3.40 Σχέδια της Ατράκτου Λειαντικού Τροχού

Limiting factors for	Belt drive	Built-in motor	Air turbine
Performance of grinding wheel	Motor power Belt efficiency	Thermal loading $P_s \leq 8 \text{ kW}$	Energy generation and transmission $P_s \leq 1 \text{ kW}$
Speed of spindle	Pulley speed ($n_s \leq 50\,000 \text{ rev min}^{-1}$)	Rigidity of armature ($n_s \leq 120\,000 \text{ rev min}^{-1}$)	Bearings Air velocity ($n_s \leq 400\,000 \text{ rev min}^{-1}$)
		n_s speed of grinding spindle in rev min^{-1}	P_s power of grinding spindle

Limiting factors for = Περιοριστικοί παράγοντες για
 Performance of grinding wheel = Απόδοση λειαντικού τροχού
 Speed of spindle = Ταχύτητα ατράκτου
 Belt drive = Οδήγηση με μάντα
 Motor power = Ισχύς κινητήρα
 Belt efficiency = Αποδοτικότητα μάντα
 Pulley speed = Ταχύτητα τροχαλίας
 Built-in motor = Ενσωματωμένος κινητήρας

Thermal loading = Θερμική φόρτιση
 Rigidity of armature = Στιβαρότητα οπλισμού
 Air turbine = Αεροστρόβιλος
 Energy generation and transmission = Δημιουργία και μεταφορά ενέργειας
 Bearings/Air velocity = Έδρανα/Ταχύτητα αέρα
 n_s speed of grinding spindle in rev min^{-1} (ταχύτητα λειαντικού τροχού σε στροφές/ λεπτό)
 P_s power of grinding spindle (ισχύς λειαντικού τροχού)

Σχήμα 3.41 Διάφορα Σχέδια Ατράκτων της Μηχανής Εσωτερικής Λείανσης



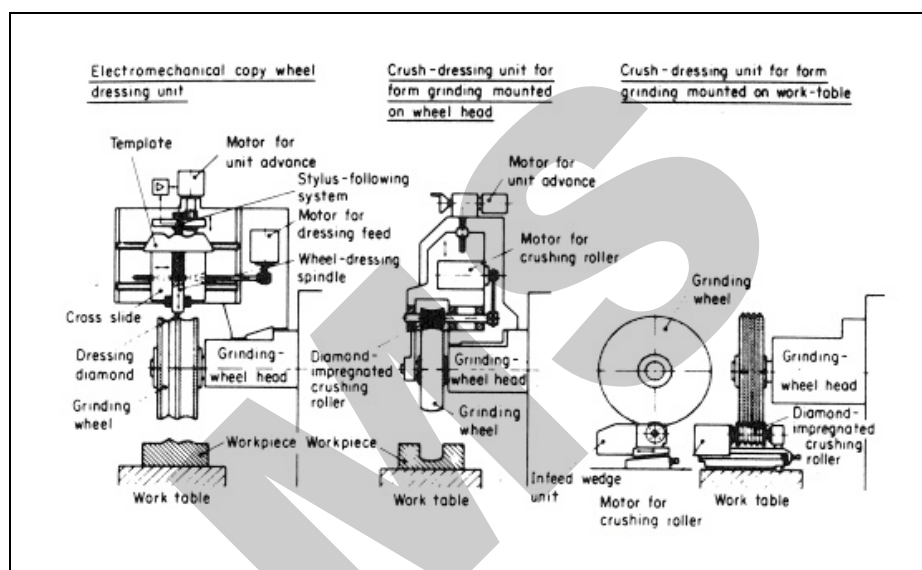
Variable DC motor = Μεταβλητός κινητήρας συνεχούς ρεύματος
 Pulley drive = Οδήγηση με τροχαλίες
 Removable driving plate = Αφαιρούμενος δίσκος οδήγησης
 Driving dog = Οδηγός κίνησης
 Dead centre = Κέντρο

Pulley with thrust-free bearings = Τροχαλία χωρίς οστικά έδρανα
 Workpiece spindle = Κεφαλή ατράκτου του κατεργαζόμενου εξαρτήματος
 Spindle locking-pin = Σφήνα σταθεροποίησης ατράκτου

Σχήμα 3.42 Η Κεφαλή Εργασίας της Ατράκτου

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο σε οποιοδήποτε τύπο λειαντικής μηχανής είναι η άτρακτος από την οποία υποστηρίζεται ο λειαντικός τροχός (Σχ. 3.40). Διαφορετικοί τύποι χρησιμοποιούνται ανάλογα με την απαιτούμενη ταχύτητα του λειαντικού τροχού. Τα υδροδυναμικά έδρανα χρησιμοποιούνται για μέτριες ταχύτητες και μεγάλες διαμέτρους λειαντικών τροχών, ενώ τα έσφαιρα έδρανα (ρουλεμάν) χρησιμοποιούνται για υψηλότερες περιστροφικές ταχύτητες και μικρότερες διαμέτρους λειαντικών τροχών. Στην εσωτερική λείανση η κίνηση στην άτρακτο (Σχ. 3.44) μεταδίδεται με μάντα, με ενσωματωμένο κινητήρα ή με τουρμπίνα που παρέχουν τις απαιτούμενες υψηλές ταχύτητες για εσωτερική λείανση, ενώ επίσης παρέχουν μειωμένες δονήσεις στην άτρακτο του λειαντικού τροχού. Στις κυλινδρικές λειαντικές μηχανές, το κατεργαζόμενο εξάρτημα στηρίζεται από μια άτρακτο. Το τμήμα αυτής που παρέχει την απαραίτητη σύνδεση και τοποθέτηση του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος παρέχει επίσης και την κυκλική κίνηση της πρόωσης. Συνήθως για την κίνηση αυτή χρησιμοποιείται μια ξεχωριστή μετάδοση κίνησης, από ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) με δυνατότητα μεταβλητής ταχύτητας (Σχ. 3.42).

Η ακρίβεια της λείανσης ενός εξαρτήματος εξαρτάται ιδιαίτερα από το σχήμα του λειαντικού τροχού, που συνεχώς φθείρεται κατά την λειαντική διαδικασία. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα περιοδικά ή συνεχόμενα, η επιφάνεια του λειαντικού τροχού ανανεώνεται με μια ποικιλία συσκευών και μηχανισμών (3.43). Η ανανέωση αυτή είναι πολύ σημαντική για τους τροχούς με ειδικό σχήμα, που «μεταβιβάζουν» το σχήμα τους στην επιφάνεια του εξαρτήματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα αντιγραφής ή μια "συνθλιπτική" μονάδα, όπου ένας διαμαντένιος κύλινδρος έρχεται σε επαφή με τον λειαντικό τροχό δημιουργώντας το σωστό σχήμα στον τροχό. Από την μεριά του ο λειαντικός τροχός μεταδίδει το σχήμα του στο επεξεργαζόμενο εξάρτημα.



Electromechanical copy wheel dressing unit = Ηλεκτρομηχανική μονάδα ανανέωσης της επιφάνειας τροχού

Crush-dressing unit for form grinding mounted on wheel head = Μονάδα ανανέωσης της επιφάνειας με σύνθλιψη που εδράζεται στην κεφαλή του τροχού

Crush-dressing unit for form grinding mounted on work-table = Μονάδα ανανέωσης της επιφάνειας με σύνθλιψη που εδράζεται στην τράπεζα εργασίας, για λείανση μορφής

Template = Πρότυπο

Motor for unit advance = Βηματικός Κινητήρας

Stylus-following system = Σύστημα που ακολουθεί την ακίδα

Motor for dressing feed = Κινητήρας πρόωσης του

εργαλείου ανανέωσης επιφάνειας

Wheel-dressing spindle = Ατρακτός του εργαλείου ανανέωσης επιφάνειας

Grinding-wheel head = Κεφαλή λειαντικού τροχού

Grinding wheel = Τροχός λείανσης

Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα

Work table = Τράπεζα εργασίας

Dressing diamond = Διαμάντι ανανέωσης επιφάνειας

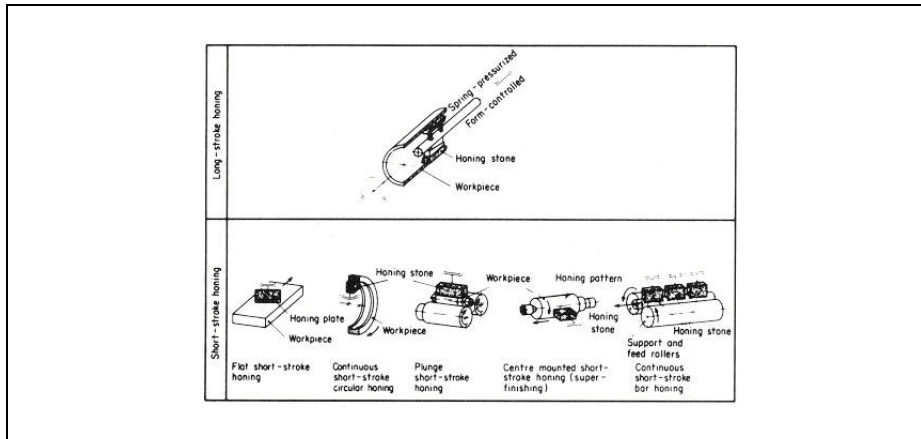
Cross slide = Ολισθητήρας (γλίστρα)

Motor for crushing roller = Κινητήρας κυλίνδρου σύνθλιψης

Diamond-impregnated crushing roller = Κύλινδρος σύνθλιψης εμφυτευμένος με διαμάντια

Infeed wedge unit = Σύστημα (μονάδα) σφηνών για μετάδοση της κίνησης

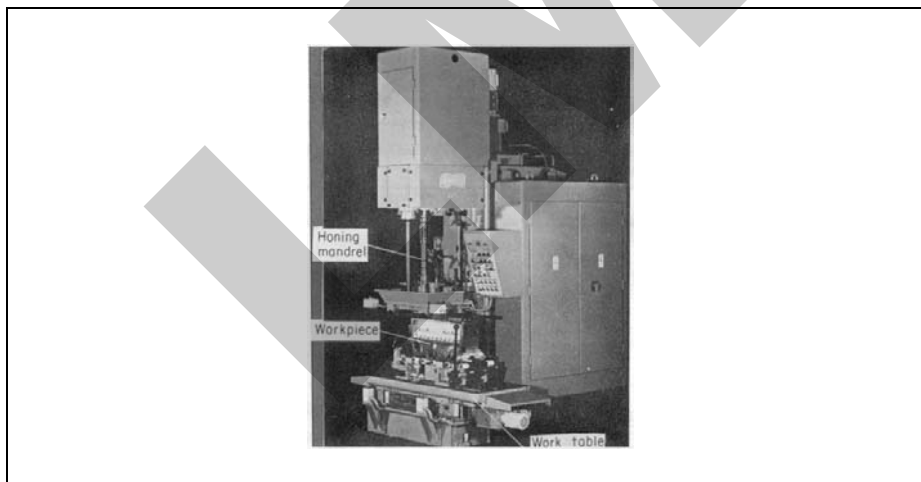
Σχήμα 3.43 Μονάδα Ανανέωσης Επιφάνειας του Τροχού για Διεργασίες Λείανσης Σχήματος



Long-stroke honing = Γυάλισμα μεγάλης διαδρομής
 Short-stroke honing = Γυάλισμα μικρής διαδρομής
 Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα
 Honing stone = Πέτρα γυαλίσματος
 Spring-pressurized = Με συμπίεση ελατηρίου
 Form-controlled = Με έλεγχο μορφής
 Honing plate = Πλάκα γυαλίσματος
 Flat short-stroke honing = Επίπεδο γυάλισμα μικρής διαδρομής
 Continuous short-stroke circular honing = Συνεχές κυκλικό γυάλισμα μικρής διαδρομής

Plunge short-stroke honing = Γυάλισμα βύθισης μικρής διαδρομής
 Honing pattern = Πρότυπο (σχεδιάγραμμα) γυαλίσματος
 Centre mounted short-stroke honing (super-finishing) = Κεντραρισμένο γυάλισμα μικρής διαδρομής (τελείωμα υψηλής ποιότητας)
 Support and feed rollers = Κύλινδροι υποστήριξης και πρόωσης
 Continuous short-stroke bar honing = Συνεχές, μικρής διαδρομής γυάλισμα ράβδου

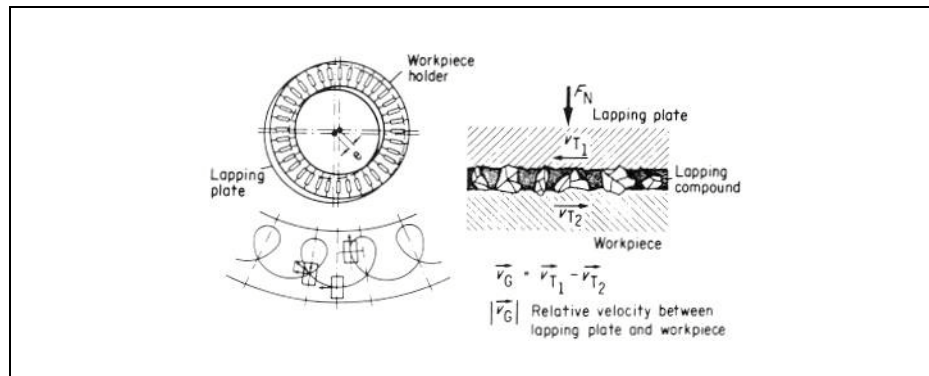
Σχήμα 3.44 Μέθοδοι Γυαλίσματος



Honing mandrel = Άξονας στήριξης εξαρτήματος γυαλίσματος

Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα
 Work table = Τράπεζα εργασίας

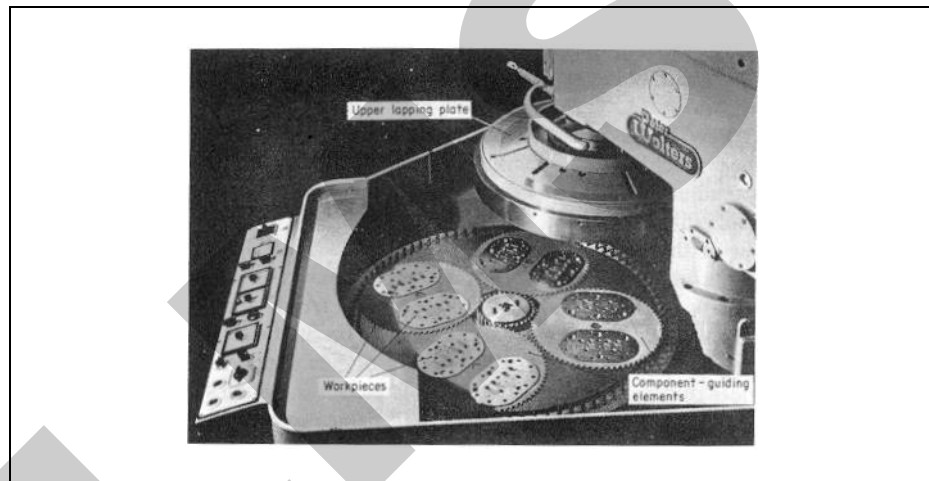
Σχήμα 3.45 Μηχανή Γυαλίσματος με Μεγάλη Διαδρομή



Lapping plate = Δίσκος λείανσης
Lapping compound = Λειαντικό Μίγμα
Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα

Workpiece holder = Συγκρατητής κατεργαζομένου εξαρτήματος
Relative velocity = Σχετική ταχύτητα

Σχήμα 3.46 Διεργασίες Λείανσης με Λειαντικό Μίγμα και η Σχετική Κίνηση μεταξύ των Πλακών Λείανσης



Upper lapping plate = Άνω δίσκος λείανσης
Workpieces = Κατεργαζόμενα εξαρτήματα

Component-guiding elements = Στοιχεία καθοδήγησης εξαρτημάτων (δηλαδή, κατεργαζομένων εξαρτημάτων)

Σχήμα 3.47 Η Περιοχή Εργασίας μιας Μηχανής Λείανσης με Λειαντικό Μίγμα Διπλής Πλάκας

Το γυάλισμα (honing) (Σχ. 3.44) και η λείανση με λειαντικό μίγμα (lapping) (Σχ. 3.46) είναι δυο διαδικασίες που επικεντρώνονται στην τελική επεξεργασία της επιφάνειας και της διαστασιακής ακρίβειας, αλλά δεν μπορούν να διορθώσουν διαστάσεις ή εκκεντρότητα. Οι διαδικασίες γυαλίσματος και λείανσης με λειαντικό μίγμα (Σχ. 3.45 και 3.47) πραγματοποιούνται σε ειδικά σχεδιασμένες μηχανές.

3.3 Σχεδιασμός Εργαλειομηχανών και Ανάλυση (Machine Tool Design and Analysis)

Ο σχεδιασμός των εργαλειομηχανών επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος των επεξεργαζόμενων εξαρτημάτων, την απαιτούμενη ακρίβεια, τον βαθμό αυτοματοποίησης, τις διαδικασίες συντήρησης, το επιτρεπόμενο κόστος κατασκευής και μια σειρά από παράγοντες σχετικούς με πιθανές ειδικές απαιτήσεις για τον τρόπο λειτουργίας της μηχανής από τον χρήστη της. Εφ' όσον οι εργαλειομηχανές έχουν σύνθετη ηλεκτρομηχανική κατασκευή που περιλαμβάνει πολλές αλληλοσυνδεδεμένες συσκευές, στον σχεδιασμό τους ακολουθούνται πλήθος κανόνων, που προέρχονται από την εφαρμοσμένη μηχανική έως την εργονομία. Αυτή η πολυπλοκότητα μαζί με τις απαιτήσεις της κινηματικής ακριβείας, της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς κ.λ.π. κάνει την διαδικασία σχεδιασμού της εργαλειομηχανής να βασίζεται σημαντικά στην εμπειρική γνώση και εξειδίκευση. Γενικά οι εργαλειομηχανές σχεδιάζονται για να ανταποκρίνονται σε μια ποικιλία συνθηκών εργασίας και μεγέθους του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος ενώ οι ειδικευμένες μηχανές –που χρησιμοποιούνται κυρίως στις σειριακές γραμμές παραγωγής– σχεδιάζονται με στόχο την αυξημένη αξιοπιστία παρά την ευελιξία.

Εξετάζοντας την ιστορική εξέλιξη του σχεδιασμού των εργαλειομηχανών και την αργή τους εξέλιξη, πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν δυο παράγοντες: Πρώτον οι μηχανές αυτές έχουν μεγάλο αρχικό κόστος επένδυσης και δεύτερον η παραγωγή και κατά συνέπεια τα έσοδα του τελικού χρήστη, εξαρτώνται από την σωστή λειτουργία της μηχανής. Ένα πειραματικό, μη δοκιμασμένο σχέδιο μηχανής έχει συνήθως μεγάλο ρίσκο στο να μην επιτευχθούν οι απαιτούμενες προδιαγραφές παραγωγικότητας. Αυτό ίσως εξηγεί τη συντηρητική συμπεριφορά των κατασκευαστών εργαλειομηχανών παγκοσμίως και την αδυναμία τους να παρουσιάσουν ριζοσπαστικές ιδέες στον σχεδιασμό των εργαλειομηχανών. Από την άλλη μεριά η έλλειψη μιας νέας προσέγγισης στο σχέδιο μιας εργαλειομηχανής μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος. Η σωστή αντιμετώπιση στην κατασκευή εργαλειομηχανών είναι να βρεθεί η ισορροπία ανάμεσα στις νέες ιδέες του μέλλοντος και στους επιτυχημένους σχεδιασμούς του παρελθόντος. Επί πλέον, εφ' όσον ο σχεδιασμός της εργαλειομηχανής επηρεάζει ουσιαστικά τις παραγωγικές δυνατότητες του χρήστη, υπάρχει ανάγκη για στενή συνεργασία μεταξύ του χρήστη και του κατασκευαστή της εργαλειομηχανής.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού δίδεται μια περιγραφή των θεμάτων όσον αφορά τον σχεδιασμό εργαλειομηχανών και ορισμένες αναλυτικές μεθόδους προσέγγισης, οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν ακριβείς λύσεις για τα προβλήματα του σχεδιασμού εργαλειομηχανών, αλλά περισσότερο για να δείξουν τις κατευθύνσεις και να δώσουν ένα γενικό πλαίσιο εργασίας για τη λύση τους. Η συζήτηση επικεντρώνεται σε τρία βασικά στοιχεία κάθε εργαλειομηχανής: στα *πλαίσια (Frames)*, τα οποία αποτελούν τον σκελετό που φέρει το φορτίο και στον οποίο τοποθετούνται τα διάφορα στοι-

χεία και συσκευές της μηχανής, στις *εδράσεις (Bearings)* και στους *οδηγούς (Guideways)* που κατευθύνουν την κίνηση των στοιχείων της μηχανής, στους κινητήρες και τα συστήματα μετάδοσης (*drives and transmissions*).

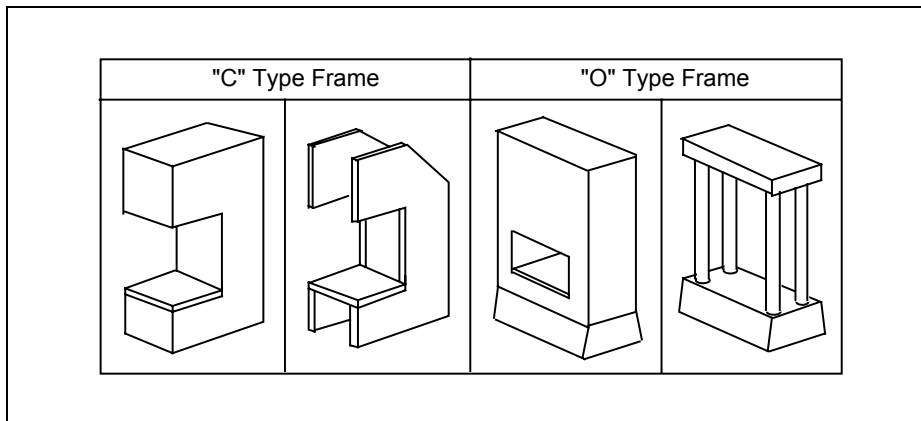
3.3.1 Πλαίσια (Frames)

Τα πλαίσια (frames) των εργαλειομηχανών είναι συνήθως κατασκευές που αποτελούνται από έναν αριθμό στοιχείων όπως *βάσεις στήριξης (baseplates)*, *δοκοί (columns)* και *τραβέρσες (crossbeams)* των οποίων το μέγεθος, το σχήμα και το υλικό εξαρτώνται βασικά από:

- τη θέση και το μήκος των κινούμενων αξόνων της μηχανής,
- τη κατεύθυνση και το μέγεθος των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία της μηχανής,
- τη δυνατότητα πρόσβασης και ασφάλειας του χώρου εργασίας, και
- τη δυνατότητα κατασκευής και το επιτρεπόμενο κόστος της μηχανής

Χάλυβας, χυτοσίδηρος, αλουμίνιο, χαλκός, ορείχαλκος, τιτάνιο, τσιμέντο και *σύνθετα υλικά* χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πλαισίων των εργαλειομηχανών. Προκειμένου να καθορισθεί το σχήμα και το σχέδιο ενός πλαισίου εργαλειομηχανής γίνεται συμβιβασμός μεταξύ διαφορετικών παραγόντων. Αν, για παράδειγμα, η πρόσβαση στον εργασιακό χώρο είναι σημαντικός παράγοντας, τότε ένα πλαίσιο μορφής C είναι προτιμότερο από ένα πλαίσιο μορφής O (Σχ. 3.48). Ένα πλαίσιο μορφής O έχει καλύτερη στιβαρότητα, περιορίζει όμως την πρόσβαση στον χώρο εργασίας. Προκειμένου η απομάκρυνση των αποβλήτων να είναι ευκολότερη κατά την διάρκεια των διεργασιών με τόρνο, ενδείκνυται μια επικλινή τράπεζα (Σχ. 3.49) στην περίπτωση ενός τόρνου CNC.

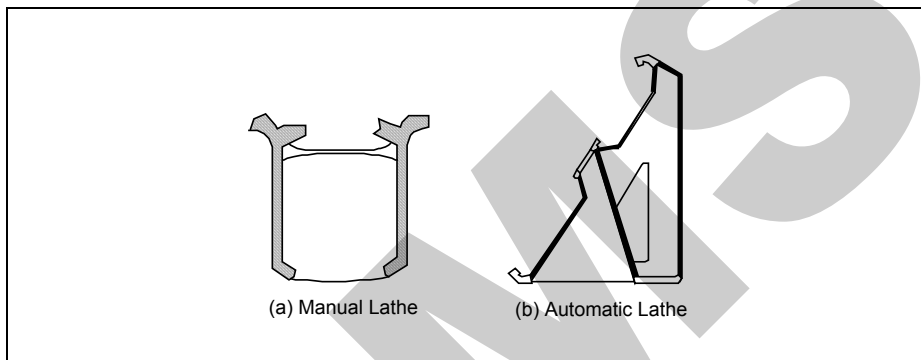
Στην επιλογή υλικών, σχημάτων και μεγεθών των διαφορετικών στοιχείων του πλαισίου, ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπ' όψιν του ότι ο στόχος είναι η μείωση των ανεπιθύμητων μετατοπίσεων μεταξύ εργαλείου και επεξεργαζόμενου εξαρτήματος κατά την μηχανουργική κατεργασία. Το πλαίσιο της μηχανής καταπονείται από χρονικά μεταβαλλόμενες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να μετακινήσουν το κατεργαζόμενο εξάρτημα σε σχέση με το εργαλείο. Αυτή η μετακίνηση έχει ανεπιθύμητη επίδραση στην ακρίβεια του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος. Στη συνέχεια, θα συζητηθεί περιληπτικά η συμπεριφορά του πλαισίου της μηχανής κάτω από στατικά, δυναμικά και θερμικά φορτία προκειμένου να κατανοήσουμε ορισμένες από τις λύσεις που εφαρμόζονται στο σχεδιασμό των εργαλειομηχανών. Πρέπει όμως να ληφθεί υπ' όψη ότι οι αναλυτικές προσεγγίσεις του περιγράφονται παρακάτω δίνουν την μόνο τάξη μεγέθους και όχι ακριβείς λύσεις σε πολλά προβλήματα σχεδιασμού πλαισίων εργαλειομηχανών, αφού οι σύνδεσμοι που συνδέουν τα διάφορα στοιχεία της εργαλειομηχανής εισάγουν πολλές μη γραμμικότητες στο πλαίσιο της, που καθιστούν αδύνατη την επίλυση των προβλημάτων αυτών με αναλυτικές μεθόδους.



Type = Τύπος

Frame = Πλαίσιο

Σχήμα 3.48 Τύποι "O" και "C" των Πλαισίων των Εργαλειομηχανών



Lathe = Τόρνος

Manual = Χειροκίνητος

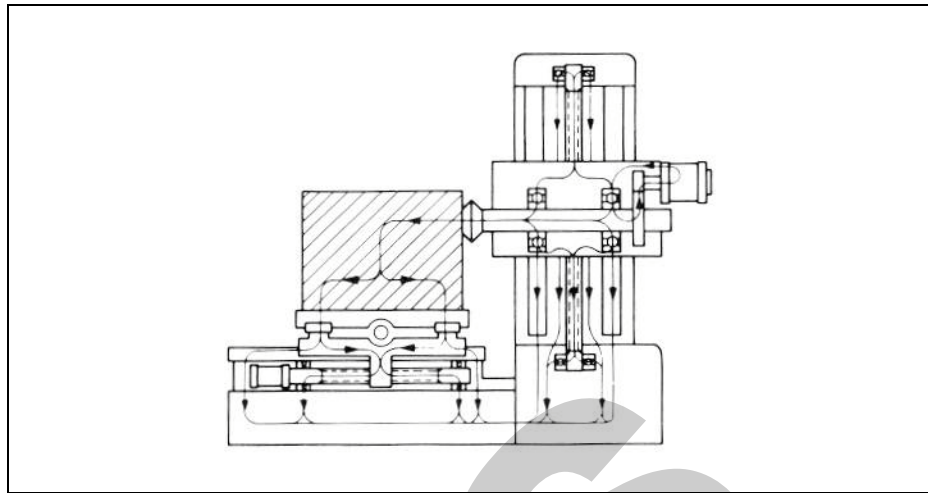
Automatic = Αυτόματος

Σχήμα 3.49 Κατασκευές για τη Βάση ενός α) Χειροκίνητου και β) Αυτόματου Τόρνου

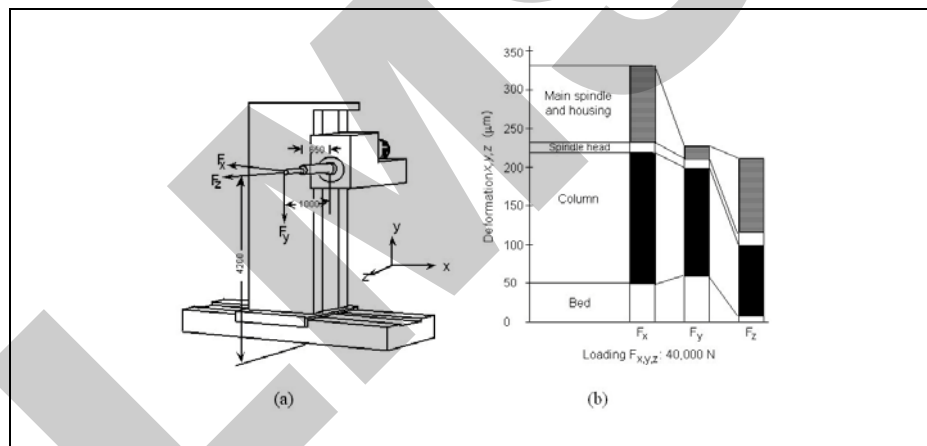
**Στατική συμπεριφορά
(Static Behavior)**

Η ανάλυση της καταπόνησης μιας εργαλειομηχανής από τα φορτία που δέχεται, ξεκινά συνήθως με την ανάλυση της κατανομής των δυνάμεων στη μηχανή (Σχ. 3.50). Οι δυνάμεις που ασκούνται στο επεξεργαζόμενο εξάρτημα από το εργαλείο, μεταβιβάζονται στην τράπεζα, ύστερα στις γλίστρες και τελικά

στη βάση της εργαλειομηχανής. Οι δυνάμεις που ασκούνται μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις [3] στα διάφορα μέρη της μηχανής (Σχ. 3.51).



Σχήμα 3.50 Διάγραμμα των Δυνάμεων που ασκούνται σε μια Οριζόντια Φρέζα



Main spindle and housing = Κύρια άτρακτος και κλωβός
Column = Στήλη

Bed = Υπόβαθρο (π.χ., στήριξης τραπέζης)
Deformation = Παραμόρφωση
Loading = Φόρτιση (καταπόνηση)

Σχήμα 3.51 Δυνάμεις και παραμορφώσεις σε μια Οριζόντια Φρέζα

Κάθε πλαίσιο εργαλειομηχανής παραμορφώνεται ως ένα βαθμό υπό την πίεση στατικών φορτίων με την δυσκαμψία της μηχανής να είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος των αναμενόμενων παραμορφώσεων. Τα συνηθέστερα φορτία που συναντώνται στις εργαλειομηχανές είναι η κάμψη (bending) και η στρέψη

(torsion). Η αντοχή στην κάμψη σχετίζεται με τη ροπή αδρανείας ως προς τον ουδέτερο άξονα, ενώ η αντοχή σε στρέψη σχετίζεται [4] με την πολική ροπή αδρανείας. Οι δεύτερες ροπές επιφανείας για ένα μοντέλο ορθογώνιας ράβδου (Σχ. 3.52α) καθορίζονται ως:

$$J_x = \int_A y^2 dA \quad (3-1)$$

και

$$J_y = \int_A x^2 dA \quad (3-2)$$

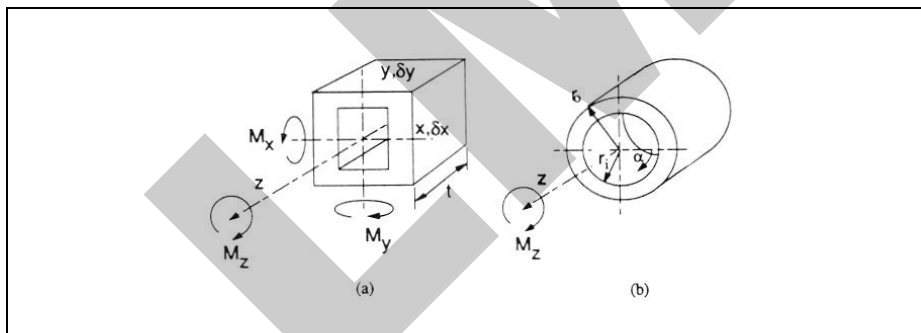
Τα βέλη κάμψης δx και δy ($z = t$) στις διευθύνσεις x και y που προκύπτουν από την καμπτική ροπή που εφαρμόζεται, ευρίσκονται από τις παρακάτω εξισώσεις [4]:

$$\delta x_{(z=t)} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{M_y}{EJ_x} dz dz \quad (3-3)$$

και

$$\delta y_{(z=t)} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{M_x}{EJ_x} dz dz \quad (3-4)$$

Όπου E το μέτρο της ελαστικότητας και
 M η ροπή που εφαρμόζεται στη ράβδο.



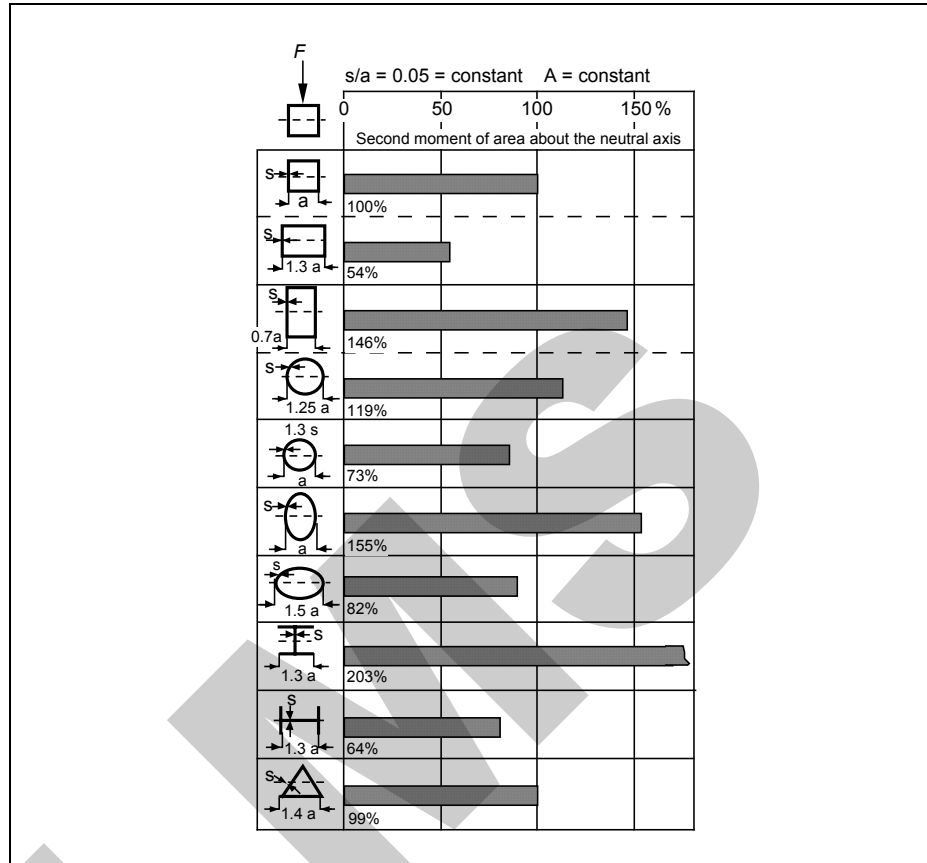
Σχήμα 3.52 Ορθογώνια (α) και Κυλινδρικά (β) Μοντέλα Δοκών

Η πολική ροπή επιφανείας για μια κυλινδρική δοκό [4] καθορίζεται ως (Σχ. 3.52b):

$$J_T = \frac{\pi r_0^4}{2} \left(1 - \frac{r_1^4}{r_0^4} \right) \quad (3-5)$$

Η γωνία στρέψης που προκύπτει από μια στρεπτική ροπή M_z είναι τότε [4]:

$$\alpha_{(z=t)} = \int_0^t \frac{M_z}{EJ_T} dz \quad (3-6)$$

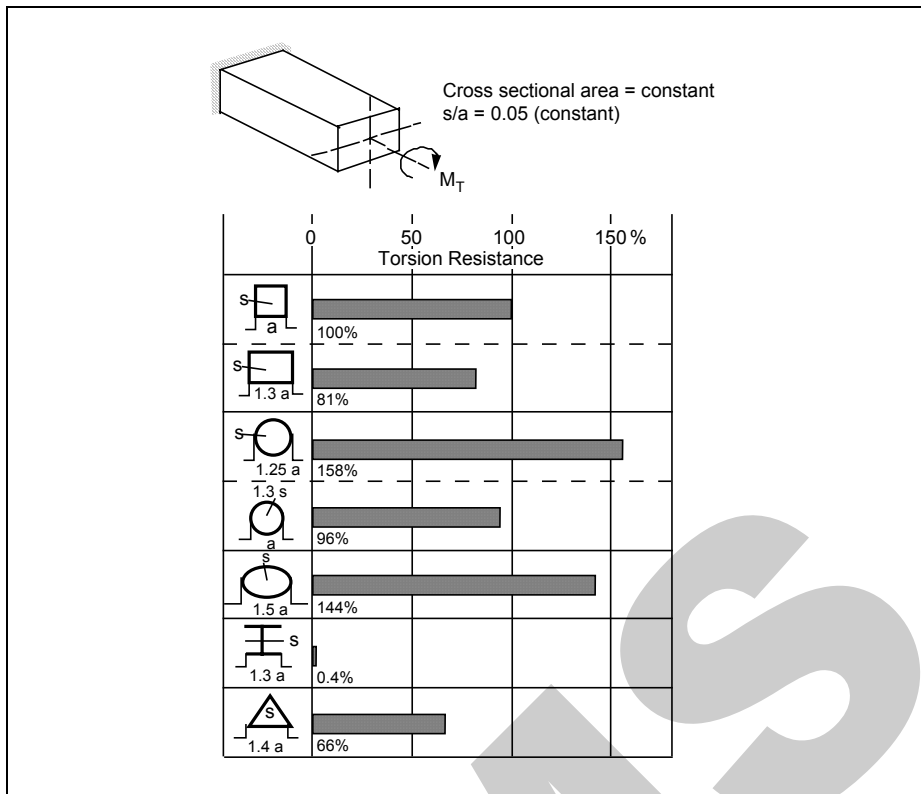


Second moment of area = Δεύτερη ροπή επιφανείας (ροπή αδράνειας)
About = Περί (ως προς)

Neutral axis = Ουδέτερος άξονας
Constant = Σταθερά

Σχήμα 3.53 Δεύτερη Ροπή Επιφανείας (Ροπή Αδράνειας) για Διαφορετικές Διατομές

Η ροπή αδράνειας (Σχ. 3.53) και η πολική ροπή επιφανείας (Σχ. 3.54) εξαρτώνται από τη διατομή της δοκού. Εφ' όσον τα πλαίσια των εργαλειομηχανών εκτίθενται και σε καμπτικά και σε στρεπτικά φορτία, μια μέθοδος για να επιτευχθεί η απαιτούμενη δυσκαμψία των στοιχείων του πλαισίου, χωρίς σημαντική αύξηση του βάρους της κατασκευής είναι να προστεθούν νεύρα δυσκαμψίας (Σχ. 3.55). Εντούτοις τα νεύρα δυσκαμψίας αυξάνουν το κόστος της μηχανής και θα πρέπει να εφαρμόζονται με μέτρο [3].

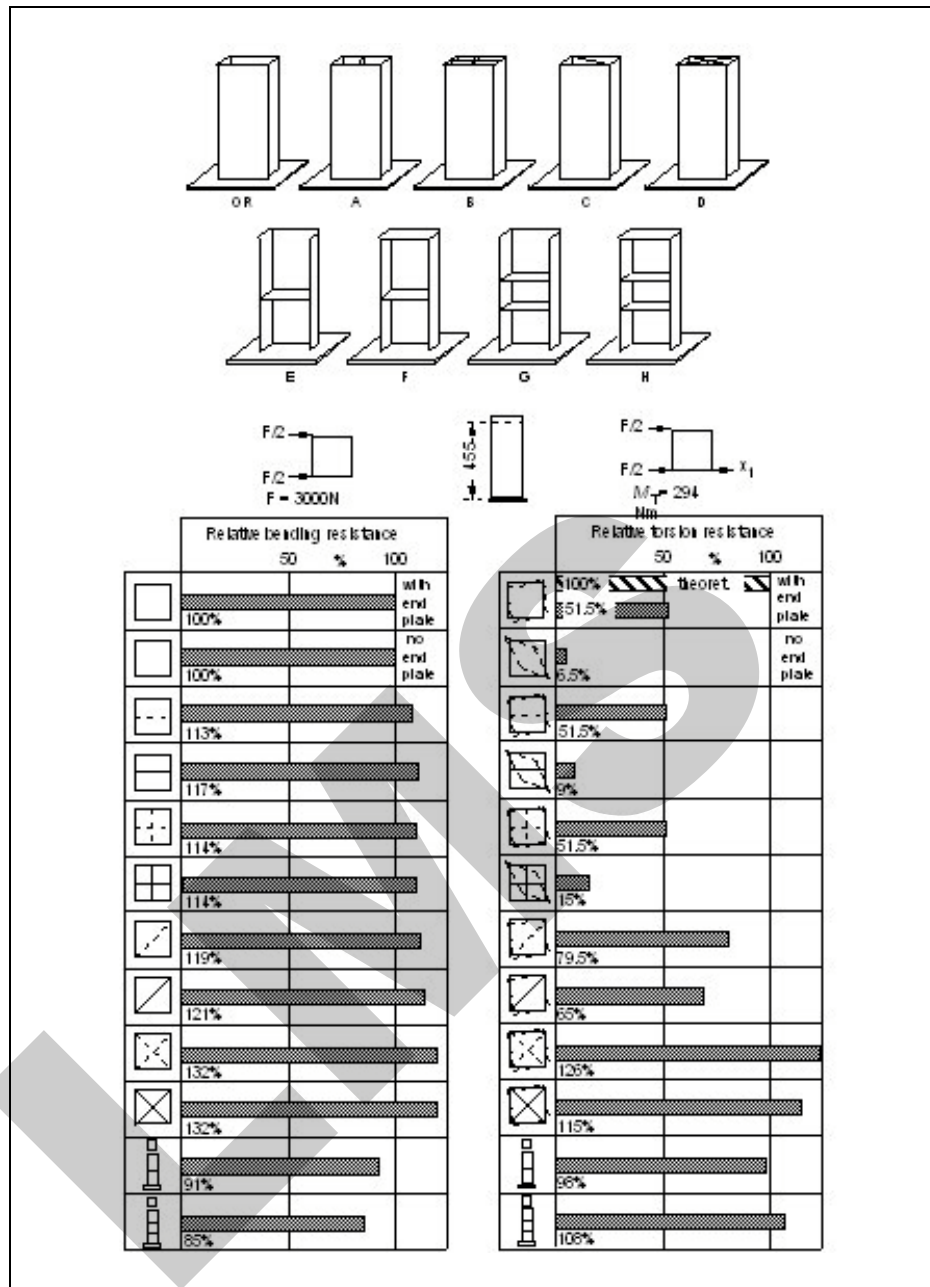


Cross sectional area = Διατομή
Constant = Σταθερά

Torsion resistance = Αντίσταση σε στρέψη

Σχήμα 3.54 Πολική Ροπή Επιφανείας (Πολική Ροπή Αδρανείας) για Διαφορετικές Διατομές

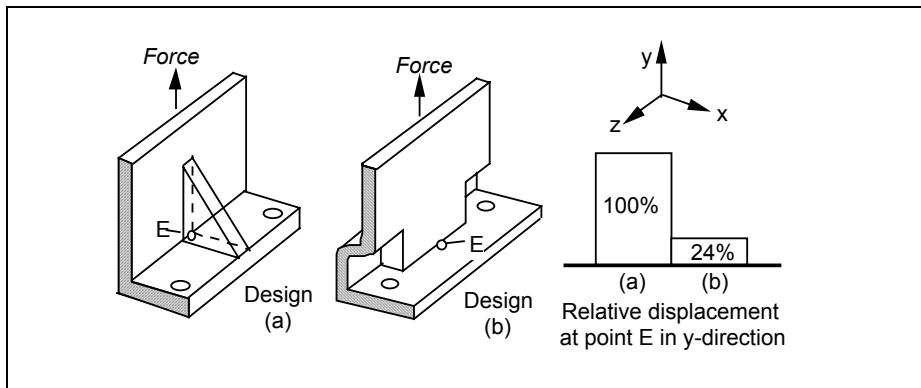
Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για τη σύνδεση των στοιχείων μιας εργαλειομηχανής επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοσή της. Τα δυναμικά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία της μηχανής μεταφέρονται διαμέσου των αρθρώσεων στα διάφορα μέρη της. Οι παραμορφώσεις των σημείων σύνδεσης μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την ακρίβεια και την ποιότητα της επιφάνειας των εξαρτημάτων που παράγει η μηχανή. Επειδή στα σημεία σύνδεσης οφείλεται μέχρι και το 90% της ολικής παραμόρφωσης των εργαλειομηχανών, ο σκοπός του σχεδιαστή είναι να μεγιστοποιηθεί η δυσκαμψία των σημείων σύνδεσης (Σχ. 3.56). Καθώς οι μετατοπίσεις των σημείων σύνδεσης χαρακτηρίζονται από μη γραμμική συμπεριφορά είναι γενικά δύσκολο να αναλυθούν.



Relative bending resistance = Σχετική καμπτική αντίσταση
 Relative bending resistance = Σχετική στρεπτική αντίσταση

Theoretic = Θεωρητική
 With end plate = Με τελική πλάκα
 No end plate = Χωρίς τελική πλάκα

Σχήμα 3.55 Νεύρα Δυσκαμψίας για Εργαλειομηχανές



Relative displacement at point E in y-direction = Σχετική μετατόπιση του σημείου E κατά την διεύθυνση y

Force = Δύναμη
Design = Σχεδιάγραμμα (σχέδιο)

Σχήμα 3.56 Σύγκριση Δυσκαμψίας δύο Διαφορετικών Συνδέσμων

Αριθμητικές μέθοδοι, όπως η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (FEA), χρησιμοποιούνται συνήθως στην ανάλυση των πλαισίων των εργαλειομηχανών. Το πρώτο βήμα στην εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων είναι να προσεγγίσουμε τη γεωμετρία της δομής χρησιμοποιώντας στοιχεία που έχουν απλά όρια και εύκολα προσδιοριζόμενες διαστάσεις (Σχ. 3.57). Τα αναμενόμενα σημεία δομικών παραμορφώσεων θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά τη διάρκεια αυτής της γεωμετρικής προσέγγισης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία των πλαισίων των εργαλειομηχανών (Σχ. 3.58). Όταν ένα γεωμετρικό μοντέλο της εργαλειομηχανής ολοκληρωθεί, αναπτύσσεται ένα διακριτό μαθηματικό μοντέλο που συνδέει τις παραμορφώσεις της εργαλειομηχανής με τα εφαρμοσμένα εξωτερικά φορτία. Αυτές οι εξισώσεις βασίζονται στο νόμο του Hooke.

$$\{F\} = [K]\{U\} \tag{3-7}$$

Σ' αυτή τη σχέση, το $\{F\}$ είναι το διάνυσμα που περιλαμβάνει τις ασκούμενες δυνάμεις και ροπές, το $[K]$ είναι το μητρώο δυσκαμψίας, και $\{U\}$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης. Για να καταλάβουμε το πως τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των εργαλειομηχανών, θα περιγραφεί εν συντομία ο τρόπος που συμπληρώνεται το μητρώο δυσκαμψίας για μία απλή ράβδο (Σχ. 3.59). Η συμπεριφορά παραμόρφωσης ανάμεσα σε δυο κόμβους της ράβδου εκφράζεται με μια γραμμική πολυωνυμική εξίσωση:

$$u_x(x) = a_0 + a_1x \tag{3-8}$$

Από τη μετατόπιση των κόμβων μπορεί να καθορισθεί η μετατόπιση της ράβδου σε κάθε θέση σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$u_x = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{L} & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix} \quad (3-9)$$

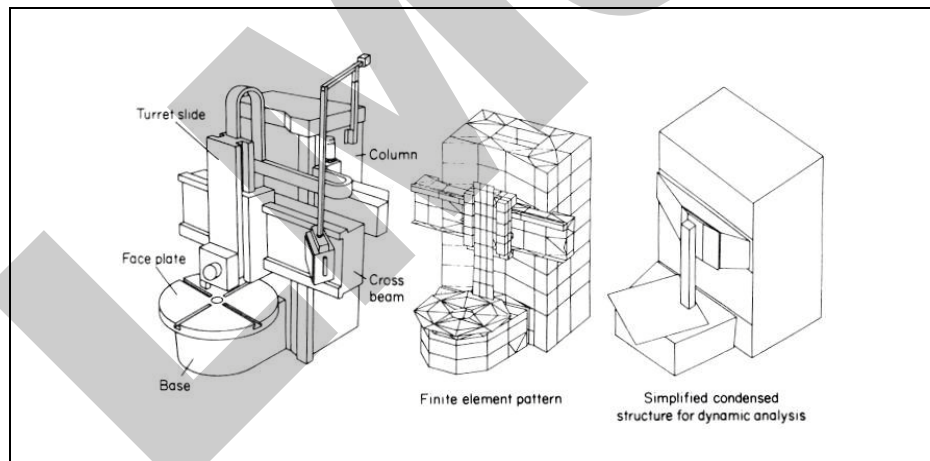
Η παραμόρφωση του στοιχείου μπορεί να προσδιορισθεί με τη μερική διαφορά της σχέσης μετατόπισης, που στην περίπτωση του περιγραφόμενου στοιχείου δίδει την ακόλουθη σχέση:

$$\varepsilon_x = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix} = [b]^T \{U\} \quad (3-10)$$

Υποθέτοντας, ότι η μετατόπιση είναι ελαστική, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης ($\sigma - \varepsilon$) περιγράφεται από τον νόμο του Hooke.

$$\{\sigma\} = [H]\{\varepsilon\} \quad (3-11)$$

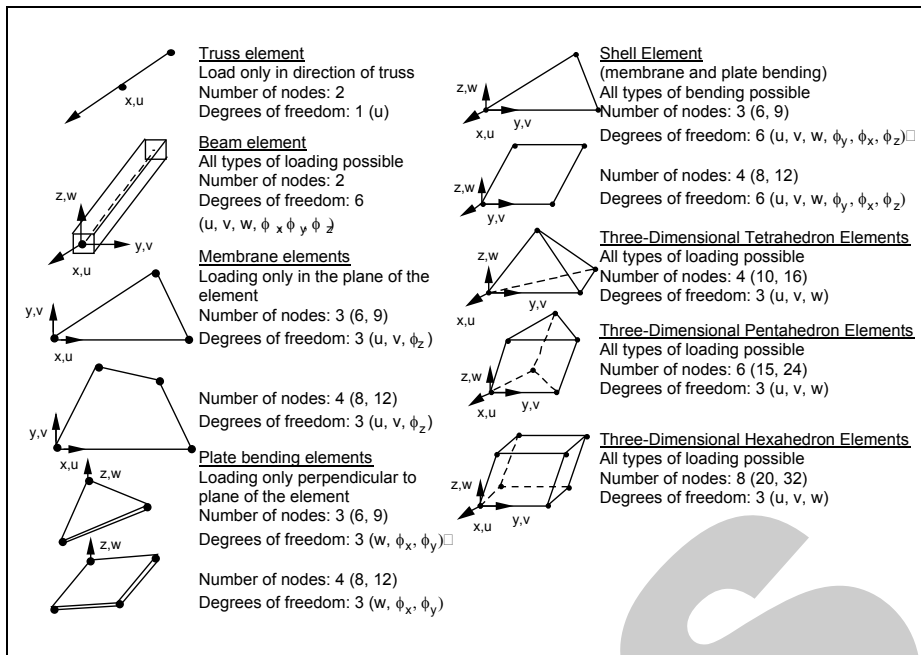
όπου $[H]$ είναι το μέτρο του μητρώου ελαστικότητας. Επομένως το μητρώο δυσκαμψίας προσδιορίζεται από την αρχή των δυνατών έργων, που υποδηλώνει ότι το εξωτερικό έργο, δW_a (το γινόμενο του εξωτερικού φορτίου F και της πραγματικής μετατόπισης U) ισοδυναμεί με το εσωτερικό έργο, δW_i , που προκύπτει από τα φορτία και την πραγματική παραμόρφωση. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3-10) και (3-11) προκύπτει το παρακάτω ολοκλήρωμα για το εξωτερικό έργο:



Turret slide = Ολισθητήρας (γλίστρα) πυργίσκου
Face plate = Σφιγκτήρας (τσοκ) φρέζας
Base = Βάση
Cross beam = Εγκάρσια δοκός
Column = Στήλη

Finite element pattern = Πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων
Simplified condensed structure for dynamic analysis = Απλοποιημένη συμπαγής μορφή για δυναμική ανάλυση

Σχήμα 3.57 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων για μια Φρέζα



Truss element = Στοιχείο (ράβδος) πλαισίου
 Beam element = Στοιχείο δοκού
 Membrane elements = Στοιχεία μεμβράνης
 Plate bending elements = Επίπεδα καμπτικά στοιχεία
 Shell element = Στοιχείο κελύφους
 Three-dimensional tetrahedron elements = Στοιχεία τρισδιάστατου τετραέδρου
 Three-dimensional pentahedron elements = Στοιχεία τρισδιάστατου πενταέδρου
 Three-dimensional hexahedron elements = Στοιχεία τρισδιάστατου εξαέδρου

Load only in direction of truss = Φόρτιση μόνο κατά την διεύθυνση της ράβδου
 Loading only in the plane of the element = Φόρτιση μόνο στο επίπεδο (επιφάνεια) του στοιχείου
 Loading only perpendicular to plane of the element = Φόρτιση μόνο κάθετα στο επίπεδο (επιφάνεια) του στοιχείου
 All types of loading possible = Όλοι οι τύποι φόρτισης είναι δυνατοί
 All types of bending possible = Όλοι οι τύποι κάμψης είναι δυνατοί
 Number of nodes = Αριθμός κόμβων
 Degrees of freedom = Βαθμοί ελευθερίας

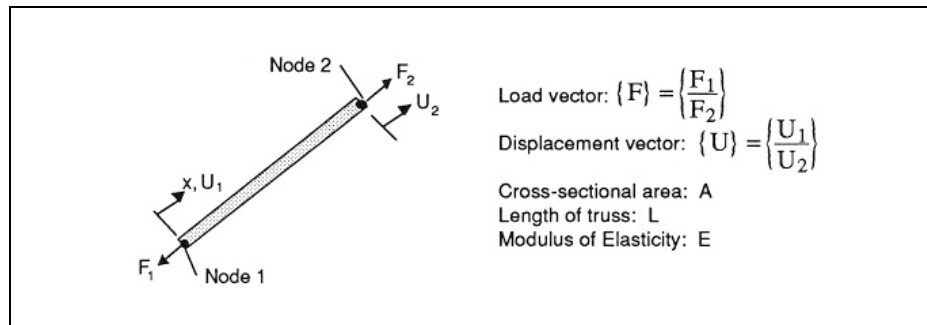
Σχήμα 3.58 Γεωμετρικά Στοιχεία για Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

$$\delta W_a = \delta \{U\}^T \{F\} = \delta W_i = \int \delta \{U\}^T [b]^T [H][b] \{U\} dV \quad (3-12)$$

Από την εξίσωση (3-12) προκύπτει, ότι το μητρώο δυσκαμψίας $[K]$ για το στοιχείο αυτό είναι:

$$[K] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

όπου A , η διατομή της επιφάνειας.



Node = Κόμβος

Load vector = Διάνυσμα φορτίου

Displacement vector = Διάνυσμα μετατόπισης

Cross-sectional area = Επιφάνεια διατομής

Length of truss = Μήκος ράβδου

Modulus of Elasticity = Μέτρο ελαστικότητας

Σχήμα 3.59 Ανάλυση Δοκού με Πεπερασμένα Στοιχεία

Η Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (FEA) αποτελεί ένα ισχυρό και ευρέως διαδεδομένο εργαλείο για σχεδιασμό μηχανών. Η μέθοδος είναι και εμπορικά διαθέσιμη σε μορφή λογισμικού για υπολογιστές. Μια πλήρης προσέγγιση του λογισμικού, πακέτα FEA και το θεωρητικό τους υπόβαθρο δίδονται στην αναφορά [5].

Δυναμική Συμπεριφορά (Dynamic Behavior)

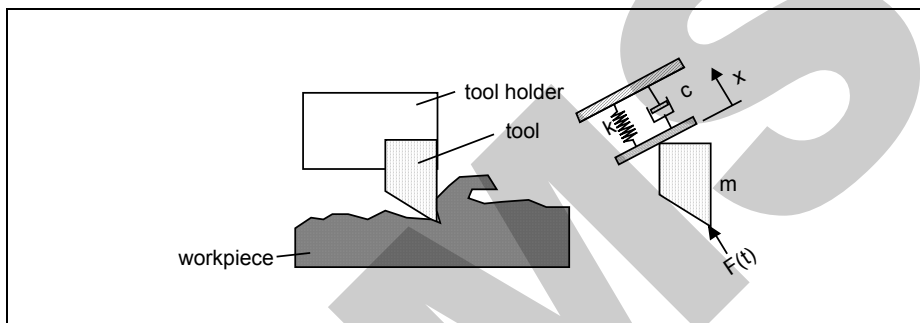
Οι μηχανές, τα εργαλεία και τα επεξεργαζόμενα εξαρτήματα αποτελούν ένα σύστημα, το οποίο παρουσιάζει περίπλοκα δυναμικά χαρακτηριστικά. Εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεταξύ της διαδικασίας κοπής ή διαμόρφωσης και της δομής των εργαλειομηχανών παρουσιάζονται ταλαντώσεις διαφόρων ειδών. Οι ταλαντώσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν [6]:

- *Ελεύθερες ή μεταβατικές ταλαντώσεις (Free or transient vibrations)* που προκύπτουν από τους περιοδικούς παλμούς οι οποίοι μεταφέρονται στην κατασκευή της εργαλειομηχανής από τις ταχείες αντιστροφές των παλινδρομούμενων μαζών (όπως οι τράπεζες των μηχανών), ή από την αρχική εμπλοκή των εργαλείων με το εξάρτημα. Η κατασκευή παραμορφώνεται και ταλαντεύεται στις φυσικές ιδιομορφές της έως ότου η απόσβεση της κατασκευής να προκαλέσει την ελάττωση των ταλαντώσεων.
- *Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις (Forced vibrations)* που προκύπτουν από τις περιοδικές δυνάμεις που εμφανίζονται μέσα στο σύστημα, όπως οι αζυγοστάθμητες περιστρεφόμενες μάζες ή η περιοδική εμπλοκή των πολλαπλών κοπτικών εργαλείων με το εξάρτημα (milling). Οι εξαναγκασμένες ταλαντώσεις δημιουργούνται επίσης από ταλαντώσεις που μεταφέρονται μέσω των θεμελίων από γειτονικές μηχανές. Οι εργα-

λειομηχανές ταλαντώνονται στην συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης και εάν αυτή η συχνότητα συμπίπτει με μια από τις φυσικές συχνότητες της μηχανής, η μηχανή θα συντονισθεί.

- *Αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις (Self-excited vibrations)* που συνήθως προκύπτουν από τη δυναμική αστάθεια των διαδικασιών. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται συχνά ως *chatter* των εργαλειομηχανών και η κατασκευή θα ταλαντεύεται σε μια από τις ιδιοσυχνότητές της.

Ο περιορισμός των ταλαντώσεων της εργαλειομηχανής είναι σημαντικό θέμα, εφ' όσον οι ταλαντώσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα το μη ικανοποιητικό φινίρισμα των επιφανειών, τις ζημιές στα εργαλεία, τον ανεπιθύμητο θόρυβο και την κόπωση των εξαρτημάτων των μηχανών. Ενώ οι αιτίες και οι μέθοδοι ελέγχου των ελεύθερων ή εξαναγκασμένων ταλαντώσεων είναι γενικά κατανοητές και είναι δυνατόν να αποφευχθούν, είναι πιο δύσκολο να ελεγχθούν τα φαινόμενα της «αυτοδιέγερσης του κοπτικού εργαλείου (chatter).



Tool = Εργαλείο

Tool holder = Εργαλειοδέτης

Workpiece = Κατεργαζόμενο εξάρτημα

Σχήμα 3.60 Σύστημα Αποσβεστήρα–Ελατηρίου που χρησιμοποιείται για τη Μο-
ντελοποίηση Ταλαντώσεων Κοπτικού Εργαλείου

Η δυναμική ενός απλού ταλαντωτή μάζας που περιλαμβάνει τη μάζα (mass), το ελατήριο (spring) και το σύστημα απόσβεσης (damper system) θα συζητηθούν συνοπτικά προκειμένου να παρουσιασθούν οι επιδράσεις των σχεδιαστικών παραμέτρων όπως η μάζα, η στιβαρότητα, και η απόσβεση στην δυναμική απόκριση του συστήματος (Σχ. 3.60).

Η απόκριση ενός δυναμικού συστήματος είναι το άθροισμα της μεταβατικής (ελεύθερης) απόκρισης $x(t)_{trans}$ συν την απόκριση εξ αιτίας μιας εξωτερικής διέγερσης (external excitation) $x(t)_{forced}$ (εξαναγκασμένη απόκριση).

$$x(t) = x(t)_{trans} + x(t)_{forced} \quad (3-14)$$

Για ένα σύστημα με ένα βαθμό ελευθερίας (Σχ. 3.60) η εξίσωση της κίνησης είναι [7]:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3-15)$$

όπου m είναι η μάζα, c ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης (viscous damping coefficient), k η δυσκαμψία του ελατηρίου (spring stiffness) και $F(t)$ η εξίσωση της δύναμης συναρτήσει του χρόνου.

Ελεύθερη Απόκριση

Η ελεύθερη απόκριση δίδεται από την εξίσωση:

$$\ddot{x}(t) + \frac{c}{m}\dot{x}(t) + \frac{k}{m}x(t) = 0 \quad (3-16)$$

Εισάγοντας τον αδιάστατο βαθμό ιξώδους απόσβεσης,

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3-17)$$

και την φυσική συχνότητα του συστήματος που δίδεται από την:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (3-18)$$

η εξίσωση (3-16) μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = 0 \quad (3-19)$$

Η τυπική μέθοδος επίλυσης της εξίσωσης (3-19) χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό Laplace, όπου υποθέτουμε μια λύση της ακόλουθης μορφής:

$$x(t) = Ae^{st} \quad (3-20)$$

όπου η s είναι μιγαδική μεταβλητή η οποία προσδιορίζει το μετασχηματισμό Laplace. Με τη βοήθεια της εξίσωσης (3-20), η (3-19) γίνεται:

$$Ae^{st}[s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2] = 0 \quad (3-21)$$

Από την εξίσωση (3-21) η μεταβλητή s προσδιορίζεται ως:

$$s_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \quad (3-22)$$

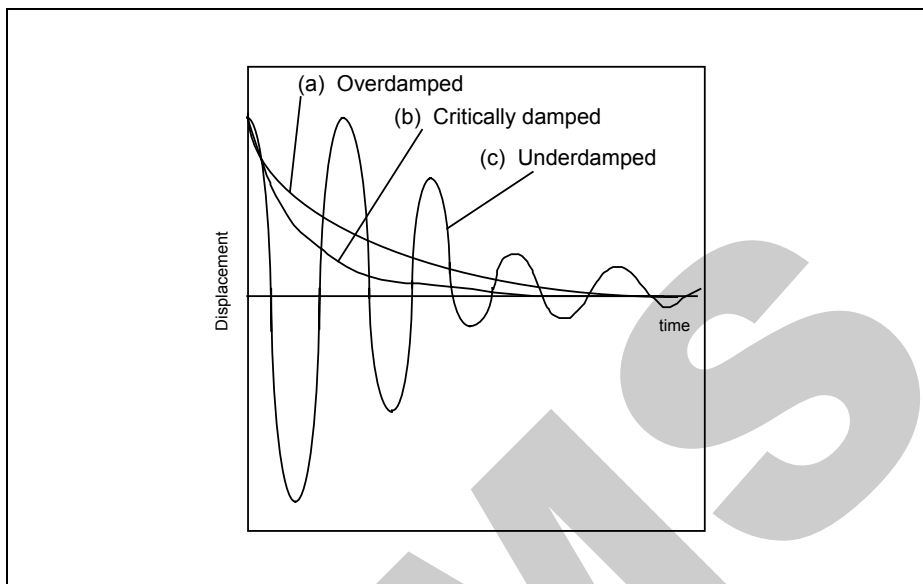
Υπάρχουν τρεις δυνατότητες για την τιμή του ζ [7,8]:

1. $\zeta > 1$, το σύστημα έχει πραγματικές ρίζες και είναι υπεραποσβενήμενο (Σχ. 3.61α):

$$x(t)_{trans} = (c_1 e^{\omega_d t} + c_2 e^{-\omega_d t}) e^{-\zeta \omega_n t} \quad (3-23)$$

όπου c_1 και c_2 είναι άγνωστοι συντελεστές, οι οποίοι καθορίζονται από τις συνοριακές συνθήκες και όπου ω_d είναι η συχνότητα των ελεύθερων αποσβεσμένων ταλαντώσεων που δίδονται από την σχέση:

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n \quad (3-24)$$



Overdamped = Υπεραποσβεσμένο (υπεραπόσβεση)
Critically damped = Κρίσιμα αποσβεσμένο (κρίσιμη απόσβεση)

Underdamped = Υποαποσβεσμένο (υποαπόσβεση)
Displacement = Μετατόπιση
Time = Χρόνος

Σχήμα 3.61 Μεταβατική Απόκριση ενός α) Υπεραποσβεσμένου, β) Οριακά αποσβεσμένου και γ) Υποαποσβεσμένου Απλού Ταλαντωτή Μάζας

2. $\zeta = 1$, το σύστημα έχει δύο ίδιες ρίζες και είναι κρίσιμα αποσβεσμένο (Σχ. 3.61β):

$$x(t)_{trans} = (c_1 + c_2 t) e^{-\omega_n t} \quad (3-25)$$

3. $\zeta < 1$, το σύστημα έχει μη πραγματικές ρίζες και είναι υποαποσβεσμένο (Σχ.3.61γ):

$$x(t)_{trans} = A e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_d t - \psi) \quad (3-26)$$

όπου ψ είναι η γωνία φάσης.

Εξαναγκασμένη Απόκριση (Forced Response)

Η εξαναγκασμένη απόκριση ενός συστήματος περιγράφει την κίνηση ενός απλού ταλαντωτή μάζας υπό ένα συγκεκριμένο τύπο φορτίου. Οι πιο κοινοί τύποι φορτίων που περιλαμβάνονται στις εργαλειομηχανές είναι οι παλμοί, η βηματική συνάρτηση φορτίων και τα περιοδικά ή αρμονικά φορτία (Σχ. 3.62). Οι δυο πρώτοι τύποι φορτίων αντιστοιχούν συνήθως στην εμπλοκή των εργαλείων με το εξάρτημα, όπου παρουσιάζεται μια ξαφνική αύξηση των δυνάμεων και η κατασκευή ταλαντώνεται στη φυσική της ιδιομορφή, έως ότου η κίνηση μειωθεί από την υπάρχουσα απόσβεση.

Ο μοναδιαίος παλμός είναι ένας παλμός με μια απειροελάχιστη χρονική διάρκεια που έχει καθαρό εμβαδόν ίσο με τη μονάδα. Πρακτικά μια είσοδος με μια πολύ μικρή διάρκεια μπορεί να θεωρηθεί ως ένας παλμός [7]. Ο μοναδιαίος παλμός απόκρισης ενός απλού ταλαντωτή μάζας δίδεται πιο κάτω (Σχ. 3.63) [7].

Για $\zeta < 1$,

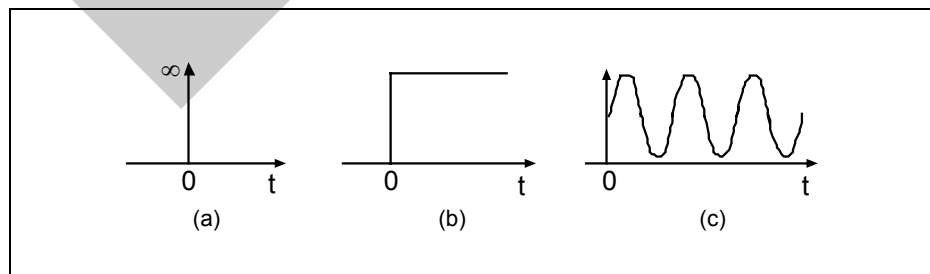
$$x(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} (\omega_n t \sqrt{1-\zeta^2}) \quad (t \geq 0) \quad (3-27)$$

Για $\zeta = 1$,

$$x(t) = \omega_n^2 t e^{-\omega_n t} \quad (t \geq 0) \quad (3-28)$$

Για $\zeta > 1$,

$$x(t) = \frac{\omega_n}{2\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} - \frac{\omega_n}{2\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} \quad (t \geq 0) \quad (3-29)$$



Σχήμα 3.62 α) Μοναδιαίος Παλμός, β) Βηματική Είσοδος, γ) Περιοδική Είσοδος

Η βηματική απόκριση (Σχ. 3.64) του απλού ταλαντωτή μάζας είναι:

Για $\zeta < 1$,

$$x(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left[\omega_d t + \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \quad (3-30)$$

$$(t \geq 0)$$

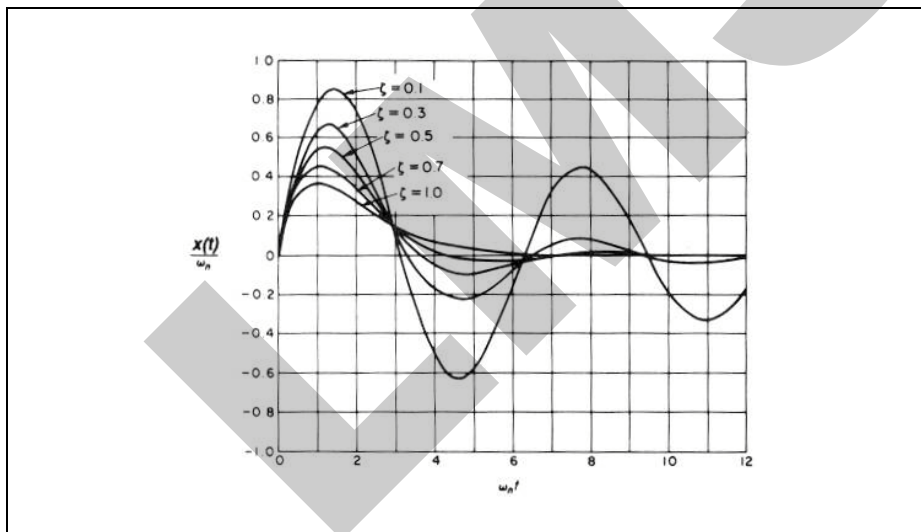
Για $\zeta = 1$,

$$x(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 - \omega_n t) \quad (t \geq 0) \quad (3-31)$$

Για $\zeta > 1$,

$$x(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} \left(\frac{e^{s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{s_2 t}}{s_2} \right) \quad (t \geq 0) \quad (3-32)$$

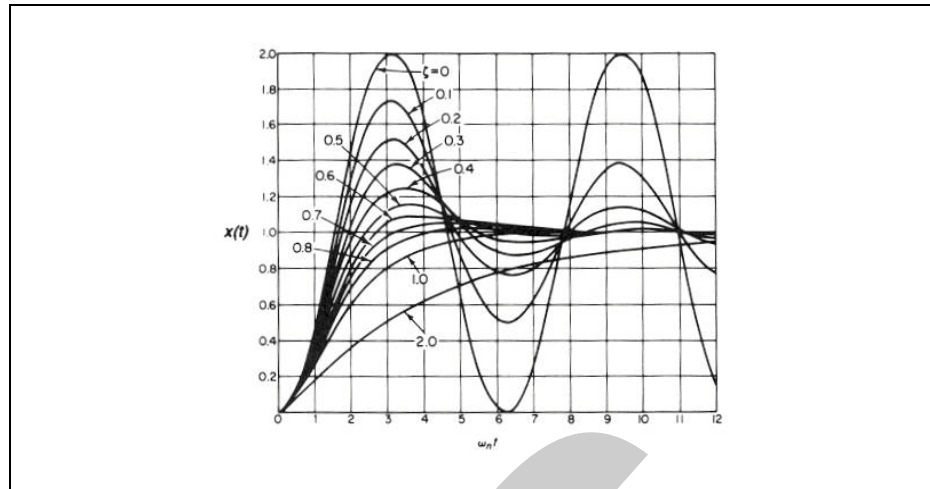
όπου $s_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$ και $s_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$.



Σχήμα 3.63 Καμπύλες Απόκρισης Μοναδιαίων Παλμών [7]

Κατά τον σχεδιασμό των εργαλειομηχανών, η ταλάντωση των εργαλείων θα πρέπει να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα έπειτα από την εμφάνιση ενός παλμού. Στην περίπτωση της κρίσιμης απόσβεσης $\zeta = 1$, ελαχιστοποιούνται οι επιβλαβείς επιδράσεις των ταλαντώσεων, ενώ το σύστημα επι-

στρέφει σε συνθήκες ισορροπίας χωρίς υπερβάσεις ή ταλαντώσεις.



Σχήμα 3.64 Καμπύλες Μοναδιαίας Βηματικής Απόκρισης [7]

Η περιστροφή των εργαλείων και η παλινδρόμηση διαφόρων μαζών κατά την διάρκεια των μηχανουργικών διαδικασιών μπορεί να προκαλέσουν δυναμικές αστάθειες που οφείλονται στη περιοδική φύση της διέγερσης. Αυτός ο τύπος φορτίου προκαλεί μη αποδεκτές ταλαντώσεις, όταν η συχνότητα της ασκούμενης δύναμης συμπίπτει με μια από τις φυσικές συχνότητες της κατασκευής (συντονισμός). Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού των εργαλειομηχανών είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπ' όψιν η δυναμική απόκριση των μηχανών εξ αιτίας της αρμονικής φόρτισης.

Η απόκριση ενός φυσικού συστήματος στις περιοδικές διεγέρσεις μπορεί να αναλυθεί μαθηματικά λαμβάνοντας υπ' όψιν την απόκριση ενός απλού ταλαντωτή μάζας. Η εξίσωση της κίνησης για ένα τέτοιο σύστημα δίνεται από την σχέση:

$$\ddot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = 0 \quad (3-33)$$

Εισάγοντας τη γενική λύση για την Εξίσωση απόκρισης (3-20) στην εξίσωση (3-33), προκύπτει η ακόλουθη χαρακτηριστική εξίσωση:

$$s^2 + \omega_n^2 = 0 \quad (3-34)$$

η οποία έχει δύο μιγαδικές ρίζες $\lambda_{1,2} = \pm i\omega_n$. Οπότε έχουμε την ακόλουθη λύση

$$x(t) = A_1 e^{i\omega_n t} + A_2 e^{-i\omega_n t} \quad (3-35)$$

όπου A_1 και A_2 είναι οι σταθερές του ολοκληρώματος. Για $x(t)$ πραγματικό,

το A_1 πρέπει να είναι μιγαδική συζυγία του A_2 . Η θεώρηση αυτή επιτρέπει να εκφρασθεί η λύση της εξίσωσης (3-35) εναλλακτικά ως μια ημιτονοειδής συνάρτηση.

Γνωρίζοντας ότι

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \quad (3-36)$$

Η εξίσωση (3-35) μπορεί επίσης να γραφεί ως

$$x(t) = B_1 \sin(\omega t) + B_2 \cos(\omega t) \quad (3-37)$$

όπου B_1 και B_2 είναι οι σταθερές του ολοκληρώματος.

Οι πιο πάνω σχέσεις δείχνουν ότι μια περιοδική φόρτιση μπορεί να εκφρασθεί ως μια ημιτονοειδής συνάρτηση μετατόπισης συναρτήσει του χρόνου, καθώς επίσης και ως ένα διάνυσμα στο μιγαδικό επίπεδο.

Εάν υποθέσουμε μια ημιτονοειδή δύναμη διεγέρσεως, η μαθηματική έκφραση για το φορτίο γράφεται ως :

$$F(t) = F_0 \cos(\omega t) \quad (3-38)$$

τότε η απόκριση του συστήματος δίδεται από την σχέση

$$x(t)_{force} = \frac{F_0 M}{K} \cos(\omega_f t + \phi_f) \quad (3-39)$$

όπου ω_f είναι η συχνότητα της δύναμης και K είναι η σταθερά του ελαστικότητας της μηχανής, ϕ_f είναι η γωνία φάσης που δείχνει πόσο η έξοδος καθυστερεί ως προς την είσοδο και δίδεται από την σχέση:

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{-2\zeta\omega_f\omega_n}{\omega_n^2 - \omega_f^2} \right) \quad (3-40)$$

Ο βαθμός μεγέθυνσης ή εύρους M , είναι το ποσοστό του εύρους εξόδου προς το εύρος εισόδου της ταλάντωσης (Σχ. 3.65)

$$M = |G(i\omega)| = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega_f}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{2\zeta\omega_f}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (3-41)$$

Στην συχνότητα συντονισμού έχουμε :

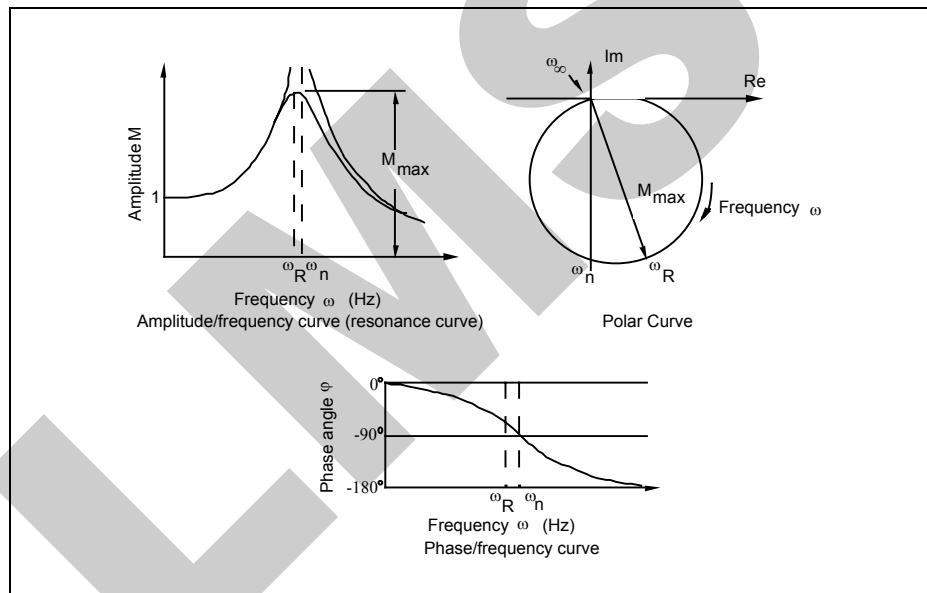
$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (3-42)$$

$$M_r = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \text{ για } \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3-43)$$

και

$$M_r = 1 \text{ για } \zeta \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3-44)$$

Οι στοιχειώδεις εξισώσεις, που παρουσιάστηκαν πιο πάνω για την αρμονική διέγερση, παρέχουν την βάση για την κατανόηση των σημαντικών δυναμικών χαρακτηριστικών των εργαλειομηχανών που προέρχονται από την περιοδική άσκηση των φορτίων. Οι υπερβολικές ταλαντώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε παραγόμενα εξαρτήματα κακής ποιότητας, σε κόπωση της μηχανής και σε μείωση του χρόνου ζωής του εργαλείου. Επομένως η αρμονική διέγερση, η απόκριση παλμού και η βηματική απόκριση πρέπει να αναλυθούν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού μιας εργαλειομηχανής προκειμένου η εργαλειομηχανή που θα κατασκευασθεί να παράγει με αξιοπιστία εξαρτήματα καλής ποιότητας.



Amplitude = Πλάτος (ταλάντωσης)
Frequency = Συχνότητα
Phase angle = Γωνία φάσης

Resonance = Συντονισμός
Curve = Καμπύλη
Polar = Πολική (καμπύλη, συντεταγμένη)

Σχήμα 3.65 Εύρος και Συχνότητα Απόκρισης ενός Απλού Ταλαντωτή Μάζας

Ο Γεωμετρικός Τόπος Πολικής Συχνότητας Απόκρισης (Σχ. 3.65) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την γραφική αναπαράσταση της πιο πάνω πληροφορίας σε ένα απλό διάγραμμα, το οποίο αναπαριστά την απόκριση του συστήματος με

την μορφή διανυσμάτων. Η εξίσωση της κίνησης για ένα δευτεροβάθμιο σύστημα (second order system) που υπόκειται σε αρμονική φόρτιση γράφεται επίσης ως:

$$\ddot{x}(t) + 2\omega_n \zeta \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = A\omega_n^2 e^{i\omega t} \quad (3-45)$$

χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3-36) που δίνει μια λύση με τη μορφή διανυσμάτων:

$$x(t) = AMe^{i(\omega t + \phi)} \quad (3-46)$$

όπου A είναι μια σταθερά που έχει μονάδες μετατόπισης, M η μεγέθυνση και ϕ η γωνία φάσης.

Αυτοδιεγερόμενες Ταλαντώσεις (Chatter)

Οι αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις (chatter) προκαλούνται από τη δυναμική αλληλεπίδραση των διεργασιών κοπής και της εργαλειομηχανής. Το μέγεθος της δύναμης κοπής που εξασκείται από το εργαλείο στο επεξεργαζόμενο εξάρτημα εξαρτάται κατ'αρχήν από την ταχύτητα και το βάθος της κοπής. Μια διαταραχή στη διαδικασία κοπής (για παράδειγμα εξ αιτίας ενός "σκληρού" σημείου στο κατεργαζόμενο υλικό) θα προκαλέσει μια παραμόρφωση της μηχανής, η οποία μπορεί να μεταβάλλει το πάχος του αποβλήτου και τη δύναμη κοπής. Η αρχική ταλάντωση μπορεί να είναι αυτοδιατηρούμενη και να αναγκάζει την μηχανή να ταλαντεύεται σε μια από τις ιδιοσυχνότητές της. Η αστάθεια αυτή δημιουργείται από δυο παράγοντες: την επίδραση της ανάδρασης, που είναι το επικρατέστερο φαινόμενο και τη σύζευξη των ιδιοσυχνοτήτων (mode-coupling) [6].

Αστάθεια από ανάδραση (Regenerative Instability)

Η αστάθεια από ανάδραση συμβαίνει, όταν μια διαταραχή στην διαδικασία κοπής δημιουργεί μια κυματοειδή επιφάνεια στο κατεργαζόμενο εξάρτημα. Κατά την διάρκεια διαδοχικών περασμάτων του εργαλείου, το πάχος του αποβλήτου εξαρτάται από την τρέχουσα δόνηση του εργαλείου και την καμπυλότητα της επιφάνειας που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο πέρασμα. Η απόκλιση της δύναμης εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των κυμάτων και μπορεί να αυξάνεται έπειτα από τα διαδοχικά περάσματα του εργαλείου, ενώ η ταλάντωση θα συνεχίζεται έως ότου διακοπεί από μια μη γραμμικότητα που μπορεί να παρουσιασθεί, όταν για παράδειγμα, το εργαλείο απομακρύνεται από το κατεργαζόμενο εξάρτημα κατά την διάρκεια μέρους του κύκλου ταλάντωσης.

Οι κόπτες της φρέζας (milling cutters) με μεταβλητό βήμα μεταξύ των διαδοχικών οδόντων μπορεί να οδηγήσουν σε εξαφάνιση αυτής της αστάθειας. Τα εργαλεία αυτά δημιουργούν διαφορετικές φάσεις μεταξύ των κυμάτων κο-

πής και μπορούν να μειώσουν τις επιδράσεις της ανάδρασης. Ένας δεύτερος τρόπος να επιτύχουμε μη κανονικό βήμα για τους ελικοειδείς κόπτες φρέζας είναι να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικές γωνίες ελίκωσης (helix angles) σε διαδοχικές έλικες οδόντων. Μια άλλη μέθοδος να μεταβάλλουμε τη φάση μεταξύ των κυμάτων κοπής στην κατεργαζόμενη επιφάνεια είναι να προσθέσουμε μια μεταβολή της ταχύτητας στην σταθερή ταχύτητα περιστροφής του εξαρτήματος. Αν και είναι δύσκολο να επιτευχθεί αυτό στην πράξη, η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι αποτελεσματική για τις διαδικασίες όπου δημιουργούνται ταλαντώσεις με αργό ρυθμό, όπως είναι ορισμένες διαδικασίες λείανσης.

Αστάθεια στη Σύζευξη Ιδιοσυχνοτήτων (Mode-Coupling Instability)

Η αστάθεια, εξ αιτίας της σύζευξης ιδιοσυχνοτήτων, μπορεί να συμβεί ακόμα και όταν τα διαδοχικά περάσματα του εργαλείου δεν επικαλύπτονται –όπως στην κοχλιοτόμηση– και δημιουργείται μια ανεπιθύμητη κίνηση του εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο εξάρτημα. Αυτός ο τύπος αστάθειας συμβαίνει, όταν η κατασκευή έχει στενά συζυγείς ιδιοσυχνότητες. Για παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής μπορεί να είναι τέτοια, ώστε μια ελεύθερη ταλάντωσή της να επιβάλλει στο εργαλείο να ακολουθήσει έναν ελλειπτικό δρόμο σε σχέση με το κατεργαζόμενο εξάρτημα, όταν η κατασκευή διαταραχθεί [6].

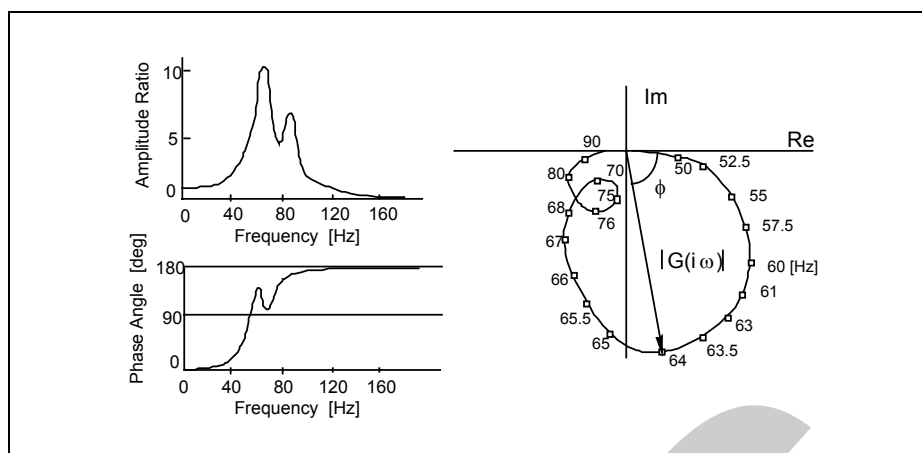
Εργαλειομηχανές ως Ταλαντωτές Πολλαπλής Μάζας (Machine Tools as Multi-Mass Vibrators)

Η ακρίβεια της διεργασίας μιας εργαλειομηχανής, η συμπεριφορά της φθοράς των εργαλείων και η ικανότητα της εργαλειομηχανής να λειτουργεί επιτυχώς, σχετίζονται με τη συμπεριφορά του πλαισίου της εργαλειομηχανής υπό την επίδραση δυναμικών φορτίων. Εφ' όσον οι εργαλειομηχανές είναι συναρμογήσεις ξεχωριστών μονάδων, μπορεί να θεωρηθούν ως ταλαντωτές πολλαπλής μάζας όσον αφορά τη δυναμική συμπεριφορά τους. Μη λαμβάνοντας υπ' όψη την επίδραση των συνδέσεων, η δομή μιας εργαλειομηχανής μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα μη συνδεδεμένων απλών ταλαντωτών μάζας. Επομένως, είναι πιθανό, να προσομοιώσουμε έως ένα σημείο την συμπεριφορά αυτών των κατασκευών, χρησιμοποιώντας διαφορετικές μάζες, ελατήρια και στοιχεία απόσβεσης που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, αν και στην πράξη η επιλογή των κατάλληλων τιμών για κάθε στοιχείο είναι πολύ δύσκολη.

Καθώς η συχνότητα της ασκούμενης δύναμης μεταβάλλεται, οι ταλαντώσεις της εργαλειομηχανής θα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [6]:

- Μια σύνθετη δομή της μηχανής μπορεί να παρουσιάζει διάφορους συντονισμούς ή φυσικές συχνότητες και η καμπύλη απόκρισης συχνότη-

τας θα έχει διάφορες "κορυφές" που αντιστοιχούν σε κάθε συντονισμό (Σχ. 3.66).



Amplitude = Πλάτος (ταλάντωσης)
Frequency = Συχνότητα
Phase angle = Γωνία φάσης

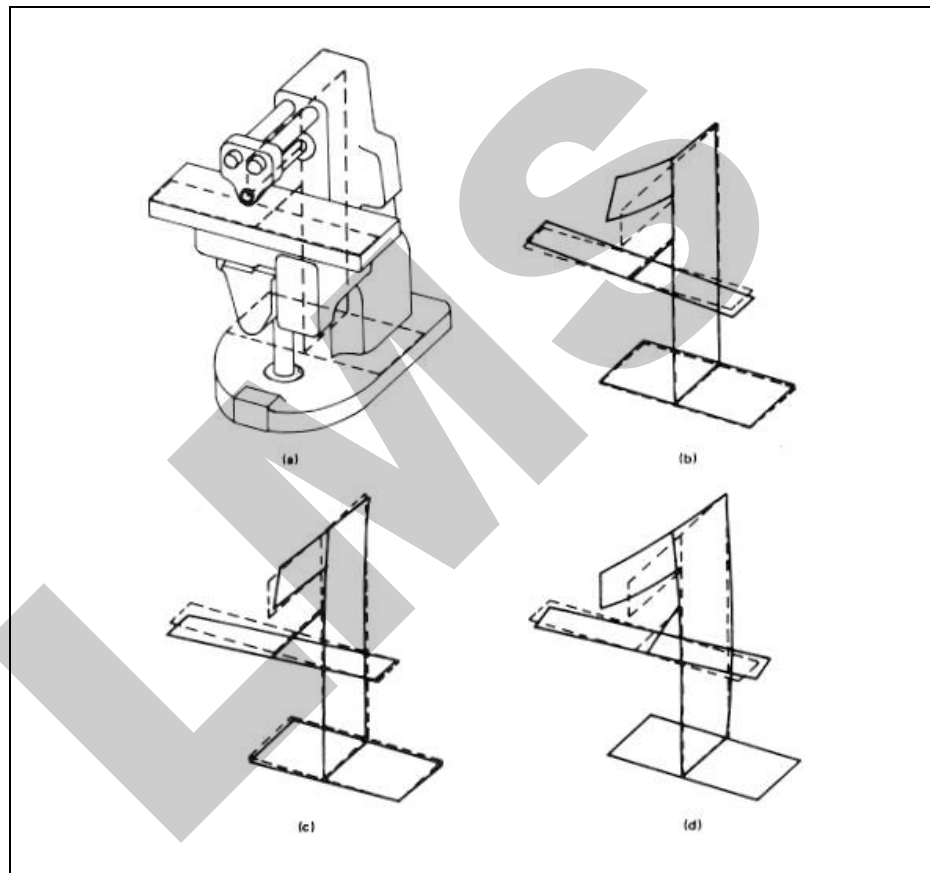
Ratio = Λόγος
Im (imaginary) = Άξονας φανταστικών αριθμών
Re (real) = Άξονας πραγματικών αριθμών

Σχήμα 3.66 Συχνότητα Απόκρισης μιας Εργαλειομηχανής Τυπικής Κατασκευής

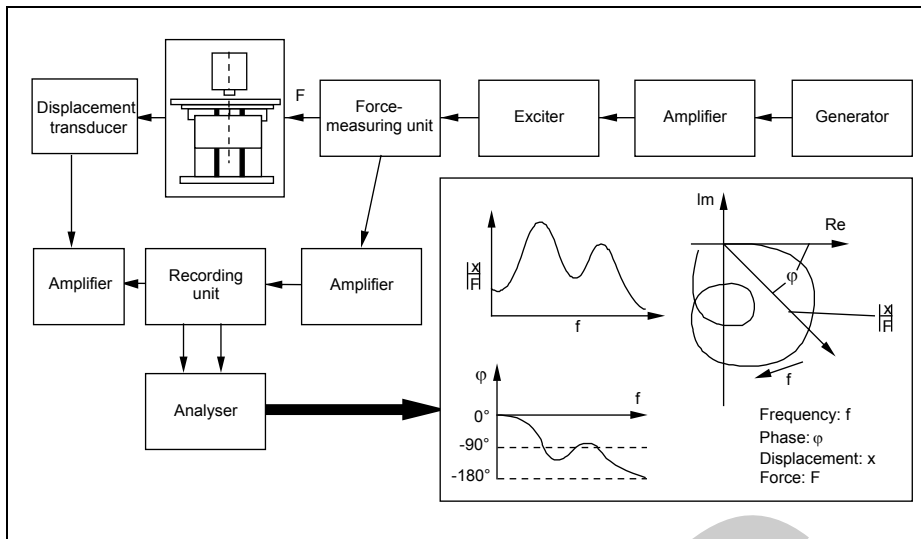
- Σε κάθε συχνότητα συντονισμού η συμβολή των κύριων στοιχείων της κατασκευής στον συνολικό συντονισμό θα ποικίλει. Ορισμένα εξαρτήματα θα μετακινούνται με μεγάλο εύρος σε μερικές συχνότητες, όμως άλλα εξαρτήματα μόλις που θα κινούνται. Κάθε συντονισμός θα έχει μια αντίστοιχη ιδιομορφή ταλάντωσης ή μορφή σχήματος που θα «υιοθετεί» η κατασκευή. Οι συχνότητες συντονισμού και οι αντίστοιχες ιδιομορφές μπορεί να εκτιμηθούν αναλυτικά συνθέτοντας και λύνοντας το πρόβλημα των ιδιοτιμών [6]. Κάθε συχνότητα συντονισμού είναι μια ιδιοτιμή και το σχετικό ιδιοδιάνυσμα περιγράφει την ιδιομορφή ή το σχήμα της ταλάντωσης. Για παράδειγμα, οι ιδιομορφές της ταλάντωσης μιας οριζόντιας μηχανής φρεζαρίσματος μπορούν να παρουσιασθούν γραφικά θεωρώντας την κίνηση των κυριότερων σημείων της κατασκευής και δείχνοντας το πλάτος και τις σχετικές φάσεις της κίνησης για [6] αυτά τα σημεία σε μια εικόνα της κατασκευής (Σχ. 3.67).
- Τα σημεία εφαρμογής και η κατεύθυνση των ασκούμενων δυνάμεων και των μετρούμενων ταλαντώσεων πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπ' όψη σε μια τρισδιάστατη κατασκευή. Για ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας οι ταλαντώσεις μετρούνται στο σημείο που εφαρμόζεται η ασκούμενη δύναμη. Η συχνότητα απόκρισης που προκύπτει αναφέρεται ως απευθείας απόκριση. Ωστόσο σε μια πολύπλοκη τρισδιάστατη

κατασκευή είναι πιθανό να εφαρμόσουμε ασκούμενες δυνάμεις σε συγκεκριμένα σημεία και σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις και μετά να μετρήσουμε την μετατόπιση σε άλλα σημεία σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Η συχνότητα απόκρισης που προκύπτει αναφέρεται σε μια συζευγμένη συχνότητα απόκρισης (cross-frequency response).

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας εργαλειομηχανής (Σχ. 3.68) συνήθως καθορίζονται πειραματικά (σφυρί εξοπλισμένο με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, Σχ. 3.69), εφ' όσον οι κατασκευές είναι μη γραμμικές και δεν είναι εύκολο να μελετηθούν αναλυτικά.



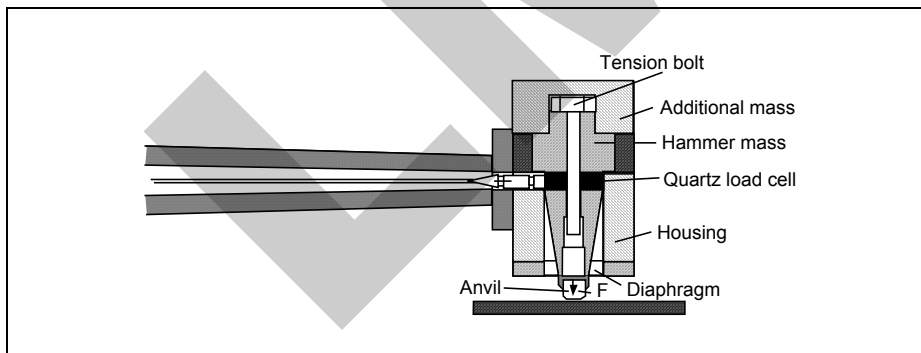
Σχήμα 3.67 Χαρακτηριστικά Ιδιομορφών για μια Οριζόντια Φρεζομηχανή α) Πλέγμα για την Περιγραφή των Ιδιομορφών, β) Ιδιομορφές Ταλάντωσης στα 97 Hz, γ) Ιδιομορφές Ταλάντωσης στα 107 Hz και δ) Ιδιομορφές Ταλάντωσης στα 112 Hz [6]



Displacement = Μετατόπιση
 Frequency = Συχνότητα
 Phase = Φάση
 Force = Δύναμη
 Transducer = Μετατροπέας
 Measuring unit = Μονάδα (συσσκευή) μέτρησης
 Exciter = Διεγέρτης

Amplifier = Ενισχυτής
 Generator = Γεννήτρια
 Recording unit = Καταγραφέας
 Analyser = Αναλυτής
 Im (imaginary) = Άξονας φανταστικών αριθμών
 Re (real) = Άξονας πραγματικών αριθμών

Σχήμα 3.68 Περίγραμμα Διαδικασίας Μέτρησης των Δυναμικών Χαρακτηριστικών ενός Πλαισίου



Tension bolt = Πείρος τάνυσης
 Additional mass = Πρόσθετη μάζα
 Hammer mass = Μάζα σφύρας
 Quartz load cell = Κυψέλη φόρτισης με χαλαζία

Housing = Περιβλημα
 Diaphragm = Διάφραγμα
 Anvil = Αμόνι

Σχήμα 3.69 Πιεζοηλεκτρική Σφύρα

Βελτίωση της Δυναμικής Συμπεριφοράς των Εργαλειομηχανών

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας μιας εργαλειομηχανής, ειδικότερα στις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου, δεν είναι πάντα εύκολο να αποφύγουμε τις συνθήκες όπου δημιουργούνται αυτοδιεγερόμενες ταλαντώσεις (chatter). Επομένως είναι απαραίτητο να βελτιώσουμε την ευστάθεια της μηχανής κατά την μελέτη και κατασκευή της. Οι ιδιομορφές της ταλάντωσης που προκαλούν τη σχετική κίνηση ανάμεσα στο εργαλείο και το κατεργαζόμενο εξάρτημα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη. Οι ιδιομορφές αυτές μπορεί να αντιμετωπισθούν μέσω της πρόσθετης στιβαρότητας και απόσβεσης στην κατασκευή. Ωστόσο, ο καθορισμός του σημείου εφαρμογής της πρόσθετης απόσβεσης απαιτεί προσεκτική ανάλυση της κατασκευής. Είναι πιθανό, μέσω του ανασχεδιασμού των διάφορων τμημάτων της κατασκευής, να μεταβάλλουμε τις αρχικές διευθύνσεις των βασικών ιδιομορφών της ταλάντωσης, έτσι ώστε να μην συμπίπτουν με τις δυνάμεις κοπής και/ή με τις κανονικές ως προς την επιφάνεια κοπής διευθύνσεις.

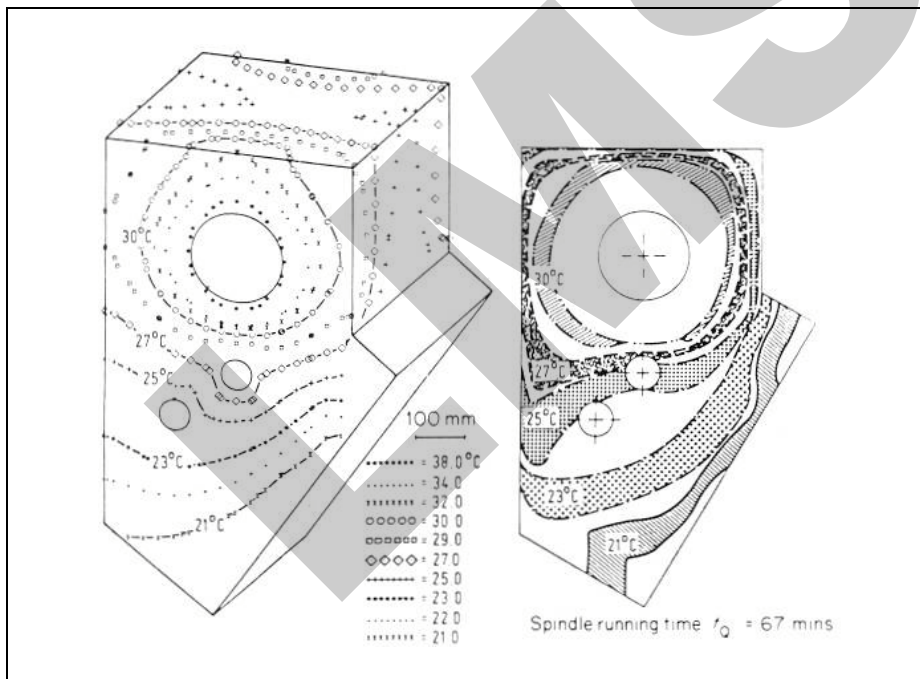
Ένας άλλος τρόπος να βελτιώσουμε την δυναμική συμπεριφορά των εργαλειομηχανών είναι να χρησιμοποιήσουμε αποσβεστήρα ταλαντώσεων (vibration absorber), ο οποίος είναι ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου που έχει προστεθεί στην κατασκευή και συντονίζεται ώστε να μειώνει τις επιδράσεις των κύριων ιδιομορφών της ταλάντωσης. Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων μπορούν να ληφθούν υπ' όψη στις εργαλειομηχανές αλλά μπορεί να είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν εάν υπάρχουν διάφορες κύριες ιδιομορφές της ταλάντωσης. Αυτά τα συστήματα μπορεί να είναι αποτελεσματικά [6] για τις μηχανές με μια απλή επικρατούσα ιδιομορφή ταλάντωσης.

Θερμική Συμπεριφορά (Thermal Behavior)

Η θερμική φόρτιση μιας εργαλειομηχανής μπορεί να οφείλεται σε έναν αριθμό παραγόντων στο εργασιακό περιβάλλον της εργαλειομηχανής. Οι πηγές θερμότητας που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία μιας εργαλειομηχανής χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: εξωτερικές και εσωτερικές. Οι εξωτερικές πηγές θερμότητας περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος που βρίσκεται η εργαλειομηχανή, τις μονάδες θερμότητας που βρίσκονται κοντά στην μηχανή, άλλες μηχανές που δημιουργούν θερμότητα, τον ήλιο, τα θερμαινόμενα αντικείμενα όπως οι λιπαντήρες, τα ψυκτικά υγρά κ.λ.π. Οι εσωτερικές πηγές θερμότητας περιλαμβάνουν τους ηλεκτρικούς κινητήρες, οδηγούς, κιβώτια ταχυτήτων κ.λ.π., καθώς και πηγές που προέρχονται από την ίδια τη διαδικασία όπως τα θερμά απόβλητα (hot chips).

Οι πηγές θερμότητας, είτε εξωτερικές είτε εσωτερικές, μπορεί να δημιουργήσουν ένα πεδίο θερμοκρασιών γύρω από συγκεκριμένα εξαρτήματα (Σχ. 3.70). Η θερμική παραμόρφωση ενός εξαρτήματος εξαρτάται από το πεδίο θερμοκρασιών, τη γεωμετρία του εξαρτήματος, το πώς το εξάρτημα είναι συν-

δεδεμένο στη μηχανή καθώς και από το υλικό του ίδιου του εξαρτήματος. Η μετατόπιση μεταξύ του εργαλείου και του κατεργαζόμενου εξαρτήματος είναι το άθροισμα της παραμόρφωσης όλων των εξαρτημάτων που υπόκεινται σε κάποιο θερμοκρασιακό πεδίο. Στη διαδικασία σχεδιασμού, το αποτέλεσμα της παραμόρφωσης που δημιουργείται από τη θερμότητα μπορεί να μειωθεί τοποθετώντας όλες τις εσωτερικές πηγές θερμότητας με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε ελάχιστες επιδράσεις στα εξαρτήματα των μηχανών ή τοποθετώντας τα εξαρτήματα με τέτοιο τρόπο ώστε η θερμική τους επίδραση να αντισταθμίζεται από την επίδραση από άλλη πηγή θερμότητας. Συχνά, οι κινητήρες έχουν προσαρμοσθεί εξωτερικά και η μηχανή έχει σχεδιασθεί με θερμικούς μονωτές (heat isolators). Η παροχή ψυκτικών γραμμών για τα έδρανα και τους κινητήρες είναι ένα άλλο μέτρο που επιτρέπει στη θερμότητα λόγω τριβής να διασκορπισθεί ικανοποιητικά. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σύνδεσμοι (expansion joints) που απορροφούν τη θερμική διαστολή των συστατικών ενώ συγχρόνως προσπαθούν να διατηρήσουν αποδεκτή τη στατική και δυναμική συμπεριφορά της μηχανής. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί λογισμικό (software) που θα μετράει τα αποτελέσματα της θερμοελαστικής παραμόρφωσης στην οποία εφαρμόζεται ο έλεγχος αναδράσεως (feedback control) σε συνεργασία με μέτρα αντιστάθμισης.

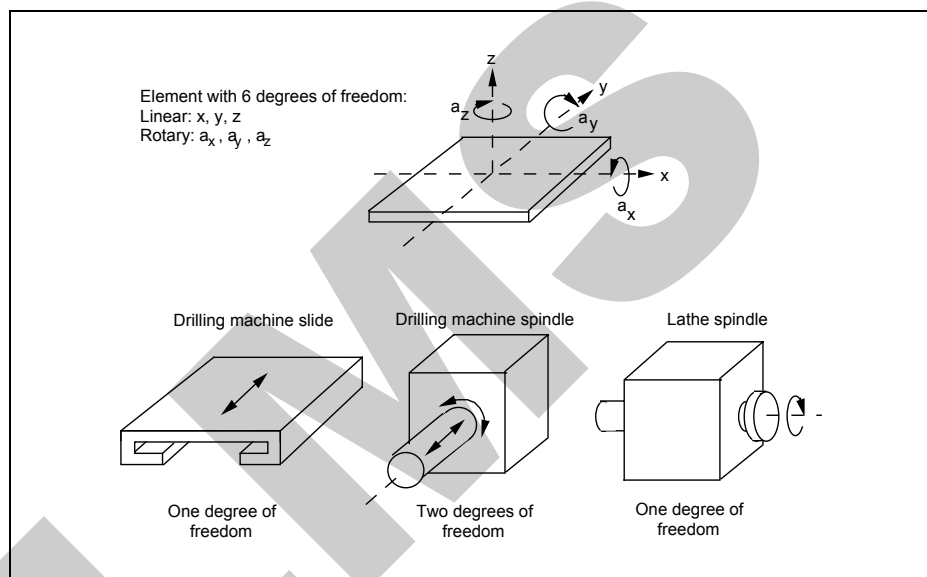


Spindle running time = Χρόνος λειτουργίας ατράκτου

Σχήμα 3.70 Ισοθερμοκρασιακές γραμμές στην κεφαλή ενός Τόρνου [3]

3.3.2 Έδρανα και Οδηγοί (Guideways and Bearings)

Οι οδηγοί και τα έδρανα χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση των δρομέων (slides) και των τραπεζιών εργασίας καθώς επίσης και για την υποστήριξη των αξόνων των εργαλειομηχανών. Οι οδηγοί χαρακτηρίζονται από τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας τους, τον τύπο της μετακίνησης (γραμμική, περιστροφική ή συνδυασμός τους) και τις λειτουργίες κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διεργασίας. Οι εργαλειομηχανές μπορούν να έχουν πολλούς βαθμούς ελευθερίας για το κοπτικό εργαλείο καθώς και για το κατεργαζόμενο εξάρτημα. Για παράδειγμα, μια μετακίνηση του δρομέα σε ευθεία γραμμή έχει ένα βαθμό ελευθερίας, ενώ ένας άξονας έχει δύο βαθμούς ελευθερίας, εφ' όσον ο άξονας περιστρέφεται και μετακινείται κατά μήκος ενός από τους γραμμικούς άξονες (Σχ. 3.71).

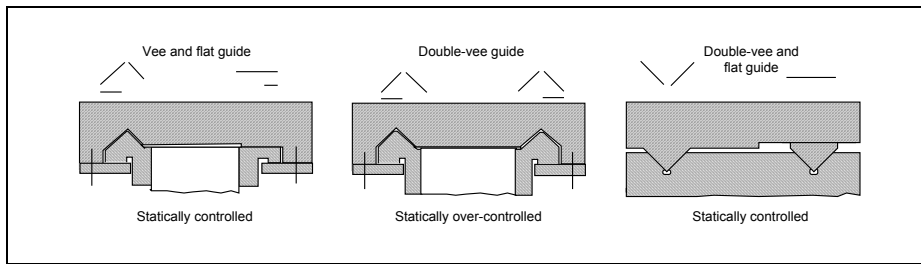


Element with 6 degrees of freedom = Στοιχείο με 6 βαθμούς ελευθερίας
Linear = Γραμμική (συντεταγμένη)
Rotary = Περιστροφή (γωνία)
Drilling machine slide = Δρομέας δραπάνου

Drilling machine spindle = Άτρακτος δραπάνου
Lathe spindle = Άτρακτος τόρνου
One degree of freedom = Ένας βαθμός ελευθερίας
Two degrees of freedom = Δύο βαθμοί ελευθερίας

Σχήμα 3.71 Βαθμοί Ελευθερίας σε Οδηγούς και Έδρανα

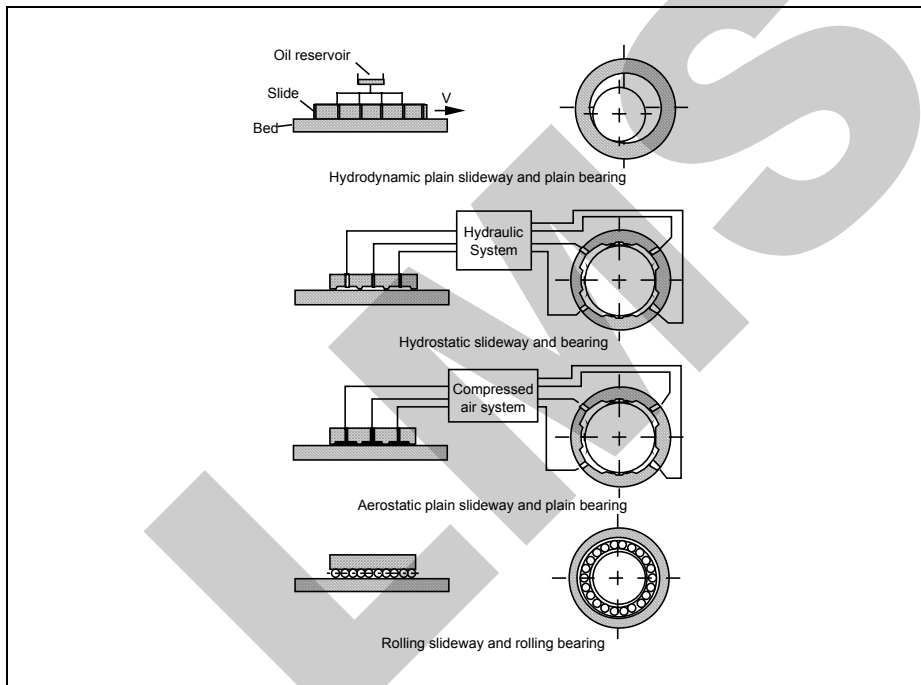
Οι οδηγοί χρησιμοποιούνται στη λειτουργία των εργαλειομηχανών και στη διαδικασία προετοιμασίας του εξαρτήματος. Στην πρώτη περίπτωση οι οδηγοί είναι ενεργοί κατά τη διάρκεια των παραγωγικών διεργασιών, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται μόνο πριν και μετά την παραγωγική διαδικασία, για εργασίες όπως η τοποθέτηση των εργαλείων. Οι οδηγοί που



Vee and flat guide = Οδηγός σχήματος V και επιπέδου σχήματος
 Double-vee guide = Οδηγός σχήματος διπλού V
 Double-vee and flat guide = Οδηγός σχήματος

διπλού V και επιπέδου σχήματος
 Statically controlled = Στατικά ελεγχόμενος
 Statically over-controlled = Στατικά υπερελεγχόμενος

Σχήμα 3.72 Παραδείγματα Στοιχείων Οδηγών στις Εργαλειομηχανές



Oil reservoir = Δοχείο ελαίου (λίπανσης)
 Slide = Ολισθητήρας (γλίστρα)
 Bed = Υπόβαθρο
 Hydrodynamic plain slideway and plain bearing = Υδροδυναμική απλή γλίστρα και έδρανο
 Hydraulic system = Υδραυλικό σύστημα
 Hydrostatic plain slideway and plain bearing =

Υδραστατική απλή γλίστρα και έδρανο
 Compressed air system = Σύστημα συμπιεσμένου αέρα
 Aerostatic plain slideway and plain bearing = Αεροστατική απλή γλίστρα και έδρανο
 Rolling slideway and rolling bearing = Γλίστρα και έδρανο κύλισης

Σχήμα 3.73 Διαφορετικοί τύποι Οδηγών και Εδράνων

Characteristic	Hydrodynamic Bearing	Rolling Bearing	Hydrostatic Bearing
Damping	●	○	●
Running Accuracy	●	○	●
Speed Range	○	○	●
Wear Resistance	○	○	●
Power Loss	●	○	○
Installation Costs	○	○	●
Cooling Capacity	○	○	●
Reliability	●	●	○

Evaluation of characteristics
 ● high ○ medium ○ low

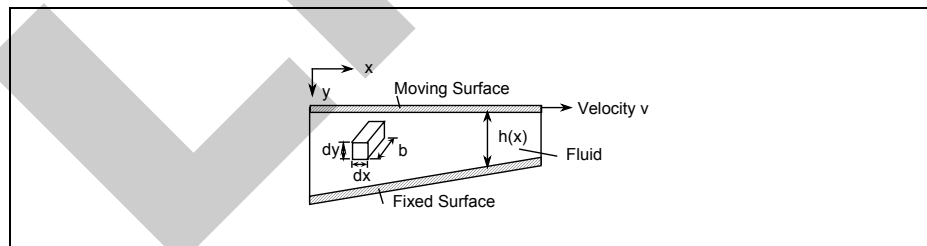
Characteristic = Χαρακτηριστικό
 Hydrodynamic bearing = Υδροδυναμικό έδρανο
 Hydrostatic bearing = Υδροστατικό έδρανο
 Rolling bearing = Έδρανο κύλισης
 Damping = Απόσβεση
 Running accuracy = Ακρίβεια λειτουργίας
 Speed range = Εύρος ταχυτήτων
 Wear Resistance = Αντίσταση σε φθορά
 Power loss = Απώλεια ισχύος

Installation costs = Κόστος εγκατάστασης
 Cooling capacity = Ικανότητα ψύξης
 Reliability = Αξιοπιστία
 Evaluation of characteristics = Αξιολόγηση (βαθμολόγηση) χαρακτηριστικών
 High = Υψηλός
 Medium = Μέσος
 Low = Χαμηλός

Σχήμα 3.74 Χαρακτηριστικά Εδράνων για Εργαλειομηχανές

χρησιμοποιούνται στη λειτουργία των εργαλειομηχανών συνήθως δέχονται μεγάλες τάσεις, οπότε πρέπει να ληφθούν υπ' όψη θέματα λίπανσης και αντοχής σε φθορά. Υπάρχουν διάφοροι τύποι [3] οδηγών και εδράνων (Σχ. 3.72 και 3.73), με τα δικά του χαρακτηριστικά ο καθένας (Σχ. 3.74).

Υδροδυναμικοί Οδηγοί και Ρουλεμάν (Hydrodynamic Guideways)

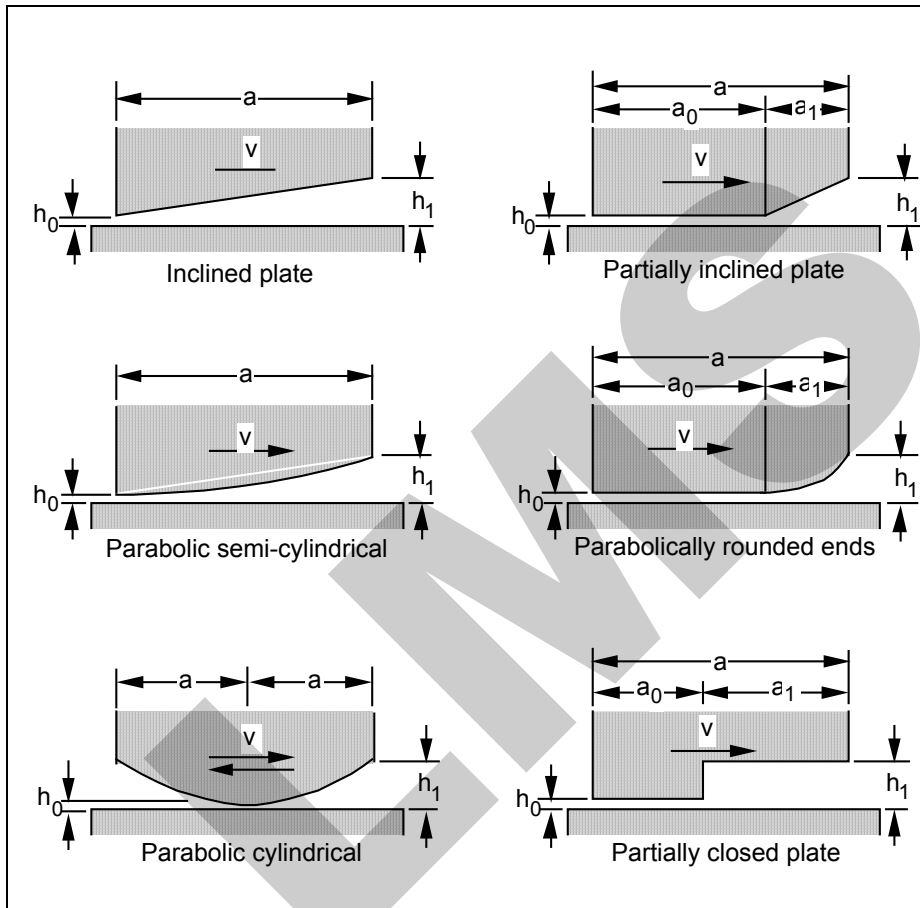


Moving surface = Κινούμενη επιφάνεια Velocity = Ταχύτητα
 Fixed surface = Σταθερή (ακίνητη) επιφάνεια Fluid = Ρευστό

Σχήμα 3.75 Υγρό υπό Μορφή Σφήνας

Οι υδροδυναμικοί οδηγοί χρησιμοποιούνται ευρέως στις εργαλειομηχανές. Δεν απαιτούν εξωτερική πηγή πίεσης για το λιπαντικό λάδι. Αντίθετα η πίεση

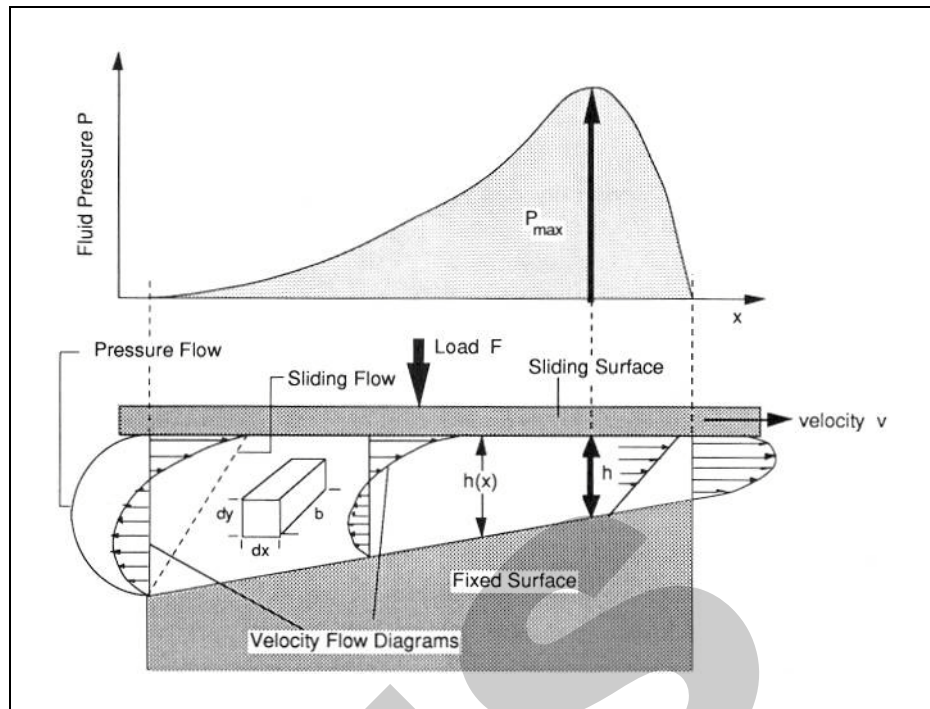
δημιουργείται από την ολισθαίνουσα επιφάνεια που κινείται πάνω σε ένα λεπτό στρώμα λιπαντικού πάνω σε μικρούς θύλακες σφηνοειδούς μορφής (Σχ. 3.75). Για την κατασκευή των εργαλειομηχανών χρησιμοποιείται μια ποικιλία από σχήματα διακένων για το σχηματισμό της υδροδυναμικής πίεσης (Σχ. 3.76). Πιο κάτω περιγράφεται η κατανομή της πίεσης που ενεργεί κατά μήκος μιας ολισθαίνουσας επιφάνειας. Θεωρούμε μια ολισθαίνουσα επιφάνεια η οποία κινείται με ταχύτητα v πάνω σε ένα λεπτό στρώμα ρευστού (Σχ. 3.77).



Inclined plate = Επικλινής σφήνα υπό μορφή πλάκας
 Partially inclined plate = Μερικά επικλινής σφήνα υπό μορφή πλάκας
 Parabolic semi-cylindrical = Παραβολική ημικυλινδρική σφήνα

Parabolically rounded ends = Σφήνα με παραβολικά καμπύλα άκρα
 Parabolic cylindrical = Παραβολική κυλινδρική σφήνα
 Partially closed plate = Σφήνα υπό μορφή μερικώς κλειστής πλάκας

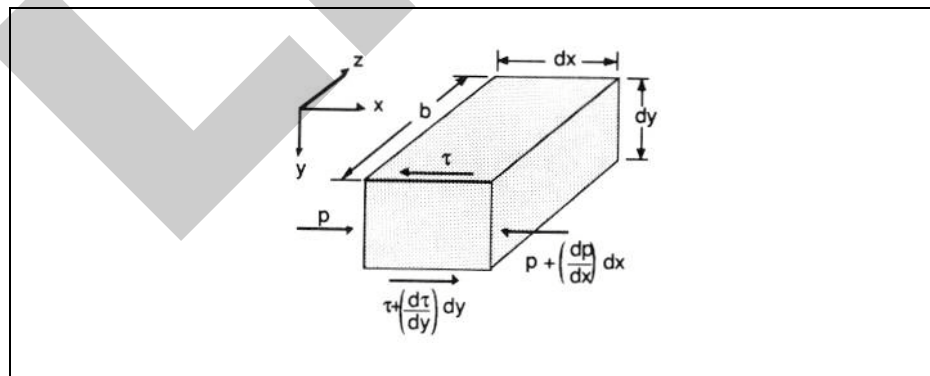
Σχήμα 3.76 Παραδείγματα Υδροδυναμικών Σφηνών



Fluid pressure = Πίεση ρευστού
 Pressure flow = Ροή πίεσης
 Sliding flow = Ροή ολίσθησης
 Load = Φόρτιση
 Sliding surface = Επιφάνεια ολίσθησης

Velocity = Ταχύτητα
 Fixed surface = Σταθερή (ακίνητη) επιφάνεια
 Velocity flow diagrams = Διαγράμματα ροής ταχύτητας

Σχήμα 3.77 Αρχή Λειτουργίας των Υδροδυναμικών Οδηγών



Σχήμα 3.78 Όγκος Ελέγχου

Ας υποθέσουμε ότι ένας όγκος με διαστάσεις dx και dy και βάθος b (Σχ 3.75 και Σχ. 3.78) βρίσκεται σε ισορροπία. Η εξίσωση ορμής για ένα μονοαξονικό ρευστό δίδεται από:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dt}{dy} \quad (3-47)$$

Για νευτόνια ρευστά, η διατμητική τάση είναι ανάλογη της μεταβολής της ταχύτητας ως προς την τεταγμένη,

$$\tau = \eta \frac{dv_s}{dy} \quad (3-48)$$

όπου τ είναι η διατμητική τάση,

η είναι το ιξώδες και

v_s είναι η ταχύτητα ροής.

Διαφορίζοντας την εξίσωση (3-48) έχουμε:

$$\frac{d\tau}{dy} = \eta \frac{d^2v_s}{dy^2} \quad (3-49)$$

Από τις εξισώσεις (3-47) και (3-49)

$$\frac{d^2v_s}{dy^2} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (3-50)$$

Εφόσον η μεταβολή της πίεσης ως προς την τεταγμένη $\left(\frac{dp}{dx}\right)$ δεν αλλάζει ως προς το y , η διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης (3-50) έχει τη λύση:

$$v_s(y) = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{dp}{dx}\right) y^2 + C_1 y + C_2, \quad (3-51)$$

με τις ακόλουθες οριακές συνθήκες και τιμές για τις σταθερές

για $y = 0$ και $v_s(y) = v \Rightarrow C_2 = v$

για $y = h(x)$ και $v_s(y) = 0 \Rightarrow C_1 = -\frac{v}{h(x)} - \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} h(x)$ (3-52)

Επομένως,

$$v_s(y) = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} \left[y^2 - h(x)y \right] + v \left[1 - \frac{y}{h(x)} \right] \quad (3-53)$$

Η μέγιστη πίεση p θα εμφανισθεί στο σημείο όπου $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 0$.

Επομένως σ' αυτό το σημείο

$$v_s(y) = v \left(1 - \frac{y}{h^*}\right) \quad (3-54)$$

όπου h^* είναι το σφηνοειδές διάκενο στη μέγιστη πίεση (Σχ. 3.77).

Η ροή Q διαμέσου οποιασδήποτε διατομής της σφήνας είναι:

$$Q = \int_{y=0}^{y=h(x)} v_s(y) b dy \quad (3-55)$$

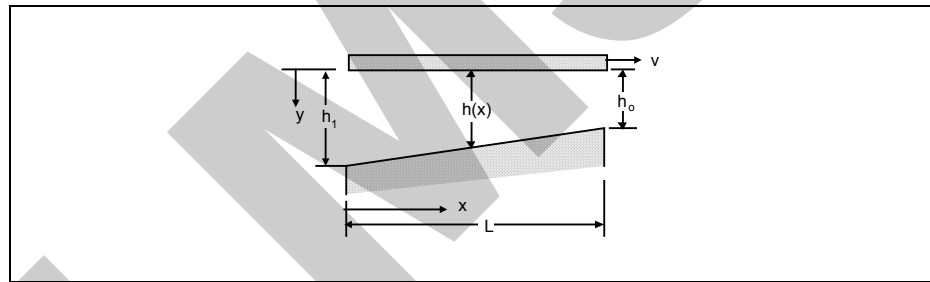
και η ροή στο σημείο μέγιστης πίεσης δίνεται από:

$$Q^* = \frac{v}{2} b h^* \quad (3-56)$$

Εφ' όσον η ροή είναι σταθερή έχουμε:

$$Q^* = Q \quad (3-57)$$

Έτσι για τη σφήνα του Σχ. 3. 79:



Σχήμα 3.79 Η Γεωμετρία του Υγρού υπό Μορφή Σφήνας

$$h(x) = h_0 + \frac{L-x}{L} (h_1 - h_0) \quad (3-58)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\eta v}{h_0^2} \left\{ \left(1 + m \frac{L-x}{L}\right)^{-2} - k^* \left(1 + m \frac{L-x}{L}\right)^{-3} \right\} \quad (3-59)$$

όπου $m = \frac{h_1}{h_0} - 1$ και $h^* = k^*$.

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (3-59)

$$p(x) = \frac{6\eta\nu L}{h_0^2 m} \left\{ \frac{1}{1 + m \frac{L-x}{L}} - \frac{k^*}{2 \left(1 + m \frac{L-x}{L}\right)^2} + C \right\} \quad (3-60)$$

Οι οριακές συνθήκες και οι σταθερές είναι:

$$x = 0 \Rightarrow p = 0$$

$$x = L \Rightarrow p = 0$$

$$C = \frac{-1}{2+m}, \quad k^* = \frac{2m+2}{2+m}$$

Γι.αυτό,

$$p(x) = \frac{6\eta\nu L}{h_0^2} K_p(x, m) \quad (3-61)$$

στην οποία

$$K_p(x, m) = \frac{1}{1 + m \frac{L-x}{L}} - \frac{1}{2(2+m) \left(1 + m \frac{L-x}{L}\right)^2}$$

Το φορτίο το οποίο μπορεί να υποστηριχθεί από τη σφήνα είναι:

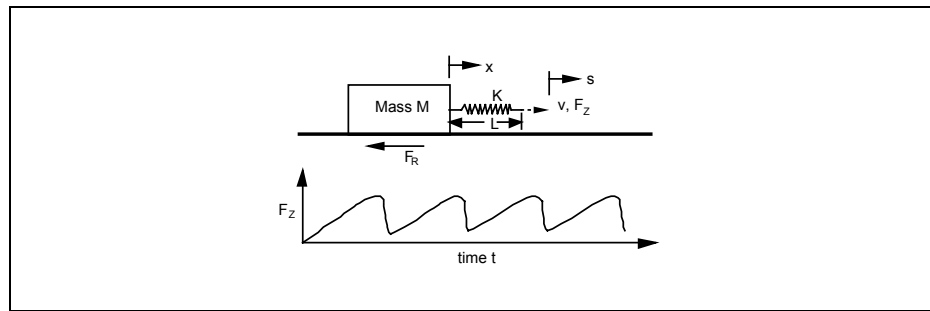
$$F = p_m L b \quad (3-62)$$

όπου

$$p_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} p(x) dx \quad (3-63)$$

Αυτή η στοιχειώδης ανάλυση μας δίνει μια εκτίμηση της τάξης του μεγέθους του φορτίου που ένας υδροδυναμικός οδηγός μπορεί να μεταφέρει [3]. Τέτοιες εκτιμήσεις μας δίνουν έναν γενικό προσανατολισμό για το σχεδιασμό των οδηγών, αλλά για λεπτομερή σχέδια χρησιμοποιούνται συνήθως αριθμητικές μέθοδοι και εμπειρία.

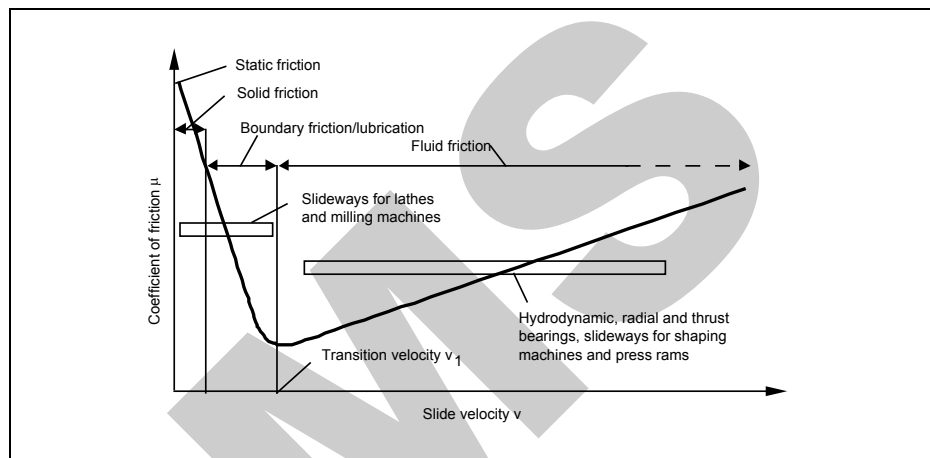
Τα χαρακτηριστικά της τριβής των υδροδυναμικών δρομέων είναι κρίσιμα για την ακρίβεια των εργαλειομηχανών. Ακανόνιστη κίνηση ολίσθησης μπορεί να εμφανισθεί σε χαμηλές ταχύτητες ολίσθησης. Αυτή η ακανόνιστη κίνηση οφείλεται στο φαινόμενο «σταμάτημα-ολίσθηση» (stick-slip) (Σχ. 3.80), δηλαδή στη μεταβολή του συντελεστή της τριβής μ , σε σχέση με την ταχύτητα ολίσθησης, η οποία περιγράφεται από την καμπύλη "Stribeck" (Σχ. 3.81). Το φαινόμενο σταματήματος-ολίσθησης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί επιλέγοντας τα κατάλληλα υλικά και λιπαντικά.



Mass = Μάζα

Time = Χρόνος

Σχήμα 3.80 Το μηχανικό ανάλογο του φαινομένου του σταματήματος-ολίσθησης (stick-slip effect)



Static friction = Στατική τριβή
 Solid friction = Τριβή στερεού
 Boundary friction/lubrication = Σύνορο τριβής/λίπανσης
 Fluid friction = Τριβή ρευστού
 Slideways for lathes and milling machines = Οδηγοί ολίσθησης για τόρνους και φρέζες
 Hydrodynamic, radial and thrust bearings,

slideways for shaping machines and press rams = Υδροδυναμικά, ακτινικά και ωστικά έδρανα, οδηγοί ολίσθησης για μηχανές μορφοποίησης και έμβολα πίεσης
 Transition velocity = Μεταβατική ταχύτητα
 Slide velocity = Ταχύτητα ολίσθησης
 Coefficient of friction = Συντελεστής τριβής

Σχήμα 3.81 Καμπύλη Stribeck

Το φαινόμενο του σταματήματος-ολίσθησης μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα αναλύοντας τη συμπεριφορά μιας μάζας η οποία σύρεται κατά μήκος μιας επιφάνειας. Εξισώνοντας τις δυνάμεις που ενεργούν στη μάζα κατά μήκος της επιφάνειας

$$F_z - F_R = m\ddot{x} \quad (3-64)$$

Η δύναμη της τριβής F_R και η δύναμη του ελατηρίου F_z ορίζονται παρακάτω:

$$F_R = c\dot{x} + F_{static} \quad (3-65)$$

$$F_z = K(s - x - L) \quad (3-66)$$

όπου L το απαραμόρφωτο μήκος του ελατηρίου
 K ο συντελεστής ακαμψίας (stiffness coefficient),
 c είναι ανάλογο της κλίσης από την καμπύλη Stribeck και
 F_{static} η δύναμη για να υπερβούμε τη στατική τριβή.

Η συνολική απόσταση που διανύει το άκρο του ελατηρίου δίδεται από την σχέση:

$$s = vt \quad (3-67)$$

όπου v είναι η δεδομένη ταχύτητα. Θέτοντας τις Εξισώσεις (3-65), (3-66) και (3-67) στην (3-64) η δυναμική της μάζας δίδεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

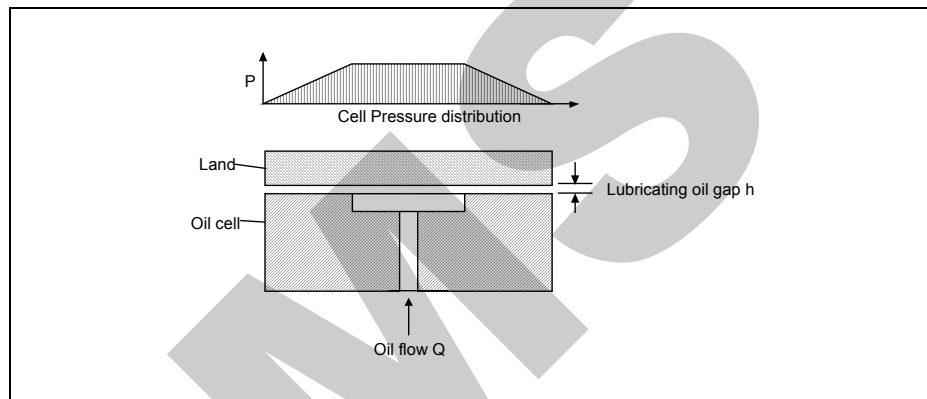
$$m\ddot{x} = K(s - x - L) - c\dot{x} - F_{static} \quad (3-68)$$

Ακριβώς όπως οι υδροδυναμικοί οδηγοί, έτσι και τα υδροδυναμικά έδρανα είναι λιγότερο κατάλληλα για εφαρμογές ακριβείας από τα υδροστατικά ή μαγνητικά έδρανα.

Υδροστατικοί Οδηγοί και Έδρανα (Hydrostatic Guideways and Bearings)

Στους υδροστατικούς οδηγούς και στα έδρανα (Σχ. 3.82) το λιπαντικό διάκενο δημιουργείται από ένα λεπτό στρώμα λαδιού το οποίο διοχετεύεται από μια εξωτερική αντλία. Εφόσον η πίεση διατηρείται σταθερή, το πάχος του λιπαντικού στρώματος είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα ολίσθησης. Το σχεδόν σταθερό πάχος του λιπαντικού στρώματος που παρέχεται από τους υδροστατικούς οδηγούς και τα έδρανα ελαχιστοποιούν τη φθορά και την τριβή. Επίσης παρέχουν πολύ υψηλή απόσβεση κατά μήκος των αξόνων κίνησης. Επί πλέον, εφόσον υπάρχει πολύ μικρή απόκλιση από το μέσο όρο του συντελεστή τριβής, δεν εμφανίζεται το φαινόμενο σταμάτημα-ολίσθηση (stick-slip). Ελαχιστοποιώντας τη στατική τριβή και το φαινόμενο σταματήματος-ολίσθησης, οι υδροστατικοί οδηγοί και τα έδρανα παρέχουν υψηλή ακρίβεια. Τα υδροστατικά ρουλεμάν παρέχουν το πλεονέκτημα να έχουμε εξαιρετικά χαμηλή τριβή και την δυνατότητα να πετύχουμε πολύ υψηλή στιβαρότητα. Παρ' όλα αυτά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων εξ αιτίας προβλημάτων με την διάτμηση του λαδιού και την ιξώδη αντίσταση.

Ένας υδροστατικός οδηγός αποτελείται από έναν αριθμό εγκοπών, γνωστές σαν κελιά λαδιού (oil cells) (Σχ. 3.83). Το διάστημα μεταξύ της σταθερής και της ολισθαίνουσας επιφάνειας γεμίζεται με λιπαντικό στρώμα λαδιού με πάχος μεταξύ 20 και 80μm. Το διάκενο δημιουργεί μια υδραυλική αντίσταση, η οποία προκαλεί μια σταδιακά αυξανόμενη πίεση για να δεχθεί το εξωτερικό φορτίο. Η ανάλυση της ροής σε τέτοιους υδροστατικούς οδηγούς ακολουθεί το νόμο του Hagen-Poiseuille [3]. Διαφορετικοί συνδυασμοί από αντλίες ανά κελί και διαφορετικές διατάξεις των κελιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να πετύχουμε τη ροή που απαιτείται για ένα συγκεκριμένο εξωτερικό φορτίο (Σχ. 3.84). Τα κελιά των οδηγών συνήθως τοποθετούνται παράλληλα στη διεύθυνση της κίνησης. Ένας μεγάλος αριθμός από κελιά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντισταθμίσουν τις ταλαντώσεις και τις αποκλίσεις από ένα γραμμικό μονοπάτι κατά τη διάρκεια της κίνησης. Η εμπειρία έχει δείξει, ότι το βάθος των κελιών θα πρέπει να είναι 10 έως 100 φορές μεγαλύτερο από το διάκενο του στρώματος λαδιού.



Cell pressure distribution = Κατανομή πίεσης στην κυψελίδα

Land = Επιφάνεια φίλτρου ελαίου λίπανσης

Oil cell = Κυψελίδα ελαίου λίπανσης

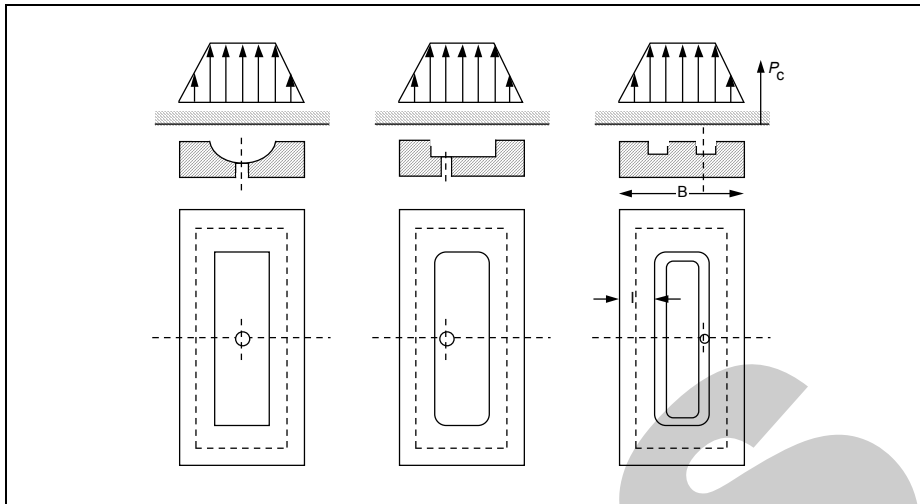
Oil flow = Ροή ελαίου λίπανσης

Lubricating oil gap = Διάκενο (εισόδου) ελαίου λίπανσης

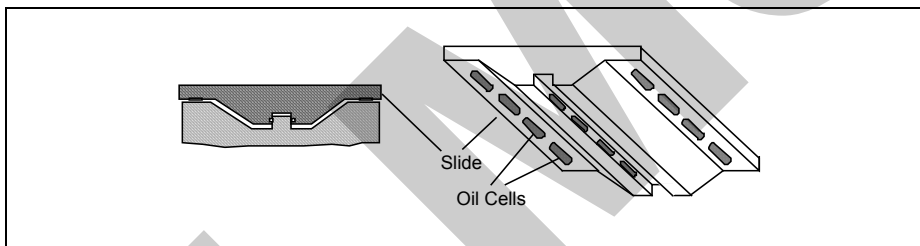
Σχήμα 3.82 Η Αρχή Λειτουργίας Υδροστατικού Οδηγού ή Εδράνου

Οι υδροστατικοί οδηγοί και τα έδρανα είναι ακριβά και πολύπλοκα εξαρτήματα αφού κάθε συγκρότημα πίεσης χρειάζεται ένα περίπλοκο υδραυλικό σύστημα (αντλίες, γραμμές λαδιού κ.λ.π) για να διατηρείται η αναγκαία ροή και πίεση του ρευστού. Η χρήση των υδροστατικών οδηγών και ρουλεμάν, απαιτεί γενικά ένα υψηλό επίπεδο συντήρησης. Επί πλέον, όταν λειτουργούν αυτοί οι οδηγοί και τα ρουλεμάν σε υψηλές ταχύτητες μπορεί να αυξηθεί η θερμοκρασία του ρευστού λόγω της διατμητικής τριβής του ρευστού και έτσι να αλλάξουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του λαδιού και πιθανόν να μειωθεί και η αποτελεσματικότητα των οδηγών ή των ρουλεμάν. Αφού οι υδροστατικοί οδηγοί απαιτούν ένα υδραυλικό σύστημα υψηλής πίεσης, η κατανάλωση ισχύος

από την αντλία μπορεί να είναι σημαντική. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν βαλβίδες ελέγχου της ροής για να δώσουν στα έδρανα την επιθυμητή στιβαρότητα ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ισχύος.



Σχήμα 3.83 Διάφορες Μορφές των Κυψελίδων Λιπαντικού Ελαίου



Oil cells = Κυψελίδες ελαίου λίπανσης

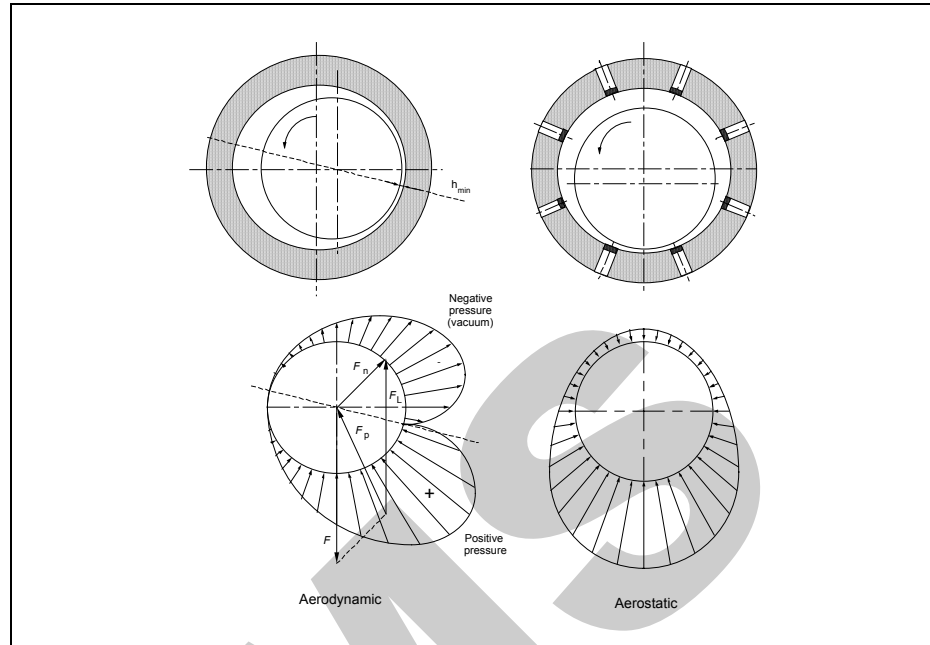
Slide = Ολισθητήρας (γλίστρα)

Σχήμα 3.84 Οδηγός Τράπεζας Εργασίας με Υδροστατικές Κυψελίδες

Αεροδυναμικοί και Αεροστατικοί Οδηγοί και Έδρανα (Aerodynamic and Aerostatic Guideways and Bearings)

Οι αεροδυναμικοί και αεροστατικοί οδηγοί και έδρανα χρησιμοποιούν αέρα σαν λιπαντικό μέσο μεταξύ των ολισθαινόντων επιφανειών. Αυτοί οι οδηγοί και τα έδρανα είναι κατάλληλοι για υψηλές ταχύτητες λειτουργίας γιατί παρέχουν χαμηλή τριβή και ελάχιστη παραγωγή θερμότητας. Είναι συγκριτικά απλοί κατά την κατασκευή γιατί υπάρχει μικρή πιθανότητα μόλυνσης του λιπαντικού μέσου σε σύγκριση με τα λιπαντικά ρευστά. Επί πλέον, δεν επηρεά-

ζονται σημαντικά από δραστικές αλλαγές στη θερμοκρασία λειτουργίας. Οι αεροστατικοί οδηγοί και τα έδρανα, όπως οι υδροστατικοί παρέχουν ελάχιστη στατική τριβή και πολύ χαμηλή φθορά και η ικανότητα μεταφοράς φορτίου είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα ολίσθησης.



Negative pressure (vacuum) = Αρνητική πίεση (κενό)
Positive pressure = Θετική πίεση

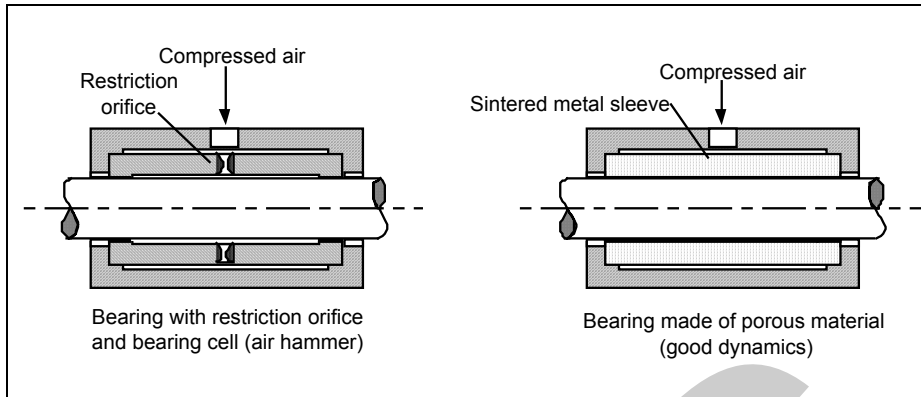
Aerodynamic = Αεροδυναμικό
Aerostatic = Αεροστατικό

Σχήμα 3.85 Αρχές Λειτουργίας των Αεροδυναμικών και Αεροστατικών Εδράνων

Η λειτουργία των αεροδυναμικών και αεροστατικών εδράνων και οδηγών βασίζεται στο φαινόμενο αντίστασης μέσα στο μικρό διάκενο μεταξύ δυο κινούμενων μερών και συνεπώς η ικανότητα μεταφοράς των φορτίων αυτών είναι σχετικά χαμηλή (Σχ. 3.85). Οι υπολογισμοί για τις διαστάσεις των διακένων του αέρα της κατανάλωσης αέρα και της ικανότητας μεταφοράς φορτίου ενός αεροστατικού εδράνου ή οδηγού είναι πολύ πιο πολύπλοκοι από ότι για ένα υδροστατικό λόγω επιπρόσθετων παραγόντων όπως είναι η πιθανότητα δημιουργίας στροβιλισμών του αέρα και το σχήμα των ακροφυσίων αέρα. Λόγω της συμπιεστότητας του αέρα, μπορεί να εμφανισθούν σε αεροστατικά έδρανα ή οδηγούς διάφορες αυτοδιεγείρομενες ταλαντώσεις.

Για να αποφύγουμε αυτά τα φαινόμενα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταξύ του στομίου εισαγωγής αέρα και του κινούμενου μέρους του εδράνου (Σχ. 3.86) ή περιοριστικά στόμια ή πορώδη υλικά όπως πυροσυσσωματωμένο χιτώνιο. Οι ολισθαίνουσες επιφάνειες των αεροδυναμικών και αεροστατικών

οδηγών και ρουλεμάν μπορούν να διαβρωθούν λόγω της υγρασίας στον αέρα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας ανοξειδωτα υλικά ή ξηραντήρες αέρα, λύσεις που ενδεχομένως να είναι ακριβές στην εφαρμογή τους.

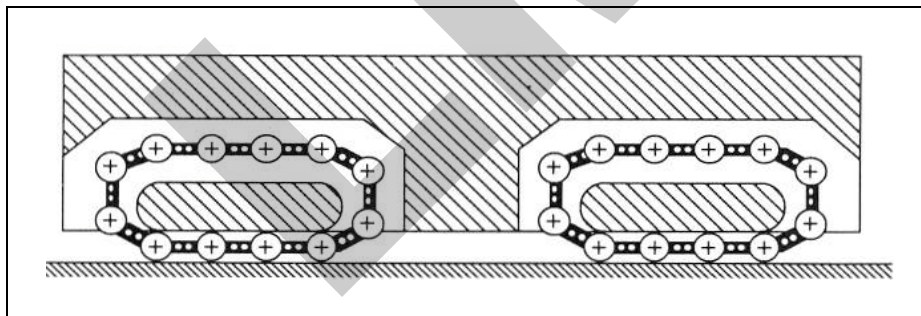


Compressed air = Πεπιεσμένος αέρας
 Restriction orifice = Περιοριστικό στόμιο
 Bearing with restriction orifice and bearing cell (air hammer) = Έδρανο με περιοριστικό στόμιο και περίβλημα (αερόσφυρο)

Sintered metal sleeve = Πυροσυσσωματωμένο μεταλλικό χιτόνιο
 Bearing made from porous material (good dynamics) = Έδρανο από πορώδες υλικό (καλή δυναμική συμπεριφορά)

Σχήμα 3.86 Αεροστατικό Ακτινικό Έδρανο

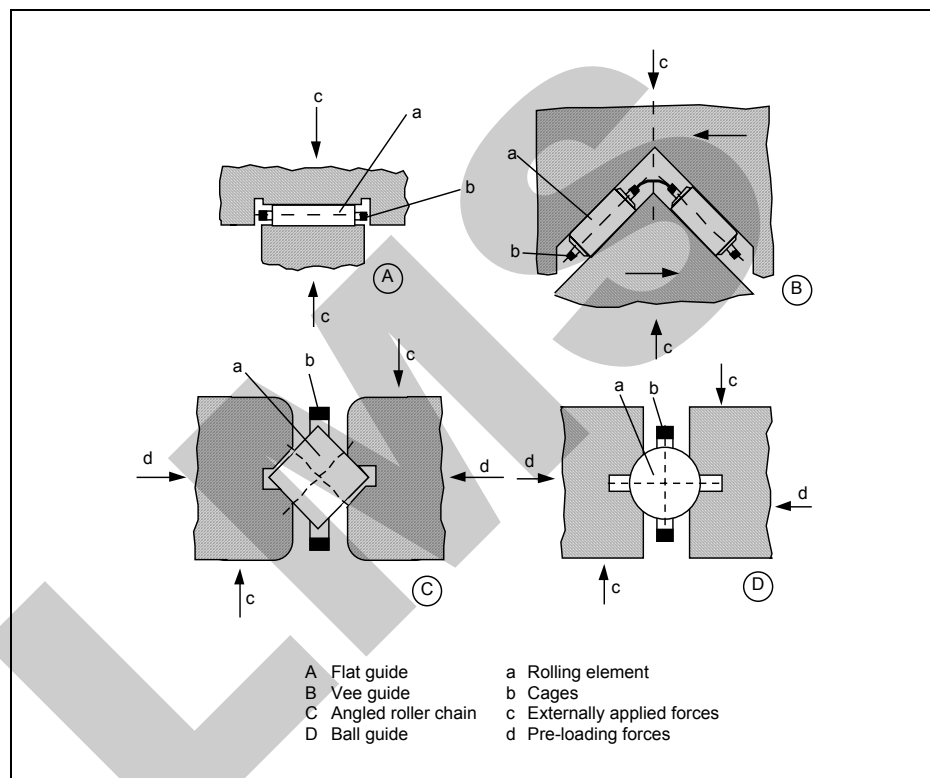
Οδηγοί και Έδρανα Κύλισης (Rolling Contact Guideways and Bearings)



Σχήμα 3.87 Γραμμικά Κυλιόμενος Οδηγός (Linear Rolling Guideway)

Οι οδηγοί και τα έδρανα κύλισης χρησιμοποιούνται ευρέως στις εργαλειομηχανές επειδή παρέχουν μικρή τριβή, ελαχιστοποίηση του φαινομένου σταματήματος-ολίσθησης και λειτουργίες χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Το μέγεθός τους και τα χαρακτηριστικά τους είναι τυποποιημένα και συχνά είναι διαθέσιμα από πολλούς διαφορετικούς προμηθευτές.

Οι οδηγοί κύλισης συνήθως έχουν μια κυλιόμενη αλυσίδα με στοιχεία κύλισης που ανακυκλοφορούν (Σχ. 3.87). Η ακριβής λειτουργία ενός οδηγού δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα των οδηγούμενων επιφανειών αλλά και από τη γεωμετρική ακρίβεια των στοιχείων κύλισης και της θέσης τους στον θάλαμο (cage). Είναι διαθέσιμη μια ποικιλία βασικών σχεδίων για τους οδηγούς κύλισης, η οποία περιλαμβάνει επίπεδους οδηγούς (flat guides) και οδηγούς σχήματος V (Σχ. 3.88).



Flat guide = Επίπεδος οδηγός

Vee guide = Οδηγός τύπου V

Angled roller chain = Αλυσίδα κυλίστρων υπό γωνία

Ball guide = Ένσφαιρος οδηγός

Rolling element = Στοιχείο κύλισης

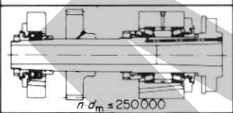
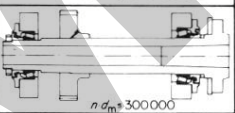
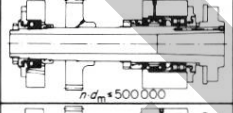
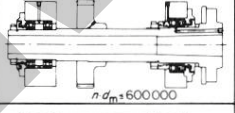
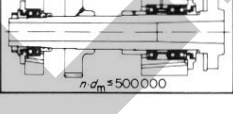
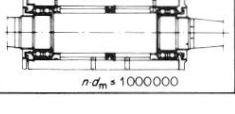
Cages = Κλωβοί

Externally applied forces = Εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις

Pre-loading forces = Δυνάμεις προφόρτισης

Σχήμα 3.88 Διαφορετικές Διατάξεις Σχεδιασμού Κυλιόμενων Οδηγών

Στην κατασκευή των εργαλειομηχανών, τα έδρανα με επαφές κύλισης χρησιμοποιούνται συχνά στις ατράκτους και για στήριξη των αξόνων των κινητήρων πρόωσης (feed drives). Και τα δυο σχέδια εδράνων, με σφαίρες (ball) και με κυλίνδρους (roller) είναι διαθέσιμα. Τα έδρανα της ατράκτου είναι κρίσιμα στοιχεία της εργαλειομηχανής, γιατί θα πρέπει να δίδουν υψηλή ακρίβεια κάτω από μια μεγάλη ποικιλία φορτίσεων. Στα έδρανα με άξονες (spindle bearings) συχνά ασκούνται προφορτίσεις. Ορισμένα σχέδια χρησιμοποιούν ένα υδραυλικό σύστημα προκειμένου να διατηρήσουν ένα σταθερό φορτίο. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι εδράνων με άξονες που χρησιμοποιούνται ευρέως (Σχ. 3.89). Τα κωνικά έδρανα κύλισης (taper roller bearings) είναι κατάλληλα για χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, παρέχουν ικανοποιητική στιβαρότητα και συνήθως εφαρμόζονται στους άξονες των τόνων και στις φρέζες. Τα έδρανα κύλισης με διπλές παράλληλες σειρές (double row parallel roller bearings) είναι κατάλληλα για μεσαίες ταχύτητες περιστροφής και παρέχουν ικανοποιητική στιβαρότητα. Αυτός ο τύπος εδράνων αποδίδει καλά στους τόνους, στις φρέζες και στις μηχανές λείανσης. Τα επικλινή γωνιακά ένσφαιρα έδρανα (inclined angular contact ball bearings) χρησιμοποιούνται για πολύ υψηλές περιστροφικές ταχύτητες. Ωστόσο, παρέχουν σχετικά μικρή στιβαρότητα και χρησιμοποιούνται στις μηχανές εσωτερικής λείανσης ή στις μηχανές που χρησιμοποιούνται στις φρέζες ή στους τόνους που επεξεργάζονται μη σιδηρούχα μέταλλα τα οποία δεν απαιτούν μεγάλες δυνάμεις κοπής.

Bearing principle	Bearing type No.1 Fixed bearing at work holding end	Bearing type No.2 Opposite tapered guides or fixed bearing at drive end
Taper roller bearing	 $n d_m \approx 250\,000$	 $n d_m \approx 300\,000$
Double-row parallel roller bearing	 $n d_m \approx 500\,000$	 $n d_m \approx 600\,000$
Inclined axis ball bearing	 $n d_m \approx 500\,000$	 $n d_m \approx 1\,000\,000$

Bearing principle = Αρχή έδρασης

Taper roller bearing = Κωνικά έδρανα κύλισης

Double-row parallel roller bearing = Έδρανα κύλισης με διπλή παράλληλη σειρά

Inclined axis ball bearing = Ένσφαιρα έδρανα κεκλιμένου άξονα

Type = Τύπος

Fixed bearing at work holding end = Σταθερό έδρανο τοποθετημένο στο άκρο στήριξης του εξαρτήματος

Opposite tapered guides or fixed bearing at drive end = Αντίθετα τοποθετημένοι κωνικοί οδηγοί ή σταθερό έδρανο στα άκρα του οδηγού άξονα

Σχήμα 3.89 Διαφορετικές Διατάξεις Εδράνων Ατράκτου [3]

Οδηγοί και Έδρανα Μαγνητικής Ανάρτησης (Magnetic Suspension Guideways and Bearings)

Η μαγνητική ανάρτηση παρέχει το πλεονέκτημα της ασήμαντης στατικής και ιξώδους τριβής και της πολύ καλής θερμικής μόνωσης. Ωστόσο, η μαγνητική ανάρτηση είναι δύσκολο να εφαρμοσθεί γιατί κάθε μαγνήτης απαιτεί ξεχωριστό ελεγκτή. Οι άξονες μαγνητικής ανάρτησης έχουν κατασκευασθεί και ρυθμίζονται με μέγιστη ταχύτητα αυτή των 40.000 rpm και με μέγιστο ακτινικό φορτίο αυτό των 1000 N. Οι μαγνητικοί αναρτημένοι ολισθητήρες χρησιμοποιούνται σε πολύ ειδικές εφαρμογές. Η θέση ενός ολισθητήρα περιορίζεται σε ένα άξονα μέσω ενός ζεύγους μαγνητών που είναι οριζόντιοι και κάθετοι κατά αντίθετη φορά μεταξύ τους. Η σχετική δύναμη έλξης μεταξύ δυο μαγνητών με αντίθετη φορά ελέγχει τη θέση των ολισθητήρων στον άξονα. Ένας μετρητής ηλεκτροχωρητικότητας (capacitance gauge) υπολογίζει τη θέση μεταξύ των ολισθητήρων και των επιφανειών των μαγνητών για τον έλεγχο της θέσης των ολισθητήρων.

3.3.3 Κινητήρες και Συστήματα Μετάδοσης (Drives and Transmissions)

Κινητήρες (Drives)

Οι εργαλειομηχανές χρησιμοποιούν υδραυλικούς κινητήριους μηχανισμούς, κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ή βηματικούς κινητήρες για οδηγούς. Ο τύπος του οδηγού, που θα χρησιμοποιηθεί, καθορίζεται από τις απαιτήσεις ισχύος των εργαλειομηχανών, τις διαθέσιμες πηγές ισχύος και τα επιθυμητά δυναμικά χαρακτηριστικά.

Οι βηματικοί κινητήρες έχουν κάποιους περιορισμούς ως προς την ισχύ και τη διαθέσιμη ροπή, οπότε είναι κατάλληλοι μόνο για μικρές εργαλειομηχανές. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) παρέχουν ικανοποιητική ρύθμιση των ταχυτήτων, μεγάλη στρέψη και υψηλή αποτελεσματικότητα και γι' αυτό ταιριάζουν απόλυτα σε αυτόματα ελεγχόμενες μηχανές. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) μπορούν να σχεδιασθούν έτσι ώστε να ικανοποιούν ένα μεγάλο εύρος απαιτήσεων ισχύος και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες μηχανές μικρού ή μεσαίου μεγέθους. Τα υδραυλικά συστήματα είναι κατάλληλα για τις εργαλειομηχανές όπου οι απαιτήσεις ισχύος είναι υψηλές. Το κόστος των υδραυλικών μηχανισμών δεν είναι ανάλογο της απαιτούμενης ισχύος, και για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα ακριβοί για μηχανές μικρού έως μεσαίου μεγέθους [9].

Υδραυλικά Συστήματα (Hydraulic systems)

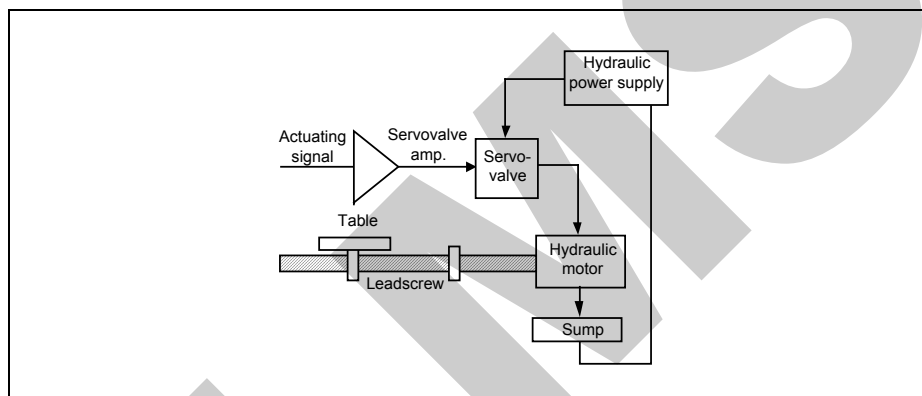
Τα υδραυλικά συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως για να κινούν εργαλειο-

μηχανές με μεγάλη ισχύ αφού ένα σχετικά μικρό υδραυλικό σύστημα μπορεί να παρέχει μεγάλη ισχύ. Μπορούν να αναπτύξουν πολύ περισσότερη από τη μέγιστη γωνιακή επιτάχυνση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC) με την ίδια μέγιστη ισχύ. Έχουν μικρές σταθερές χρόνου και γι' αυτό η λειτουργία των ολισθητήρων των εργαλειομηχανών είναι ιδιαίτερα ομαλή.

Τα υδραυλικά συστήματα ωστόσο παρουσιάζουν προβλήματα ως προς τη συντήρηση και διαρροή λαδιών από τις γραμμές μεταφοράς και τα εξαρτήματα του συστήματος. Τα λάδια πρέπει να παραμείνουν καθαρά και προστατευμένα από τυχόν ρυπάνσεις. Άλλα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά των υδραυλικών συστημάτων είναι οι δυναμικές καθυστερήσεις που προκαλούνται από τις γραμμές μεταφοράς και τις μεταβολές στο ιξώδες του λαδιού ως συνάρτηση της θερμοκρασίας λαδιού.

Τα υδραυλικά συστήματα (Σχ. 3.90) περιλαμβάνουν τα ακόλουθα συστατικά [9] :

1. Υδραυλική τροφοδοσία ισχύος
2. Μια σερβοβαλβίδα για κάθε άξονα κίνησης
3. Λεκάνη αποστράγγισης λαδιών
4. Ένα υδραυλικό κινητήρα για κάθε άξονα κίνησης



Actuating signal = Σήμα ενεργοποίησης

Servo-valve = Σερβοβαλβίδα

Amp. (amplifier) = Ενισχυτής

Hydraulic power supply = Τροφοδοσία υδραυλικής ισχύος

Hydraulic motor = Υδραυλικός κινητήρας

Sump = Δοχείο αποστράγγισης (λιπαντικού ελαίου)

Leadscrew = Κοχλίας οδηγός

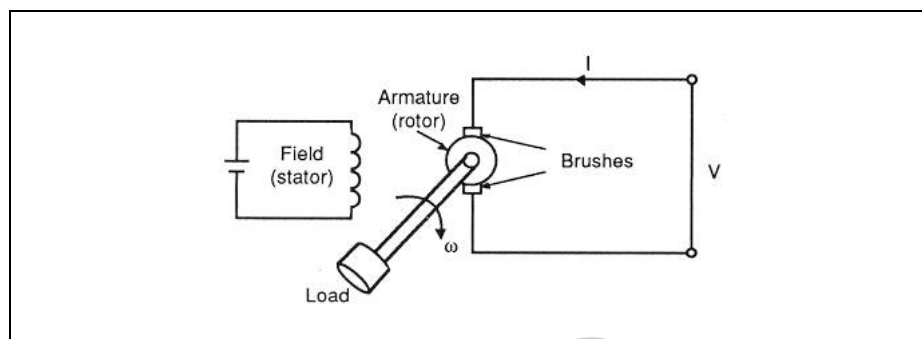
Table = Τράπεζα

Σχήμα 3.90 Υδραυλικό Σύστημα

Κινητήρες DC (Κινητήρες συνεχούς ρεύματος) (DCMotors)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο της ταχύτητας για ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας μέσω του ελέγχου της τάσης που εφαρμόζεται στον κινητήρα. Οι κινητήρες αυτοί είναι κατάλληλοι για να κι-

νούν τους άξονες μηχανών μικρού ή μεσαίου μεγέθους. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) επίσης χρησιμοποιούνται για να κινούν τους άξονες των τόνων και των φρεζών όταν απαιτείται συνεχής έλεγχος της ταχύτητας των αξόνων.



Field = Πεδίο
Stator = Στάτορας
Armature = Οπλισμός

Rotor = Ρότορας
Load = Φορτίο
Brushes = Ψήκτρες (κινητήρα)

Σχήμα 3.91 Σχηματικό Διάγραμμα Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος (DC Motor) με Αυτόνομη Διέγερση

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC) μπορεί να λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια. Η αρχή λειτουργίας μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος (DC) βασίζεται στην περιστροφή μιας περιέλιξης επαγωγισμού (armature winding) μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο (Σχ. 3.91). Το στροφείο (armature) είναι το περιστρεφόμενο μέρος ή ρότορας (rotor), και η περιέλιξη διεγέρσεως (field winding) είναι το σταθερό μέλος ή επαγωγέας (stator). Η περιέλιξη επαγωγισμού είναι συνδεδεμένη σε έναν συλλέκτη (commutator), ο οποίος είναι ένας κύλινδρος που αποτελείται από μεμονωμένα τμήματα χαλκού τα οποία βρίσκονται πάνω στον άξονα στροφείου. Οι ψήκτρες (carbon brushes) που είναι συνδεδεμένες στους ακροδέκτες του κινητήρα στηρίζονται αντίθετα προς την επιφάνεια του μεταλλάκτη και επιτρέπουν τη μεταφορά συνεχούς ρεύματος στην περιστρεφόμενη περιέλιξη (rotating winding). Σε έναν κινητήρα η ηλεκτρική ενέργεια προσδίδεται στο ρότορα από μια εξωτερική συνεχούς ρεύματος πηγή, και ο κινητήρας τη μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια [3].

Προκειμένου να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος (DC) απαιτούνται οι εξισώσεις ροπής και τάσης. Η εξίσωση σχετίζει τη ροπή με το ρεύμα του στροφείου (armature current):

$$T = K_f \phi I \quad (3-69)$$

και η εξίσωση τάσης σχετίζει την τάση επαγωγής της περιέλιξης επαγωγισμού με την ταχύτητα περιστροφής:

$$E = K_f \phi \omega \quad (3-70)$$

όπου τ , η μαγνητική στρέψη σε N.m

ϕ , η ροή ανά πόλο σε Wb

I , το ρεύμα στο κύκλωμα του στροφείου σε A

E , η τάση επαγωγής (emf) σε V

ω , η γωνιακή ταχύτητα σε rad/s

K_f , σταθερά που εξαρτάται από τη σχεδίαση της περιέλιξης

Για ένα κινητήρα, η τάση που εισάγεται, V , προσδίδεται στην περιέλιξη και η αντίστοιχη εξίσωση τάσης γίνεται:

$$V - IR = K_f \phi \omega \quad (3-71)$$

όπου R είναι η αντίσταση του ρεύματος του πηνίου και IR , η πτώση τάσης στην αντίσταση αυτή. Η αυτεπαγωγή του πηνίου είναι αμελητέα στην εξίσωση (3-71).

Πολλαπλασιάζοντας τις Εξισώσεις (3-69) και (3-71) προκύπτει η εξίσωση της ισχύος:

$$P = \omega T = VI - I^2 R \quad (3-72)$$

όπου P , η μηχανική ενέργεια που προκύπτει, VI , η ηλεκτρική ενέργεια που εισάγεται και $I^2 R$, η απώλεια της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) διακρίνονται σε κινητήρες με παράλληλη, σειριακή και σύνθετη σύνδεση σύμφωνα με τη μέθοδο σύνδεσης του πεδίου. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) που διεγείρονται ξεχωριστά με σταθερό πεδίο διέγερσης είναι κατάλληλοι για εφαρμογές ελέγχου, εφ' όσον παρέχουν ομαλό έλεγχο της ταχύτητας για ένα μεγάλο εύρος (Σχ. 3.91). Το πεδίο του κινητήρα διεγείρεται από μια ξεχωριστή σταθερή παροχή τάσης συνεχούς ρεύματος και επομένως η ροή ϕ γίνεται επίσης σταθερή, οπότε οι Εξισώσεις (3-69) και (3-71) μπορούν να γραφούν:

$$T = K_t I \quad (3-73)$$

$$V - IR = K_v \omega \quad (3-74)$$

Οι παράμετροι K_t και K_v αναφέρονται ως οι σταθερές ροπής και τάσης.

Οι σύγχρονοι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) χρησιμοποιούν ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο (permanent magnet field-PM) και όχι ένα πεδίο που διεγείρεται εξωτερικά [5]. Και οι δυο τύποι αναφέρονται ως σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) και χαρακτηρίζονται από τις εξισώσεις (3-73) και (3-74). Το μόνιμο μαγνητικό πεδίο (PM) δεν απαιτεί μια πηγή τάσης και δημιουργεί υψηλότερα προβλήματα απόδοσης και λιγότερα θερμικά προβλήματα.

Εάν ένας σερβοκινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC) οδηγεί ένα μηχανικό φορτίο που αποτελείται από δυναμικά και στατικά συστατικά, εξισώνοντας τη στρέψη που ασκείται με το φορτίο έχουμε:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + T_s \quad (3-75)$$

όπου J είναι η συνδυασμένη ροπή αδράνειας του κινητήρα και του φορτίου και T_s , το στατικό φορτίο που οφείλεται στις δυνάμεις τριβής και κοπής στις μηχανουργικές κατεργασίες.

Η απαλοιφή των J και T από τις εξισώσεις (3-73) έως την (3-75) και η αναδιάταξη των όρων, έτσι ώστε να διαχωρίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές, δίδουν την εξίσωση της ταχύτητας:

$$\tau_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{1}{K_v} V - \frac{R}{K_t K_v} T_s \quad (3-76)$$

όπου τ_m είναι η μηχανική σταθερά χρόνου του κινητήρα και προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\tau_m = \frac{JR}{K_t K_v} \quad (3-77)$$

Ο μετασχηματισμός Laplace για την Εξίσωση (3-76) είναι:

$$\omega(s) = \frac{K_m V(s) - (RK_m / K_t) T_s(s)}{1 + s \tau_m} \quad (3-78)$$

όπου K_m , η απόδοση του κινητήρα (gain of the motor) που καθορίζεται από την σχέση $K_m = 1/K_v$. Η λύση της Εξίσωσης (3-78) ως προς το χρόνο εξαρτάται από την εφαρμοσμένη τάση και ροπή. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι ο κινητήρας αρχικά δεν λειτουργεί, $T_s = 0$ και ότι εφαρμόζεται μια βηματική τάση από V volts στο τελικό στροφείο (armature), η λύση είναι:

$$\omega(t) = K_m V (1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (3-79)$$

Η απόκριση του κινητήρα περιγράφεται από μια σταθερή ταχύτητα $K_m V$ και μια σταθερά χρόνου τ_m που δίδεται από την εξίσωση (3-77).

Σε αρκετές μηχανές ο οδηγός κοχλίας (lead screw) κινείται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Η σχέση μετάδοσης K_g ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της

ταχύτητας ενός οδηγού κοχλία ω_L και της ταχύτητας του κινητήρα ω :

$$K_g = \frac{\omega_L}{\omega} \quad (3-80)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε τη σταθερά χρόνου μέσω της εξίσωσης (3-77), η αδράνεια του οδηγού κοχλία πρέπει να αναφέρεται στο περίβλημα του κινητήρα. Επομένως η αδράνεια J στην εξίσωση (3-73) είναι:

$$J = J_r + K_g^2 J_l \quad (3-81)$$

όπου J_r είναι η αδράνεια του ρότορα και J_l , η αδράνεια του οδηγού κοχλία και του φορτίου. Σημειώστε ότι η ροπή του φορτίου πρέπει επίσης να αναφέρεται στο περίβλημα του κινητήρα:

$$T_s = K_g T_l \quad (3-82)$$

όπου T_l , η στρέψη του φορτίου στον οδηγό κοχλία [9].

Οι Βηματικοί Κινητήρες (Stepping Motors)

Ο βηματικός κινητήρας (Stepping Motor-SM) είναι ένας «ψηφιακός» κινητήρας. Μετατρέπει μια σειρά παλμών εισόδου σε μια αναλογική γωνιακή μετακίνηση και περιστρέφεται κατά μια γωνιακή αύξηση, ή ένα βήμα, για κάθε παλμό εισόδου. Η θέση της ατράκτου καθορίζεται από τον αριθμό των παλμών ενώ η ταχύτητα της ατράκτου είναι ανάλογη της συχνότητας των παλμών. Η ταχύτητα της ατράκτου σε βήματα ανά δευτερόλεπτο είναι ίση με τη συχνότητα εισόδου σε παλμούς ανά δευτερόλεπτο (pulses per second-pps).

Για να επιτύχουμε την βέλτιστη απόδοση του βηματικού κινητήρα, απαιτείται ένας ηλεκτρονικός διακόπτης ή μεταφραστής ως μέρος της μονάδας (drive unit). Η μονάδα περιέχει ένα κατευθυντήριο κύκλωμα (steering circuit) και έναν ενισχυτή ισχύος (power amplifier). Η μονάδα κατευθύνσεως μετατρέπει τον παλμό εισόδου στην σωστή σειρά εναλλαγής των διακοπών που απαιτούνται στον βηματικό κινητήρα. Οι κατευθυντήριοι παλμοί μετατρέπονται σε παλμούς ισχύος με κατάλληλη αύξηση του χρόνου, της διάρκειας και του εύρους για την οδήγηση της περιέλιξης του κινητήρα.

Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC Motors)

Ορισμένοι κατασκευαστές εργαλειομηχανών CNC χρησιμοποιούν συγχροκίνητες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC-synchromotors) για τις εργαλειομη-

χανές [9]. Αντίθετα με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) λειτουργούν χωρίς ψήκτρες, οπότε απαλείφουν ένα από τα κύρια προβλήματα συντήρησης που υπάρχουν στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η ταχύτητα του κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος ελέγχεται μέσω του χειρισμού της *συχνότητας* τάσης που τροφοδοτείται στον κινητήρα, και όχι μέσω του *μεγέθους* της τάσης όπως στους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος. Ο έλεγχος της συχνότητας απαιτεί τη χρησιμοποίηση ενός ηλεκτρικού *αντιστροφέα (inverter)*. Ο μετασχηματιστής περιλαμβάνει τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος και ένα κύκλωμα που μετατρέπει την παραγόμενη τάση συνεχούς ρεύματος (DC) σε τάση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με μια συνεχώς ελεγχόμενη συχνότητα [9].

Μηχανισμοί Μετάδοσης (Transmissions)

Οι μηχανισμοί μετάδοσης είναι μηχανολογικά συστήματα που παρέχουν κίνηση σε άλλα μηχανολογικά εξαρτήματα χρησιμοποιώντας ισχύ από τους κινητήρες. Οι μηχανισμοί μετάδοσης περιλαμβάνουν κιβώτια ταχυτήτων, οδοντωτούς κανόνες με οδοντωτούς τροχούς, οδηγούς κοχλίων και παξιμάδια [10].

Μηχανισμοί Κοχλίων και Παξιμαδιών (Leadscrew and Nut Drives)

Οι μηχανισμοί κοχλίων και παξιμαδιών είναι τυπικοί μηχανισμοί μετατροπής της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική και βρίσκονται διαθέσιμοι στην αγορά. Έχουν σταθερούς, μικρούς λόγους μετάδοσης έτσι ώστε να επιτρέπουν αργές, απαλές και ακριβείς κινήσεις. Επί πλέον η ικανότητα «αυτοσυγκράτησης» αυτών των μηχανισμών, τους κάνει εφαρμόσιμους σε οριζόντιες και κάθετες τοποθετήσεις. Η μικρή απόδοση, που σχετίζεται με την τριβή ολίσθησης των μηχανισμών κοχλίων και παξιμαδιών, τους κάνει μη πρακτικούς για να χρησιμοποιηθούν ως κύριοι μηχανισμοί κίνησης. Όμως για τους βοηθητικούς μηχανισμούς αυτό το μειονέκτημα δεν είναι σημαντικό.

Οι μηχανισμοί κοχλίων και παξιμαδιών χρησιμοποιούν ένσφαιρα έδρανα (ball bearings) έτσι ώστε οι παράμετροι σχεδιασμού να είναι παρόμοιοι με αυτούς των ένσφαιρων εδράνων: η φθορά των σφαιρών, η ακρίβεια, η δημιουργία θερμότητας, η προφόρτιση κ.λ.π. [10] είναι δυνατόν να επιλεγούν από το βαθμό της ακρίβειας, ο οποίος συνήθως είναι ανάλογος του κόστους. Η στιβαρότητα του συστήματος μετάδοσης μηχανισμών κοχλίων ελέγχεται από την προφόρτιση μεταξύ των παξιμαδιών και των κοχλίων. Υπάρχει μια επί-

πτωση, όταν εξετάζουμε την στιβαρότητα, εφ' όσον αυξάνοντας την προφόρτιση αυξάνεται επίσης η στατική και η ιξώδης τριβή.

Μηχανισμοί Ένσφαιρων Κοχλιών και Παξιμαδιών (Ball Screws and Nut Drives)

Οι μηχανισμοί ένσφαιρων παξιμαδιών και κοχλιών έχουν μικρή τριβή, υψηλή απόδοση, και μπορούν να προφορτισθούν ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις νεκρές διαδρομές (backlash) για ακριβείς παλινδρομικές κινήσεις [10]. Σε αυτόν τον μηχανισμό, οι σφαίρες "τρέχουν" κατά μήκος του σπειρώματος μεταξύ του κοχλία και του παξιμαδιού [9] διαμέσου ενός περάσματος με επιστροφή (Σχ. 3.92). Τα πλεονεκτήματα που σχετίζονται με τους ένσφαιρους κοχλίες τους έχουν κάνει δημοφιλείς για πολλούς μηχανισμούς εργαλειομηχανών.



Σχήμα 3.92 Ένσφαιροι Κοχλίες και Οδηγοί Παξιμαδιών [9]

Οδοντωτοί Κανόνες με Οδοντωτούς Τροχούς (Rack and Pinion Drives)

Οι οδοντωτοί κανόνες με οδοντωτούς τροχούς συνήθως χρησιμοποιούνται για γρήγορες, δυναμικές αλλά μάλλον μη ακριβείς κινήσεις [10]. Έχουν μικρό κόστος και κατασκευάζονται εύκολα αλλά συχνά έχουν υψηλούς λόγους μετάδοσης, οι οποίοι δεν είναι ομοίμορφοι εξ αιτίας λαθών στην οδόντωση. Η υψηλή απόδοση αυτών των μηχανισμών, τους βοηθά να μεταφέρουν ένα αρκετά μεγάλο ποσό ισχύος. Επομένως είναι κατάλληλοι για τις εργαλειομηχα-

νές. Η έλλειψη της ικανότητας αυτοσυγκράτησης λόγω τριβών και αδράνειας (self-braking) αυτών των μηχανισμών δεν επιτρέπει την χρησιμοποίησή τους για κατακόρυφη τοποθέτηση. Ωστόσο, ο κοχλίας και τα παξιμάδια μπορούν να εγκατασταθούν παράλληλα με έναν οδοντωτό κανόνα με οδοντωτό τροχό, ώστε να εμφανισθεί το χαρακτηριστικό αυτοσυγκράτησης.

Μετάδοση με Οδοντωτό Κανόνα και Ατέρμονα Κοχλία (Worm and Rack Drives)

Έχουν αρκετά πιο μικρούς λόγους μετάδοσης από τους οδοντωτούς κανόνες με οδοντωτούς τροχούς και παρέχουν πιο απαλή κίνηση [10]. Ωστόσο κατασκευάζονται πιο δύσκολα από ότι οι μηχανισμοί οδοντωτών ράβδων με οδοντωτούς τροχούς.

Οδηγοί με μικρή μετατόπιση (Small Displacement Drives)

Οι μηχανισμοί με μικρή μετατόπιση προκαλούν ελάχιστη μετατόπιση και συνήθως χρησιμοποιούνται στις μηχανές λείανσης [10]. Οι περισσότεροι από αυτούς τους χρησιμοποιούνται για εξαιρετικά ακριβείς εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλη στιβαρότητα και μετατόπιση. Ορισμένοι τύποι με μικρή μετατόπιση είναι:

- *Θερμικής Διαστολής (Thermal-Expansion Drives)*: Η θέρμανση προκαλεί την παραμόρφωση ενός θερμικού στοιχείου οπότε παρουσιάζονται μικρές μετατοπίσεις.
- *Μαγνητοσυστολής (Magnetostriction Drives)*: Η μετατόπιση μιας σιδηρομαγνητικής ράβδου ποικίλει ανάλογα με τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου που περιβάλλει τη ράβδο.
- *Με Ελαστικούς Συνδέσμους (Elastic-Link Drives)*: Ένας ελαστικός σύνδεσμος, όπως ένα φυλλωτό ελατήριο, κάμπτεται αρχικά με την χρήση υδραυλικής ισχύος. Το υδραυλικό λάδι επιτρέπεται να αποστραγγισθεί ελεύθερα μέσω μιας οπής, που βαθμιαία ευθυγραμμίζει τον ελαστικό σύνδεσμο και προκαλεί ομαλές κινήσεις.

3.4 Έλεγχος των Εργαλειομηχανών και Αυτοματισμός (Machine Tool Control and Automation)

Οι σημαντικότεροι λόγοι για την χρήση αυτοματισμών σε ένα σύστημα παραγωγής είναι:

- *Μεγαλύτερη παραγωγικότητα ως αποτέλεσμα υψηλότερου ρυθμού παραγωγής (Higher productivity as a result of higher production rate)*. Στα

συστήματα μαζικής παραγωγής, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία και στις βιομηχανίες καταναλωτικών αγαθών, τα πολύπλοκα εξαρτήματα, η κατασκευή των οποίων θα απαιτούσε ορισμένες ώρες για να κατασκευασθούν (με μη αυτόματα ή με ημι-αυτόματα συστήματα), μπορούν να κατασκευασθούν μέσα σε δευτερόλεπτα από τα αυτόματα συστήματα όπως είναι οι γραμμές παραγωγής. Αυτή η αυτοματοποίηση έχει σχεδιασθεί για να μειώσει το χρόνο διαχείρισης των υλικών ή τον «νεκρό» χρόνο που το εξάρτημα ευρίσκεται μεταξύ διεργασιών. Στην βιομηχανία επεξεργασίας μετάλλων τα εξαρτήματα συχνά αναλώνουν μόνο το 5-15% του χρόνου τους σε διεργασίες που προσθέτουν αξία, ενώ ο υπόλοιπος χρόνος τους καταναλώνεται σε ενδιάμεση διαχείριση, μετακίνηση και αναμονή. Η αυτοματοποίηση μπορεί να αυξήσει σημαντικά το ρυθμό παραγωγής του συστήματος αλλά αυξάνει επίσης την απαιτούμενη επένδυση αρχικού κεφαλαίου, ενώ μειώνει την ευελιξία του συστήματος.

- *Σταθερή ποιότητα (Consistent quality)*. Ο στόχος αυτός περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση των ανθρώπινων λαθών και ασυνεπειών που οδηγούν σε αποκλίσεις ποιότητας. Οι παραγωγικές διεργασίες που πραγματοποιούνται από μη αυτόματα συστήματα και η ποιότητα των τελικών εξαρτημάτων επηρεάζεται από τις ικανότητες και τις δυνατότητες του ανθρώπινου χειριστή. Ο αυτοματισμός, με στόχο την σταθερή ποιότητα, μπορεί όμως να μειώσει την ευελιξία του συστήματος, εφ' όσον ο ανθρώπινος παράγοντας είναι ένας από τους πιο ευέλικτους στις παραγωγικές διεργασίες.
- *Βελτιωμένο περιεχόμενο και συνθήκες εργασίας (Better work content)*. Εργασίες, επαναληπτικές ή επικίνδυνες, μπορούν να αυτοματοποιηθούν, ώστε να απαλλαγούν από αυτές οι άνθρωποι. Αυτός ο «κουμανιστικός» αυτοματισμός δίνει γενικότερη ώθηση στην παραγωγική διαδικασία, κάνοντάς την περισσότερο αποτελεσματική.

Εφ' όσον η αυτοματοποίηση βελτιώνει την παραγωγικότητα αλλά μειώνει την ευελιξία, σημαντική προσπάθεια έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης έχει γίνει και γίνεται ακόμη με στόχο τον ευέλικτο αυτοματισμό. Αποτέλεσμα αυτών των προσπαθειών είναι η ανάπτυξη των Ευέλικτων Συστημάτων Παραγωγής (Flexible Manufacturing Systems, FMS) και η χρήση ρομπότ, τα οποία μπορούν να προγραμματισθούν, ώστε να εκτελέσουν διαφορετικές εργασίες. Εκτός από την τεχνολογική πρόοδο, τα μέτρα που παίρνονται για την αυτοματοποίηση είναι συχνά δύσκολο να δικαιολογηθούν οικονομικά, ειδικά όταν η αφαίρεση του κόστους εργασίας θεωρείται η αρχική αιτία. Πράγματι, σε πολλές βιομηχανίες το κόστος παραγωγής επηρεάζεται πολύ λίγο από το κόστος εργασίας. Για παράδειγμα, στην βιομηχανία επεξεργασίας μετάλλων το ποσοστό των άμεσων εργατικών κατά μέσο όρο είναι το 10% του συνολικού κόστους παραγωγής. Αυτό σημαίνει πως η εισαγωγή του αυτοματισμού μόνο για

μείωση ή απαλοιφή του άμεσου εργατικού κόστους δεν είναι σωστή από οικονομική άποψη.

Η αυτοματοποίηση των εργαλειομηχανών αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την εισαγωγή του αυτοματισμού στην παραγωγή. Στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα συζητηθεί ο αριθμητικός έλεγχος και ο προγραμματισμός των εργαλειομηχανών, μαζί με τον έλεγχο των διαδικασιών και τα ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής.

3.4.1 Αριθμητικά Ελεγχόμενες Εργαλειομηχανές (Numerically Controlled Machine Tools)

Μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στην αυτοματοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας είναι ο *αριθμητικός έλεγχος (Numerical Control)*. Τα δεδομένα που απαιτούνται για να παραχθεί ένα εξάρτημα καλούνται τεχνολογικό πρόγραμμα του εξαρτήματος. Οι μηχανές αριθμητικού ελέγχου (NC) εστιάζονται αρχικά στην παραγωγή σύνθετων εξαρτημάτων σε μεγάλες ποσότητες. Ωστόσο, εξαιτίας της ανάπτυξης νέων και αποδοτικότερων γλωσσών προγραμματισμού, οι μηχανές αριθμητικού ελέγχου (NC) μπορούν να χρησιμοποιούνται και για μικρότερες παρτίδες εξαρτημάτων. Ένα σύστημα αριθμητικού ελέγχου εργαλειομηχανής περιλαμβάνει κατ' αρχήν την μονάδα ελέγχου της μηχανής (machine control unit-MCU). Η μονάδα ελέγχου της μηχανής (MCU) χωρίζεται [9] στην μονάδα επεξεργασίας των δεδομένων (data processing unit-DPU) και την μονάδα ελέγχου ανακυκλώσεων (control-loops unit-CLU). Η μονάδα επεξεργασίας των δεδομένων (DPU) επεξεργάζεται τα κωδικοποιημένα δεδομένα, που διαβάζονται από την κασέτα ή από άλλα μέσα αποθήκευσης και παρέχει τις πληροφορίες σχετικά με τη θέση κάθε άξονα, την κατεύθυνση της κίνησης, την πρόωση, και την βοηθητική λειτουργία η οποία ελέγχει τα σήματα στην μονάδα ελέγχου ανακυκλώσεων (CLU).

Η μονάδα ελέγχου ανακυκλώσεων (CLU) θέτει σε λειτουργία τους μηχανισμούς οδήγησης της μηχανής, λαμβάνει τα σήματα της πραγματικής θέσης και ταχύτητας του κάθε άξονα και δείχνει πότε έχει ολοκληρωθεί μια διαδικασία. Η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων (DPU) διαβάζει σειριακά τα δεδομένα, όταν κάθε γραμμή έχει ολοκληρώσει την εκτέλεση, όπως σημειώθηκε από την μονάδα ελέγχου ανακυκλώσεων (CLU).

Ο έλεγχος των κινήσεων των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (NC) ολοκληρώνεται με τη μετατροπή των κωδικών NC σε εντολές της μηχανής. Οι κώδικες αριθμητικού ελέγχου (NC) μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

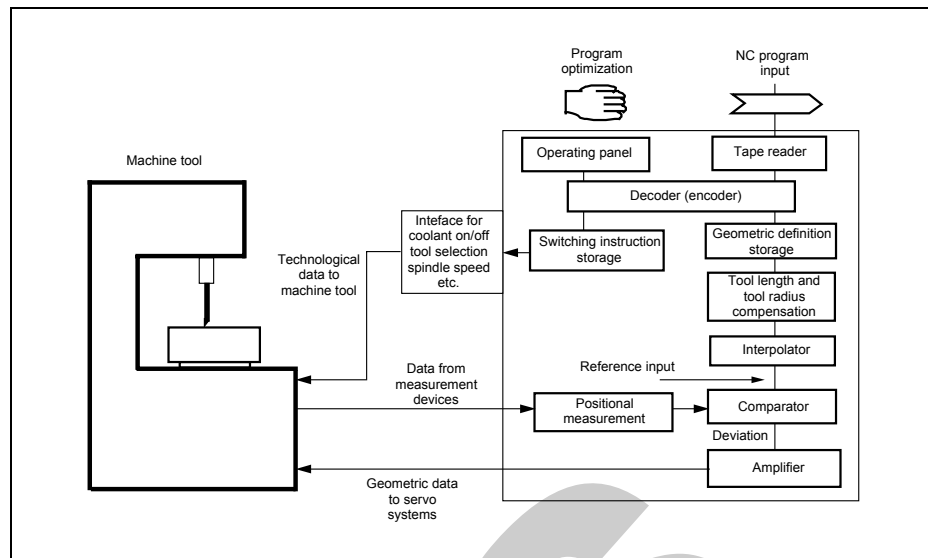
- (1) εντολές για τον έλεγχο μεμονωμένων στοιχείων της μηχανής, όπως έλεγχος έναρξης και παύσης λειτουργίας, επιλογή της ταχύτητας του άξονα, αλλαγή του εργαλείου, έλεγχος έναρξης και λήξης της ψύξης—οι εργασίες αυτές πραγματοποιούνται με την αποστολή ηλεκτρικών παλμών στο σύστημα ηλεκτρονόμου (relay system) ή στο δίκτυο λογικού ελέγχου— και

(2) εντολές για τον έλεγχο της σχετικής μετατόπισης του κατεργαζόμενου εξαρτήματος και των εργαλείων. Οι εντολές αυτές αποτελούνται από πληροφορίες όπως οι άξονες και η απόσταση μετακίνησης σε κάθε χρονική στιγμή. Οι εντολές μεταφράζονται σε εντολές ελέγχου των μηχανών, οι οποίες εκτελούνται από το ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα ελέγχου.

Οι ελεγκτές αριθμητικού ελέγχου (NC) κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των μικροϋπολογιστών. Τέτοιοι ελεγκτές καλούνται *ελεγκτές αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή* (CNC). Τα συστήματα αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή (CNC) είναι πιο ευέλικτα από ό,τι τα απλά συστήματα αριθμητικού ελέγχου (NC) επειδή επιτρέπουν την συγγραφή, αποθήκευση στη μνήμη και στιγμιαία ανάκληση των προγραμμάτων. Οι μηχανές αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή (CNC) επεξεργάζονται πιο σύνθετα σχήματα από ό,τι οι μηχανές αριθμητικού ελέγχου (NC) και παρέχουν κυκλική παρεμβολή και τυποποιημένους κύκλους προγραμματισμού. Οι ελεγκτές αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή (CNC) έχουν εφαρμοσθεί σχεδόν σε κάθε τύπο εργαλειομηχανής, όπως: τόνους, φρέζες, λειαντικές μηχανές, κ.λ.π. Στις δυνατότητες των σύγχρονων εργαλειομηχανών περιλαμβάνονται συστήματα αλλαγής εργαλείων παλετών και κατεργαζόμενων εξαρτημάτων. Τα χαρακτηριστικά των ελεγκτών περιλαμβάνουν εσωτερικούς παρεμβολείς, γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας και επικοινωνία δεδομένων.

Αν και στην πλειοψηφία των εφαρμογών αριθμητικού ελέγχου (NC) χρησιμοποιούνται διάτρητες ταινίες, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μεταφοράς δεδομένων αριθμητικού ελέγχου (NC) μέσω δικτύων επικοινωνίας. Ένας αριθμός από προγράμματα αριθμητικού ελέγχου μπορούν να αποθηκευθούν στην μνήμη του μικροϋπολογιστή. Εάν ο αριθμός των εξαρτημάτων και των σχετικών τεχνολογικών προγραμμάτων υπερβαίνουν τη χωρητικότητα της μνήμης του υπολογιστή (CNC), επιπρόσθετοι δίσκοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν ή η αρχική μηχανή μπορεί να εξοπλισθεί περαιτέρω με κάποιον υπολογιστή για να φορτωθούν τα απαιτούμενα τεχνολογικά προγράμματα εξαρτημάτων. Εάν ένας απλός υπολογιστής χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί τεχνολογικά προγράμματα των εξαρτημάτων σε ένα πλήθος μηχανών αριθμητικού ελέγχου, το σύστημα αυτό αναφέρεται ως σύστημα άμεσου αριθμητικού ελέγχου (direct numerical control system DNC). Ο υπολογιστής αυτός μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να «φορτώσει» τις οδηγίες στο σύστημα διαχείρισης.

Στον ελεγκτή μιας εργαλειομηχανής αριθμητικού ελέγχου περιλαμβάνεται (Σχ. 3.93): α) σύστημα πίνακα/πληκτρολογίου ή σύστημα ανάγνωσης ταινίας που επιτρέπει την εισαγωγή των αλφαριθμητικών οδηγιών στη μηχανή, β) αποκωδικοποιητής/κωδικοποιητής που λαμβάνει τα δεδομένα, που αρχικά εισάγονται μέσω του λειτουργικού πίνακα του συστήματος ανάγνωσης της ταινίας και τα αποθηκεύει σε δυο ξεχωριστές θέσεις μνήμης: μια για τα δεδομένα που αναφέρονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξαρτήματος και μια για τα δεδομένα των διεργασιών που περιλαμβάνουν πληροφορίες για την πρόωση, τις ταχύτητες των αξόνων, και άλλες κατασκευαστικές παραμέτρους. Τα δε-



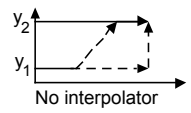
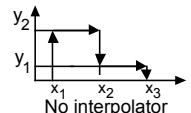
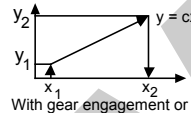
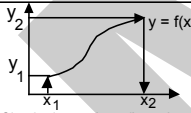
Machine tool = Εργαλειομηχανή
 Technological data to machine tool = Τεχνολογικά δεδομένα προς την εργαλειομηχανή
 Interface for coolant on/off, tool selection, spindle speed etc. = Μονάδα διασύνδεσης για την τροφοδοσία ψυκτικού υγρού (on/off), την επιλογή του κοπτικού, την ρύθμιση της ταχύτητας της απράκτου κλπ.
 Data from measurement devices = Δεδομένα από μετρητικές συσκευές
 Geometric data to servo systems = Γεωμετρικά δεδομένα προς τα σερβοσυστήματα
 Program optimisation = Βελτιστοποίηση προγράμματος
 Operating panel = Πίνακας χειρισμού
 Decoder = Αποκωδικοποιητής
 Encoder = Κωδικοποιητής

Switching instruction storage = Αποθήκευση οδηγίας χειρισμού διακόπτη
 Reference input = Εισαγωγή αναφοράς
 Positional measurement = Μέτρηση θέσης
 NC program input = Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου
 Tape reader = Αναγνώστης ταινίας
 Geometric definition storage = Αποθήκευση γεωμετρικών ορισμών
 Tool length and tool radius compensation = Αντιστάθμιση μήκους και ακτίνας του εργαλείου (κοπτικού) κατεργασίας
 Interpolator = Παρεμβολέας
 Comparator = Διαδικασία ή μηχανισμός σύγκρισης
 Deviation = Απόκλιση
 Amplifier = Ενισχυτής

Σχήμα 3.93 Λειτουργίες Αριθμητικού Ελέγχου

δομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν επίσης πληροφορίες για τις κινήσεις των εργαλείων. Το ίδιο σύνολο των δεδομένων χρησιμοποιείται επίσης για να καθορίσει το μήκος των εργαλείων, την ακτίνα των εργαλείων, την αντιστάθμιση των εργαλείων κ.λ.π. που απαιτούνται στις διάφορες διεργασίες. Τα δεδομένα των διεργασιών αποτελούνται από λειτουργίες για την ρύθμιση των ταχυτήτων πρόωσης, των ταχυτήτων των αξόνων, των αλλαγών των εργαλείων κ.λ.π. Οι λειτουργίες αυτές αρχίζουν στέλνοντας τις εντολές σε μια μονάδα επικοινωνίας, όπου συγκρίνονται με τα σήματα ανάδρασης από την εργαλειομηχανή και στη συνέχεια μεταφράζονται στα κατάλληλα σήματα ελέγχου για το αντίστοιχο τμήμα που πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία. Επίσης, παρέχεται ένας σύνδεσμος με διακόπτες ασφαλείας που χρη-

σιμοποιούνται ως προφυλάξεις για να σταματήσουν τη λειτουργία της μηχανής σε περίπτωση αντικρουόμενων οδηγιών, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν ζημιά. Τα γεωμετρικά δεδομένα μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο έπειτα από την εφαρμογή ορισμένων ρυθμίσεων, ώστε να προσαρμόζονται στη συγκεκριμένη σχέση εργαλείου-εξαρτήματος. Η προσαρμογή αυτή επιτρέπει στον προγραμματιστή να συντάξει ένα πρόγραμμα ανεξάρτητο από την πραγματική θέση του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος κ.λ.π. Διάφοροι διορθωτικοί υπολογισμοί πραγματοποιούνται και αφορούν στις διαστάσεις των εργαλείων: όπως το μήκος του τρυπανιού, το μέγεθος του τόννου ή η διάμετρος του εργαλείου της φρέζας (εκγλυφάνου) κ.λ.π.

Type of Control	Problem	Tool Action	Application
Point-to-point or positional control		Not cutting during table movement	Drilling, spot welding
Line-motion control (simple)		Cutting during table movement	Parallel turning, milling
Line-motion control with linear interpolation		Cutting during table movement	Turning Milling
Continuous path or contour control		Cutting during table movement	Turning, Milling, Flame cutting (any contour)

Type of control = Τύπος ελέγχου

Point-to-point or positional control = Έλεγχος σημείου προς σημείο ή έλεγχος θέσης

Line motion control (simple) = Έλεγχος γραμμικής κίνησης (απλός)

Line motion control with linear interpolation = Έλεγχος γραμμικής κίνησης με γραμμική παρεμβολή

Continuous path or contour control = Έλεγχος συνεχούς διαδρομής ή έλεγχος περιγράμματος

Problem = Πρόβλημα

No interpolator = Χωρίς παρεμβολέα

Linear interpolator = Γραμμικός παρεμβολέας

With gear engagement = Με εμπλοκή γραναζωτού μηχανισμού

Circular interpolator (based on equation of order 2

or higher) = Κυκλικός παρεμβολέας (που βασίζεται σε εξίσωση 2ης ή μεγαλύτερης τάξης)

Tool action = Ενέργεια εργαλείου (κοπτικού)

Not cutting during table movement = Απουσία κοπής κατά την διάρκεια της κίνησης της τραπέζης

Cutting during table movement = Κοπή κατά την διάρκεια της κίνησης της τραπέζης

Application = Εφαρμογή

Drilling = Διάτρηση

Spot welding = Σημειακή συγκόλληση (ποντάρισμα)

Parallel turning = Παράλληλο τορνίρισμα

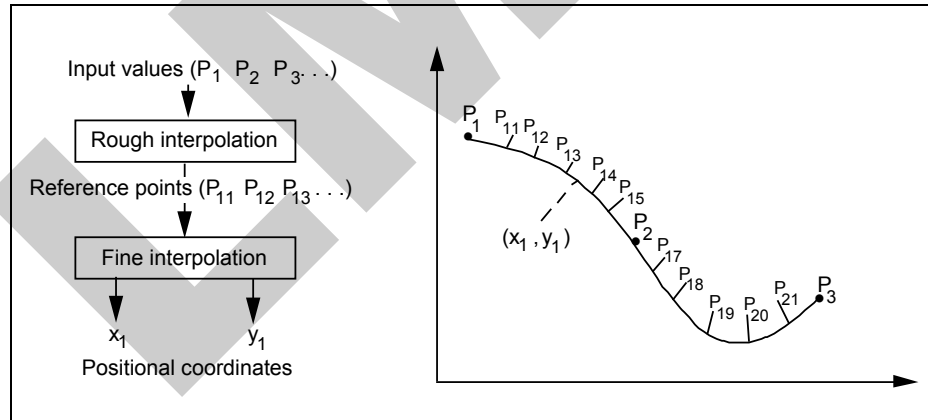
Milling = Εκγλύφωση (φρεζάρισμα)

Turning = Τορνίρισμα

Flame cutting (any contour) = Κοπή (οποιοδήποτε περιγράμματος) με χρήση φλόγας

Σχήμα 3.94 Κατηγορίες των Στρατηγικών Ελέγχου

Η πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου σχετίζεται άμεσα με τον τύπο των κινήσεων που μπορούν να αποδώσουν. Οι κύριες κατηγορίες (Σχ. 3.94) των στρατηγικών ελέγχου και παρεμβολών είναι: έλεγχος θέσεως από σημείο σε σημείο (point to point), έλεγχος γραμμικής παρεμβολής (linear interpolation) και συνεχούς διαδρομής (continuous path). Ο έλεγχος από σημείο σε σημείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν οι απαιτήσεις αφορούν απλά στη θέση ενός εργαλείου, όπως στη διεργασία διάτρησης ή στη σημειακή συγκόλληση. Όταν χρησιμοποιείται ο έλεγχος θέσης, το εργαλείο δεν δραστηριοποιείται όταν μετακινείται από τη μια θέση στην άλλη και η διαδρομή είναι τυχαία [35]. Ο προγραμματιστής πρέπει να γνωρίζει, ότι τα εμπόδια δεν θα υπολογίζονται όταν χρησιμοποιείται αυτός ο έλεγχος. Όταν εφαρμόζεται ο γραμμικός έλεγχος, η τελική θέση της μετατόπισης επιτυγχάνεται σε ευθεία γραμμή και το εργαλείο μπορεί να βρίσκεται σε λειτουργία κατά τη διάρκεια της κίνησης. Οι μετακινήσεις των εργαλείων και της τράπεζας της μηχανής, σε κάθε επιθυμητή κυκλική ή καμπύλη διαδρομή, μπορεί να πραγματοποιηθούν με συνεχή έλεγχο της διαδρομής, όπου τα εργαλεία της μηχανής και οι οδηγοί μετακινούνται ταυτόχρονα και συντονισμένα ώστε να βρίσκονται στην επιθυμητή διαδρομή. Οι περισσότεροι συνεχείς έλεγχοι των διαδρομών βασίζονται σε ευθύγραμμες μετακινήσεις και καμπύλες, που παράγονται από το συνδυασμό μιας σειράς χορδών. Ένας παρεμβολέας πραγματοποιεί τους απαραίτητους υπολογισμούς για να μετατρέψει τις δεδομένες πληροφορίες μετατόπισης σε μια σειρά συγχρονισμένων μετακινήσεων κατά μήκος του άξονα με την κατάλληλη κατεύθυνση, ταχύτητα και πρόωση για τις μονάδες πρόωσης. Οι πληροφορίες από τον παρεμβολέα τροφοδοτούνται στον συγκριτή (comparator), όπου συγκρί-



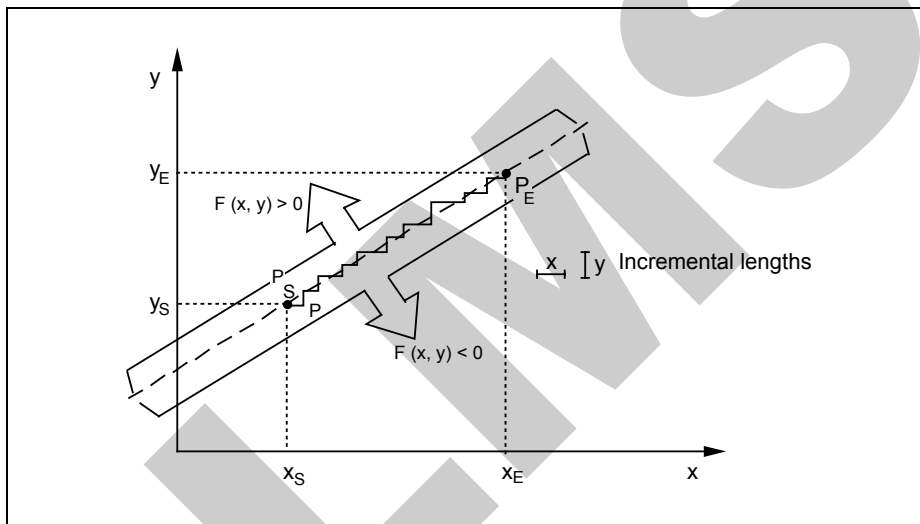
Input values = Εισαγωγή τιμών (π.χ., για μια σειρά μεταβλητών)
 Rough interpolation = Χονδρική (πρόχειρη) παρεμβολή

Fine interpolation = Εκλεπτυσμένη (λεπτομερέστερη) παρεμβολή
 Reference points = Σημεία αναφοράς
 Positional coordinates = Συντεταγμένες θέσης

Σχήμα 3.95 Παρεμβολή σε Δύο Στάδια

νονται με τις μετρήσεις θέσης. Η απόκλιση ενισχύεται με τη βοήθεια ενός ενισχυτή και επιστρέφει τις κατάλληλες εντολές σε διάφορους κινητήρες της μηχανής προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές κινήσεις.

Οι τεχνικές παρεμβολών βοηθούν ιδιαίτερα σε περιπτώσεις προγραμμάτων για εξαρτήματα σύνθετης γεωμετρίας. Στην παρεμβολή, οι γεωμετρικές πληροφορίες που σχετίζονται με μία γραμμική ή συνεχή διαδρομή ελέγχου μεταφράζονται σε συγχρονισμένες εντολές κίνησης προσανατολισμένες σε άξονες, έτσι ώστε τα διανύσματα της ταχύτητας των αξόνων ελέγχου να αντιστοιχούν στο απαιτούμενο περίγραμμα. Η λειτουργία αυτή ενσωματώνεται σε έναν επεξεργαστή γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ο οποίος έχει ως κύρια εργασία τον υπολογισμό ενός μεγάλου αριθμού «συγχρονισμένων» συντεταγμένων. Ένας τρόπος δημιουργίας της απαραίτητης παρεμβολής φαίνεται στο Σχήμα 3.95. Το πρότυπο περίγραμμα καθορίζεται από τις τιμές εισόδου P_1 , P_2 , και P_3 . Στο πρώτο στάδιο ο παρεμβολέας υπολογίζει τα σημεία αναφοράς P_{11} , P_{12} , P_{13} κ.ο.κ., ενώ στο δεύτερο στάδιο καθορίζει τις ενδιάμεσες συγχρονισμένες τιμές x και y μεταξύ των σημείων αναφοράς. Τα δυο κύρια συστήματα παρεμβολής, που χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές, είναι γραμμικά ή κυκλικά.



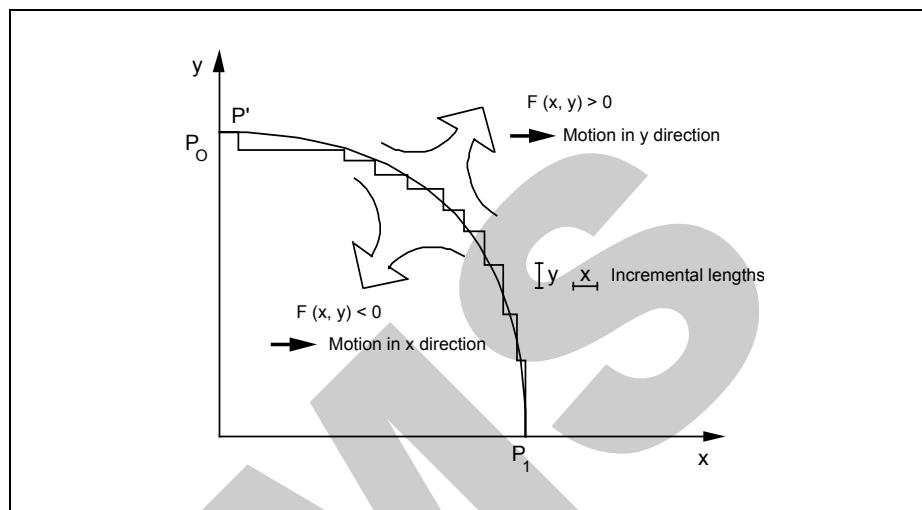
Incremental lengths = Στοιχειώδη μήκη

Σχήμα 3.96 Γραμμική Παρεμβολή

Πολλές τεχνικές παρεμβολής έχουν αναπτυχθεί για να καθορίζουν τις τιμές θέσης σε κάθε ξεχωριστό άξονα. Μια τέτοια τεχνική παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.96, όπου η ευθεία γραμμή πρόκειται να παρεμβληθεί ως προς μια θετική κατεύθυνση x μεταξύ των σημείων P_S και P_E . Αρχίζοντας από το P_S προχωρεί με αυξανόμενη συντεταγμένη στον άξονα x σε μια νέα θέση P . Μια αρνητική απόκλιση ($F < 0$) δείχνει μια διόρθωση ως προς την διεύθυνση y , ενώ μια

θετική απόκλιση ($F > 0$) δείχνει μια διόρθωση στην κατεύθυνση x . Εάν $F = 0$, η επόμενη προσαύξηση μπορεί να είναι είτε στην κατεύθυνση x είτε στην κατεύθυνση y . Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι, ότι το λάθος σχετίζεται μόνο με το αρχικό μήκος προσαύξησης και δεν μεταδίδεται μέσω της διαδικασίας παρεμβολής. Η μέθοδος αυτή μπορεί επίσης να εφαρμοσθεί στην κυκλική παρεμβολή (Σχ. 3.97).

Ελεγκτές μπορεί να χρησιμοποιούν έναν επεξεργαστή προγραμματισμού, έναν αποκλειστικά αφιερωμένο ελεγκτή κίνησης ή σε απλές περιπτώσεις ένα αναλογικό κύκλωμα. Οι ψηφιακοί ελεγκτές έχουν τρία κύρια χαρακτηριστικά:



Incremental lengths = Στοιχειώδη μήκη

Motion in y direction = Κίνηση κατά την διεύθυνση y

Motion in x direction = Κίνηση κατά την διεύθυνση x

Σχήμα 3.97 Κυκλική Παρεμβολή

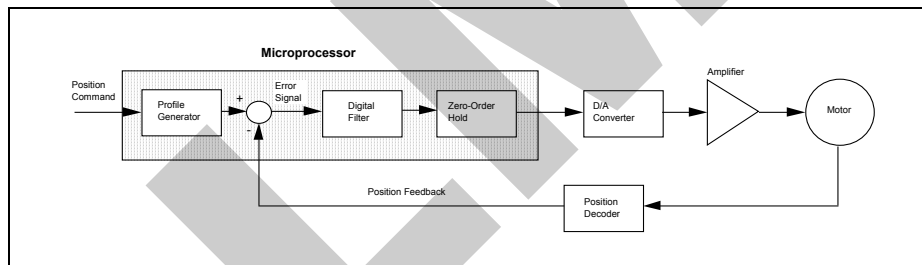
- **Ταχύτητα:** οι αναλογικές/ψηφιακές (analog/digital, A/D) και ψηφιακές/αναλογικές (digital/analog, D/A) μετατροπές και οι υπολογισμοί ελέγχου απαιτούν χρόνο και περιορίζουν την ταχύτητα με την οποία ένας ελεγκτής μπορεί να ενημερώνει το σήμα ελέγχου. Η απόδοση των ελεγκτών σχετίζεται με τον χρόνο μεταξύ των ενημερώσεων των σημάτων ελέγχου (servo loop time).
- **Ανάλυση:** Όλα τα ψηφιακά σήματα είναι κβαντικά. Η κβαντοποίηση περιορίζεται από την συνθετότητα των μετατροπών ψηφιακό/αναλογικό (digital/analog, D/A) και αναλογικό/ψηφιακό (analog/digital, A/D). Η κβαντοποίηση στον επεξεργαστή δεν παρουσιάζει πλέον πρόβλημα στους περισσότερους σύγχρονους ελεγκτές.
- **Κόστος:** Συνήθως είναι ανάλογο της ταχύτητας του ελεγκτή και της α-

νάλυσης. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το κόστος είναι η ευελιξία του ελεγκτή.

Ο αποκλειστικά αφιερωμένος επεξεργαστής ελέγχου κίνησης είναι ο πιο συνηθισμένος ελεγκτής από σημείο σε σημείο. Ο ελεγκτής λαμβάνει τις εντολές από τον επεξεργαστή, ο οποίος μπορεί να κάνει ρυθμίσεις σε πραγματικό χρόνο των παραμέτρων ελέγχου και των εντολών εισόδου. Μερικοί ελεγκτές πραγματοποιούν επίσης λειτουργίες όπως η παρεμβολή και η δημιουργία του προφίλ της κίνησης.

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι συστημάτων ελέγχου κίνησης: ανοικτού βρόγχου (open loop) και κλειστού βρόγχου (closed loop). Ο έλεγχος ανοικτού βρόγχου (*open loop control*) βασίζεται σε μια προκαθορισμένη είσοδο χωρίς καμία ανάδραση από την πραγματικής κίνηση. Στον έλεγχο κλειστού βρόγχου (*closed loop control*), η κίνηση του εργαλείου παρακολουθείται από μετρητικά συστήματα και συγκρίνεται με την επιθυμητή κίνηση. Ο ελεγκτής δραστηριοποιείται, ώστε να ελαχιστοποιήσει τα λάθη μεταξύ της πραγματικής και επιθυμητής κίνησης. Οι περισσότεροι κινητήριιοι μηχανισμοί (actuators) απαιτούν έλεγχο κλειστού βρόγχου για να έχουν ικανοποιητική απόδοση. Ο στόχος του συστήματος κλειστού βρόγχου είναι να συμπληρώσει τη δυναμική του συστήματος και να ελαχιστοποιήσει τα λάθη μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής κίνησης. Τα πιο εξελιγμένα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου αναπληρώνουν τις απρόβλεπτες διαταραχές και τις μη γραμμικότητες.

Προκειμένου να κλείσουμε το βρόγχο μεταξύ του τμήματος ανάδρασης και του κινητήρα, απαιτούνται αναλογικοί/ψηφιακοί (A/D) μετατροπείς, αποκωδικοποιητές θέσεως, ψηφιακοί/αναλογικοί (D/A) μετατροπείς, ένας μικροεπεξεργαστής ελέγχου και μνήμη για το λογισμικό ελέγχου (Σχ. 3.98).



Microprocessor = Μικροεπεξεργαστής

Position command = Εντολή θέσης

Profile generator = Γεννήτρια κατατομών (προφίλ)

Error signal = Σήμα σφάλματος

Digital filter = Ψηφιακό φίλτρο

Zero-order hold = Απομονωτής (μηδενικής τάξης)

D/A converter = Ψηφιακός/Αναλογικός μεταβολέας

Amplifier = Ενισχυτής

Motor = Κινητήρας

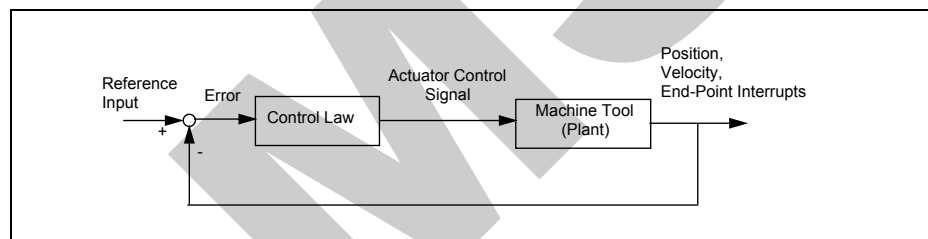
Position decoder = Αποκωδικοποιητής θέσης

Position feedback = Επανατροφοδότηση θέσης

Σχήμα 3.98 Η Δομή Τυπικού Συστήματος Επεξεργασίας Ελέγχου Δεδομένης Κίνησης

Η γραμμοσκιασμένη περιοχή, (Σχ. 3.98), συνήθως υλοποιείται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (chip). Ο ψηφιακός/αναλογικός (digital/analog, D/A) μετασχηματιστής και ο αποκωδικοποιητής θέσης περιέχονται, συνήθως, χωριστά στην κάρτα ελέγχου. Άλλα ψηφιακά κυκλώματα πάνω στην κάρτα βοηθούν την επικοινωνία με τον κύριο ελεγκτή μέσω μιας ηλεκτρονικής «αρτηρίας» (bus).

Για τις εφαρμογές ακριβείας, οι επεξεργαστές υψηλής απόδοσης, όπως είναι οι επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων (digital signal processing chips, DSP), αντικαθιστούν τον μικροεπεξεργαστή κίνησης. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα DSP συνήθως προγραμματίζονται πλήρως και μπορούν να εφαρμοσθούν πρακτικά με κάθε αλγόριθμο ελέγχου. Αυτοί οι επεξεργαστές πραγματοποιούν αριθμητικές λειτουργίες στον φυσικό εξοπλισμό του υπολογιστή (hardware) και επομένως είναι πολύ γρήγοροι. Ένας επεξεργαστής DSP, χαμηλών προδιαγραφών, μπορεί να πραγματοποιήσει έναν υπολογισμό PID σε λιγότερο από 3 μ s, μια τάξη μεγέθους ταχύτερη από τον πιο γρήγορο αποκλειστικά αφιερωμένο προγραμματιζόμενο ελεγκτή. Οι κατασκευαστές των εργαλειομηχανών που παρέχουν έλεγχο 32 bit, συνήθως χρησιμοποιούν τεχνολογία DSP. Η χρήση αυτών των εξελιγμένων επεξεργαστών επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου να εκμεταλλευθεί τα πλεονεκτήματα των κινητήριων μηχανισμών ακριβείας και των αισθητήρων ανάλυσης όπως είναι τα συμβολόμετρα λέιζερ (laser interferometres).



Reference input = Είσοδος αναφοράς

Error = Σφάλμα

Control law = Κανόνας ελέγχου

Actuator control signal = Σήμα ελέγχου ενεργοποιητή

Machine tool = Εργαλειομηχανή

Plant = Εγκατάσταση

Position = Θέση

Velocity = Ταχύτητα

End-point interrupts = Διακοπές τελικού σημείου (αναφέρεται στην διαδρομή του κοπτικού εργαλείου)

Σχήμα 3.99 Έλεγχος από Σημείο σε Σημείο της Εργαλειομηχανής

Ο έλεγχος από σημείο σε σημείο των οδηγών μιας εργαλειομηχανής (Σχ. 3.99) απαιτεί έναν αλγόριθμο ελέγχου, ο οποίος να εξισορροπεί διαταραχές όπως είναι η δυναμική συμπεριφορά των εργαλείων. Ο σκοπός του αλγόριθμου είναι να επιτύχει την πιο γρήγορη και ακριβή μετακίνηση από σημείο σε σημείο. Από την άποψη ελέγχου, μια εργαλειομηχανή είναι ένα "μαύρο κουτί" που περιέχει τον μηχανισμό κίνησης και όλα τα σχετικά μηχανικά μέρη. Η είσοδος είναι το σήμα ελέγχου του κινητήριου μηχανισμού και η έξοδος είναι η πληρο-

φορία για το διάγραμμα της κίνησης (θέση, ταχύτητα, διαταραχές στο τελικό σημείο). Οι περισσότερες μέθοδοι ελέγχου απαιτούν ένα σχετικά ακριβές μοντέλο εισόδου/εξόδου ή μία συνάρτηση μεταφοράς της μηχανής, προκειμένου η μηχανή να ελεγχθεί αποτελεσματικά.

Οι συνηθέστεροι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται σε εργαλειομηχανές είναι οι γραμμικοί ελεγκτές σταθερής ενίσχυσης. Με δεδομένο ένα καλό μοντέλο της μηχανής, ένας ελεγκτής μπορεί να σχεδιασθεί ώστε να επιτύχει βέλτιστη απόκριση σε μια εντολή εισόδου στο σύστημα. Οι τυπικοί γραμμικοί ελεγκτές σταθερής ενίσχυσης είναι:

- PID
- Προπορευόμενη/υπολειπόμενη φάση ή άλλο φίλτρο μηδενικού πόλου
- Ανάδραση κατάστασης
- Ανάδραση κατάστασης με πλήρη ή μειωμένη σειρά παρατηρητών

Οι γραμμικοί ελεγκτές ρυθμιζόμενης ενίσχυσης είναι πολυπλοκότεροι και ανήκουν στην κατηγορία προσαρμοζόμενου ελέγχου. Εάν αλλάξει η δυναμική της μηχανής, οι ενισχύσεις των ελεγκτών ρυθμίζονται σε πραγματικό χρόνο με βάση επαναληπτικές εκτιμήσεις των παραμέτρων της μηχανής, προκειμένου να αντισταθμίσουν αυτές τις διαταραχές. Ωστόσο, οι ελεγκτές αυτοί αποδίδουν ικανοποιητικά μόνο για παραμέτρους που μεταβάλλονται με αργό ρυθμό.

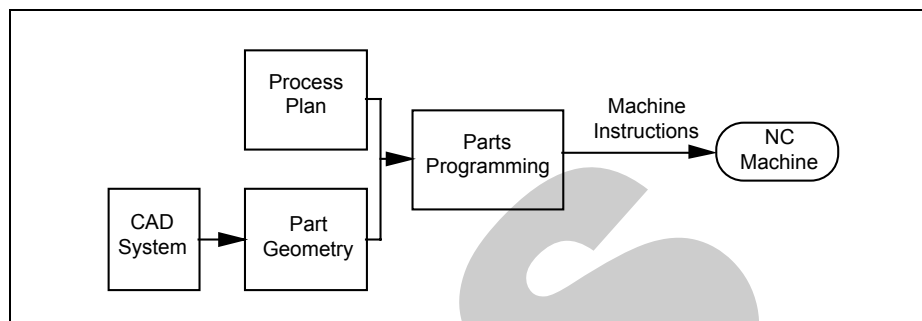
Η ανάπτυξη της τεχνολογίας κινητήρων ελέγχου είναι κρίσιμη για τις εργαλειομηχανές που εκτελούν παραγωγικές διεργασίες υψηλής ακριβείας. Τα σερβοσυστήματα, που βασίζονται στην ψηφιακή τεχνολογία, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο αντί των αναλογικών. Τα ψηφιακά σερβοσυστήματα δεν έχουν την σερβο-καθυστέρηση των αναλογικών συστημάτων και αυξάνουν την ακρίβεια τους και την απόκριση με μεγάλη ταχύτητα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των ψηφιακού σερβο-ελέγχου είναι το ό,τι επιτρέπει την χρήση μη γραμμικού ελέγχου, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις –π.χ. της στατικής τριβής. Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής σερβο-τεχνολογίας περιλαμβάνουν βελτιώσεις στην επιτάχυνση/επιβράδυνση του ελέγχου σε μεγάλες ταχύτητες προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι φορτίσεις στην μηχανή.

3.4.2 Προγραμματισμός κατασκευής κομματιών και εξαρτημάτων (Parts Programming)

Ο προγραμματισμός ενός εξαρτήματος μπορεί να καθορισθεί ως ένα σύνολο αλφαριθμητικών οδηγιών, που δείχνουν τον τύπο και τη σειρά των ξεχωριστών λειτουργιών για την παραγωγή του σε μια εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου (NC). Η ύπαρξη του προγράμματος του εξαρτήματος διασφαλίζει, ότι το ίδιο εξάρτημα θα παραχθεί με τον ίδιο τρόπο κάθε φορά. Το κόστος της διαδικασίας προγραμματισμού του εξαρτήματος μπορεί να χωρισθεί σε άμεσο και έμμεσο. Το άμεσο κόστος είναι ανάλογο της διάρκειας του χρόνου επεξεργασίας του προγράμματος (editing time). Τα έμμεσα κόστη περιλαμβάνουν το κόστος λόγω των τροποποιήσεων του προγράμματος, την ποιότητα των τελι-

κών εξαρτημάτων, την ακρίβεια των καταργασμένων εξαρτημάτων σε σύγκριση με το υπάρχον σχέδιο, και το κόστος που προκύπτει από τα λάθη του προγραμματισμού. Για τα εξαρτήματα, που απαιτούν δεκάδες ή εκατοντάδες ωρών καταργασίας, τα έμμεσα κόστη μπορεί να είναι σημαντικά.

Πριν γράψουμε το πρόγραμμα ενός εξαρτήματος, ένα ολοκληρωμένο μηχανολογικό σχέδιο (γεωμετρία του εξαρτήματος και ανοχές) και ένα τεχνολογικό πρόγραμμα διεργασιών (ταχύτητες κοπής, πρόωση, αλληλουχία των διεργασιών, κ.λ.π.) πρέπει να είναι έτοιμα. Η παραγωγή του προγράμματος ενός εξαρτήματος περιλαμβάνει έναν αριθμό βημάτων (Σχ. 3.100).



CAD system = Σύστημα σχεδιασμού με υπολογιστή (CAD)
 Part geometry = Γεωμετρία εξαρτήματος
 Process plan = Σχέδιο παραγωγής
 Parts programming = Προγραμματισμός παραγωγής εξαρτημάτων

Machine instructions = Οδηγίες προς την εργαλειομηχανή
 NC machine = Αριθμητικά ελεγχόμενη εργαλειομηχανή

Σχήμα 3.100 Η Παραγωγή ενός Προγράμματος

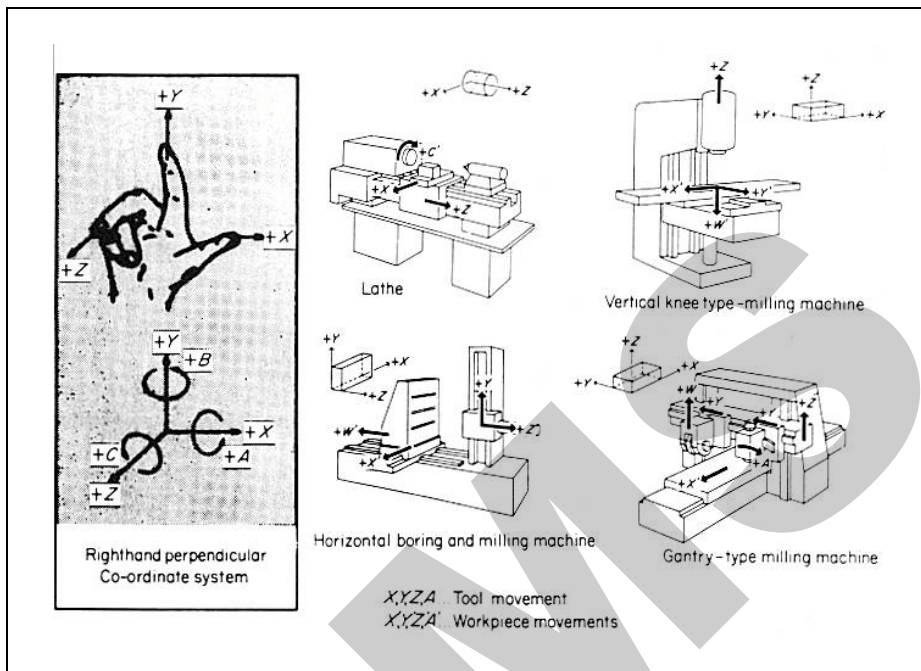
Οι μέθοδοι προγραμματισμού εξαρτημάτων μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον βαθμό εμπλεκόμενου αυτοματισμού:

- Μη αυτόματος προγραμματισμός.
- Προγραμματισμός με τη βοήθεια υπολογιστή.
- Προγραμματισμός αριθμητικού ελέγχου (NC) χρησιμοποιώντας CAD/CAM.
- Αυτόματος προγραμματισμός με τη βοήθεια H/Y.

Μη αυτόματος προγραμματισμός

Στον μη αυτόματο προγραμματισμό, το NC πρόγραμμα εισάγεται απ' ευθείας στον ελεγκτή αριθμητικού ελέγχου (NC) ή διατρυπάται στην ταινία από τον χειριστή της μηχανής ή τον προγραμματιστή. Ο προγραμματισμός πραγματοποιείται με τον καθορισμό των συντεταγμένων των διαφόρων σημείων και του τρόπου σύνδεσής τους.

Προκειμένου να περιγράψουμε την κίνηση κατά την διάρκεια της κατεργασίας (π.χ. τορνιρίσματος), είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων και έναν αριθμό σημείων αναφοράς (datum points) μέσα στην περιοχή κατεργασίας (Σχ. 3.101). Συνήθως οι άξονες X , Y και Z περιγράφουν ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, με τον άξονα Z να είναι παράλληλος προς την άτρακτο της μηχανής και τον άξονα X να είναι ο κύριος άξονας του επιπέδου τοποθέτησης, ο οποίος γενικά είναι παράλληλος με την



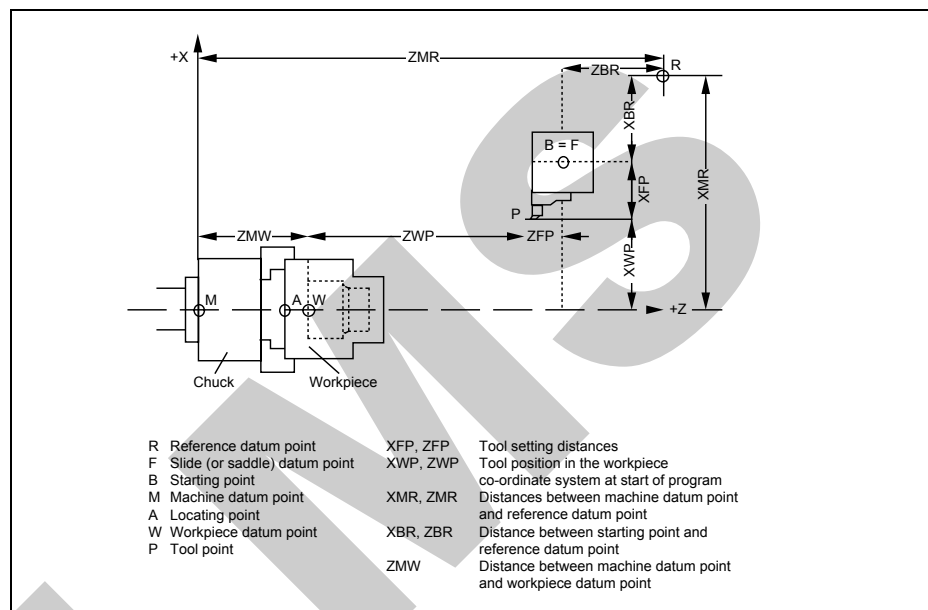
Righthand perpendicular co-ordinate system = Κατακόρυφο δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων
 Lathe = Τόρνος
 Horizontal boring and milling machine = Οριζόντια εργαλειομηχανή διάτρησης και φρεζαρίσματος
 Tool movement = Κίνηση κοπτικού εργαλείου

Workpiece movements = Κινήσεις κατεργαζόμενου κομματιού/εξαρτήματος
 Vertical knee-type milling machine = Κάθετη φρεζα
 Gantry-type milling machine = εφρεζα γεφυρωτού τύπου

Σχήμα 3.101 Σύστημα Συντεταγμένων για τις Εργαλειομηχανές

επιφάνεια τοποθέτησης του κατεργαζόμενου εξαρτήματος και είναι οριζόντιος, όπου αυτό είναι δυνατό [3]. Εάν υπάρχουν άξονες παράλληλοι με τους X , Y και Z , μπορούν να ονομαστούν U , V και W ενώ τα γράμματα A , B και C χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τους άξονες περιστροφής, όπου ως θετική κατεύθυνση περιστροφής λαμβάνεται η φορά του δεξιόστροφου κοχλία. Προκειμένου να προκαλέσουμε μια σχετική αλλαγή στην θέση μεταξύ του εργαλείου και του εξαρτήματος είτε πρέπει να μετακινήσουμε το εργαλείο είτε το

κατεργαζόμενο εξάρτημα. Εάν μετακινηθεί το εργαλείο, τότε μια θετική κατεύθυνση της μετακίνησης συμπίπτει με τη θετική κατεύθυνση του αντίστοιχου άξονα και αυτό προσδιορίζεται με το σύμβολο $+X$, $+Y$ κ.λ.π. Εάν μετακινηθεί το εξάρτημα, τότε μια θετική μετακίνηση θα είναι αντίθετη με τον συμβατικό άξονα και η κίνηση θα προσδιορισθεί ως $+X'$, $+Y'$ κ.λ.π. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στις συντεταγμένες του κατεργαζόμενου εξαρτήματος και η δεύτερη αναφέρεται στις συντεταγμένες της εργαλειομηχανής. Υπάρχει μια παρόμοια αντιστοιχία για τους άξονες περιστροφής. Ωστόσο, το πρόγραμμα υποθέτει, ότι το εργαλείο θα κινηθεί σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων του κατεργαζόμενου εξαρτήματος. Εκτός από το σύστημα συντεταγμένων [9], ένας αριθμός διαφορετικών σημείων αναφοράς (Σχ. 3.102) προσδιορίζονται για κάθε αριθμητικά ελεγχόμενη εργαλειομηχανή.

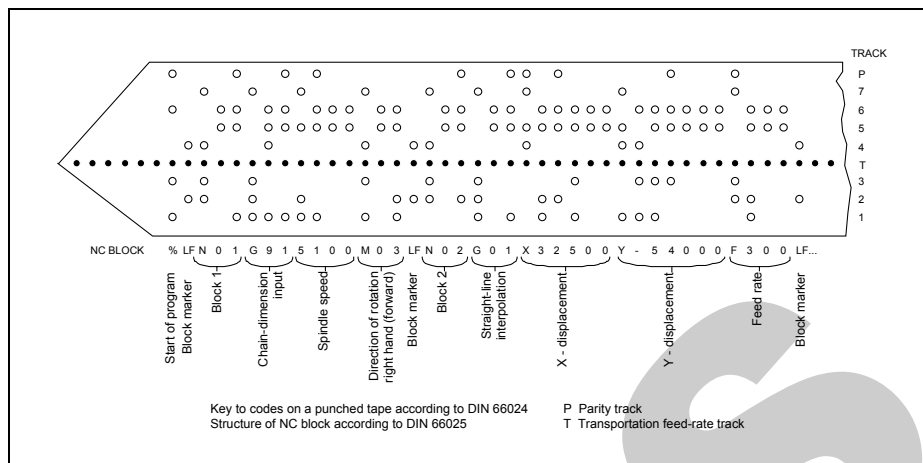


Reference datum point = Χωροσταθμικό σημείο αναφοράς
 Slide (or saddle) datum point = χωροσταθμικό σημείο ολίσθησης (ή αυχενικό σημείο)
 Starting point = Σημείο εκκίνησης
 Machine datum point = χωροσταθμικό σημείο εργαλειομηχανής
 Locating point = Σημείο εντοπισμού
 Workpiece datum point = χωροσταθμικό σημείο κατεργαζόμενου κομματιού
 Tool point = Σημείο κοπτικού εργαλείου
 Tool setting distances = Οριοθέτηση αποστάσεων κοπτικού εργαλείου
 Tool position in the workpiece co-ordinate system at start of program = Θέση του κοπτικού εργαλείου

στο σύστημα συντεταγμένων του κατεργαζόμενου κομματιού κατά την εκκίνηση του προγράμματος
 Distances between machine datum point and reference datum point = Αποστάσεις μεταξύ του χωροσταθμικού σημείου της εργαλειομηχανής και του χωροσταθμικού σημείου αναφοράς
 Distance between starting point and reference datum point = Απόσταση μεταξύ του σημείου εκκίνησης και του χωροσταθμικού σημείου αναφοράς
 Distance between machine datum point and workpiece datum point = Απόσταση μεταξύ του χωροσταθμικού σημείου της εργαλειομηχανής και του δεδομένου χωροσταθμικού σημείου του κατεργαζόμενου κομματιού

Σχήμα 3.102 Χωροσταθμικά Σημεία των Εργαλειομηχανών

Ενώ δημιουργούμε ένα πρόγραμμα κατασκευής εξαρτήματος, πρέπει να λάβουμε υπ' όψη μας γεωμετρικές συνθήκες (π.χ. τις ακατέργαστες και τελειοποιημένες διαστάσεις του εξαρτήματος, τις ανοχές των διαστάσεων, τον τύπο και την σειρά των απαιτούμενων διεργασιών κ.λ.π.) καθώς επίσης και τεχνολογικές πληροφορίες (π.χ. το υλικό του κατεργαζόμενου εξαρτήματος, το υλι-



NC block = Ομάδα εντολών αριθμητικού ελέγχου
 Block = Ομάδα (μπλοκ)
 Start of program = Εκκίνηση του προγράμματος
 Block marker = Δείκτης μπλοκ
 Chain-dimension input = Είσοδος της αλυσίδας διαστάσεων
 Spindle speed = Ταχύτητα ατράκτου
 Direction of rotation right hand (forward) = Διεύθυνση δεξιόστροφης περιστροφής (προωστική)
 Straight-line interpolation = Παρεμβολή ευθείας γραμμής
 X-displacement = Μετατόπιση κατά την διεύθυνση X

Y-displacement = Μετατόπιση κατά την διεύθυνση Y
 Feed rate = Ρυθμός πρόωσης
 Key to codes on a punched tape according to DIN 66024 = Επεξήγηση των κωδικών στην διάτρητη χαρτοταινία σύμφωνα με το DIN 66024
 Structure of NC block according to DIN 66025 = Δομή του μπλοκ των εντολών αριθμητικού ελέγχου σύμφωνα με το DIN 66025
 Parity track = Σειρά ελέγχου ισοτιμίας
 Transportation feed-rate track = Σειρά ελέγχου ρυθμού μεταφοράς

Σχήμα 3.103 Πρόγραμμα ενός Εξαρτήματος

κό του κοπτικού εργαλείου, την στιβαρότητα του εξαρτήματος και τα δεδομένα κατεργασιών που σχετίζονται με το υλικό του κατεργαζόμενου εξαρτήματος και του κοπτικού εργαλείου). Όσον αφορά την μηχανή, είναι σημαντικό να λάβουμε υπ' όψη μας τις διαστάσεις του χώρου εργασίας μέσα στην εργαλειομηχανή, τους μηχανισμούς και τον τρόπο πρόσδεσης των υπό επεξεργασία εξαρτημάτων στην τράπεζα της μηχανής, το εύρος των κοπτικών ταχυτήτων και ταχυτήτων πρόωσης, το σχήμα των διαφόρων εργαλείων, την ακρίβεια της μηχανής και κάθε ειδικό βοηθητικό εξοπλισμό της μηχανής. Έχοντας αυτές τις πληροφορίες, μπορούμε να κατασκευάσουμε το πρόγραμμα του εξαρτήματος με το να δημιουργούμε ομάδες ή μπλόκ εντολών, που συνδεδεμένα σχημα-

τίζουν όλο το πρόγραμμα (Σχ. 3.103). Υπάρχει ένας αριθμός τυπικών εντολών σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές (Σχ. 3.104).

ISO	Code	Function and Meaning
%		Start of program
	1 to 9999	Main block
N		Secondary block-sequence block
/		Optional main block
/N		Optional secondary block
G	00	Point-to-point positioning
	01	Linear interpolation
	02	Circular interpolation, clockwise
	03	Circular interpolation, anti-clockwise
	33	Thread cutting
G	04	Dwell
G	39	Corner correction for cutter/radius compensation
G	40	Cancel cutter compensation
	41	Cutter compensation, left (tool left of work)
	42	Cutter compensation, right (tool right of work)
G	53	Cancel linear shift of origin
X	0 to = 99 999 999	Displacement information in mm
	1 to = 99 999 999	Dwell in ms
Y	1 to = 99 999 999	Displacement information in mm
Z	0 to = 99 999 999	Displacement information in mm

ISO = Διεθνής Οργανισμός Προτυποποίησης
 Code = Κώδικας
 Function and meaning = Λειτουργία και επεξήγηση
 Start of program = Εκκίνηση του προγράμματος
 Main block = Κύριο τμήμα
 Secondary block = Δευτερεύον τμήμα
 Sequence block = ή τμήμα αλληλουχίας
 Optional main block = Προαιρετικό κύριο τμήμα
 Optional secondary block = Προαιρετικό δευτερεύον τμήμα
 Point-to-point positioning = Καθορισμός θέσης σημείο προς σημείο
 Linear interpolation = Γραμμική παρεμβολή
 Circular interpolation = Κυκλική παρεμβολή
 Clockwise = Κατά την φορά της κίνησης των δεικτών του ωρολογίου
 Anti-clockwise = Κατά φορά αντίθετη της κίνησης των δεικτών του ωρολογίου
 Thread cutting = Κοπή σπειρώματος

Dwell in ms = Μικρή διακοπή (στην κίνηση του κοπτικού εργαλείου) σε ms
 Corner correction for the cutter = Διόρθωση γωνίας για το κοπτικό εργαλείο
 Radius compensation = Αντιστάθμιση ακτίνας
 Cancel cutter compensation = Ακύρωση αντιστάθμισης κοπτικού εργαλείου
 Cutter compensation, left (tool left of work) = Αντιστάθμιση κοπτικού εργαλείου αριστερά (το κοπτικό στα αριστερά του κατεργαζόμενου κομματιού)
 Cutter compensation, right (tool right of work) = Αντιστάθμιση κοπτικού εργαλείου δεξιά (το κοπτικό στα δεξιά του κατεργαζόμενου κομματιού)
 Cancel linear shift of origin = Ακύρωση γραμμικής μετατόπισης της αρχής των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων
 Displacement information in mm = Τα δεδομένα της μετατόπισης σε mm

Σχήμα 3.104 Παράδειγμα των Εντολών Προγραμματισμού σε κώδικα G(G-Code)

Η κύρια προσπάθεια στην παραγωγή ενός προγράμματος αριθμητικού ελέγχου (NC) συνίσταται στον προσδιορισμό των μετακινήσεων των εργαλείων. Οι τιμές των συντεταγμένων του τέλους μιας κίνησης στο σύστημα συντεταγμένων

του εξαρτήματος προγραμματίζονται χρησιμοποιώντας τα σημεία αναφοράς του κατεργαζόμενου εξαρτήματος (Σχ. 3.102). Η τοποθέτηση του εξαρτήματος και η θέση κάθε σημείου αναφοράς στον χώρο εργασίας της μηχανής καθορίζονται από τις διαστάσεις του κατεργαζόμενου εξαρτήματος. Επομένως η θέση του σημείου αναφοράς του εξαρτήματος είναι μια από τις πρώτες εντολές που πρέπει να δοθεί στον ελεγκτή. Μια τέτοια αναφορά επιτυγχάνεται μέσω του προγραμματισμού του σημείου αναφοράς (zero offset) στις μηχανές οι οποίες έχουν απόλυτα συστήματα μετρήσεων (διαστάσεις *ZMW* στο Σχ. 3.102). Επιπλέον, οι διαστάσεις που ορίζουν την θέση των εργαλείων, όπως η *XFP* και η *ZFP* (Σχ. 3.102) πρέπει επίσης να προγραμματισθούν. Εάν ο προγραμματιστής γνωρίζει την θέση πρόσδεσης του κατεργαζόμενου εξαρτήματος, την θέση του εργαλείου και το μήκος του εργαλείου, τότε μπορούν να υπολογισθούν οι αποστάσεις του σημείου του εργαλείου από το σημείο αναφοράς του κατεργαζόμενου εξαρτήματος. Όταν οι διαστάσεις αυτές, *XWP* και *ZWP* (Σχ. 3.102), εισάγονται στον ελεγκτή ως τιμές θέσεως πριν από την πρώτη αξονική μετακίνηση, τότε τα σημεία αναφοράς των κατεργαζόμενων εξαρτημάτων σταθεροποιούνται. Οπότε με κάθε αλλαγή εργαλείου, μια νέα θέση εργαλείου είναι απαραίτητο να επαναπρογραμματισθεί. Γενικά, όλες οι διαστάσεις του εξαρτήματος, που πρόκειται να κατεργασθεί, δίδονται από ένα σημείο, μια ακμή ή μια επιφάνεια αναφοράς. Εκτός των γεωμετρικών πληροφοριών, ένα πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου (NC) περιέχει τις απαραίτητες τεχνολογικές πληροφορίες, οι οποίες προσδιορίζουν τις παραμέτρους των διεργασιών όπως τις ταχύτητες κοπής και πρόωσης. Αυτές οι παράμετροι προέρχονται, συνήθως, από τον τεχνολογικό προγραμματισμό (Process Planning/Κεφ. 4) των διεργασιών.

Προγραμματισμός των εξαρτημάτων με τη βοήθεια H/Y (Computer-Assisted Part Programming)

Προκειμένου να μειωθεί η προσπάθεια που απαιτείται για τον προγραμματισμό, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές προγραμματισμού με τη βοήθεια του H/Y και κατάλληλης γλώσσας προγραμματισμού, προσανατολισμένης στο πρόβλημα προγραμματισμού και ελέγχου εργαλειομηχανών. Η APT (Automatically Programmed Tools) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη γλώσσα προγραμματισμού, η οποία είναι κατάλληλη για απλές και σύνθετες παραγωγικές διεργασίες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μηχανές που έχουν μέχρι πέντε άξονες ελέγχου. Το πρόγραμμα των εξαρτημάτων αναπτύσσεται ανεξάρτητα από τις συνθήκες της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής και μεταφράζεται σε κώδικα μηχανής, κατάλληλο για τον συγκεκριμένο συνδυασμό μηχανής και ελεγκτή με τη βοήθεια ενός προγράμματος/αποκωδικοποιητή (post processor). Η πλειοψηφία του εμπορικά διαθέσιμου λογισμικού για προγραμματισμό χρησιμοποιεί γεωμετρία δικτυωμάτων και απαιτεί συνεχή παρέμβαση του προγραμματιστή για

την τελική δημιουργία του κώδικα. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί έμφαση στο να γίνει αυτό το λογισμικό περισσότερο φιλικό προς τους χρήστες.

Επαλήθευση Προγράμματος αριθμητικού ελέγχου για κατασκευές εξαρτήματος (NC Part Verification)

Όταν χρησιμοποιείται π.χ. μια φρέζα αριθμητικού ελέγχου (NC), οι συνέπειες ενός λάθους μπορεί να έχουν μεγάλο κόστος. Ένας λανθασμένος χαρακτήρας σε ένα πρόγραμμα 10.000 χαρακτήρων (τυπικό μέγεθος για ένα μέσο πρόγραμμα) μπορεί να προκαλέσει φθορά στο εργαλείο, να καταστρέψει το κατεργαζόμενο εξάρτημα ή να προκαλέσει βλάβη στη μηχανή. Μερικές από τις πολύ μεγάλες μήτρες, που χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν το εξωτερικό πλαίσιο ενός αυτοκινήτου, μπορεί να απαιτούν έως και τρεις εβδομάδες συνεχούς κατεργασίας. Λάθη στο πρόγραμμα απαιτούν επαναλήψεις εργασιών που είναι ιδιαίτερα δαπανηρές και προκαλούν καθυστερήσεις στην παραγωγή. Οι προσπάθειες, για να αποφευχθούν και να προβλεφθούν αυτά τα λάθη κατά την διάρκεια των μηχανουργικών κατεργασιών, γίνονται κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του προγράμματος (NC Part Verification). Το κόστος της επαλήθευσης αποτελεί κατά κανόνα ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους των αυτοματοποιημένων μηχανουργικών κατεργασιών.

Νέες τεχνικές στην αυτόματη δημιουργία πολύπλοκων διαδρομών των εργαλείων απλοποιούν την διαδικασία επαλήθευσης του κώδικα, αλλά δεν μπορούν να εγγυηθούν, ότι η διαδρομή του εργαλείου θα παράγει κανονικά την επιθυμητή επιφάνεια κατά την διάρκεια της πρώτης επανάληψης. Ο ακατάλληλος προγραμματισμός ή τυχόν σφάλματα στην δημιουργία του λογισμικού, μπορεί να προκαλέσουν στα κατεργαζόμενα εξαρτήματα βαθιές εγχοπές ή να τα υποτέμνουν. Επίσης υπάρχει η πιθανότητα, ότι στο εργαλείο μπορεί να παρεμβάλλονται εξαρτήματα στήριξης ή άλλα πιθανά εμπόδια. Λάθη κάθε τύπου μπορεί να αυξήσουν σημαντικά το κόστος υλικού, τον χρόνο ρύθμισης της μηχανής και τον χρόνο μηχανουργικών κατεργασιών και γι' αυτό πρέπει να ελαχιστοποιούνται.

Η συνήθης πρακτική είναι να ελέγχονται τα προγράμματα αριθμητικού ελέγχου (NC), πριν αυτά χρησιμοποιηθούν. Ο έλεγχος αυτός –γνωστός ως "Tape-Try-Out" (TTO)– μπορεί να πάρει την μορφή της "κοπής στον αέρα" (cutting air) ή της κοπής ενός μαλακού υλικού –όπως το πολυστυρένιο– ή της κοπής με μειωμένη ταχύτητα και με έναν χειριστή να παρακολουθεί προσεκτικά την διαδικασία.

Μια άλλη προσέγγιση στην μη αυτόματη επαλήθευση αριθμητικού ελέγχου (NC) περιλαμβάνει τον οπτικό έλεγχο των διαστάσεων σχεδίων των διαδρομών των εργαλείων αριθμητικού ελέγχου (NC), όπου το κοπτικό εργαλείο αντικαθίσταται από ένα σχεδιαστικό σύστημα. Η επιτυχία της μεθόδου αυτής εξαρτάται από τις ικανότητες του χρήστη να μεταφράσει τα πολύπλοκα σχέδια που προκύπτουν. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι αποτελεσματική για την

αναγνώριση μεγάλων λαθών, π.χ. μιας φρέζας, αλλά είναι περιορισμένης αποτελεσματικότητας για την ανίχνευση μικρών λαθών σε πολύπλοκα εξαρτήματα. Καθώς η πολυπλοκότητα των προγραμμάτων αυξάνει από τριαξονικές σε πενταξονικές κινήσεις, η προσέγγιση αυτή γίνεται μη ευέλικτη. Η μη αυτόματη μέθοδος επαλήθευσης των προγραμμάτων είναι αποτελεσματική για απλά εξαρτήματα, αλλά καθώς η πολυπλοκότητα αυξάνει, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται ένα «έξυπνο» πρόγραμμα για την επιτυχή ανάπτυξη προγραμμάτων αριθμητικού ελέγχου.

3.4.3 CAD/CAM

Οι βασικές ιδέες της σχεδίασης με τη βοήθεια Η/Υ (Computer Aided Design—CAD) άρχισαν με την ανάπτυξη των αλληλεπιδρώντων γραφικών σε υπολογιστή. Το πρόγραμμα *Sage*, στο *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), είχε ως σκοπό την ανάπτυξη οθονών CRT και λειτουργικών συστημάτων. Το γνωστό σύστημα *Sketchpad* [11] αναπτύχθηκε κατά την διάρκεια του προγράμματος *Sage*. Μια οθόνη CRT και μια γραφίδα φωτός (*light pen*) χρησιμοποιήθηκαν για να αλληλεπιδράσουν με το σύστημα. Οι εφαρμογές αυτές πραγματοποιήθηκαν περίπου όταν εμφανίστηκαν ο αριθμητικός έλεγχος (NC) και η γενική γλώσσα προγραμματισμού (APT). Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν οι σχεδιαστικές μηχανές (X-Y plotters) ως τυπικό εξάρτημα εξόδου για τα γραφικά σε υπολογιστή. Μια σημαντική παρατήρηση είναι, ότι η σχεδιαστική μηχανή (X-Y plotter) έχει την ίδια βασική δομή με μια μηχανή αριθμητικού ελέγχου (NC) διάτρησης, εκτός από το ότι η πένα αντικαθιστά το εργαλείο στον άξονα της μηχανής.

Αρχικά τα συστήματα CAD δεν ήταν τίποτα παραπάνω από γραφικοί επεξεργαστές με μερικά σχεδιαστικά σύμβολα. Η διαθέσιμη γεωμετρία στον χρήστη περιοριζόταν σε γραμμές, κυκλικά τόξα και τους συνδυασμούς τους. Η ανάπτυξη καμπύλων και επιφανειών όπως οι καμπύλες Coon, Ferguson, Bezier και B-Spline επέτρεψαν στα συστήματα CAD να χρησιμοποιηθούν για πιο εξελιγμένα σχέδια. Με την ανάπτυξη τρισδιάστατων συστημάτων, τα μοντέλα CAD περιέχουν αρκετές πληροφορίες για τον προγραμματισμό των διαδρομών των αριθμητικά ελεγχόμενων (NC) κοπτικών. Η σύνδεση μεταξύ του CAD και του αριθμητικού ελέγχου (NC) άρχισε με τα συστήματα CAD/CAM που αναπτύχθηκαν στις δεκαετίες 1970 και 1980.

Στην δεκαετία 1970 αναπτύχθηκαν τρισδιάστατοι στερεομετρικοί μοντελοποιητές (*three-dimensional solid modelers*). Πριν από την ανάπτυξη των στερεομετρικών μοντέλων, υπήρχαν τρισδιάστατα μοντέλα συρματικής αναπαράστασης, που παρουσίαζαν ένα αντικείμενο οριοθετώντας μόνο τις ακμές του. Τα μοντέλα συρματικής αναπαράστασης είναι ασαφή από την άποψη, ότι μπορεί να δοθούν πολλές ερμηνείες για ένα σχετικά απλό σχήμα, ενώ δεν υπάρχει τρόπος να καθορισθούν ογκομετρικές πληροφορίες. Τα στερεομετρικά μοντέλα περιέχουν ολοκληρωμένες πληροφορίες και η μηχανική ανάλυση μπορεί να γίνει στο ίδιο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή μη-

χανικών σχεδίων. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, τα στερεομετρικά μοντέλα άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε περιβάλλον σχεδίασης και σήμερα χρησιμοποιούνται συχνότερα από ό,τι τα μοντέλα συρματικής αναπαράστασης.

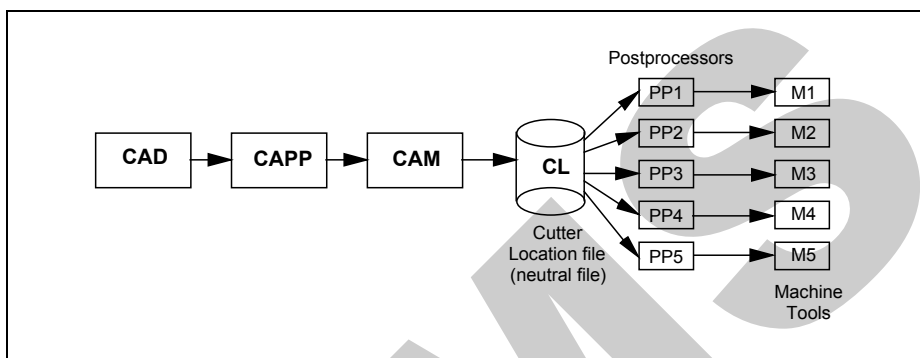
Την βάση για κάθε κατασκευαστική προσπάθεια αποτελεί το κλασσικό μηχανολογικό σχέδιο (design drawing). Προσεκτικά προετοιμασμένα σχέδια και έγγραφα χρησιμοποιούνται σε κάθε βήμα: στην σύλληψη του προϊόντος, στην σχεδίαση και στην κατασκευή του. Όμως, η κλασική σχεδίαση είναι «δεμένη» με το χαρτί και είναι αρκετά κουραστική. Σε αντίθεση με τα ηλεκτρονικά δεδομένα στον υπολογιστή, τα σχέδια στο χαρτί δεν μπορούν να μεταβληθούν, να επεξεργασθούν και να αναλυθούν εύκολα.

Το CAD, η χρήση δηλαδή του υπολογιστή στην διαδικασία σχεδίασης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στα στάδια αναπαράστασης, όσο και στα στάδια ανάλυσης ενός προϊόντος και των απαραίτητων διεργασιών για την παραγωγή του. Η εφαρμογή του CAD για την αναπαράσταση δεν περιορίζεται μόνο στην σχεδίαση. Η μοντελοποίηση μέσω των τρισδιάστατων μοντέλων συρματικής αναπαράστασης, η μοντελοποίηση μέσω της αναπαράστασης του περιγράμματος (boundary representation B-rep) και η στερεομετρική μοντελοποίηση, είναι μέθοδοι αναπαράστασης διαθέσιμες στους χρήστες CAD. Υπάρχουν διάφορα πακέτα εφαρμογών, που βοηθούν στην ανάλυση και πραγματοποιούν κινηματική προσομοίωση και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Τα συστήματα CAD συχνά αποτελούνται από πολλές εφαρμογές (module) – που βρίσκονται σε μια κοινή βάση δεδομένων– και χρησιμοποιούν κοινό επεξεργαστή γραφικών.

Ένα σύστημα CAD αποτελεί ένα εργαλείο, που χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση της σχεδιαστικής διαδικασίας. Αντί να χρησιμοποιεί μολύβι και χαρτί, ο σχεδιαστής χρησιμοποιεί μια οθόνη γραφικών. Μια γραφίδα φωτός χρησιμοποιείται, για να σχεδιάσει στην οθόνη του υπολογιστή ή για να ανασύρει από τη μνήμη του υπολογιστή τις ευθείες, τις καμπύλες και τα σχήματα. Τα στερεά σχήματα, που καλούνται από μια βιβλιοθήκη του υπολογιστή με γεωμετρικά πρότυπα, μπορούν να συναρμολογηθούν ώστε να σχηματίσουν ένα σύνθετο σχήμα. Ένα σύστημα CAD μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις εργασίες ανεύρεσης παλαιών σχεδίων μέσω βιβλιοθηκών, αντιγράφοντας ότι έχει σχεδιασθεί προηγουμένως ή σχεδιάζοντας ξανά ήδη υπάρχοντα σχέδια ή συναρμολογήσεις εξαρτημάτων. Χρησιμοποιώντας απλές εντολές, ο σχεδιαστής μπορεί να εμφανίσει ένα εξάρτημα, από το οποίο έχει αφαιρεθεί ένα τμήμα, ή να μεγεθύνει μία όψη ή να εμφανίσει μια συνολική όψη όλων των υπό συναρμολόγηση εξαρτημάτων. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα CAD, η ολοκληρωμένη γεωμετρία ενός εξαρτήματος γίνεται ορατή, χωρίς να είναι ανάγκη να βλέπουμε τα διάφορα επίπεδα του σχεδίου. Κάθε προϊόν ή εξάρτημα που είχε σχεδιασθεί σε χαρτί μπορεί να σχεδιασθεί με τη βοήθεια ενός συστήματος CAD. Μερικά συστήματα CAD είναι πιο σύνθετα από άλλα και οι σχεδιαστικές τους ικανότητες περιορίζονται ουσιαστικά από τις υπολογιστικές δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου υπολογιστή. Ωστόσο, ακόμη και τα πιο περιορι-

σμένα συστήματα CAD προσφέρουν, συνήθως, σημαντικά οφέλη στην παραγωγή σε σχέση π.χ. με την σχεδίαση με το χέρι.

Η προετοιμασία των χαρτοταινιών ή των κασετών για τις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (NC) –είτε πρόκειται για τον προγραμματισμό μιας απλής διαξονικής μηχανής διάτρησης είτε για ένα σύνθετο πενταξονικό μηχανουργικό κέντρο– αποτελεί σύνθετη και χρονοβόρα διαδικασία. Συνήθως χρειάζονται πολλές ώρες ή ημέρες για να προγραμματισθεί μια εργαλειομηχανή [12]. Τα απλά προγράμματα δημιουργούνται μη αυτόματα, ενώ τα πλέον σύνθετα, με την βοήθεια υπολογιστή και μιας γλώσσας προγραμματισμού όπως η APT. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει σημαντικό κίνητρο να αναπτυχθούν αποτελεσματικές διαδικασίες, ικανές να αυτοματοποιήσουν στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό την διαδικασία του προγραμματισμού εξαρτημάτων και να ενσωματώσουν τις διαδικασίες αυτές σε ένα σύστημα CAD/CAM.



Postprocessors = Μετεπεξεργαστές
Cutter location file (neutral file) = Αρχείο οριοθέτησης κοπτικού εργαλείου (ουδέτερο αρχείο)
Machine tools = Εργαλειομηχανές

Σχήμα 3.105 Η Δημιουργία ενός Προγραμματισμού Εξαρτημάτων από ένα Αρχείο CAD

Η δημιουργία των προγραμμάτων αριθμητικού ελέγχου (NC) από ένα αρχείο CAD, επιτρέπει σ' έναν προγραμματιστή να χρησιμοποιήσει όλες τις υπολογιστικές ικανότητες του υπολογιστή μέσω μιας κονσόλας γραφικών. Ο προγραμματισμός των εξαρτημάτων αρχίζει, συνήθως, με σχεδιασμό υπό την μορφή σχεδίου ή μοντέλου CAD (Σχ. 3.105). Έπειτα από την επιθεώρηση, που πραγματοποιεί ο υπεύθυνος της παραγωγής, η διαδικασία επιλογής εργαλείου ολοκληρώνεται με την βοήθεια του συστήματος CAD. Ο προγραμματισμός των εξαρτημάτων μέσω του CAD επιτρέπει την περιγραφή της γεωμετρίας του εξαρτήματος με την μορφή σημείων, γραμμών, τόξων κ.λ.π. όπως ακριβώς σ' ένα μηχανολογικό σχέδιο, οπότε δεν απαιτείται η μετάφρασή της σε κείμενο. Τα συστήματα CAD/NC επιτρέπουν στον προγραμματιστή να προσδιορίσει γρήγορα την γεωμετρία του αντικειμένου καθώς επίσης και να χρησιμοποιήσει τις ικανότητες εμφάνισης γραφικών για να καθορίσει, να πιστοποιήσει και να

επεξεργασθεί την πραγματική κίνηση του κοπτικού. Ο προγραμματιστής δημιουργεί μια διαδρομή του κοπτικού μέσω της επιλογής γεωμετρικών στοιχείων με ένα ψηφιοποιητή –όπως είναι μία γραφίδα, ένα ποντίκι κ.λ.π.– ο οποίος είναι συνδεδεμένος με ένα τερματικό. Οι υπορουτίνες του λογισμικού συχνά χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση κοινών μηχανουργικών κατεργασιών –π.χ. φρεζάρισμα μίας κοιλότητας σε ένα εξάρτημα– οπότε απλοποιείται η δημιουργία της διαδρομής του εργαλείου. Διάφορες βοηθητικές εντολές μπορούν επίσης να εισαχθούν στο τερματικό. Ένα σύστημα CAD μπορεί να εμφανίσει την γεωμετρία της πορείας του κοπτικού εργαλείου, επιτρέποντας την επαλήθευση του προγράμματος χωρίς να χρησιμοποιεί μέρος του χρόνου των κατεργασιών της μηχανής. Ο υπολογιστής μπορεί να βοηθήσει έναν προγραμματιστή στην οπτικοποίηση, μέσω της προσομοίωσης ολόκληρης της πορείας του εργαλείου στην οθόνη του τερματικού, της θέσης του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζοντας τις συντεταγμένες του X , Y , Z . Η επεξεργασία μπορεί να γίνει κατά την διάρκεια της επανάληψης για την διόρθωση των λαθών ή για την πραγματοποίηση αλλαγών στο πρόγραμμα.

Επειτα από την επαλήθευση, τα διάφορα περάσματα του κοπτικού συνδυάζονται για να σχηματίσουν ένα πρόγραμμα, το οποίο αποθηκεύεται για επεξεργασία από τους αποκωδικοποιητές. Οι αποκωδικοποιητές (postprocessors) παράγουν προγράμματα, που μπορούν να μεταφραστούν από μια συγκεκριμένη εργαλειομηχανή (Σχ. 3.105). Τέλος το πρόγραμμα παράγεται σε μια διάτρητη ταινία ή σε οποιοδήποτε μέσο που απαιτείται από την εργαλειομηχανή

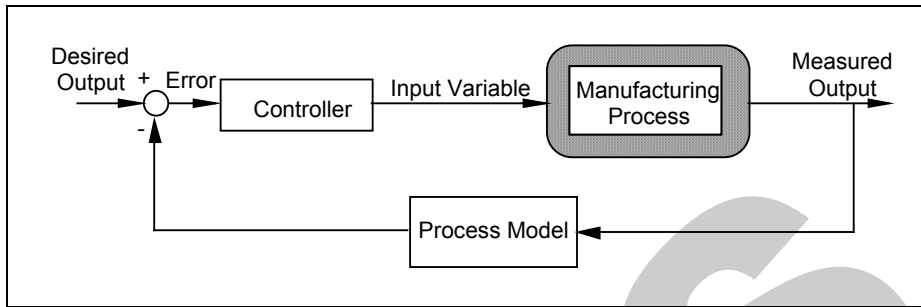
Διάφορα συστήματα CAD/CAM –όπως CADAM, Computervision, CATIA κ.λ.π.– έχουν την ικανότητα να δημιουργούν εντολές για κατεργασίες αριθμητικού ελέγχου (NC) με βάση τον γεωμετρικό προσδιορισμό του κατεργαζόμενου εξαρτήματος. Υπάρχουν εγκαταστάσεις όπου τα εξαρτήματα σχεδιάζονται σ' ένα σύστημα CAD, τα τεχνολογικά προγράμματα παραγωγής δημιουργούνται από τα δεδομένα CAD χρησιμοποιώντας αυτόματο σύστημα τεχνολογικού προγραμματισμού, τα αριθμητικά ελεγχόμενα προγράμματα κατασκευής των εξαρτημάτων δημιουργούνται σε σύστημα CAD χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς της διαδρομής του εργαλείου και τέλος τα εξαρτήματα κατασκευάζονται υπό τον έλεγχο ηλεκτρονικού υπολογιστή.

3.4.4 Έλεγχος των Διαδικασιών (Process Control)

Βασικές Αρχές

Ο έλεγχος των μηχανών περιλαμβάνει τις μετρήσεις και τον έλεγχο της θέσης και της ταχύτητας των αξόνων και των οδηγών πρόωσης. Ο αυτόματος έλεγχος των μηχανουργικών και γενικότερα των διεργασιών/διαδικασιών παραγωγής προϋποθέτει την χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των διεργασιών και την ρύθμιση των παραμέτρων τους, όπως η ταχύτητα και η πρόωση, προκειμένου να επιτύχουμε την αποδοτική εκτέλεση των διεργασιών παραγωγής.

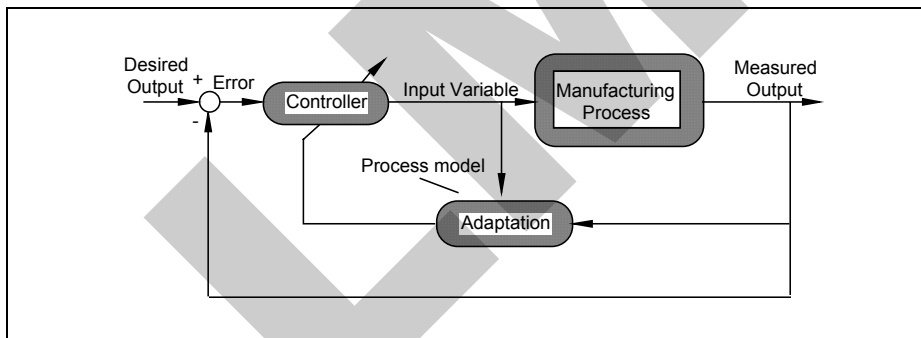
Οι παράμετροι αριθμητικά ελεγχόμενων εργαλειομηχανών, όπως η ταχύτητα και η πρόωση, επιλέγονται συνήθως με βάση προηγούμενες εμπειρίες και πληροφορίες. Ωστόσο κατά την διάρκεια της διαδικασίας μπορεί να παρατηρηθούν διαταραχές, όπως ταλαντώσεις του πλαισίου της εργαλειομηχανής ή μεταβολές στις ιδιότητες του υλικού του υπό επεξεργασία εξαρτήματος. Ο *προσαρμοστικός έλεγχος (adaptive control)* αποσκοπεί στο να ρυθμίσει τις παραμέτρους των διεργασιών, προκειμένου οι τελευταίες να «προσαρμοσθούν» στις συγκεκριμένες διαταραχές (Σχ. 3.106).



Desired output = Επιθυμητή έξοδος
 Error = Σφάλμα
 Controller = Ελεγκτής
 Input variable = Μεταβλητή εισόδου

Manufacturing process = Παραγωγική διεργασία
 Measured output = Μετρούμενη έξοδος
 Process model = Μοντέλο διεργασίας

Σχήμα 3.106 Σχήμα Προσαρμοζόμενου Ελέγχου



Desired output = Επιθυμητή έξοδος
 Error = Σφάλμα
 Controller = Ελεγκτής
 Input variable = Μεταβλητή εισόδου

Manufacturing process = Παραγωγική διαδικασία
 Measured output = Μετρούμενη έξοδος
 Process model = Μοντέλο διεργασίας
 Adaptor = Προσαρμογέας

Σχήμα 3.107 Το Σχήμα του Προσαρμοστικού Ελέγχου με Προσαρμογή των Παραμέτρων του Μοντέλου

Υπάρχουν δυο τύποι προσεγγίσεων του προσαρμοστικού ελέγχου. Ο πρώτος είναι ο *Περιοριστικός Προσαρμοστικός Έλεγχος (Adaptive control constraint-ACC)*, που αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση της χρήσης της εργαλειομηχανής ή/και των ικανοτήτων του εργαλείου –θέτοντας περιορισμούς και συγκεκριμένα όρια στις διαδικασίες. Ένα παράδειγμα τέτοιου περιορισμού είναι το *μέγιστο φορτίο*, που προλαμβάνει την υπερφόρτιση της μηχανής. Ο άλλος τύπος του συστήματος ελέγχου είναι ο *προσαρμοστικός έλεγχος βελτιστοποίησης (Adaptive Control Optimization-ACO)* που σκοπεύει στην βελτιστοποίηση της παραγωγικής διεργασίας ως προς ένα ή περισσότερα κριτήρια βελτιστοποίησης. Τα συστήματα που είναι διαθέσιμα, εφαρμόζουν κατά κανόνα τον Περιοριστικό Προσαρμοστικό Έλεγχο (ACC) και όχι το σύστημα Βελτιστοποίησης του Προσαρμοστικού Ελέγχου (ACO), διότι το τελευταίο απαιτεί πλήρη μαθηματικά μοντέλα διεργασιών και περισσότερο εξελιγμένες προσεγγίσεις στην παρακολούθηση των διεργασιών.

Στον προσαρμοστικό έλεγχο (Adaptive Control) [13], τα τέσσερα κρίσιμα στοιχεία που περιλαμβάνονται είναι οι αισθητήρες (sensors), οι κινητήριιοι μηχανισμοί (actuators), ο ελεγκτής (controller) και τα μοντέλα των διεργασιών (process models). Οι αισθητήρες, συνήθως μετρούν τις μεταβλητές των διεργασιών όπως την ισχύ, την δύναμη, την εκπομπή ήχου κλπ. Οι αισθητήρες αποτελούν τα σημαντικότερα στοιχεία, απαραίτητα για την επιτυχή εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου των διεργασιών. Ωστόσο η ανάπτυξη αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν με ακρίβεια και αξιόπιστα να παρακολουθούν τις διεργασίες, έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα δύσκολη. Οι κινητήριιοι μηχανισμοί (actuators) δέχονται τις εντολές του συστήματος ελέγχου ως εισόδους τους και μετατρέπουν τις εντολές αυτές σε ρυθμίσεις των παραμέτρων των διεργασιών. Ο ελεγκτής λαμβάνει πληροφορίες από τον αισθητήρα του συστήματος και χρησιμοποιεί ένα μοντέλο διεργασιών, για να υπολογίσει τις αποκρίσεις στον κινητήριιο μηχανισμό του συστήματος. Τα μοντέλα των διεργασιών είναι οι μαθηματικές περιγραφές που συσχετίζουν τις μεταβλητές των διεργασιών, οι οποίες μετρούνται από τους αισθητήρες –π.χ. η δύναμη κοπής– με τις παραμέτρους των διεργασιών –π.χ. πρόωση ή/και ταχύτητα.

Η πλήρης μαθηματική περιγραφή των διεργασιών μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη, εξ αιτίας των επιδράσεων διαφόρων φυσικών φαινομένων κατά την διάρκεια της διεργασίας. Συνήθως, μια προσέγγιση του προσαρμοστικού ελέγχου αποτελείται από δύο βρόγχους ελέγχου (control loops). Ο πρώτος βρόγχος είναι ο βρόγχος ανάδρασης, που αποτελείται από τον ελεγκτή και την διεργασία. Οι παράμετροι του ελεγκτή ρυθμίζονται στον δεύτερο βρόγχο ώστε να ελαχιστοποιείται η διαφορά ή το λάθος μεταξύ των αποτελεσμάτων των διεργασιών και του αντίστοιχου θεωρητικού μοντέλου.

Αισθητήρες και οι τεχνικές τους (Sensing Techniques and Devices)

Ο στόχος της αυτοματοποίησης των παραγωγικών διεργασιών προϋποθέτει την δημιουργία βρόγχων ελέγχου, που παρέχουν πληροφορίες ανάδρασης για την κατάσταση των παραγωγικών διεργασιών. Στην συμβατική παραγωγή, χωρίς αυτοματοποιημένους ελέγχους, η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται μέσω της επίβλεψης από τους ειδικούς. Για τις εφαρμογές του αυτοματισμού, τα συστήματα αισθητήρων πρέπει να έχουν υψηλή απόδοση, προκειμένου να επιτύχουν τον αυτόματο έλεγχο, την επίβλεψη και την διόρθωση των λαθών που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών ενός «ευφυούς» παραγωγικού συστήματος.

Ανθρώπινη Αίσθηση	Δραστηριότητα Παρακολούθησης από τον Άνθρωπο	Πιθανοί Αισθητήρες Μηχανών
Όραση	<p>Προσδιορισμός σημείων αναφοράς του προς επεξεργασία κομματιού και των κοπτικών εργαλείων</p> <p>Παρακολούθηση για ξαφνική ζημιά των κοπτικών εργαλείων</p> <p>Οπτικοί ελεγκοί φθοράς εργαλείου</p> <p>Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των εργαλείων από το χρώμα του αποβλήτου (chip)</p> <p>Παρακολούθηση για τυχόν αλλαγές στην τελική επιφάνεια του εξαρτήματος</p>	<p>Ανιχνευτής αφής (touch-trigger)</p> <p>Μηχανική όραση (Machine Vision) και Ανιχνευτές με αφή (touch-trigger)</p> <p>Μηχανική όραση (Machine Vision)</p> <p>Θερμοζεύγος</p> <p>Μηχανική όραση (Machine Vision)</p>
Ακοή	<p>Ανίχνευση τυχόν υπερβολικών ταλαντώσεων μεταξύ εργαλείου και εξαρτήματος</p> <p>Ανίχνευση ήχου των εργαλείων που πλησιάζει ή έχει φθάσει σε αστοχία</p>	<p>Μετρητές επιταχύνσεων Δυναμόμετρα</p> <p>Μετρητές επιταχύνσεων Δυναμόμετρα και εξαρτήματα ακουστικών εκπομπών</p>
Αφή	<p>Αίσθηση τυχόν ταλαντώσεων μέσω του πατώματος ή με το άγγιγμα των εξαρτημάτων</p> <p>Αίσθηση των δυνάμεων κοπής μέσω του αγγίγματος των εξαρτημάτων ή των συγκρατητών των εργαλείων</p> <p>Αίσθηση τελικών επιφανειών για μέτρηση της ποιότητας</p>	<p>Μετρητές επιταχύνσεων</p> <p>Δυναμόμετρα και επιμηκυσιόμετρα (strain gages)</p> <p>Ακίδα ελέγχου επιφανειακής ποιότητας</p>
Οσμή	<p>Υψηλές θερμοκρασίες εργαλείων μερικές φορές αλλάζουν την οσμή των υγρών κοπής</p>	<p>Χημικοί Αισθητήρες</p>

Πίνακας 3.2 Αισθητήρες που σχετίζονται με Ανθρώπινες Αισθήσεις

Στην συμβατική κατάσταση, οι περισσότερες από τις αισθητήριες λειτουργίες ολοκληρώνονται με την ανθρώπινη κατανόηση και αξιολόγηση. Η τάση για μη επιβλεπόμενες κατεργασίες και τελείως αυτοματοποιημένα εργοστάσια

απαιτούν υψηλά επίπεδα αυτόματης παρακολούθησης των μηχανών. Ένα σύστημα αισθητήρων πρέπει να φθάσει τουλάχιστον την αποτελεσματικότητα των ικανοτήτων των ανθρώπινων αισθήσεων, προκειμένου να αντικαταστήσει έναν χειριστή (Πιν. 3.2). Οι αισθητήρες, που έχουν ικανότητες αίσθησης και επεξεργασίας παρόμοιες με τις ανθρώπινες, μπορούν να ονομαστούν «ευφυείς» αισθητήρες και μπορούν να χωρισθούν σε τρεις κατηγορίες, σύμφωνα με τις λειτουργίες τους: παρακολούθηση εργαλείων, παρακολούθηση επεξεργαζόμενων εξαρτημάτων και παρακολούθηση της απόδοσης των μηχανών.

Παρακολούθηση των Εργαλείων

Οι αισθητήρες των εργαλείων συνήθως πραγματοποιούν πέντε εργασίες: (1) αναγνώριση των εργαλείων, (2) επιβεβαίωση σύσφιγξης εργαλείου (tool grip confirmation), (3) αυτόματη αλλαγή εργαλείων (Automatic Tool Changer-ATC) με επιβεβαίωση της λειτουργίας αποθήκευσης των εργαλείων, (4) επιβεβαίωση της θέσης του άκρου των εργαλείων και (5) παρακολούθηση της κατάστασης των εργαλείων [14].

1. Οι αισθητήρες κωδικού ραβδώσεων (bar code) χρησιμοποιούνται ευρέως για την αναγνώριση των εργαλείων.
2. Οι προσεγγιστικοί διακόπτες και οι διακόπτες ορίου χρησιμοποιούνται για την επιβεβαίωση των σφιγκτήρων.
3. Η λειτουργία επιβεβαίωσης της αυτόματης αλλαγής εργαλείου(ATC) πραγματοποιείται με την χρήση προσεγγιστικών διακοπτών και διακοπτών ορίου.
4. Οι μηχανικοί αισθητήρες επαφής χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της θέσης του άκρου του εργαλείου.
5. Για την ανίχνευση της φθοράς του εργαλείου ή/και της τελικής αστοχίας του χρησιμοποιούνται διάφοροι αισθητήρες:
 - α) Κυψέλες φόρτισης, διακόπτες προσέγγισης και αισθητήρες ακουστικής εκπομπής (Acoustic Emission, AE) χρησιμοποιούνται στους τους τόνους.
 - β) Αισθητήρες ακουστικής εκπομπής και αισθητήρες επαφής χρησιμοποιούνται στα μηχανουργικά κέντρα.
 - γ) Μερικοί κατασκευαστές έχουν αναπτύξει ειδικούς αισθητήρες για την παρακολούθηση της φθοράς του τροχού λείανσης.

Μια περιοχή, στην οποία δίδεται ιδιαίτερη σημασία, είναι η παρακολούθηση της κατάστασης των εργαλείων (tool conditioning monitoring). Σκοπός είναι να διαγνωσθούν τα προβλήματα και να αντιμετωπισθούν χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

Οι μέθοδοι ανίχνευσης της φθοράς και των βλαβών των εργαλείων μπορούν να χωρισθούν σε δυο κατηγορίες: άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν την λήψη μετρήσεων από το ίδιο το εργαλείο, προκειμένου

να προσδιορίσουν την φθορά ή την βλάβη της κοπτικής πλευράς. Οι άμεσες μέθοδοι οδηγούν σε απώλεια παραγωγικού χρόνου, εξ αιτίας της αδυναμίας ανίχνευσης βλαβών κατά την λειτουργία του κοπτικού εργαλείου. Οι έμμεσες μέθοδοι έχουν την δυνατότητα να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα αυτά, χρησιμοποιώντας μετρήσεις κατά την διάρκεια της παραγωγικής διεργασίας για την παρακολούθηση της κατάστασης των εργαλείων. Οι άμεσες μέθοδοι είναι αποδεκτές σε περίπτωση ελέγχου σχετικά μικρού αριθμού εξαρτημάτων, όπου οι συχνές προσβάσεις στα εργαλεία δεν απαιτούν πολύ παραγωγικό χρόνο. Ωστόσο, μια έμμεση μέθοδος προτιμάται, γενικά, περισσότερο. Οι πιο πρόσφατες ερευνητικές μελέτες ασχολούνται με την αναγνώριση σημάτων (pattern recognition) και την συσχέτιση μεταξύ των σημάτων των αισθητήρων και της φθοράς των εργαλείων. Η πρόοδος στην κατεύθυνση αυτή θα οδηγούσε σε συστήματα παρακολούθησης, που θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν σε διάφορες διεργασίες [15].

Οι άμεσοι μέθοδοι παρακολούθησης της κατάστασης των εργαλείων περιλαμβάνουν:

1. Ανιχνευτές με διακόπτες επαφής που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των διαστάσεων των εξαρτημάτων. Η απόκλιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπό επεξεργασία εξαρτήματος από τα προβλεπόμενα, λόγω της φθοράς του εργαλείου, μπορεί να αναπληρωθεί με ρυθμίσεις για την επόμενη κοπή κ.ο.κ. έως ότου το εργαλείο φθαρεί τόσο, ώστε να πρέπει να αντικατασταθεί.
2. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που βασίζονται στις καλύτερες ανακλαστικές ιδιότητες της φθαρμένης επιφάνειας σε σχέση με την άφθαρτη επιφάνεια ενός εργαλείου. Το πρόβλημα με αυτές τις μεθόδους είναι, ότι δεν μπορούν να εφαρμοσθούν ικανοποιητικά στις συνθήκες ενός εργοστασίου, επειδή απαιτούν ιδιαίτερα καθαρό περιβάλλον.
3. Οι μέθοδοι όρασης έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ως άμεσοι μέθοδοι παρακολούθησης της φθοράς του εργαλείου [16, 17].

Οι έμμεσοι μέθοδοι παρακολούθησης της κατάστασης των εργαλείων περιλαμβάνουν:

1. Σχετικά εύχρηστες μεθόδους, που βασίζονται στην μέτρηση της μετατόπισης εργαλείου/επιφάνειας κατεργασίας. Η πραγματική θέση μιας κατεργασμένης επιφάνειας συγκρίνεται με την θέση της ίδιας της επιφάνειας, επεξεργασμένης όμως από ένα καινούργιο εργαλείο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την ίδια πληροφορία με εκείνη ενός αισθητήρα επαφής (touch trigger probe) αλλά δεν έχει το μειονέκτημα της διακοπής της διεργασίας για να γίνουν οι μετρήσεις.
2. Μεθόδους ηλεκτρικής αντίστασης, που βασίζονται στην αρχή ότι η ηλεκτρική αντίσταση κατά μήκος της επαφής εργαλείου-εξαρτήματος αυξάνει καθώς το εργαλείο φθείρεται. Το πρόβλημα σε αυτές τις με-

θόδους είναι, ότι οι κυκλικές μεταβολές της θερμοκρασίας κυρίως κατά την διακοπτόμενη κοπή (π.χ. φρεζάρισμα) επηρεάζουν σημαντικά την ηλεκτρική αντίσταση.

3. Τεχνικές βασισμένες στην εμφύτευση μικρών ποσοτήτων ραδιενεργού υλικού στην ελεύθερη πλευρά του κοπτικού εργαλείου σε μικρή αλλά γνωστή απόσταση από την κοπτική ακμή του [15]. Με την φθορά του κοπτικού απομακρύνεται το ραδιενεργό υλικό, η μείωση και τελικά η οριστική απομάκρυνση του οποίου ανιχνεύεται συνεχώς και προσδιορίζει την κατάσταση φθοράς του εργαλείου. Τα προβλήματα ασφαλείας των μεθόδων αυτών, το κόστος τους αλλά και η ανησυχία των χειριστών των μηχανών δεν τους επέτρεψε να βρουν πρακτικές εφαρμογές.
4. Οι ευρύτερα διαδεδομένες τεχνικές χρησιμοποιούν την μέτρηση των δυνάμεων κοπής για την παρακολούθηση και ανίχνευση της φθοράς των εργαλείων κοπής [18]. Πολλές μέθοδοι χρησιμοποιούν ανάλυση των συχνοτήτων των σημάτων της δύναμης ή της στρεπτικής ροπής [19-21]. Οι δυνάμεις και οι στρεπτικές ροπές μετρώνται εύκολα κατά την διάρκεια των διεργασιών. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μέτρησης των δυνάμεων κοπής:
 - α) δυναμόμετρο του συγκρατητή εργαλείου στους τόνους,
 - β) δυναμόμετρο τραπέζης στις μηχανές φρεζαρίσματος, διάτρησης και στα μηχανουργικά κέντρα,
 - γ) δυναμόμετρα τοποθετημένα μέσα στα έδρανα ατράκτου,
 - δ) εκτίμηση της δύναμης κοπής με βάση το ρεύμα, την τάση και την ταχύτητα του κινητήρα.
5. Μεθόδους που χρησιμοποιούν σήματα ακουστικής εκπομπής (ΑΕ), για την παρακολούθηση της φθοράς και την ανίχνευση της ζημιάς του εργαλείου [22, 23].
6. Μεθόδους συσχετισμού θερμοκρασίας του εργαλείου με τη φθορά του [24].
7. Μεθόδους συγχώνευσης των αισθητήρων: δηλαδή, συγχώνευσης των πληροφοριών από πολλούς αισθητήρες προκειμένου να επιτευχθούν ακριβείς και αξιόπιστες εκτιμήσεις της φθοράς των εργαλείων [25].

Παρακολούθηση των κατεργαζόμενων εξαρτημάτων (Workpiece Monitoring)

Οι αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση των εξαρτημάτων, πρέπει να παρακολουθούν τις πιο κάτω κατηγορίες: (1) αναγνώριση του κατεργαζόμενου εξαρτήματος, (2) διαστάσεις του εξαρτήματος, (3) θέση του εξαρτήματος, (4) επιβεβαίωση του μονταρίσματος/λάθους μονταρίσματος του

εξαρτήματος και (5) μη ικανοποιητική σύσφιξη (chucking) ή χαλάρωση των σφιγκτήρων.

1. Οι προσεγγιστικοί διακόπτες, οι διακόπτες ορίου και οι μηχανικοί αισθητήρες επαφής χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση του κατεργαζομένου εξαρτήματος.
2. Οι διαστάσεις των εξαρτημάτων υπολογίζονται με αισθητήρες επαφής, ηλεκτροστατικής χωρητικότητας, ή/και υπερηχητικούς και ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες.
3. Η θέση του μονταρίσματος των εξαρτημάτων ανιχνεύεται από τους προσεγγιστικούς διακόπτες επαφής και αισθητήρες αέρος.
4. Η επιβεβαίωση του μονταρίσματος των εξαρτημάτων γίνεται με αισθητήρες αέρος, μικρόμετρα αέρος, αισθητήρες πίεσης και αισθητήρες επαφής.
5. Η σύσφιξη ελέγχεται με τους προσεγγιστικούς διακόπτες, τους αισθητήρες πίεσης και τους διακόπτες ορίου.

Παρακολούθηση της Απόδοσης των Μηχανών (Machine Performance Monitoring)

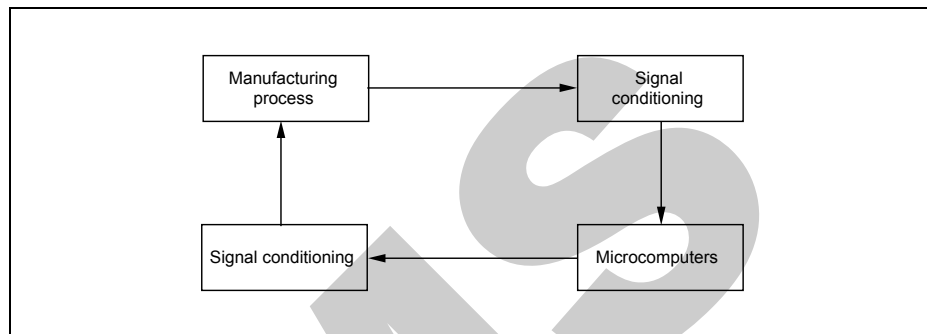
Η χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση της απόδοσης των μηχανών αποσκοπεί στην ικανοποίηση των απαιτήσεων του ποιοτικού ελέγχου και του αυτοματισμού των παραγωγικών διεργασιών, καθώς επίσης και στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας του προϊόντος. Η ικανοποίηση αυτών των αναγκών απαιτεί τη χρησιμοποίηση ενός μεγαλύτερου αριθμού αισθητήρων από ό,τι στην διαδικασία συμβατικής προετοιμασίας των μηχανών –π.χ. δραστηριότητες όρασης, αίσθηση της κατανομής της θερμοκρασίας ή αισθητήρες αφής. Για την παρακολούθηση της απόδοσης της μηχανής, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν αμπερόμετρα για την μέτρηση της δύναμης κοπής και της ισχύος του άξονα του κινητήρα. Χρησιμοποιούνται επίσης μετρητές τάσης, κυψέλες μέτρησης φορτίου (load cells), αμπερόμετρα για τον κινητήρα της πρόωσης του εργαλείου και ηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες [26].

Επίσης, αποτελεσματικές διαδικασίες είναι απαραίτητες για την επεξεργασία του αυξημένου όγκου πληροφοριών από τους αισθητήρες. Οι πληροφορίες, που παρέχονται, θα χρησιμοποιηθούν στα υψηλότερα επίπεδα ελέγχου των παραγωγικών διεργασιών. Όσο πιο εξελιγμένη είναι η επεξεργασία των πληροφοριών, τόσο συνθετότερες δραστηριότητες μπορεί να πραγματοποιήσει το σύστημα ελέγχου.

Η επιτυχής εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου, που εφαρμόζεται κατά την διάρκεια των διεργασιών, απαιτεί και την σύνδεση των αισθητήρων με τον υπολογιστή ελέγχου [27]. Ειδικότερα για αυτά τα συστήματα ελέγχου, οι αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν την τρέχουσα κατάσταση μιας διεργασίας, πρέπει να επικοινωνούν άμεσα μ' έναν μικροϋπολογιστή (Σχ.

3.108). Επιπλέον, εάν ένας υπολογιστής χρησιμοποιείται για την δραστηριοποίηση των κινητηρίων μηχανισμών προκειμένου να επηρεάσει μια διεργασία, οι μηχανισμοί αυτοί πρέπει να επικοινωνούν με το υπολογιστικό σύστημα. Οι απαιτήσεις επικοινωνίας δεν είναι ίδιες για όλους τους αισθητήρες και τους κινητήριους μηχανισμούς αλλά ποικίλουν από το ένα στοιχείο στο άλλο, ενώ τα χαρακτηριστικά του υπολογιστή που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει επίσης να ληφθούν υπ' όψη. Οι απαιτήσεις επικοινωνίας, που εξαρτώνται από τα επίπεδα των σημάτων, μπορούν να χωρισθούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Είσοδος χαμηλής τάσης, της τάξεως των milivolts
2. Έξοδος χαμηλού ρεύματος, της τάξεως 4-20 mA
3. Έξοδος υψηλής τάσεως, από μηδέν ως αρκετά Volts



Manufacturing process = Παραγωγική διεργασία
Signal conditioning = Επεξεργασία σήματος

Microcomputers = Μικροϋπολογιστές

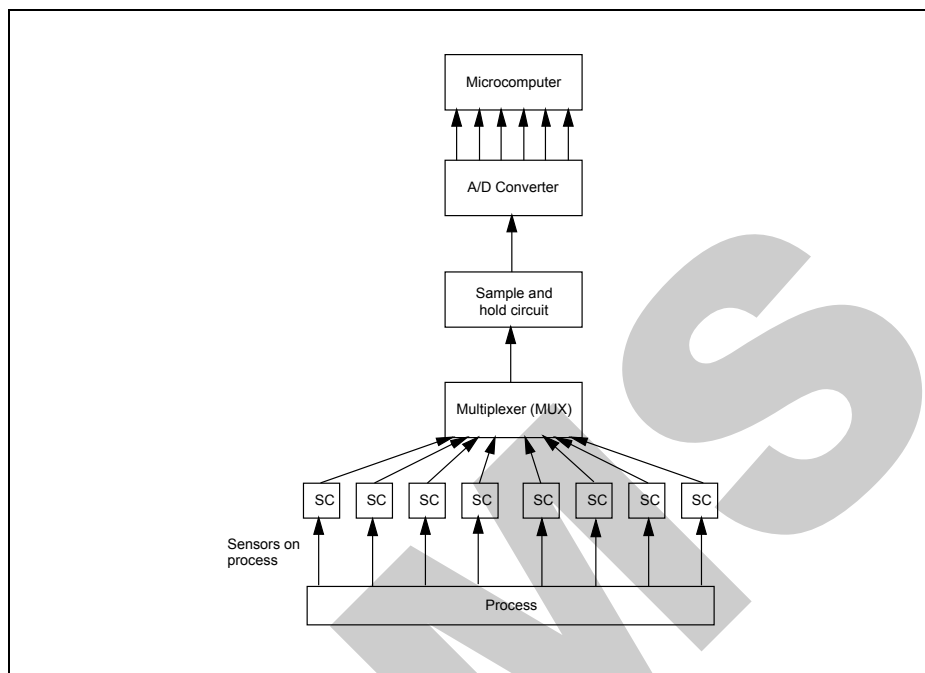
Σχήμα 3.108 Επικοινωνία του Μικροϋπολογιστή με μια Παραγωγική Διεργασία

Για την επικοινωνία του υπολογιστή με τους αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια σειρά εξαρτημάτων συνδεδεμένων με τον υπολογιστή: (1) μετασχηματιστές από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα (ADCs), (2) μετασχηματιστές από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα (DACs), (3) πολυπλέκτες (multiplexers), (4) ηλεκτρονικά κυκλώματα που πραγματοποιούν μια μέτρηση και την κρατούν (sample and hold circuit) και (5) ενισχυτές [27].

Πολυπλέκτες και Αποπολυπλέκτες (Multiplexers and Demultiplexers)

Συχνά στα συστήματα ελέγχου, που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια των διεργασιών, τα δεδομένα πρέπει να συγκεντρώνονται από πολλούς αισθητήρες. Για τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιείται ένας μικροεπεξεργαστής, που διαθέτει έναν περιορισμένο αριθμό θυρών εισόδου. Επομένως, ένας πολυπλέκτης (multiplexer) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για

να μοιράσει μια θύρα εισόδου ανάμεσα σ' έναν αριθμό αισθητήρων και να μετασχηματίσει τα δεδομένα από διάφορες γραμμές εισόδου σε μια κοινή γραμμή εξόδου (Σχ. 3.109). Η είσοδος πολλαπλών καναλιών του αναλογικού πολλαπλασιαστή είναι συνδεδεμένη με έναν αριθμό αισθητήρων και η απλή γραμμή εξόδου είναι συνδεδεμένη με ένα κύκλωμα δειγματοληψίας (sample-and-hold), του οποίου η αναλογική έξοδος είναι η είσοδος στο ADC.



Microcomputer = Μικροϋπολογιστής

A/D converter = Αναλογικός/ Ψηφιακός μετατροπέας

Sample and hold circuit = Κύκλωμα δείγματος και μνήμης

Multiplexer = Πολυπλέκτης

Sensors on process = Αισθητήρες κατά την διεργασία

Process = Διεργασία

Σχήμα 3.109 Σχηματική Αναπαράσταση Ενός Πολυπλέκτη

Ενισχυτές (Amplifiers)

Τα περισσότερα συστήματα ελέγχου, που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια των διεργασιών, περιλαμβάνουν την χρήση διαφορικών ή απλών ενισχυτών (differential or instrumentation amplifiers), οι οποίοι ενισχύουν την μέγιστη τιμή του χαμηλότερου επιπέδου των σημάτων των αισθητήρων έως το πλήρες

επίπεδο που απαιτείται από τον μετασχηματιστή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά. Τα αποτελέσματα του θορύβου μειώνονται σημαντικά με την χρήση διαφορικών ενισχυτών. Είναι πιθανό να χρησιμοποιήσουμε διαφορικούς ή απλούς ενισχυτές στις λειτουργίες, ώστε το κέρδος/ενίσχυση κάθε ενισχυτή ξεχωριστά μπορεί να είναι τέτοιο που να ταιριάζει στο επίπεδο του ηλεκτρικού σήματος που παρέχεται από τον αισθητήρα. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτού του τύπου απαιτεί την χρήση τόσων ενισχυτών, όσος είναι και ο αριθμός των αισθητήρων και για τον λόγο αυτόν έχει μεγάλο κόστος. Μια εναλλακτική λύση είναι η χρησιμοποίηση προγραμματιζόμενων ενισχυτών, των οποίων η ενίσχυση μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί από το λογισμικό, ώστε να ταιριάζει σε κάθε αισθητήρα. Ένας απλός προγραμματιζόμενος ενισχυτής μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί, για να ενισχύσει κατάλληλα τα σήματα από όλους τους αισθητήρες που έρχονται σε επαφή με τον πολυπλέκτη. Οι πιο σημαντικοί παράμετροι επιλογής των ενισχυτών είναι:

1. Το εύρος ενίσχυσης
2. Ο χρόνος ανόρθωσης
3. Η γραμμική ή μη γραμμική φύση του ενισχυτή
4. Ο απαιτούμενος χρόνος κάλυψης ολοκλήρου του πεδίου απόκρισης του ενισχυτή σε μια είσοδο μεγάλου βήματος
5. Η δυνατότητα αφαίρεσης της κοινής συνιστώσας των σημάτων εισόδου και εξόδου (common mode rejection capabilities) του ενισχυτή.

Ένα Παράδειγμα Αυτοπροσαρμοζόμενου Ελέγχου

Ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο των δυνάμεων κοπής στις κατασκευαστικές διεργασίες είναι σημαντικός για πολλούς λόγους: καλύτερο φινίρισμα των επιφανειών και ακρίβεια των διαστάσεων του εξαρτήματος, αύξηση της διάρκειας ζωής των εργαλείων και καλύτερη χρήση της μηχανής που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας. Ο έλεγχος των δυνάμεων για το φρεζάρισμα και το τρνίρισμα επιτυγχάνεται, συνήθως, μέσω της ρύθμισης της πρόωσης, η οποία καθορίζει το πάχος του αποβλήτου. Ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή απαιτεί ένα μοντέλο της δυναμικής, το οποίο συσχετίζει την εντολή πρόωσης με το πάχος του αποβλήτου, εφ' όσον η επιτυχημένη λειτουργία του ελεγκτή εξαρτάται από την δυναμική απόκριση του συστήματος. Επιπλέον ο ελεγκτής ανάδρασης πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη την δύναμη κοπής σε σχέση με τις ιδιότητες του υλικού, την κατάσταση των εργαλείων και το βάθος κοπής, που γενικά είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Το παράδειγμα αυτό θεωρεί έναν ελεγκτή, ο οποίος προσαρμόζεται στις αλλαγές των συνθηκών κοπής και των ιδιοτήτων των υλικών. Αυτό το σχέδιο προσαρμογής εκτιμά μόνο μια παράμετρο και είναι εξαιρετικά απλό να εφαρμοσθεί [13].

Το σχέδιο προσαρμοστικού ελέγχου χρησιμοποιεί ένα δυναμικό μοντέλο διακριτού χρόνου για την μοντελοποίηση των διεργασιών κοπής. Το μοντέλο βασίζεται στην αναγνώριση εισόδου/εξόδου και στις γεωμετρικές θεωρήσεις

για το πάχος του αποβλήτου κατά την διάρκεια της μετάβασης. Το μοντέλο λαμβάνει υπ' όψη του τους εξής όρους:

α) Δυναμική της μεταφορικής κίνησης

Η αναγνώριση ελαχίστων τετραγώνων, που βασίζεται στην εντολή πρόωσης και στην μετρούμενη πρόωση, παρέχει το ακόλουθο δευτεροβάθμιο μοντέλο διακριτού χρόνου για την αναπαράσταση της δυναμικής του εργαλειοφορείου και του οδηγού.

$$G_{ic}(z) = \frac{U_a(z)}{U_c(z)} = \frac{0.552z + 0.4529}{z^2 + 0.215z + 0.2466} \quad (3-83)$$

όπου

U_c : Η εντολή πρόωσης (volts)

U_a : Η πραγματική πρόωση (cm/sec)

β) Η δυναμική της πρόωσης και του πάχους του αποβλήτου

Από μια απλή γεωμετρική προσέγγιση φαίνεται, ότι η μεταβατική απόκριση του πάχους του αποβλήτου για μια αλλαγή μοναδιαίου βήματος στην πρόωση, χαρακτηρίζεται από μια ευθεία γραμμή από την παλιά τιμή σταθερής κατάστασης στην καινούργια (Σχ. 3.110) και χρειάζεται μια πλήρης περιστροφή του άξονα, πριν το πάχος του αποβλήτου καθορισθεί σε μια καινούργια τιμή. Ακολουθεί ένα μοντέλο διακριτού χρόνου, που περιγράφει την μεταβατική απόκριση του πάχους του αποβλήτου:

$$G_{mc}(z) = \frac{f_r(z)}{U_a(z)} = \frac{B(z^4 + z^3 + z^2 + z + 1)}{z^5} \quad (3-84)$$

όπου $B=0.01$ για το ακατέργαστο πάχος/πρόωση του αποβλήτου, f_r , και την πραγματική πρόωση, U_a , σε cm και cm/sec αντίστοιχα. Η συνάρτηση μεταφοράς εξαρτάται από τον χρόνο δειγματοληψίας και την ταχύτητα του άξονα.

γ) Η διεργασία κοπής

Με δεδομένο το πάχος του αποβλήτου, το βάθος της κοπής και άλλες συνθήκες κοπής καθώς επίσης και τις ιδιότητες του υλικού, η δύναμη κοπής καθορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$F = Kdf_r^p \quad (3-85)$$

όπου

F : δύναμη κοπής

K : σταθερά

d : βάθος κοπής

p : σταθερός εκθέτης

f_r : πρόωση

Προκειμένου να έχουμε ένα γραμμικό μοντέλο, αντίστοιχο του πάχους του αποβλήτου, ο εκθέτης p στην Εξίσωση (3-85) υποθέτουμε ότι είναι μονάδα. Η υπόθεση αυτή δεν προκαλεί καμία σημαντική διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων και πειραματικών δεδομένων.

Η έξοδος του αισθητήρα της δύναμης έχει φιλτραριστεί, ώστε να απομακρύνει τον θόρυβο υψηλής συχνότητας. Η συνάρτηση μεταφοράς για το φίλτρο είναι:

$$G_f(z) = \frac{F_f(z)}{F(z)} = \frac{0.454}{z - 0.5464} \quad (3-86)$$

όπου

F : η δύναμη κοπής

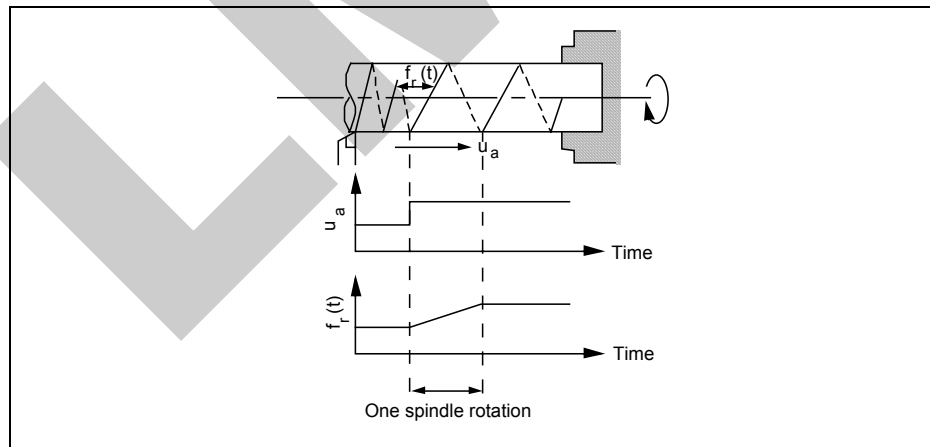
F_f : η φιλτραρισμένη δύναμη κοπής

Μέσω των Εξισώσεων (3-83) έως (3-86) παρέχεται ένα μοντέλο διακριτού χρόνου του συστήματος τόνου για τον έλεγχο της ανάδρασης της δύναμης (Σχ. 3.111).

$$G_p(z) = K_p \frac{(z^4 + z^3 + z^2 + z + 1)(0.522z + 0.4529)}{z^5(z^2 + 0.215z + 0.2466)(z - 0.5464)} \quad (3-87)$$

όπου $K_p = 0.454BK_d$.

Όλα τα χαρακτηριστικά αβεβαιότητας στην κοπή των μετάλλων παριστάνονται από την ενίσχυση K_p , που περιλαμβάνεται στο μοντέλο. Αυτό το χαρακτηριστικό του μοντέλου διευκολύνει τον σχεδιασμό και την εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου.



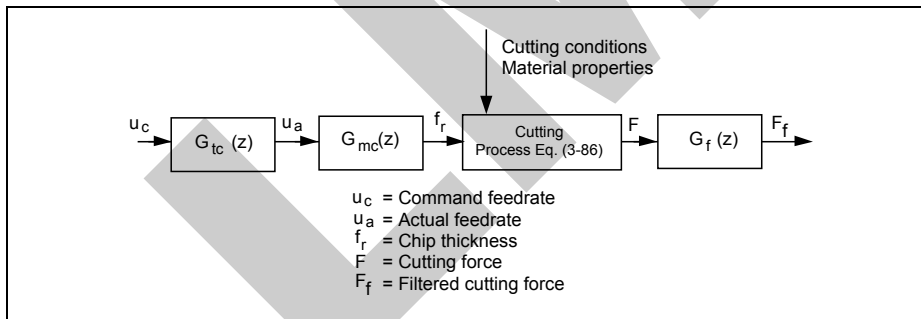
Time = Χρόνος

ατράκτου

One spindle rotation = Μία περιστροφή της

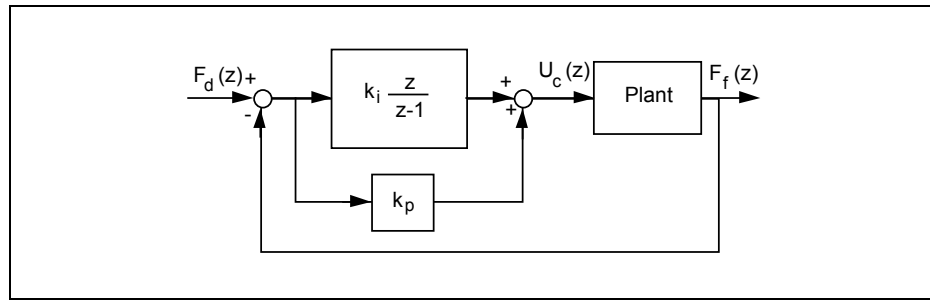
Σχήμα 3.110 Το Πάχος του Αποβλήτου σε Σχέση με την Πρόωση

Η μέθοδος του προσαρμοστικού ελέγχου βασίζεται σε έναν ελεγκτή PI (Σχ. 3.112). Το σύστημα ελέγχου σταθερού κέρδους/ενίσχυσης PI παρέχει πολύ καλή ρύθμιση της απόδοσης στην περίπτωση συντονισμού και η μείωση της απόδοσης οφείλεται στις αποκλίσεις από το κέρδος του βρόγχου. Ο σκοπός της μεθόδου του προσαρμοστικού ελέγχου (Σχ. 3.113) είναι να διατηρεί την δύναμη κοπής F_f σε μια επιθυμητή τιμή F_d , κάνοντας τις κατάλληλες ρυθμίσεις στην εντολή πρόωσης U_c , ενώ η ταχύτητα κοπής παραμένει σταθερή. Ο ελεγκτής αποτελείται από δύο βρόγχους ελέγχου. Ο πρώτος βρόγχος είναι ένας τυπικός βρόγχος ανάδρασης, που χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή PI. Ο δεύτερος συντονίζει το κέρδος, \hat{K}_p , έτσι ώστε η διαφορά, μεταξύ της δύναμης κοπής που εκτιμήθηκε από το μοντέλο \hat{F}_f και της μετρούμενης δύναμης κοπής F , να ελαχιστοποιηθεί. Η διαδικασία κέρδους, \hat{K}_p , η οποία εξαρτάται από το βάθος κοπής, τις συνθήκες των εργαλείων και το υλικό, εκτιμάται από μια παράμετρο που προσδιορίζεται με μια επαναληπτική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Ο προσδιορισμός του \hat{K}_p βασίζεται στο $m(k)$, στην εντολή πρόωσης επεξεργασμένη από το γνωστό μέρος της δυναμικής της διεργασίας κοπής. Το $f(k)$ παριστάνει το εφαρμοζόμενο κέρδος και λ είναι ο συντελεστής εκθετικής μείωσης της επίδρασης παρελθουσών εκτιμήσεων στην τρέχουσα εκτίμηση των παραμέτρων. Οι παράμετροι του ελεγκτή συγχρονίζονται για μια υποτιθέμενη ονομαστική διεργασία κέρδους/ενίσχυσης K_{p0} . Η έξοδος του ελεγκτή τροποποιείται από το $K_{p0}/K_p(k-1)$, ώστε να κάνει τον συνολικό βρόγχο κέρδους/ενίσχυσης αμετάβλητο από τις αποκλίσεις της διεργασίας κέρδους/ενίσχυσης.



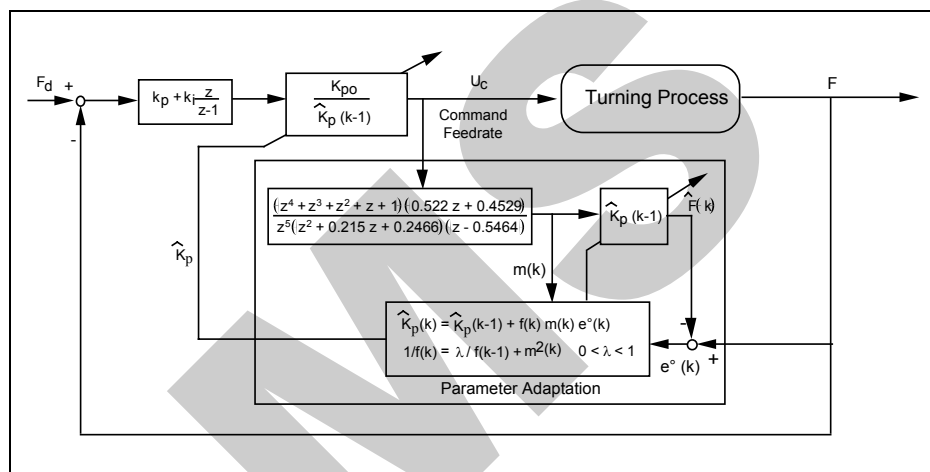
Cutting conditions = Συνθήκες κοπής	τροφοδοσίας
Material properties = Ιδιότητες υλικού	Chip thickness = Πάχος αποβλήτου (γρεζιού)
Cutting process = Διεργασία κοπής	Cutting force = Δύναμη κοπής
Command feedrate = Ρυθμός τροφοδοσίας εντολών	Filtered cutting force = Φιλτραρισμένη δύναμη κοπής
Actual feedrate = Πραγματικός ρυθμός	

Σχήμα 3.111 Το Μοντέλο Διακριτού Χρόνου για τη Διεργασία Κοπής Μετάλλου στον Τόρνο



Plant = Εγκατάσταση

Σχήμα 3.112 Αναλογικός και Ολοκληρωτικός Έλεγχος της Δύναμης Κοπής



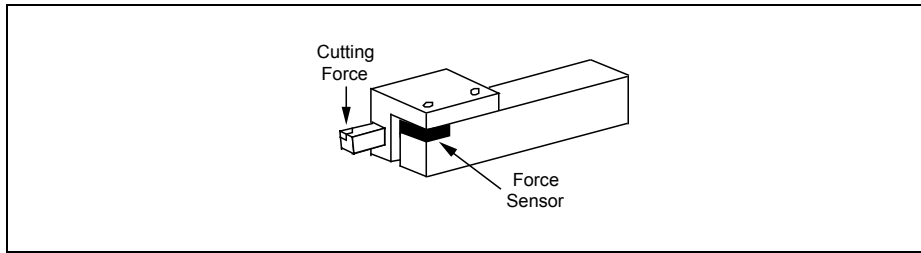
Turning process = Διεργασία τρνρνίρματορ
Command feedrate = Ρυθμόρ τροφοδορρίαρ

εντολών

Parameter adaptation = Προραρμογή παραμέτρον

Σχήμα 3.113 Το Σχέδιο του Προραρμορτικού Ελέγχου εφαρμοζόμενο ρτιρ Διεργαρρίαρ Τόρνου

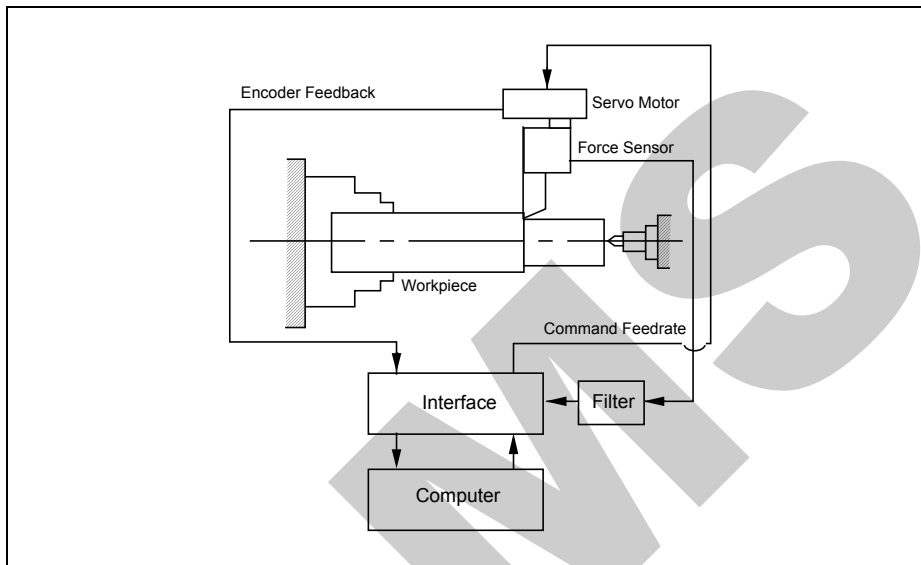
Κατά την εφαρμογή του προραρμορτικοφ ελέγχου ρτιρ την διεργαρρίαρ τρνρνίρματορ, η δύναμη κοπήρ μετράται από έναν αιρθητήρα δυνάμεων με πιερροηλεκτρικό κρύρταλλο (Σχ. 3.114) ρνδεδεμένο ρτον μεταφορέα του εργαλείου (Σχ. 3.115). Η έξοδορ του αιρθητήρα των δυνάμεων φιλτράρεται, ώρτε να ελαχίρτοποιήρσει την υρηγή ρυχνότητα θορύβου. Για τον έλεγχο της δύναμης ανάδραρρηρ, η πρόωρη του εργαλείου ρτιρ την διεύθυνρη του άξονα είναι η επερξεργαρρημένη μεταβλητή. Άλλερ πορρότητερ όπωρ το βάθορ κοπήρ και οι ιδιότητες του υλικού, που προρδιορίζουρ την κατάρσταση κοπήρ, χρρηρριοποιούρται ωρ γνωρρτέρ ή άγνωρρτερ διαταραχές.



Cutting force = Δύναμη κοπής

Force sensor = Αισθητήρας δύναμης

Σχήμα 3.114 Αισθητήρας Δυνάμεων συνδεδεμένος στον Εργαλειοδέτη



Encoder feedback = Επανατροφοδοσία Κωδικοποιητή
 Servo motor = Σερβοκινητήρας
 Force sensor = Αισθητήρας δύναμης
 Workpiece = Κατεργαζόμενο κομμάτι

Command feedrate = Ρυθμός τροφοδοσίας εντολών
 Interface = Μέσο διασύνδεσης
 Filter = Φίλτρο
 Computer = Υπολογιστής

Σχήμα 3.115 Τόρνος Ελεγχόμενος μέσω Υπολογιστή

3.4.5 Αυτοματισμός της Παραγωγής και Ολοκληρωμένα Συστήματα Παραγωγής με τη βοήθεια Η/Υ (CIM)

Κατά τη διαδικασία παραγωγής, οι υπολογιστές είναι απαραίτητοι για την ανάπτυξη συστημάτων αριθμητικού ελέγχου NC, ρομποτικών συστημάτων, του σχεδιασμού με την βοήθεια Η/Υ (CAD), της παραγωγής με τη βοήθεια Η/Υ

(CAM) και των ευέλικτων συστημάτων παραγωγής (FMS). Προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα συνεργασίας των συστημάτων, έχουν σχεδιασθεί ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής (CIM) μέσω Η/Υ. Τα ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής (CIM) περιλαμβάνουν όχι μόνο τις λειτουργίες παραγωγής αλλά επιχειρησιακές και άλλες λειτουργίες.

Τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Παραγωγής με την βοήθεια Η/Υ (CIM) παρέχουν υπολογιστική βοήθεια, έλεγχο και αυτοματισμό υψηλού επιπέδου σε όλα τα επίπεδα των βιομηχανιών παραγωγής, μέσω της σύνδεσης των διαφόρων τμημάτων αυτοματισμού σ' ένα κατανεμημένο σύστημα επεξεργασίας. Η τεχνολογία, που εφαρμόζεται στα ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής (CIM), χρησιμοποιεί τα κατανεμημένα δίκτυα υπολογιστών, τις τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων, την τεχνητή νοημοσύνη (AI) και τα συστήματα διαχείρισης των βάσεων δεδομένων.

Ένας τυπικός ορισμός των ολοκληρωμένων συστημάτων παραγωγής (CIM) [28] είναι: «Μια σειρά αλληλοσυσχετιζόμενων δραστηριοτήτων και λειτουργιών, στις οποίες περιλαμβάνονται ο σχεδιασμός, η επιλογή των υλικών, ο προγραμματισμός, η παραγωγή, η διασφάλιση ποιότητας, η διαχείριση και η προώθηση στην αγορά βιομηχανικών προϊόντων. Το ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής (CIM) είναι η ολοκλήρωση των αυτόματων συστημάτων στις διεργασίες παραγωγής ενός προϊόντος. Το ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής (CIM) μπορεί να θεωρηθεί ως η λογική οργάνωση των λειτουργιών της τεχνικής της παραγωγής και της αγοράς/υποστήριξης σ' ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα».

Τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Παραγωγής με τη βοήθεια Η/Υ (CIM) καλύπτουν όλες τις δραστηριότητες, που σχετίζονται με τις παραγωγικές επιχειρήσεις, περιλαμβάνοντας:

- Εκτίμηση και ανάπτυξη των διαφορετικών στρατηγικών παραγωγής. Ανάλυση της αγοράς και δημιουργία των προβλέψεων.
- Ανάλυση των χαρακτηριστικών του προϊόντος/αγοράς και των βασικών ιδεών, που δημιουργούνται για πιθανά συστήματα παραγωγής (π.χ. κυψέλες FMS και συστήματα FMS).
- Σχεδίαση και ανάλυση εξαρτημάτων για την κατασκευή, τον έλεγχο, την συναρμολόγηση και όλες τις άλλες διεργασίες, που σχετίζονται με την φύση του συστατικού ή/και του προϊόντος (π.χ. κοπή, παραγωγή με laser, βαφή, συγκόλληση, κ.λ.π.).
- Εκτίμηση ή/και καθορισμός του μεγέθους των παρτίδων, της χωρητικότητας της παραγωγής, των στρατηγικών προγραμματισμού και ελέγχου που σχετίζονται με τις διεργασίες σχεδιασμού και κατασκευής και εμπλέκονται στο συγκεκριμένο προϊόν.
- Ανάλυση και ανάδραση ορισμένων επιλεγμένων παραμέτρων που σχετίζονται με τις παραγωγικές διεργασίες, εκτίμηση των αναφορών κατάστασης από τα συστήματα άμεσου αριθμητικού ελέγχου (DNC)

(παρακολούθηση των δεδομένων και της λειτουργίας της μηχανής σε πραγματικό χρόνο).

- Ανάλυση των διαταραχών του συστήματος και των οικονομικών παραγόντων του συνολικού συστήματος.

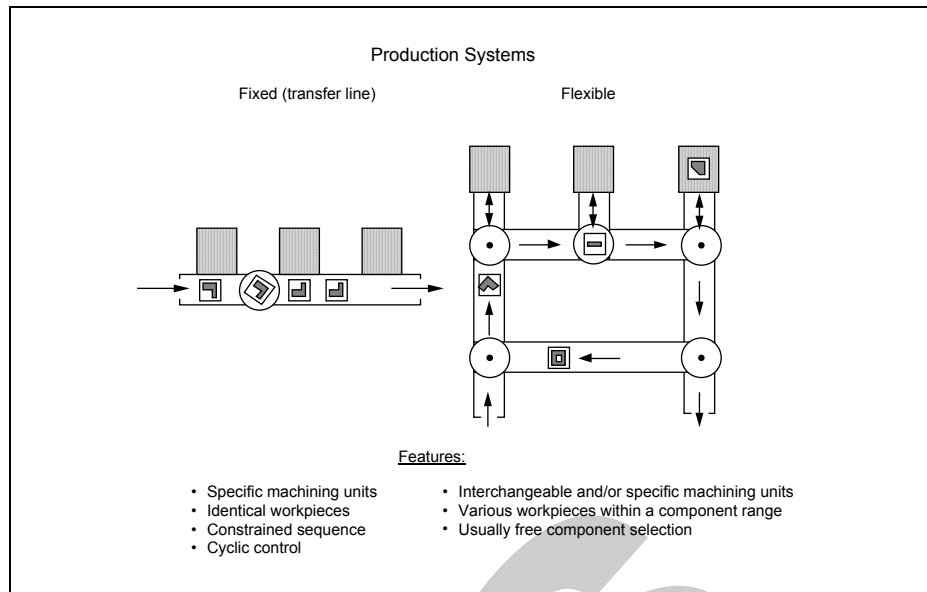
Ο σκοπός του ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής (CIM) είναι η χρησιμοποίηση προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας πληροφοριών σε όλες τις περιοχές των παραγωγικών βιομηχανιών προκειμένου:

- Να κάνει την συνολική διεργασία περισσότερο παραγωγική και αποτελεσματική.
- Να αυξήσει την αξιοπιστία του προϊόντος.
- Να μειώσει το κόστος της παραγωγής και την συντήρηση, που σχετίζεται και με το σύστημα παραγωγής καθώς επίσης και με το προϊόν.
- Να μειώσει τον αριθμό των επικίνδυνων εργασιών και να αυξήσει την εμπλοκή ικανών και πολύ καλά εκπαιδευμένων ανθρώπων στις δραστηριότητες παραγωγής και σχεδιασμού.

Ευέλικτο Σύστημα Παραγωγής (Flexible Manufacturing System, FMS)

Γενικά, ένα αυτόματο σύστημα παραγωγής μπορεί να περιγραφεί ως μια συλλογή μηχανικών, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, τα οποία συνεργάζονται ώστε να πραγματοποιήσουν μια ή περισσότερες παραγωγικές εργασίες. Τα προκαθορισμένα συστήματα (fixed systems) συνήθως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μεγάλων παρτίδων προϊόντων και περιορίζονται στην παραγωγή ενός απλού εξαρτήματος ή μερικών εξαρτημάτων (Σχ. 3.116). Στα συστήματα αυτά ο απαιτούμενος χρόνος ρύθμισης των μηχανών, από την παραγωγή ενός εξαρτήματος στην παραγωγή ενός άλλου, είναι συνήθως μεγαλύτερης τάξης μεγέθους από τον χρόνο του παραγωγικού κύκλου. Οι αυτόματες γραμμές παραγωγής είναι συνήθως ομάδες ειδικά σχεδιασμένων μηχανών, οι οποίες ενσωματώνονται σ' ένα σύστημα με την μορφή ειδικά σχεδιασμένων συστημάτων μεταφοράς εξαρτημάτων και χειρισμού υλικών .

Ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής (Flexible Manufacturing System, FMS) είναι ένα «επαναπρογραμματιζόμενο» σύστημα παραγωγής, ικανό να παράγει μια ποικιλία εξαρτημάτων αυτόματα (Σχ. 3.116). Οι γραμμές παραγωγής είναι ικανές να πραγματοποιήσουν μια ποικιλία παραγωγικών λειτουργιών αυτόματα. Ωστόσο, η αλλαγή αυτών των γραμμών παραγωγής, ώστε να προσαρμοσθούν ακόμα και σε πολύ μικρές αλλαγές των προϊόντων, είναι πολύ δύσκολη. Μπορεί να χρειάζεται η εισαγωγή ολόκληρων μηχανών στο σύστημα ενώ άλλες μηχανές ή εξαρτήματα τροποποιούνται ή απομακρύνονται, ώστε να εφαρμοσθούν μικρές αλλαγές στο προϊόν.



Production systems = Συστήματα παραγωγής
 Fixed (transfer line) = Σταθερό (γραμμή μεταφοράς)
 Flexible = Ευέλικτο (σύστημα παραγωγής)
 Features = Χαρακτηριστικά
 Specific machining units = Ειδικές μονάδες κατεργασίας
 Identical workpieces = Πανομοιότυπα κομμάτια προς κατεργασία
 Constrained sequence = Διατεταγμένη (βάσει

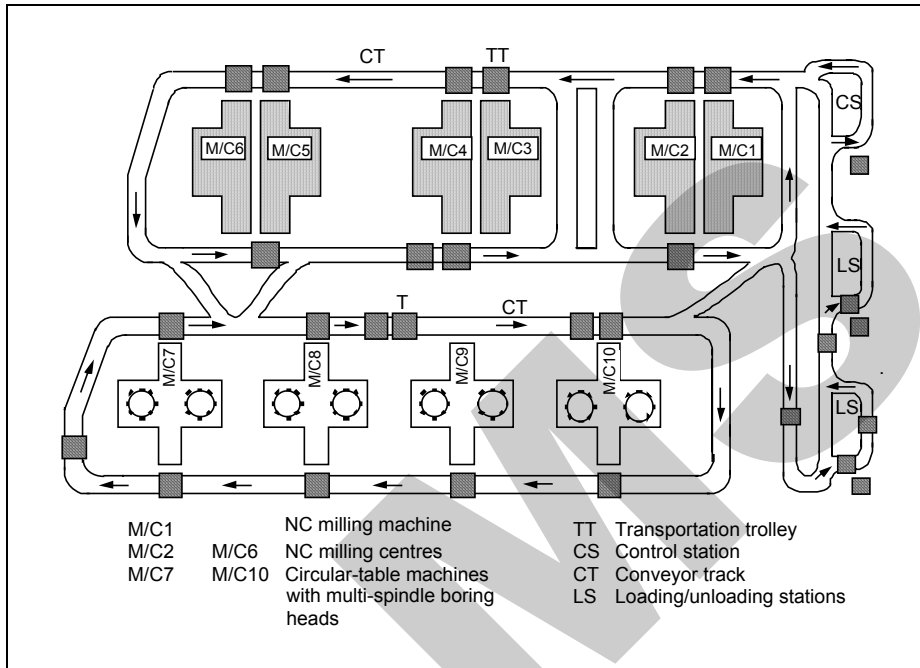
περιορισμών) ακολουθία
 Cyclic control = Κυκλικός έλεγχος
 Interchangeable and/or specific machining units = Εναλλάξιμες και/ή ειδικές μονάδες κατεργασίας
 Various workpieces within a component range = Διάφορα κατεργαζόμενα κομμάτια εντός του πεδίου συνιστώντων στοιχείων
 Usually free component selection = Συνήθως ελεύθερη επιλογή συνιστώντων στοιχείων

Σχήμα 3.116 Προκαθορισμένα και Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής

Ένα σύστημα FMS εφαρμόζει προγραμματιζόμενο ηλεκτρονικό έλεγχο, που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ρυθμισθεί για τυχαίες σειρές εξαρτημάτων, χωρίς να επισύρει κανένα χρόνο ρύθμισης μεταξύ των εξαρτημάτων. Οι αρχές του αριθμητικού ελέγχου (NC) και της ρομποτικής παρέχουν ικανότητες επαναπρογραμματισμού στο επίπεδο της μηχανής, με ελάχιστο χρόνο ρύθμισης. Οι μηχανές αριθμητικού ελέγχου (NC) και τα ρομπότ [3] αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία (building blocks) ενός επαναπρογραμματιζόμενου συστήματος παραγωγής (Σχ. 3.117).

Εφ' όσον ο αυτοματισμός πρέπει να είναι προγραμματιζόμενος, προκειμένου να προσαρμόζεται σε μια ποικιλία απαιτήσεων διεργασιών-προϊόντων, τότε θα πρέπει οι βασικές διεργασίες να πραγματοποιούνται από μηχανές ικανές να πραγματοποιούν αλλαγές, καθώς επίσης και από μηχανές πολλαπλών χρήσεων. Γι' τον λόγο αυτόν, τα κέντρα τριτοβάθμιας με αριθμητικό έλεγχο με υπολογιστή (CNC), τα μηχανουργικά κέντρα αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή (CNC) και οι ρομποτικοί σταθμοί εργασίας αποτελούν την πλειοψηφία

του εξοπλισμού στα εν λόγω συστήματα. Οι μηχανές αυτές δεν είναι ικανές μόνο για εύκολο επαναπρογραμματισμό αλλά επίσης είναι ικανές να υιοθετούν πολλά διαφορετικά εργαλεία, μέσω ενός συστήματος αλλαγής και αποθήκευσης εργαλείων. Δεν είναι ασυνήθιστο για ένα μηχανουργικό κέντρο αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή (CNC) να περιέχει 60 ή περισσότερα εργαλεία (κοντύλια, τρυπάνια κ.λ.π.) και για ένα κέντρο τορνιρίσματος αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή (CNC) να περιέχει 12 ή περισσότερα εργαλεία (δεξιόστροφα και αριστερόστροφα εργαλεία τορνιρίσματος, τρυπάνια, ράβδους βαθιάς τórνευσης κ.λ.π.).



NC milling machining = Φρέζα με αριθμητικό έλεγχο

NC milling centres = Κέντρα εργαλειομηχανών/φρεζών με αριθμητικό έλεγχο

Circular-table machines with multi-spindle boring heads = Εργαλειομηχανές κυκλικής τραπέζης με πολλαπλές κεφαλές διάνοιξης

Transportation trolley = Βαγονέτο μεταφοράς

Control station = Σταθμός ελέγχου

Conveyor track = Τροχιές (βαγονέτου μεταφοράς)

Loading/unloading stations = Σταθμοί φόρτωσης/εκφόρτωσης

Σχήμα 3.117 Το σχέδιο ενός Ενέλικτου Συστήματος Παραγωγής

Τα εξαρτήματα πρέπει επίσης να μετακινούνται αυτόματα μεταξύ των σταθμών επεξεργασίας. Πολλοί διαφορετικοί τύποι συστημάτων διαχείρισης υλικών χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση των υπό κατεργασία εξαρτημάτων από τον έναν σταθμό στον άλλο. Η επιλογή του τύπου του συστήματος χειρισμού είναι συνάρτηση πολλών χαρακτηριστικών. Το σύστημα χειρισμού πρέ-

πει πρώτα να είναι ικανό να προσαρμόζεται στο φορτίο και τον όγκο του εξαρτήματος καθώς και στα χαρακτηριστικά του. Μεγάλα και βαριά εξαρτήματα απαιτούν μεγάλα δυναμικά συστήματα χειρισμού, κυλιόμενους μεταφορείς ή οδηγούμενα οχήματα. Οι αριθμοί των μηχανών, που περιλαμβάνονται στο σύστημα, καθώς και η διάταξη τους πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη κατά την σχεδίαση. Εάν ένας απλός χειριστής υλικών πρόκειται να μετακινήσει εξαρτήματα σε όλες τις μηχανές εντός του συστήματος, τότε ο χώρος εργασίας του χειριστή πρέπει να είναι τόσο μεγάλος όσος και του φυσικού συστήματος. Ένα ρομπότ μπορεί να κατευθύνεται σε μια ή δύο μηχανές και σε έναν σταθμό φόρτωσης ή εκφόρτωσης. Ένα σύστημα Αυτόματα Οδηγούμενων Οχημάτων (Automatic Guided Vehicle AGV) μπορεί να επεκταθεί, ώστε να καλύπτει πολλά χιλιόμετρα του χώρου του εργοστασίου. Το σύστημα διαχείρισης υλικών πρέπει επίσης να είναι ικανό να μετακινεί εξαρτήματα από τη μια μηχανή στην άλλη μέσα σε καθορισμένα χρονικά πλαίσια. Οι μηχανές στο σύστημα θα είναι μη παραγωγικές, εάν καταναλώνουν πολύ χρόνο περιμένοντας να παραλάβουν τα εξαρτήματα από τον χειριστή των υλικών. Εάν πολλά εξαρτήματα περιλαμβάνονται στο σύστημα και απαιτούν συχνές επισκέψεις στις μηχανές, τότε το σύστημα χειρισμού των υλικών πρέπει να είναι ικανό να υποστηρίξει αυτές τις δραστηριότητες. Αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί είτε με την χρήση πολύ γρήγορης συσκευής χειρισμού (π.χ. ρομπότ) είτε με την χρήση πολλών συσκευών χειρισμού παράλληλα. Για παράδειγμα, αντί να χρησιμοποιείται ένα και μοναδικό ρομπότ για την μετακίνηση των εξαρτημάτων σε όλες τις μηχανές του συστήματος, θα μπορούσε ένα ρομπότ να εξυπηρετεί μια και μόνο μηχανή.

Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιείται σ' ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής (FMS), πρέπει να έχει την ικανότητα να υποστηρίζει την παραγωγή μιας ποικιλίας προϊόντων ή εξαρτημάτων. Μια οικονομική ανάλυση κόστους και οφελών, για κάθε κατηγορία ειδικού εξοπλισμού, κρίνεται απαραίτητη για τον καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού του εξοπλισμού. Ωστόσο, επειδή οι μηχανές αριθμητικού ελέγχου (NC) έχουν πρόσβαση σ' έναν μικρόν αριθμόν εργαλείων, πολύ μικρός αριθμός ειδικών εργαλείων θα πρέπει να συμπεριληφθεί.

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των ευέλικτων συστημάτων παραγωγής (FMS), που θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη, είναι τα συστήματα πρόσδεσης/συγκράτησης (fixturing). Μοναδικό χαρακτηριστικό, πολλών συστημάτων FMS, αποτελεί η δυνατότητα μετακίνησης εξαρτήματος μέσα στο σύστημα μαζί με το σύστημα συγκράτησης του. Τα συστήματα συγκράτησης κατασκευάζονται με τις ίδιες διαστάσεις, ώστε το σύστημα χειρισμού των υλικών να μπορεί να εξειδικευθεί στην χρήση μιας και μόνον γεωμετρίας. Τα εξαρτήματα τοποθετούνται ακριβώς στα αντίστοιχα συστήματα συγκράτησης και μετακινούνται από τον έναν σταθμό στον άλλον μαζί με αυτά. Τα συστήματα συγκράτησης αυτού του τύπου καλούνται, συνήθως, παλέτες προσαρμογής ή απλά παλέτες. Πολλές από τις παλέτες, που χρησιμοποιούνται σήμερα, έχουν τυπικές εγκοπές (T-slots) και χρησιμοποιούν τυπικές συναρμογές για να δημιουργήσουν το σύ-

στημα τοποθέτησης και συγκράτησης των εξαρτημάτων, που απαιτείται για τις κατασκευαστικές διεργασίες.

Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνικές Δικτύων Τοπικής Περιοχής (Local Area Network LAN) έχουν γίνει περισσότερο δημοφιλείς στον αυτοματισμό του χώρου παραγωγής. Επιτρέπουν την επικοινωνία από πολλά-σε-πολλά σημεία μέσω του ίδιου δικτύου και του ίδιου καλωδίου. Καθώς το κόστος εφαρμογής των δικτύων τοπικής περιοχής (LAN) γίνεται όλο και πιο χαμηλό, πολλά εργοστάσια εγκαθιστούν διάφορους τύπους δικτύων τοπικής περιοχής (LAN).

Η ανάπτυξη τεχνικών δικτύωσης υπολογιστών επιτρέπει τη σύνδεση μεγάλου αριθμού υπολογιστών. Η λειτουργία ενός δικτύου τοπικής περιοχής (LAN) περιορίζεται σε μια απόσταση 10 km.

Ένα ιδανικό δίκτυο τοπικής περιοχής (LAN) έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- υψηλή ταχύτητα: μεγαλύτερη από 10 Mbps
- χαμηλό κόστος: παρέχεται εύκολα σε ένα μικροϋπολογιστή και/ή σε μια μηχανή ελέγχου
- υψηλή αξιοπιστία: χαμηλοί ρυθμοί λαθών, ανοχή λαθών, αξιόπιστο
- δυνατότητα επέκτασης: επεκτείνεται εύκολα, ώστε να εγκατασταθούν νέοι κόμβοι
- ευελιξία στην εγκατάσταση: εγκαθίσταται εύκολα σε ένα υπάρχον περιβάλλον
- τυπική επικοινωνία: τυπική επικοινωνία ανάμεσα σε πολλούς υπολογιστές και ελεγκτές

Σε ένα δίκτυο τοπικής περιοχής (LAN), οι υπολογιστές και οι ελεγκτές μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Τα τερματικά μπορούν, επίσης, να έχουν πρόσβαση σε κάθε υπολογιστή του δικτύου, χωρίς την χρήση καλωδίου. Είναι επικερδές, εφ' όσον το ίδιο τερματικό μπορεί να έχει πρόσβαση σε όλα τα μηχανήματα του χώρου παραγωγής.

Ένα δίκτυο τοπικής περιοχής (LAN) αποτελείται από λογισμικό –το οποίο ελέγχει το σύστημα διαχείρισης των δεδομένων και την διόρθωση των λαθών– από hardware –το οποίο δημιουργεί και λαμβάνει σήματα– και από μέσα, τα οποία μεταφέρουν τα σήματα. Η σχεδίαση του λογισμικού και του hardware καθορίζεται από ένα σύνολο κανόνων: το πρωτόκολλο. Το πρωτόκολλο καθορίζει τα λογικά ηλεκτρικά και φυσικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Προκειμένου τα τμήματα του δικτύου να επικοινωνούν μεταξύ τους, πρέπει να ακολουθείται το ίδιο πρωτόκολλο. Όταν ένα τμήμα στέλνει ένα μήνυμα μέσα στο δίκτυο, ο αποστολέας και ο παραλήπτης πρέπει να προσδιορίζονται μοναδιαία. Το μήνυμα πρέπει να στέλνεται σε κατάλληλη μορφή και πρέπει να πραγματοποιείται ένας έλεγχος των λαθών προκειμένου να διασφαλίζεται η ορθότητα των πληροφοριών. Παρόμοια με τη διαδικασία προετοιμασίας ενός δέματος

για την υπηρεσία του Ταχυδρομείου, το λογισμικό πρέπει να «πακετάρει» και να προσδιορίσει τα δεδομένα με τις κατάλληλες «ταμπέλες». Η ταμπέλα περιέχει την διεύθυνση του προορισμού, και πληροφορίες, που αφορούν τα περιεχόμενα του μηνύματος. Το πακέτο τότε μετατρέπεται στα κατάλληλα ηλεκτρικά σήματα και περιμένει να μεταβιβασθεί.

Δυστυχώς, ο τρόπος εφαρμογής των δικτύων τοπικής περιοχής (LAN) δεν ήταν αρχικά τυποποιημένος. Τα εξαρτήματα που κατασκευάζονταν από διαφορετικούς προμηθευτές, συνήθως δεν μπορούσαν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Ένας ειδικός υπολογιστής ήταν απαραίτητος για την μετάφραση των δεδομένων μεταξύ των δυο δικτύων από διαφορετικούς προμηθευτές και πολλές φορές και από τον ίδιο προμηθευτή. Σύμφωνα με μια μελέτη [29], το 50% του κόστους, που ξοδεύεται στους υπολογιστές του χώρου παραγωγής (shop floor), οφείλεται στα δίκτυα. Το κόστος αυτό ήταν πολύ υψηλό και μπορούσε να μειωθεί. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 δόθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια στην ίδρυση ενός κοινού τυπικού πρωτοκόλλου –Πρωτόκολλο Αυτοματισμού της Παραγωγής (Manufacturing Automation Protocol, MAP)– που προσδιορίζει τυπικά την φυσική και λογική επικοινωνία για τις παραγωγικές δραστηριότητες. Το MAP έχει υιοθετηθεί ως το πρότυπο για την επικοινωνία των δεδομένων στον χώρο παραγωγής (shop floor). Παρά το γεγονός ότι ο Διεθνής Οργανισμός Προτύπων (ISO) υιοθετεί το MAP ως το διεθνές πρότυπο, πολλά άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται.

Βιβλιογραφία

1. --*The Working Papers of the MIT Commission on Industrial Productivity*, MIT Press, Cambridge, MA (1989).
2. Lange, K., *Handbook of Metal Forming*, McGraw Hill, New York (1985).
3. Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, John Wiley & Sons, New York (1984).
4. Crandall, S.H., N. Dahl, and T.J. Lardner, *An Introduction to the Mechanics of Solids*, McGraw-Hill Inc., New York (1978).
5. Bathe, K.J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall/Englewood Cliffs, N.J.(1982).
6. Boothroyd, G. and W.A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2nd edition, Marcel Dekker, Inc., New York (1989).
7. Ogata, K., *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1970).
8. Meirovitch, L., *Introduction to Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, Inc., New York (1985).
9. Koren, Y ., *Computer Control of Manufacturing Systems*, McGraw-Hill, Inc., New York (1983).
10. Acherkan, N., et al., *Machine Tool Design*, U.S.S.R. (1973).
11. Sutherland, I.E., "SKETCHPAD: A Man-Machine Graphical Communication System," *SJCC* 1963, Spanan Books, Baltimore, (1963), pg. 329 and *MIT Lincoln Lab. Tech. Rep. 296*, (May, 1965).
12. Knox, C.S., *CAD/CAM Systems-Planning and Implementation*, Marcel-Dekker, New York (1983).
13. Tomizuka, M. and S. Zhang, "Modelling and Conventional Adaptive PI Control of a lathe Cutting Process," *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control*, (Vol. 110, 1988), pp. 350-354.
14. Wright, P.K. and D.A. Bourne, *Manufacturing Intelligence*, Addison- Wesley , Reading, MA. (1984).
15. Lister, P.M., and G. Barrow, "Tool Condition Monitoring Systems," *Proceedings of the Twenty-sixth International Machine Tool Design and Research Conference*, (1984).
16. Giusti, F., M. Santochi, and G. Tantussi, "On-line Sensing of Flank and Crater Wear of Cutting Tools," *Annals of CIRP* (1987), pp. 41-44.
17. Lee, Y .H., P. Bandyopadhyay, and B. Kaminski, "Cutting Tool Wear Measurement Using Computer Vision." *Proc. of NAMRC(1987)*, pp. 195-212.
18. Altintas, Y., "In-Process Detection of Tool Breakages Using Time Series Monitoring of Cutting Forces," *Int. i. Mach. Tools Manufact.*, (Vol. 28, No.2, 1988), pp. 157-172.
19. Bandyopadhyay, P., and S.M. Wu, "Signature Analysis of Drilling Dynamics for on- Line Drill life Monitoring," *Sensors and Control for Manufacturing*, ASME Annual Winter Meeting, (PED-Vol. 18, 1985), pp. 101-110.
20. Chryssolouris, G., and M. Domroese, "Some Aspects of Acoustic Emission Modeling for Machining Control," *Proc. of NAMRC* (1989), pp. 228-234.
21. Liang, S.Y., and D.A. Dornfeld, "Tool Wear Detection Using Time Series Analysis of Acoustic Emission," *J. Eng. Ind.* (Vol. 111, Aug. 1989), pp. 199-212.
22. Chow, J.G., and P.K. Wright, "On-line Estimation of Tool/Chip Interface Temperatures for a Turning Operation," *J. Eng. Ind.*, (Vol. 110, Feb. 1988), pp. 56- 64.
23. Liu, T.I., and S.M. Wu, "On-line Drill Wear Monitoring," *Sensors and Controls for Manufacturing*, ASME Annual Winter Meeting, (PED-Vol. 33, 1988), pp. 99-104.
24. Kazuaki, J., "Sensing Technologies for Improving Machine Tool Function." NMBT A Data Files.
25. Chryssolouris, G., and S.R. Patel, "In-Process Control for Quality Assurance," in *Manufacturing High Technology Handbook*, Tijunelis and McKee Eds., Marcel Dekker, New York (1987), pp. 609-643.

26. Bunce, P ., "Planning for CIM," *The Production Engineer*, (Vol. 64, No.2, Feb. 1985), pg. 21.
27. -, *General Motor's Manufacturing Automation Protocol, A Communications Network Protocol for Open Systems Interconnection*, Warren, MI. GM MAP Task Force (1984).
28. -, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Society of Manufacturing Engineers, McGraw-Hill, New York, 1976.
29. Chang, T.C., R.A. Wysk and H.P. Wang, *Computer Aided Manufacturing*, Prentice- Hall, Englewood Cliffs, N.J.(1991).
30. Hardt, D.E., T. Jenne, M. Domroese and R. Farra, "Real-Time Control of Twist Deformation Processes," *Annals of the CIRP*, (1987).
31. Hardt, D.E., A. Suzuki and I. Valvani, " Application of Adaptive Control Theory to On-line GTA Weld Geometry Regulation," *ASME Journal of Dynamic Systems. Measurement and Control*, (Vol. 113, March 1991), pp. 93-103.
32. Ko, T.R., and Y. Koren, . "Cutting Force Model for Tool Wear Estimation," *Proc. of NAMRCXVII (1989)*, pp. 166-169.
33. Koren, Y ., "The Optimal locus Approach With Machining Applications," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* (Vol. 111, June 1989), pp. 260-267.
34. Park, I.J., and A.G. Ulsoy, "On-line Flank Wear Estimation Using Adaptive Observers," *Automation of Manufacturing Processes*, ASME Winter Annual Meeting (1990), pp. 11-20.
35. Fassois, S.D., K.F. Eman and S.M. Wu, "A Fast Algorithm for On-Line Machining Process Modeling and Adaptive Control," *ASME Journal of Engineering for Industry* (Vol. 111, May 1989), pp. 133-139.
36. Altintas, Y., I. Yellowley and J. Tlusty, "The Detection of Tool Breakage in Milling Operations," *ASME Journal of Engineering for Industry* (Vol. 110, Aug. 1988), pp. 271-277.
37. Tlusty, J ., and G.C. Andrews, "A Critical Review of Sensor for Unmanned Machining," *Annals of the CIRP* (1983).
38. Chryssolouris, G., M. Domroese and P. Beaulieu. "Sensor Synthesis for Control of Manufacturing Processes". Proceedings of the *Symposium on Control of Manufacturing Processes*. ASME Winter Annual Meeting. (1990). pp. 67- 76.
39. Chryssolouris, G., V. Subramaniam and M. Domroese. "A Game Theory Approach to the Operation of Machining Processes". to be presented at the ASME Winter Annual Meeting. (1991).
40. Chryssolouris, G., M. Domroese and P. Beaulieu. "A Statistical Approach to Sensor Synthesis," *Proceedings of NAMRC XIX*, (May 1991). pp. 333-337.
41. Rangwala, S., and D. Dornfeld, "Integration of Sensors via Neural Networks for Detection of Tool Wear States," *Intelligent and Integrated Manufacturing Analysis and Synthesis*. ASME Winter Annual Meeting, (1987).
42. Ranky, P.G., *Computer Integrated Manufacturing*, Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N.J.(1986).
43. Kusiak, A., *Intelligent Manufacturing Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N.J.(1990).