

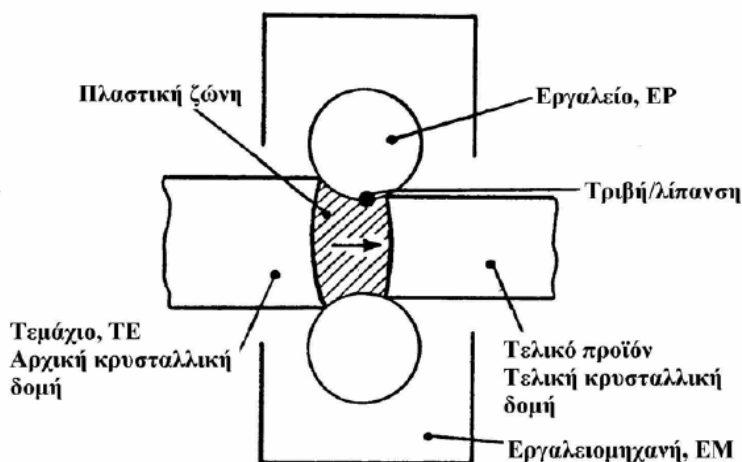
5 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

5.1 Βασικές έννοιες

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή του βιβλίου, **κατεργασία (manufacturing process)** είναι η διαδικασία μορφοποίησης των υλικών που εκμεταλλεύεται την ιδιότητά τους να παραμορφώνονται πλαστικά (μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις) και συνδυάζει κατάλληλα τις συνθήκες φόρτισης, θερμοκρασίας και ταχύτητας για βέλτιστο αποτέλεσμα. Στη συνέχεια, **γίνεται αναφορά στην παραγωγή διακριτών προϊόντων** σε αντιδιαστολή με τις βιομηχανίες συνεχών διεργασιών, π.χ. χημική βιομηχανία.

Οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται σε μια κατεργασία και αλληλοεπηρεάζονται είναι δε οι ακόλουθες, βλέπε Σχήμα 5.1:

- Το προς κατεργασία **τεμάχιο** (workpiece), TE, υπό τη μορφή **μπιγέτας** (billet) ή **ελάσματος** (blank).
- Το **εργαλείο** (tool), E, που διαμορφώνει το TE.
- Οι **συνθήκες στη διεπιφάνεια τεμαχίου/εργαλείου**, TE/EP (conditions at tool/material interface), δηλ. η λίπανση και τα τριβολογικά χαρακτηριστικά.
- Η **ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης** (deformation zone), όπου επιτελείται η πλαστική παραμόρφωση του TE.
- Ο χρησιμοποιούμενος **εξοπλισμός** (equipment), δηλαδή η εργαλειομηχανή, E/M, (machine-tool) και ο λοιπός χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός.
- Το **τελικό προϊόν** (product) με κρυσταλλική δομή και ιδιότητες διαφορετικά από αυτά του αρχικού TE.
- Το «**περιβάλλον**» (environment) της κατεργασίας με την γενική έννοια.



Σχήμα 5.1: Σχηματική παράσταση μιας κατεργασίας.

5.2 Η κατεργασία ως σύστημα

Κάθε κατεργασία, όπως και η παραγωγή γενικότερα, μπορεί να θεωρηθεί και να μελετηθεί ως ένα **σύστημα** (*Hitomi, 1996*), δηλαδή ως ένας συνδυασμός διαφόρων μονάδων ή/και χαρακτηριστικών συνιστωσών, οργανωμένων κατά τρόπο ώστε να απαρτίζουν ένα λειτουργικό σύνολο που οδηγεί στην επίτευξη κάποιου επιδιωκόμενου σκοπού ή αποτελέσματος. Οι παράμετροι που καθορίζουν την κατεργασία ως σύστημα, το οποίο απαιτεί συστηματική πληροφόρηση για την ανάλυσή του αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η «αναγκαία πληροφόρηση» ανά παράμετρο συνίσταται στα εξής στοιχεία:

1. Τεμάχιο

- Καταστατικές εξισώσεις του υλικού του τεμαχίου, δηλαδή έκφραση της τάσης, σ , συναρτήσει της παραμόρφωσης, ε , της ταχύτητας παραμόρφωσης, $\dot{\varepsilon}$, της θερμοκρασίας, T , και της μικροδομής.
- Κατεργασιμότητα του υλικού του τεμαχίου, που εκφράζει το βαθμό δυσκολίας προς μορφοποίησή του, επίσης ως συνάρτηση των ανωτέρω παραγόντων.
- Αρχική γεωμετρία και μορφολογία της επιφανείας του τεμαχίου.
- Αρχικές συνθήκες του υλικού του τεμαχίου, δηλαδή σύσταση, θερμοκρασία, «ιστορία» παραμόρφωσης και μικροδομή.
- Θερμικές και φυσικές ιδιότητες υλικού του τεμαχίου.

2. Εργαλείο

- Γεωμετρία εργαλείου.
- Επιφανειακές συνθήκες.
- Υλικό εργαλείου / κατεργασία παραγωγής του.
- Θερμοκρασία κατεργασίας.
- Τρόπος στήριξης, στιβαρότητα και ακρίβεια του εργαλείου.

3. Συνθήκες στη διεπιφάνεια εργαλείου/τεμαχίου

- Τύπος λιπαντικού και θερμοκρασιακές συνθήκες.
- Μονωτική δράση και χαρακτηριστικά απόψυξης του στρώματος λιπαντικού.
- Τριβολογικά χαρακτηριστικά διεπιφάνειας.

4. Ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης

- Μηχανική της παραμόρφωσης σε συνδυασμό με το εφαρμοζόμενο θεωρητικό μοντέλο ανάλυσης.
- Πλαστική ροή, ταχύτητες παραμόρφωσης και λοιπές κινηματικές συνθήκες.
- Εντατική κατάσταση (αναπτυσσόμενες τάσεις) στη διάρκεια της κατεργασίας.
- Θερμοκρασίες (παραγόμενη θερμότητα και κατανομή / μεταφορά / απομάκρυνση των θερμικών φορτίων).

5. Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός

- Ικανότητα φορτίου και ισχύς της εργαλειομηχανής.
- Στιβαρότητα και ακρίβεια οδήγησης της εργαλειομηχανής.
- Ταχύτητα και παραγωγικότητα.

6. Τελικό προϊόν

- Γεωμετρία.
- Διαστατική και γεωμετρική ακρίβεια.
- Ποιότητα επιφάνειας.
- Μικροδομή, μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες.

7. Περιβάλλον

- Περιβάλλον κατεργασίας, δηλ. το ανθρώπινο δυναμικό (κίνδυνοι, ασφάλεια κλπ) και ο εξοπλισμός εξυπηρέτησης της κατεργασίας (robots, αυτοματισμοί κλπ).
- Φυσικό περιβάλλον (ρύπανση από απόβλητα και παραπροϊόντα, ηχορύπανση, μέτρα προστασίας κλπ).
- Οικονομοτεχνικό περιβάλλον (χρηματοδοτικές ροές, βελτιστοποίηση κατεργασίας με βάση οικονομικά κριτήρια, βέλτιστο μέγεθος παραγωγής, εξοικονόμηση ενέργειας και υλικών, ανακύκλωση κλπ).

5.3 Ταξινόμηση κατεργασιών

Για λόγους μεθοδολογικούς είναι σκόπιμη η ταξινόμηση των κατεργασιών με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η αρχική του μορφή, ο τρόπος παραμόρφωσής του, η θερμοκρασία κατεργασίας κλπ.

➔ **A.** Το πλέον διαδεδομένο και παραδεκτό σύστημα ταξινόμησης των κατεργασιών βασίζεται στην προδιαγραφή DIN 8580 (1974). Κατά DIN 8580 διακρίνονται σε :

- **Αρχέγονες κατεργασίες (primary forming processes):** Το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά τη μορφοποίηση (χύτευση, κονιομεταλλουργία κλπ).
- **Διαμορφώσεις (deforming processes):** Χαρακτηριστικό τους είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού. Διακρίνονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού (bulk forming) όπου ανήκουν η σφυρηλάτηση, η έλαση, η διέλαση, η ολκή κλπ και σε κατεργασίες διαμόρφωσης του επιπέδου ελάσματος (sheet metal forming) όπου ανήκουν κατεργασίες όπως η απότμηση, η κάμψη, η βαθεία κοίλανση κλπ.
- **Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού (removing processes):** Η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού. Διακρίνονται περαιτέρω σε κοπές με (κοπτικό) εργαλείο καθορισμένης γεωμετρίας (τόρνευση, φρεζάρισμα, διάτρηση κλπ) και σε κοπές με μη καθορισμένη γεωμετρία κοπτικού εργαλείου (λείανση, honing, lapping κλπ).

Γενικά, οι κατεργασίες κοπής επιτυγχάνουν πολύ καλή διαστατική ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας, υπάρχει όμως σημαντική απώλεια υλικού. Εφαρμόζονται σε μικρά, μεσαία αλλά και μεγάλα μεγέθη παραγωγής, πλην όμως στη τελευταία περίπτωση ο ρυθμός παραγωγής δεν είναι ιδιαίτερα υψηλός. Χαρακτηρίζονται επίσης από υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης (εργαλειομηχανές CNC, κέντρα κατεργασιών κλπ).

- **Επιφανειακές κατεργασίες (surface processes ή modifying processes):** Δεν επιφέρουν αλλαγή σχήματος στο τεμάχιο αλλά μεταβολή στις ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας (ενίσχυση ή τροποποίηση επιφανειακών ιδιοτήτων και προστασία). Διακρίνονται σε θερμικές, θερμοχημικές και επικαλύψεις.
- **Κατεργασίες σύνδεσης (joining processes):** Διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις, κοχλιώσεις κλπ)

Ένα άλλο, παραπλήσιο, σύστημα ταξινόμησης, βλέπε ενδεικτικά *Altung, 1982*, χρησιμοποιεί συνδυασμένα τα κριτήρια της αρχικής κατάστασης του υλικού (π.χ. στερεό

σώμα) και της διατήρησης / μεταβολής της μάζας του συστήματος. Διακρίνει τις κατεργασίες σε:

- Στερεά υλικά – κατεργασίες διατήρησης μάζας.
- Στερεά υλικά – κατεργασίες αφαίρεσης μάζας.
- Στερεά υλικά – κατεργασίες πρόσθεσης μάζας.
- Κοκκώδη υλικά – κονιομεταλλουργία.
- Υγρά υλικά – χύτευση.
- Πλαστικά υλικά – κατεργασίες πλαστικών.

➔ **Β.** Με κριτήριο τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια και τον εξοπλισμό οι κατεργασίες διακρίνονται σε :

- ❖ **Συμβατικές:** Χρησιμοποιείται μηχανική ενέργεια και συμβατικός εξοπλισμός (εργαλειομηχανές μηχανουργικών κατεργασιών).
- ❖ **Μη συμβατικές:** Για τη μορφοποίηση χρησιμοποιείται άλλη μορφή ενεργείας, πέραν της μηχανικής, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είναι μη συμβατικός, προσαρμοζόμενος στις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας (μαγνητική διαμόρφωση, εκρηκτική συμπίεση, ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με laser, εκρηκτική συγκόλληση κλπ).

➔ **Γ.** Με κριτήριο τη θερμοκρασία κατεργασίας, T .

Για την ταξινόμηση αυτή λαμβάνονται υπόψη δύο χαρακτηριστικές θερμοκρασίες του κατεργαζόμενου υλικού, η θερμοκρασία τήξης, T_M , και η θερμοκρασία αναक्रυστάλλωσης, T_r ($= 0,4-0,5 T_M$).

- **Ψυχρές κατεργασίες (cold processes):** Επιτελούνται σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_e .
- **Θερμές κατεργασίες (hot processes):** Πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία T με $T_M > T > T_r$
- **Ημίθερμες κατεργασίες (warm processes):** Συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και μετριάζουν τα μειονεκτήματα των δύο παραπάνω ομάδων, λαμβάνουν δε χώρα σε θερμοκρασία T , με $T_r > T > T_e$.

Γενικά, με τις θερμές κατεργασίες επιτυγχάνονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι μικρότερες σε σύγκριση με τις ψυχρές κατεργασίες.

Τα μειονεκτήματα των θερμών κατεργασιών είναι η ταχεία φθορά των εργαλείων, η δημιουργία επιφανειακών οξειδώσεων και οι απώλειες υλικού, δεδομένου ότι συχνά απαιτείται κατεργασία κοπής για αποπεράτωση. Οι ψυχρές κατεργασίες δεν παρουσιάζουν τα παραπάνω μειονεκτήματα αλλά απαιτούν στιβαρότερο μηχανολογικό εξοπλισμό και περισσότερες φάσεις κατεργασίας.

Όλες οι μηχανουργικές κατεργασίες εφαρμόζονται σε μία μεγάλη ποικιλία τεχνικών υλικών τα οποία κατά τα γνωστά διακρίνονται σε μέταλλα (και κράματα), κεραμικά, πλαστικά και σύνθετα υλικά. Η δυνατότητα εφαρμογής των μεγάλων κατηγοριών κατεργασιών στους διάφορους τύπους υλικών συνοψίζεται στον Πίνακα 5.1. Σημειώνεται ότι η επιλογή της κατεργασίας που θα εφαρμοσθεί για τη μορφοποίηση ενός συγκεκριμένου υλικού εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων με κυριότερους το μέγεθος της παρτίδας των αντικειμένων που θα παραχθούν και τις ιδιότητες του υλικού.

Πίνακας 5.1: Συνδυασμοί εφαρμογής κατεργασιών και υλικών
(προέλευση: Χρυσολούρης, 1998)

		ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ				
		Αρχικού Σχηματισμού	Διαμόρφωσης	Αφαίρεσης Υλικού	Σύνδεσης	Αλλαγής Ιδιοτήτων
ΥΛΙΚΑ	Μέταλλα	XX	XX	XX	XX	XX
	Κεραμικά	XX	--	X	--	--
	Πολυμερή	XX	X	X	X	--
	Σύνθετικά	XX	--	X	X	--

XX: Ευρέως χρησιμοποιούμενες

X : Σπάνια χρησιμοποιούμενες

- : Καθόλου χρησιμοποιούμενες

5.4 Ομοιογενής και ανομοιογενής παραμόρφωση

Η πλαστική παραμόρφωση του κατεργάσιμου υλικού είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση οποιασδήποτε κατεργασίας. Κρίνεται κατά συνέπεια σκόπιμη, εδώ, μια εισαγωγική αναφορά στην ομοιογενή και ανομοιογενή πλαστική παραμόρφωση. Οι έννοιες αυτές γίνονται περισσότερο κατανοητές με την απεικόνιση στο κατεργάσιμο τεμάχιο ενός ομοιόμορφου πλέγματος, βλέπε Σχήμα 5.2(α).

Ομοιογενής πλαστική παραμόρφωση (*homogeneous plastic deformation*) υφίσταται όταν όλα τα στοιχεία του προς κατεργασία τεμαχίου παραμορφώνονται στον ίδιο

βαθμό, βλέπε Σχήμα 5.2(β). Η περίπτωση αυτή προφανώς είναι *ιδανική*, δεν συναντάται στην πράξη, διευκολύνει, όμως, στη θεμελίωση των διαφόρων ενεργειακών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την θεωρητική ανάλυση των κατεργασιών. Στην ομοιογενή παραμόρφωση το παρεχόμενο έργο κατεργασίας ανά μονάδα όγκου είναι μόνο το πλαστικό έργο παραμόρφωσης (specific energy), που ισούται με:

$$w = \int_0^{\varepsilon} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = w_i \quad (5.1)$$

όπου w : το ειδικό έργο (ανά μονάδα όγκου),

σ : η ισοδύναμη τάση (effective stress)

ε : η ισοδύναμη παραμόρφωση (effective strain)

w_i : το ιδανικό ανηγμένο έργο

Η απαιτούμενη ισχύς της κατεργασίας είναι προφανώς

$$W = \iiint_V w dV \quad \text{ή απλούστερα} \quad W = wV \quad (5.2)$$

όπου V : ο όγκος του υλικού

Με δεδομένο ότι η σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων στην πλαστική περιοχή εξαρτάται από τη μορφή της καμπύλης σ - ε , η αναφορά και χρήση για τους υπολογισμούς της καμπύλης πραγματικών τάσεων- πραγματικών παραμορφώσεων είναι εξόχως υποβοηθητική.



Σχήμα 5.2: Ομοιογενής και ανομοιογενής πλαστική παραμόρφωση: (α) σχηματική παράσταση του απαραμόρφωτου υλικού, (β) ομοιογενής πλαστική παραμόρφωση και (γ) ανομοιογενής πλαστική παραμόρφωση του υλικού.

Στην **ανομοιογενή πλαστική παραμόρφωση** εκτός από το ιδανικό έργο απαιτείται η υπερνίκηση του έργου των τριβών (friction work), w_f , στη διεπιφάνεια εργαλείου/τε-μαχίου και ένα επιπρόσθετο (συμπληρωματικό) έργο (redundant work), w_r , που σχετίζεται με την ανομοιογενή πλαστική παραμόρφωση (διάτμηση) του κρυσταλλικού πλέγματος, βλέπε Σχήμα 5.2(γ). Άρα, θα ισχύει:

$$w_t = w_i + w_f + w_r \quad (5.3)$$

όπου w_i το ολικό έργο (ανά μονάδα όγκου)

Ως απόδοση (efficiency) μιας κατεργασίας ορίζεται ο λόγος:

$$\eta = w_i / w_t \quad (5.4)$$

Το μέγεθος αυτό κυμαίνεται μεταξύ ευρέων ορίων εξαρτώμενο από την συγκεκριμένη κατεργασία, τη γεωμετρία των εργαλείων, τις συνθήκες τριβής και τις άλλες παραμέτρους της κατεργασίας. Ενδεικτικά κυμαίνεται μεταξύ 30-60 % στη διέλαση και 70-95 % στην έλαση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Μανωλάκος, Δ.Ε., *Γενικά περί Κατεργασιών*, ανέκδοτες σημειώσεις ΕΜΠ, 2001.
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26065/mathimata/02-Genika%20peri%20katergasion.pdf>
- Μάμαλης, Α.Γ., *Κατεργασίες των Υλικών -I*, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα, 1985.
- Μπουζάκης, Κ-Δ.Ε., *Εισαγωγή στις Μηχανουργικές Μορφοποιήσεις*, εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2001.
- Πετρόπουλος, Π.Γ., *Μηχανουργική Τεχνολογία II-I*, εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1993.
- Χρυσολούρης, Γ.Μ., *Συστήματα Παραγωγής - I*, εκδ. Πανεπ. Πατρών, Πάτρα, 1998.
- Altung, L., *Manufacturing Engineering Processes*, Marcel Dekker, N. York, 1982.
- DIN 8580 (1974): *Manufacturing Methods; Classification*.
- DIN 8582, (1971): *Manufacturing processes, forming; classification, subdivision, alphabetical index*.
- Hitomi, K., *Manufacturing Systems Engineering*, Taylor & Francis, 2nd ed., London, 1996.
- Kalpakjian, S., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison-Wesley, 3rd ed., California, 1997.
- Konig, W., *Fertigungsverfahren –Band 1*, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1981.
- Schey, J.A., *Introduction to Manufacturing Processes*, Mc-Graw Hill, 3rd ed., N. York, 2000.