



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Μηχανουργική Τεχνολογία & Εργαστήριο Ι

Basics of Grinding – Βασικές Αρχές Λείανσης

Καθηγητής Χρυσολούρης Γεώργιος

Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά **ΠΠ**
μαθήματα

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ
Καθηγητής**

«ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ»

Συνεργάτης:
Κωνσταντίνος Σαλωνίτης

ΠΑΤΡΑ 2003

Εισαγωγή – Διεργασίες Αποπεράτωσης

Ορισμός Διεργασιών Αποπεράτωσης

Αφαίρεση υλικού μέσω της χρήσης σκληρών κόκκων

Διεργασίες Αποπεράτωσης:

Λείανση - Grinding

Χόνινγκ - Honing

Λείανση με λειαντικό μείγμα - Lapping

Υψηλής ακρίβειας τελείωμα - Superfinishing

Γυάλισμα - Polishing

Buffing

1

Εισαγωγή – Διεργασία Λείανσης

Ορισμός της λείανσης

Αφαίρεση υλικού με χρήση λειαντικού τροχού από κόκκους σκληρού υλικού που συγκρατούνται από συνδετικό υλικό.

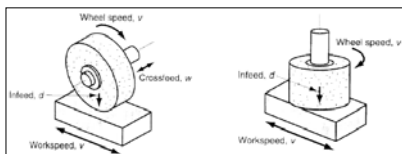
Η λείανση είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη διεργασία αποπεράτωσης και χρησιμοποιείται ευρέως όταν:

- Το υπό επεξεργασία υλικό παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα
- Το υπό επεξεργασία υλικό παρουσιάζει μεγάλη ψαθυρότητα
- Η επιθυμητή επιφανειακή ποιότητα είναι υψηλή
- Η επιθυμητή διαστασιακή ακρίβεια είναι υψηλή

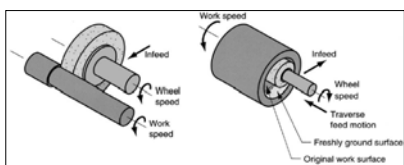
2

Είδη λείανσης

• Επιφανειακή λείανση

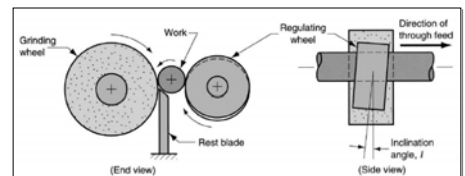


• Κυλινδρική λείανση



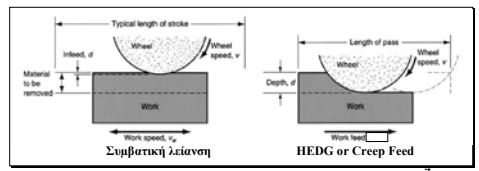
Είδη λείανσης

• Έκκεντρη λείανση



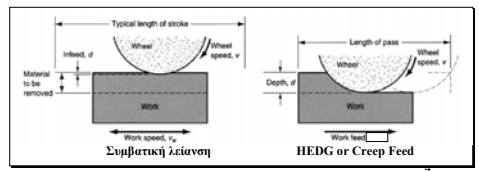
• Λείανση μεγάλης Πρόωσης

Creep-Feed Grinding (όταν v_w χαμηλό)



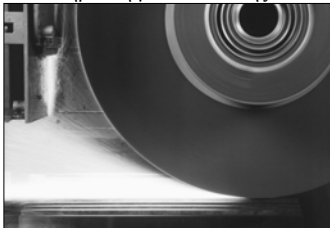
• Βαθιά Λείανση υψηλής απόδοσης

High Efficiency Deep Grinding (HEDG) (όταν v_w υψηλό)



Διάφορα είδη λείανσης

• Σκλήρυνση μέσω λείανσης



• Λείανση για μορφοποίηση

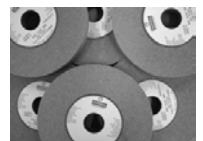


5

Λειαντικοί τροχοί

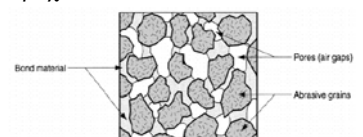
Αποτελείτε από τους λειαντικούς κόκκους και το υλικό σύνδεσης

- Οι λειαντικοί κόκκοι (Abrasive Grains) επιτελούν την κοπή
- Το υλικό σύνδεσης διατηρεί του κόκκους στην θέση τους και καθορίζει την μορφολογία και την υφή του τροχού



Παράμετροι λειαντικών τροχών

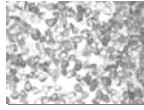
- Υλικό κόκκου
- Μέγεθος κόκκου
- Συνδετικό υλικό ή δεσμός
- Σκληρότητα (Grade)
- Υφή (Structure)



6

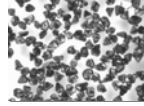
Λειαντικοί τροχοί – Υλικό κόκκων

Κόκκοι: Μικρά, μη μεταλλικά, σκληρά σωματίδια που έχουν κοφτερές ακμές και διάφορες γεωμετρίες για την αφαίρεση υλικού.



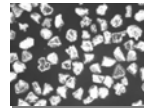
Συμβατικά υλικά

- i. Φυσικό ή τεχνητό κορούνδιο (Al_2O_3)
το πλέον σύνηθες, μη μεταλλικό μεγάλης αντοχής
- ii. Ανθρακοϋρίτιο (SiC)
σκληρότερο αλλά όχι αρκετά δυνατό για αλουμίνιο, χαλκό, ανοξείδωτο, χυτοσίδηρο και αεροπορικά υλικά.



Υπέρ-σκληρά υλικά

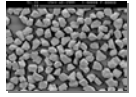
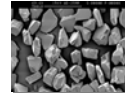
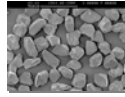
- i. Κυβικός βορονιτρίτης (Cubic Boron Nitride - CBN)
πολύ σκληρό & πολύ ακριβό. Χρησιμοποιείται για σκληριμένα μέταλλα εργαλείων και αεροπορικά κράματα.
- ii. Διαμάντι
Σκληρότερο και ακριβότερο. Τόσο φυσικό όσο και τεχνητό. Για σκληρά, ψαθυρά υλικά όπως τα κεραμικά, τα καρβίδια και το γυαλί.



Λειαντικοί τροχοί – Κόκκοι

Ιδιότητες των κόκκων που χρησιμοποιούνται για λειαντικούς τροχούς

- Υψηλή σκληρότητα
- Αντοχή στην φθορά
- Σκληρότητα
- Ψαθυρότητα



Μέγεθος κόκκων

Μέγεθος κόκκων από 8 (χοντροκόκκοι για σκληρά υλικά) έως 250 (λεπτόκοκκοι για μαλακά υλικά)

- Οι λεπτόκοκκοι τροχοί δημιουργούν καλύτερη επιφανειακή ποιότητα
- Οι χοντροκόκκοι τροχοί επιτρέπουν μεγαλύτερους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού (MRR)
- Για την λείανση σκληρών υλικών είναι καταλλήλότεροι οι λεπτόκοκκοι τροχοί
- Για την λείανση μαλακών υλικών χρησιμοποιούνται χοντροκόκκοι τροχοί

8

Λειαντικοί τροχοί – Συνδετικό υλικό

Συνδετικό υλικό

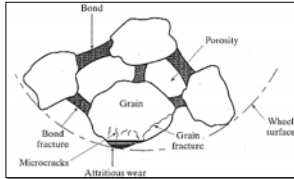
Συγκρατεί τους κόκκους μεταξύ τους μέχρι αυτοί να στομάσουν οπότε και αποσπώνται

Απαιτήσεις

- Θα πρέπει να αντέχουν στις φυγόκεντρες δυνάμεις και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Θα πρέπει να αντέχουν σε ζυγνικά φορτία
- Συγκρατούν σταθερά τους κόκκους

Διάφορα είδη σύνδεσης

- Υαλώδες αργαλικό υλικό (Vitrified)
- Silicate
- Ελαστικό υλικό (Rubber)
- Ρητινικό υλικό (Resinoid)
- Shellac
- Μεταλλικό



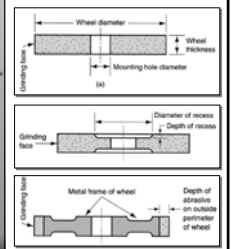
Τυποποίηση λειαντικών τροχών

Abrasive	Grain size	Hardness	Structure	Bond
Aluminum oxide 19 A, 19 A	very coarse 8, 10, 12	very soft D, E, F, G	very dense 0, 1	V / vit vitrified
Aluminum oxide 20 A - 29 A	coarse 14, 16, 20, 24	soft H, I, J, K	dense 2, 3	# 1 BF resinoid
Aluminum oxide 30 A - 39 A	medium 20 A - 29 A	medium L, M, N, O	medium 4, 5	Mg magnoite
Aluminum oxide 40 A - 49 A	fine 25, 30, 40, 50	hard P, Q, R, S	open 6, 7	Peripheral speed up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 50 A - 59 A	very fine 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120	very hard T, U, V, W	open 8, 9	up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 60 A - 69 A	finest fine 100, 120, 150, 180, 220, 280	extremely hard X, Y, Z	highly porous 10, 11	up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 70 A - 79 A	ultra-fine 150, 180, 220, 280, 350, 450, 600, 800, 1000			up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 80 A - 89 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 90 A - 99 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 100 A - 109 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 110 A - 119 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 120 A - 129 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 130 A - 139 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 140 A - 149 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 150 A - 159 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 160 A - 169 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 170 A - 179 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 180 A - 189 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 190 A - 199 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 200 A - 209 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 210 A - 219 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 220 A - 229 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 230 A - 239 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 240 A - 249 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s
Aluminum oxide 250 A - 259 A				up to: 40 m/s up to: 50 m/s up to: 60 m/s up to: 80 m/s

Τυποποίηση για τον χαρακτηρισμό λειαντικού τροχού

Μορφοποίηση τροχού

Διαθέσιμες περισσότερες από 50, πχ:

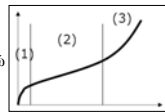


Φθορά λειαντικών τροχών

Φθορά: Οι κόκκοι στομάζουν λόγω φθοράς

Τρία στάδια φθοράς του λειαντικού τροχού

- > **Στόμωμα κόκκων** – ένα μέρος του κόκκου αποσπάται ενώ ο υπόλοιπος παραμένει συνδεδεμένος στον τροχό (1)
- > **Ενδιάμεση φθορά** – στόμωμα διαφόρων κόκκων (2)
- > **Διάσπαση Συνδετικού υλικού** – οι στομομένοι κόκκοι αποσπώνται (3)



Αναγέννηση - Dressing: «Ακονίζει» τις ακμές των κόκκων στην επιφάνεια του λειαντικού τροχού μετά το 3ο στάδιο φθοράς

- > Αποσπώνται στομομένοι κόκκοι ούτως ώστε να εμφανιστούν κοφτεροί
- > Απομακρύνονται εγκλωβισμένα ρινίσματα από τους πόρους του τροχού

Truing: Εργασία αναγέννησης για της επαναφορά του τροχού στο αρχικό κυλινδρικό του σχήμα.

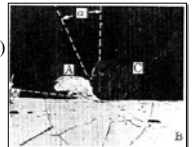
$$\text{Λόγος Λείανσης: } G = \frac{\text{Όγκος αφαιρουμένου υλικού}}{\text{Όγκος κατεστραμένου τροχού}}$$



Παράμετροι λείανσης

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λείανσης

- Μη σταθερή γεωμετρία κόκκου (εργαλείου κοπής)
- Μεγάλη γωνία απόβλητου και πολύ μικρή γωνία διάτμησης
- Τυχαία θέση κόκκων επί του λειαντικού τροχού
- Μεγάλες ταχύτητες κοπής



Παράμετροι διεργασίας

- Ταχύτητα κοπής
- Ρυθμός πρόωσης (περιστροφή κομματιού)
- Πρόωση (Βάθος κοπής)
- Υγρό κοπής

12

Παράμετροι λείανσης

Διαστάσεις απόβλητου:

$$l_c = \sqrt{Dd} \quad t = \sqrt{(4\nu/VCr)}\sqrt{d/D}$$

Όπου C είναι ο αριθμός των ενεργών κόκκων ανά επιφάνεια και t συντελεστής

Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (MRR):

$$MRR = d\nu w, \text{ όπου } w \text{ το πλάτος του τροχού}$$

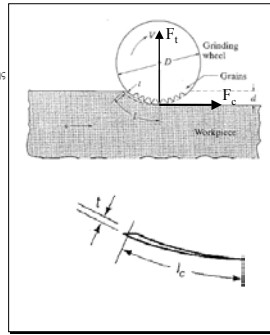
$$\text{Ισχύς: } P = T \cdot \omega = 2\pi N \cdot T$$

$$\text{Ροπή: } T = F_c \cdot \frac{D}{2}$$

$$\text{Δύναμη κοπής: } F_c = \frac{2T}{D}$$

$$\text{Δύναμη ώσης: } F_f = 1.3 \cdot F_c$$

$$\text{Ειδική ενέργεια: } U = \frac{FV}{\nu wd} \text{ (ιδιαίτερα υψηλή)}$$



13

Επιφανειακό τελείωμα

- Οι περισσότερες εργασίες λείανσης πραγματοποιούνται για την επίτευξη καλής επιφανειακής ποιότητας
- Καλύτερη επιφανειακή ποιότητα επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης:
 1. Λεπτόκοκκων λειαντικών τροχών
 2. Υψηλότερες ταχύτητες πρόωσης του κομματιού
 3. Τροχούς με Πυκνότερη υφή = περισσότεροι κόκκοι ανά επιφάνεια λείανσης

- Γιατί η ειδική ενέργεια κατά την λείανση είναι υψηλή:
 - ✓ Τα μικρού μεγέθους απόβλητα επιτρέπουν την μεταφορά δεκαπλάσιας ποσότητας ενέργειας στον ίδιο όγκο σε σχέση με άλλες διεργασίες, π.χ. τριβή.
 - ✓ Ο κάθε κόκκος έχει υπερβολικά αρνητικές γωνίες απόβλητου, προκαλώντας πολύ μικρές γωνίες διάτμησης και μεγάλες διατμητικές τάσεις
 - ✓ Δεν εμπλέκονται όλοι οι κόκκοι κατά την κοπή

14

Συνέπειες Θερμοκρασίας

- Υψηλή θερμοκρασία και παρουσίαση τριβής
- Η περισσότερη ενέργεια παραμένει στη επιφάνεια προκαλώντας:
 1. Επιφανειακό κάψιμο (Burn) και δημιουργία ρωγμών
 2. Καταστροφή της μεταλλικής δομής στο υπόστρωμα της επιφάνειας
 3. Μείωση της επιφανειακής σκληρότητας εάν αυτό υποστεί θερμικές καταρραγίες
 4. Υπομένουσες τάσεις στην επιφάνεια του κομματιού
- Οι πυκνοί και σκληροί λειαντικοί τροχοί οδηγούν σε μεγάλες επιφανειακές θερμοκρασίες
- Η μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί μέσω:
 - ✓ Μείωση του βάθους κοπής
 - ✓ Μείωση της ταχύτητας κοπής (περιστροφή του λειαντικού τροχού)
 - ✓ Μείωση του αριθμού των ενεργών κόκκων ανά επιφάνεια κοπής του λ. τροχού
 - ✓ Αύξηση της πρόωσης
 - ✓ Χρήση υγρών κοπής – μειώνει την θερμοκρασία μέσω της μείωσης της τριβής και της απορρόφησης θερμότητας

15

Άλλες Διεργασίες Αποπεράτωσης

- Honing
- Λείανση με λειαντικό μείγμα - Lapping
- Υψηλής ακρίβειας τελείωμα - Superfinish
- Γυάλισμα - Polishing

Μέγεθος κόκκου: 20 έως 80, 90 – 120 και <120

□ Buffing

Surface Luster

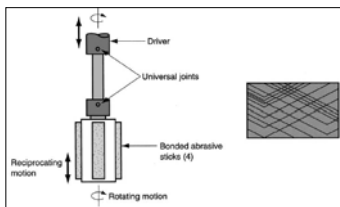
Διεργασία	Συνήθης εφαρμογή	Επιφανειακή ποιότητα (μm)
Λείανση (Μεσαίου μεγέθους κόκκοι)	Flat, ext. cylinder, holes	0.4 – 0.6
Λείανση (Μικρού μεγέθους κόκκοι)	Flat, ext. cylinder, holes	0.2 – 0.4
Honing	Round Hole	0.1 – 0.8
Lapping	Near Flat	0.025 – 0.4
Superfinishing	Flat, ext. Cylinder	0.013 – 0.2
Polishing	Misc. Shape	0.025 – 0.8
Buffing	Misc. Shape	0.013 – 0.4

16

Honing

Διεργασία αποπεράτωσης που πραγματοποιείται από μία σειρά λειαντικών ράβδων μέσω περιστροφών και παλινδρομήσεων

- Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή είναι το τελείωμα των κυλίνδρων των μηχανών εσωτερικής καύσης.
- Ταχύτητα λειτουργίας μεταξύ 50 και 500 ft/min. Πίεση μεταξύ 150 και 450 lb/in² και μέγεθος κόκκων μεταξύ 30 και 600
- Επιφανειακή ποιότητα της τάξης των 0.12 μm
- Δημιουργείται χαρακτηριστικής υψής επιφάνεια που βελτιώνει την λίπανση

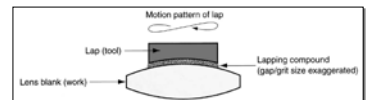


17

Λείανση με λειαντικό μείγμα - Lapping

Επιφανειακή ποιότητα μέγιστης ακρίβειας και ομαλότητας. Γίνεται με την παροχή υγρού, εντός του οποίου «ναρτάνται» πολύ μικροί κόκκοι, μεταξύ της υπό επεξεργασία επιφάνειας και της λειαντικής πλάκας (lap).

- Λειαντικό μείγμα – Υγρό με κόκκους.
- Τυπικές διαστάσεις κόκκου μεταξύ 300 και 600
- Εφαρμογές: οπτικοί φακοί, επιφάνειες εδράνων, μετρητικές διατάξεις, κλπ.



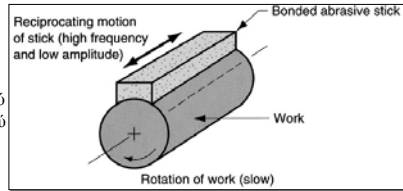
18

Υψηλής ακρίβειας τελείωμα - Superfinishing

Παρόμοιο με το honing – χρησιμοποιούνται λειαντικά ραβδιά τα οποία πιέζονται στις υπό επεξεργασία επιφάνειες και επιτυγχάνουν την κοπή μέσω παλινδρόμησης του ραβδιού και ταυτόχρονης περιστροφής του κομματιού

Διαφορές με το Honing:

- Μικρότερες μήκους παλινδρομήσεις
- Υψηλότερες συχνότητες
- Μικρότερη πίεση μεταξύ εργαλείου και κομματιού
- Χαμηλότερες ταχύτητες πρόωσης
- Μικρότεροι κόκκοι



19

Βιβλιογραφικές πηγές

1. G. Chryssolouris, 1992, "Manufacturing Process – Theory and Practice", Springer Verlag.
2. Ε. Παπαδανιήλ, Μ. Σφαντζικόπουλου, «Μηχανουργική τεχνολογία – Εργαστήριο II», Ίδρυμα Ευγενίδου.
3. Α. Λαζαρίδη, «Μηχανουργική τεχνολογία», Ίδρυμα Ευγενίδου.
4. S. Malkin, 1989, "Grinding Technology – theory and applications of machining with abrasives", Ellis Horwood Ltd.
5. C. Wick & R. F. Veilleux, 1985, "Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol.3 – Materials, Finishing and Coating", Society of Manufacturing Materials, Michigan.

20

Σημειώματα

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιον Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Καθηγητής Γεώργιος Χρυσολούρης. «Μηχανουργική Τεχνολογία & Εργαστήριο Ι. “Basics of Grinding”». Έκδοση: 1. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/MECH1111/>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

