

**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.

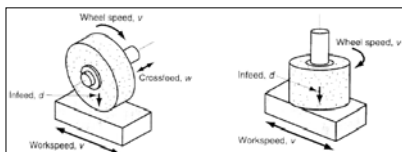
Η λείανση είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη διεργασία αποπεράτωσης και χρησιμοποιείται ευρέως όταν:

- 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

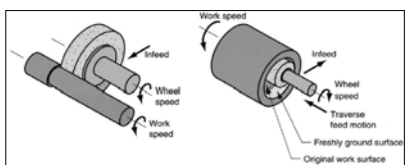
2

Είδη λείανσης

• Επιφανειακή λείανση

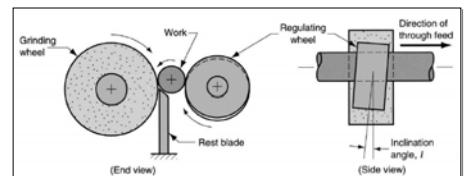


• Κυλινδρική λείανση

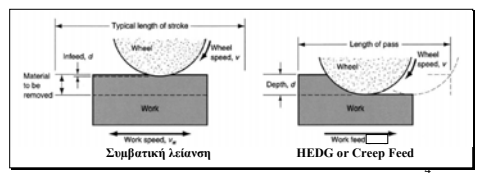


Είδη λείανσης

• Έκκεντρη λείανση



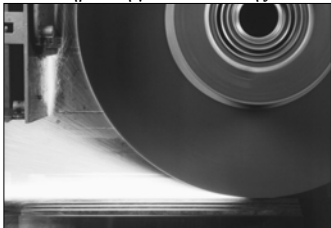
• Λείανση μεγάλης Πρόωσης Creep-Feed Grinding (όταν v_w χαμηλό)



• Βαθιά Λείανση υψηλής απόδοσης High Efficiency Deep Grinding (HEDG) (όταν v_w υψηλό)

Διάφορα είδη λείανσης

• Σκλήρυνση μέσω λείανσης



• Λείανση για μορφοποίηση

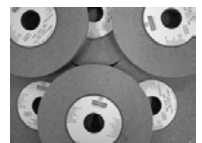


5

Λειαντικοί τροχοί

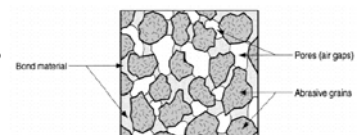
Αποτελείτε από τους λειαντικούς κόκκους και το υλικό σύνδεσης

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



Παράμετροι λειαντικών τροχών

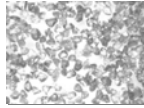
- Υλικό κόκκου
- Μέγεθος κόκκου
- Συνδετικό υλικό ή δεσμός
- Σκληρότητα (Grade)
- Υφή (Structure)



6

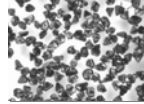
Λειαντικοί τροχοί – Υλικό κόκκων

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



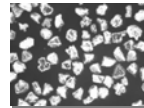
Συμβατικά υλικά

- 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

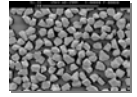
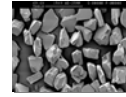
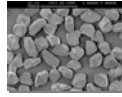
- i. Κυβικός βοριονιτρίτης (Cubic Boron Nitride - CBN)
πολύ σκληρό & πολύ ακριβό. Χρησιμοποιείται για σκληριμένα μέταλλα εργαλείων και αεροπορικά κράματα.
- ii. Διαμάντι
Σκληρότερο και ακριβότερο. Τόσο φυσικό όσο και τεχνητό. Για σκληρά, ψαθυρά υλικά όπως τα κεραμικά, τα καρβίδια και το γυάλι.



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

Λειαντικοί τροχοί – Συνδετικό υλικό

Συνδετικό υλικό

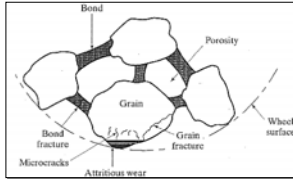
Συγκρατεί τους κόκκους μεταξύ τους μέχρι αυτοί να στομάσουν οπότε και αποσπώνται

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

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

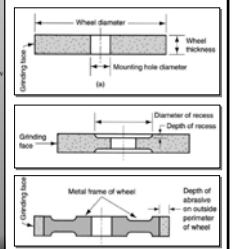


Τυποποίηση λειαντικών τροχών

Abrasive	Grain size	Hardness	Structure	Bond
Alumina	8, 10, 12	very soft	very dense	V / vitrified
Alumina	14, 16, 20, 24	soft	dense	II BF
Alumina	28 A - 29 A	medium	medium	III BF
Alumina	30 A - 33 A	hard	open	IV BF
Alumina	36 A - 39 A	very hard	very open	V BF
Alumina	40 A - 42 A	extremely hard	porous	VI BF
Alumina	44 A - 48 A		highly porous	VI BF
Alumina	50 A - 52 A			VI BF
Alumina	54 A - 56 A			VI BF
Alumina	60 A - 63 A			VI BF
Alumina	66 A - 69 A			VI BF
Alumina	72 A - 74 A			VI BF
Alumina	80 A - 84 A			VI BF
Alumina	90 A - 94 A			VI BF
Alumina	100 A - 104 A			VI BF
Alumina	110 A - 114 A			VI BF
Alumina	120 A - 124 A			VI BF
Alumina	130 A - 134 A			VI BF
Alumina	140 A - 144 A			VI BF
Alumina	150 A - 154 A			VI BF
Alumina	160 A - 164 A			VI BF
Alumina	170 A - 174 A			VI BF
Alumina	180 A - 184 A			VI BF
Alumina	190 A - 194 A			VI BF
Alumina	200 A - 204 A			VI BF
Alumina	210 A - 214 A			VI BF
Alumina	220 A - 224 A			VI BF
Alumina	230 A - 234 A			VI BF
Alumina	240 A - 244 A			VI BF
Alumina	250 A - 254 A			VI BF
Alumina	260 A - 264 A			VI BF
Alumina	270 A - 274 A			VI BF
Alumina	280 A - 284 A			VI BF
Alumina	290 A - 294 A			VI BF
Alumina	300 A - 304 A			VI BF
Alumina	310 A - 314 A			VI BF
Alumina	320 A - 324 A			VI BF
Alumina	330 A - 334 A			VI BF
Alumina	340 A - 344 A			VI BF
Alumina	350 A - 354 A			VI BF
Alumina	360 A - 364 A			VI BF
Alumina	370 A - 374 A			VI BF
Alumina	380 A - 384 A			VI BF
Alumina	390 A - 394 A			VI BF
Alumina	400 A - 404 A			VI BF
Alumina	410 A - 414 A			VI BF
Alumina	420 A - 424 A			VI BF
Alumina	430 A - 434 A			VI BF
Alumina	440 A - 444 A			VI BF
Alumina	450 A - 454 A			VI BF
Alumina	460 A - 464 A			VI BF
Alumina	470 A - 474 A			VI BF
Alumina	480 A - 484 A			VI BF
Alumina	490 A - 494 A			VI BF
Alumina	500 A - 504 A			VI BF
Alumina	510 A - 514 A			VI BF
Alumina	520 A - 524 A			VI BF
Alumina	530 A - 534 A			VI BF
Alumina	540 A - 544 A			VI BF
Alumina	550 A - 554 A			VI BF
Alumina	560 A - 564 A			VI BF
Alumina	570 A - 574 A			VI BF
Alumina	580 A - 584 A			VI BF
Alumina	590 A - 594 A			VI BF
Alumina	600 A - 604 A			VI BF
Alumina	610 A - 614 A			VI BF
Alumina	620 A - 624 A			VI BF
Alumina	630 A - 634 A			VI BF
Alumina	640 A - 644 A			VI BF
Alumina	650 A - 654 A			VI BF
Alumina	660 A - 664 A			VI BF
Alumina	670 A - 674 A			VI BF
Alumina	680 A - 684 A			VI BF
Alumina	690 A - 694 A			VI BF
Alumina	700 A - 704 A			VI BF
Alumina	710 A - 714 A			VI BF
Alumina	720 A - 724 A			VI BF
Alumina	730 A - 734 A			VI BF
Alumina	740 A - 744 A			VI BF
Alumina	750 A - 754 A			VI BF
Alumina	760 A - 764 A			VI BF
Alumina	770 A - 774 A			VI BF
Alumina	780 A - 784 A			VI BF
Alumina	790 A - 794 A			VI BF
Alumina	800 A - 804 A			VI BF
Alumina	810 A - 814 A			VI BF
Alumina	820 A - 824 A			VI BF
Alumina	830 A - 834 A			VI BF
Alumina	840 A - 844 A			VI BF
Alumina	850 A - 854 A			VI BF
Alumina	860 A - 864 A			VI BF
Alumina	870 A - 874 A			VI BF
Alumina	880 A - 884 A			VI BF
Alumina	890 A - 894 A			VI BF
Alumina	900 A - 904 A			VI BF
Alumina	910 A - 914 A			VI BF
Alumina	920 A - 924 A			VI BF
Alumina	930 A - 934 A			VI BF
Alumina	940 A - 944 A			VI BF
Alumina	950 A - 954 A			VI BF
Alumina	960 A - 964 A			VI BF
Alumina	970 A - 974 A			VI BF
Alumina	980 A - 984 A			VI BF
Alumina	990 A - 994 A			VI BF
Alumina	1000 A - 1004 A			VI BF

Τυποποίηση για τον χαρακτηρισμό λειαντικού τροχού

Μορφοποίηση τροχού
Διαθέσιμες περισσότερες από 50, πχ:

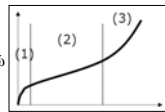


Φθορά λειαντικών τροχών

Φθορά: Οι κόκκοι στομώνουν 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.

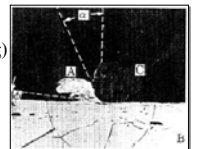
Λόγος Λείανσης: $G = \frac{\text{Όγκος αφαιρουμένου υλικού}}{\text{Όγκος κατεστραμμένου τροχού}}$



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

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):

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

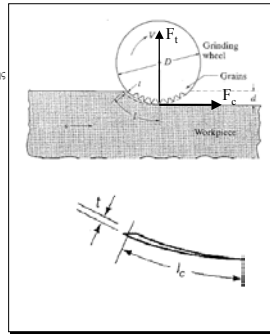
$$\text{Ισχύς: } P = T \cdot \omega = 2\pi N \cdot T$$

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

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

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

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



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

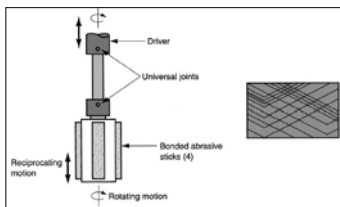
Διεργασία	Συνήθης εφαρμογή	Επιφανειακή ποιότητα (μm)
Λείανση (Μεσαίου μεγέθους κόκκοι)	Flat, ext. cylinder, holes	0.4 – 0.6
Λείανση (Μικρού μεγέθους κόκκοι)	Flat, ext. cylinder, holes	0.2 – 0.4
Honing	Round Hole	0.1 – 0.8
Lapping	Near Flat	0.025 – 0.4
Superfinishing	Flat, ext. Cylinder	0.013 – 0.2
Polishing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

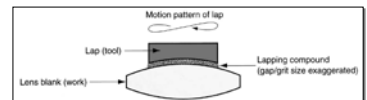


17

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.



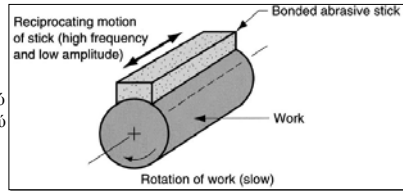
18

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