

- Φθορά κοπτικών εργαλείων
- Δυνάμεις κοπής

13

<http://www.m3.tuc.gr>



Αρχές της κοπής – 2



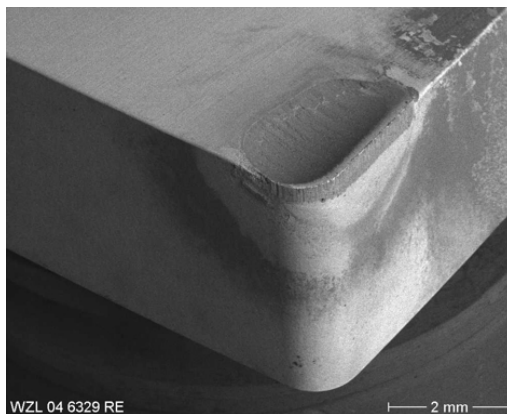
2019-20



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

1

Το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή υπόκειται, όπως προαναφέρθηκε, σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια το κοπτικό εργαλείο σταδιακά να φθείρεται και τελικά να αστοχεί, πράγμα που σημαίνει πως είναι πλέον άχρηστο και πρέπει να επανατροχιστεί ή να απορριφθεί. Η **αστοχία του κοπτικού εργαλείου** παρουσιάζεται είτε με θραύση του εργαλείου, είτε με υπέρβαση προκαθορισμένης τιμής σε κάποιο χαρακτηριστικό μέγεθος, για παράδειγμα το πλάτος ζώνης φθοράς, το βάθος κρατήρα κ.λπ., όπως αυτά θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Η φθορά που αναπτύσσεται παρουσιάζεται με τις παρακάτω μορφές:

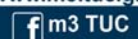


- **φθορά της ελεύθερης επιφάνειας** (καλείται ζώνη φθοράς),
- **φθορά κρατήρα** στην επιφάνεια αποβλίττου,
- **απολέπιση της κόψης** και στην επιφάνεια αποβλίττου,
- **μικροθραύσεις, ρωγμές, πλαστική παραμόρφωση** της ακμής του εργαλείου.

<http://www.m3.tuc.gr>



Φθορά κοπτικών εργαλείων

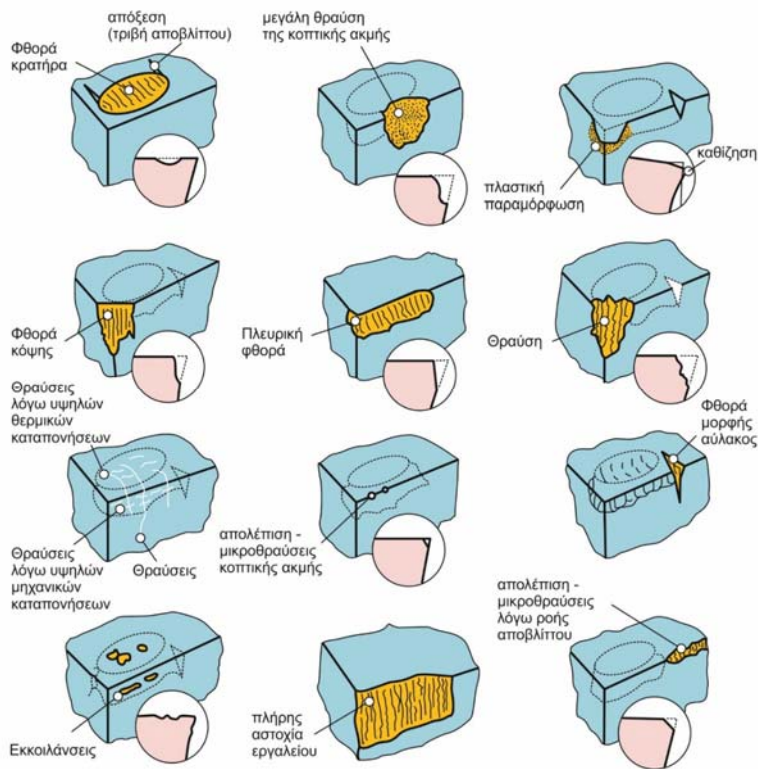


2019-20



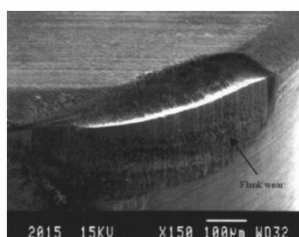
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

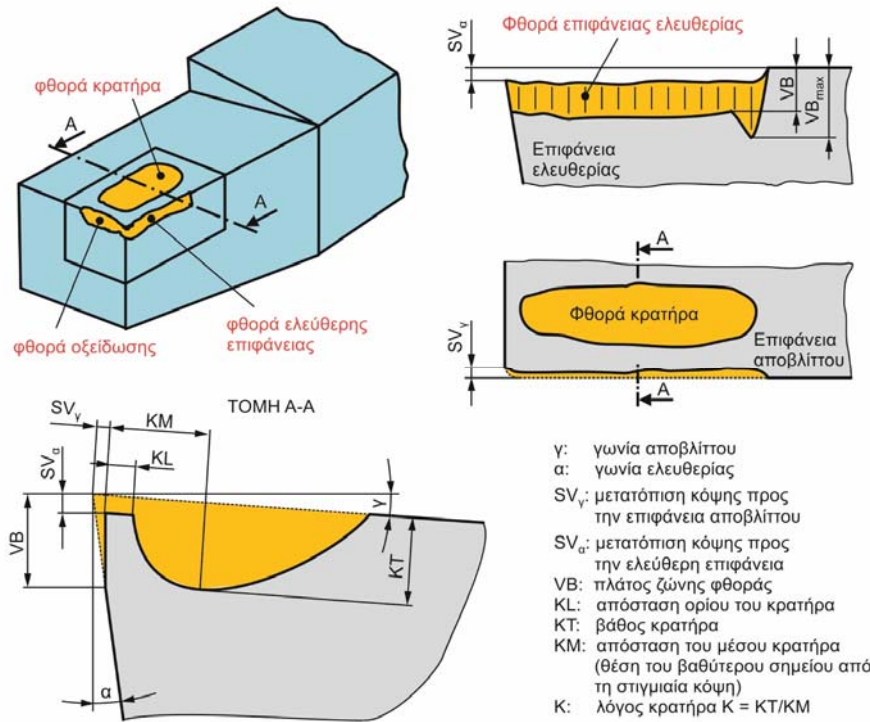
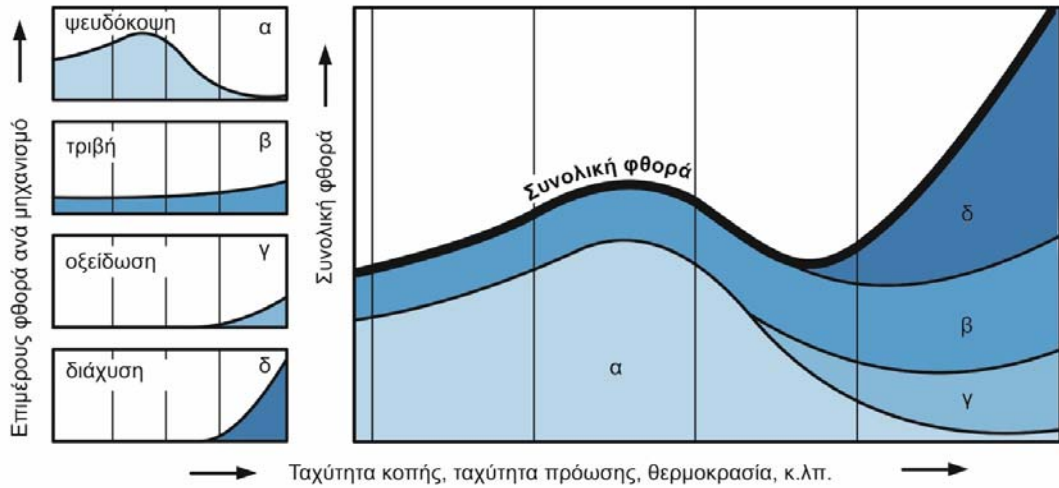
2

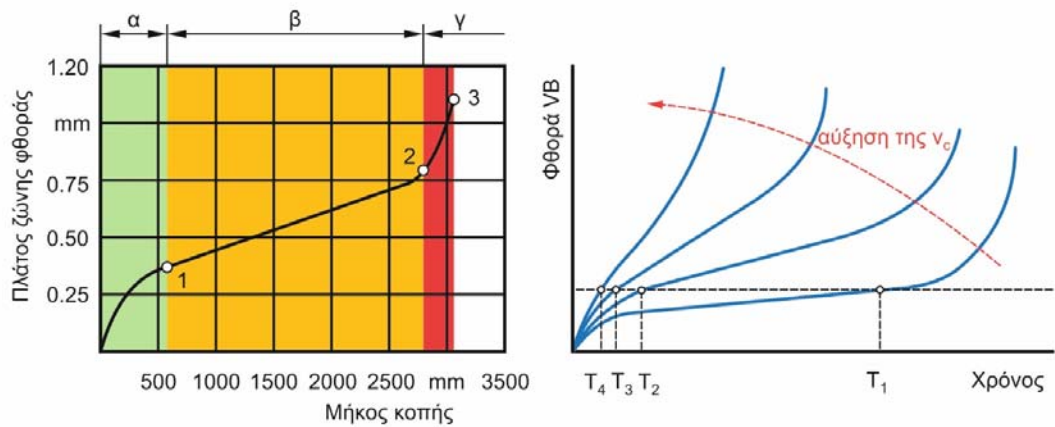


Οι κύριοι μηχανισμοί βάσει των οποίων αναπτύσσεται η φθορά στα κοπτικά εργαλεία είναι οι εξής:

- **σχηματισμός και λύση συγκολλητών δεσμών:** Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται λόγω της τριβής μεταξύ αποβλίτου και εργαλείου ή εργαλείου και τεμαχίου. Ο διαρκής σχηματισμός και καταστροφή των δεσμών αυτών κατά τη διάρκεια της κοπής, έχει ως συνέπεια την απόσπαση μικρών τεμαχίων από το εργαλείο προς το απόβλιτο ή το τεμάχιο αντίστοιχα.
- **απόξεση:** Σκληρά τεμαχίδια του αποβλίτου κινούμενα και συγχρόνως πιεζόμενα πάνω στην επιφάνεια αποβλίτου του κοπτικού εργαλείου, τη φθείρουν συνεχώς, εκτελώντας κοπή σε μικρή κλίμακα. Τα τεμαχίδια αυτά μπορεί να προέρχονται και από μικρά κομμάτια της ψευδόκοψης.
- **διάχυση στερεάς κατάστασης:** Άτομα από το υλικό του κοπτικού εργαλείου διαχέονται προς το απόβλιτο ή το τεμάχιο, λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών για διάχυση που προσφέρουν οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η μεταλλική επαφή του εργαλείου με το απόβλιτο ή το τεμάχιο.
- **οξειδωση:** Εμφανίζεται κυρίως στη δευτερεύουσα κόψη του κοπτικού εργαλείου και αφορά κυρίως τα σκληρομέταλλα σε μεγάλες ταχύτητες κοπής που συνοδεύονται από μεγάλη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία που ευνοεί την οξειδωση.







Το πλάτος της ζώνης φθοράς αυξάνεται με το χρόνο κοπής παρουσιάζοντας τρεις διαφορετικές περιοχές συμπεριφοράς. Αρχικά, στη **φάση α** του σχήματος, μόλις το κοπτικό εργαλείο εμπλέκεται στην κοπή, η ιδιαίτερα αιχμηρή κόψη του αμβλύνεται πολύ γρήγορα. Στη συνέχεια, ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου σταθεροποιείται για μεγάλο χρονικό διάστημα (**φάση β** του σχήματος) και η φθορά που παρουσιάζεται είναι ανάλογη του μήκους και του χρόνου κοπής. Τέλος, στην τρίτη φάση (**φάση γ**), η φθορά επιταχύνεται συνεχώς μέχρι το κοπτικό εργαλείο να αστοχήσει. Αυτή η συμπεριφορά παρουσιάζεται σε όλες τις ταχύτητες κοπής, όπως φαίνεται στο δεξί μέρος του σχήματος.

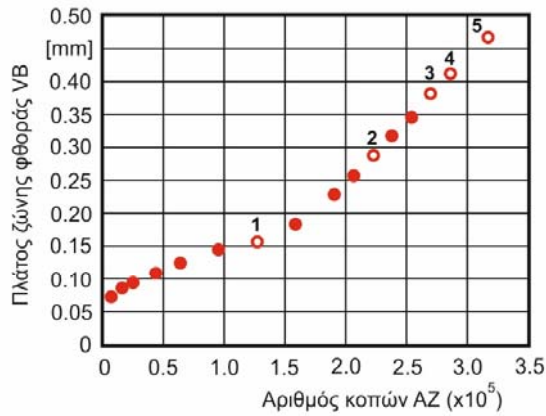
Τόρνευση ανθρακούχου χάλυβα 0.45% C	Μετωπικό φραιζάρισμα ανθρακούχου χάλυβα 0.45% C	Τόρνευση Inconel 718
α	β	γ
δ	ε	

Τόρνευση ανθρακούχου χάλυβα 0.45% C

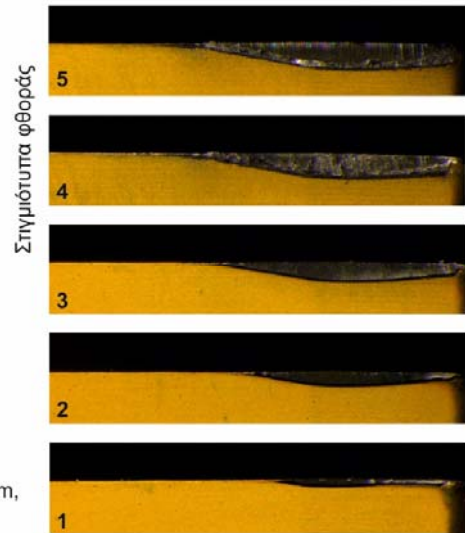
Τόρνευση κράματος Ti

Δεδομένα κατεργασιών

- (α) Εργαλείο: σκληρομέταλλο P10, $v_c = 150\text{m/min}$, $d = 1.0\text{ mm}$, $f = 0.19\text{ mm/rev}$, χρόνος: 5 min
- (β) Εργαλείο: σκληρομέταλλο P10, $v_c = 400\text{m/min}$, $d = 1.0\text{ mm}$, $f = 0.19\text{ mm/rev-δόντι}$, χρόνος: 5 min
- (γ) Εργαλείο: κεραμικό $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$, $v_c = 100\text{m/min}$, $d = 0.5\text{ mm}$, $f = 0.19\text{ mm/rev}$, χρόνος: 0.5 min
- (δ) Εργαλείο: κεραμικό Si_3N_4 , $v_c = 300\text{m/min}$, $d = 1.0\text{ mm}$, $f = 0.19\text{ mm/rev}$, χρόνος: 1 min
- (ε) Εργαλείο: σκληρομέταλλο P10, $v_c = 150\text{m/min}$, $d = 0.5\text{ mm}$, $f = 0.1\text{ mm/rev}$, χρόνος: 2 min



Κατεργαζόμενο τεμάχιο: Ck60
 Κοπτικό εργαλείο: $\Phi 25$, $z=1$, καρβίδιο, TiN
 Συνθήκες κοπής: $v_c=220\text{m/min}$, $f=1\text{mm/rev}$, δόντι, $t_{xy}=0.3\text{mm}$,
 $t_z=0.5\text{mm}$

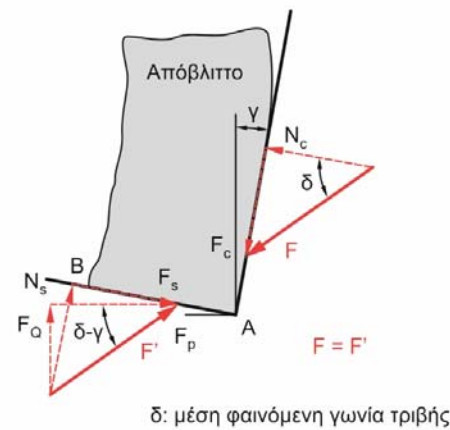
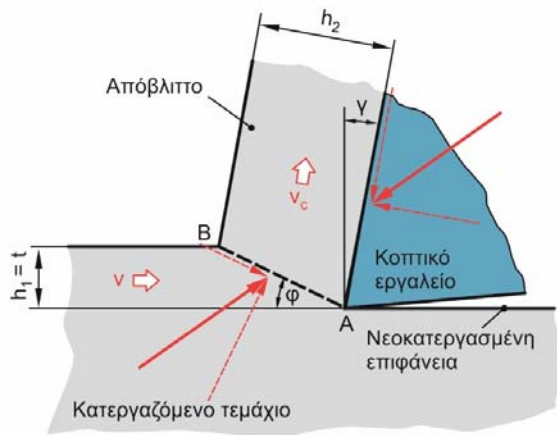


Είναι σημαντικό να υπάρχουν δεδομένα για τις αναμενόμενες συνιστώσες της δύναμης κοπής κατά την κατεργασία, ιδιαίτερα για τους παρακάτω λόγους:

- Η ισχύς της εργαλειομηχανής που πρόκειται να υλοποιήσει μια κατεργασία, εξαρτάται από τις προκύπτουσες δυνάμεις κατά την κατεργασία αυτήν. Για το λόγο αυτό, οι συνιστώσες της δύναμης κοπής είναι βασικό δεδομένο για τη σχεδιομελέτη της εργαλειομηχανής.
- Οι συνιστώσες της δύναμης κοπής κατά την κατεργασία δημιουργούν παραμόρφωση εξαρτημάτων της εργαλειομηχανής, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η επιθυμητή υψηλή ακρίβεια κατεργασίας της εργαλειομηχανής. Η γνώση αυτών των δυνάμεων βοηθά στη σωστή σχεδιομελέτη των εξαρτημάτων των εργαλειομηχανών.
- Η γνώση των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας ενός συγκεκριμένου υλικού με καθορισμένες συνθήκες κοπής, αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για τον καθορισμό της βέλτιστης περιοχής λειτουργίας της εργαλειομηχανής.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν καθοριστικά τις συνιστώσες της δύναμης κοπής και που η επίδρασή τους θα αναλυθεί στη συνέχεια, είναι:

- Η μέθοδος κατεργασίας και το είδος του αποβλίπτου (σταθερό ή μεταβαλλόμενο πάχος),
- οι συνθήκες κοπής όπως η πρόωση, το βάθος κοπής, η γεωμετρία του κοπτικού, η ταχύτητα κοπής, η παρουσία ψυκτικού υγρού, κ.λπ.,
- το κατεργαζόμενο υλικό, η χημική του σύνθεση, η πιθανή θερμική κατεργασία, κ.λπ.,
- το κοπτικό εργαλείο, η γεωμετρία των κόψεων, η πιθανή φθορά, κ.λπ..



- Η αντίσταση σε διάτμηση του αποβλίπτου F_s που βρίσκεται πάνω στο επίπεδο διάτμησης.
 - Η αντίστοιχη κάθετη στο επίπεδο διάτμησης N_s που αποτελεί την αντίδραση από το τεμάχιο στο απόβλιπτο.
 - Η δύναμη τριβής F_c που είναι η δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια επαφής εργαλείου και αποβλίπτου και αντιτίθεται στην κίνησή του.
 - Η δύναμη N_c που είναι κάθετη στην επιφάνεια επαφής αποβλίπτου – εργαλείου.
- Η συνισταμένη F των δυνάμεων F_c και N_c είναι και η δύναμη κοπής, ίση και αντίθετη με τη δύναμη F' .

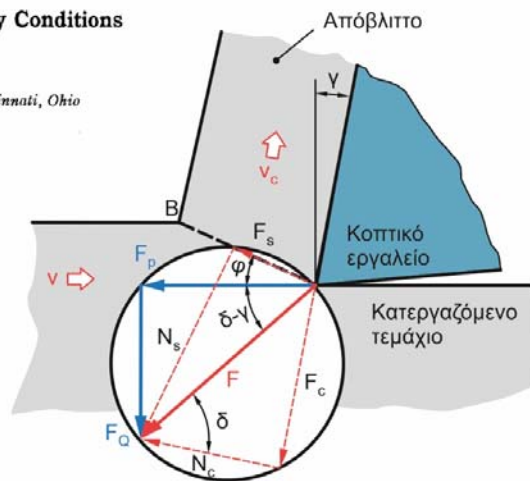
δ: μέση φαινόμενη γωνία τριβής



Οι δυνάμεις κοπής, όπως παρουσιάστηκαν στην ορθογωνική κοπή, απεικονίζονται στο σχήμα με τη μορφή κυκλικού διαγράμματος, όπως πρωτοσχεδιάστηκε από τον **Eugene Merchant** το 1945. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_p που ουσιαστικά προσδιορίζει την ισχύ της κοπής και η οποία έχει την ίδια διεύθυνση με την κίνηση του εργαλείου. Αυτή η δύναμη κοπής καθώς και η κάθετη συνιστώσα F_Q είναι εκείνες που συνήθως μετρούνται με ειδικό εξοπλισμό δυναμομέτρησης

Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting*

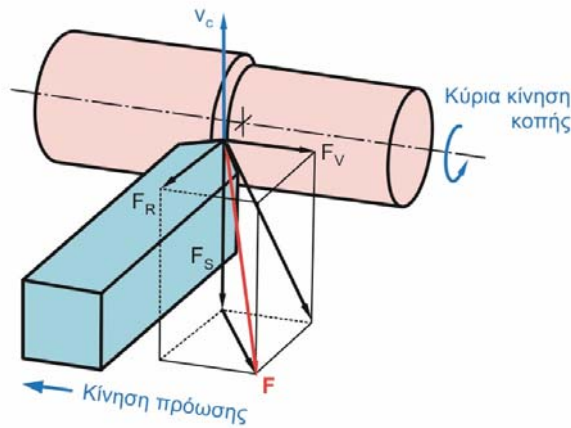
M. EUGENE MERCHANT
Research Department, The Cincinnati Milling Machine Company, Cincinnati, Ohio
(Received November 15, 1944)



- F_p : η συνιστώσα στην κατεύθυνση της κίνησης που είναι η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής
- F_Q : κάθετη συνιστώσα στην κίνηση



Στο σχήμα παρουσιάζεται το σύστημα των δυνάμεων στη **λοξή κοπή** που είναι και η γενική περίπτωση. Στη λοξή κοπή, η δύναμη κοπής F αναλύεται σε τρεις συνιστώσες κατά μήκος τριών αξόνων, καθέτων μεταξύ τους. Οι συνιστώσες αυτές είναι η **κύρια δύναμη κοπής F_S** , η **δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης F_V** και η **δύναμη απώθησης F_R** .



- F : Συνισταμένη δύναμη κοπής
- F_S : Κύρια δύναμη κοπής
- F_V : Δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης
- F_R : Δύναμη απώθησης
- v_c : Ταχύτητα κοπής



Για τον υπολογισμό της κύριας δύναμης κοπής, η αναλυτική σχέση που διατυπώθηκε από τον **Otto Kienzle**, παίρνει υπόψη της τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις δυνάμεις κοπής και την υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια.

Βασικό δεδομένο για τον υπολογισμό των αναπτυσσομένων δυνάμεων κατά την κατεργασία ενός υλικού, είναι η ειδική αντίσταση κοπής του υλικού αυτού. Η ειδική αντίσταση κοπής είναι η ανηγμένη στη διατομή του αποβλίττου δύναμη κοπής και προσδιορίζεται πειραματικά.

$$F_S = b \cdot K_{s1,1} \cdot h^{1-z}$$

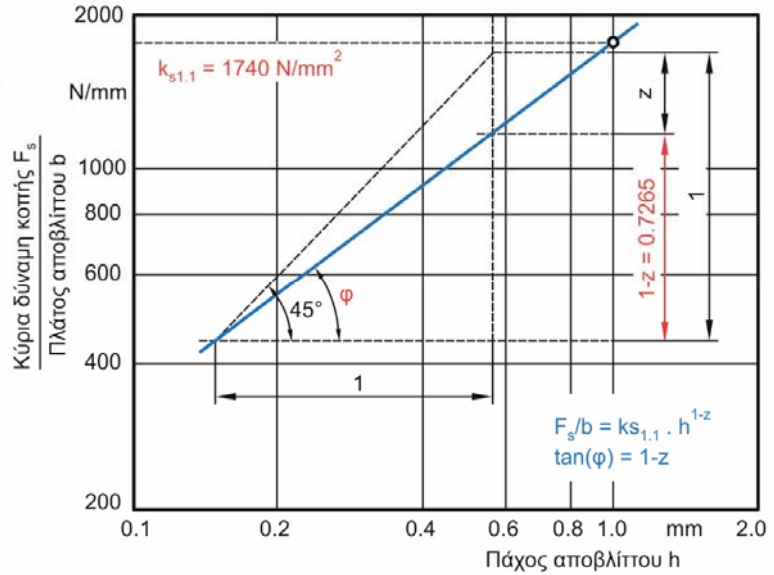
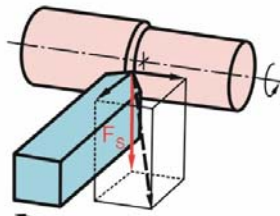
όπου:

- F_S : κύρια δύναμη κοπής
- b : πλάτος αποβλίττου
- h : πάχος αποβλίττου
- $K_{s1,1}$: ειδική αντίσταση κοπής
- z : σταθερά κατεργαζόμενου υλικού

Παρόμοιες σχέσεις ισχύουν για τις συνιστώσες της δύναμης κοπής, απώθησης F_R και στην κατεύθυνση της πρόωσης F_V :

$$F_R = b \cdot K_{R1,1} \cdot h^{1-y}$$

$$F_V = b \cdot K_{V1,1} \cdot h^{1-x}$$



Οι εξισώσεις Kienzle σε **διπλό λογαριθμικό διάγραμμα** με τετμημένη το πάχος του αποβλήτου και τεταγμένη την ανηγμένη στο πλάτος αποβλήτου δύναμη κοπής, περιγράφονται ως ευθεία, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η ευθεία αυτή έχει κλίση το «συντελεστή κλίσης» 1-z που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά της δύναμης κοπής σε ζεύγος κατεργαζόμενου υλικού – κοπτικού εργαλείου, για συγκεκριμένη ταχύτητα κοπής και διαφορετικά πάχη αποβλήτου.

Υλικό	z	$K_{s1,1}$ σε N/mm ²	1-x	$K_{v1,1}$ σε N/mm ²	1-y	$K_{R1,1}$ σε N/mm ²
St50	0,26	1990	0,2987	351	0,5089	274
St70	0,30	2260	0,3835	364	0,5067	311
C15	0,22	1820	0,1993	333	0,4648	260
Ck45	0,14	2220	0,3248	343	0,5244	263
Ck60	0,18	2130	0,2877	347	0,5870	250
15CrMo5	0,17	2290	0,2488	290	0,4430	232
16MnCr5	0,26	2100	0,3024	391	0,5410	324
18CrNi6	0,30	2260	0,2750	326	0,5352	247
20MnCr5	0,25	2140	0,3190	337	0,4778	246
30CrNiMo8	0,20	2600	0,3844	355	0,5657	255
34CrMo4	0,21	2240	0,3190	337	0,3715	237
37MnSi5	0,20	2260	0,3622	259	0,7432	277
42CrMo4	0,26	2500	0,3295	334	0,5239	271
50CrV4	0,26	2220	0,2345	317	0,6106	315
GG20	0,25	1020	0,3010	240	0,5400	178
GG25	0,26	1160	0,3020	251	0,5410	190
GGG-60	0,17	1480	0,2400	290	0,5657	240

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

Αρχές της κοπής

Αλλαγή Υλικού

Υλικό: KS1.1.KV1.1.KR1.1.KS

Συγκεντρωτικός Πίνακας ειδικών αντιστάσεων κοπής KS1.1, KV1.1, KR1.1, KS

Υλικό Κοπτικού Εργαλείου	Γεωμετρία Κόπης					Ταχύτητα Κόπης v m/min	Ειδική Αντίσταση Κόπης kS1.1 N/mm ²	Συντελεστής Κόπης (Πρώτα) 1-z	Ειδική Αντίσταση Κόπης (Πλάνα) KV1.1 N/mm ²	Συντελεστής Κόπης 1-x	Ειδική Αντίσταση Κόπης (Αποβλίττα) KR1.1 N/mm ²	Συντελεστής Κόπης 1-y	Ειδική Αντίσταση Κόπης KS=(f)h N/mm ²	
	γ	α	β	κ	ε									
	α mm													
HMP10	6	5	0	70	90	0.8	50	1823	0.792	417	0.3644	319	0.5672	1
HMP10	6	5	0	70	90	0.8	100	1686	0.7842	265	0.2775	259	0.587	2
HMP10	6	5	0	70	90	0.8	200	1605	0.7823	269	0.3734	258	0.5428	3
HMP10	-6	6	-6	70	90	0.8	50	1938	0.751	626	0.3651	557	0.5765	4
HMP10	-6	6	-6	70	90	0.8	100	1704	0.7139	496	0.3935	489	0.6177	5
HMP10	-6	6	-6	70	90	0.8	200	1831	0.7775	673	0.7028	769	0.9167	6
S181-2.5	15	8	0	70	90	0.8	25	2267	0.8383	930	0.7151	678	0.8711	7
														8

Πάχος Αποβλίττου h

kS=(f)h (N/mm ²)	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800	1.000	1.250	1.600
α/α	mm												
1	2943	2809	2669	2547	2432	2318	2205	2105	2007	1909	1823	1740	1653
2	2771	2641	2504	2386	2274	2163	2055	1958	1863	1769	1686	1607	1523
3	2649	2524	2392	2278	2170	2064	1959	1866	1775	1685	1605	1529	1449
4	3439	3253	3069	2893	2737	2584	2435	2303	2174	2049	1938	1833	1724
5	3293	3089	2878	2700	2533	2371	2215	2078	1945	1816	1704	1598	1489
6	3056	2908	2753	2619	2493	2368	2245	2136	2029	1924	1831	1742	1649
7	3289	3173	3048	2940	2836	2732	2629	2536	2443	2350	2267	2186	2101
8													

Εντάξει Άσυρο Εφαρμογή Βοήθεια

<http://www.m3.tuc.gr>



Βάση δεδομένων ειδικών αντιστάσεων κοπής



2019-20

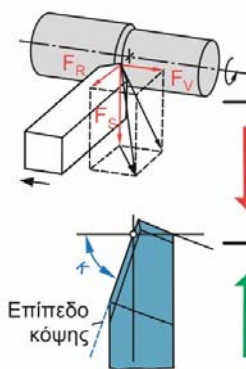


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

17

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

Αρχές της κοπής



	F_S : Κύρια δύναμη κοπής	F_V : Δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης	F_R : Δύναμη απώθησης
↓ γωνία αποβλίττου γ	↑ 1.5 %	↑ 5.0 %	↑ 4.0 %
↓ γωνία θέσης κύριας κόπης κ	↑ 1.5 %	↑ 1.5 %	↑ 10.0 %
↑ γωνία αποβλίττου γ	↓ 1.5 %	↓ 5.0 %	↓ 4.0 %
↑ γωνία θέσης κύριας κόπης κ	↓ 1.5 %	↓ 1.5 %	↓ 10.0 %

<http://www.m3.tuc.gr>



Επίδραση μεταβολής γωνιών αποβλίττου και τοποθέτησης στις συνιστώσες της δύναμης κοπής

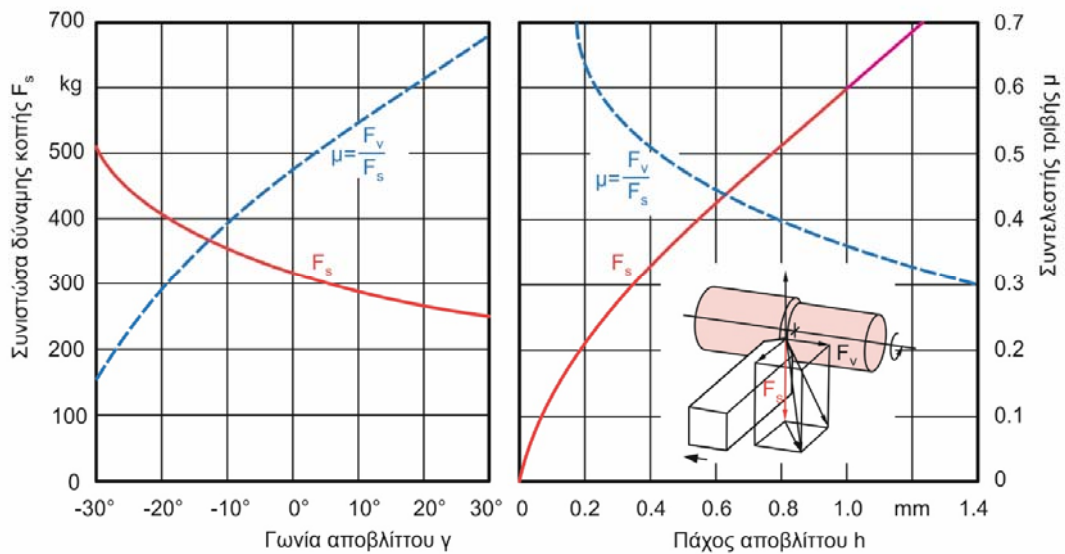


2019-20

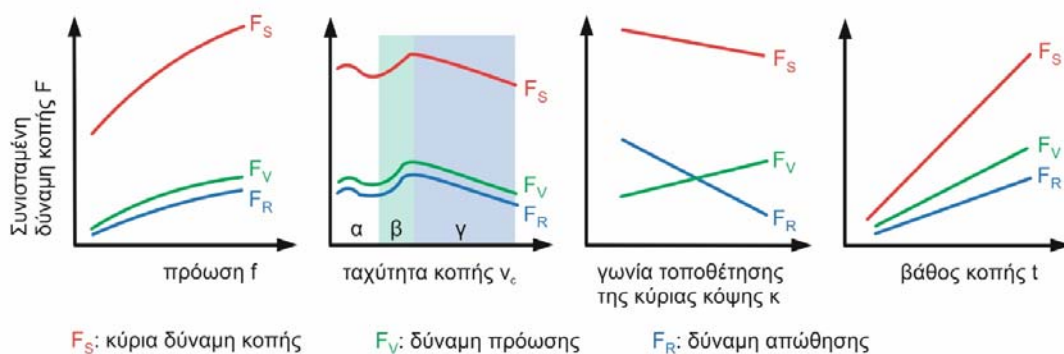


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

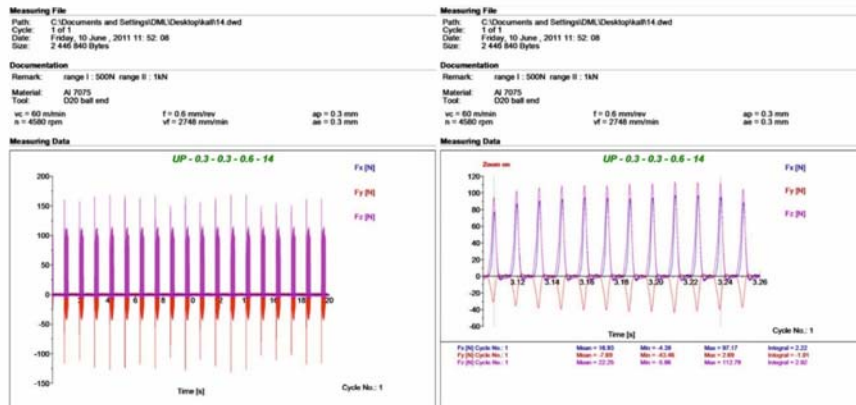
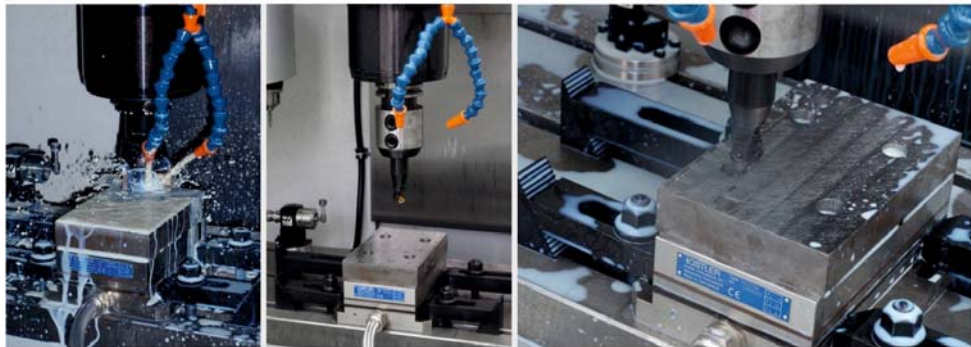
18



Ειδικά η επίδραση της ταχύτητας κοπής στις συνιστώσες της δύναμης κοπής έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αναλύεται περισσότερο στο σχήμα, όπου παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα της επίδρασης της ταχύτητας κοπής v_c στις συνιστώσες της δύναμης κοπής. Στο διάγραμμα διακρίνονται τρεις περιοχές:

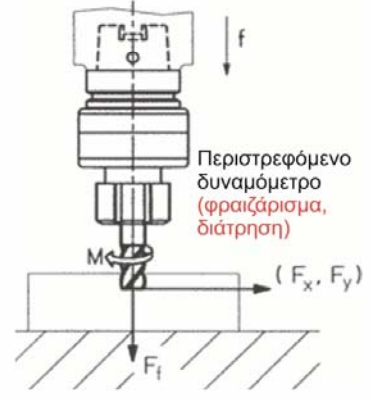
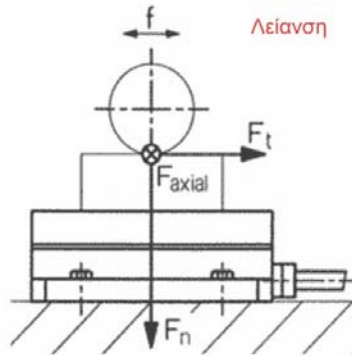
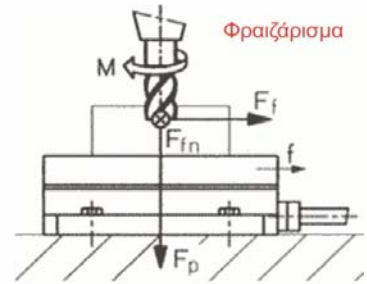
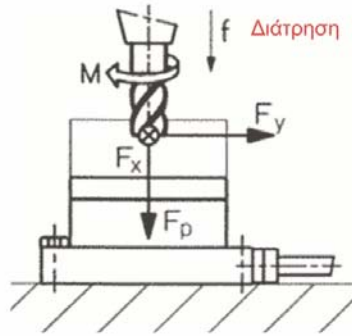
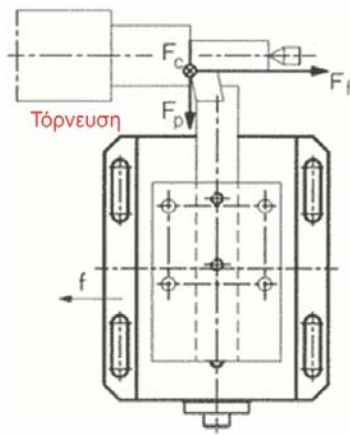


- Η **περιοχή α** όπου παρατηρείται εν γένει πτώση των δυνάμεων και είναι η περιοχή όπου υπάρχει πλήρης σχηματισμός της ψευδοκόψης και αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της δύναμης κοπής λόγω της αύξησης της γωνίας του αποβλίτου.
- Η **περιοχή β** όπου παρατηρείται υποχώρηση της ψευδοκόψης και άρα αύξηση της δύναμης κοπής με αύξηση της ταχύτητας.
- Η **περιοχή γ**, όπου στην αρχή παρουσιάζεται πτώση της δύναμης κοπής και στη συνέχεια σταθεροποίησή της με την αύξηση της ταχύτητας κοπής



20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

Αρχές της κοπής



<http://www.m3.tuc.gr>



Εφαρμογές στατικών και περιστρεφόμενων δυναμόμετρων
(προσφορά της KISTLER)



2019-20



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis