

Theory of Formation of Metal Chips

VÄINÖ PIISPANEN
Oy. Billnäs Ab., Billnäs, Finland
(Received February 10, 1948)

In this article values for the angles β and ν have been deduced (compare Fig. 3 and Eqs. (2) and (3)). New values have been deduced for the shear angle ϕ , Eqs. (16), (20), and (21). The increasing of the internal friction and the strain hardening have been considered.

Equations for the work done in cutting per unit of length (6) and (13) have been deduced. For the cutting force Eqs. (14), (15), and (19) have been deduced. A high cutting speed decreases the friction angle τ between the chip and the face of the tool, by which the forces loading the machine tool steeply may be decreased. These forces are very highly dependent on the friction angle τ , since the rake angle α is negative.

A new theory of the formation of a discontinuous chip is presented.

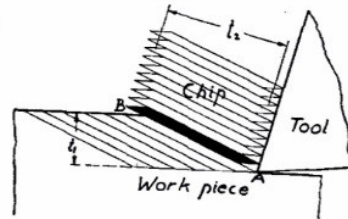
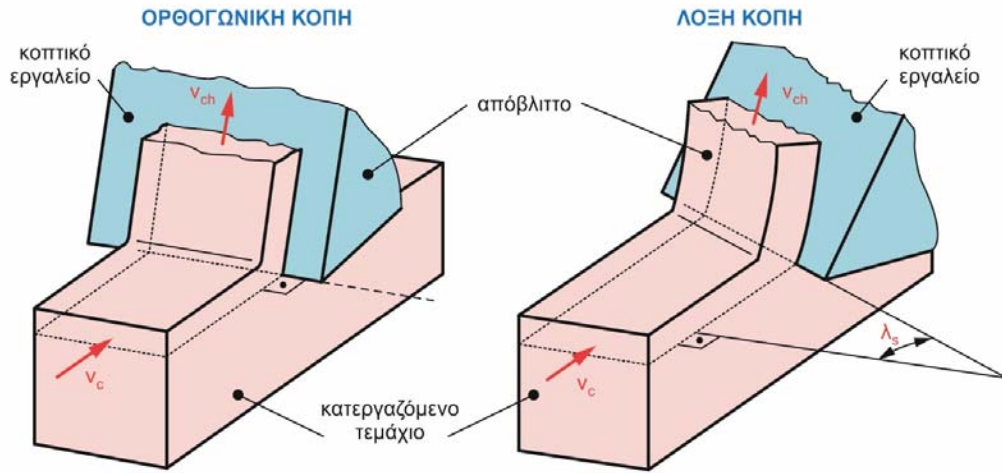


FIG. 1. Chip formation: a lamella just removed is marked black. In reality, the lamellas are very thin.

13

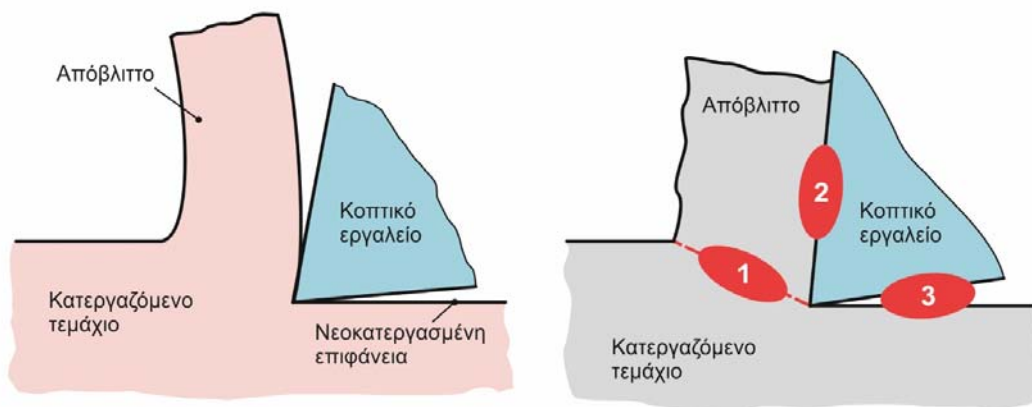
ΜΕΘΟΔΟΣ	ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ	ΚΟΠΤΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ	ΤΕΜΑΧΙΟ
<ul style="list-style-type: none"> Τόρνευση Φραιζάρισμα Διάτρηση Πλάνιση Γραναζοκοπή Λείανση Πριόνισμα Honning Lapping 	<ul style="list-style-type: none"> Ισχύς Ακρίβεια Σπβαρότητα Συνθήκες κοπής Μεγεθος 	<ul style="list-style-type: none"> Υλικό Γεωμετρία Επικάλυψη 	<ul style="list-style-type: none"> Υλικό Διαστάσεις Επιφάνεια

Οι **παράγοντες** που επηρεάζουν τις κατεργασίες κοπής σχετίζονται με όλους τους συμμετέχοντες στην κοπή, δηλαδή την εργαλειομηχανή, το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο, καθώς και τη μέθοδο κατεργασίας που χρησιμοποιείται. Στο σχήμα παρουσιάζονται όλες εκείνες οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά που αφορούν κάθε έναν από τους παράγοντες της κοπής

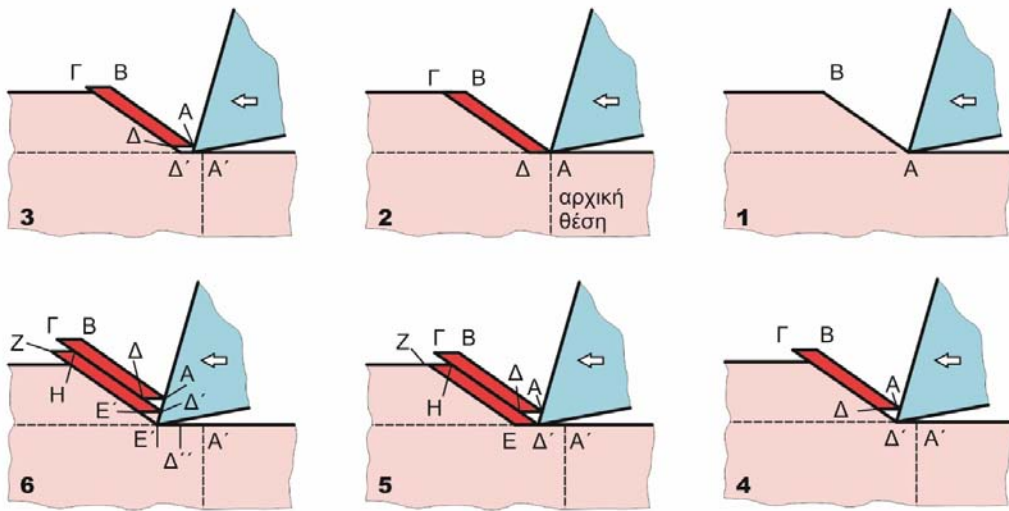


Η **ορθογωνική κοπή**, η οποία θεωρεί ότι το κοπτικό εργαλείο έχει μορφή σφήνας, πλάτος μεγαλύτερο από το πλάτος του κατεργαζόμενου τεμαχίου και είναι κάθετο στη διεύθυνση της κοπής, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η σχετική κίνηση αυτού του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι η αιτία παραγωγής του αποβλίττου που συμβαίνει λόγω της σύγκρουσης του σκληρότερου κοπτικού εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στη συνήθη περίπτωση και σε αντίθεση με την απλουστευμένη ορθογωνική κοπή, στη **λοξή κοπή**, το κοπτικό εργαλείο είναι με κλίση ως προς την κάθετο στη διεύθυνση της κοπής κατά γωνία λ_s που ονομάζεται **γωνία κλίσης της κόψης**.

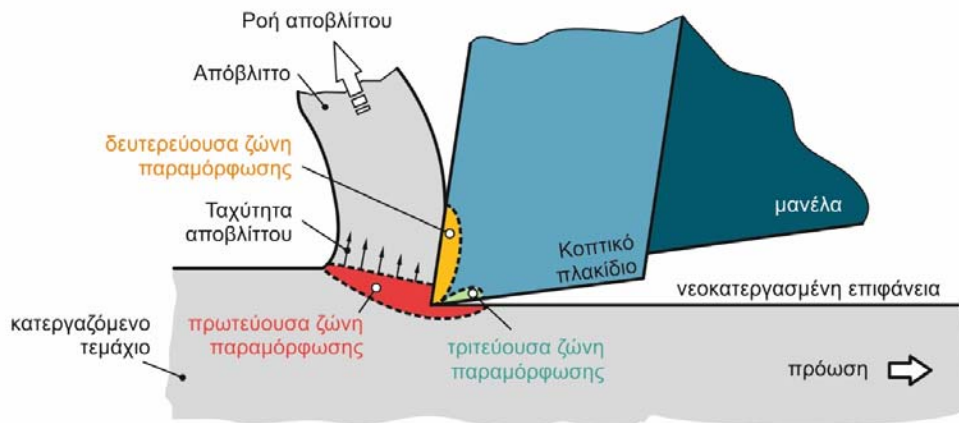
Με βάση την απλουστευμένη μορφή της ορθογωνικής κοπής, το σύστημα κοπτικό εργαλείο, κατεργαζόμενο τεμάχιο και απόβλιττο, παρουσιάζεται απλοποιημένα στο σχήμα στο οποίο διακρίνονται δεξιά οι χαρακτηριστικές περιοχές ενδιαφέροντος στη διαδικασία της κοπής οι οποίες είναι:



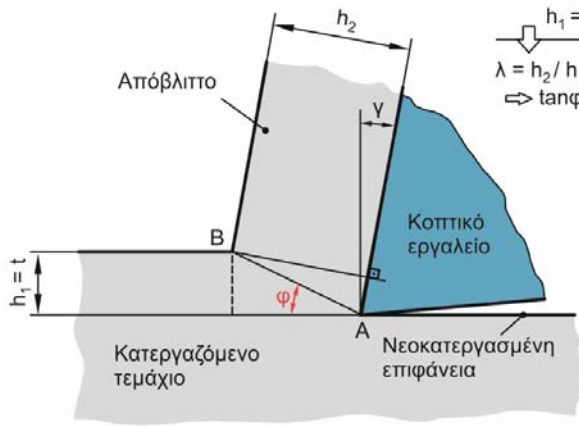
- η **περιοχή 1**, ανάμεσα στο παραμορφωμένο και στο απαραιμόρφωτο υλικό του τεμαχίου,
- η **περιοχή 2**, που είναι η επιφάνεια μεταξύ του αποβλίττου και του κοπτικού εργαλείου και
- η **περιοχή 3** που περιλαμβάνει την κατεργασμένη επιφάνεια.



Victor Astakhov



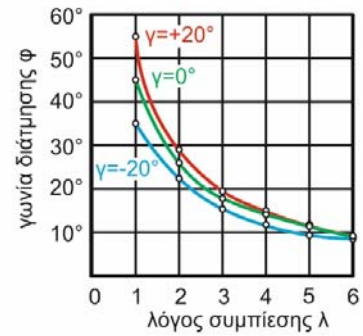
Η σύγχρονη θεώρηση του μηχανισμού της κοπής αναφέρει πως στην ορθογωνική κοπή, καθώς το κατεργαζόμενο υλικό πλησιάζει το επίπεδο διάτμησης, δεν ξεκινά η παραμόρφωσή του παρά μόνον όταν το υλικό φτάσει στο επίπεδο αυτό. Στη θέση αυτή, δηλαδή στο **επίπεδο διάτμησης**, το υλικό παραμορφώνεται με απλή διάτμηση καθώς κινείται κατά μήκος της λεπτής ζώνης διάτμησης με μικρό ποσό παραμόρφωσης στη **δευτερεύουσα ζώνη διάτμησης** που θεωρείται αμελητέα, όπως και η παραμόρφωση στην **τριτεύουσα ζώνη διάτμησης**, που φαίνεται στο σχήμα, η οποία είναι ισοδύναμη με την τριβή ολίσθησης με σταθερό συντελεστή τριβής.



$$h_1 = (AB)\sin\varphi \text{ και } h_2 = (AB)\cos(\varphi-\gamma)$$

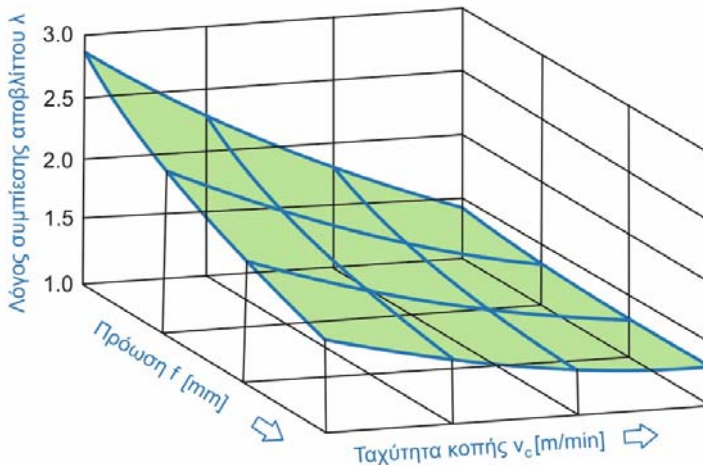
$$\lambda = h_2 / h_1 = \cos(\varphi-\gamma) / \sin\varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tan\varphi = \cos\gamma / (\lambda - \sin\gamma) \Rightarrow \varphi = \arctan[\cos\gamma / (\lambda - \sin\gamma)]$$



Η παραμόρφωση του αποβλίττου, στην πραγματικότητα, παράγεται κυρίως στην περιορισμένου πλάτους πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης. Δεδομένου μάλιστα ότι το απόβλιττο συνεχίζει και παράγεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της κοπής, το πίσω μέρος του αποβλίττου τείνει να τραχυνθεί, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση αυτή στη ζώνη διάτμησης έχει ως συνέπεια το θεωρητικό πάχος του αποβλίττου να μεγαλώνει μια και το απόβλιττο, όπως ήδη περιγράφηκε, περνώντας από τη ζώνη διάτμησης εφελκύεται. Το μέτρο που χαρακτηρίζει την πλαστική παραμόρφωση του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου, καλείται λόγος συμπίεσης του αποβλίττου και ισούται με:

$$\lambda = h_2 / h_1$$

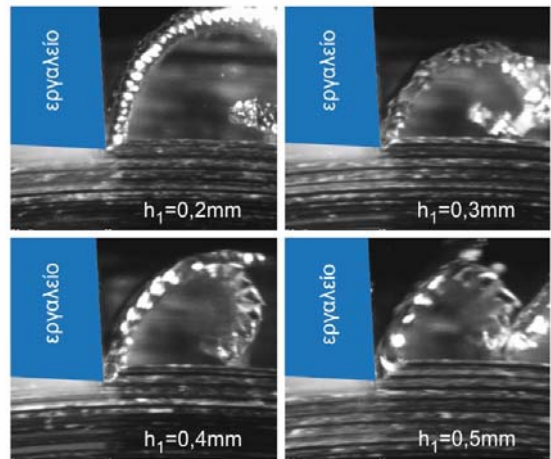
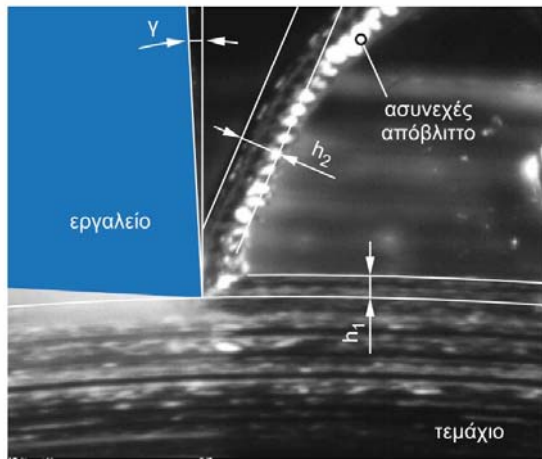


λόγος συμπίεσης
 $\lambda = h_2/h_1$

Werner Degner

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

Αρχές της κοπής



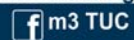
Al7075, P25, γωνία αποβλίπτου $\gamma=3^\circ$, $v_c=80\text{m/min}$

Σε αντίθεση με την ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στο λόγο συμπίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα. Στο σχήμα αυτό διακρίνεται στο αριστερό μέρος του το θεωρητικό πάχος αποβλίπτου h_1 το οποίο ταυτίζεται με το βάθος κοπής καθώς και το πάχος του παραμορφωμένου αποβλίπτου h_2 . Αντίστοιχα στο δεξιό μέρος του σχήματος, παρουσιάζονται τέσσερις φωτογραφίες κοπής με διαφορετικά βάθη κοπής. Η μέτρηση των h_1 και h_2 στις φωτογραφίες του σχήματος δείχνει ότι ο λόγος συμπίεσης δεν επηρεάζεται από το βάθος κοπής.

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



Μέτρηση του λόγου συμπίεσης



2019-20

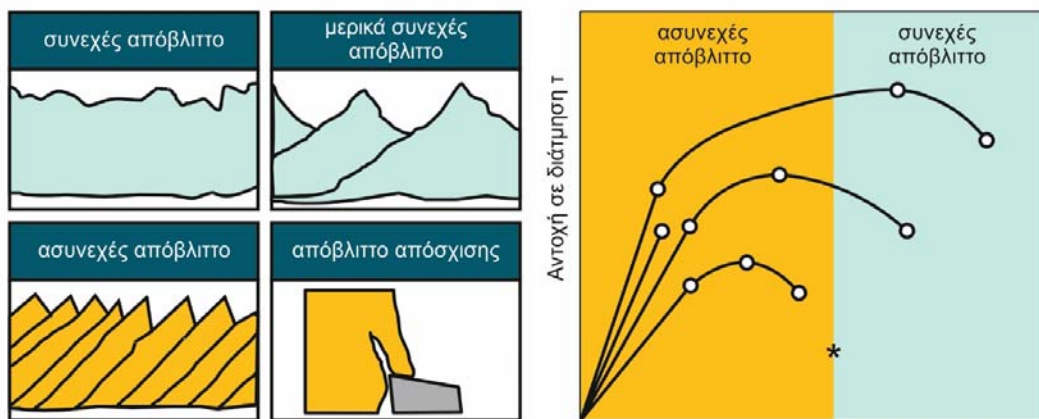


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

9

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

Αρχές της κοπής



* Βαθμός παραμόρφωσης στο επίπεδο διάτμησης ϵ_0

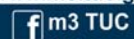
Βαθμός παραμόρφωσης ϵ

Ανάλογα με την **αντοχή σε διάτμηση τ** και το **βαθμό παραμόρφωσης ϵ** του κατεργαζόμενου υλικού, το παραγόμενο απόβλιπτο μπορεί να είναι **συνεχές** ή **ασυνεχές**, όπως φαίνεται στο σχήμα. Το συνεχές απόβλιπτο δημιουργείται από συνεχή πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται στην περιοχή της ζώνης διάτμησης. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια τη διαρροή του υλικού του και τη ροή του ως ταινία πάνω στην επιφάνεια αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου. Τέτοιο απόβλιπτο συναντάται σε όλκιμα μέταλλα ή κράματα, στο χαλκό κ.λπ..

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



Σχηματισμός αποβλίπτου σε σχέση με την αντοχή σε διάτμηση του υλικού



2019-20

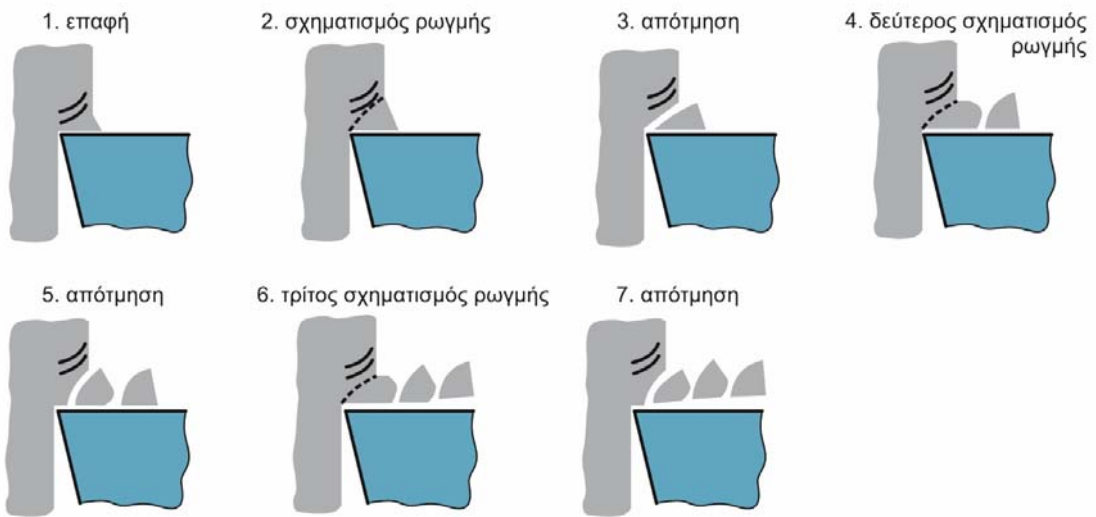


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

10

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

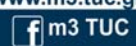
Αρχές της κοπής



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



Φάσεις δημιουργίας ασυνεχούς αποβλίττου σε ψαθυρό υλικό



2019-20

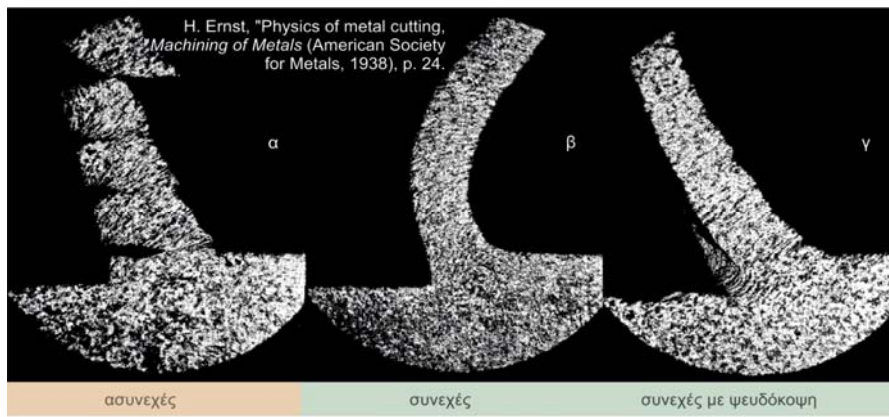
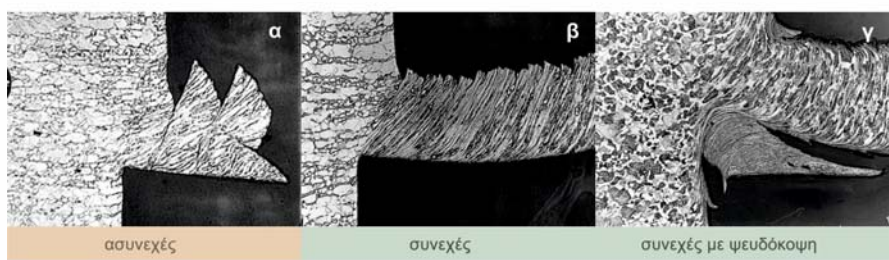


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

11

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

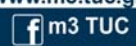
Αρχές της κοπής



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



Βασικές μορφές αποβλίττου



2019-20



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

12

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

Αρχές της κοπής

ΤΑΙΝΙΟ-ΕΙΔΗ	ΣΩΛΗΝΟ-ΕΙΔΗ	ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ	ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΤΥΠΟΥ ΡΟΔΕΛΑΣ	ΚΩΝΙΚΑ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ	ΣΠΕΙΡΟ-ΕΙΔΗ	ΤΕΜΑΧΙΑ ΣΠΕΙΡΟ-ΕΙΔΟΥΣ	ΒΕΛΟΝΟ-ΕΙΔΗ
1.1 μακρύ	2.1 μακρύ	3.2 επίπεδο	4.1 μακρύ	5.1 μακρύ	6.1 ενωμένο		
1.2 κοντό	2.2 κοντό	3.2 κωνικό	4.2 κοντό	5.2 κοντό	6.2 θρυμματισμένο		
1.3 περιπλεγμένο	2.3 περιπλεγμένο		4.3 περιπλεγμένο	5.3 περιπλεγμένο		ISO 3685-1977	

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



Ταξινόμηση αποβλίτων κατά ISO



2019-20

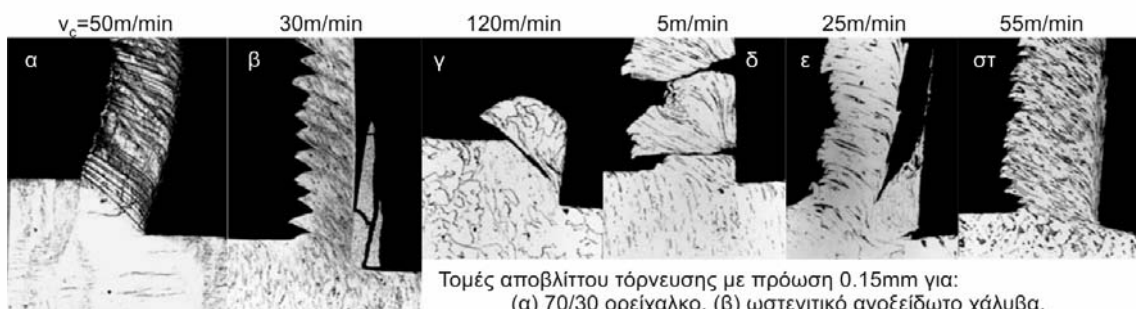


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

13

20
19
18
17
16
15
14
13
12
11

Αρχές της κοπής

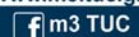


Τομές αποβλίτου τόννευσης με πρόωση 0.15mm για:
(α) 70/30 ορείχαλκο, (β) ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα,
(γ) κράμα μπρούτζου - μολύβδου, (δ) (ε) (ζ) μαλακό χάλυβα

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



Επίδραση του υλικού στο σχηματισμό αποβλίτου

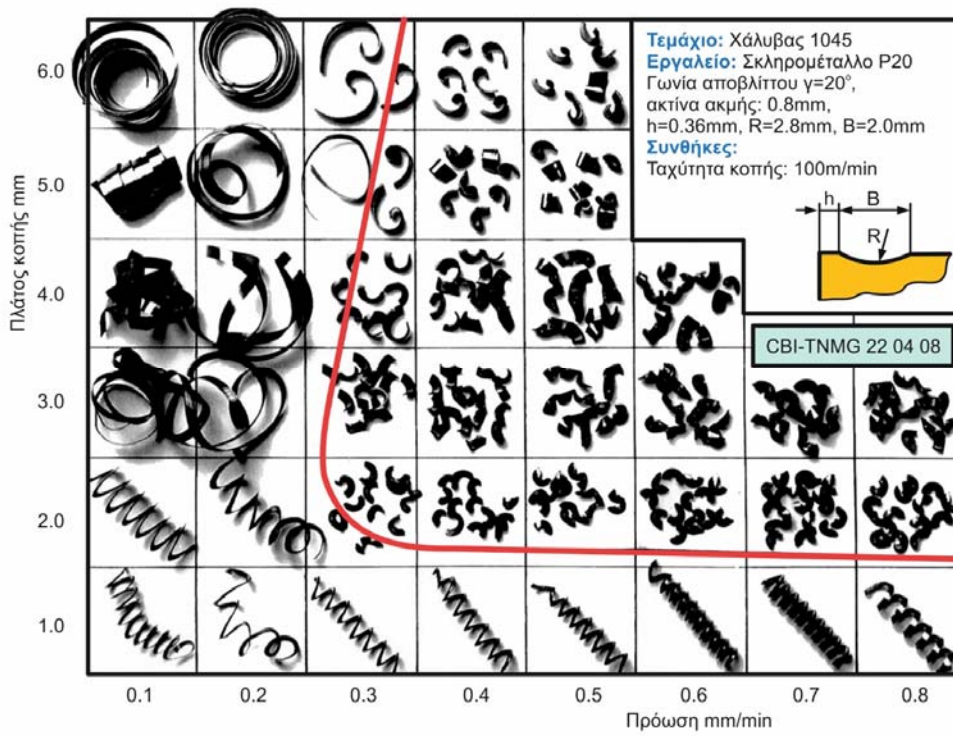


2019-20



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

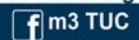
14



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



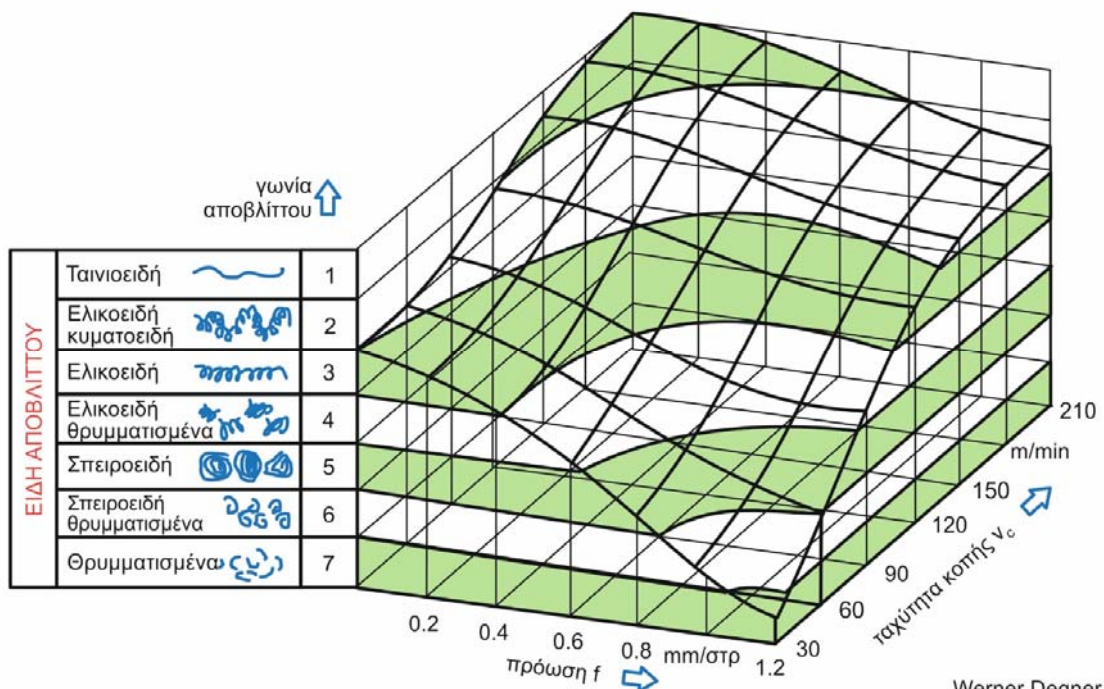
Μορφές αποβλίττου



2019-20



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



Werner Degner

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



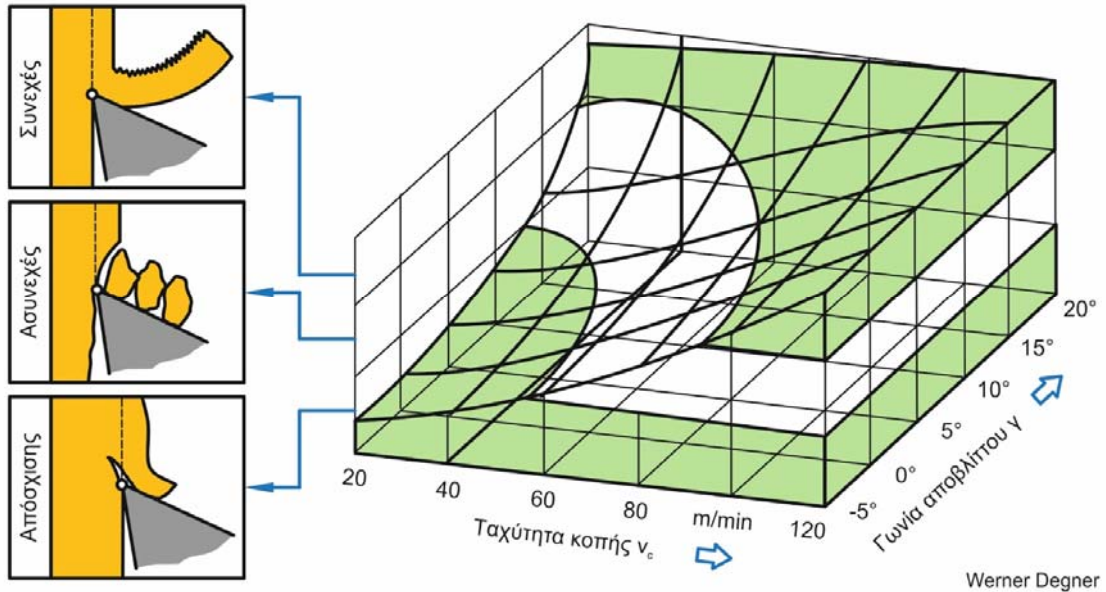
Επίδραση ταχύτητας κοπής, πρόωσης και γωνίας αποβλίττου, στο σχηματιζόμενο απόβλιττο (κατά Werner Degner)



2019-20



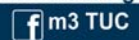
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis



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



Επίδραση ταχύτητας κοπής και γωνίας αποβλίτου, στο σχηματιζόμενο απόβλιτο (κατά Werner Degner)



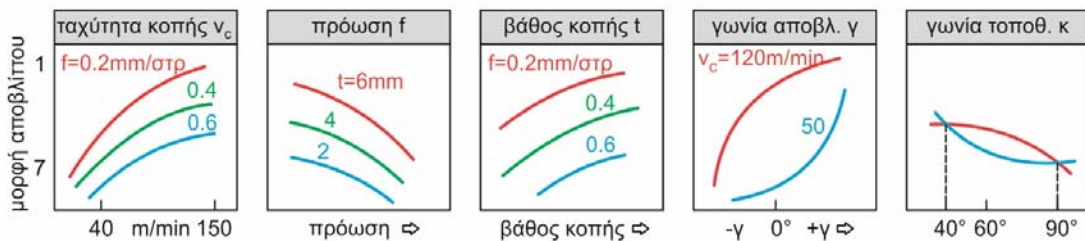
2019-20



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

Συμπεράσματα που μπορεί να εξαχθούν είναι:

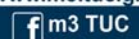
- Η αύξηση της ταχύτητας κοπής για όλες τις προώσεις οδηγεί σε ομαλότερη κοπή και μάλιστα πιο ομαλή όσο μειώνεται η πρόωση.
- Η μείωση της πρόωσης σε όλα τα βάθη κοπής οδηγεί επίσης σε ομαλότερη κατεργασία και μάλιστα πιο ομαλή όσο αυξάνεται το βάθος κοπής.
- Η αύξηση του βάθους κοπής ισοδυναμεί με πιο επιθυμητή μορφή αποβλίτου
- Η αύξηση της γωνίας αποβλίτου έχει επακόλουθο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ομαλότερη ροή και καλύτερο σχηματισμό αποβλίτου.
- Μικρότερη γωνία τοποθέτησης του εργαλείου επιφέρει ομαλότερη κατεργασία.



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



Επίδραση παραμέτρων κοπής στο σχηματιζόμενο απόβλιτο



2019-20



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

20

19

18

17

16

15

14

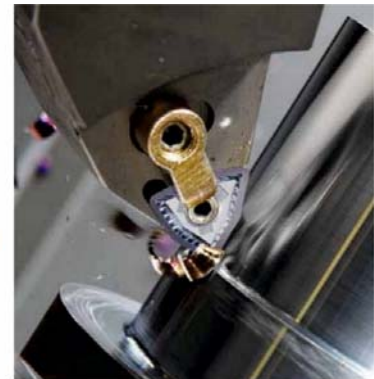
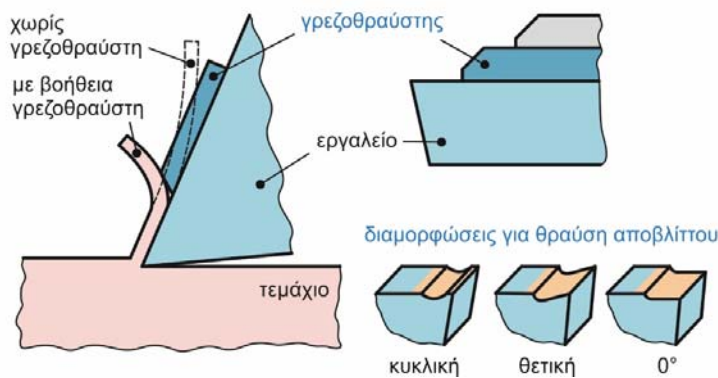
13

12

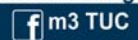
11

Αρχές της κοπής

Σε περιπτώσεις που το συνεχές απόβλιπτο αποκτά μεγάλο μήκος (ιδίως στην κατεργασία όλκιμων υλικών), με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά και κινδύνους κατά την ώρα της κατεργασίας, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται **γρεζοθραύστες**.


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


Γρεζοθραύστες



2019-20



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

19

20

19

18

17

16

15

14

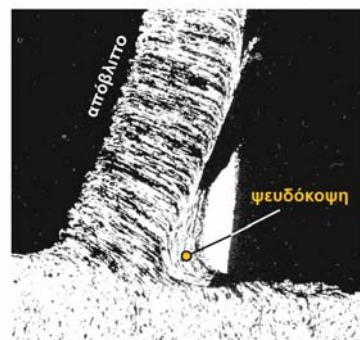
13

12

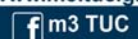
11

Αρχές της κοπής

Πρόκειται για **σφηνοειδές, ασύμμετρο** σώμα από ισχυρά **παραμορφωμένο** και **σκληρυμένο** υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται η κοπτική ακμή του εργαλείου που έχει μορφή σφήνα, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το απόβλιπτο που παράγεται και η ψευδόκοψη ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Η **ψευδόκοψη** αυτή δημιουργείται από επάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου, που προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και αναπτύσσεται συνεχώς καθώς η κοπή προχωρεί. Όταν η ψευδόκοψη αποκτά ένα ορισμένο μέγεθος, αποχωρίζεται από το σώμα της λόγω των δυνάμεων κοπής, μικρά κομμάτια τα οποία προσκολλώνται, είτε στο απόβλιπτο που ρέει, είτε στην νεοσχηματισμένη επιφάνεια του τεμαχίου. Έτσι, όπως φαίνεται στο σχήμα, κομμάτια της ψευδόκοψης απομένουν στην νεοκατεργασμένη επιφάνεια καθώς η κατεργασία εξελίσσεται, γεγονός που είναι επιβαρυντικό όσον αφορά την ποιότητα της επιφάνειας αυτής. Αντίστοιχα, κομμάτια της ψευδόκοψης αποσύρονται μαζί με το απόβλιπτο, γεγονός που δεν έχει όμως κανένα πρακτικό ενδιαφέρον μια και το απόβλιπτο απομακρύνεται στις κατεργασίες κοπής για ανακύκλωση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και διαρκεί για όλη την εξελισσόμενη μηχανουργική κατεργασία κοπής


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


Ψευδόκοψη

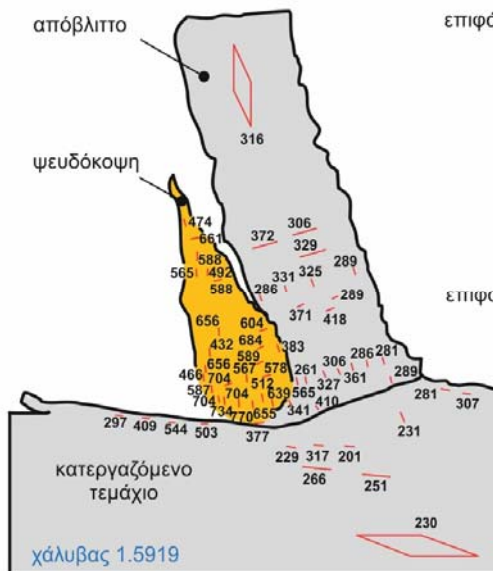


2019-20

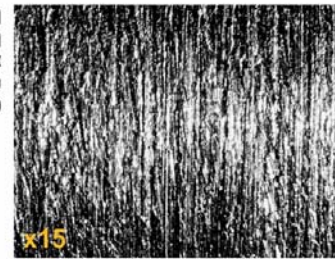


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

20



επιφάνεια με ψευδόκοψη σε αποπεράτωση με τρνάρισμα τεμαχίου από χάλυβα 1.7030



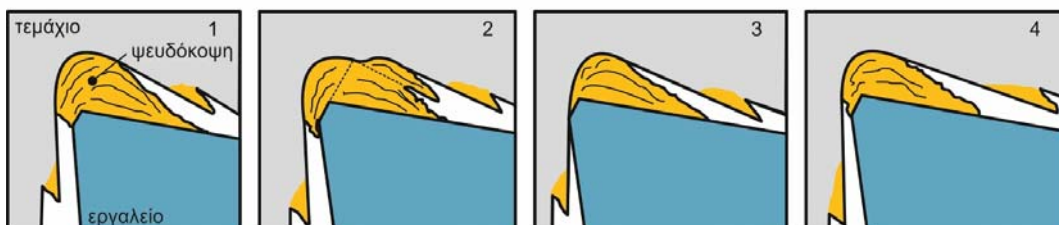
επιφάνεια με ψευδόκοψη σε αποπεράτωση με φραιζάρισμα τεμαχίου από χάλυβα 1.0453

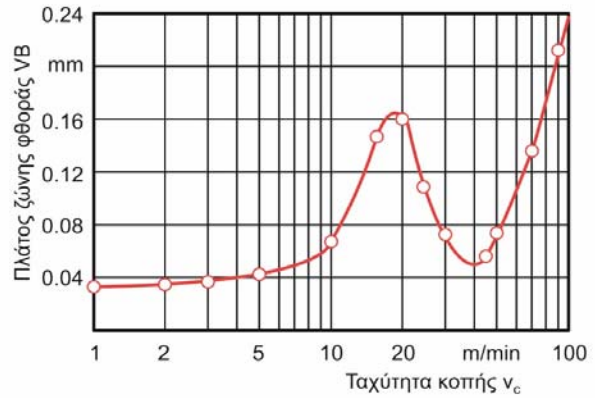
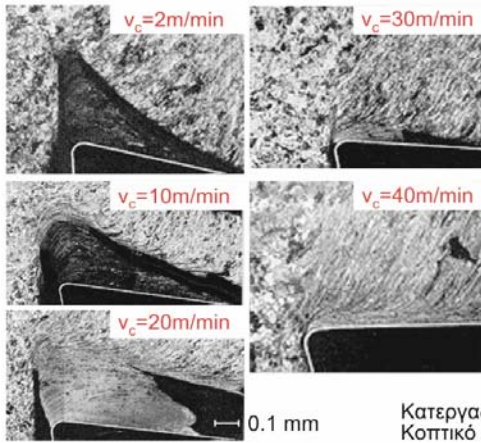


από Metcut Research Associates, Inc

Συνοπτικά η παρουσία της ψευδόκοπης είναι αρνητική και έχει ως συνέπεια τις παρακάτω επιδράσεις:

- αύξηση της γωνίας αποβλίπτου μια και η κοπή πλέον πραγματοποιείται με την ψευδόκοψη και όχι με την κόψη του εργαλείου,
- μείωση της επιφάνειας επαφής εργαλείου - αποβλίπτου,
- επιδείνωση της ποιότητας της νεοκατεργασμένης επιφάνειας,
- διαφοροποίηση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων της νεοκατεργασμένης επιφάνειας,
- διαφοροποίηση στις προβλεπόμενες από τον κατασκευαστή ανοχές διαστάσεων και μορφής στο κατεργασμένο τεμάχιο,
- αύξηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου μέσω του φαινομένου της απόξεσης,
- ενίσχυση των ταλαντώσεων στους παράγοντες της κοπής.





Κατεργαζόμενο τεμάχιο Ck53N, χρόνος κοπής 30min, Κοπτικό εργαλείο P30 με γωνία αποβλίπτου 10° και γωνία ελευθερίας 8°

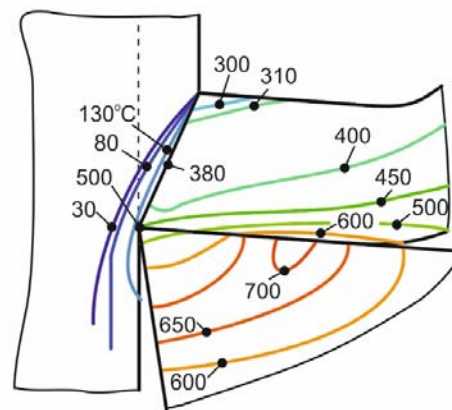
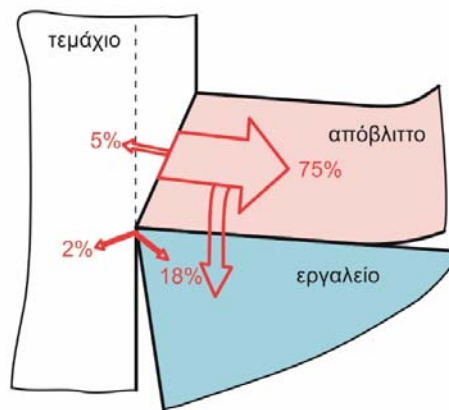
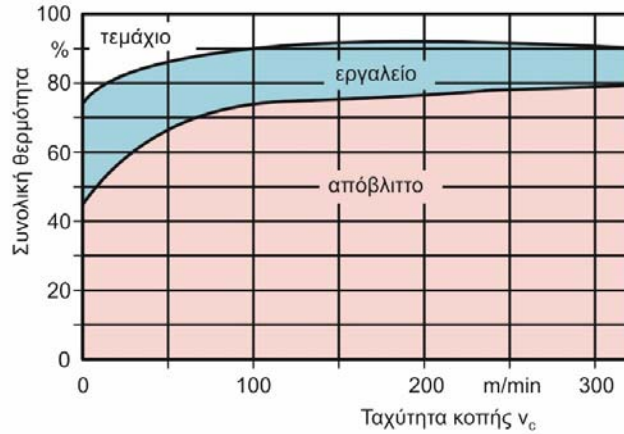
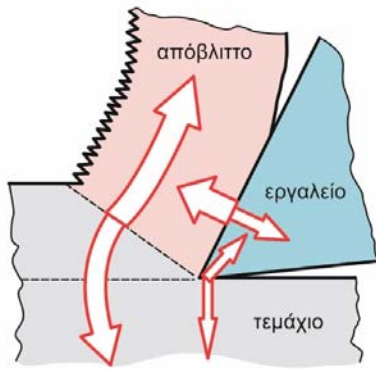
Από το σχήμα γίνεται φανερό πως το πλάτος ζώνης φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας, αλλά παρουσιάζεται μια περιοχή (στην περίπτωση του σχήματος ανάμεσα στα 18m/min και 40m/min) όπου η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε ελάττωση της παρουσίας της ψευδόκοψης και αντίστοιχα μείωση του πλάτους ζώνης φθοράς. Όπως διακρίνεται στην κάτω αριστερή φωτογραφία, η ψευδόκοψη στην περίπτωση αυτή δεν υπερβαίνει σε μέγεθος κάποια δέκατα του χιλιοστού. Σε ταχύτητα μεγαλύτερη από 30m/min, η ψευδόκοψη δεν προλαβαίνει να δημιουργηθεί και η επίδρασή της στη φθορά παύει να υφίσταται.



Η **ενέργεια** που απαιτείται για την κοπή των μετάλλων προσφέρεται από τις αντίστοιχες εργαλειομηχανές στις οποίες υλοποιούνται οι κατεργασίες. Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια κατεργασία κοπής, καταναλώνεται σε δύο βασικά περιοχές, στη **ζώνη διάτμησης** και στη **ζώνη τριβής εργαλείου και αποβλίπτου**. Πολλή λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται στη θέση τριβής της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου και της κατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου και αυτό στις περιπτώσεις που το κοπτικό εργαλείο δεν είναι αρκούντως οξύ.

Σε αυτές τις τρεις περιοχές ανάλωσης ενέργειας, το κατεργαζόμενο υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, η ενέργεια της πλαστικής παραμόρφωσης μετατρέπεται σε θερμότητα και οι τρεις περιοχές αντίστοιχα σε πηγές έκλυσης θερμότητας. Η παραγόμενη θερμότητα στη ζώνη διάτμησης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή αυτή καθώς και τη μεταφορά της θερμότητας προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το απόβλιπτο. Αντίστοιχα, η παραγόμενη θερμότητα στη ζώνη τριβής εργαλείου και αποβλίπτου, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή αυτή, καθώς και τη μεταφορά της θερμότητας προς το απόβλιπτο και το κοπτικό εργαλείο.

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την κοπή, παράγεται κατά κύριο λόγο στη ζώνη διάτμησης και κυμαίνεται σε ποσοστό 65% έως 80%. Η υπόλοιπη θερμότητα παράγεται στη ζώνη τριβής του αποβλίπτου πάνω στο κοπτικό εργαλείο, αλλά και στη θέση που εφάπτεται η ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου με το τεμάχιο



χάλυβας $R_m=850\text{daN/mm}^2$, HM P20, $v_c=60\text{m/min}$, $t=0.32\text{mm}$, $\gamma=10^\circ$

Το απόβλιττο που δέχεται το μεγαλύτερο ποσό της θερμότητας κινείται και αποσύρεται γρήγορα από την κοπή, ενώ το κοπτικό εργαλείο που δέχεται πολύ μικρότερο ποσό θερμότητας, συνεχίζει να παραμένει στην κοπή, δέχεται έτσι συνεχώς θερμότητα για όσο χρόνο διαρκεί η κοπή, ανεβάζοντας τη θερμοκρασία του. Στο σχήμα φαίνεται ακριβώς το αποτέλεσμα αυτής της συνεχούς συμμετοχής του εργαλείου στην κοπή, όπου **οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κοπτικό εργαλείο είναι πιο υψηλές** από τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο απόβλιττο ή στο τεμάχιο.