

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



Δρ. Αριστομένης Αντωνιάδης
Δρ. Νικόλαος Μπιλάλης
Δρ. Παύλος Κουλουριδάκης

Μπικιάκης Μιχαήλ

Πολυτεχνείο Κρήτης – Χανιά 2022

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



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

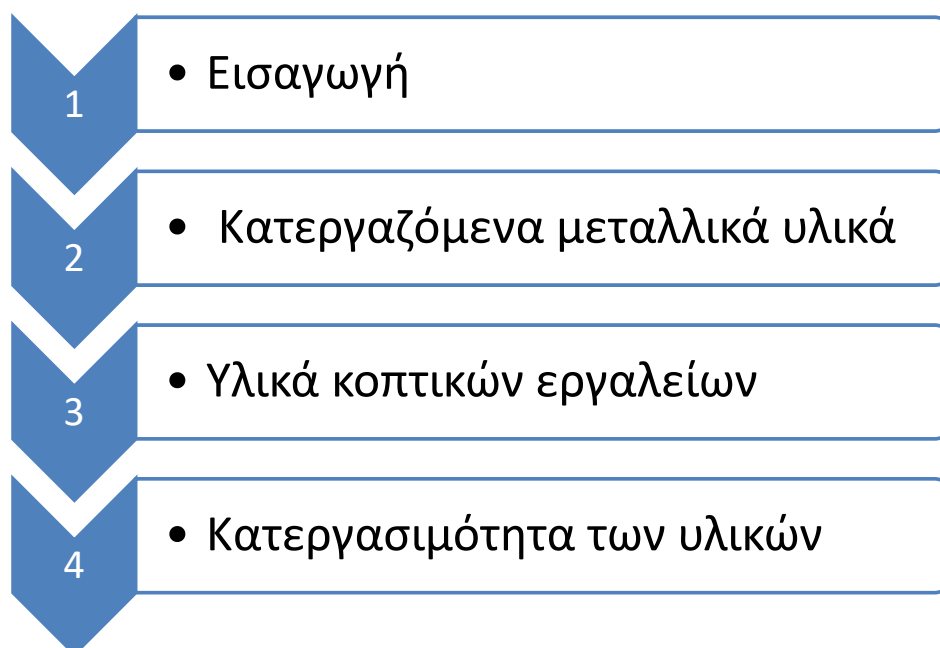


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Μιχαήλ Μπικιάκης

2

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



2022



Περιεχόμενα παρουσίασης

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



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

Μιχαήλ Μπικιάκης

Στόχος της εργασίας

- Καταγραφή των ευρέως χρησιμοποιούμενων κατεργαζόμενων μεταλλικών υλικών και υλικών κοπτικών εργαλείων
- Ανάλυση της κατεργασιμότητας τους κατά την τόννευση
- Παρουσίαση βέλτιστων συνθηκών τόννευσης
 1. Ταχύτητα κοπής
 2. Βάθος κοπής
 3. Πρόωση
 4. Τρόπος ψύξης



2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



Εισαγωγή I

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


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

Μιχαήλ Μπικιάκης

Ορισμός Κατεργασιμότητας



Καλή-Κατεργασιμότητα είναι όρος που εμπεριέχει τα στοιχεία εκείνα που θα συνδράμουν σε μία κατεργασία που χαρακτηρίζεται από:

1. Συνεχόμενη και ανενόχλητη κοπή
2. «Δίκαιη» διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου
3. Επιθυμητή ποιότητα επιφανείας κατεργασμένου τεμαχίου

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



Εισαγωγή II

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


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

Μιχαήλ Μπικιάκης

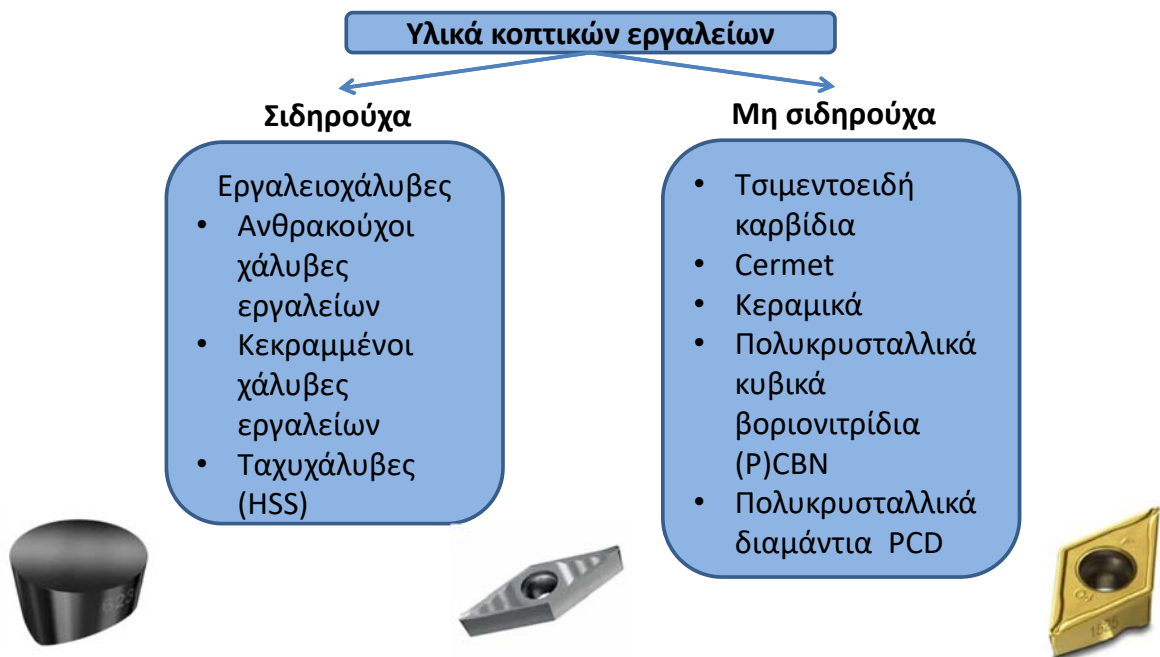
Κατεργαζόμενα μεταλλικά υλικά

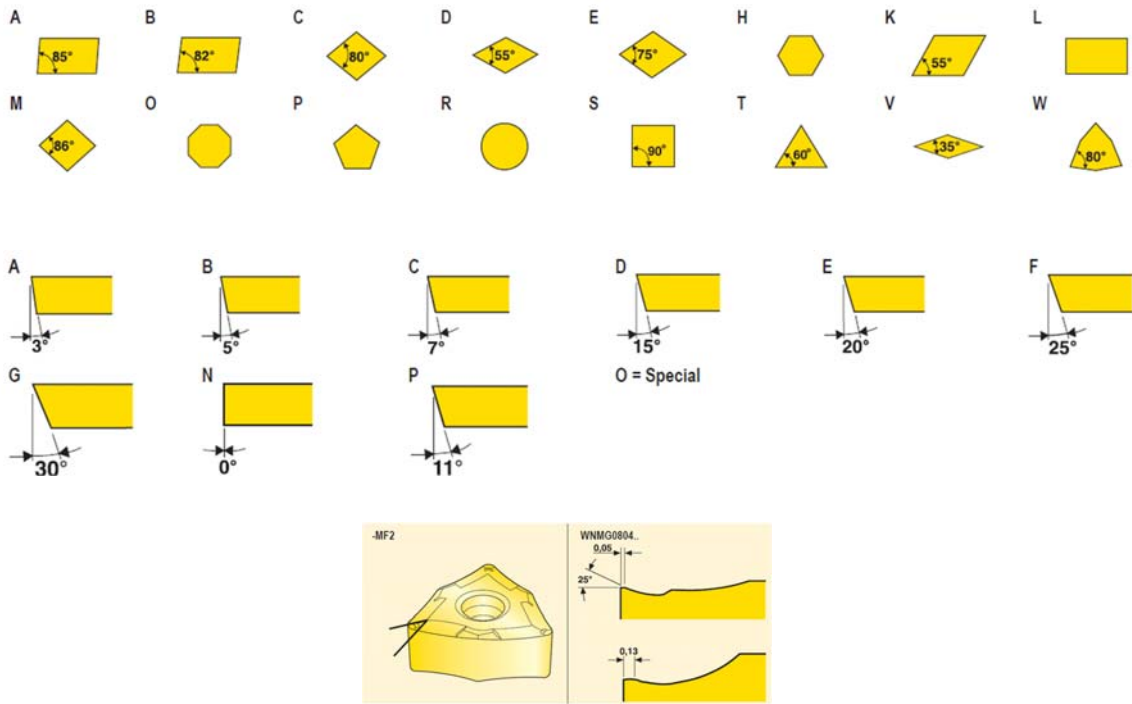
<p>P</p>  <p>Χάλυβες</p>	<p>M</p>  <p>Ανοξείδωτοι χάλυβες</p>	<p>K</p>  <p>Χυτοσίδηροι</p>
<p>N</p>  <p>Μη σιδηρούχα μέταλλα</p>	<p>S</p>  <p>Υπέρ κράματα-Τιτάνιο</p>	<p>H</p>  <p>Υπέρσκληρα Υλικά</p>

- Κατάταξη ευρέως χρησιμοποιούμενων μεταλλικών υλικών κατά ISO 513



Υλικά κοπτικών εργαλείων





2022



Σχήματα-Είδη κοπτικών εργαλείων

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Μιχαήλ Μπικιάκης

Χάλυβες

Οι χάλυβες είναι κράματα σιδήρου-άνθρακα και πρόκειται για το πιο δημοφιλές προς κατεργασία υλικό

Η κατεργασιμότητα τους ποικίλει ανάλογα με τα στοιχεία κραμάτωσης και τις θερμικές κατεργασίες των τεμαχίων

Γενικά όσο αυξάνετε η αντοχή τους τόσο δυσκολότερη γίνεται η κατεργασιμότητα τους

Οι χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα παράγουν μεγαλύτερο απόβλητο

- Χαρακτηρίζεται ως κολλώδες υλικό κατά την κατεργασία
- Εύκολος και ομαλός έλεγχος αποβλήτου
- Προτιμώνται αιχμηρές ακμές κοπτικών
- Περιορισμένο εύρος δυνάμεων κοπής μεταξύ διαφορετικών χαλύβων



2022



Κατεργασιμότητα ISO P

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Μιχαήλ Μπικιάκης

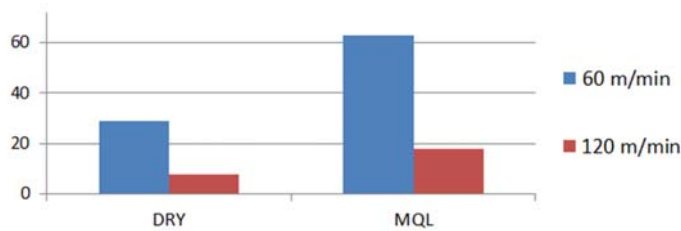
Απλός χάλυβας κοπής 11 SMn 30 και κραματοποιημένος χάλυβας 42 CrMo 4

Χάλυβες	C	Si	Mn	P	S	Cr	H
11 SMn 30	<0.014	≤0.05	0.9-1.3	<0.11	0.27-0.33	-	-
42 CrMo 4	0.4	0.23	0.85	0.02	-	1.01	1.4

Για την κοπή του 11 SMn 30 με κοπτικό από τιμμεντοειδές καρβίδιο επικάλυψης CVD προέκυψαν τα παρακάτω βέλτιστα δεδομένα κοπής:

Βέλτιστες συνθήκες	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)	Ra (μm)	MRR (cm^3/min)
	240	0.1	1.5	1.9	32.16

Ενώ για την τόνρευση του 42 CrMo 4 μελετήθηκε η χρήση MQL για αύξηση της διάρκειας ζωής του κοπτικού πλακιδίου τριτλής επικάλυψης CVD



Χάλυβες	Σκληρότητα
11 SMn 30	107-169 HB
42CrMo4	290 HB

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



Χάλυβες - 11 SMn 30 & 42 CrMo 4

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


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

Μιχαήλ Μπικιάκης

Ανοξειδωτοι Χάλυβες

Είναι κράματα χαλύβων με τουλάχιστον 10.5% περιεκτικότητα χρωμίου με την ύπαρξη ή μη άλλων στοιχείων κραμάτωσης

Είναι γνωστοί για την αντίσταση σε οξείδωση η οποία αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας τους σε Cr

Το Ni και το Mo αυξάνουν επιπλέον την αντίσταση σε οξείδωση.

- Συνεχές απόβλητο
- Σκληρύνσεις επιφανείας λόγω της θερμότητας της ζώνης κοπής
- Καλύτερη κατεργασιμότητα για υλικά με υψηλή περιεκτικότητα Si
- Χειρότερη κατεργασιμότητα για υλικά με υψηλή περιεκτικότητα N



2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



Κατεργασιμότητα ISO M

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


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

Μιχαήλ Μπικιάκης

Αν. Χάλυβες	Cr	Mn	Si	Ni	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Μέτρο ελαστικότητας
1.4372	16	6,5	-	4	85 HB	~690MPa	197 GPa
1.4548	17.5	1	1	5	110 HB	~1000MPa	~200 GPa

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την εύρεση των παραμέτρων τόνρευσης που δίνουν τις μικρότερες δυνάμεις κοπής στον 1.4372 διαπιστώθηκε:

Μικρότερες δυνάμεις κοπής παρουσιάζονται για

1. Ταχύτητα κοπής $V_c \sim 100$ m/min
2. Πρόωση $f \sim 0.14$ (mm/rev)

Το μικρότερο βάθος κοπής καθώς και η μικρότερη διάμετρος του δοκιμίου δίνουν επίσης μικρότερες δυνάμεις κοπής.

Για τόνρευση με τιμεντοειδές καρβίδιο επικάλυψης PVD του 1.4548 προέκυψαν τα παρακάτω βέλτιστα δεδομένα (MRR, V_c , Ra) και παρατηρήσεις:

Βέλτιστες συνθήκες	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)
	132	0.048	0.2

- Η Ra και ο MRR παρουσίασαν αύξηση κατά την αύξηση της V_c , της F του και A_p
- Η χρήση cryogenic coolant μειώνει την θερμοκρασία κοπής και αυξάνει την σημαντικά κατεργασιμότητα

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



Χυτοσίδηροι

Παραδοσιακά επεξεργάζονται δίχως χρήση ψυκτικού υγρού

Σε αντίθεση με τους χάλυβες η κατεργασιμότητα του σιδήρου ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής του

Συχνά κατεργάζονται με κοπτικά αρνητικού τύπου

Τα υποστρώματα των κοπτικών καρβιδίων πρέπει να είναι σκληρά και οι επικαλύψεις πρέπει να είναι από παχύ τύπο οξειδίου του αλουμινίου

- Μη συνεχές, μικρού μήκους απόβλητο
- Εύκολα διαχειρίσιμο απόβλητο
- Μικρότερες τιμές K_c σε σχέση με τα προηγούμενα υλικά
- Στους χυτοσιδήρους με εγκλείσματα άμμου δημιουργείται στο εργαλείο επιπλέον φθορά λόγω της τραχύτητας επιφανείας



2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



Φαιός χυτοσίδηρος EN-GJL-250 και ανοπτημένος όγκιμος σίδηρος EN-GJS-1200-2

Φαιός χυτοσίδηρος (GCI)	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού
EN-GJL-250	180-240 HB	250MPa
EN-GJS-1200-2	388 HB	1200MPa

Για την κοπή του EN-GJL-250 έγινε χρήση πλακιδίου CBN με επικάλυψη TiN/PVD. Τα βέλτιστα δεδομένα κατεργασίας για Max MRR και Min Ra παρουσιάζονται εδώ:

B. συνθήκες	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)	Ra (μ m)	MRR (cm^3/min)
Max MRR	546	0.2	0.9	1.988	95.65
Min Ra	522	0.08	0.9	0.796	39.85

Στην τόνρευση EN-GJS-1200-2 με χρήση συμβατικού καρβιδίου βολφραμίου χωρίς επικάλυψη παρατηρούνται τα παρακάτω βέλτιστα δεδομένα (Max MRR και Min Ra) και παρατηρήσεις

B. συνθήκες	V_c (m/min)	F (mm/rev)	A_p (mm)
Max MRR	94.2	0.5	0.159
Min Ra	145.1	1	0.051

- Για Max MRR, η πρόωση έχει το μεγαλύτερο αντίκτυπο της τάξης του 70.32%
- Για Min Ra, η ταχύτητα κοπής είχε τον μεγαλύτερο αντίκτυπο με ποσοστό 56.45%

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



Σίδηροι EN-GJL-250 & EN-GJS-1200-2

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Μιχαήλ Μπικάκης

Μη σιδηρούχα μέταλλα

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται το αλουμίνιο ο χαλκός ο ορείχαλκος και ο ψευδάργυρος. Επίσης κράματα και συνθετικά του αλουμινίου.

Οι μηχανικές τους ιδιότητες, η κατεργασιμότητα, καθώς και το κόστος τους διαφέρει από τα σιδηρούχα υλικά

Έχουν στην πλειοψηφία τους μικρότερη αντοχή από τους χάλυβες ωστόσο μπορούν να κατεργαστούν πιο εύκολα γρήγορα και οικονομικά

- Αλουμίνιο : Ελαφρύ, οικονομικό στην κατεργασία
- Χαλκός-Ορείχαλκος : Εμφανίζουν μεγάλη κατεργασιμότητα
- Ψευδάργυρος: Αντοχή σε διάβρωση
- Κράματα αλουμινίου : Ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες



2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



Κατεργασιμότητα ISO N

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Μιχαήλ Μπικάκης

Κράμα αλουμινίου 7075 και συνθετικό MMC με κράμα αλουμινίου 7075

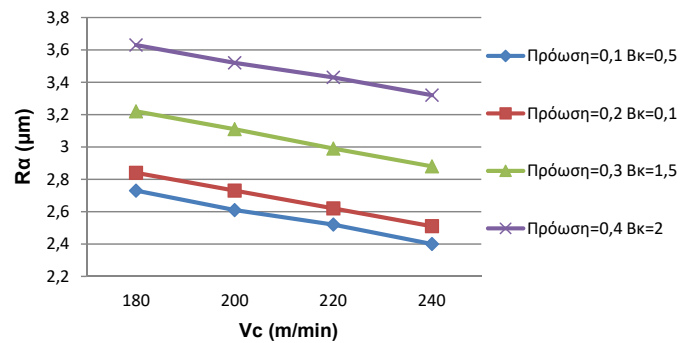
Κράμα αλουμινίου	Cu	Mg	Cr	Zn	Al	Other	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού
7075	1.2-2	2.1-2	~0.2	5.1-6.1	Bal	<2	158 HB	572MPa

* MMC 7075 Al alloy + 10% (wt%) SiC

Σε συγκριτική έρευνα για τόννευση του 7075 και του MMC χρησιμοποιήθηκε κοπτικό PCD χωρίς επικάλυψη και τσιμεντοειδές καρβίδιο με επικάλυψη TiN/CVD. Μετρήθηκαν η τραχύτητα επιφανείας Ra και η πλευρική φθορά κοπτικού VBC. Προκύπτουν τα παρακάτω:

1. Καλύτερη κατεργασιμότητα και για τα δυο υλικά με χρήση PCD έναντι του καρβιδίου
2. Η φθορά και των δύο κοπτικών είναι μικρότερη κατά την τόννευση του κράματος σε σύγκριση με την τόννευση του συνθετικού
3. Καλύτερες τιμές τραχύτητας επιφανείας για μεγάλες ταχύτητες κοπής $V_c \sim 240$ m/min
4. Κατά την τόννευση του συνθετικού, το καρβίδιο παρουσίαζε διάρκεια ζωής μικρότερη των 7 λεπτών

Τραχύτητα επιφανείας ανά Ταχύτητα κοπής PCD-7075 Al alloy



2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



Κράμα αλουμινίου 7075 και MCC

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



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

Μιχαήλ Μπικάκης

Υπέρ κράματα-Τιτάνιο

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται τα HRSA κράματα με βάση το νικέλιο, το κοβάλτιο και τον σίδηρο. Επιπλέον το Τιτάνιο και τα κράματα τιτανίου.

Τα (HRSA) είναι μία ομάδα υλικών τα οποία εμφανίζουν εξαιρετική αντοχή και αντίσταση φθοράς ακόμα και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες

Λόγω της ικανότητας αυτών των κραμάτων να αποδίδουν κοντά στο σημείο τήξης των βασικών τους μετάλλων, η κατεργασιμότητα τους ποικίλει αλλά χαρακτηρίζεται ως μικρή

Το τιτάνιο είναι ένα από τα πιο ελαφριά μεταλλικά στοιχεία ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και αντίσταση στην φθορά

- Μη συνεχές απόβλητο
- Δύσκολη διαχείριση του αποβλήτου
- Μεγάλες δυνάμεις κοπής και ανάγκη για μεγάλη ισχύ
- Παραμένουσα θερμοκρασία στην ζώνη κοπής



2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



Κατεργασιμότητα ISO S

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



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

Μιχαήλ Μπικάκης

HRSA με βάση το κοβάλτιο Stellite® alloy 6 και HRSA με βάση τον σίδηρο Incoloy 800

HRSA	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Σημείο τήξης
Stellite® alloy 6	~373HB	970MPa	~1300°C
Incoloy 800	271 HB	600-1000MPa	~1385°C

Για την τόνρευση του Stellite alloy 6 με κοπτικό CBN επικάλυψης PVD (Ti,Al) και αξιολόγηση των δυνάμεων κοπής, της καταναλωμένης ισχύς, του MRR και της Ra προκύπτουν τα παρακάτω βέλτιστα δεδομένα κατεργασιμότητας:

B. Συνθήκες	r (mm)	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)
Max MRR	0.6	80	0.160	0.45
Min Ra	0.67	80	0.083	0.45

1. Για την καταναλωμένη ισχύ P_c οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι η ταχύτητα κοπής V_c και το βάθος κοπής Ap
2. Η ακτίνα κοπής του κοπτικού εργαλείου r δεν επηρεάζει την καταναλωμένη ισχύ P_c

Στην περίπτωση του Incoloy 800 για τόνρευση με καρβίδιο χωρίς επικάλυψη σε 4 διαφορετικές συνθήκες ψύξης παρατηρήθηκαν τα παρακάτω *(DRY, MQL1, MQL2, Flood)

- Τα τσιμεντοειδή καρβίδια δεν παρουσίασαν πρόωρες αστοχίες σε καμία περίπτωση με τιμές του VB_c < 0.3mm σε όλες τις περιπτώσεις
- Η χρήση της MQL2 έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ενώ η DRY σε σχέση με τις άλλες τεχνικές ήταν η χειρότερη

B. Συνθήκες	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)
Incoloy 800	40	0.033	0.75

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



HRSA Stellite® alloy 6 & Incoloy 800

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


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

Μιχαήλ Μπικάκης

Κράμα Τιτανίου Ti-6Al-4V

Κράμα Τιτανίου	Ti	Al	V	Fe	Others	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Σημείο τήξης
Ti-6Al-4V	87.6-91	5.5-6.75	3.5-4.5	<0.4	<0.3	277HB	1130MPa	1674°C

Σε δύο παρεμφερείς έρευνες τόνρευσης του Ti-6Al-4V με χρήση καρβιδίων πολλαπλής επικάλυψης CVD Ti (C,N) + Al₂O₃ + Ti βρέθηκαν τα παρακάτω:

B. Συνθήκες	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)	Ra (μm)	MRR (mm ³ /min)	Chip Thickness (mm)
1	62,83	0.06	0.3	2.432	30.12	0.340
2	45	0.05	0.5	-	-	-

1. Το βάθος κοπής είναι το βασικό στοιχείο ως προς την απόδοση της κατεργασίας
2. Τα περισσότερα απόβλητα είναι συνεχή και μεγάλου μήκους
3. Το απόβλητο αλλάζει σημαντικά σε μεγάλη ταχύτητα κοπής

Σε τρίτη έρευνα για την τόνρευση του Ti-6Al-4V, μελετήθηκε η χρήση cryogenic cooling και προέκυψε σε σύγκριση με απλή υγρή ψύξη:

1. 125% μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κοπτικού
2. 23.4% μείωση κατανάλωσης ενέργειας
3. 22.1% μείωση τιμών τραχύτητας επιφανείας
4. 27% μείωση κόστους
5. 22% μείωση εκπομπών άνθρακα

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόνρευση



Κράμα Τιτανίου Ti-6Al-4V

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


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

Μιχαήλ Μπικάκης

Υπέρσκληρα υλικά

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι σκληρυμένοι χάλυβες με σκληρότητα > 419–745 HB και οι σκληροί τύποι χυτοσιδήρου ~ 400-600 HB

Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να βρεθούν και υλικά της κατηγορίας ISO P όταν αυτά υποστούν θερμική κατεργασία που αυξάνει τις μηχανικές τους ιδιότητες

Για τις μηχανικές κατεργασίες η κατηγορία ISO H είναι η λιγότερο δημοφιλής

Τα προτερήματά τους είναι η μεγάλη αντοχή στην φθορά και στην τριβή, κατά συνεχείς καταπονήσεις

- Πολύ δύσκολα προς κατεργασία
- Παράγουν πολύ μεγάλο ποσό θερμότητας κατά την κοπή
- Φθείρουν πολύ την κοπτική ακμή
- Ο έλεγχος αποβλήτου δεν είναι υπέρμετρα δύσκολος
- Απαιτούνται υψηλές δυνάμεις κοπής και ισχύς για την τόννευση τους



2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



Κατεργασιμότητα ISO H

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


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

Μιχαήλ Μπικάκης

Χάλυβας εδράνων κύλισης 100Cr6

Σκληρυμένος χάλυβας	Cr	C	Mn	Si	Others	Σκληρότητα	Αντοχή εφελκυσμού	Σημείο τήξης
100Cr6	1.35 - 1.65	0.9-1.05	0.25 - 0.45	0.15- 0.35	<0.7	~700HB	830-1470MPa	1424°C

Σε έρευνα για τις συνθήκες τόννευσης του 100Cr6 έγινε χρήση τριγωνικών κοπτικών πλακιδίων (Sandwik (Al₂O₃), (whisker), (PCBN) και De Beers (PCBN)) και προέκυψαν τα παρακάτω:

Βέλτιστες συνθήκες	V _c (m/min)	F (mm/rev)	Ap (mm)
Μέγιστη Δ. ζωής εργαλείου	100	0.06	0.25
Min Ra	116-130	0.06-0.09	-

1. Τα PCBN κοπτικά παρέχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ότι τα κεραμικά
2. Η V_c επηρεάζει την διάρκεια ζωής
3. Η F επηρεάζει την Ra
4. Το (whisker) δεν είναι κατάλληλο για την κατεργασία

Σε παρεμφερή έρευνα τόννευσης του 100Cr6 με PCBN με, και χωρίς επικάλυψη TiN και TiAlN παρατηρήθηκε ότι :

- τα κοπτικά χωρίς επικάλυψη παρουσίασαν ίδιες φθορές κρατήρα σε σύγκριση με τα επικαλυμμένα
- Τα κοπτικά με τεχνολογία γρεζοθραυστών είχαν μικρότερη διάρκεια ζωής

2022

Κατεργασιμότητα μεταλλικών υλικών κατά την τόννευση



Σκληρυμένος χάλυβας 100Cr6

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


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

Μιχαήλ Μπικάκης

Ευχαριστώ για την προσοχή σας

Ερωτήσεις;



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



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

Μιχαήλ Μπικιάκης