



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΤΟΡΝΕΥΣΗ  
ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΗΤΡΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ  
ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ**

**ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

Αθήνα, Ιούλιος 2018



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
**Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών**

**Διπλωματική Εργασία**

Έλεγχος κατεργασιμότητας σε τórνευση νανοσύνθετων  
υλικών μήτρας αλουμινίου με ενίσχυση νανοδομών  
γραφενίου

Turning machinability of graphene nanoplatelets aluminum  
matrix nanocomposite materials.

**ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

Αθήνα, Ιούλιος 2018

# Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Με την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν σε αυτήν.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη βοήθεια του , καθώς και τον Διδάκτορα κ. Γεώργιο Σερέτη για την άψογη συνεργασία, την πολύτιμη βοήθεια του και τη συνεχή καθοδήγηση απο την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωση αυτής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υπ. Διδάκτορα κ. Ιωάννη Παπαντωνίου για την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια της торνευσης και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Επίσης, ευχαριστώ θερμά το τεχνικό προσωπικό του Τομέα κους Κερασιώτη Κωνσταντίνο και Μελισσά Νικόλαο για τη σημαντικότερη συμβολή τους, τόσο στην προετοιμασία, όσο και στην εκτέλεση των πειραματικών διαδικασιών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και φίλη μου, Σταυρούλα Σταματοπούλου, για τη στήριξη και τη βοήθεια τους όλα αυτά τα χρόνια.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον έλεγχο της κατεργασιμότητας σε τόννευση νανοσύνθετων υλικών μήτρας αλουμινίου με ενίσχυση νανοδομών γραφενίου (Graphene nanoplatelets – GNPs). Η ενσωμάτωση των νανοδομών γραφενίου στο αλουμίνιο πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της ελεύθερης χύτευσης με ανάδευση σε θερμοκρασία καλουπιού 100°C. Η προσθήκη των GNPs έγινε σε περιεκτικότητες 0.10% w.t., 0.20% w.t., 0.30% w.t., 0.40% w.t. και 0.50% w.t. Στα προκύπτοντα κυλινδρικά δοκίμια πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες διαμορφώσεις ώστε να πραγματοποιηθούν τα πειράματα στις επιλεγμένες συνθήκες κοπής.

Όσον αφορά την τόννευση, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi και μέσω αυτής δημιουργήθηκε ο πίνακας με τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Έτσι προέκυψαν οι τιμές της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης των εννέα πειραμάτων. Τα κυλινδρικά τα δοκίμια τριετύθηκαν στο τόρνο CNC. Κατά την διάρκεια της τόννευσης μετρήθηκαν οι δυνάμεις κοπής σε κάθε πείραμα με την βοήθεια του δυναμόμετρου. Στο τέλος κάθε πειράματος συλλέχθηκαν τα απόβλιττα που δημιουργήθηκαν. Κατά την τόννευση εμφανίστηκε έντονα το φαινόμενο της ψευδόκοψης το οποίο οφείλεται στην ολκιμότητα του αλουμινίου. Παρατηρήθηκε αλλαγή την μορφολογίας των αποβλίττων με την αλλαγή την πρόωσης σε όλα τα δοκίμια του πειράματος. Επίσης παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας σε GNPs στα συνεχή απόβλιττα γινόταν εντονότερη η συσπείρωση των κύκλων του αποβλίττου. Στα ασυνεχή απόβλιττα η αύξηση της περιεκτικότητας σε GNPs προκάλεσε τη μείωση του μεγέθους τους. Με την στατιστική ανάλυση (μέθοδος Taguchi) μελετήσαμε την επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στις παραμέτρους της τραχύτητας Ra, Rt και RMS και της κύριας συνιστώσας δύναμης κοπής (Fz). Ακόμα με την ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) βρέθηκαν τα ποσοστά των επιδράσεων. Τέλος με την παλινδρόμηση (Regression) δημιουργήθηκαν θεωρητικά μοντέλα πρόβλεψης και έγινε σύγκριση με τα πειραματικά.

## **Abstract**

The following paper was carried out in order to test the processability of turning nano-reinforced aluminum matrix materials with reinforcement of Graphene nanoplatelets - GNPs. The incorporation of the graphene nanoparticles into aluminum was carried out by the free-molding method with stirring at a mold temperature of 100°C. The addition of GNPs was done at 0.10% wt., 0.20% wt., 0.30% w.t., 0.40% wt. and 0.50% wt. In the resulting cylindrical specimens, the appropriate configurations were carried out to perform the experiments at the selected cutting conditions.

In terms of turning, the Taguchi method was used and through it a table of variables used in the experiments was created. This resulted in the values of the cutting speed, the cutting base and the feed rate of the nine experiments. The cylindrical specimens were turned into the CNC lathe. During the turning process the cutting forces were measured in each experiment with the help of the dynamometer. At the end of each experiment the disposals created were collected. During turning, the phenomenon of built up edge (BUE) was strongly influenced by the ductility of the aluminum. A change in the morphology of the debris was observed by the change of propulsion in all the experiments. It was also observed that with the increase in the GNPs content in the continuous waste the reunification of waste cycles became more intense. In discontinuous waste, the increase in GNPs caused a reduction in their size. With the statistical analysis (Taguchi method) we studied the influence of cutting speed, cutting depth and propulsion on the parameters of roughness Ra, Rt and RMS and the main cutting force component (Fz). We also used the analysis of variance (ANOVA) and the percentage of the effects was found. Finally with regression, theoretical predictive models were created and then they were compared to the experimental ones.

# Πίνακας περιεχομένων

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	1
1. Αργίλιο ή Αλουμίνιο (Aluminum).....	1
1.1. Ιστορική Ανάδρομη Αλουμίνιου .....	2
1.2. Παραγωγή Αλουμίνιου .....	5
1.2.1. Παραγωγή Πρωτόχυτου Αλουμίνιου .....	6
1.2.1.1. Παραγωγή αλουμίνιας (Μέθοδος Bayer).....	6
1.2.1.2. Παραγωγή αλουμίνιου (Μέθοδος Hall-Heroult).....	11
1.2.2. Παραγωγή Δευτερόχυτου Αλουμίνιου.....	15
1.3. Ιδιότητες αλουμινίου .....	17
1.3.1. Φυσικές ιδιότητες.....	18
1.3.2. Μηχανικές ιδιότητες.....	20
1.3.3. Άλλες ιδιότητες του αλουμινίου .....	21
1.4. Τα κράματα του αλουμινίου .....	21
1.4.1. Κύρια κραματικά στοιχεία .....	22
1.5. Σχεδιασμός, Ονοματολογία και εφαρμογές Κραμάτων Αλουμινίου .....	24
1.5.1. Κράματα Διαμόρφωσης (Wrought Alloys).....	24
1.5.2. Τα Κράματα Χύτευσης (Cast Alloys).....	33
1.5.3. Βασικές Κατεργασίες αλουμινίου (κωδικοποίηση) .....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	41
2. Γραφένιο (Graphene).....	41
2.1. Εισαγωγή στον άνθρακα.....	41
2.2. Μορφές του άνθρακα .....	41
2.3. Γραφένιο.....	44
2.3.1. Δομή του γραφενίου.....	45
2.3.2. Μέθοδοι παραγωγής γραφενίου .....	47
2.3.2.1. Μέθοδος μηχανικής αποφλοιώσης (Exfoliation).....	47
2.3.2.2. Επιταξιακή ανάπτυξη πάνω σε καρβίδια πυριτίου.....	48
2.3.2.3. Επιταξιακή ανάπτυξη πάνω σε μεταλλικά υποστρώματα.....	49
2.4. Ιδιότητες γραφενίου.....	49



2.5. Εφαρμογές του Γραφενίου .....	53
2.6. Επίδραση του γραφενίου στο αλουμίνιο .....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	57
3. Κατεργασίες αποβολής υλικού .....	57
3.1. Εισαγωγή στην εννοια της κατεργασιας.....	57
3.2. Η Ταξινόμηση των κατεργασιων.....	57
3.3. Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού .....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	60
4. Μηχανική της κοπής .....	60
4.1. Περιγραφή .....	60
4.2. Κινηματικά στοιχεία της κοπής.....	60
4.3. Είδη κοπής .....	61
4.4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής .....	61
4.5. Συνθήκες κοπής .....	63
4.6. Κινηματική της κοπής .....	63
4.7. Δυνάμεις και ισχύς κοπής.....	64
4.8. Η Θερμότητα στην κοπή .....	65
4.9. Σχηματισμός του αποβλίττου στην κοπή .....	67
4.9.1. Είδη αποβλίττου .....	70
4.9.2. Μικροδομές αποβλίττων .....	71
4.9.3. Ψευδόκοψη.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	75
5. Κοπτικά εργαλεία .....	75
5.1. Περιγραφή .....	75
5.2. Υλικά κοπτικών εργαλείων .....	75
5.3. Επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων .....	77
5.4. Φθορά κοπτικών εργαλείων .....	78
5.5. Διάρκεια ζωής των κοπτικών .....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	82
6. Η κατεργασία της τόννευσης.....	82
6.1. Είδη Τόννευσης .....	82
6.2. Περιγραφή της κατεργασίας τόννευσης και η τυπική γεωμετρία ενός εργαλείου τόννευσης .....	85



6.3.	Συνθήκες κοπής και κύριες διαστάσεις στην κατεργασία της τόννευσης.	85
6.4.	Συμβολισμός και οι επιδράσεις γωνιών κοπής του κοπτικού εργαλείου της τόννευσης.....	87
6.5.	Καταπονήσεις του υλικού κατά την κατεργασία της τόννευσης .....	90
6.6.	Δυνάμεις κοπής και ισχύς κατά την κατεργασία της τόννευσης.....	91
6.7.	Επίδραση της μικροδομής του αποβλίττου επί της δύναμης κοπής.....	92
6.8.	Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας επί της δύναμης κοπής .....	93
6.9.	Επίδραση γωνιών της κοπτικής γεωμετρίας επί των συνιστωσών της δύναμης κοπής .....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	.....	99
7.	Χύτευση .....	99
7.1.	Υλικά και εξοπλισμός χύτευσης.....	99
7.2.	Διαδικασία χύτευσης .....	102
7.3.	Παραχθέντα δοκίμια .....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	.....	104
8.	Τόννευση .....	104
8.1.	Προετοιμασία κυλινδρικών δοκιμίων.....	104
8.2.	Υλικά και εξοπλισμός τόννευσης.....	105
8.3.	Διαδικασία τόννευσης .....	108
8.4.	Παραχθέντα δοκίμια και απόβλιττα .....	110
8.5.	Μέτρηση τραχύτητας.....	111
8.6.	Αποτελέσματα μετρήσεων και παρατηρήσεις στην τόννευση.....	113
8.6.1.	Αποτελέσματα.....	113
8.6.2.	Παρατηρήσεις .....	117
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	.....	127
9.	Στατιστική ανάλυση πειραμάτων.....	127
9.1.	Περιγραφή .....	127
9.2.	Αποτελέσματα και παρατηρήσεις στατιστικής μεθόδου.....	127
9.2.1.	Αλουμίνιο αναφοράς.....	127
9.2.2.	Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,10% (Al – Gr 0,10%).....	139
9.2.3.	Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,20% (Al – Gr 0,20%).....	150
9.2.4.	Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,30% (Al – Gr 0,30%).....	162
9.2.5.	Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,40% (Al – Gr 0,40%).....	174





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

*Έλεγχος κατεργασιμότητας σε τόννευση  
νανοσύνθετων υλικών μήτρας αλουμινίου με  
ενίσχυση νανοδομών γραφενίου*

Διπλωματική Εργασία  
του Παπαδημητρίου  
Δημήτρη

9.2.6. Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,50% (Al – Gr 0,50%).....	186
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	199
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	2044



## Εικόνες

<b>Εικόνα 1.1</b> Το αλουμινιο.....	1
<b>Εικόνα 1.2</b> Το μεταλλικό αλουμίνιο .....	1
<b>Εικόνα 1.3</b> Η στυπτηρία (alum, alumen): είναι η κοινή ονομασία του διπλού θειικού άλατος του καλίου-αργιλίου $KAl(SO_4)_2$ . Η μορφή στην οποία είναι γνωστότερη είναι το ένυδρο άλας $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ Είναι ένα άλας που κυρίως εξάγεται από το βωξίτη. ....	2
<b>Εικόνα 1.4</b> (Αριστερά) Τυπική μορφή βωξίτη, με περιεκτικότητα σε $Al_2O_3$ στην περιοχή 40-60%. Το κοκκινωπό χρώμα του οφείλεται στη σχετικώς μεγάλη περιεκτικότητά του σε $Fe_2O_3$ . (Κέντρο) Εξόρυξη βωξίτη από επιφανειακά στρώματα του πετρώματος σε δασική περιοχή της Τζαμάικας .(Δεξιά) Καθαρό $Al_2O_3$ , αλουμίνα, προϊόν λαμβανόμενο από τον βωξίτη. ....	5
<b>Εικόνα 1.5</b> <b>Διεργασία Bayer</b> (Αριστερά) Βωξίτης. (Κέντρο) Καθαρή αλουμίνα $Al_2O_3$ (Δεξιά) Κόκκινη λάσπη (κυρίως $Fe_2O_3$ ) .....	10
<b>Εικόνα 1.6</b> (Αριστερά) Δείγμα φυσικού κρυσθίου από τη Γροιλανδία (Δεξιά) Τα πρώτα ηλεκτρολυτικά στοιχεία παραγωγής αλουμινίου (εγκαταστάσεις Alcoa, 1889) .....	11
<b>Εικόνα 1.7</b> (Αριστερά) "Προ-ψημένες" άνοδοι από ανθρακούχο μίγμα έτοιμες για χρήση. Το βάρος κάθε ανόδου μπορεί να φθάνει τα 600 έως 800 kg. (Δεξιά) Τεχνικός ανοίγει ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο για να αντικαταστήσει μια άνοδο. ....	13
<b>Εικόνα 1.8</b> Τυπική κατασκευή ηλεκτρολυτικού στοιχείου παραγωγής αλουμινίου. Μεταξύ ανόδων (μπλοκ αγωγίμου άνθρακα) και καθόδου (τήγμένο αλουμίνιο) μεσολαβεί σχετικά λεπτό στρώμα του τήγματος του ηλεκτρολύτη. Η απόσταση ανόδου-καθόδου πρέπει να διατηρείται σταθερή και καθώς φθείρονται οι άνοδοι, η θέση τους αναπροσαρμόζεται αυτόματα. Η απόσταση αυτή (τυπικά 4,5 cm) είναι εξαιρετικά κρίσιμη ως προς την ενεργειακή απόδοση της όλης διαδικασίας, η οποία βρίσκεται υπό τον έλεγχο υπολογιστών, ώστε να εξασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά ποσότητα παραγόμενου αλουμινίου. Η τροφοδοσία του στοιχείου με αλουμίνα είναι συνεχής, ώστε να διατηρείται η περιεκτικότητα του τήγματος σε αλουμίνα σε μια περιοχή 3 έως 4%. Ο μηχανισμός τροφοδοσίας περιλαμβάνει και ένα είδος σφύρας, που σπάει την επιφανειακή κρούστα του τήγματος, ώστε να μπορεί να δεχθεί το τελευταίο τις νέες ποσότητες αλουμίνας. ....	13
<b>Εικόνα 1.9</b> Scrap Αλουμινίου .....	16
<b>Εικόνα 1.10</b> (Αριστερά) Φύλο αλουμινίου για συσκευασία Al 1100 "Αλουμινόχαρτο" (Δεξιά) Καλώδιο αλουμινίου Al 1350 .....	25
<b>Εικόνα 1.11</b> (Αριστερά) Επένδυση με φύλλα αλουμινίου Al 2024 σε αεροσκάφος. (Δεξιά) Βυτίο επικαθήμενο καυσίμων από αλουμίνιο Al 2014. ....	26



<b>Εικόνα 1.12</b> (Αριστερά) Εξωθημένος σωλήνας θερμαντικών σωμάτων αργιλίου για τους αυτοκινητικούς ανταλλάκτες θερμότητας AI 3003 / 3102. (Δεξιά) Τενεκεδάκια των αναψυκτικών από αλουμίνιο AI 3004.....	27
<b>Εικόνα 1.13</b> (Αριστερά) Σφυρήλατο πιστόνι αλουμινίου AI 4032 . (Δεξιά) Ράβδοι συγκόλλησης αλουμινίου AI 4043.....	28
<b>Εικόνα 1.14</b> (Αριστερά) Πλαίσιο σκάφους αλουμινίου AI 5754 . (Δεξιά) Φτερα και καπώ αυτοκινήτου αλουμινίου AI 5252 .....	29
<b>Εικόνα 1.15</b> (Αριστερά) Σκελετός ποδηλάτου αλουμινίου AI 6061 . (Δεξιά) Πεζογέφυρα αλουμινίου AI 6063 .....	30
<b>Εικόνα 1.16</b> (Αριστερά) Σκελετός πτερυγίου αλουμινίου AI7075 . (Δεξιά) Κέντρα ζαντας ποδηλάτου αλουμινίου AI 7475 .....	31
<b>Εικόνα 1.17</b> Κατασκευή Boeing απο κράμα αλουμινίου-λιθίου AI 8090. ....	31
<b>Εικόνα 1.18</b> (Αριστερά) Στήριγμα σωλήνας χυτού αλουμινίου 201.0 . (Δεξιά) Κυλινδροκεφαλή αυτοκινήτου χυτού αλουμινίου 203.0 .....	35
<b>Εικόνα 1.19</b> Ανεμιστήρας χυτού αλουμινίου A380.0 .....	36
<b>Εικόνα 1.20</b> Εξαρτήματα φωτισμού Led χυτού αλουμινίου 413.0 .....	37
<b>Εικόνα 1.21</b> (Αριστερά) Αντλία νερού αυτοκινήτου χυτού αλουμινίου 512.0 . (Δεξιά) Κέλυφος συμπλέκτη αυτοκινήτου χυτού αλουμινίου σειράς 5xx.x .....	38
<b>Εικόνα 1.22</b> (Αριστερά) Εξάρτημα CNC εργαλειομηχανής χυτού αλουμινίου D712.0 . (Δεξιά) Βάση τραπέζιου χυτού αλουμινίου σειράς 7xx.x.....	39
<b>Εικόνα 1.23</b> Μπλοκ κινητήρα αυτοκινήτου χυτού αλουμινίου σειράς 8xx.x.....	39
<b>Εικόνα.2.1</b> (Αριστερά) Το διαμάντι . (Δεξιά) Ο γραφίτης . Στο κάτω μέρος της εικόνας βρίσκονται οι αντίστοιχες κρυσταλλικές δομές. ....	42
<b>Εικόνα 2.2</b> Φουλερένια. (Αριστερά) Μόριο C <sub>60</sub> (Δεξιά) Μόριο C <sub>540</sub> .....	43
<b>Εικόνα 2.3</b> (Αριστερά) Single Wall Nanotubes SWNT . (Δεξιά) Multi Wall Nanotubes MWNT.....	43
<b>Εικόνα 2.4</b> Διάφορα σταθερά nanobuds άνθρακα .....	44
<b>Εικόνα 2.5</b> (Αριστερά) Το γραφένιο τυλίγεται δημιουργώντας φουλερένιο (0D). (Κέντρο) Το γραφένιο διπλώνεται δημιουργώντας νανοσωλήνα άνθρακα (1D) (Δεξιά) Το γραφένιο στοιβάζεται δημιουργώντας γραφίτη (3D) .....	44
<b>Εικόνα 2.6</b> Οι δεσμοί $sp^2$ (γκρι απόχρωση) που δημιουργούν τα γειτονικά άτομα άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του γραφενίου και τα τροχιακά $2p_z$ στα οποία κινείται το τέταρτο ηλεκτρόνιο κάθε ατόμου άνθρακα. ....	45
<b>Εικόνα 2.7</b> Τα υποπλέγματα A και B του κρυσταλλικού πλέγματος του γραφενίου και η μονάδα εξαγωνικού κελιού.....	46
<b>Εικόνα 2.8</b> (Αριστερά) Atomic Force Microscopy-AFM. (Κέντρο) Transmission Electron Microscopy-TEM . (Δεξιά) Scanning Electron Microscope-SEM. ....	46
<b>Εικόνα 2.9</b> Κυματισμοί στην επιφάνεια του μονοστρωματικού γραφενίου. ....	47
<b>Εικόνα 2.10</b> Η κολλητική ταινία από την οποία απομονώθηκαν μονοστρωματικά φύλλα γραφενίου για πρώτη φορά το 2004. ....	48
<b>Εικόνα 2.11</b> Η Αμφιπολικό ηλεκτρικό πεδίο και βαλλιστική μεταφορά φορέων αγωγιμότητας στο γραφένιο.....	50



<b>Εικόνα 2.12</b> Οι ζώνες σθένους (πράσινο χρώμα) και αγωγιμότητας (μωβ χρώμα) και τα σημεία Dirac που αντιστοιχούν στις έξι γωνίες της ζώνης Brillouin στο γραφένιο. Όπως παρατηρείται οι ενεργειακές ζώνες είναι συνημιτονοειδής και εφάπτονται στα σημεία Dirac δημιουργώντας κωνικές τομές του ενεργειακού φάσματος για $E = eV$	51
<b>Εικόνα 2.13</b> Το ποσοστό διέλευσης του λευκού φωτός συναρτήσει της απόστασης.	52
<b>Εικόνα 2.14</b> Μέτρηση της ελαστικής σταθεράς και του μέτρου ελαστικότητας Young του γραφενίου μέσω του μικροσκοπίου ατομικών δυνάμεων (AFM)	53
<b>Εικόνα 2.15</b> Τεχνολογικές εφαρμογές του γραφενίου.	54
<b>Εικόνα 4.1</b> Βασικοί συντελεστές της κοπής και ο σχηματισμός του αποβλίττου	60
<b>Εικόνα 4.2</b> (Αριστερά) Ορθογωνική κοπή (Δεξιά) Λοξή κοπή	61
<b>Εικόνα 4.3</b> Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής	62
<b>Εικόνα 4.4</b> Οι τρεις ταχύτητες κατά την κοπή	64
<b>Εικόνα 4.5</b> Το σύστημα δυνάμεων που ασκούνται στο απόβλιττο	64
<b>Εικόνα 4.6</b> Ζώνες παραγωγής θερμότητας κατά την κοπή	66
<b>Εικόνα 4.7</b> (Αριστερά) Τυπική ποσοστιαία διανομή της παραγόμενης θερμότητας κατά την κοπή (Δεξιά) Κατανομή θερμοκρασιών (σε °C) σε τεμάχιο, κοπτικό εργαλείο και απόβλιττο κατά την κοπή.	67
<b>Εικόνα 4.8</b> Περιοχή δημιουργίας αποβλίττου κατά την κοπή	69
<b>Εικόνα 4.9</b> Είδη αποβλίττου	70
<b>Εικόνα 4.10</b> Χαρακτηριστικές μικροδομές αποβλίττων διαφόρων υλικών	72
<b>Εικόνα 4.11</b> Δημιουργία ψευδοκόψης κατά τη δημιουργία αποβλίττου	73
<b>Εικόνα 4.12</b> Φθορά επιφάνειας ελευθερίας ψευδοκόψης κατά τη δημιουργία αποβλίττου	74
<b>Εικόνα 5.1</b> Απαγωγές θερμότητας κοπής από το τεμάχιο, το απόβλιττο και το ακάλυπτο ή επικαλυμμένο εργαλείο	78
<b>Εικόνα 5.2</b> (Αριστερά) Ανάπτυξη πλευρικής φθοράς στα κοπτικά εργαλεία. (Δεξιά) Απεικόνιση πλευρικής φθοράς.	79
<b>Εικόνα 5.3</b> (Αριστερά) Ανάπτυξη φθοράς κρατήρα στα κοπτικά εργαλεία. (Δεξιά) Απεικόνιση φθοράς κρατήρα.	79
<b>Εικόνα 5.4</b> Απεικόνιση φθοράς λόγω αποκολλήσεων.	80
<b>Εικόνα 5.5</b> Απεικόνιση φθοράς λόγω ψευδοακμής.	80
<b>Εικόνα 6.1</b> Τόννευση	82
<b>Εικόνα 6.2</b> Είδη τόννευσης	83
<b>Εικόνα 6.3</b> Κατάταξη των μεθόδων τόννευσης	84
<b>Εικόνα 6.4</b> (Αριστερά) Θέση του σημείου κατεργασίας στην τόννευση. (Δεξιά) Διεύθυνση πρόωσης στην τόννευση.	84
<b>Εικόνα 6.5</b> Τυπική γεωμετρία κοπτικού εργαλείου τόννευσης	85
<b>Εικόνα 6.6</b> Διαστάσεις απαραμόρφωτου αποβλίττου και κύριες συνθήκες κατεργασίας τόννευσης	87
<b>Εικόνα 6.7</b> Γωνίες κοπτικού εργαλείου τόννευσης	88
<b>Εικόνα 6.8</b> Ενδεικτικές τιμές και επιδράσεις γωνιών κοπής και ακτινών καμπυλότητας	88



<b>Εικόνα 6.9</b> Κατασκευαστική και ενεργός τιμή γωνιών $\alpha$ και $\gamma$ (για απλοποίηση $\gamma=\lambda=0$ ) .....	89
<b>Εικόνα 6.10</b> Πεδίο ισοδύναμων κατά von Mises τάσεων, που δημιουργείται κατά την κοπή, σε χαμηλές ταχύτητες κοπής .....	91
<b>Εικόνα 6.11</b> Δύναμη κοπής και συνιστώσες της σε σύστημα αναφοράς της κινηματικής της κατεργασίας .....	92
<b>Εικόνα 6.12</b> Συνιστώσες δύναμης κοπής και κατανομή των προκαλούμενων μηχανικών φορτίσεων επί της επιφάνειας του αποβλίττου .....	92
<b>Εικόνα 6.13</b> Διακυμάνσεις της δύναμης κοπής σε διάφορες περιπτώσεις μικροδομών του αποβλίττου.....	93
<b>Εικόνα 6.14</b> Επίδραση της ταχυτητας στην κοπή στην διακύμανση των τιμών των συνιστωσών της δύναμης κοπής.....	94
<b>Εικόνα 6.15</b> Εξάρτηση των συνιστωσών της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής ...	95
<b>Εικόνα 6.16</b> Επίδραση του πάχους του απαραμορφώτου αποβλίττου επί των ανηγμένων συνιστωσών της δύναμης κοπής, στο πλάτος του αποβλίττου, σε απλό και διπλό λογαριθμικό διάγραμμα .....	96
<b>Εικόνα 6.17</b> Εξάρτηση των συνιστωσών της δύναμης κοπής από τη γωνία τοποθέτησης $\kappa$ , αποβλίττου $\gamma$ και κλίσης $\lambda$ .....	97
<b>Εικόνα 7.1</b> (Αριστερά) Μπιγιέτα κράματος αλουμινίου 96,83%. (Κέντρο) Νανοδομές γραφενίου (GNPs) . (Δεξιά) Αυτόματο πριόνι. ....	100
<b>Εικόνα 7.2</b> (Αριστερά) Κεραμικό δοχείο. (Κέντρο) Διαιρετό κυλινδρικό καλούπι βαμμένου χάλυβα . (Δεξιά) Εργαστηριακός κλίβανος .....	100
<b>Εικόνα 7.3</b> (Αριστερά) Ηλεκτρονικό θερμόμετρο. (Κέντρο) Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και Γυάλινο δοχείο . (Δεξιά) Νανοδομές γραφενίου (GNPs) .....	100
<b>Εικόνα 7.4</b> (Αριστερά) Δερμάτινη ποδιά. (Κέντρο) Πυρίμαχα γάντια . (Δεξιά) Γάντια latex μη διαπερατά απο νανοσωματίδια .....	101
<b>Εικόνα 7.5</b> (Αριστερά) Μάσκα προστασίας προσώπου. (Κέντρο) Πλαστικά γυαλιά ασφαλείας . (Δεξιά) Μεταλλική λαβίδα .....	102
<b>Εικόνα 7.6</b> Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια .....	103
<b>Εικόνα 8.1</b> (Αριστερά) Τόρνος Optimum D180 x 300 Vario (Δεξιά) Κυλινδρικά δοκίμια ύστερα από την προετοιμασία. ....	104
<b>Εικόνα 8.2</b> Τόρνος CNC Haas LT-1 του εργαστηρίου .....	105
<b>Εικόνα 8.3</b> Διαστάσεις μανέλας MTJNR 2020 K16.....	106
<b>Εικόνα 8.4</b> Μετρητική διάταξη των δυνάμεων κοπής στον τόρνο .....	108
<b>Εικόνα 8.5</b> (Αριστερά) Δυναμόμετρο Kistler KIAG SWISS , Type: 9257A. (Κέντρο) Ενισχυτές Kistler, Type: 5011 . (Δεξιά) Πρόγραμμα LabView διαμορφωμένο για την τόννευση .....	108
<b>Εικόνα 8.6</b> Τοποθετημένο κυλινδρικό δοκίμιο στον CNC τόρνο.....	109
<b>Εικόνα 8.7</b> Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια και απόβλιττα (Αριστερά) Αλουμίνιο αναφοράς (Δεξιά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,10% .....	110
<b>Εικόνα 8.8</b> Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια και απόβλιττα (Αριστερά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,20% (Δεξιά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,30% .....	110



<b>Εικόνα 8.9</b> Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια και απόβλιττα (Αριστερά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,40% (Δεξιά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,50% .....	111
<b>Εικόνα 8.10</b> (Αριστερά) Τραχύμετρο Surtronic 3+ (Δεξιά) Μέτρηση τραχύτητας στο κυλινδρικό δοκίμιο.....	111
<b>Εικόνα 8.11</b> Σχηματική απεικόνιση του Ra .....	112
<b>Εικόνα 8.12</b> Σχηματική απεικόνιση του Rt.....	112
<b>Εικόνα 8.13</b> Σχηματική απεικόνιση του Rq ή RMS .....	112
<b>Εικόνα 8.14</b> Πρόσοψη ψευδοακμής.....	117
<b>Εικόνα 8.15</b> Κάτοψη ψευδοακμής .....	118
<b>Εικόνα 8.16</b> Θραύσματα από τη διάσπαση της ψευδόκοψης .....	118
<b>Εικόνα 8.17</b> Κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου GNPs 0,10% .....	119
<b>Εικόνα 8.18</b> Απόβλιττα αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου GNPs 0,30% ....	120
<b>Εικόνα 8.19</b> Απόβλιττα αλουμινίου αναφοράς $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,75\text{mm}$ $f=0,1\text{mm/rev}$ .....	121
<b>Εικόνα 8.20</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,10% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,75\text{mm}$ $f=0,1\text{mm/rev}$ .....	121
<b>Εικόνα 8.21</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,20% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,75\text{mm}$ $f=0,1\text{mm/rev}$ .....	122
<b>Εικόνα 8.22</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,30% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,75\text{mm}$ $f=0,1\text{mm/rev}$ .....	122
<b>Εικόνα 8.23</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,40% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,75\text{mm}$ $f=0,1\text{mm/rev}$ .....	123
<b>Εικόνα 8.24</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,50% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,75\text{mm}$ $f=0,1\text{mm/rev}$ .....	123
<b>Εικόνα 8.25</b> Απόβλιττα αλουμινίου αναφοράς $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,50\text{mm}$ $f=0,3\text{mm/rev}$ .....	124
<b>Εικόνα 8.26</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,10% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,50\text{mm}$ $f=0,3\text{mm/rev}$ .....	124
<b>Εικόνα 8.27</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,20% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,50\text{mm}$ $f=0,3\text{mm/rev}$ .....	125
<b>Εικόνα 8.28</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,30% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,50\text{mm}$ $f=0,3\text{mm/rev}$ .....	125
<b>Εικόνα 8.29</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,40% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,50\text{mm}$ $f=0,3\text{mm/rev}$ .....	126
<b>Εικόνα 8.30</b> Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,50% $v=120\text{m/min}$ $a_p=0,50\text{mm}$ $f=0,3\text{mm/rev}$ .....	126



## Σχήματα

<b>Σχήμα 1.1</b> Συνοπτικό διάγραμμα της παραγωγής αλουμινίου από βωξίτη όπου συνδυάζει υδρομεταλλουργία (εκχύλιση), πυρομεταλλουργία (φρύξη) και ηλεκτρομεταλλουργία (ηλεκτρόλυση τήγματος).....	6
<b>Σχήμα 1.2</b> Συνοπτικό διάγραμμα της διεργασίας Bayer (παραλαβή αλουμίνιας από βωξίτες). Σε ορισμένες βιομηχανίες παραγωγής αλουμίνιας παραλαμβάνεται και το ιχνοστοιχείο γάλλιο από το ανακυκλούμενο αλκαλικό διάλυμα (Bayer's liquor). .....	7
<b>Σχήμα 1.3</b> Οι απαιτούμενες ποσότητες των διαφόρων υλικών και ενέργειας για την παραγωγή 1 kg αλουμινίου. ....	15
<b>Σχήμα 1.4</b> Συνοπτικό διάγραμμα παραγωγής αλουμινίου .....	17
<b>Σχήμα 8.1</b> Παραδειγμα μετρησης της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής (Fz) .....	113
<b>Σχήμα 9.1</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	128
<b>Σχήμα 9.2</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt. ....	128
<b>Σχήμα 9.3</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	128
<b>Σχήμα 9.4</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg).....	129
<b>Σχήμα 9.5</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	130
<b>Σχήμα 9.6</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	131
<b>Σχήμα 9.7</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra .....	131
<b>Σχήμα 9.7</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Rt .....	132
<b>Σχήμα 9.8</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Rt .....	132
<b>Σχήμα 9.9</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.....	132
<b>Σχήμα 9.10</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	133
<b>Σχήμα 9.11</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	133
<b>Σχήμα 9.12</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS .....	134
<b>Σχήμα 9.13</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην Fz avg.....	134



<b>Σχήμα 9.14</b>	Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην $Fz_{avg}$ .....	135
<b>Σχήμα 9.15</b>	Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην $Fz_{avg}$ .....	135
<b>Σχήμα 9.20</b>	Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $Ra$ .....	139
<b>Σχήμα 9.21</b>	Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $Rt$ .....	140
<b>Σχήμα 9.22</b>	Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	140
<b>Σχήμα 9.23</b>	Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $Fz_{avg}$ ) .....	141
<b>Σχήμα 9.24</b>	Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $Ra$ .....	142
<b>Σχήμα 9.25</b>	Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $Ra$ .....	142
<b>Σχήμα 9.26</b>	Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $Ra$ .....	142
<b>Σχήμα 9.27</b>	Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $Rt$ .....	143
<b>Σχήμα 9.28</b>	Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $Rt$ .....	143
<b>Σχήμα 9.29</b>	Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $Rt$ .....	144
<b>Σχήμα 9.30</b>	Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	144
<b>Σχήμα 9.31</b>	Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	145
<b>Σχήμα 9.32</b>	Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	145
<b>Σχήμα 9.33</b>	Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην $Fz_{avg}$ .....	146
<b>Σχήμα 9.34</b>	Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην $Fz_{avg}$ .....	146
<b>Σχήμα 9.35</b>	Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην $Fz_{avg}$ .....	146
<b>Σχήμα 9.37</b>	Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $Rt$ .....	147
<b>Σχήμα 9.38</b>	Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	148
<b>Σχήμα 9.39</b>	Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $Fz_{avg}$ ) .....	148
<b>Σχήμα 9.40</b>	Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $Ra$ .....	150
<b>Σχήμα 9.41</b>	Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $Rt$ .....	151
<b>Σχήμα 9.42</b>	Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	151





<b>Σχήμα 9.43</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg).....	152
<b>Σχήμα 9.44</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	153
<b>Σχήμα 9.45</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	153
<b>Σχήμα 9.46</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	154
<b>Σχήμα 9.47</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	154
<b>Σχήμα 9.48</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	155
<b>Σχήμα 9.49</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	155
<b>Σχήμα 9.50</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	156
<b>Σχήμα 9.51</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	156
<b>Σχήμα 9.52</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	156
<b>Σχήμα 9.53</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην $F_z$ avg.....	157
<b>Σχήμα 9.54</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην $F_z$ avg.....	157
<b>Σχήμα 9.55</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην $F_z$ avg.....	158
<b>Σχήμα 9.56</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	159
<b>Σχήμα 9.57</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	159
<b>Σχήμα 9.59</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg).....	160
<b>Σχήμα 9.60</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	162
<b>Σχήμα 9.61</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	162
<b>Σχήμα 9.62</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	163
<b>Σχήμα 9.63</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg).....	164
<b>Σχήμα 9.64</b> Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	165
<b>Σχήμα 9.65</b> Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	165
<b>Σχήμα 9.66</b> Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	166



<b>Σχήμα 9.67</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	166
<b>Σχήμα 9.68</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	167
<b>Σχήμα 9.69</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	167
<b>Σχήμα 9.70</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	168
<b>Σχήμα 9.71</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	168
<b>Σχήμα 9.72</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS .....	168
<b>Σχήμα 9.73</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην $F_z$ avg.....	169
<b>Σχήμα 9.74</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην $F_z$ avg .....	169
<b>Σχήμα 9.75</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην $F_z$ avg .....	170
<b>Σχήμα 9.76</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	171
<b>Σχήμα 9.77</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	171
<b>Σχήμα 9.78</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	171
<b>Σχήμα 9.79</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg).....	172
<b>Σχήμα 9.80</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	174
<b>Σχήμα 9.81</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	174
<b>Σχήμα 9.82</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS .....	175
<b>Σχήμα 9.83</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg).....	176
<b>Σχήμα 9.84</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	177
<b>Σχήμα 9.85</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	177
<b>Σχήμα 9.86</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	177
<b>Σχήμα 9.87</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	178
<b>Σχήμα 9.88</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	178
<b>Σχήμα 9.89</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	179



<b>Σχήμα 9.90</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	179
<b>Σχήμα 9.91</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	180
<b>Σχήμα 9.92</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	180
<b>Σχήμα 9.93</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην Fz avg.....	181
<b>Σχήμα 9.94</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην Fz avg.....	181
<b>Σχήμα 9.95</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην Fz avg.....	181
<b>Σχήμα 9.96</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	182
<b>Σχήμα 9.97</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Rt.....	183
<b>Σχήμα 9.99</b> Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg).....	183
<b>Σχήμα 9.100</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	186
<b>Σχήμα 9.101</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.....	186
<b>Σχήμα 9.102</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	187
<b>Σχήμα 9.103</b> Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg).....	188
<b>Σχήμα 9.104</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	189
<b>Σχήμα 9.105</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	189
<b>Σχήμα 9.106</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.....	190
<b>Σχήμα 9.107</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.....	190
<b>Σχήμα 9.108</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.....	191
<b>Σχήμα 9.109</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.....	191
<b>Σχήμα 9.110</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	192
<b>Σχήμα 9.111</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	192
<b>Σχήμα 9.112</b> Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS.....	192
<b>Σχήμα 9.113</b> Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην Fz avg.....	193
<b>Σχήμα 9.114</b> Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην Fz avg.....	193



<b>Σχήμα 9.115</b>	Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην $Fz_{avg}$ .....	194
<b>Σχήμα 9.117</b>	Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $Rt$ .....	195
<b>Σχήμα 9.118</b>	Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	195
<b>Σχήμα 9.119</b>	Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $Fz_{avg}$ ).....	196



## Πίνακες

<b>Πίνακας 1.1</b> Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου .....	18
<b>Πίνακας 1.2</b> Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται. Οι τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, και η παρουσία και άλλων στοιχείων στο κράμα επηρεάζει την διαλυτότητα. ....	22
<b>Πίνακας 1.3</b> Συγκεντρωτικός πίνακας χρήσεων των κραμάτων αλουμινίου.....	33
<b>Πίνακας 1.4</b> Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A., των κραμάτων αλουμινίου, ....	40
ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί. ....	40
<b>Πίνακας 3.1</b> Κατεργασίες με αποβολή υλικού και οι εργαλειομηχανές .....	58
<b>Πίνακας 5.1</b> Προτεινόμενοι εκθέτες υπολογισμού διάρκειας ζωής, κατά B. K. Srinivas .....	81
<b>Πίνακας 7.1</b> Φασματογραφικός χαρακτηρισμός του αλουμινίου μήτρας .....	100
<b>Πίνακας 8.1</b> Χαρακτηριστικά τόννου CNC Haas LT-1 .....	105
<b>Πίνακας 8.2</b> Διαστάσεις κοπτικού πλακιδίου TNMG 160404-MF2 TP200.....	107
<b>Πίνακας 8.3</b> Συνθήκες κοπής της τόννευσης.....	108
<b>Πίνακας 8.4</b> Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο αναφοράς.....	114
<b>Πίνακας 8.5</b> Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο-GNPs 0,10% .....	114
<b>Πίνακας 8.6</b> Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο-GNPs 0,20% .....	115
<b>Πίνακας 8.7</b> Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο-GNPs 0,30% .....	115
<b>Πίνακας 8.8</b> Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο-GNPs 0,40% .....	116
<b>Πίνακας 8.9</b> Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο-GNPs 0,50% .....	116
<b>Πίνακας 9.1</b> Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra ....	130
<b>Πίνακας 9.2</b> Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.....	131
<b>Πίνακας 9.3</b> Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS	133
<b>Πίνακας 9.4</b> Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg) .....	134
<b>Πίνακας 9.5</b> Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους.....	136
<b>Πίνακας 9.6</b> Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra .....	137



<b>Πίνακας 9.7</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	138
<b>Πίνακας 9.8</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS .....	138
<b>Πίνακας 9.9</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	139
<b>Πίνακας 9.10</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ ....	141
<b>Πίνακας 9.11</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	143
<b>Πίνακας 9.12</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS	144
<b>Πίνακας 9.13</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	145
<b>Πίνακας 9.14</b>	Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους.....	147
<b>Πίνακας 9.15</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	148
<b>Πίνακας 9.16</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	149
<b>Πίνακας 9.17</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS .....	149
<b>Πίνακας 9.18</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	150
<b>Πίνακας 9.19</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ ....	153
<b>Πίνακας 9.20</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	154
<b>Πίνακας 9.21</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS	155
<b>Πίνακας 9.22</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	157
<b>Πίνακας 9.23</b>	Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους.....	158
<b>Πίνακας 9.24</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	160
<b>Πίνακας 9.25</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	161
<b>Πίνακας 9.26</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS .....	161



<b>Πίνακας 9.27</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	161
<b>Πίνακας 9.28</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ ....	165
<b>Πίνακας 9.29</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	166
<b>Πίνακας 9.30</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$	167
<b>Πίνακας 9.31</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	169
<b>Πίνακας 9.32</b>	Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους.....	170
<b>Πίνακας 9.33</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	172
<b>Πίνακας 9.34</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	173
<b>Πίνακας 9.35</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	173
<b>Πίνακας 9.36</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	173
<b>Πίνακας 9.37</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ ...	176
<b>Πίνακας 9.38</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	178
<b>Πίνακας 9.39</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $RMS$	179
<b>Πίνακας 9.40</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	180
<b>Πίνακας 9.41</b>	Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους.....	182
<b>Πίνακας 9.42</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	184
<b>Πίνακας 9.43</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	184
<b>Πίνακας 9.44</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $RMS$ .....	185
<b>Πίνακας 9.45</b>	Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	185
<b>Πίνακας 9.46</b>	Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ ....	189



<b>Πίνακας 9.47</b> Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ ....	190
<b>Πίνακας 9.48</b> Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS	191
<b>Πίνακας 9.49</b> Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ avg) .....	193
<b>Πίνακας 9.53</b> Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους.....	194
<b>Πίνακας 9.49</b> Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_a$ .....	196
<b>Πίνακας 9.50</b> Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας $R_t$ .....	197
<b>Πίνακας 9.51</b> Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS .....	197
<b>Πίνακας 9.52</b> Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέγιστη κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ max).....	197





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

*Έλεγχος κατεργασιμότητας σε τόννευση  
νανοσύνθετων υλικών μήτρας αλουμινίου με  
ενίσχυση νανοδομών γραφενίου*

Διπλωματική Εργασία  
του Παπαδημητρίου  
Δημήτρη

## **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1. Αργίλιο ή Αλουμίνιο (Aluminium)



*Εικόνα 1.1 Το αλουμίνιο*

Το αργίλιο ή αλουμίνιο (Aluminium) είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο στοιχείο που ανήκει στην ομάδα IIIA (13) του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο (3<sup>ο</sup>) πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο βωξίτης.



*Εικόνα 1.2 Το μεταλλικό αλουμίνιο*

Το μεταλλικό αλουμίνιο έχει (φαινομενικά) μεγάλη ικανότητα στο να αντιστέκεται στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του



μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου του, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Επίσης, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, έγινε στρατηγικό μέταλλο για την αεροδιαστημική (και όχι μόνο) βιομηχανία. Είναι, επίσης, εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία, τόσο αυτούσιο ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διαφόρων ενώσεων του [1].

## 1.1. Ιστορική Ανάδρομη Αλουμινίου

- Από την αρχαιότητα οι αρχαίοι Έλληνες και Ρωμαίοι γνώριζαν τη στυπτηρία (διπλό θειικό άλας αργιλίου και καλίου) και την χρησιμοποιούσαν. Επίσης, χρησιμοποιούσαν αργιλοπυριτικές ενώσεις στην κεραμική.



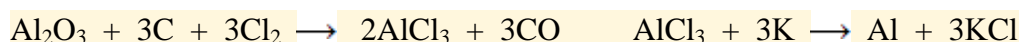
*Εικόνα 1.3 Η στυπτηρία (alum, alumen): είναι η κοινή ονομασία του διπλού θειικού άλατος του καλίου-αργιλίου  $KAl(SO_4)_2$ . Η μορφή στην οποία είναι γνωστότερη είναι το ένυδρο άλας  $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ . Είναι ένα άλας που κυρίως εξάγεται από το βωξίτη.*

- Το 1761, ο Γάλλος χημικός Guyton de Morveau (1737-1816), συνεργάτης του Lavoisier γνωστός για τη συμβολή του στη συστηματική χημική ονοματολογία, πρότεινε τον όρο *alumin* (αλουμίνα) για το οξείδιο του αργιλίου ( $Al_2O_3$ ) ενός άγνωστου μέχρι τότε μετάλλου του οποίου την παρουσία θεωρούσε βέβαιη στη στυπτηρία (alum). Στη συνέχεια προστέθηκε και η λατινική κατάληξη *-ium*, όπως συνηθιζόταν στην ονομασία κάθε νέου χημικού στοιχείου και το υποθετικό αυτό στοιχείο ονομάστηκε *aluminium*.
- Το 1808, ο Βρετανός χημικός Humphry Davy (1778-1829), διάσημος για την απομόνωση δραστικότετων μετάλλων των των ομάδων των αλκαλίων και γαιαλκαλίων (Na, K, Mg, Ca, Ba) με ηλεκτρόλυση τηγμάτων των αλάτων τους, σε



επιστολή του προς τη Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου έγραψε ότι δεν επέτυχε να απομονώσει τα μέταλλα από τα οξειδία alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silex ( $\text{SiO}_2$ ), zircon (ZrO<sub>2</sub>) και glucine (BeO).

- Το 1821, ο Γάλλος γεωλόγος Pierre Berthie (1782-1861) είχε διαπιστώσει ότι το καταλληλότερο μέταλλευμα για την παρασκευή αλουμίνας ήταν ένα ορυκτό (τυπικά πρόκειται για "πέτρωμα") αποτελούμενο από ένυδρη αλουμίνα (σε μίγμα με οξειδία άλλων μετάλλων και κυρίως σιδήρου). Το ορυκτό αυτό βρισκόταν σε σχετικά μεγάλες ποσότητες στην περιοχή της Μεσογείου και το οποίο ονόμασε βωξίτη, από το όνομα της πόλης Γαλλίας (Les Baux in Provence), όπου βρήκε πλούσια κοιτάσματά του.
- Το 1825, ο Δανός φυσικός και χημικός Hans Christian Oersted (1777-1851), γνωστός κυρίως για τις εργασίες του στον ηλεκτρομαγνητισμό, διαβίβασε χλώριο μέσω ερυθροπυρακτωμένου μίγματος αλουμίνας και άνθρακα και συνέλεξε το σχετικά πτητικό άλας τριχλωριούχο αργίλιο, το οποίο με αντίδραση με αμάλγαμα μεταλλικού καλίου (1,5% διάλυμα K σε Hg) έδωσε μεταλλικό αλουμίνιο:



Ο Oersted παρέλαβε μια μικρή ποσότητα μάλλον ακάθαρτου μετάλλου, το οποίο του φάνηκε να μοιάζει κάπως με τον κασσίτερο. Ωστόσο, η ανακάλυψη αυτή δεν έγινε ευρύτερα γνωστή, αφού η σχετική δημοσίευση έγινε σε ένα μάλλον άσημο επιστημονικό περιοδικό της Δανίας, αλλά και ο ίδιος δεν ενδιαφέρθηκε να συνεχίσει την έρευνα πάνω στο νέο αυτό μέταλλο. Αν και η μέθοδος απομόνωσης του μετάλλου αναφέρεται ως "χημική" θα πρέπει εδώ να τονιστεί ότι το μεταλλικό κάλιο (ή νάτριο που χρησιμοποιήθηκε λίγο αργότερα) παράγεται αποκλειστικά με ηλεκτρόλυση τήγματος του αντίστοιχου χλωριούχου άλατος, επομένως -έστω και έμμεσα- η μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ηλεκτρολυτική.

- Το 1827 περιγράφηκε αναλυτικά από τον Γερμανό χημικό Friedrich Wöhler (1777-1851) μία μέθοδος παρασκευής του αργιλίου σε σκόνη από άνυδρο χλωριούχο αργίλιο και κάλιο. Ο Wöhler γενικά πιστώνεται την απομόνωση του αργιλίου, αλλά επίσης και ο Oersted πρέπει επίσης να αναφερθεί ως αυτός που το ανακάλυψε. Ο Wöhler αρχικά απέτυχε να παραλάβει αλουμίνιο με τη μέθοδο του Oersted, όμως στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ως αναγωγικό καθαρό κάλιο,



απομόνωσε μια ποσότητα του μετάλλου. Τα επόμενα 18 χρόνια ο Wöhler συνέχισε να ασχολείται με την απομόνωση του αλουμινίου.

- Το 1845, είχε συλλέξει αρκετή ποσότητα από το νέο μέταλλο και έχοντας πλέον στη διάθεσή του μια συμπαγή μάζα του, μπόρεσε να μετρήσει το ειδικό βάρος του. Έτσι, ανακάλυψε μια από τις σπουδαιότερες ιδιότητες του αλουμινίου: την "αβάσταχτη" ελαφρότητά του, δηλ. το μικρό ειδικό βάρος του ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ), τιμή πρωτόγνωρη για μέταλλο σταθερό στις συνήθειες ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- Το 1854 ο Γάλλος χημικός Henri Etienne Saint-Claire Deville (1818-1881), βασισμένος στις εργασίες του Wöhler επινοεί την πρώτη εμπορική μέθοδο παραγωγής του. Ανέπτυξε μια χημική μέθοδο, παραγωγής αλουμινίου σε μεγάλη κλίμακα με βάση την ίδια σειρά αντιδράσεων, αντικαθιστώντας όμως το ακριβό μεταλλικό κάλιο με το φθηνότερο και σχετικά πιο εύχρηστο μεταλλικό νάτριο. Παρά τη βελτίωση της μεθόδου το μεταλλικό αλουμίνιο εξακολουθούσε να είναι ένα πανάκριβο μέταλλο. Αρχικά, το κόστος του αργιλίου ήταν υψηλότερο από αυτό του χρυσού και του λευκόχρυσου.
- Το 1886, ο Αμερικανός χημικός, εφευρέτης και μετέπειτα επιχειρηματίας Charles Martin Hall (1863-1914) και ο Γάλλος εφευρέτης Paul Heroult (1863-1914) και οι δύο σε ηλικία μόλις 22 ετών, ανεκάλυψαν ανεξάρτητα μεταξύ τους, στην Αμερική και στη Γαλλία αντίστοιχα, την ηλεκτρολυτική μέθοδο παραλαβής του μετάλλου από σύντηγμα αλουμίνας και κρυόλιθου. Ο κρυόλιθος (cryolite,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) είναι ένα σπάνιο ορυκτό, μικτό φθοριούχο άλας νατρίου-αργιλίου, στο τήγμα του οποίου η αλουμίνα παρουσιάζει σημαντική διαλυτότητα. Οι Hall και Heroult διαπίστωσαν ότι η αλουμίνα (σημείο τήξης  $2072^\circ\text{C}$ ) μπορούσε να διαλυθεί σε τηγμένο κρυόλιθο παρέχοντας ευτηκτικό μίγμα με σημείο τήξης περίπου  $1000^\circ\text{C}$ , όπου μπορούσε να πραγματοποιηθεί αναγωγή του  $\text{Al(III)}$  με ηλεκτρόλυση προς μεταλλικό αλουμίνιο. Η μέθοδος τους, με τις βελτιώσεις που υπέστη στη συνέχεια, χάραξε τον δρόμο της σημερινής ηλεκτρολυτικής μεθόδου και επέφερε ουσιαστική πλέον μείωση του κόστους του αλουμινίου, το οποίο κατέστησε ένα μέταλλο της καθημερινότητας, δεύτερο σε παραγωγή και εφαρμογές μετά τον σίδηρο.
- Το 1888 ο Αυστριακός χημικός Karl Josef Bayer (1847-1904) συνέβαλε στην περαιτέρω μείωση του κόστους του αλουμινίου, με την επινόηση μιας



οικονομικότερης μεθόδου επεξεργασίας του βωξίτη. Δηλαδή επινόησε μία μέθοδο καθαρισμού του βωξίτη προς παρασκευή αλουμίνας, με τη χρήση καυστικού νατρίου. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αλουμινίου. Το 1900 η παγκόσμια παραγωγή αλουμινίου ήταν 8000 τόνοι. Έκτοτε αυξήθηκε με πολύ μεγάλους ρυθμούς, για να φτάσει το 1999 τα 24 εκατομμύρια τόνους [2].

## 1.2. Παραγωγή Αλουμινίου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το αλουμίνιο παρήχθη βιομηχανικά για πρώτη φορά το 1886. Όπως τα περισσότερα μέταλλα, έτσι και αυτό βρίσκεται υπό τη μορφή ορυκτών. Από βιομηχανικής πλευράς το πλέον σημαντικό ορυκτό είναι ο βωξίτης, όπου το αργίλιο περιέχεται εκεί υπό τη μορφή οξειδίων ή ένυδρων οξειδίων ( $Al_2O_3$ ) την λεγόμενη αλουμίνα. Ο βωξίτης για να θεωρηθεί οικονομικά εκμεταλεύσιμος πρέπει να έχει περιεκτικότητα σε αλουμίνα τουλάχιστον 55%. Το μέταλλο που παράγεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης της αλουμίνας είτε ως καθαρό αλουμίνιο είτε ως κράμα αλουμινίου ονομάζεται πρωτόχυτο αλουμίνιο ενώ μια άλλη πηγή αλουμινίου, που είναι ιδιαίτερα σημαντική από ενεργειακής άποψης, είναι η επανάτξη και επαναχύτευση κομματιών που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί (scrap). Το αλουμίνιο που παράγεται μέσα από αυτή την διαδικασία ονομάζεται δευτερόχυτο αλουμίνιο. [2]



**Εικόνα 1.4** (Αριστερά) Τυπική μορφή βωξίτη, με περιεκτικότητα σε  $Al_2O_3$  στην περιοχή 40-60%.

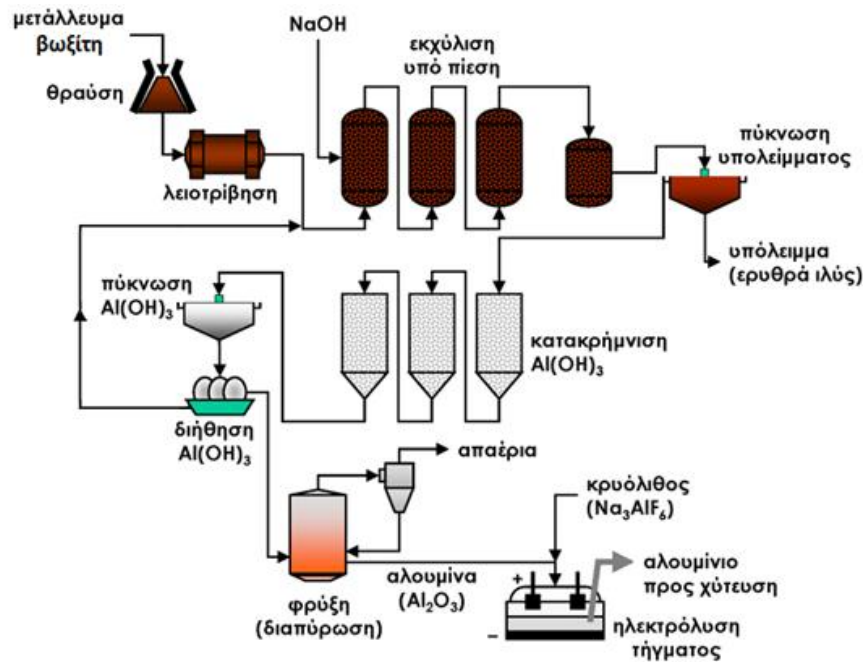
Το κοκκινωπό χρώμα του οφείλεται στη σχετικά μεγάλη περιεκτικότητά του σε  $Fe_2O_3$ .

(Κέντρο) Εξόρυξη βωξίτη από επιφανειακά στρώματα του πετρώματος σε δασική περιοχή της

Τζαμάικας. (Δεξιά) Καθαρό  $Al_2O_3$ , αλουμίνα, προϊόν λαμβανόμενο από τον βωξίτη.

### 1.2.1. Παραγωγή Πρωτόχυτου Αλουμινίου

Η παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου παγκοσμίως πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Πρώτο στάδιο είναι η παραγωγή αλουμίνας από το βωξίτη με τη μέθοδο Bayer και δεύτερο στάδιο η εξαγωγή του αλουμινίου από την αλουμίνα με την ηλεκτρολυτική μέθοδο Hall-Heroult.



*Σχήμα 1.1* Συνοπτικό διάγραμμα της παραγωγής αλουμινίου από βωξίτη όπου συνδυάζει υδρομεταλλουργία (εκχύλιση), πυρομεταλλουργία (φρύξη) και ηλεκτρομεταλλουργία (ηλεκτρόλυση τήγματος).

#### 1.2.1.1. Παραγωγή αλουμίνας (Μέθοδος Bayer)

##### Εργαστηριακή παρασκευή αλουμίνας.

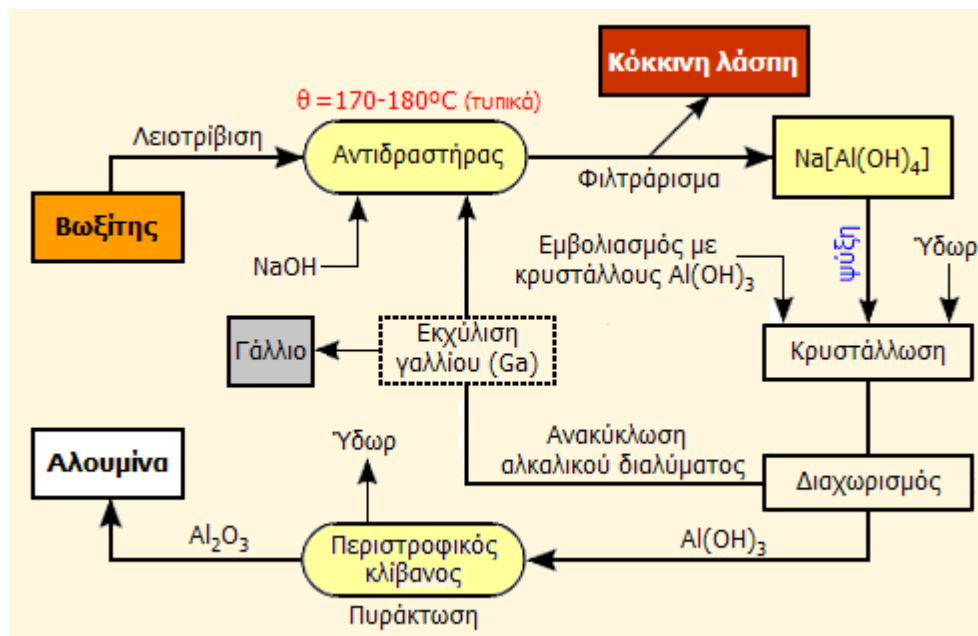
Η αλουμίνα παρασκευάζεται βιομηχανικά από τον βωξίτη σε ποσότητες εκατοντάδων εκατομμυρίων τόνων ετησίως και αποτελεί ένα φθινό χημικό προϊόν. Επομένως, η εργαστηριακή σύνθεσή της από άλλες δαπανηρότερες ή πιο δυσεύρετες ενώσεις του αργιλίου δεν έχει κάποιο νόημα, αν και είναι απλή και εύκολη. Έτσι, σε μικρές ποσότητες και στα πλαίσια πειραμάτων επίδειξης, μπορεί να παρασκευασθεί με βραδεία προσθήκη διαλύματος αμμωνίας σε έντονα αναδευόμενο διάλυμα ενός άλατος του αλουμινίου, όπως π.χ. το θεικό αργίλιο, ή σε διάλυμα  $AlCl_3$ , το οποίο παρασκευάζεται εύκολα με διάλυση μεταλλικού αλουμινίου (π.χ. φύλλο αλουμινίου) σε HCl.

Κατά την προσθήκη περίσσειας αμμωνίας σε διάλυμα άλατος του αργιλίου καθιζάνει ζελατινώδες ίζημα υδροξειδίου του αργιλίου, το οποίο στη συνέχεια συλλέγεται, εκπλένεται και πυρακτώνεται σε θερμοκρασία  $>900^{\circ}\text{C}$  παρέχοντας καθαρό οξείδιο  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### Βιομηχανική παραγωγή αλουμίνας.

Ο Γάλλος χημικός Henri Etienne Saint-Claire Deville (1818-1881) επινόησε μια μέθοδο για την παραλαβή καθαρής αλουμίνας από βωξίτες, η οποία είναι γνωστή ως μέθοδος Le Chatelier. Η μέθοδος βασίζεται στη σύντηξη λεπτοκοκιοποιημένου βωξίτη με  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  στους  $1200^{\circ}\text{C}$ , που οδηγεί στον σχηματισμό άνυδρων αργλικών αλάτων του νατρίου, όπως το (μετα)αργλικό νάτριο ( $\text{NaAlO}_2$ ). Το σύντηγμα διαλυόταν σε νερό, τα αδιάλυτα συστατικά απομακρύνονταν και ακολουθούσε διαβίβαση  $\text{CO}_2$  στο διήθημα, που παρείχε ίζημα  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , το οποίο με πυράκτωση έδινε  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Σήμερα, η αλουμίνα παραλαμβάνεται σχεδόν αποκλειστικά ( $>95\%$ ) από τον βωξίτη με την οικονομικότερη και αποδοτικότερη μέθοδο Bayer. Το διάγραμμα ροής της μεθόδου Bayer παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 1.2** Συνοπτικό διάγραμμα της διεργασίας Bayer (παραλαβή αλουμίνας από βωξίτες). Σε ορισμένες βιομηχανίες παραγωγής αλουμίνας παραλαμβάνεται και το ιχνοστοιχείο γάλλιο από το ανακυκλούμενο αλκαλικό διάλυμα (Bayer's liquor).





Η μέθοδος Bayer, η οποία ανακαλύφθηκε από τον Karl Josef Bayer(1847–1904) είναι μία υδρομεταλλουργική εξαγωγική μέθοδος, η οποία εφαρμόστηκε βιομηχανικά το 1888. Στη διεργασία αυτή ο βωξίτης εκχυλίζεται με πυκνό διάλυμα καυστικού νατρίου (NaOH). Η διεργασία είναι κυκλική με την έννοια της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης του μεγαλύτερου μέρους του NaOH [3]. Η μέθοδος Bayer βασίζεται στην επεξεργασία λεπτοκονιοποιημένου βωξίτη, ο οποίος μπορεί να περιέχει 40 έως 60%  $Al_2O_3$ . Η μέθοδος αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια, τα οποία είναι:

1. Προετοιμασία βωξίτη (Raw materials preparation)
2. Εκχύλιση υπό πίεση (Digestion)
3. Καταβύθιση (Precipitation)
4. Θερμική διάσπαση (Calcination).

### **Προετοιμασία Βωξίτη (Raw materials preparation)**

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου Bayer αρχίζει με την προετοιμασία της τροφοδοσίας στο σύστημα επεξεργασίας. Η τροφοδοσία θα πρέπει να έχει ίδια χημική σύσταση κάθε φορά για να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Διότι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται το στάδιο αυτό, εξαρτώνται από τον τύπο του βωξίτη. Βωξίτες αποτελούμενοι κυρίως από  $AlO(OH)$ , οι αποκαλούμενοι διασπορικοί βωξίτες, απαιτούν εντονότερες συνθήκες αντίδρασης σε σχέση με τους βωξίτες, που αποτελούνται κυρίως από  $Al(OH)_3$  τους αποκαλούμενους γκιμπσιτικούς βωξίτες. Οι πρώτοι απαιτούν θερμοκρασία επεξεργασίας: 200-240°C και συγκέντρωση NaOH: 180-220 g/L, ενώ οι δεύτεροι απαιτούν θερμοκρασία επεξεργασίας: 140°C και συγκέντρωση NaOH: 140 g/L. Αυτό επιτυγχάνεται με ανάμειξη βωξιτών από διαφορετικές πηγές, έτσι ώστε να επιτευχθεί ομοιομορφία ως προς τη σύσταση. Επιπλέον, για να πραγματοποιηθούν όλες οι αντιδράσεις που θα αναφερθούν παρακάτω, το υλικό θα πρέπει να θραυστεί και να λειοτριβηθεί ώστε να αποκτήσει μέγεθος κόκκων μικρότερο των <0,15cm. Καθώς τα κύρια στάδια της μεθόδου Bayer αποτελούν τυπικές ετερογενείς χημικές διεργασίες, η απόδοση και η ταχύτητα τους εξαρτάται από το μέγεθος της διεπιφάνειας στερεού / ρευστού.



### **Εκχύλιση υπό πίεση (Digestion)**

Στη συνέχεια, το υλικό προσβάλλεται με πυκνό διάλυμα NaOH και θερμαίνεται σε αυτόκλειστο (autoclave) υπό πίεση 5-6 Atm και θερμοκρασία 170 °C βαθμούς κελσίου (digestion). Τα ορυκτά του αργιλίου που περιέχονται στο βωξίτη διαλυτοποιούνται, ενώ το στερεό υπόλειμμα που περιέχει τα οξείδια του σιδήρου και άλλων μετάλλων απομακρύνεται και απορρίπτεται υπό μορφή λάσπης που είναι γνωστή ως «κόκκινη λάσπη» (red mud). Η περιεκτικότητα της κόκκινης λάσπης σε στερεά ποικίλει στην περιοχή 25-50%, ενώ το pH της φθάνει το 13.

Μετά τη διήθηση και απαλλαγή από τα αδιάλυτα συστατικά ακολουθεί το στάδιο του εμβολιασμού (seeding) κατά το οποίο στο πυκνό αλκαλικό διάλυμα τα αργιλικά ανιόντα σταδιακά διασπώνται παρέχοντας στερεό  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

Ο Bayer ανακάλυψε ότι η διάσπαση αυτή επιταχύνεται με την προσθήκη μικρής ποσότητας στερεού κρυσταλλικού υδροξειδίου του αργιλίου και επιπλέον ότι το μητρικό αλκαλικό υγρό μπορούσε να ξαναχρησιμοποιηθεί. Ακόμη, διαπίστωσε ότι το  $\text{Al}(\text{OH})_3$  που καθιζάνει κατά τη διάσπαση των αργιλικών ανιόντων, έχει μορφή συνεκτική και εύκολα διηθήσιμη, σε πλήρη αντίθεση με τη ζελατινώδη μορφή που αποκτά κατά την καθίζηση από όξινα διαλύματα, μορφή η οποία είναι εξαιρετικά δύσκολο να παραληφθεί. Αυτές οι ανακαλύψεις του Bayer συνέβαλαν αποφασιστικά στη μείωση του κόστους παραγωγής αλουμίνας και επομένως και του αλουμινίου.

### **Καταβύθιση (Precipitation)**

Το πυκνό διάλυμα αργιλικού νατρίου αντλείται σε μεγάλες δεξαμενές καταβύθισης, που ονομάζονται κρυσταλλωτήρες που μπορεί να έχουν ύψος μεγαλύτερο και από 24 μέτρα και χωρητικότητες μεγαλύτερες από 1000 κυβικά μέτρα. Εκεί ψύχεται, αραιώνεται και εμβολιάζεται με κρυσταλλικό  $\text{Al}(\text{OH})_3$  και αναδεύεται μέχρι και τρεις ημέρες, οπότε πραγματοποιείται κατά ελεγχόμενο τρόπο κρυστάλλωση, ώστε να ληφθεί  $\text{Al}(\text{OH})_3$  με την επιθυμητή κατανομή μεγέθους κρυστάλλων για τα επόμενα στάδια.

Με την ολοκλήρωση του σταδίου καταβύθισης και το διαχωρισμό του προϊόντος σε δύο κλάσματα, συλλέγεται η χονδρομερής ένυδρη αλουμίνα  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , ξεπλένεται από υπολείμματα καυστικής σόδας και οδηγείται στο τελευταίο στάδιο της μεθόδου Bayer, τη θερμική διάσπαση της ένυδρης αλουμίνας (calcination). Στόχος στο στάδιο αυτό είναι να διασπαστεί το αργιλικό διάλυμα με τη μέγιστη



δυνατή απόδοση ανά μονάδα όγκου και να παραχθεί γιββσίτης συγκεκριμένων προδιαγραφών. Μετά το πέρας της καταβύθισης γίνεται διαχωρισμός του ιζήματος  $Al(OH)_3$  σε χοντρό, που αποτελεί το προϊόν, και λεπτό που αποτελεί τα φύτρα προς ανακύκλωση.

### **Θερμική διάσπαση (Calcination).**

Το τελευταίο αυτό στάδιο λαμβάνει χώρα σε υψηλή θερμοκρασία ( $1100\text{ }^{\circ}C$ ), σε περιστροφικούς κλιβάνους (rotary kilns), παρέχοντας καθαρή αλουμίνα (οξειδίο του αργιλίου). Το στάδιο της πυράκτωσης πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά, διότι καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Η ένυδρη αλουμίνα μετατρέπεται σε άνυδρη αλουμίνα ( $Al_2O_3$ ), με την απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού. Το τελικό προϊόν ονομάζεται μεταλλουργική άνυδρη αλουμίνα και αποτελεί την τροφοδοσία των κελιών ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή αλουμινίου.

Η επεξεργασία που υπόκεινται οι βωξίτες για την παραλαβή της αλουμίνας βοηθά έμμεσα την παραλαβή του γαλλίου. Το γάλλιο, όπως και το αργίλιο, σχηματίζει υδατοδιαλυτά υδροξυσύμπλοκα με αποτέλεσμα το ανακυκλούμενο διάλυμα  $NaOH$  (Bayer's liquor) να εμπλουτίζεται σταδιακά με το πολύτιμο αυτό μεταλλικό στοιχείο (π.χ. από μια αρχική αναλογία  $Ga:Al$  1:5000, φθάνει σε αναλογία 1:300). Σε αρκετές βιομηχανίες παραγωγής αλουμίνας (και αλουμινίου) επιδιώκεται η παραλαβή του γαλλίου από το διάλυμα  $NaOH$ . Η παραλαβή του μετάλλου ξεκινά συνήθως με εκχύλιση με οργανικά συμπλεκτικά μέσα και καταλήγει σε ένα ηλεκτρολυτικό καθαρισμό.



*Εικόνα 1.5 Διεργασία Bayer (Αριστερά) Βωξίτης. (Κέντρο) Καθαρή αλουμίνα  $Al_2O_3$  (Δεξιά) Κόκκινη λάσπη (κυρίως  $Fe_2O_3$ ).*



### 1.2.1.2. Παραγωγή αλουμινίου (Μέθοδος Hall-Heroult)

Όπως προαναφέρθηκε, το 90% της παγκόσμιας παραγωγής αλουμίνιας χρησιμοποιείται για την ηλεκτρολυτική παραγωγή αλουμινίου σύντομη περιγραφή της οποίας ακολουθεί.

Η ηλεκτρολυτική παραγωγή του αλουμινίου πραγματοποιείται σε διάλυμα 3-4% της αλουμίνιας ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) σε τήγμα (περίπου στους  $1000^\circ\text{C}$ ) του ορυκτού κρυολίθου (cryolite,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), ενός σπάνιου ορυκτού που ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά στη Γροιλανδία το 1799. Σήμερα, επειδή τα αποθέματα του ορυκτού δεν επαρκούν, ο κρυολίθος παρασκευάζεται συνθετικά με πρώτη ύλη τον άφθονο φθορίτη (fluorite,  $\text{CaF}_2$ ). Η διαλυτότητα της αλουμίνιας στο τήγμα του κρυολίθου οφείλεται στον σχηματισμό οξοφθοριούχων ιόντων του αργιλίου. Κατιόντα αλκαλίων και γαιαλκαλίων και ανιόντα όπως τα προηγούμενα προσδίδουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στο τήγμα και τη δυνατότητα ηλεκτρολυτικής αναγωγής του  $\text{Al(III)}$  προς μεταλλικό  $\text{Al}$ .



*Εικόνα 1.6 (Αριστερά) Δείγμα φυσικού κρυολίθου από τη Γροιλανδία (Δεξιά) Τα πρώτα ηλεκτρολυτικά στοιχεία παραγωγής αλουμινίου (εγκαταστάσεις Alcoa, 1889)*

Στα ηλεκτρολυτικά στοιχεία (pots) η άνοδος αποτελείται από αγωγίμο πυρολυτικό άνθρακα που συνήθως παρασκευάζεται με ειδικές μεθόδους (π.χ. με πυράκτωση ασφαλτούχων υλικών με κωκ) συνήθως στα ίδια τα εργοστάσια παραγωγής αλουμινίου (προψημένες άνοδοι, pre-baked anodes).

Η πυράκτωση πραγματοποιείται στους  $1100-1150^\circ\text{C}$  και μπορεί να διαρκέσει μέχρι και δύο εβδομάδες και αποβλέπει στην ομοιογενοποίηση του μίγματος και τη δημιουργία ανόδων με την κατάλληλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και ικανών να αντέξουν στις υψηλές θερμοκρασίες της ηλεκτρόλυσης.



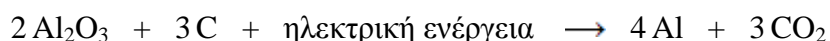
Σύμφωνα με μια άλλη τεχνολογία (Soederberg technology), το ανθρακούχο μίγμα εισάγεται απευθείας εκ των άνω στο ηλεκτρολυτικό στοιχείο και η άνοδος δημιουργείται "επί τόπου" με εκμετάλλευση της θερμότητας που εκλύεται κατά την ηλεκτρόλυση.

Στις ηλεκτροδιακές αντιδράσεις εμπλέκονται τα οξοφθοριούχα ανιόντα του αργιλίου, ωστόσο, το συνολικό αποτέλεσμά τους μπορεί να γραφεί απλά ως εξής:



Το παραγόμενο στην άνοδο οξυγόνο οξειδώνει τον άνθρακα προς CO<sub>2</sub> και έτσι οι χρησιμοποιούμενες άνοδοι απαιτούν τακτική αντικατάσταση. Συνήθως αντικαθίστανται μόλις καταναλωθούν τα 2/3 περίπου της μάζας του ανθρακούχου υλικού. Το υπόλοιπο 1/3 της ανόδου (butt) οδηγείται στη μονάδα κατασκευής ανόδων για ανακύκλωση.

Η κάθοδος των στοιχείων είναι επίσης από γραφιτικό άνθρακα και βρίσκεται στον πυθμένα του ηλεκτρολυτικού στοιχείου, δεν υφίσταται ουσιαστικά φθορά και καλύπτεται από το παραγόμενο τηγμένο αλουμίνιο, οπότε ουσιαστικά ως κάθοδος δρα το ίδιο το τήγμα του μετάλλου. Η συνολική αντίδραση στο ηλεκτρολυτικό στοιχείο μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση:

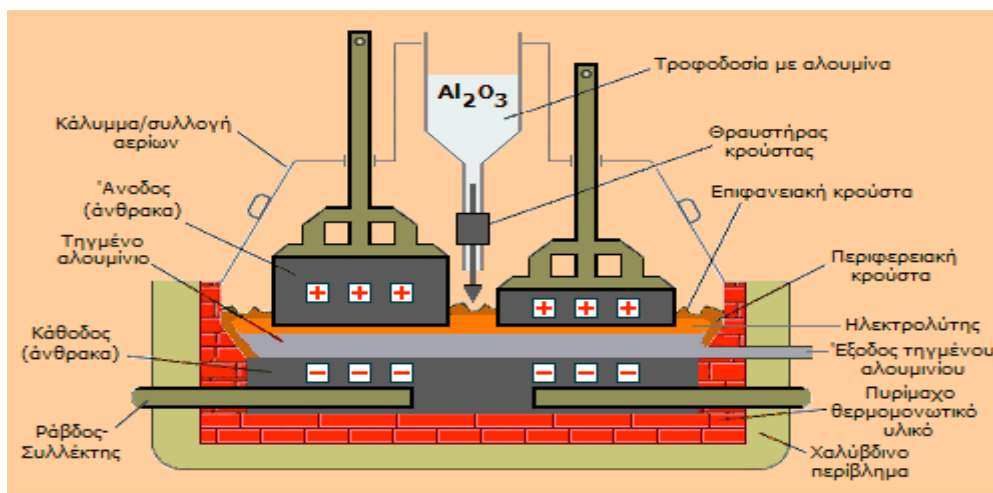


Επομένως η ενέργεια που απαιτείται για την αναγωγή της αλουμίνης έχει μικτή προέλευση (χημική + ηλεκτρική), αφού ο άνθρακας μόνος του δεν θα μπορούσε να προκαλέσει αναγωγή στην αλουμίνα (το αργίλιο είναι ισχυρότερο αναγωγικό από τον άνθρακα).

Ο καθαρός κρυστάλλος έχει σημείο τήξεως 1012°C, ενώ αν περιέχει και 2-3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> μειώνεται περίπου στους 1000°C. Στο τήγμα προστίθεται μια επιπλέον ποσότητα AlF<sub>3</sub> που υποβιβάζει ακόμη περισσότερο το σημείο τήξεως στους 950°C. Το τήγμα του ηλεκτρολύτη είναι ειδικώς ελαφρότερο (d = 2 g/cm<sup>3</sup>) από το τηγμένο αλουμίνιο (σ.τ. 660°C, d = 2,3 g/cm<sup>3</sup>), έτσι το τελευταίο είναι συνεχώς καλυμμένο και δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα που θα το οξειδωνε εύκολα στις τόσο υψηλές θερμοκρασίες. Μια τυπική σύνθεση του τήγματος του ηλεκτρολύτη κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης είναι: 79,8% Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> + 12,2% AlF<sub>3</sub> + 5,0% CaF<sub>2</sub> + 3,0% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Εικόνα 1.7** (Αριστερά) "Προ-ψημένες" άνοδοι από ανθρακούχο μίγμα έτοιμες για χρήση. Το βάρος κάθε ανόδου μπορεί να φθάνει τα 600 έως 800 kg. (Δεξιά) Τεχνικός ανοίγει ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο για να αντικαταστήσει μια άνοδο.



**Εικόνα 1.8** Τυπική κατασκευή ηλεκτρολυτικού στοιχείου παραγωγής αλουμινίου. Μεταξύ ανόδων (μπλοκ αγωγίμου άνθρακα) και καθόδου (τηγμένο αλουμίνιο) μεσολαβεί σχετικά λεπτό στρώμα του τήγματος του ηλεκτρολύτη. Η απόσταση ανόδου-καθόδου πρέπει να διατηρείται σταθερή και καθώς φθείρονται οι άνοδοι, η θέση τους αναπροσαρμόζεται αυτόματα. Η απόσταση αυτή (τυπικά 4,5 cm) είναι εξαιρετικά κρίσιμη ως προς την ενεργειακή απόδοση της όλης διαδικασίας, η οποία βρίσκεται υπό τον έλεγχο υπολογιστών, ώστε να εξασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά ποσότητα παραγόμενου αλουμινίου. Η τροφοδοσία του στοιχείου με αλουμίνα είναι συνεχής, ώστε να διατηρείται η περιεκτικότητα του τήγματος σε αλουμίνα σε μια περιοχή 3 έως 4%. Ο μηχανισμός τροφοδοσίας περιλαμβάνει και ένα είδος σφύρας, που σπάει την επιφανειακή κρούστα του τήγματος, ώστε να μπορεί να δεχθεί το τελευταίο τις νέες ποσότητες αλουμίνιας.

Η ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται συνεχώς με χαμηλές τάσεις μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων (4,0-4,5 V), αλλά με τεράστια ρεύματα (150-350 χιλιάδες Ampère). Το



ρεύμα αυτό κατανέμεται σε πολλές παράλληλα συνδεδεμένες ανόδους. Η απόσταση μεταξύ κάθε ανόδου και της καθόδου (δηλ. του τηγμένου αλουμινίου) είναι σχετικά μικρή, τυπικά 4 έως 5 cm, για να διατηρείται μικρή η ωμική αντίσταση μεταξύ τους. Μικρότερη ωμική πτώση τάσης  $iR$ , συνεπάγεται μικρότερη τάση ηλεκτρόλυσης  $V$  και επομένως μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η ωμική πτώση τάσης πρέπει να είναι αρκετή, ώστε η εκλυόμενη θερμότητα Joule να διατηρεί τη θερμοκρασία του τήγματος λίγο πιο πάνω από το σ.τ. του ηλεκτρολύτη. Το εκλυόμενο από τις ανόδους  $CO_2$  συμβάλλει στην ανάδευση του τήγματος κατά την ηλεκτρόλυση. Κάθε ηλεκτρολυτικό στοιχείο παράγει 1 έως 2 τόνους αλουμινίου την ημέρα.

Μέσω της εξίσωσης Faraday μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ότι για την παραγωγή 1 τόνου αλουμινίου την ημέρα από ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο και θεωρώντας ως 100% την ηλεκτρολυτική απόδοση, θα πρέπει το στοιχείο αυτό να διαρρέεται από ρεύμα ίσο προς:

$$I = Q/t = [ m(\text{eq}) \times F(\text{C/eq}) ] / t (\text{s}) = \{ [ (10^6 \text{ g}) / (27,0/3 \text{ g Al/eq Al}) ] \times (96485 \text{ C/eq}) \} / (24 \times 3600 \text{ s}) = 124.080,5 \text{ A.}$$

Τα αέρια που παράγονται κατά την ηλεκτρόλυση (κυρίως  $CO_2$ ) υπόκεινται σε καθαρισμό (scrubbing), ώστε να απαλλαγούν από φθοριούχες ενώσεις ( $HF$ , σωματίδια φθοριούχων αλάτων) για να αποφευχθεί η ρύπανση του περιβάλλοντος. Αυτές οι τοξικές ουσίες εκλύονται σε μικρές ποσότητες από παράλληλες ανεπιθύμητες ηλεκτροδιακές αντιδράσεις και από τις υψηλές θερμοκρασίες της όλης διαδικασίας. Επιπλέον, επιδιώκεται η ανακύκλωση των συλλεγόμενων κατά τον καθαρισμό φθοριούχων αλάτων.

Κατά την ηλεκτρόλυση, κατάλληλος μηχανισμός περιοδικά σπάει την επιφανειακή κρούστα και προσθέτει νέα ποσότητα αλουμίνια, ώστε να διατηρείται η περιεκτικότητά της στο τήγμα στην επιθυμητή περιοχή (3 έως 4%) και να περιοριστούν παράπλευρες ανεπιθύμητες ανοδικές αντιδράσεις, όπως π.χ. ο σχηματισμός  $CO$ , αλλά και αερίων υπερφθοριανθράκων (κυρίως  $CF_4$  και  $C_2F_6$ ), που συμβαίνουν όταν μειωθεί η περιεκτικότητα του τήγματος σε αλουμίνια.

Οι υπερφθοριάνθρακες είναι χημικώς αδρανή αέρια και έτσι δεν μπορούν να απομακρυνθούν από τις μονάδες καθαρισμού των εκλυόμενων αερίων. Δεν είναι



τοξικοί, ωστόσο η παραγωγή τους είναι ανεπιθύμητη, διότι αποτελούν δραστικότερα "αέρια θερμοκηπίου" και ως εκ τούτου συνιστούν επιβλαβή ατμοσφαιρικό ρύπο.

Εκτός από την κανονική τροφοδοσία των ηλεκτρολυτικών στοιχείων με αλουμίνα, είναι απαραίτητη και η τακτική προσθήκη πολύ μικρότερων ποσοτήτων  $AlF_3$  και κρυσολίθου, για να αναπληρωθούν απώλειές τους λόγω δευτερευουσών αντιδράσεων.

Επίσης σημαντικό είναι οι φθαρμένες άνοδοι να αντικαθίστανται χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του στοιχείου. Για τον λόγο αυτό σε κάθε στοιχείο υπάρχουν συνήθως δύο συστοιχίες πολλών παράλληλα συνδεδεμένων ανόδων, ώστε κατά τη διάρκεια της αντικατάστασης της μίας να λειτουργούν οι υπόλοιπες.

Η ηλεκτρόλυση του  $Al_2O_3$  είναι διεργασία εξαιρετικώς ηλεκτροβόρα. Ένα εργοστάσιο παραγωγής αλουμινίου καταναλώνει ρεύμα όσο μια μικρή πόλη. Ενδεχόμενη διακοπή ρεύματος για παραπάνω από κάποιο χρονικό διάστημα (3-4 ώρες) σημαίνει στερεοποίηση των τηγμάτων στα ηλεκτρολυτικά στοιχεία και με αποτέλεσμα την ουσιαστική καταστροφή τους. Γι' αυτόν τον λόγο, τα περισσότερα εργοστάσια είτε παράγουν επιτόπου την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν, είτε συνδέονται με παραπάνω από μία πηγές ενέργειας (έχουν δηλαδή απευθείας διεθνείς συνδέσεις) [2].



*Σχήμα 1.3 Οι απαιτούμενες ποσότητες των διαφόρων υλικών και ενέργειας για την παραγωγή 1 kg αλουμινίου.*

### 1.2.2. Παραγωγή Δευτερόχυτου Αλουμινίου

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η παραγωγή δευτερόχυτου αλουμινίου πραγματοποιείται με την επανάτξη και επαναχύτευση ήδη χρησιμοποιημένων κομματιών, το λεγόμενο scrap. Το scrap προέρχεται από τα αποκόμματα που δημιουργούνται κατά την επεξεργασία του αλουμινίου για την παραγωγή προϊόντων (new scrap) και από συλλογή διαφόρων κομματιών αλουμινίου που η χρήση τους έχει





πάψει (old scrap). Κουτιά αναψυκτικών, οχήματα που δεν λειτουργούν πια, κατεδαφισμένα κτίρια και οικιακές συσκευές είναι μερικές από τις πιθανές πηγές για την συλλογή αλουμινίου.



*Εικόνα 1.9 Scrap Αλουμινίου*

Το κύριο χαρακτηριστικό της παράγωγης δευτερογενούς αλουμινίου είναι η ποικιλομορφία των πρώτων υλών και η ποικιλία των καμίνων που χρησιμοποιούνται. Ο τύπος της πρώτης ύλης και η προεπεξεργασία της χρησιμοποιείται στην συνεχεία για την επιλογή του καλύτερου τύπου της κάμινου που θα χρησιμοποιηθεί για ένα συγκεκριμένο τύπο scrap, την περιεκτικότητα σε οξείδια και το βαθμό ρύπανσης. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν επίσης την επιλογή των συλλιπασμάτων που συνδέονται με την διεργασία για την μεγιστοποίηση της ανάκτησης του αλουμινίου. Η επιλογή της τεχνολογίας που εφαρμόζεται διαφέρει από εγκατάσταση σε εγκατάσταση [3].

Το δευτερόχυτο αλουμίνιο, εάν ακολουθηθεί ο σωστός τρόπος παραγωγικής διαδικασίας, έχει τις ίδιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με το πρωτόχυτο αλουμίνιο. Η παραγωγή αλουμινίου από ανακυκλωμένο scrap απαιτεί μόνο το 5-10% της ενέργειας που απαιτεί η πρωτογενής παραγωγή. Και μειώνοντας την ανάγκη για εξόρυξη βωξίτη, η ανακύκλωση του αλουμινίου βοηθά στην αποφυγή των τοξικών μεταλλευτικών αποβλήτων. Η παγκόσμια δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου έχει αυξηθεί σταθερά από 2.6 εκατ. τόνους το 1970 σε περίπου 9 εκατ. τόνους το 2000. Από τότε ωστόσο η τάση αντιστράφηκε, αν και η πρωτογενής παραγωγή συνέχισε να αυξάνεται ραγδαία. Ενδεικτικά το 2008, η παραγωγή αλουμινίου από scrap ήταν 6,3 εκατ. τόνοι, που αντιστοιχεί στο 16% μόνο της συνολικής παραγωγής. Η εμπειρία της Ιαπωνίας είναι μοναδική κατά το ότι έχει εγκαταλείψει σχεδόν ολοκληρωτικά την

πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου, την οποία αντικατέστησε με τη δευτερογενή παραγωγή και τις εισαγωγές. Στις ΗΠΑ, η δευτερογενής παραγωγή από παλαιό scrap αντιστοιχεί στο 30% της παραγωγής, ενώ το νέο scrap (από την παραγωγική διαδικασία) διπλασιάζει αυτό το ποσοστό. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου έχει τριπλασιαστεί από το 1980 και έχει φτάσει το 40% του συνολικού [4].



Σχήμα 1.4 Συνοπτικό διάγραμμα παραγωγής αλουμινίου

### 1.3. Ιδιότητες αλουμινίου

Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό για την βιομηχανία είναι το χαμηλό του ειδικό βάρος, η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες. Το αλουμίνιο υφίσταται εύκολα κατεργασία με χύτευση και με αφαίρεση υλικού. Παρουσιάζει, επίσης, πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα [5].

Το αλουμίνιο βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος κατασκευών πράγμα που οφείλεται σε μια σειρά ιδιοτήτων που παρουσιάζει σε συνδυασμό με το χαμηλό του βάρος και τη σχετικά χαμηλή τιμή του. Έτσι σήμερα είναι το δεύτερο πιο



χρησιμοποιούμενο μέταλλο μετά το χάλυβα. Ενδεικτικά, χρησιμοποιείται σε δομικές κατασκευές, στις συσκευασίες τροφίμων και φαρμάκων, σε ηλεκτρικές εφαρμογές, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυπηγική, στην αεροδιαστημική και σε πληθώρα οικιακών και καταναλωτικών προϊόντων. Οι ιδιότητες του αλουμινίου διακρίνονται σε φυσικές και μηχανικές. Συγκεντρωτικά οι ιδιότητες αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Κρυσταλλική Δομή Κυβική εδροκεντρωμένη (FCC)		
Σταθερή σε θερμοκρασία από 4 K έως σημείο τήξης,		
$(\alpha = 4,0496 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , στους 298 K), διάμετρος ατόμου $2,86 \cdot 10^{-10} \text{ m}$		
Ατομικός Αριθμός	13	
Σθένος στις χημικές ενώσεις	3	
Ατομικό Βάρος	26,98	
Πυκνότητα	$2,7 \text{ g/cm}^3$	
Σημείο Τήξης	933,4 K ή 660,4 °C	
Θερμότητα Τήξης	397 J / g	
Σημείο Βρασμού	2.519 °C	
Θερμότητα Εξάτμισης	$1,08 \cdot 10^4 \text{ J / g}$	
Συντελεστής θερμικής Διαστολής	$(23 \text{ έως } 24,9) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ από 20 έως 127 °C	
Θερμική Αγωγιμότητα	$2,37 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ στους 25 °C	
Ηλεκτρική Αντίσταση	$2,6548 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ στους 20 °C	
Θερμοχωρητικότητα	$0,9 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Όριο Διαρροής	10 Mpa	
Όριο Θραύσης	45 Mpa	

*Πίνακας 1.1 Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου*

### 1.3.1. Φυσικές ιδιότητες

#### Πυκνότητα

Κατά κύρια ομολογία, η ελαφρότητα του αλουμινίου είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του. Εάν εξαιρέσουμε το μαγνήσιο και το τιτάνιο, το αλουμίνιο έχει το ένα τρίτο του βάρους των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μετάλλων. Έχει ατομικό βάρος 26,98 και ειδικό βάρος  $2,70 \text{ g/cm}^3$ . Όπως συμβαίνει και στα περισσότερα μέταλλα, με την αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται μείωση της πυκνότητας.



### **Ηλεκτρική αγωγιμότητα**

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα,  $\lambda$ , είναι αντίστροφη της αντίστασης και είναι από τις πιο ευαίσθητες ιδιότητες του αλουμινίου. Επηρεάζεται από τη σύνθεσή του και από τη θερμική του επεξεργασία. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του καθαρού αλουμινίου (99,99%) στους 20°C είναι στο 63,8 % του IACS (International Annealed Copper Standard). Λόγω του μικρού ειδικού βάρους του, είναι διπλάσια ανά μονάδα βάρους από αυτή του χαλκού και μεγαλύτερη από κάθε άλλο μέταλλο.

### **Θερμική αγωγιμότητα**

Η θερμική αγωγιμότητα,  $\kappa$ , του καθαρού αλουμινίου είναι 244W/mK για θερμοκρασία μεταξύ 0-100°C που είναι το 61,9 % του IACS. Όπως η ηλεκτρική, έτσι και η θερμική αγωγιμότητα λόγω του μικρού ειδικού βάρους είναι ανά μονάδα βάρους διπλάσια του χαλκού. Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης βάσει της σχέσης  $\kappa = 5,0\lambda T \times 10^{-9} + 0,03$  όπου  $T$  η θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν. Η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με την προσθήκη στοιχείων στα κράματα.

### **Αντοχή στη διάβρωση**

Το αλουμίνιο διακρίνεται για την σημαντική αντοχή του στη διάβρωση, αν και δεν είναι πολύ ευγενές μέταλλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αλουμίνιο και τα κράματά του αντιδρούν με το οξυγόνο και τους υδρατμούς του αέρα με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός λεπτού συμπαγούς φιλμ οξειδίου το οποίο προστατεύει το υποκείμενο μέταλλο από περαιτέρω προσβολή. Έτσι, το αλουμίνιο και τα περισσότερα από τα κράματά του που δεν περιέχουν χαλκό μπορεί να αποδειχθούν πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση, αν η τιμή του pH οποιουδήποτε υγρού επαφής βρίσκεται μεταξύ 5 και 8 (με αυτό το εύρος καλύπτονται οι περισσότερες υπάρχουσες ατμοσφαιρικές/περιβαλλοντικές συνθήκες). Κάτω από pH 5 και πάνω από 8, η μεν όξινη αντίδραση οδηγεί σε  $Al_3^+$  ιόντα, ενώ η αλκαλική σχηματίζει  $AlO_2^-$ . Το υγρό περιβάλλον θεωρείται εξαιρετικά υποβοηθητικό για τη λειτουργία της χημείας της διάβρωσης.



## **Μη μαγνητικότητα**

Το αλουμίνιο έχει μαγνητική διαπερατότητα,  $m$ , ελαφρώς μεγαλύτερη από τη μονάδα. Έχει πάρα πολύ μικρή μαγνητική ευαισθησία πράγμα που σημαίνει στις πρακτικές εφαρμογές ότι δεν έχει μαγνητισμό.

## **Ανακλαστική ικανότητα**

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται για την κατασκευή κατόπτρων δεδομένου ότι έχει μικρότερη ανακλαστική ικανότητα μόνο από εκείνη του άργυρου, παρουσιάζει όμως το πλεονέκτημα ότι μαυρίζει δυσκολότερα και είναι σημαντικά πιο οικονομικό.

### **1.3.2. Μηχανικές ιδιότητες**

Το εμπορικής καθαρότητας ανοπτημένο αλουμίνιο έχει όριο διαρροής τα 35MPa και αντοχή σε εφελκυσμό 47MPa. Βέβαια, η μηχανική αντοχή αυξάνεται με μηχανική κατεργασία «εν ψυχρώ» δηλαδή με εργοσκλήρυνση οπότε το όριο διαρροής και η αντοχή σε εφελκυσμό μπορούν να υπερβούν τα 150 και τα 200 MPa αντίστοιχα. Άρση της εργοσκλήρυνσης επιτυγχάνεται με ανόπτηση του αλουμινίου στους 350-400 °C. Τέλος με προσθήκη κραματικών στοιχείων προκύπτουν κράματα υψηλής μηχανικής αντοχής της τάξης ακόμα και των 700 MPa, με το κράμα 7118 (Zn=7%, Mg=3%, Cr=0,3%, Cu=2%, Al=87,7%) να αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αφού παρουσιάζει αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 607MPa [5].

## **Κατεργασιμότητα**

Έχει αναφερθεί και προηγουμένως ότι το αλουμίνιο διαθέτει κρυσταλλική δομή κυβικού χωροκεντρομένου και μάλιστα είναι το μόνο από τα ελαφρά μέταλλα με το χαρακτηριστικό αυτό. Η ιδιότητα αυτή δίνει στο αλουμίνιο τη δυνατότητα της εύκολης μορφοποίησης με μηχανικές κατεργασίες «εν ψυχρώ». Έτσι το αλουμίνιο ελάσσεται, διελάσσεται, εξελάσσεται, κλπ, οπότε μπορούν να παραχθούν φύλλα, ράβδοι, σύρματα, κλπ.

Το αλουμίνιο μπορεί να κατεργασθεί εύκολα με τα γνωστά μηχανουργικά εργαλεία και εργαλειομηχανές. Μάλιστα λόγω της μεγάλης θερμικής του αγωγιμότητας δεν παρουσιάζονται μεγάλες θερμοκρασίες κατά την κατεργασία ενώ προτιμότερες συνθήκες κατεργασίας είναι οι μεγάλες ταχύτητες και οι μικρές πιέσεις στο εργαλείο.



## **Συγκολλησιμότητα**

Οι μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται είναι οι ηλεκτρικές (τόξου, αντιστασης), με καύσιμα αέρια-οξυγόνο καθώς και με ετρογενή συγκόλληση με τη βοήθεια όμως κάποιων κατάλληλων συλλιπασμάτων προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα του πολυ δύστηκτου οξειδίου στην επιφάνεια του μετάλλου. Τα συλλιπάσματα αυτά πρέπει να απομακρύνονται μετά την κόλληση γιατί είναι πολυ διαβρωτικά. Συνεπώς προτείνονται μέθοδοι συγκολλήσεως που δεν χρειάζεται η χρήση συλλιπασμάτων όπως η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου.

### **1.3.3. Άλλες ιδιότητες του αλουμινίου**

Το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται και από μια σειρά άλλων ιδιοτήτων αρκετά σημαντικών που δικαιολογούν αντίστοιχες εφαρμογές του όπως είναι για παράδειγμα το ότι είναι μη αναφλέξιμο, μη τοξικό, ότι εμφανίζει πολύ μικρή μαγνητικότητα, η μικρή θερμική διαστολή και τέλος το ότι είναι εύκολα ανακυκλώσιμο [5].

## **1.4. Τα κράματα του αλουμινίου**

Το αλουμίνιο βρίσκεται στη δεύτερη θέση (μετά τους χάλυβες) όσον αφορά την παραγωγή και χρήση βιομηχανικών κραμάτων λόγω των εξαιρετικών του ιδιοτήτων. Επίσης το γεγονός αυτό εξηγείται και από το ότι με τη χρήση των κατάλληλων προσθηκών (κράματα αλουμινίου) παράγεται ένας μεγάλος αριθμός υλικών με πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Γενικά, τα κράματα αλουμινίου υπερτερούν κατά πολύ των χαλύβων με βάση τον λόγο αντοχή/βάρος, υστερούν όμως ελαφρώς από την άποψη της αντοχής του ερπυσμού, της φθοράς και της κόπωσης και φυσικά του υψηλότερου κόστους.

Τα κράματα του αλουμινίου (aluminium alloys) διατίθενται ως κράματα διαμόρφωσης ύστερα από έλαση, με μορφή μπιγιετών (ingots) ως κράματα χύτευσης και με μορφή σκόνης για εφαρμογές κωνιομεταλλουργίας. Τα κράματα διαμορφώσεως, κυρίως διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες: αυτά που σκληρύνονται με θερμική κατεργασία, συνήθως γήρανση, και αυτά που δεν επιδέχονται θερμικές κατεργασίες αλλά σκληρύνονται με ενδοτράχυνση ή προσθήκη κραματικών στοιχείων.



### 1.4.1. Κύρια κραματικά στοιχεία

Τα κυριότερα κραματικά στοιχεία στα κράματα αλουμινίου είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος, ενώ άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς [6].

Προσθήκη	% κ/β	% άτομα	Θερμοκρασία °C
Cu	5,6	2,5	745
Mg	14,9	16,3	569
Mn	1,8	0,9	944
Si	1,6	1,6	798
Zn	82,8	66,4	447
Mg <sub>2</sub> Si	1,8	1,9	740
MgZn <sub>2</sub>	16,9	9,6	614

*Πίνακας 1.2 Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται. Οι τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, και η παρουσία και άλλων στοιχείων στο κράμα επηρεάζει την διαλυτότητα.*

#### Χαλκός (Cu)

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σαν κύριο κραματικό στοιχείο, ή μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες από 1 έως 10%.

#### Μαγνήσιο (Mg)

Το μαγνήσιο παρέχει σημαντική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών της ψυχρηλασίας. Έχει σχετικά μεγάλη διαλυτότητα στο στερεό αλουμίνιο αλλά τα κράματα Al- Mg που περιέχουν Mg λιγότερο από 7% δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Το Mg προστίθεται επίσης σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία κυρίως χαλκό και ψευδάργυρο, για ακόμη καλύτερη ενίσχυση της αντοχής.

#### Μαγγάνιο (Mn)

Το μαγγάνιο έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου αλλά σε περιεκτικότητες περίπου 1% σχηματίζει μια σειρά από κατεργάσιμα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Προστίθεται ευρέως σαν συμπληρωματικό στοιχείο σε κράματα (επιδεκτικά ή μη επιδεκτικά θερμικής κατεργασίας) και προσδίδει σημαντική ενίσχυση.



### **Πυρίτιο (Si)**

Τα περισσότερα κράματα χύτευσης έχουν σαν κυρίαρχο κραματικό στοιχείο το πυρίτιο. Η προσθήκη πυριτίου βελτιώνει την χυτευσιμότητα και αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση. Επίσης μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.

### **Ψευδάργυρος (Zn)**

Ο ψευδάργυρος εισάγεται στα χυτευτικά κράματα και σε συνδυασμό με το μαγνήσιο στα κράματα διαμόρφωσης. Μειώνει τη χυτευσιμότητα, αλλά σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης παράγει κράματα που έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή μεταξύ των κραμάτων του αλουμινίου.

Πέρα από τα παραπάνω βασικά στοιχεία, στα κράματα συνηθίζεται να προστίθενται και άλλα στοιχεία σε μικρές ποσότητες. Μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω, καθώς επίσης και οι επιδράσεις τους στο κράμα.

### **Σιδηρός (Fe)**

Βελτιώνει την αντοχή και την σκληρότητα ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά την χύτευση. Η κατεργασιμότητα, η ολκιμότητα και η αντοχή σε κρούση μειώνονται όταν η περιεκτικότητα του σιδήρου στο κράμα είναι υψηλή.

### **Λίθιο (Li)**

Στα διαμορφωμένα κράματα και σε πολύ μικρές ποσότητες έως και 3% βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αντιθέτως, στα κράματα χύτευσης οι συνέπειες του είναι βλαβερές οπότε συνιστάται η περιεκτικότητά του να μην υπερβαίνει το 0,003%.

### **Ζιρκόνιο (Zr)**

Επηρεάζει την σκληρότητα και λειτουργεί ως σταθεροποιητής

### **Χρώμιο (Cr)**

Αυξάνει τις αντιστάσεις στη διάβρωση

### **Νικέλιο (Ni)**

Αυξάνει την αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες

### **Τιτάνιο (Ti)**

Προσδίδει στο κράμα μειωμένο μέγεθος





## 1.5. Σχεδιασμός, Ονοματολογία και εφαρμογές Κραμάτων Αλουμινίου

### 1.5.1. Κραματα Διαμόρφωσης (Wrought Alloys)

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου:

Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.

Το δεύτερο ψηφίο δείχνει τις διάφορες μορφές του αρχικού κράματος παραλλαγή (το 0 σημαίνει την πρωτότυπη σύσταση) που αντιστοιχεί σε μεταβολή 0.15% - 0.5% σε κραματικό στοιχείο.

Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο τις διαφορετικές μορφές του κάθε κράματος.

- 1xxx Καθαρό Al (Al >99,00%)
- 2xxx Κράματα Al-Cu
- 3xxx Κράματα Al-Mn
- 4xxx Κράματα Al-Si
- 5xxx Κράματα Al-Mg
- 6xxx Κράματα Al-Mg-Si
- 7xxx Κράματα Al-Zn
- 8xxx Κράματα Al με άλλα στοιχεία
- 9xxx Μη χρησιμοποιούμενη σειρά.

#### 1xxx Καθαρό Αλουμίνιο

- Σκληρώνεται με ενδοτράχυνση
- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικές σειρές: 1100, 1350
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69- 186 Μpa

Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00%min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και



1175 (99,75% min. Al) . Μερικοί τύποι , σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ησειρά 1xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Περισσότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων η φορτηγών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας [7].



*Εικόνα 1.10 (Αριστερά) Φύλο αλουμινίου για συσκευασία Al 1100 "Αλουμινόχαρτο" (Δεξιά)  
Καλώδιο αλουμινίου Al 1350*

### **2xxx ΚράματαAl-Cu**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Εφαρμογές σε μεταφορές ( αεροπλάνα τράινα)
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 2014, 2017, 2024, 2219, 2195
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 186 - 427 Μρα

Η σειρά 2xxx υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται η επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα ή πριτσίνια. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2219 και 2048)



συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται. Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές, έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και παρουσιάζοντας καλή συγκολλησιμότητα. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2124, 2324, 2419) με υψηλή ακαμψία και στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής, και αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία αεροσκαφών. Τα κράματα 2011, 2017 και 2117 χρησιμοποιούνται ευρέως για βίδες και ροδέλες [7].



*Εικόνα 1.11 (Αριστερά) Επένδυση με φύλλα αλουμινίου Al 2024 σε αεροσκάφος. (Δεξιά)  
Βυτίο επικαθήμενο καυσίμων από αλουμίνιο Al 2014*

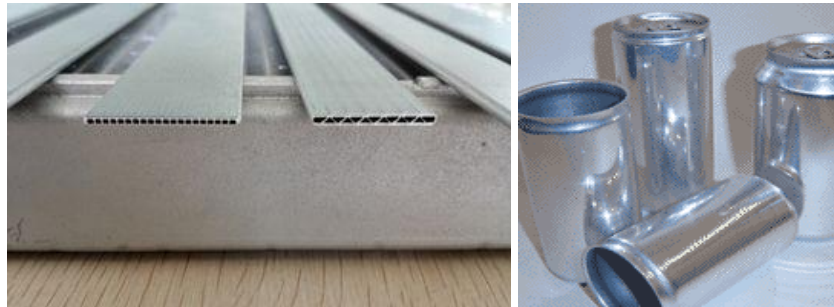
### **3xxx Κράματα Al-Mn**

- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα. Μέτρια αντοχή.
- Χρησιμοποιείται για αγωγούς μεταφοράς θερμότητας, συσκευασία και εφαρμογές στέγης και πλαϊνών τοιχωμάτων.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 3003, 3004, 3005.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 110-282 Μpa

Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιγάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτιριακές υποδομές. Το κράμα 3105 είναι ένα από τα βασικά για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτιρίων. Τα διάφορα κράματα της σειράς 3xxx χρησιμοποιούνται σε μορφή λαμαρίνας και σωλήνα για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς. Τα κράματα 3004 και το 3104 είναι



μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κραμάτων λόγω της χρήσης τους στα τενεκεδάκια των αναψυκτικών.



*Εικόνα 1.12 (Αριστερά) Εξωθημένος σωλήνας θερμαντικών σωμάτων αργιλίου για τους αυτοκινητικούς ανταλλάκτες θερμότητας Al 3003 / 3102. (Δεξιά) Τενεκεδάκια των αναψυκτικών από αλουμίνιο Al 3004*

#### **4xxx Κράματα Al-Si**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Καλά χαρακτηριστικά ροής , μέτρια αντοχή.
- Πιστόνια , σφυρήλατα πολύπλοκου σχήματος.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 4032 και υλικό ηλεκτροδίων 4043.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172- 380 Mpa

Από τα δυο περισσότερο χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς 4xxx , το 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών. Από την άλλη πλευρά το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα. Το ίδιο χαρακτηριστικό (της εύκολης σφυρηλασίας) οδηγεί στις εφαρμογές της σειράς. Πολύ καλή ολκιμότητα που οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε Si, στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων εξασφαλίζει το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών , στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται [8].



*Εικόνα 1.13 (Αριστερά) Σφυρήλατο πιστόνι αλουμινίου Al 4032 . (Δεξιά) Ράβδοι συγκόλλησης αλουμινίου Al 4043*

### **5xxx Κράματα Al-Mg**

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση καλή συγκολλησιμότητα και καλή δυσκαμψία. Ενδιάμεση αντοχή.
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, κρυογενικά υλικά, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 5052, 5083, 5754.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172-380 Mpa

Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυξηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0°K. Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κτιριακά και κατασκευές, κατασκευές γεφυρών δοχεία αποθήκευσης και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες -270°C και εφαρμογές κοντά στη θάλασσα. Τα κράματα 5052, 5086 και 5083 χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατασκευές με την αντοχή να αυξάνει καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε Mg. Ειδικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν το 5182 (ο πυθμένας από το τενεκεδάκι των αναψυκτικών) το 5754 για σωληνωτό πλαίσιο αυτοκινήτων και 5252, 5457 και 5657 για εμφανίσιμες εφαρμογές (φτερά, καπό αυτοκινήτου κ.λ.π.). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5xxx με Mg >3%, σε εφαρμογές συνεχούς έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 100°C. Τέτοια κράματα μπορεί να ευαισθητοποιηθούν σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται κράματα σαν τα 5454 και 5754.



*Εικόνα 1.14 (Αριστερά) Πλαίσιο σκάφους αλουμινίου Al 5754 . (Δεξιά) Φτερα και καπό αυτοκινήτου αλουμινίου Al 5252*

### **6xxx Κράματα Al-Mg-Si**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική ολκιμότητα, ενδιάμεση αντοχή.
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 6061, 6063, 6111
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 125- 400 Mpa

Τα κράματα της σειράς 6xxx δέχονται θερμική κατεργασία, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση. Συγκολλούνται εύκολα. Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει την πρώτη εκλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή. Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη γέφυρα Foresmo της Νορβηγίας και είναι το κράμα που η Audi έχει επιλέξει για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της. Το κράμα 6061 με υψηλότερη αντοχή βρίσκει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές συνδεδεμένες με συγκολλήσεις όπως φορτηγά, βαγόνια τραίνου και σωληνώσεις. Μεταξύ των ειδικών κραμάτων της σειράς: 6066-T6 με υψηλή αντοχή για σφυρήλατα 6111 για panel πλαισίων αυτοκινήτου και 6101 και 6201 για υψηλής αντοχής ηλεκτρικούς αγωγούς [9].

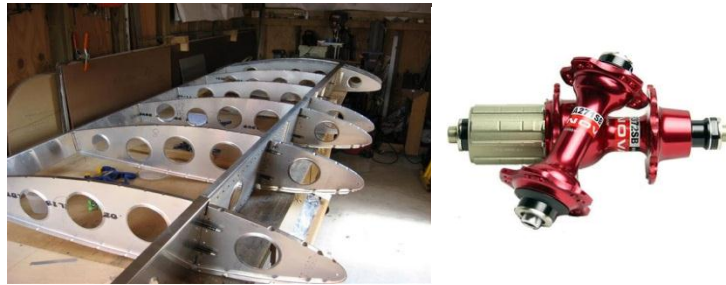


*Εικόνα 1.15 (Αριστερά) Σκελετός ποδηλάτου αλουμινίου Al 6061 . (Δεξιά) Πεζογέφυρα αλουμινίου Al 6063*

### **7xxx Κράματα Al-Zn**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Πολύ μεγάλη αντοχή, τύποι εξαιρετικής ακαμψίας.
- Εφαρμογές ζαυτοκινήτων και αεροδιαστημικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 7005,7075,7475,7150
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220-605 Μpa

Τα κράματα της σειράς 7xxx υφίστανται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που παράγονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, κυρίως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας. Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν θεωρούνται συγκολλησίμα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια. Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται η αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα (Alclad). Στις περιπτώσεις που υπάρχει υποψία για κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων (stress corrosion cracking) πρέπει να εφαρμόζεται θερμική T73 αντί για T6 [10].



*Εικόνα 1.16 (Αριστερά) Σκελετός πτερυγίου αλουμινίου Al7075 . (Δεξιά) Κέντρα ζαντας ποδηλατου αλουμινίου Al 7475*

### **8xxx Κράματα Al - με άλλα στοιχεία.**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αγωγιμότητα και αντοχή, σκληρότητα.
- Ηλεκτρικές εφαρμογές και αεροδιαστημικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 8017,8176,8081,8280,8090.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 117-241 Mpa

Η σειρά 8xxx χρησιμοποιείται για τα κράματα μετα λιγότερα χρησιμοποιούμενα κραματικά στοιχεία Fe, Ni, και Li. Το καθέ να χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα: Τα Fe και Ni παρέχουν αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αντιπροσωπευτικό 8017). Το Li στο 8090 παρέχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας , έτσι χρησιμοποιείται για αεροδιαστημικές εφαρμογές [11].



*Εικόνα 1.17 Κατασκευή Boeing από κράμα αλουμινίου-λιθίου Al 8090.*





Τομείς εφαρμογών	Προϊόντα	Κράματα που χρησιμοποιούνται
Αεροπορική βιομηχανία	κατασκευές υψηλών αντοχών	2014 2014A 2017A 2024 7010 7075
	κατασκευές μέσης αντοχής	6061 6082
Αυτοκινητοβιομηχανία	σκελετοί με προφίλ	6005A 6060 6063 6082
	σφυρήλατα	2014 6082
	οροφές/σώμα	1200 3003 3103 5005
	ταμπέλες αριθμών κυκλοφορίας	1200
	δεξαμενές καυσίμων	5083 5251 5454
Οικοδομή	ψευδοοροφές	1050A 1200 3003 3103 5005 5005A 6060
	πόρτες / παράθυρα/ προσόψεις	6060 6063 6082
	σκάλες	6060 6063 6082
	πάνελς	1050A 1200 3003 3103 5005A 5052 5251 5754
	κάγκελα	6060 6061 6063 6082
	πύργοι/σκαλωσιές	5083 5086 6061 6082
Χημική βιομηχανία	δοχεία	1005 3003 3103 5005 5005A
	σωλήνες	1050A 1200 3003 3103 5005 5005A 5052 5154A 5251 5454 5754 6061 6082
	δοχεία πίεσης	5052 5083 5086 5154A 5251 5454 5754
	δεξαμενές	3003 3103 5083 5086 5154A 5454 5754
Ηλεκτρικές εφαρμογές	κεραίες/δορυφορικές	5251 6063 6082
	ψύκτρες	6060 6063
	κέλυφος κινητήρα	6060 6063 6082
	πυλώνες	5083 5454 6005A 6061 6082 7020
Γενικές κατασκευές	κατασκευές υψηλών αντοχών	2014 2014A 2017A 2024 7075
	υδραυλικά συστήματα	2017A 2024 6082 7075



	σωληνώσεις	1050A 3003 3103 5005 5005A 5052 5083 5086 5154 5251 5754 6005A 6061 6082
	πλατφόρμες	5083 5086 6005A 6082 7020
	πνευματικά συστήματα	6005A 6060 6063 6082
	δοχεία	1050A 5005A 5083 5086 5454 5754
	συγκολλημένες κατασκευές	5083 5086 5154A 5251 6060 6063 6082 7020
<b>Οδοποιία</b>	γέφυρες	6061 6082 7020
	πινακίδες	5005 5005A 5052 5251
	φωτιστικά	5251 6060 6061 6063 6082
<b>Εξοπλισμός</b>	συναρμολογούμενα συστήματα	6060 6063
	έπιπλα	5005 5005A 6005A 6060 6063
	συσκευές γραφείου	3003 3103 5154A 5754 6060 6063
<b>Συνδέσεις</b>	βίδες/παξιμάδια	2007 2011 2024 2030 6061 6082 7075
	πριτσίνια	2017A 2024 5052 5754 6061 6082 7075
<b>Ναυπηγική</b>	βάρκες/ σκάφη ανοικτής θαλάσσης	5005 5005A 5083 5086 5251 5454 5754 6005A 6061 6082
	κατάρτια	5454 6005A 6061 6082
<b>Συσκευασία</b>	σώμα κουτιών	5052
	καπάκια	1050A 3003 3103
	Foil	1050A 1200
<b>Όργανα Σπορ</b>	ποδήλατα	6082 7020
	σκι	7075
	ρακέτες τένις	7075

*Πίνακας 1.3 Συγκεντρωτικός πίνακας χρήσεων των κραμάτων αλουμινίου*

### **1.5.2. Τα Κράματα Χύτευσης (Cast Alloys)**

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου:



Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.

Το δεύτερο και τρίτο ψηφία δείχνουν τις διάφορες μορφές του κράματος.

Το τέταρτο ψηφίο αυτό που βρίσκεται μετά την υποδιαστολή, δηλώνει την μορφή του χυτού. Εάν δηλαδή είναι χυτό (casting) που συμβολίζεται με το 0 ή χελώνα (ingot) που συμβολίζεται με το 1 και το 2 (π.χ. 357.0) [12].

1xx.x Καθαρό Al (Al >99,00%)

2xx.x Κράματα Al-Cu

3xx.x Κράματα Al-Si + Cu και / η Mg.

4xx.x Κράματα Al-Si

5xx.x Κράματα Al-Mg

6xx.x Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

7xx.x Κράματα Al-Zn

8xx.x Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία

9xx.x Κράματα Al-με άλλα στοιχεία

Οι μέθοδοι χύτευσης που εφαρμόζονται και οι αντίστοιχοι συμβολισμοί τους αναφέρονται παρακάτω:

- S : Χύτευση σε άμμο (sand casting)
- P : Χύτευση σε μεταλλικό τύπο (permanent mold casting)
- D : Χύτευση υπο πίεση (die casting)

Η χύτευση σε άμμο χρησιμοποιείται για παραγωγή μικρής ποσότητας όμοιων χυτών αντικειμένων με πολύπλοκη μορφή. Με τη χύτευση σε μεταλλικό τύπο δημιουργούνται ανθεκτικότερα κράματα με μικρότερο πορώδες, σε σύγκριση με τη χύτευση σε άμμο, τα οποία είναι μονοκρυσταλλικά. Με την μέθοδο χύτευσης υπο πίεση επιτυγχάνονται μεγάλες ταχύτητες χύτευσης, μικροκρυσταλλικές δομές, λείες επιφάνειες, μικρότερες ανοχές και δυνατότητα αυτοματοποίησης της διεργασίας.

Σε αντίθεση με τα κατεργάσιμα κράματα, τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες κραματικών στοιχείων όπως πυριτίου και χαλκού. Αυτό προκαλεί μια μεγάλη ετερογενή δομή π.χ. μια σημαντική ποσότητα δεύτερης φάσης. Αυτή η δεύτερη φάση απαιτεί πολύ προσεκτική μελέτη, διότι κάθε άγριο, κοφτερό και εύθραυστο συστατικό μπορεί να δημιουργήσει εσωτερικές εγκοπές και να ξεκινήσει ρωγμές όταν το χυτό τοποθετηθεί αργότερα σε συνθήκες φορτίου. Οι μεγάλες ετερογενείς δομές δεν έχουν καλές αντοχές σε κόπωση. Καλές μεταλλουργικές και χυτευτικές τεχνικές μπορούν να προλάβουν τέτοια σφάλματα. Η

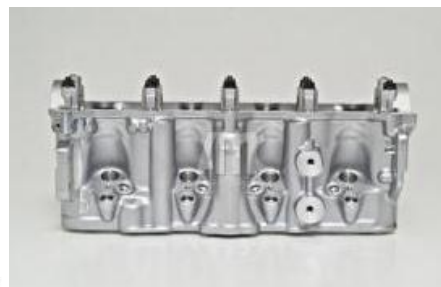


επιμήκυνση και η αντοχή, ειδικά στην κόπωση, των περισσότερων χυτών είναι σχετικά χαμηλότερες από αυτές των κατεργάσιμων προϊόντων. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τεχνικές χύτευσης ακόμη δεν μπορούν να προλάβουν τα χυτευτικά σφάλματα.

## **2xx.x Κράματα Al-Cu**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι και στο «χώμα».
- Υψηλές αντοχές σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες. Μερικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη.
- Εφαρμογές για αεροσκάφη, αυτοκίνητα και μηχανές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 201.0, 203.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-450 Mpa

Το περισσότερο ανθεκτικό κράμα είναι το 201.0/AlCu4Ti (Ντουραλουμίνιο) που επιδέχεται θερμική κατεργασία. Η χυτευσιμότητα του περιορίζεται λόγω της τάσης σχηματισμού μικροπορώδους και «θερμών σταγόνων» (hot tears) έτσι καλύτερα ταιριάζει στις μεθόδους επενδυμένων κελυφών. Η μεγάλη του αντοχή σε κάμψη το κάνει ιδιαίτερα κατάλληλο για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης σε εργαλειομηχανές, σε εφαρμογές ηλεκτρολογικού υλικού και στη κατασκευή αεροσκαφών. Εκτός από τα κανονικά κράματα χύτευσης, υπάρχουν ειδικά κράματα για ιδιαίτερα εξαρτήματα π.χ. κεφαλές μηχανής, σώματα μηχανής ή κουζινέτα. Για τέτοιες εφαρμογές το επιλεγμένο κράμα απαιτεί καλή αντοχή στη φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής, όπως επίσης κατάλληλη αντοχή σε συνθήκες λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών. Ένα καλό παράδειγμα είναι το κράμα 203.0/AlCu5NiCo που σήμερα είναι το κράμα χύτευσης με την μεγαλύτερη αντοχή στους 200 °C [12].



**Εικόνα 1.18** (Αριστερά) Στήριγμα σωλήνας χυτού αλουμινίου 201.0. (Δεξιά) Κυλινδροκεφαλή αυτοκινήτου χυτού αλουμινίου 203.0



### **3xx.x Κράματα Al-Si+Cu ή Mg**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι ,στο «χώμα» και σε χυτόπρεσσα
- Εξαιρετική χυτευσιμότητα , υψηλή αντοχή, μερικά δε κράματα με υψηλή αντοχή σε κάμψη.
- Εφαρμογές σε εξαρτήματα αυτοκινήτου, πιστόνια, αντλίες ηλεκτρολογικά εξαρτήματα.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 356.0, A356.0, 359.0, A360.0.
- Εύρος αντοχής σε εφέλκυσμό: 131-275 Μpa

Η σειρά 3xx.x των χυτών είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες σειρές λόγω της ελαστικότητας που προσδίδει του ψηλό σε πυρίτιο ποσοστό, όπως και της πολύ καλής χυτευσιμότητας. Σε αυτές τις ιδιότητες πρέπει να προστεθεί και μια ποικιλία υψηλών αντοχών μετά από θερμική κατεργασία. Επιπλέον η σειρά 3xx.x μπορεί να χυτευθεί με τις περισσότερες τεχνικές, από «χώμα» και χυτόπρεσσα μέχρι πολύπλοκα μεταλλικά καλούπια και με τις μεθόδους του χαμένου κεριού και του χαμένου ομοιώματος πολυστυρενίου καθώς και τις πολύ νέες «θιξοχύτευση» και χύτευση squeeze. Μεταξύ των περισσότερο γνωστών είναι τα 319.0 356.0/A356.0 για «χώμα» και σε μεταλλικό καλούπι , 360.0, 380.0/A380.0 και 390.0 για χυτόπρεσσα και 357.0/A357.0 για τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Το κράμα 332.0 είναι επίσης ένα πολύ διαδεδομένο κράμα που μπορεί να παραχθεί αποκλειστικά σχεδόν από ανακύκλωση [12].



*Εικόνα 1.19* Ανεμιστήρας χυτού αλουμινίου A380.0 .

#### **4xx.x Κράματα Al-Si**

- Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι, «χώμα» και χυτόπρεσσα.
- Εξαιρετική χυτευσιμότητα πολύ καλή για περίπλοκα χυτά.
- Πλαίσια γραφομηχανών, εξοπλισμός οδοντιατρείου, παραθαλάσσιες εφαρμογές και διακοσμητικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 413.0, 443.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Μρα

Το κράμα B413.0/AlSi12 είναι γνωστό για την καλή χυτευσιμότητα του και την καλή συγκολλησιμότητα που οφείλονται στην ευτηκτική του σύνθεση και το χαμηλό σημείο τήξης ( $570^{\circ}\text{C}$ ). Συνδυάζει μέτρια αντοχή με μεγάλη επιμήκυνση και καλή αντοχή σε διάβρωση. Το κράμα είναι καλό για πολύπλοκες λεπτές διατομές με καλή αντοχή σε κόπωση [12].



*Εικόνα 1.20* Εξαρτήματα φωτισμού Led χυτού αλουμινίου 413.0 .

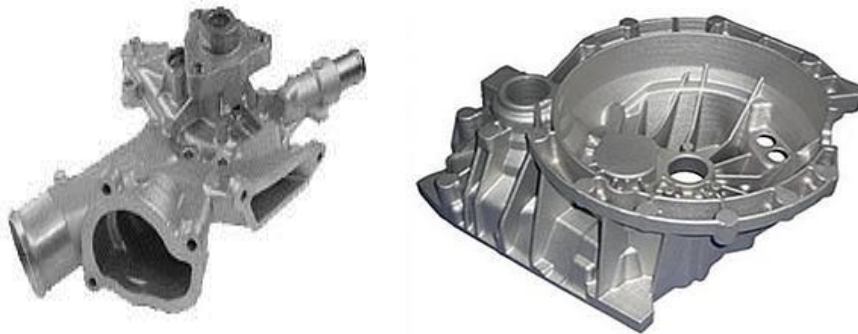
#### **5xx.x Κράματα Al-Mg**

- Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι και στο «χώμα»
- Εξαιρετική αντοχή τους στη διάβρωση όσο και για την μηχανική τους αντοχή.
- Παραθαλάσσιες εφαρμογές και διακοσμητικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 512.0, 514.0

Η σειρά 5xx.x των χυτών είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες σειρές λόγω της εξαιρετικής τους αντοχής σε θαλάσσιο περιβάλλον, ( στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε



Θαλασσινό νερό). Έχουν καλή κατεργασιμότητα αλλά μέτρια χυτευσιμότητα. Διακρίνονται τόσο για την εξαιρετική αντοχή τους στη διάβρωση όσο και για την μηχανική τους αντοχή. Υπάρχουν κράματα της σειράς αυτής (512.0, 514.0) τα οποία έχουν πολύ καλή επιμηκνσιμότητα. Επίσης τέτοια κράματα τα συναντάμε και στην κατασκευή κουφωμάτων για πόρτες και παράθυρα διότι υπάρχει η δυνατότητα καλαίσθητου μεταλλικού φινιρίσματος με ανοδίωση. Επιπλέον χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για κατασκευή κιβωτίων ταχυτήτων [13].



*Εικόνα 1.21 (Αριστερά) Αντλία νερού αυτοκίνητου χυτού αλουμινίου 512.0. (Δεξιά) Κέλυφος συμπλέκτη αυτοκίνητου χυτού αλουμινίου σειράς 5xx.x*

### **7xx.x Κράματα Al-Zn**

- Επιδέχονται θερμική κατεργασία. Έχουν πάρα πολύ μικρή χυτευσιμότητα. Χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι και στο «χώμα»
- Υψηλές μηχανικές ιδιότητες και καλή αντοχή σε διάβρωση.
- Διακοσμητικές εφαρμογές, έπιπλα, εργαλεία κηπουρικής και λοιπά.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 705.0, D712.0, 771.0

Χαρακτηριστικό μειονέκτημα των κραμάτων της σειράς 7xx.x των χυτών είναι η δύσκολη χυτευσή τους και το ότι χρειάζεται πάροδος μεγάλου χρονικού διαστήματος για να λάβουν τη μέγιστη μηχανική αντοχή και αυτή επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της γήρανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται από την ταχύτητα απόψυξης, έχουν όμως το πλεονέκτημα ότι μένουν σταθερές σε όλο το πάχος του χυτού. Έτσι, η σειρά αυτή χρησιμοποιείται για την κατασκευή επίπλων εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, εργαλείων γεωργικών και εξοπλισμό εξορύξεων [13].



*Εικόνα 1.22 (Αριστερά) Εξάρτημα CNC εργαλειομηχανής χυτού αλουμινίου D712.0 . (Δεξιά)  
Βάση τραπεζιού χυτού αλουμινίου σειράς 7xx.x*

### **8xx.x Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία**

- Επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι και στο «χώμα»
- Υψηλές υψηλή αντοχή στην φθορά.
- Εμφάνιση και φινίρισμα καθώς και την κατασκευή ρουλεμάν.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 850.0, 851.0, 852.0

Τα κράματα της σειράς 8xx.x όπως και τα κράματα της σειράς 7xx.x παρουσιάζουν πολύ μεγάλη δυσκολία στην χύτευση. Επομένως χρησιμοποιούνται μόνον όπου είναι σημαντικές και απαραίτητες οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Εφαρμογές των κραμάτων αυτής της σειράς βρίσκουμε κατα κύριο λόγο στην κατασκευή ρουλεμάν αλλά και σε μηχανές εσωτερικής καύσης [13].



*Εικόνα 1.23 Μπλοκ κινητήρα αυτοκινήτου χυτού αλουμινίου σειράς 8xx.x*





### 1.5.3. Βασικές Κατεργασίες αλουμινίου (κωδικοποίηση)

Πέρα από τους τέσσερις αριθμούς της κωδικοποίησης των κραμάτων αλουμινίου, η ονοματολογία περιλαμβάνει και κάποια χαρακτηριστικά γράμματα τα οποία είναι δηλωτικά της κατεργασίας είτε αυτή είναι θερμική, είτε μηχανική, στην οποία έχει υποβληθεί το κράμα. Τα σύμβολα αυτά φαίνονται παρακάτω πίνακα και παρέχονται από την Συνομοσπονδία Αλουμινίου (Aluminium Association). Οι κωδικοί είναι ίδιοι για τα κράματα διαμόρφωσης και χύτευσης (με εξαίρεση τα πλινθώματα) σύμφωνα με την Aluminum Association.

Κωδικός	Κατεργασία
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης
	H1X Μόνον ενδοτράχυνση (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης)
	H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας
	H12: Κράμα σκληρυμένο κατά 25 %
	H14: Κράμα σκληρυμένο κατά 50 %
	H16: Κράμα σκληρυμένο κατά 75 %
	H18: Κράμα σκληρυμένο κατά 100 %
	H19: Υπέρσκληρο κράμα
	H2X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	H3X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση
	T1 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση.
	T2 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
	T3 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
	T4 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.
	T5 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
	T6 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
	T7 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.
	T8 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
T9 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.	
T10 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.	
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

*Πίνακας 1.4 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A., των κραμάτων αλουμινίου, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί.*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. Γραφένιο (Graphene)

#### 2.1. Εισαγωγή στον άνθρακα

Ο άνθρακας είναι ένα αμέταλλο χημικό στοιχείο με σύμβολο C (Carbon) και ατομικό αριθμό 6 ( $Z=6$ ). Είναι το πρώτο στοιχείο της 14ης ομάδας του περιοδικού πίνακα και δρα σχεδόν πάντα ως τετρασθενές στοιχείο σχηματίζοντας 4 χημικούς δεσμούς. Ο άνθρακας είναι ένα από τα λίγα στοιχεία που είναι γνωστά από την αρχαιότητα [14].

#### 2.2. Μορφές του άνθρακα

Ο άνθρακας μπορεί να υπάρξει σε διάφορες μορφές, φυσικές και μη, οι οποίες ονομάζονται αλλοτροπικές. Το πλήθος των αλλοτροπικών μορφών του άνθρακα οφείλεται στο σθένος του και μπορεί να υπάρξει ως άμορφος άνθρακας, ως γραφίτης και ως διαμάντι, όσον αφορά τις φυσικές του μορφές. Οι κυριότερες τεχνητές μορφές που μπορεί να δημιουργήσει είναι τα φουλερένια (foullerenes), οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes), τα nanobuds άνθρακα και το γραφένιο [14].

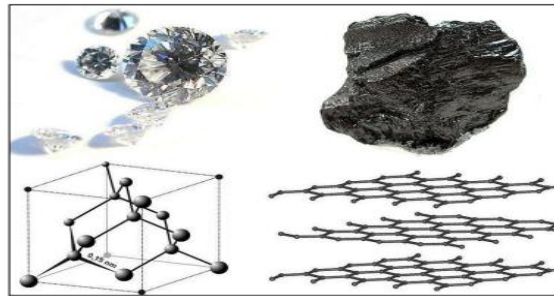
Οι αλλότροπες μορφές του άνθρακα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- **Φυσικές μορφές άνθρακα:** γραφίτης, διαμάντι και άμορφος άνθρακας
- **Τεχνητές μορφές άνθρακα:** φουλερένια, νανοσωλήνες άνθρακα, ίνες άνθρακα και το γραφένιο

#### Το διαμάντι

Το διαμάντι, σε αντίθεση με τον άμορφο άνθρακα, ανήκει στις αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα που έχουν κρυσταλλική δομή, στην οποία το κάθε άτομο άνθρακα συνδέεται μέσω ομοιοπολικών δεσμών με άλλα τέσσερα άτομα άνθρακα, σχηματίζοντας έτσι ένα τετράεδρο. Το διαμάντι αποτελεί το πιο σκληρό ορυκτό που βρίσκεται στη φύση, ιδιότητα η οποία το κάνει ιδανικό για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η χρήση του για κοπή άλλων υλικών. Το διαμάντι δημιουργείται σε μεγάλα βάθη στη μέση στη γη και κάτω από συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, και εμφανίζει μια αξιοσημείωτη θερμοαγωγιμότητα. Επιπρόσθετα υπάρχουν και τα

συνθετικά διαμάντια τα οποία και αυτά βρίσκουν εφαρμογές στη βιομηχανία, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ημιαγωγοί σε μικροτσιπ [15].



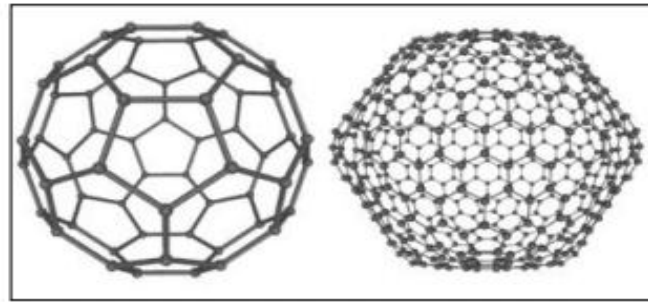
*Εικόνα.2.1 (Αριστερά) Το διαμάντι . (Δεξιά) Ο γραφίτης . Στο κάτω μέρος της εικόνας βρίσκονται οι αντίστοιχες κρυσταλλικές δομές.*

## **Ο γραφίτης**

Ο γραφίτης πήρε το όνομα του το 1789 από το αρχαίο Ελληνικό ρήμα «γράφω», λόγω της χρήσης του στα μολύβια. Σε αντίθεση με το διαμάντι ο γραφίτης είναι ηλεκτρικός αγωγός. Κάθε άτομο άνθρακα στον κρύσταλλο του γραφίτη δημιουργεί τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς με τρία γειτονικά άτομα άνθρακα που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (τα ηλεκτρόνια αυτά είναι εντοπισμένα στο χώρο μεταξύ των ατόμων). Το τέταρτο ηλεκτρόνιο του κάθε ατόμου, που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός π-δεσμού, είναι απεντοπισμένο και μπορεί να κινείται ελεύθερα κατά μήκος του επιπέδου. Ακριβώς σε αυτά τα απεντοπισμένα ηλεκτρόνια οφείλεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του γραφίτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο γραφίτης άγει ηλεκτρισμό σε αποκλειστικά παράλληλη προς τα επίπεδα των ατόμων κατεύθυνση [15].

## **Τα φουλερένια (Fullerenes)**

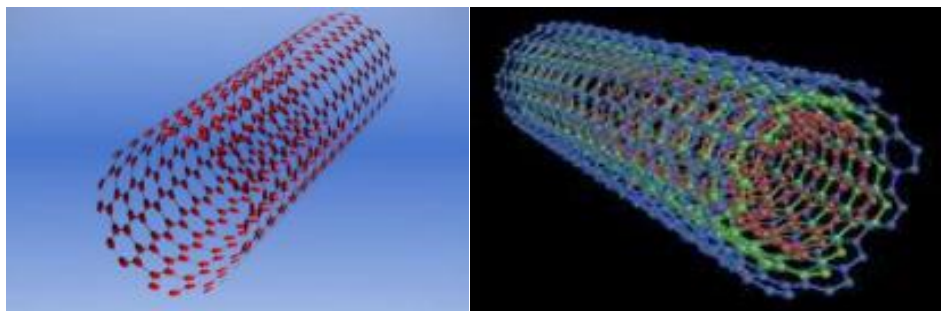
Τα φουλερένια ανακαλύφθηκαν το 1985 και η ανακάλυψη αυτή τιμήθηκε με το Nobel Χημείας το 1995. Είναι μόρια διαφόρων μεγεθών, τα οποία αποτελούνται αποκλειστικά από άνθρακα και το σχήμα τους μπορεί να είναι κυκλικό, ελλειψοειδές ή σωληνοειδές.



*Εικόνα 2.2 Φουλερένια. (Αριστερά) Μόριο  $C_{60}$  (Δεξιά) Μόριο  $C_{540}$ .*

## Νανოსωλήνες άνθρακα (Carbon nanotubes)

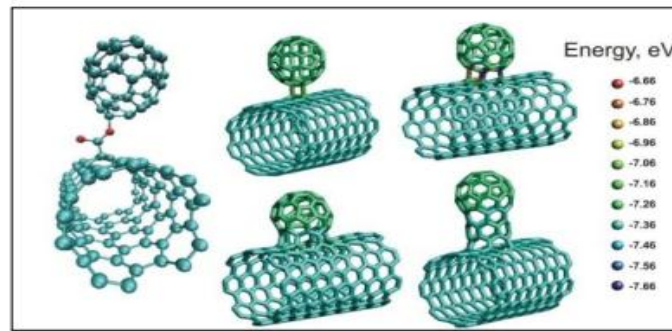
Οι νανოსωλήνες άνθρακα είναι κυλινδρικά μόρια άνθρακα τα οποία εμφανίζουν εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες και είναι πολύ καλοί θερμοαγωγοί. Η διάμετρος ενός νανოსωλήνα άνθρακα ανέρχεται σε μερικά nm, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά cm. Τα άκρα του νανοςωλήνα μπορεί να είναι και τα δύο ανοιχτά, η το ένα ανοιχτό και το άλλο κλειστό, η και τα δύο κλειστά. Εκτός από τους οργανικούς νανοςωλήνες άνθρακα, έχουν συντεθεί και ανόργανοι νανοςωλήνες (π.χ. οι WS<sub>2</sub>). Οι νανοςωλήνες κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στους νανοςωλήνες μονού τοιχώματος (Single Wall Nanotubes SWNT) και στους νανοςωλήνες πολλαπλού τοιχώματος (Multi Wall Nanotubes MWNT), οι οποίοι αποτελούνται από ομόκεντρος κυλίνδρους.



*Εικόνα 2.3 (Αριστερά) Single Wall Nanotubes SWNT. (Δεξιά) Multi Wall Nanotubes MWNT*

## Nanobuds άνθρακα

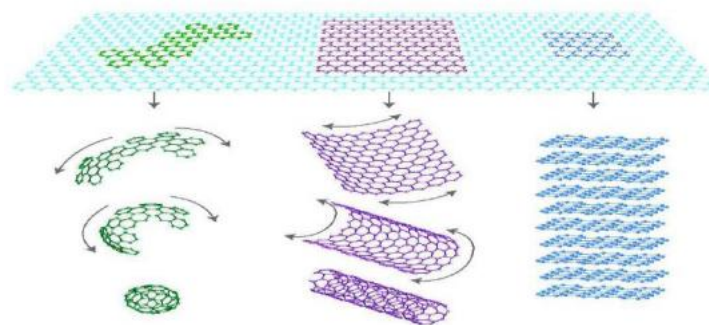
Τα nanobuds άνθρακα ανακαλύφθηκαν πρόσφατα και αποτελούν υβριδικά υλικά άνθρακα, αφού αποτελούνται από ένα νανοςωλήνα άνθρακα και ένα φουλερένιο, τα οποία είναι συνδεδεμένα με έναν ομοιοπολικό δεσμό, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Τα nanobuds άνθρακα εμφανίζουν τις ιδιότητες των νανοςωλήνων και των φουλερενίων ταυτόχρονα.



*Εικόνα 2.4* Διάφορα σταθερά nanobuds άνθρακα

## 2.3. Γραφένιο

Το γραφένιο το οποίο αποτελεί μια αλλοτροπική μορφή άνθρακα, είναι ένας δισδιάστατος κρύσταλλος αποτελούμενος αποκλειστικά από άτομα άνθρακα ισχυρώς συνδεδεμένα μεταξύ τους. Μέχρι το 2004, εθεωρείτο ότι οι αυστηρώς δισδιάστατοι κρύσταλλοι δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι στη φύση γιατί είναι θερμοδυναμικά ασταθείς. Αυτό υποστηρίχθηκε από το γεγονός ότι σε μικρών διαστάσεων κρυσταλλικό πλέγμα, οι θερμικές διακυμάνσεις μπορούν να οδηγήσουν σε τέτοιες μετατοπίσεις των ατόμων του πλέγματος, οι οποίες είναι συγκρίσιμες με τις ενδοατομικές αποστάσεις [16].



*Εικόνα 2.5* (Αριστερά) Το γραφένιο τυλίγεται δημιουργώντας φουλερένιο (0D). (Κέντρο) Το γραφένιο διπλώνεται δημιουργώντας νανοσωλήνα άνθρακα (1D) (Δεξιά) Το γραφένιο στοιβάζεται δημιουργώντας γραφίτη (3D)

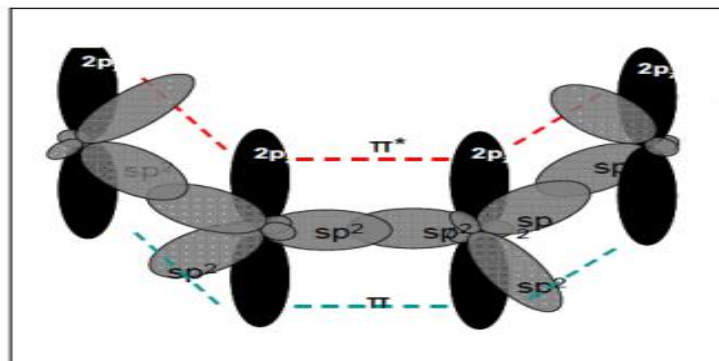
Το 2004, στο πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ, οι Andre Geim και Kostya Novoselov, κατάφεραν να απομονώσουν μονατομικού πάχους δισδιάστατο κρυσταλλίτη, ο οποίος φέρει το όνομα γραφένιο. Η ανακάλυψη αυτή τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 2010. Στον δισδιάστατο αυτό κρύσταλλο, οι ισχυροί ενδοατομικοί δεσμοί δεν επιτρέπουν στις θερμικές διακυμάνσεις να οδηγήσουν σε σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις των ατόμων στο πλέγμα, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες [17]. Το γραφένιο αποτελεί το γεννήτορα δομών μηδενικών

διαστάσεων (φουλερένια), μονοδιάστατων δομών (νανοσωλήνες άνθρακα) και τρισδιάστατων δομών (γραφίτης) [18].

Το γραφένιο διακρίνεται σε τρεις τύπους, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του ηλεκτρονικού φάσματος που εμφανίζει: Στο μονοστρωματικό γραφένιο πάχους ενός ατόμου άνθρακα, στο διστρωματικό γραφένιο πάχους δύο ατόμων άνθρακα και στο πολυστρωματικό γραφένιο πάχους από τρία έως δέκα άτομα άνθρακα. Για πάχη μεγαλύτερα από 10 άτομα άνθρακα θεωρείται ότι έχουμε τρισδιάστατη δομή γραφίτη [19].

### 2.3.1. Δομή του γραφενίου

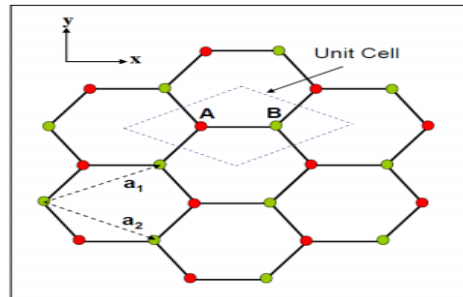
Ο δισδιάστατος κρύσταλλος του γραφενίου, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από άτομα άνθρακα ισχυρώς συνδεδεμένα μεταξύ τους, τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω στις κορυφές κανονικών εξαγώνων, δημιουργώντας κυψελοειδή δομή. Το κάθε άτομο άνθρακα δημιουργεί τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς υβριδισμού  $sp^2$  με τα γειτονικά άτομα άνθρακα του ίδιου επιπέδου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 2.6** Οι δεσμοί  $sp^2$  (γκρι απόχρωση) που δημιουργούν τα γειτονικά άτομα άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του γραφενίου και τα τροχιακά  $2p_z$  στα οποία κινείται το τέταρτο ηλεκτρόνιο κάθε ατόμου άνθρακα.

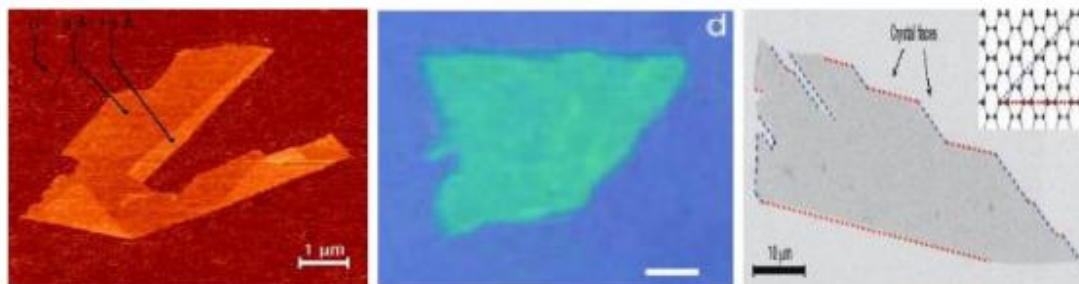
Το κρυσταλλικό πλέγμα του γραφενίου προκύπτει από τη σύνθεση δύο υποπλεγμάτων A και B, όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Για το λόγο αυτό εισάγεται ένας κβαντικός τελεστής, ο οποίος περιγράφει τις δύο καταστάσεις A και B του υποπλέγματος, και είναι αντίστοιχος με το πυρηνικό ισοσπίν που περιγράφει τις δύο καταστάσεις των νουκλεονίων. Ο τελεστής αυτός ονομάζεται ψευδοσπίν και η κατάσταση up αντιστοιχεί στο υπόπλεγμα A, ενώ η κατάσταση down αντιστοιχεί στο υπόπλεγμα B. Δύο οποιαδήποτε γειτονικά άτομα άνθρακα (ένα από κάθε υπόπλεγμα),

αποτελούν την μονάδα εξαγωνικού κελιού και απέχουν 0,142 nm μεταξύ τους. Το εμβαδόν κάθε κυψελίδας φθάνει τα 0,052 nm<sup>2</sup>. Στο διστρωματικό και πολυστρωματικό γραφένιο τα επίπεδα απέχουν μεταξύ τους 0,335 nm.



**Εικόνα 2.7** Τα υποπλέγματα A και B του κρυσταλλικού πλέγματος του γραφενίου και η μονάδα εξαγωνικού κελιού.

Η ατομική δομή του απομονωμένου μονοστρωματικού γραφενίου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, με τη χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων: Της μικροσκοπίας ατομικών δυνάμεων (Atomic Force Microscopy-AFM), της μικροσκοπίας ηλεκτρονίων μετάδοσης (Transmission Electron Microscopy-TEM) και της μικροσκοπίας σάρωσης ηλεκτρονίων (Scanning Electron Microscope-SEM) [20].



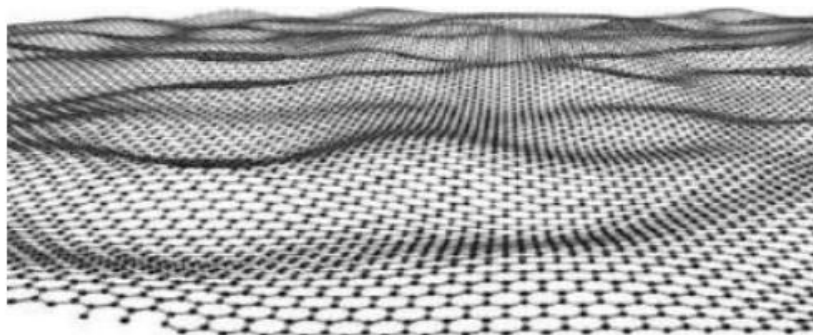
**Εικόνα 2.8** (Αριστερά) Atomic Force Microscopy-AFM. (Κέντρο) Transmission Electron Microscopy-TEM. (Δεξιά) Scanning Electron Microscope-SEM.

Στην επιφάνεια του μονοστρωματικού γραφενίου, εμφανίζονται κυματισμοί πλάτους περίπου 1 nm. Αυτοί οι κυματισμοί μπορεί να είναι εγγενείς στο γραφένιο, λόγω της αστάθειας των διαστάσεων κρυστάλλων, η μπορεί να είναι εξωγενείς, προερχόμενοι από το θόρυβο ο οποίος εμφανίζεται σε όλες τις εικόνες TEM του γραφενίου.

Το γραφένιο μπορεί να επισκευάσει τυχόν ατέλειες (τρύπες) στον κρύσταλλό του, όταν εκτίθεται σε μόρια που περιέχουν άτομα άνθρακα, όπως οι



υδρογονάνθρακες. Επίσης όταν βομβαρδίζεται με άτομα άνθρακα, τα σημεία του κρυστάλλου όπου υπάρχει έλλειψη άνθρακα, συμπληρώνονται από άτομα άνθρακα τα οποία ευθυγραμμίζονται σε κανονικά εξάγωνα.



*Εικόνα 2.9* Κυματισμοί στην επιφάνεια του μονοστρωματικού γραφενίου.

### **2.3.2. Μέθοδοι παραγωγής γραφενίου**

Η παραγωγή γραφενίου είναι παραδόξως μια πολύ φθηνή και εύκολη διαδικασία. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή γραφενίου, από τις οποίες άλλες εγκαταλείφθηκαν και άλλες είναι πολλά υποσχόμενες. Παρακάτω ακολουθούν οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής γραφενίου.

#### **2.3.2.1. Μέθοδος μηχανικής αποφλοιώσης (Exfoliation)**

Η μέθοδος της μικρομηχανικής αποφλοιώσης, είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την απομόνωση μονοστρωματικού γραφενίου. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε κολλητική ταινία όπου επαναλαμβανόμενα έσπαγαν τους κρυστάλλους του γραφίτη σε όλο και λεπτότερα κομμάτια, μέχρι την εμφάνιση των κρυσταλλιτών γραφενίου. Το πρόβλημα που προέκυψε ήταν το γεγονός ότι οι κρύσταλλοι γραφενίου ήταν κρυμμένοι μέσα σε “θημωνιές” από παχιά φύλλα γραφίτη. Η λύση δόθηκε από την παρατήρηση ότι το γραφένιο είναι ορατό από το οπτικό μικροσκόπιο, όταν αυτό βρίσκεται πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου, αφού έχει επιλεγεί προσεχτικά το πάχος του οξειδίου του πυριτίου. Για παράδειγμα μια διαφορά στο πάχος του οξειδίου του πυριτίου της τάξεως του 5%, μπορεί να κάνει ένα φύλλο γραφενίου αόρατο.





*Εικόνα 2.10 Η κολλητική ταινία από την οποία απομονώθηκαν μονοστρωματικά φύλλα γραφενίου για πρώτη φορά το 2004.*

Έτσι, η ταινία με τα οπτικά διαφανή φύλλα γραφενίου, βυθίζεται μέσα σε ακετόνη και μετά από μερικά βήματα τα φύλλα γραφενίου κατακάθονται πάνω σε υπόστρωμα οξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Στη συνέχεια, τα φύλλα γραφενίου έγιναν ορατά από το οπτικό μικροσκόπιο, μέσω του φαινομένου των αδύναμων παρεμβολών, όπου διαφορετικά πάχη γραφενίου εμφανίζονταν με διαφορετικά χρώματα [21].

Ένα χρόνο αργότερα, οι επιστήμονες απλοποίησαν την τεχνική, χρησιμοποιώντας ξηρή απόθεση του γραφενίου, παραλείποντας το στάδιο όπου το γραφένιο βρίσκεται μέσα σε υγρό. Με την τεχνική αυτή λήφθηκαν κρυσταλλίτες γραφενίου, αρχικά μερικών  $\mu\text{m}$  και αργότερα μεγαλύτεροι του 1 mm, οι οποίοι ήταν ορατοί δια γυμνού οφθαλμού.

### **2.3.2.2. Επιταξιακή ανάπτυξη πάνω σε καρβίδια πυριτίου**

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, μπορούμε να παράγουμε γραφένιο θερμαίνοντας καρβίδιο του πυριτίου ( $\text{SiC}$ ), σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των  $1100^\circ\text{C}$  και σε χαμηλές πιέσεις της τάξεως των  $10^{-6}$  Torr. Αυτή η μέθοδος παράγει επιταξιακό γραφένιο με διαστάσεις, οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος του  $\text{SiC}$  υποστρώματος [22].

Στο γραφένιο που παρήχθη με τη μέθοδο αυτή, ταυτοποιήθηκαν πολύ σημαντικές ιδιότητες του, τις οποίες θα συναντήσουμε και θα αναλύσουμε παρακάτω. Για παράδειγμα, η ηλεκτρονική δομή των ενεργειακών ζωνών, ταυτοποιήθηκε για πρώτη φορά στο επιταξιακό γραφένιο πάνω σε  $\text{SiC}$  [23].



### **2.3.2.3. Επιταξιακή ανάπτυξη πάνω σε μεταλλικά υποστρώματα**

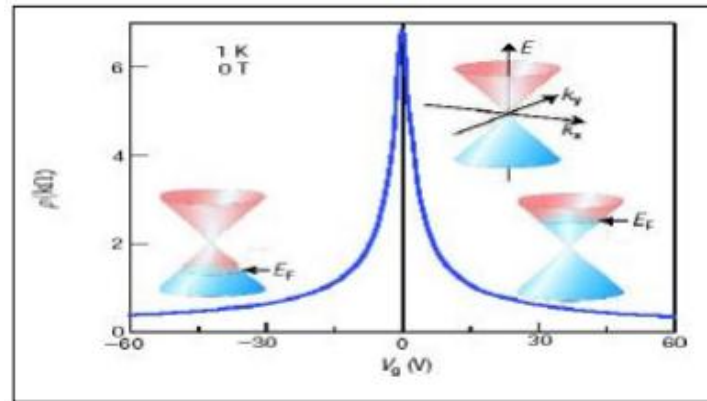
Η επιταξιακή ανάπτυξη γραφενίου πάνω σε μεταλλικά υποστρώματα, είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος, αλλά δεν έχουν γίνει ιδιαίτερες προσπάθειες προς την κατεύθυνση αυτήν. Για την πραγματοποίηση της μεθόδου, είναι απαραίτητη μια πηγή άνθρακα και ένα μεταλλικό υπόστρωμα με κατάλληλη ατομική δομή, η οποία θα συμβάλλει στην επιταξιακή ανάπτυξη του γραφενίου. Μέσω της εναπόθεσης χημικής εξάτμισης (Chemical Vapor Deposition - CVD) παρήχθηκε υψηλής ποιότητας πολυστρωματικό γραφένιο εμβαδού  $1 \text{ cm}^2$ , πάνω σε λεπτά φιλμ νικελίου ή χαλκού, χρησιμοποιώντας ως πηγή άνθρακα το μεθάνιο. Εάν η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιηθεί κάτω από συνθήκες χαμηλών πιέσεων, τότε παράγεται μονοστρωματικό γραφένιο. Η αντικατάσταση του μεθανίου, το οποίο είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, από αιθάνιο ή προπάνιο, θα οδηγήσει στην δημιουργία διστρωματικού γραφενίου. Τέλος το μεταλλικό υπόστρωμα απομακρύνεται με κατάλληλες χημικές διεργασίες [24].

## **2.4. Ιδιότητες γραφενίου**

### **Ηλεκτρονικές Ιδιότητες**

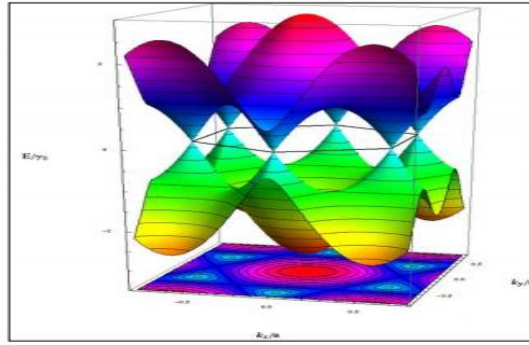
Το γραφένιο παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τα περισσότερα συμβατικά τρισδιάστατα υλικά, λόγω της φύσης του. Είναι ένα ημι-μέταλλο η ημιαγωγός μηδενικού χάσματος. Η ποιότητα του γραφενίου έγκειται στο γεγονός ότι παρουσιάζει ένα αμφιπολικό φαινόμενο ηλεκτρικού πεδίου, σύμφωνα με το οποίο οι φορείς αγωγιμότητας μπορεί να είναι είτε τα ηλεκτρόνια είτε οι οπές, ακόμη και σε συγκεντρώσεις φορέων της τάξης των  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Στο γραφένιο οι κινητικότητες των ηλεκτρονίων και των οπών είναι περίπου ίσες και εμφανίζουν υψηλές τιμές ξεπερνώντας τις  $15.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ , ακόμη και σε συνθήκες περιβάλλοντος [25]. Οι κινητικότητες εξαρτώνται ασθενώς από την θερμοκρασία  $T$ , ενώ περιορίζονται από την ύπαρξη προσμίξεων και ατελειών στον κρύσταλλο του γραφενίου, λόγω της σκέδασης των ηλεκτρονίων πάνω σε αυτές. Η ελαχιστοποίηση των δύο παραπάνω παραγόντων, μπορεί να οδηγήσει σε κινητικότητες φορέων μεγαλύτερες από  $100.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ . Επίσης όταν το γραφένιο τοποθετηθεί πάνω σε υπόστρωμα  $\text{SiO}_2$ , η σκέδαση των ηλεκτρονίων από τα οπτικά φωνόνια του υποστρώματος, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της κινητικότητας στις  $40.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  [26]. Στο γραφένιο οι

κινητικότητες είναι υψηλές, ακόμη και για συγκεντρώσεις φορέων αγωγιμότητας που ξεπερνούν τα  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , πράγμα το οποίο συνεπάγεται βαλλιστική μεταφορά ηλεκτρονίων.



**Εικόνα 2.11** Η Αμφιπολικό ηλεκτρικό πεδίο και βαλλιστική μεταφορά φορέων αγωγιμότητας στο γραφένιο.

Από πολύ νωρίς, οι επιστήμονες είχαν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι για χαμηλές ενέργειες, η σχέση ορμής - ενέργειας είναι γραμμική, πράγμα το οποίο συνεπάγεται ότι τα ηλεκτρόνια και οι οπές συμπεριφέρονται ως άμαζα σωματίδια, κοντά στις έξι γωνίες της δισδιάστατης εξαγωνικής ζώνης Brillouin, όπου οι ενέργειες των φορέων αγωγιμότητας είναι χαμηλές. Η αλληλεπίδραση των φορέων αγωγιμότητας με το περιοδικό δυναμικό του κυψελοειδούς κρυσταλλικού πλέγματος, οδηγεί στην δημιουργία μη αλληλεπιδρώντων ψευδοσωματιδίων τα οποία συμπεριφέρονται ως σχετικιστικά και περιγράφονται από την εξίσωση Dirac για σωματίδια με spin  $1/2$ . Φυσικά τίποτα το σχετικιστικό δεν υπάρχει όσον αφορά την ταχύτητα των φορέων αγωγιμότητας, οι οποίοι καλούνται άμαζα φερμιόνια Dirac. Αυτή η συμπεριφορά εμφανίζεται μόνο στο μονοστρωματικό γραφένιο, ενώ εξαφανίζεται στο διστρωματικό και πολυστρωματικό γραφένιο. Τα φερμιόνια Dirac, μπορούν να θεωρηθούν ως ηλεκτρόνια που απώλεσαν τη μάζα τους  $m$ , ή ως νετρίνα τα οποία απέκτησαν το φορτίο του ηλεκτρονίου [18].



**Εικόνα 2.12** Οι ζώνες σθένους (πράσινο χρώμα) και αγωγιμότητας (μωβ χρώμα) και τα σημεία Dirac που αντιστοιχούν στις έξι γωνίες της ζώνης Brillouin στο γραφένιο. Όπως παρατηρείται οι ενεργειακές ζώνες είναι συνημιτονοειδής και εφάπτονται στα σημεία Dirac δημιουργώντας κωνικές τομές του ενεργειακού φάσματος για  $E \text{ eV}$  .

Αντίστοιχα, οι έξι γωνίες της ζώνης Brillouin ονομάζονται σημεία Dirac, στα οποία επιλέγεται να αντιστοιχεί η μηδενική ενέργεια. Η εξίσωση που περιγράφει την γραμμική εξάρτηση της ενέργειας των φορέων αγωγιμότητας από την ορμή, δίνεται από τη σχέση (1.1):

$$E_k = \hbar \cdot V_F \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad 1.1$$

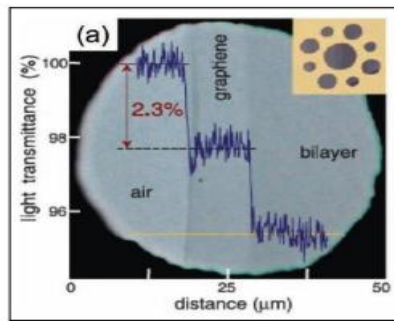
όπου  $V_F \approx 10^6 \text{ m/sec}$  είναι η ταχύτητα Fermi και  $k_x, k_y$  είναι οι συνιστώσες του κυματανύσματος  $k$ , το οποίο έχει ως αφετηρία τα σημεία Dirac [27].

## Οπτικές Ιδιότητες

Το γραφένιο εμφανίζει μοναδικές οπτικές ιδιότητες. Ένα μονοστρωματικό φύλλο γραφενίου εμφανίζει υψηλή αδιαφάνεια σε συνθήκες κενού, η οποία εκφράζεται μέσω της σχέσης (1.2):

$$\pi \cdot \alpha = 2.3\% \quad 1.2$$

όπου  $\alpha$  η σταθερά λεπτής υφής, η οποία χαρακτηρίζει την ισχύ της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, με  $\alpha = 1/137$ . Δηλαδή σύμφωνα με την παραπάνω σχέση το μονοστρωματικό γραφένιο απορροφά το 2,3% του λευκού φωτός. Αυτό είναι μια συνέπεια της χαμηλοενεργειακής ηλεκτρονικής δομής των κωνικών ζωνών, οι οποίες εφάπτονται στα σημεία Dirac. Το γραφένιο επίσης παρουσιάζει ανακλαστικότητα μικρότερη του 0,1% [28].



*Εικόνα 2.13 Το ποσοστό διέλευσης του λευκού φωτός συναρτήσει της απόστασης.*

Μια άλλη οπτική ιδιότητα του γραφενίου είναι ο κορεσμός απορρόφησης. Το γραφένιο μπορεί να κορεστεί οπτικά πολύ εύκολα κάτω από ισχυρή ακτινοβολία, με ακτινοβολία μήκους κύματος λίγο πάνω από το ορατό και κοντά στο υπέρυθρο, λόγω του μηδενικού ενεργειακού χάσματος και της υψηλής αδιαφάνειας που εμφανίζει. Τέλος, το γραφένιο κάτω από εντατική ακτινοβολία με δέσμη laser, μπορεί να προκαλέσει μια μη γραμμική μετατόπιση φάσης της ακτινοβολίας, εξαιτίας του μη γραμμικού φαινομένου Kerr που εμφανίζει. Η μη γραμμική σταθερά Kerr του γραφενίου είναι της τάξης των  $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{W}$ , η οποία είναι περίπου 9 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των διηλεκτρικών [29].

## Θερμικές Ιδιότητες

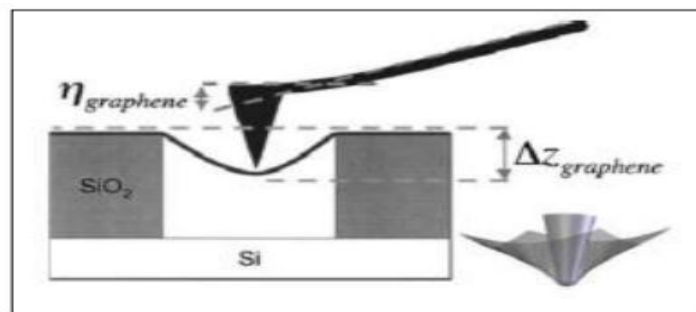
Η θερμική αγωγιμότητα που εμφανίζει το γραφένιο, κοντά σε θερμοκρασία δωματίου, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $K = 4840 \pm 440 \text{ W / mK}$  και  $K = 5300 \pm 480 \text{ W / mK}$ . Αυτές οι τιμές είναι μεγαλύτερες από την θερμική αγωγιμότητα των νανοσωλήνων άνθρακα και του διαμαντιού.

Η ισοτοπική σύνθεση του γραφενίου, δηλαδή η αναλογία  $C^{12}$  προς  $C^{13}$ , παίζει πολύ σημαντικό ρόλο αφού το γραφένιο που αποτελείται αποκλειστικά από το ισότοπο  $C^{12}$  εμφανίζει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα ακόμη και από το γραφένιο με αναλογίες ισωτόπων  $C^{12}$  και  $C^{13}$  99 προς 1. Η διάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται αποκλειστικά από φωνόνια και η βαλλιστική θερμική αγωγιμότητα του γραφενίου είναι ισοτροπική. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι στον γραφίτη και συγκεκριμένα στον άξονα z, η θερμική αγωγιμότητα είναι 100 φορές μικρότερη σε σχέση με τους άλλους δύο άξονες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δεσμοί μεταξύ ατόμων άνθρακα διαφορετικών επιπέδων γραφενίου είναι πιο ασθενείς, αφού τα άτομα άνθρακα απέχουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ

τους, σε σχέση με τις ενδοατομικές αποστάσεις άνθρακα στο κυψελοειδές κρυσταλλικό πλέγμα [30][31].

## Μηχανικές Ιδιότητες

Από το 2009 το γραφένιο θεωρείται το πιο σκληρό υλικό στη φύση, πιο σκληρό ακόμη και από το διαμάντι. Το όριο θραύσης λόγω εφελκυσμού είναι 200 φορές μεγαλύτερο από ένα υποθετικό φιλμ ατσαλιού, ίδιου πάχους με αυτό του γραφενίου, με μια τάση εφελκυσμού η οποία φθάνει το 1 TPa. Επίσης το γραφένιο είναι πολύ ελαφρύ, ζυγίζοντας μόνο 0,77 mg το τετραγωνικό μέτρο. Η ελαστική σταθερά του φύλλου του γραφενίου μετρήθηκε με ένα μικροσκόπιο ατομικών δυνάμεων (AFM). Τα φύλλα του γραφενίου τοποθετήθηκαν πάνω σε κοιλότητες SiO<sub>2</sub>, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, και η ακίδα του AFM εξέτασε τις μηχανικές ιδιότητες του γραφενίου. Η ελαστική σταθερά του γραφενίου μετρήθηκε και βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1-5 N/m, ενώ το μέτρο ελαστικότητας Young ήταν ίσο με 0,5 TPa, τιμή η οποία διαφέρει από την αντίστοιχη του ακατέργαστου γραφίτη. Αυτές οι υψηλές τιμές καθιστούν το γραφένιο πολύ σκληρό και εύκαμπτο υλικό [32].



**Εικόνα 2.14** Μέτρηση της ελαστικής σταθεράς και του μέτρου ελαστικότητας Young του γραφενίου μέσω του μικροσκοπίου ατομικών δυνάμεων (AFM).

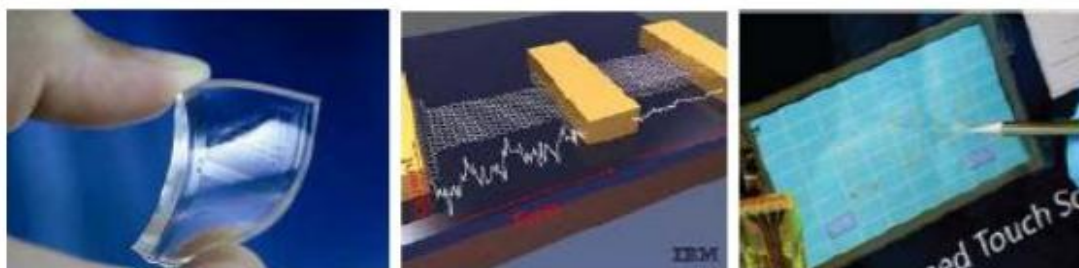
## 2.5. Εφαρμογές του Γραφενίου

Το γραφένιο, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζει μια σειρά από εξαιρετικές ιδιότητες όπως υψηλή κινητικότητα φορέων αγωγιμότητας, αποτελεί το πιο σκληρό υλικό στη φύση και είναι αρκετά εύκαμπτο. Όλες αυτές οι ιδιότητες μπορούν να οδηγήσουν σε μια ευρεία γκάμα δυναμικών εφαρμογών του γραφενίου στην ιατρική, στη χημεία, στην τεχνολογία ηλεκτρονικών και στη βιομηχανία. Αρκετές από τις



εφαρμογές του γραφενίου βρίσκονται ήδη υπό έρευνα, ενώ ακόμη περισσότερες έχουν προταθεί.

Μια από τις πλείστες εφαρμογές του γραφενίου, αποτελεί η δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς επίσης και ταχύτερων, μικρότερων και οικονομικότερων, από μεριάς κατανάλωσης ενέργειας, τρανζίστορ, τα οποία λειτουργούν σε περιοχή συχνοτήτων της τάξης των GHz. Ήδη η εταιρία IBM, το 2008, ανακοίνωσε την κατασκευή τρανζίστορ γραφενίου το οποίο λειτουργεί σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Το πρόβλημα που συναντάται έγκειται στο γεγονός ότι μονοστρωματικό γραφένιο είναι δύσκολο να παραχθεί, και ακόμη πιο δύσκολο να τοποθετηθεί πάνω σε μεταλλικό υπόστρωμα. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή πολλαπλασιαστών συχνότητας, οι οποίοι δέχονται στην είσοδο τους ένα σήμα και στην έξοδό τους εξάγουν ένα σήμα πολλαπλάσιας συχνότητας.



*Εικόνα 2.15* Τεχνολογικές εφαρμογές του γραφενίου.

Οι οπτικές ιδιότητες του γραφενίου το καθιστούν έναν εξαιρετικό υποψήφιο για την κατασκευή διαφανών αγωγίμων ηλεκτροδίων, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε εύκαμπτες οθόνες αφής, σε οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD), σε οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα και σε οργανικές διόδους εκπομπής φωτός.

Μια άλλη εφαρμογή που βρίσκει το γραφένιο, είναι στην ποτοποιία και συγκεκριμένα στην απόσταξη αιθανόλης. Σε αυτή την περίπτωση κατασκευάζονται μεμβράνες οξειδίου του γραφενίου, οι οποίες επιτρέπουν τους ατμούς του νερού να τις διαπεράσουν, ενώ δείχνουν να είναι αδιαπέραστες από άλλα υγρά και αέρια συμπεριλαμβανομένου και του ηλίου. Χρήση τέτοιων μεμβρανών έχει γίνει για την περαιτέρω απόσταξη της βότκας, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη συγκέντρωση αλκοόλ, σε κανονικές συνθήκες πίεσεως και θερμοκρασίας [33].



Το κύριο συστατικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων είναι το πυρίτιο. Νέες έρευνες όμως από το Ινστιτούτο Φωτονικών Ερευνών στην Ισπανία, έδειξαν ότι η χρήση γραφενίου αντί του πυριτίου, οδηγεί σε καλύτερη απόδοση όσον αφορά την μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η έρευνα έδειξε ότι αντίθετα με το πυρίτιο, το οποίο παράγει ένα μόνο ηλεκτρόνιο για κάθε φωτόνιο που απορροφά, το γραφένιο παράγει περισσότερα του ενός ηλεκτρόνια για κάθε προσπίπτον φωτόνιο.

Η μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς μάζα και η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του γραφενίου, το καθιστούν σοβαρό υποψήφιο για την δημιουργία ηλεκτρικών μπαταριών. Επίσης το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας, στην κατασκευή σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής και βιοδιατάξεων ανίχνευσης βακτηρίων, και ως αισθητήρες DNA για αντιβακτηριδιακή δράση.

Τέλος το γραφένιο θα μπορούσε να αντικαταστήσει το ακριβό και άκαμπτο οξείδιο του τιτανίου και να οδηγήσει στην κατασκευή εύκαμπτων οθονών. Όταν τελειοποιηθούν οι τεχνικές για την παραγωγή ποιοτικών φύλλων γραφενίου, οι επιστήμονες θεωρούν ότι θα αντικαταστήσει το πυρίτιο σε όλες τις εφαρμογές τις ηλεκτρονικής [20].

## **2.6. Επίδραση του γραφενίου στο αλουμίνιο**

Σε πρόσφατο πείραμα που διεξήχθη [34], διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη 2% κ.β. γραφενίου σε μορφή φύλλων (graphene nanosheets) σε μήτρα οξειδίου του αλουμινίου  $Al_2O_3$  οδήγησε στην αύξηση της δυσθραυστότητας κατά 53%. Επίσης, σε άλλο πείραμα παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε θραύση του μονολιθικού  $Si_3N_4$  μπορεί να ενισχυθεί κατά 136% με την προσθήκη 1,5% κατ' όγκο γραφενίου σε μορφή platelets (GPNs) [35].

Παρόμοια αποτελέσματα, δηλαδή ενίσχυση της δυσθραυστότητας, υπήρξαν και με την προσθήκη GPLs σε  $Si_3N_4$  και ZTA (zirconia toughened alumina) σε άλλες εκθέσεις [36][37]. Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα έρευνες, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για την κατασκευή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας ενισχυμένης με φύλλα γραφενίου, όπως μαγνήσιο με GNPs και χαλκός με GNPs μέσω συμβατικών μεθόδων κονιομεταλλουργίας και χύτευσης. Ωστόσο, οι μέχρι τώρα δημοσιευμένες μελέτες στην ενίσχυση καθαρού αλουμινίου με γραφένιο είναι περιορισμένες. Σε





πείραμα που δημοσιεύτηκε πρόσφατα, καθαρό αλουμίνιο ενισχύθηκε με 0.25, 0.50 και 1.0 % κατά βάρος GNPs με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και μελετήθηκαν οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών πριν και μετά απο διέλαση. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι στην περίπτωση της ενίσχυσης με 0.25% κ.β. GNPs το σύνθετο είχε σημαντικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, συγκριτικά με τις άλλες δύο περιπτώσεις αλλά και με το μονολιθικό αλουμίνιο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ομοιόμορφη διασπορά των GNPs στο χαμηλό επίπεδο πλήρωσης στην μήτρα του μονολιθικού αλουμινίου. Αναλυτικότερα, πριν απο την διέλαση, το Al-0.25% κ.β.GNPs παρουσίασε αύξηση 13.5% στην αντοχή σε εφελκυσμό και 50% στην επιμήκυνση θραύσης, συγκριτικά με το μονολιθικό αλουμίνιο. Από την άλλη πλευρά, τα σύνθετα Al-0,50% κ.β.GNPs και Al-0.10% κ.β.GNPs παρουσίασαν μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό ακόμα και απο το μονολιθικό αλουμίνιο. Καμία σημαντική αλλαγή δεν παρατηρήθηκε στο όριο διαρροής (YS) των σύνθετων. Αντίθετα με τα παραπάνω, τα διελασμένα υλικά παρουσίασαν εντελώς διαφορετικές τάσεις. Το όριο διαρροής των σύνθετων αυξανόταν μαζί με την αύξηση της ενίσχυσης των GNPs. Προς μεγάλη έκπληξη η αντοχή σε εφελκυσμό των 0.25% και 0.50% GNPs ήταν μεγαλύτερη απο αυτή της μονολιθικής μήτρας. Η επιμήκυνση θραύσης αυξήθηκε κατά 46% με την προσθήκη 0.25% κ.β. GNPs. Τα αποτελέσματα του πειράματος δείχνουν οτι η αυξημένη αντοχή του προκύπτοντος σύνθετου υλικού αποδίδεται κατά κύριο λόγο στους βασικούς μηχανισμούς ενίσχυσης συμπεριλαμβανομένων των Orowan looping, μεταφοράς φορτίου αλλά και των διαφορών της κρυσταλλογραφικής υφής μεταξύ του καθαρού Al και των σύνθετων υλικών. Όσον αφορά τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία των nanoplatelets γραφενίου μειώνει σημαντικά την αντοχή στη διάβρωση. Μάλιστα όσο πιο μεγάλη είναι η % κατά βάρος ενίσχυση τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση της αντοχής στην διάβρωση του σύνθετου υλικού, γεγονός που έχει αποδειχτεί και σε προηγούμενες μελέτες [38]. Σύμφωνα με πειραματική έρευνα [39], το υψηλότερο ποσοστό διάβρωσης του Al-GNPs από το ίδιο το αλουμίνιο είναι πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός οτι τα σωματίδια γραφενίου είναι καθοδικά σε σχέση με τη μήτρα, οδηγώντας έτσι σε γαλβανική διάβρωση υπό την παρουσία ενός ηλεκτρολύτη [40].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. Κατεργασίες αποβολής υλικού

#### 3.1. Εισαγωγή στην έννοια της κατεργασίας

Η κατεργασία, στην ευρύτερη της έννοια, είναι η διαδικασία με την οποία τα ακατέργαστα υλικά μετατρέπονται τελικά σε προϊόντα. Η έννοια της κατεργασίας καλύπτει τόσο την καθεαυτού κατασκευή όσο και τα σχέδια των προς κατασκευή προϊόντων χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους κατεργασιών και τεχνικών παραγωγής. Η ιδέα της κατεργασίας πρωτοεμφανίστηκε περίπου το 5000 με 4000 π.Χ. με την παραγωγή προϊόντων από διάφορα είδη ξύλου, κεραμικών, πέτρας, και μετάλλου. Σύμφωνα με την σύγχρονη δε μορφή της είναι η διαδικασία παραγωγής προϊόντων από ακατέργαστα υλικά, με βάση διάφορες διαδικασίες και μηχανήματα οι οποίες ακολουθούν ένα οργανωμένο σχέδιο και κάθε βήμα που απαιτείται. Τα κατεργασμένα προϊόντα χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή άλλων προϊόντων. Επειδή ένα κατασκευασμένο αντικείμενο έχει υποβληθεί σε διάφορες αλλαγές μετά τις οποίες το ακατέργαστο υλικό έχει γίνει πλέον ένα χρήσιμο προϊόν, λαμβάνεται υπόψη η προστιθέμενη αξία, ως νομισματική αξία όσον αφορά την τιμή του προϊόντος. Με την βοήθεια της κατεργασίας μπορούμε να παράγουμε και ιδιαίτερα προϊόντα, δηλαδή είτε μεμονωμένα μέρη των κομματιών, είτε συνεχή προϊόντα. Η κατεργασία είναι γενικά μια σύνθετη δραστηριότητα στην οποία συμμετέχουν άνθρωποι που έχουν μια ευρεία σειρά πειθαρχιών και ικανοτήτων αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και μια ευρεία ποικιλία μηχανημάτων, εξοπλισμού, και εργαλείων διαφόρων επιπέδων αυτοματισμού, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστών, των ρομποτικών μηχανισμών και του υλικού εξοπλισμού χειρισμού [41].

#### 3.2. Η Ταξινόμηση των κατεργασιών

Οι κατεργασίες διακρίνονται κατά DIN σε:

- **Αρχέγονες κατεργασίες:** (χύτευση, κonioμεταλλουργία κλπ).
- **Διαμορφώσεις:** (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, απότμηση, βαθεία



- κοίλανση κλπ).
- **Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού:** (τόρνευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση κλπ.).
- **Επιφανειακές κατεργασίες:** (θερμικές, θερμοχημικές και επικαλύψεις).
- **Κατεργασίες σύνδεσης:** (συγκολλήσεις, ηλώσεις, κοχλιώσεις κλπ).

Με κριτήριο την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό, οι κατεργασίες διακρίνονται σε:

- **Συμβατικές:** (μηχανουργικές κατεργασίες).
- **Μη συμβατικές:** (μαγνητική διαμόρφωση, εκρηκτική συμπίεση, ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με laser, εκρηκτική συγκόλληση)

### 3.3. Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού

Οι κατεργασίες αυτές ταξινομούνται στις συμβατικές κατεργασίες κοπής και προκαλούν αφαίρεση υλικού από την επιφάνεια υπό την μορφή αποβλίττου. Επιθυμητός στόχος μπορεί να είναι ακόμη και η βελτίωση των ανοχών και της ποιότητας της επιφάνειας ενός προηγουμένως ήδη κατεργασμένου τεμαχίου, γεγονός που επιτυγχάνεται με την αφαίρεση του υπερβολικού υλικού υπό μορφή αποβλίττου μέσω ενός μεταλλικού κοπτικού εργαλείου εργαλειομηχανής. Η κατεργασία της κοπής είναι ικανή να επιτύχει γεωμετρικές διαμορφώσεις, ανοχές και ποιότητα επιφάνειας που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνική [41].

Οι βασικότερες κατεργασίες με αποβολή υλικού και οι εργαλειομηχανές στις οποίες γίνονται οι αντίστοιχες κατεργασίες παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

<i>Κατεργασία</i>	<i>Εργαλειομηχανή</i>
Τόννευση	Τόρνος
Φρεζάρισμα	Φρέζα
Διάτρηση	Δράπανος
Πλάνιση	Πλάνη
Λείανση	Λειαντικός τροχός

**Πίνακας 3.1** Κατεργασίες με αποβολή υλικού και οι εργαλειομηχανές.



Στο παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικότερες κατεργασίες με αποβολή υλικού και σχηματικά οι αντίστοιχες χρησιμοποιούμενες εργαλειομηχανές [42]. Οι συνήθεις τρόποι κατάταξης είναι :

- **ως προς το είδος της κατεργασίας**

- **ως προς το είδος της πρωτεύουσας κίνησης**

εργαλειομηχανές με περιστροφική πρωτεύουσα κίνηση  
εργαλειομηχανές με ευθύγραμμη πρωτεύουσα κίνηση

- **ως προς τον βαθμό εξειδίκευσεως**

εργαλειομηχανές γενικής χρήσεως  
ειδικές εργαλειομηχανές  
εξειδικευμένες εργαλειομηχανές  
εργαλειομηχανές μεταφοράς

- **ως προς την ακρίβεια κατεργασίας**

εργαλειομηχανές συνήθους ακριβείας  
εργαλειομηχανές ακριβείας  
εργαλειομηχανές μεγάλης ακριβείας  
εργαλειομηχανές υψίστης ακριβείας

- **ως προς το βάρος**

εργαλειομηχανές ελαφρές (βάρος μικρότερο του 1 tn)  
εργαλειομηχανές μέσου βάρους (βάρος μικρότερο των 10 tn)  
εργαλειομηχανές βαριές (βάρος μεγαλύτερο των 10 tn)

- **ως προς το βαθμό αυτοματισμού**

κοινές εργαλειομηχανές,  
ημιαυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα),  
αυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις και η τροφοδοσία γίνονται αυτόματα).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

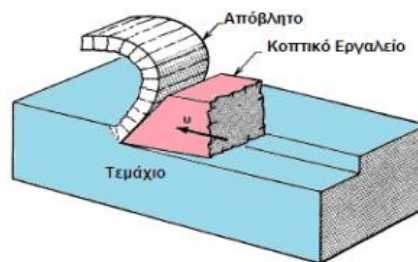
### 4. Μηχανική της κοπής

#### 4.1. Περιγραφή

Οι βασικοί συντελεστές που παίζουν σημαντικό ρόλο στην κοπή είναι:

- Κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Κοπτικό εργαλείο.
- Απόβλιττο (το αφαιρούμενο υλικό).

Το κοπτικό εργαλείο κινείται σε σχέση προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο σε συγκεκριμένη κατεύθυνση (διεύθυνση κοπής) με ταχύτητα  $v$ , ενώ συγχρόνως σχηματίζεται το απόβλιττο που κινείται επί του κοπτικού εργαλείου μετά από ισχυρή πλαστική παραμόρφωσή του [43].



*Εικόνα 4.1 Βασικοί συντελεστές της κοπής και ο σχηματισμός του αποβλίττου*

#### 4.2. Κινηματικά στοιχεία της κοπής

**Πρωτεύουσα ή κύρια κίνηση:** Παρέχεται από την εργαλειομηχανή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο ή στο κοπτικό εργαλείο και εξασφαλίζει τοπική σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο με αποτέλεσμα ή την προσέγγισή τους ή την αφαίρεση υλικού στη θέση αυτή. Κατά τη κίνηση αυτή απορροφάται το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος κοπής.

**Δευτερεύουσα ή κίνηση πρόωσης:** Παρέχεται από την εργαλειομηχανή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο ή στο κοπτικό εργαλείο κατά τρόπο συνεχή ή διακοπτόμενο και σε συνδυασμό με την κύρια κίνηση αποδίδει την κατεργασμένη επιφάνεια στο κατεργαζόμενο τεμάχιο σε ορισμένο μήκος αυτού. Η κίνηση αυτή απορροφά μικρό ποσοστό της ισχύος κοπής [43].

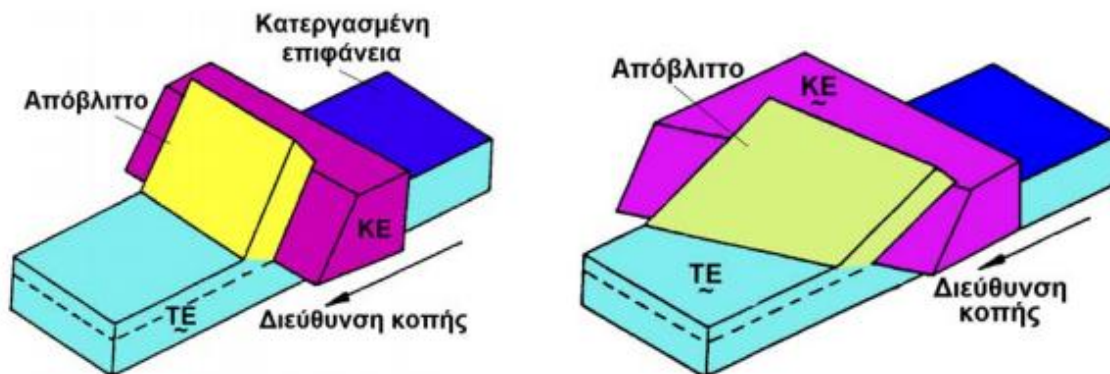
### 4.3. Είδη κοπής

#### Ορθογωνική κοπή

Στην ορθογωνική κοπή η τέμνουσα άκρη του εργαλείου είναι ευθεία και κάθετη στην κατεύθυνση κίνησης. Εδώ το επίπεδο της κοπής είναι παράλληλο προς την επιφάνεια του προς κατεργασία τεμαχίου, δηλαδή θεωρείται ότι η ροή του υλικού είναι δισδιάστατη και η κατεργασία είναι επίπεδη παραμορφωσιακή με την προϋπόθεση ότι το πλάτος του κοπτικού εργαλείου είναι μεγάλο σε σχέση με το πλάτος του αποβλίττου.

#### Λοξή κοπή

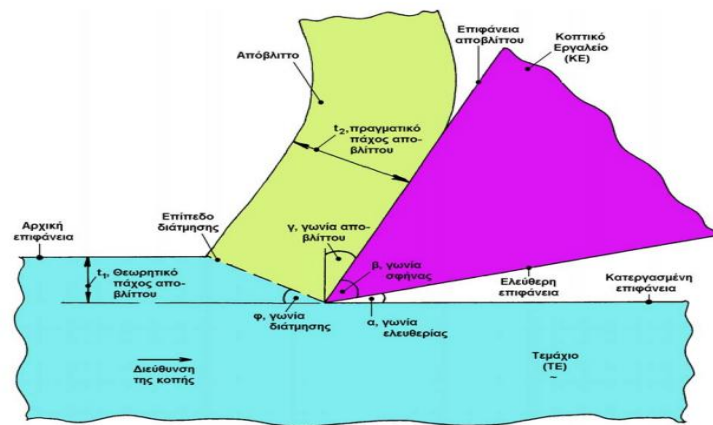
Πρόκειται για την γενική μορφή της κοπής. Όπως και στην περίπτωση της ορθογωνικής κοπής, χρησιμοποιείται ένα κοπτικό εργαλείο αλλά εδώ το επίπεδο της κοπής είναι υπό γωνία προς την επιφάνεια του προς κατεργασία τεμαχίου [43].



Εικόνα 4.2 (Αριστερά) Ορθογωνική κοπή (Δεξιά) Λοξή κοπή

### 4.4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής

Το κοπτικό εργαλείο προσομοιάζεται με σφήνα ευθύγραμμης ακμής που κινείται ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο έτσι, ώστε να αφαιρείται στρώμα υλικού ορισμένου πάχους και με την αντίστοιχη κάθε φορά μορφή αποβλίττου [43].



Εικόνα 4.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοπής

Διακρίνουμε τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου :

**Επιφάνεια αποβλίττου:** Είναι η επιφάνεια της σφήνας, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιττο κατά την κίνησή του.

**Ελεύθερη επιφάνεια:** Είναι η επιφάνεια της σφήνας που αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια.

**Κόψη:** Είναι η ακμή της σφήνας που προκύπτει ως τομή των δύο παραπάνω επιφανειών.

**Γωνία αποβλίττου, γ:** Σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίττου και το κάθετο επίπεδο στην κατεργασμένη επιφάνεια που διέρχεται από την κόψη του κοπτικού εργαλείου. Μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.

**Γωνία ελευθερίας, α:** Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και την κατεργασμένη επιφάνεια.

**Γωνία σφήνας, β:** Σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και από την επιφάνεια αποβλίττου. Ισχύει :  $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$

Διακρίνουμε τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αποβλίττου :

**Θεωρητικό πάχος αποβλίττου,  $t_1$ :** Είναι το αφαιρούμενο πάχος υλικού.

**Πραγματικό πάχος αποβλίττου,  $t_2$ :** Είναι η μέση τιμή του πάχους που έχει το απόβλιττο μετά την κοπή.

**Πλάτος αποβλίττου,  $b$ .**

**Θεωρητική διατομή αποβλίττου,  $A_1 = b \cdot t_1$**

**Πραγματική διατομή αποβλίττου,  $A_2 = b \cdot t_2$**



## 4.5. Συνθήκες κοπής

Περιλαμβάνονται οι εξής:

**Βάθος κοπής,  $a$ :** Είναι το βάθος στο οποίο εισχωρεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στο υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Μετράται σε mm.

**Ταχύτητα κοπής,  $v$ :** Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακής (κόψης) του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά την πρωτεύουσα κίνηση. Συνήθως μετράται σε m/min (σπανιότερα σε m/s).

**Πρόωση,  $s$ :** Είναι η σχετική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ως προς κατεργαζόμενο τεμάχιο ανά περιστροφή ή ενεργό διαδρομή (κοπτικό εργαλείο ή κατεργαζόμενο τεμάχιο). Μετράται σε mm/rev ή mm/ενεργό διαδρομή και κατά τη κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης.

**Ταχύτητα πρόωσης,  $v_p$ :** Είναι η στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα της ακής κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης. Μετράται σε m/min και χρησιμοποιείται εναλλακτικά αντί της πρόωσης. Μεταξύ των μεγεθών  $s$  και  $v_p$  ισχύει η σχέση  $v_p = s \cdot n$  όπου:  $n$  είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ή ο αριθμός ενεργών διαδρομών στη μονάδα χρόνου.

Συμπληρωματικά μεγέθη:

**Ρυθμός αποβολής υλικού,  $\Theta$ :** Είναι ο όγκος του αποβαλλόμενου υλικού στη μονάδα του χρόνου. Μετράται σε  $\text{cm}^3/\text{min}$ . Ισχύει:  $\Theta = A_1 \cdot v$

**Χρόνος κοπής,  $t_c$ :** Είναι το άθροισμα του καθαρού χρόνου κοπής και των χρόνων προσέγγισης και απομάκρυνσης του κοπτικού εργαλείου προς και από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, αντίστοιχα. Μετράται σε min. Ισχύει:  $t_c = i \cdot l_c / v_p$  όπου:  $i$  είναι ο αριθμός των "πάσων" και  $l_c$  το μήκος κατεργασίας.

## 4.6. Κινηματική της κοπής

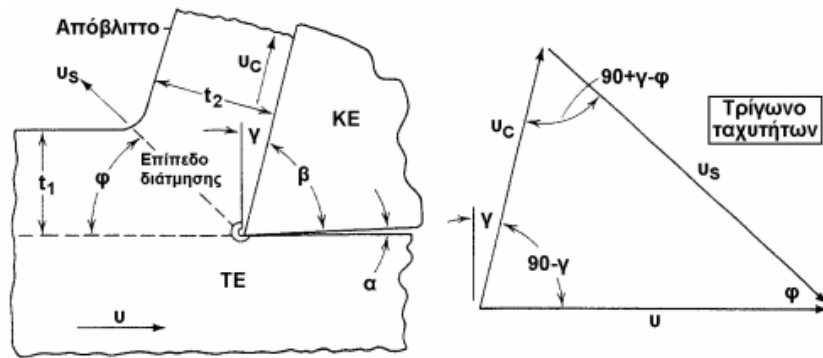
Οι διάφορες ταχύτητες κατά την κοπή σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα διακρίνουμε τις εξής 3 ταχύτητες:

**Ταχύτητα κοπής,  $v$ :** Σχετική ταχύτητα του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

**Ταχύτητα διάτμησης,  $v_s$ :** Σχετική ταχύτητα του αποβλίττου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο και επί του επιπέδου διάτμησης.

**Ταχύτητα αποβλίττου,  $v_c$ :** Σχετική ταχύτητα του απόβλίττου ως προς το κοπτικό εργαλείο.[43]





Εικόνα 4.4 Οι τρεις ταχύτητες κατά την κοπή

## 4.7. Δυνάμεις και ισχύς κοπής

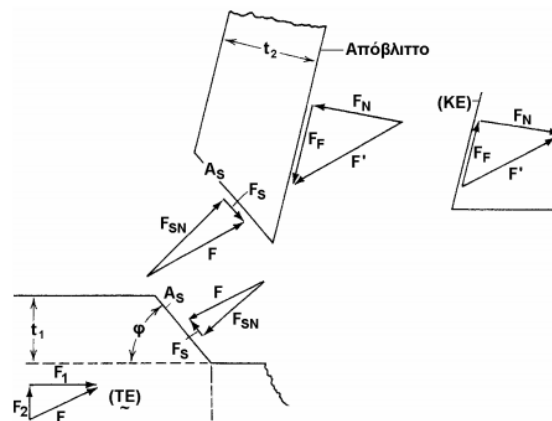
Θεωρούμε το απόβλιττο ως ένα σώμα απόλυτα στερεό και ελεύθερο που οριακά ευρίσκεται σε ισορροπία και συγχρόνως σε αλληλεπίδραση με το τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο.[43] Οι δυνάμεις που ασκούνται σ' αυτό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο είναι:

$F_S$  η αντίσταση του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε διάτμηση

$F_{SN}$  η κάθετη δύναμη στο επίπεδο διάτμησης (δηλ. κάθετη στην  $F_S$ ).

$F_F$  η δύναμη τριβής στη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου / αποβλίττου που αντιτίθεται στην κίνηση του αποβλίττου.

$F_N$  η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής κοπτικού εργαλείου / αποβλίττου (δηλ. κάθετη στην  $F_F$ ).



Εικόνα 4.5 Το σύστημα δυνάμεων που ασκούνται στο απόβλιττο

Αν  $F$  είναι η συνισταμένη των  $F_S$  και  $F_{SN}$  και  $F'$  η συνισταμένη των  $F_F$  και  $F_N$ , θα πρέπει να ισχύει για την ισορροπία του αποβλίττου  $F=F'$ . Η  $F'$  ονομάζεται δύναμη



κοπής και, αν μεταφερθεί στην ακή του κοπτικού εργαλείου, μπορεί να αναλυθεί στα ακόλουθα ζεύγη δυνάμεων:

$F_S$  και  $F_{SN}$

$F_F$  και  $F_N$

$F_1$  (οριζόντια - κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής) και

$F_2$  (κάθετη στην  $F_1$ - δύναμη άπωσης)

Προφανώς η ισχύς κοπής  $P_c$  είναι το γινόμενο της δύναμης κοπής  $F'$  επί την ταχύτητα κοπής  $v$  και δίνεται από τη σχέση:

$$P_c = F' \cdot v$$

## 4.8. Η Θερμότητα στην κοπή

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την κοπή είναι μία από τις κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την σωστή διεξαγωγή της κοπής. Για παράδειγμα, η θερμότητα επηρεάζει τις δυνάμεις κοπής, αυξάνει την ταχύτητα φθοράς του κοπτικού εργαλείου και μειώνει τη διάρκεια ζωής του, προκαλεί θερμική καταπόνηση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις κοκ. Στις κατεργασίες κοπής συνυπάρχουν και οι τρεις μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας (με επαφή, αγωγή και ακτινοβολία), π.χ. η μεταφορά θερμότητας μέσα στο απόβλιττο, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το κοπτικό εργαλείο και τον συγκρατητή του λαμβάνει χώρα με επαφή, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού υγρού/αέρα και αποβλίττου/ κοπτικού εργαλείου / κατεργαζόμενου τεμαχίου γίνεται με αγωγή, ενώ η ακτινοβολία είναι περιορισμένη στις συμβατικές κατεργασίες κοπής [43].

Στη γενική περίπτωση κοπτικού εργαλείου με στρογγυλεμένη κόψη, υφίστανται τρεις περιοχές που λειτουργούν ως πηγές θερμότητας κατά την κοπή:

**Η πρωτεύουσα ζώνη (I)** (έργο διάτμησης),

**Η δευτερεύουσα ζώνη (II)** (έργο τριβής) και

**Η περιοχή τριβής (III)** στο καμπύλο τμήμα του κοπτικού εργαλείου.



*Εικόνα 4.6 Ζώνες παραγωγής θερμότητας κατά την κοπή*

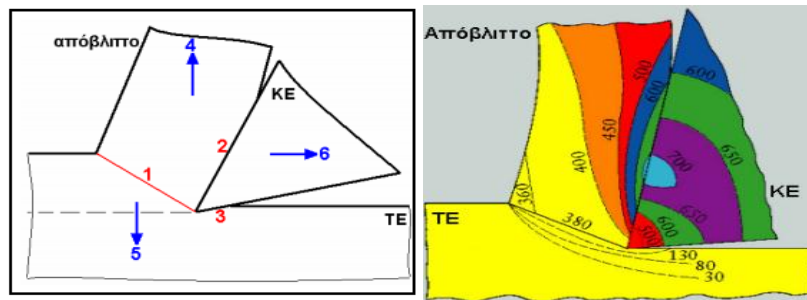
Για τη θεωρητική αντιμετώπιση του προβλήματος χρειάζεται να τεθούν και άλλες υποθέσεις: π.χ συνήθως στις περισσότερες προσεγγίσεις υιοθετείται η ανάπτυξη επίπεδου θερμικών πηγών (plane heat sources), ομοιόμορφα καταναμημένων στο επίπεδο διάτμησης και στη διεπιφάνεια κοπτικού εργαλείου /αποβλίττου.

Εκτός από τη γεωμετρία κοπτικού εργαλείου, κατεργαζόμενου τεμάχου και αποβλίττου απαιτείται και καθορισμός των οριακών συνθηκών. Στην κατεύθυνση αυτή, μπορούν να τεθούν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής, ο ρυθμός απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας είναι περίπου ίσος με το ρυθμός έκλυσης της. Η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως ισόθερμη.
- Με αύξηση της ταχύτητας κοπής, ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας υπολείπεται του ρυθμού έκλυσης της βαθμιαία και περισσότερο, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου.
- Σε πολύ υψηλές ταχύτητες κοπής η κοπή μπορεί να θεωρηθεί ως αδιαβατική.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε μια τυπική ποσοστιαία διανομή της παραγόμενης θερμότητας κατά την κοπή σε χαμηλή – μέση ταχύτητα κοπής.

- 1: Εκλύομενη θερμότητα στη ζώνη I (80%)
- 2: Εκλύομενη θερμότητα στη ζώνη II (18%)
- 3: Εκλύομενη θερμότητα στη ζώνη III (2%)
- 4: Απαγόμενη θερμότητα από απόβλιττο (75%)
- 5: Απαγόμενη θερμότητα από TE (8%)
- 6: Απαγόμενη θερμότητα από KE (17%)



*Εικόνα 4.7 (Αριστερά) Τυπική ποσοστιαία διανομή της παραγόμενης θερμότητας κατά την κοπή (Δεξιά) Κατανομή θερμοκρασιών (σε °C) σε τεμάχιο, κοπτικό εργαλείο και απόβλιττο κατά την κοπή.*

Τέλος πρέπει να σημειωθεί επιγραμματικά ότι θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο κοπτικό εργαλείο κυρίως στην ακμή του αυξάνεται κυρίως με:

- Αύξηση της ταχύτητας κοπής.
- Αύξηση της πληρότητας του υλικού του τεμαχίου.
- Αύξηση του βάθους κοπής.
- Αύξηση της προώσεως.

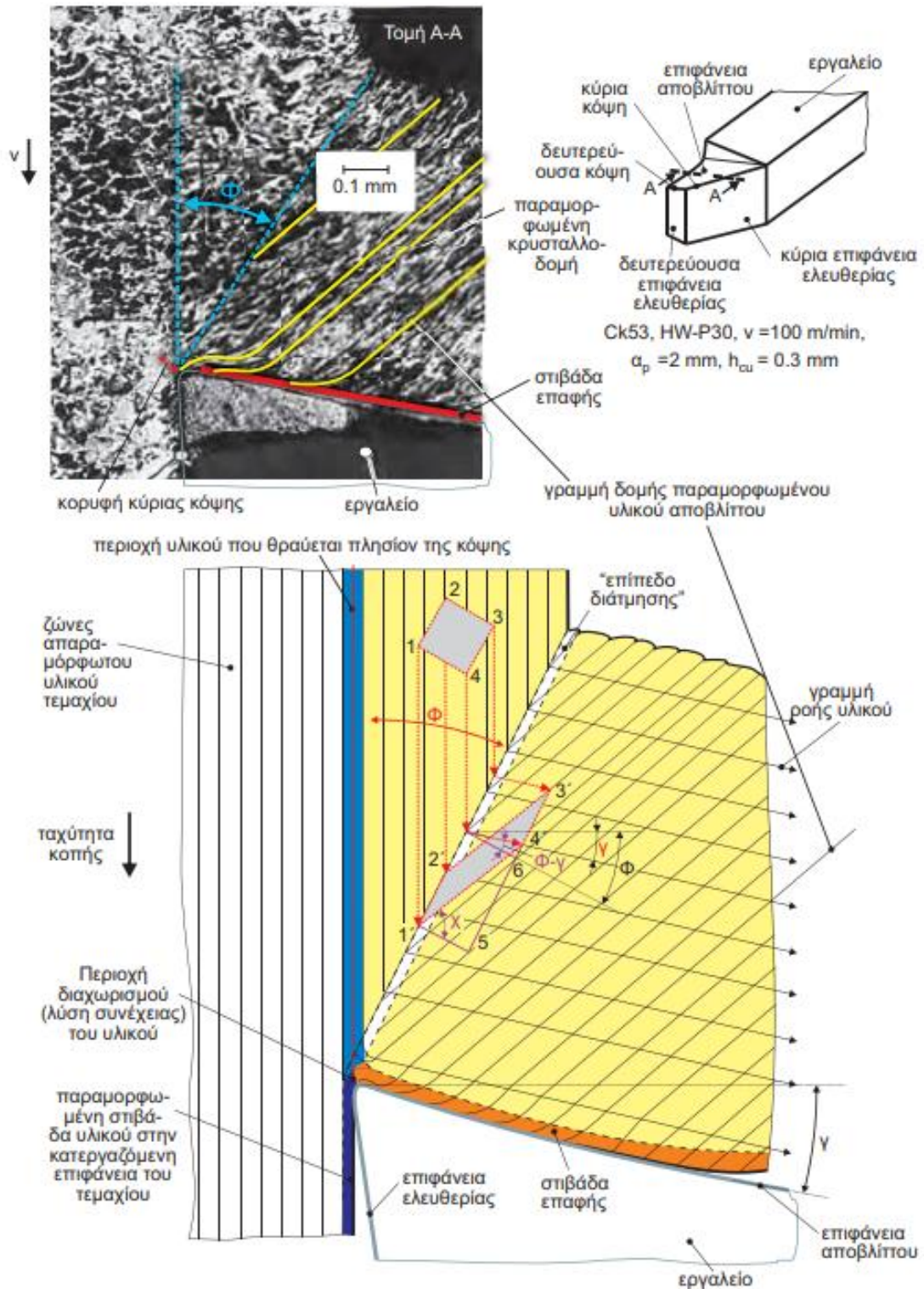
## 4.9. Σχηματισμός του αποβλίττου στην κοπή

Κατά την κοπή, μέσω της διείσδυσης του εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο το υλικό του παραμορφώνεται έντονα και στην περιοχή της κορυφής της κόπης του εργαλείου αρχίζει να ρέει επί της επιφάνειας του αποβλίττου. Οι μηχανισμοί αυτοί επεξηγούνται στην εικόνα 4.8. Στην φωτογραφία της κρυσταλλοδομής του υλικού πριν την παραμόρφωση του και τη δημιουργία του αποβλίττου είναι εμφανής η γεωμετρία των κόκκων περλίτη και φερρίτη, στην προκειμένη περίπτωση κοπής χαλύβδινου τεμαχίου όπως επίσης και η παραμόρφωσή τους, λόγω πλαστικής διαρροής του υλικού. Η πλαστική διαρροή λαμβάνει χώρα στην περιοχή που χαρακτηρίζεται ως ‘επίπεδο διάτμησης’. Πρόκειται για περιοχή του υλικού προσεγγιστικά περιγραφόμενη με ένα επίπεδο με γωνία κλίσης  $\Phi$  σε σχέση με τη διεύθυνση της ταχύτητας  $v$ , όπου οι ισοδύναμες κατά von Mises τάσεις ξεπερνούν την τιμή της τάσης, που αντιστοιχεί στην οριακή ελαστική παραμόρφωση του υλικού με συνέπεια την έναρξη της πλαστικής διαρροής του. Η γεωμετρία της παραμόρφωσης του υλικού γίνεται κατανοητή μέσω της διαφοροποίησης της γεωμετρίας ενός σχήματος αναφοράς στην προκειμένη περίπτωση του τετραγώνου (1234), που μετά την διέλευση του από το επίπεδο διάτμησης λαμβάνει τη μορφή του



παραλληλόγραμμου (1'2'3'4'). Στο παράδειγμα αυτό για λόγους ευκολότερης περιγραφής του μηχανισμού παραμόρφωσης του υλικού, οι πλευρές (12) και (34) έχουν επιλεγεί παράλληλες προς το επίπεδο διάτμησης. Οι κορυφές του τετραγώνου 3 και 4, 'διέρχονται' πρώτες από το επίπεδο διάτμησης και κινούνται σε τροχιές παράλληλες προς την επιφάνεια αποβλίττου. Οι θέσεις τους 3' και 4' εντός του αποβλίττου, όταν οι κορυφές 1 και 2 βρίσκονται επί του επιπέδου διάτμησης, προσδιορίζονται λαμβάνοντας υπόψη ότι τα εμβαδά (1234) και (1'2'3'4) είναι ίσια. Αυτό ισχύει λόγω της διδιάστατης μόνον παραμορφώσεως του υλικού στην εξεταζόμενη περίπτωση ορθογωνικής κοπής και αρχής διατήρησης του όγκου.

Είναι αντιληπτό ότι οι γραμμές της δομής του παραμορφωμένου αποβλίττου έχουν μεγαλύτερη κλίση από αυτήν του επιπέδου διάτμησης σε σχέση με τη διεύθυνση της ταχύτητας κοπής, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8. Στην εικόνα είναι επίσης εμφανές ότι μόνο στην περιοχή του υλικού που έρχεται σε επαφή με την κορυφή κόπης αρχίζει η πλαστική διαρροή του κατεργαζόμενου υλικού. Σε περίπτωση υπέρβασης της οριακής παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου υλικού μπορεί να επέλθει η θραύση του και το απόβλητο να αποχωρίζεται στην περιοχή του επιπέδου διάτμησης από τεμάχιο. Η τελική επιφάνεια του τεμαχίου καταπονείται μέσω της επιφάνειας ελευθερίας με αποτέλεσμα τη δημιουργία πεδίου παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων εντός του τεμαχίου [44].

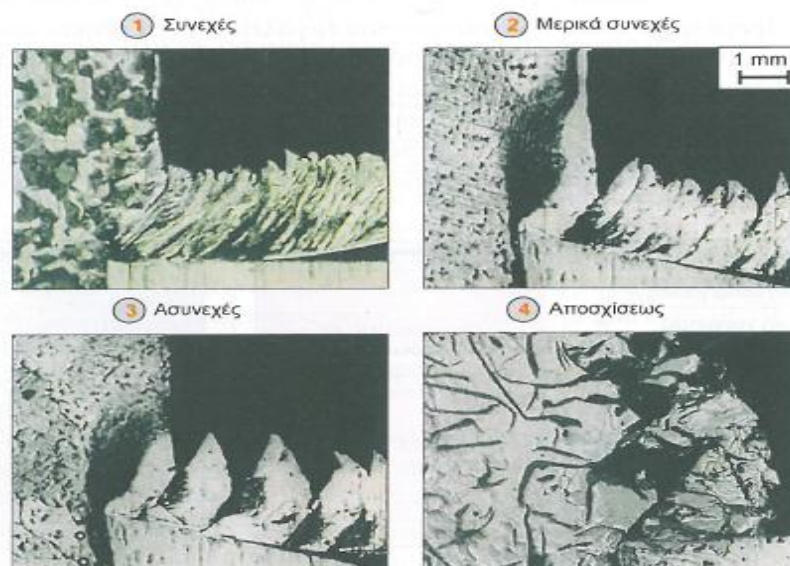


**Εικόνα 4.8** Περιοχή δημιουργίας αποβλήτου κατά την κοπή

#### 4.9.1. Είδη αποβλίττου

Τα είδη του αποβλίττου που σχηματίζονται κατά την κοπή είναι :

- Συνεχές αποβλίττο.
- Μερικά συνεχές αποβλίττο.
- Ασυνεχές αποβλίττο.
- Αποβλίττο αποσχίσεως.



*Εικόνα 4.9 Είδη αποβλίττου*

Το είδος του αποβλίττου που σχηματίζεται κατά την κοπή επηρεάζει σημαντικότερα τόσο την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας όσο και ολόκληρη την κατεργασία [43]. Το είδος του αποβλίττου που σχηματίζεται εξαρτάται από τα παρακάτω.

- Ταχύτητα κοπής.
- Οι δυνάμεις κοπής.
- Η ισχύς κοπής.
- Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.
- Η φθορά και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.
- Η απρόσκοπτη διεξαγωγή της κοπής.
- Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανής-κοπτικού εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμάχου.



Αντίστροφα, ο μηχανισμός σχηματισμού αποβλίττου επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

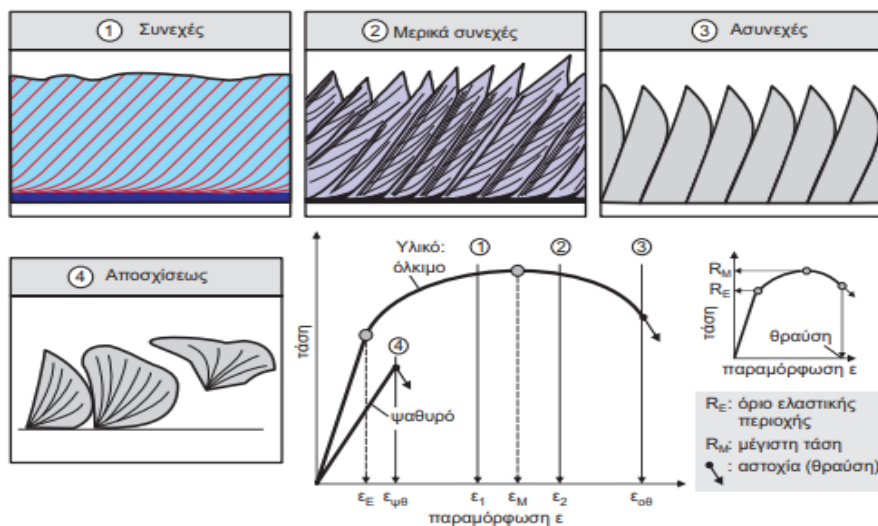
- Είδος του υλικού κατασκευής του κομματιού, αν είναι δηλαδή ψαθυρό ή όλκιμο.
- Είδος και τη μορφή, γεωμετρία, του κοπτικού εργαλείου.
- Συνθήκες κοπής.
- Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανής-κοπτικού εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου [43].

#### **4.9.2. Μικροδομές αποβλίττων**

Οι μηχανισμοί που οδηγούν σε διαφορετικές μικροδομές αποβλίττου επεξηγούνται στην εικόνα 4.10 στις περιπτώσεις ενός όλκιμου και ενός ψαθυρού υλικού. Εάν το όλκιμο υλικό ενός τεμαχίου παραμορφωθεί πλαστικά κατά την κοπή μέχρι ένα ύψος παραμορφώσεως  $\epsilon_1$  ( $\epsilon_E < \epsilon_1 < \epsilon_M$ ), το δημιουργούμενο απόβλιττο έχει συνεκτική δομή η οποία επιτρέπει περαιτέρω παραμόρφωση πριν την θραύση του. Εν προκειμένω οι γραμμές της παραμορφωμένης δομής είναι περισσότερο κεκλιμένες συγκριτικά με το 'επίπεδο διάτμησης' σε σχέση με την ταχύτητα κοπής και το απόβλιττο είναι ελαφρά κυρτωμένο. Η έντονα παραμορφωμένη στιβάδα του υλικού στην κάτω επιφάνεια του αποβλίττου είναι διακριτή σε διαμήκη τομή του. Εάν μέσω των συνθηκών κατεργασίας, η παραμόρφωση του υλικού αυξηθεί έως τις τιμές  $\epsilon_2$  και  $\epsilon_{\psi\theta}$ , το απόβλιττο με μικρή επιπλέον ή χωρίς επιπρόσθετη παραμόρφωση αντίστοιχα, θραύεται. Στην διαμήκη τομή των αποβλίττων 2 και 3 λόγω της διαρροής επί του επιπέδου διάτμησης, η κλίση του επιπέδου αυτού γίνεται αντιληπτή. Στο μερικά ασυνεχές απόβλιττο παρουσιάζεται περιορισμένη στιβάδα υψηλής παραμόρφωσης στην κάτω επιφάνειά του, η οποία και συγκρατεί τις επιμέρους κεκλιμένες περιοχές του, ανάμεσα στις οποίες το υλικό έχει σχεδόν ή πλήρως χάσει τη συνέχειά του λόγω υψηλής διάτμησης. Στο ασυνεχές απόβλιττο η δημιουργούμενη κύρτωση είναι αμελητέα και οι επιμέρους περιοχές του, δύναται ήδη κατά την κοπή να κατακερματισθούν. Από την άλλη πλευρά, εάν ένα ψαθυρό υλικό φορτιστεί στο επίπεδο διάτμησης μέχρι την παραμόρφωση θραύσης του  $\epsilon_{\psi\theta}$ , δημιουργούνται απόβλιττα απόσχισης και προκαλείται σημαντική χειροτέρευση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφανείας του τεμαχίου. Σε όλο το επίπεδο διάτμησης, όπως και



στην κορυφή της κόψης, αναπτύσσεται τάση οριακής ελαστικής παραμόρφωσης, που είναι πρακτικά ίση με την τάση θραύσης στην περιοχή του ψαθυρού υλικού. Τοιουτοτρόπως δημιουργούνται ρωγμές θραύσης που κατευθύνονται και προς την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου που περιορίζουν την αντοχή του κατά την λειτουργία του. Για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό κατά την κοπή ψαθυρών υλικών συνιστάται η χρησιμοποίηση μικρής πρόωσης και βάθους κοπής για την επίτευξη περιοχής ‘επιπέδου διάτμησης’ και ρωγμών περιορισμένων διαστάσεων. Επίσης είναι επιθυμητές και υψηλές ταχύτητες καθώς αυξάνουν την θερμοκρασία και βελτιώνουν την ολκιμότητα του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου με πρόσκληση θραύσης μετά την έναρξη της πλαστικής διαρροής. Σταθεροποιείται το ‘επίπεδο διάτμησης’ και περιορίζεται η εμφάνιση ρωγμών [44].



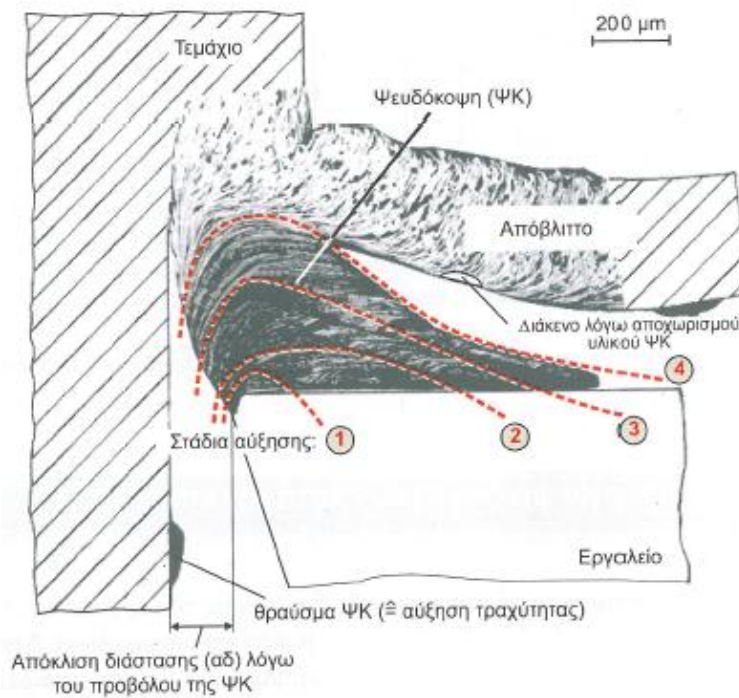
**Εικόνα 4.10** Χαρακτηριστικές μικροδομές αποβλίττων διαφόρων υλικών

### 4.9.3. Ψευδόκοψη

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλίττου, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδόκοψη. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11. Στην εικόνα αυτή διακρίνονται η κοπτική ακμή του εργαλείου που έχει μορφή σφήνα, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το απόβλιττο 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.

Η ψευδόκοψη αναπτύσσεται καθώς η κοπή προχωρεί. Όταν η ψευδόκοψη αποκτά ένα ορισμένο μέγεθος, αποχωρίζονται από το σώμα της, λόγω των δυνάμεων κοπής, μικρά κομμάτια τα οποία προσκολλώνται είτε στο απόβλιττο που ρέει, είτε στην νέο σχηματισμένη επιφάνεια του τεμαχίου. Ο περιοδικός αυτός σχηματισμός και τεμαχισμός της ψευδόκοψης φαίνεται στην εικόνα 4.11, όπου παρατηρείται ο διαχωρισμός της ψευδόκοψης προς το απόβλιττο και την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου, τεμαχισμός που ολοκληρώνεται στη συνέχεια [44].



**Εικόνα 4.11** Δημιουργία ψευδόκοψης κατά τη δημιουργία αποβλίττου

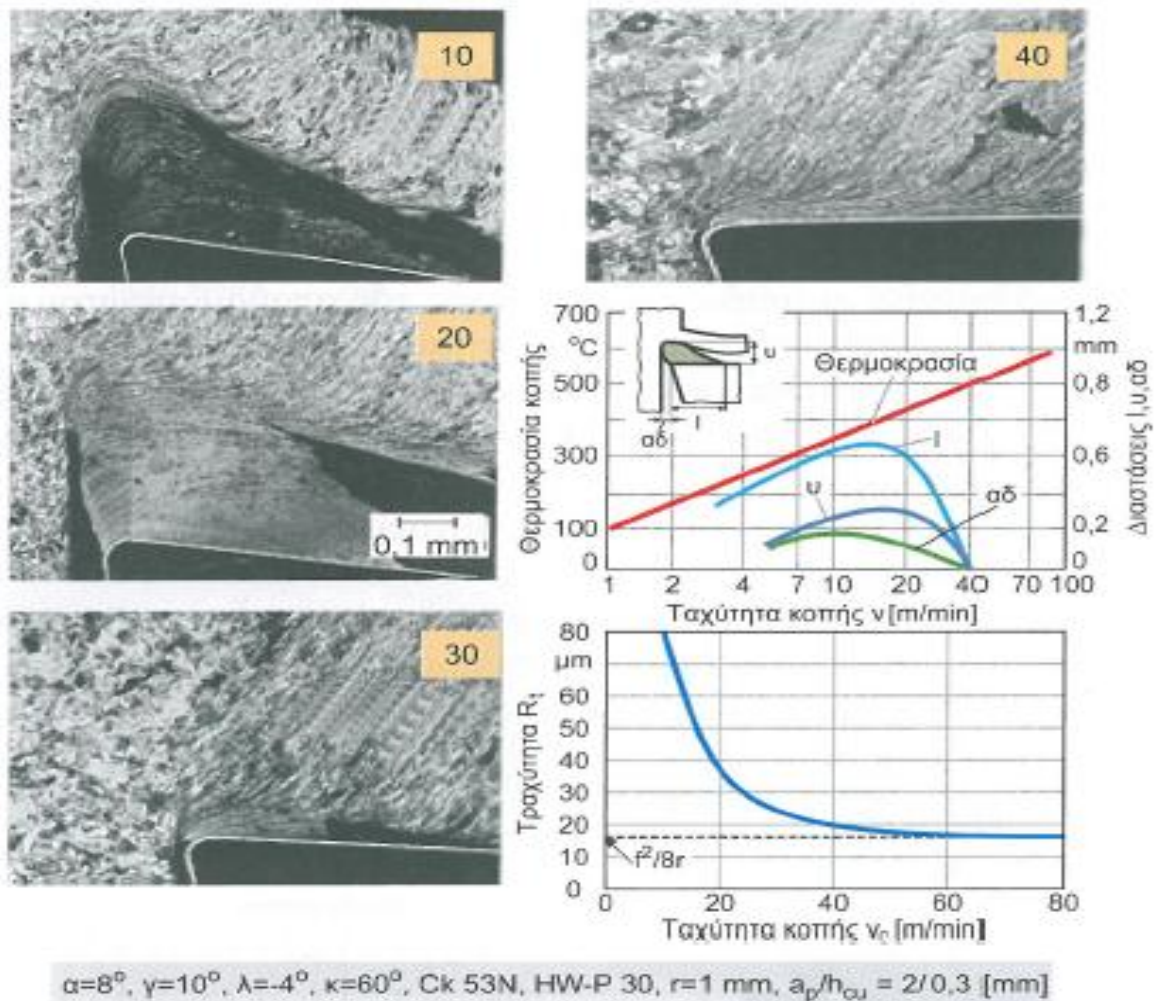
Η ύπαρξη της ψευδόκοψης χειροτερεύει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ η συμπεριφορά της ως προς το κοπτικό εργαλείο εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής. Έτσι υπάρχει περίπτωση η σταθερή παρουσία της ψευδόκοψης να προστατεύει το κοπτικό εργαλείο, μια και κόβει αυτή και όχι άμεσα η κοπτική ακμή του, ενώ υπάρχει και η περίπτωση, ανάλογα τις συνθήκες κοπής, η ψευδόκοψη να φθείρει το εργαλείο κυρίως στην επιφάνεια αποβλίττου του, με τον μηχανισμό της

απόξεσης. Η δημιουργία ή αποφυγή της ψευδόκοψης μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

Έτσι το μέγεθος της ψευδόκοψης μειώνεται αν :

- Αυξηθεί η ταχύτητα κοπής,
- Χρησιμοποιηθεί εργαλείο με μεγαλύτερη γωνία αποβλίττου.
- Μειωθεί η χρησιμοποιούμενη πρόωση.
- Χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υγρό κοπής.

Η παρουσία της ψευδόκοψης επηρεάζεται από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν ενώ ισχυρότερη επίδραση παρουσιάζει η ταχύτητα κοπής. Έτσι μπορεί κανείς να διακρίνει στην εικόνα 4.12 την επίδραση της χρησιμοποιούμενης ταχύτητας κοπής στην αναπτυσσόμενη φθορά ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, φθορά που σχετίζεται με την ύπαρξη της ψευδόκοψης [45].



**Εικόνα 4.12** Φθορά επιφάνειας ελευθερίας ψευδοκόψης κατά τη δημιουργία αποβλίττου



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5. Κοπτικά εργαλεία

#### 5.1. Περιγραφή

Η επιτυχία σε κάθε κατεργασία αποβολής του υλικού καθορίζεται από το τι συμβαίνει στο σημείο επαφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου με το κοπτικό εργαλείο. Η αξία της παγκόσμιας βιομηχανίας κατεργασιών με υπό αποβολή υλικού είναι πάνω από \$40 δισεκατομμύρια από τα οποία τα \$10 δισεκατομμύρια αποτελούν τα κοπτικά εργαλεία [46]. Η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου ανάλογα με την κατεργασία και το υλικό του τεμαχίου γίνεται με γνώμονα την γεωμετρία και το υλικό του εργαλείου. Γι' αυτό τα κοπτικά εργαλεία καθορισμένης γεωμετρίας οφείλουν να έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα απ' αυτήν του τεμαχίου, να διατηρούν τις ιδιότητές τους για υψηλές θερμοκρασίες, να παρουσιάζουν μικρή φθορά κατά τη λειτουργία και να είναι εργονομικά κατά την τοποθέτησή τους.

#### 5.2. Υλικά κοπτικών εργαλείων

Σε μια κατεργασία είναι άκρως σημαντικό να γίνει σωστή επιλογή εργαλείου και σε αυτό συντελεί κυρίως το υλικό κατασκευής κοπτικού εργαλείου. Τρεις είναι οι ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν την επιλογή μας: σκληρότητα, δυσθραυστότητα και αντοχή στην φθορά. Εκτός από τις δυνάμεις που πρέπει να αντέχει κατά την κοπή το υλικό οφείλει να μην χάνει την σκληρότητα του όσο ανεβαίνει θερμοκρασία του κατά την κατεργασία [44].

##### **Υλικά κοπτικών εργαλείων από χάλυβα**

Σύμφωνα με τους κανονισμούς DIN EN ISO 4957 διακρίνονται σε δύο μεγάλες ομάδες χαλύβδινων κοπτικών εργαλείων. Η χάλυβες για τις ταχύτητες κοπής μικρότερες των 200 °C (ψυχροί εργαλειοχάλυβες) και αυτοί για θερμοκρασίες κοπής μέχρι περίπου 580 °C (ταχυχάλυβες).

- Ψυχροί εργαλειοχάλυβες

Τυπικοί εργαλειοχάλυβες για ενδεικνύομενες θερμοκρασίες κοπής μέχρι τους 200 °C. Η χαμηλά κεκραμένοι χάλυβες είναι κυρίως ανθρακούχοι με μικρές προσμίξεις



πυριτίου για τη βελτίωση της αντοχής σε οξειδωσή και μαγγανίου για αύξηση της σκληρότητας μέσω του σχηματισμού σχετικών καρβιδίων.

- Ταχυχάλυβες.

Η ταχυχάλυβες διατηρούν την σκληρότητα τους ανάλογα με την χημική σύσταση τους μέχρι περίπου τους 580 °C . Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες κοπής σε σχέση με τους ψυχρούς εργαλειοχάλυβες. Τα κύρια συστατικά των υλικών αυτών είναι το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο, το βανάδιο και το κοβάλτιο.

### **Σκληρομέταλλα**

Η συστηματική ταξινόμηση των σκληρομετάλλων διεξάγεται υπό το πρίσμα των υλικών για την κοπή των οποίων συνιστώνται. Σύμφωνα με τους κανονισμούς DIN1505B και ISO 513 τα σκληρομέταλλα κατατάσσονται σε ομάδες κατάλληλες για την κατεργασία ορισμένων υλικών, ταξινομημένων σύμφωνα με σημαντικά για κατεργασίες κοπής χαρακτηριστικά τους. Γενικά τα σκληρομέταλλα περιέχουν πέντε δομικά υλικά:

Το καρβίδιο του βολφραμίου WC.

Το καρβίδιο του τιτανίου TiC.

Το καρβίδιο του τανταλίου TaC.

Το καρβίδιο του νιοβίου NbC.

Το κοβάλτιο Co.

### **Σκληρομέταλλα τύπου Cerments**

Σκληρομέταλλα χωρίς απλά καρβίδια WC χαρακτηρίζονται σαν cerments γιατί ιδιότητές τους και οι χημικές συστάσεις τους ταξινομούνται μεταξύ των κεραμικών (CERamics) και των σκληρομετάλλων (hardMETals). Τά cerments περιέχουν νιτρίδια και καρβονιτρίδια του τιτανίου (TiN, TiCN), βασικά συστατικά και των κεραμικών υλικών, αλλά και τον επικαλύψεων, συγχρόνως με μία σειρά συνοδευτικών στοιχείων, όπως ταντάλιο βολφράμιο μολυβδαίνιο και νιόβιο υπό την μορφή συνθετών καρβιδίων.

### **Κεραμικά υλικά**

Κοπτικά εργαλεία από κεραμικά υλικά, παρασκευάζονται κονιομεταλλουργικά, μέσω πυροσυσσωμάτωσης κόνεων οξειδίων, νιτρίδιων, καρβιδίων μετάλλων ή συνδυασμό αυτών. Τα κυριότερα οξείδια είναι του αλουμινίου



$Al_2O_3$  συνοδευόμενα από οξείδια του ζirkονίου  $ZrO_2$ , μαγνησίου  $MgO$  ('λευκά' κεραμικά) ή και άλλων μετάλλων κυρίως για τη βελτίωση της ολκιμότητας τους.

### **Κυβικά βοριονιτρίδια (CBN)**

Το κρυσταλλικό κυβικό βοριονιτρίδιο είναι το σκληρότερο υλικό μετά το διαμάντι. Η σκληρότητα του ανέρχεται περίπου στα 5000 HV ενώ του διαμαντιού προσεγγίζει την τιμή των 10.000 HV. Το υλικό αυτό δεν υπάρχει στη φύση, αλλά παράγεται μέσω καταλυτικής πυρόλυσης του τριχλωριούχου βορίου ( $BCl_3$ ) παρουσία λιθίου.

### **Διαμάντι**

Το διαμάντι είναι το πιο σκληρό υλικό που απαντάται στη φύση και περιέχει μόνο άνθρακα (C) σε ασταθή κυβική κρυσταλλική δομή. Κάθε άτομο άνθρακα περιβάλλεται από κρυσταλλικό πλέγμα από τέσσερα περαιτέρω άτομα άνθρακα δημιουργούμενων τοιουτοτρόπως τετραεδρικών δομικών υψηλής ενέργειας μοιοπολικού θεσμού στο οποίο το διαμάντι οφείλει την υψηλή σκληρότητα του.

- Μονοκρυσταλλικά διαμάντια (DM)

Τα μονοκρυσταλλικά διαμάντια είναι συνήθως φυσικής προέλευσης, λόγω του μικρότερου κόστους σε σχέση με τα τεχνικώς παραγόμενα μεγάλων διαστάσεων.

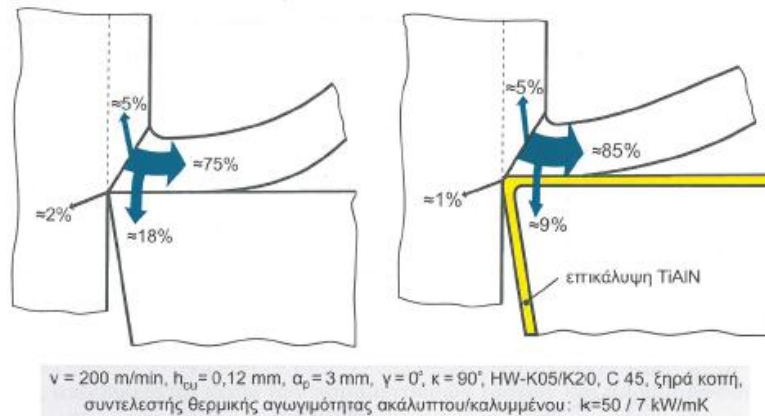
- Πολυκρυσταλλικά διαμάντια (DP)

Κατά την πρώτη τεχνική παραγωγή μικρών κοκών διαμαντιού μέσω συμπίεσης γραφίτη, η θερμοκρασία ανερχόταν περίπου στους  $3000^\circ C$  και η πίεση στα 10 GPa. Μέσω προσθήκης καταλυτών, όπως κοβάλτιο, νικέλιο, πυρίτιο, βόριο, βηρύλλιο και σίδηρο μειώθηκαν οι παραπάνω συνθήκες σημαντικά, σε  $1500^\circ C$  και 6 GPa αντίστοιχα.

## **5.3. Επικαλύψεις κοπτικών εργαλείων**

Ίσως την σημαντικότερη αλλαγή των τελευταίων 40 χρόνων έφερε στην τεχνολογία των κατεργασιών η εφαρμογή επικαλύψεων/επενδύσεων σε κοπτικά εργαλεία από ταχυχάλυβες και σκληρομέταλλα. Τα υλικά των επικαλύψεων ποικίλουν αλλά συνήθως είναι είτε κεραμικά ( $Al_2O_3$ ) είτε καρβίδια ή νιτρίδια του τιτανίου (TiC) ή (TiN), αναμειγμένα πολλές φορές με αλουμίνιο (TiAlN) ή και μεταξύ τους (TiCN), (TiAlCN). Η επικάλυψη μπορεί να γίνει από πολλές στρώσεις κάθε μία με ένα υλικό ενώ τελευταία χρησιμοποιείται και το διαμάντι ως υλικό επικάλυψης. Φυσικά η αλληλουχία και το ακριβές πάχος της κάθε στρώσης αποτελεί στις

περισσότερες φορές μυστικό για την κάθε εταιρεία κατασκευής αυτών των εργαλείων. Πάντως το εξωτερικό στρώμα συνήθως είναι TiC χάριν της καλής θερμικής του αγωγιμότητας.



**Εικόνα 5.1** Απαγωγές θερμότητας κοπής από το τεμάχιο, το απόβλιττο και το ακάλυπτο ή επικαλυμμένο εργαλείο

Οι επικάλυψεις αυτές μπορεί να μην ξεπερνούν συνήθως τα 10  $\mu\text{m}$  σε πάχος όμως συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της διάρκειας ζωής, της αντοχής σε υψηλή θερμοκρασία, της σκληρότητας και της αντοχής σε φθορά πάσης φύσεως. Ακόμη μειώνουν την δύναμη κοπής και τη θερμότητα που παράγεται από την τριβή με το απόβλιττο. Για τους παραπάνω λόγους η ταχύτητα κοπής με σκληρομέταλλο μπορεί μέχρι και να διπλασιάσει με την επικάλυψη, ενώ ταυτόχρονα ο χρόνος ζωής του εργαλείου να αυξηθεί επίσης σημαντικά [46][47].

Οι διεργασίες λεπτών σκληρών επικαλύψεων εργαλείων ταξινομούνται γενικά σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Την χημική εναπόθεση με ατμό (CVD) και την φυσική εναπόθεση με ατμό (PVD).

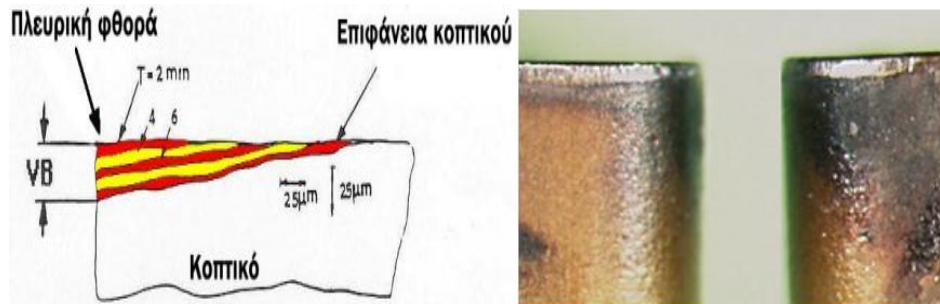
## 5.4. Φθορά κοπτικών εργαλείων

Το κοπτικό εργαλείο κατά την κοπή, υπόκειται όπως προαναφέρθηκε, σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Αυτό έχει σαν συνέπεια το κοπτικό εργαλείο σταδιακά να φθείρεται και τελικά να αστοχεί, που σημαίνει πως είναι πλέον άχρηστο και πρέπει να επανατροχιστεί ή να απορριφθεί. Η φθορά που αναπτύσσεται παρουσιάζεται με τις παρακάτω μορφές :

### Πλευρική φθορά (Flank Wear)

Η πλευρική φθορά αναπτύσσεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία ελευθερίας. Οφείλεται στην ολίσθηση / τριβή του εργαλείου επάνω στο

τεμάχιο και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης (Adhesion) και διάβρωσης / τριβής (Abrasion), που ενισχύονται από τις μεγάλες θερμοκρασίες της κοπής. Η πλευρική φθορά προκαλεί σταδιακή μείωση του βάθους κοπής. Συνήθως η διάρκεια ζωής του εργαλείου αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο όριο μέσης πλευρικής φθοράς VB [50].



*Εικόνα 5.2 (Αριστερά) Ανάπτυξη πλευρικής φθοράς στα κοπτικά εργαλεία. (Δεξιά) Απεικόνιση πλευρικής φθοράς.*

### Φθορά κρατήρα (Crater Wear)

Η φθορά κρατήρα εμφανίζεται στην πλευρά του εργαλείου που ορίζει τη γωνία αποβλήτου [50]. Σε αυτή την περιοχή αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως και οι μηχανικές τάσεις κατά την κοπή. Μέγιστη φθορά παρατηρείται μάλιστα στο σημείο όπου η θερμοκρασία κατά την κοπή είναι μέγιστη. Η φθορά κρατήρα μπορεί να αυξήσει τη γωνία εργασίας και να μειώσει τη δύναμη κοπής. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη παράμετρος για να μετρηθεί η φθορά κρατήρα είναι το βάθος κρατήρων.



*Εικόνα 5.3 (Αριστερά) Ανάπτυξη φθοράς κρατήρα στα κοπτικά εργαλεία. (Δεξιά) Απεικόνιση φθοράς κρατήρα.*

### Αποκολλήσεις (Chipping)

Η σμίλευση του εργαλείου περιλαμβάνει την αφαίρεση των σχετικά μεγάλων ιδιαίτερων μορίων του υλικού εργαλείων. Τα εργαλεία που υποβάλλονται σε ασυνεχείς κοπτικές συνθήκες είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε σμίλευση. Οι αποκολλήσεις





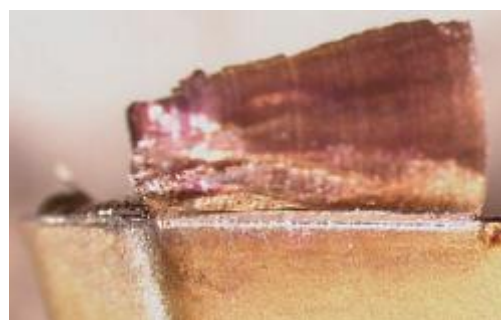
κατηγοριοποιούνται περισσότερο στη μικροθραύση του κοπτικού παρά στη συμβατική φθορά. Ο σχηματισμός ψευδοακμής έχει επίσης μια τάση να προκαλεί τη σμίλευση εργαλείων. Μια ψευδοακμή δεν είναι ποτέ απολύτως σταθερή και επομένως κάθε φορά που αφαιρούνται μερικά κομμάτια από το υλικό της, υπάρχει πιθανότητα να παρασύρουν και κομμάτια της άκρης εργαλείων. Οι αποκολλήσεις όταν συμβαίνουν μικροσκοπικά εμπίπτουν στη φθορά, ενώ όταν συμβαίνουν μακροσκοπικά εμπίπτουν στην καταστροφική θραύση του κοπτικού εργαλείου [48].



*Εικόνα 5.4 Απεικόνιση φθοράς λόγω αποκολλήσεων.*

#### **Φθορά λόγω ψευδοακμής**

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλίττου (γρεζιού), υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδοακμή [48][51]. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου. Η ψευδοακμή δημιουργείται από αλεπάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου τα οποία προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.



*Εικόνα 5.5 Απεικόνιση φθοράς λόγω ψευδοακμής.*

Η ύπαρξη της ψευδοακμής μειώνει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ η συμπεριφορά της ως προς το κοπτικό εργαλείο εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής. Έτσι υπάρχει περίπτωση η σταθερή παρουσία της ψευδοακμής να προστατεύει το κοπτικό εργαλείο, καθώς κόβει αυτή και όχι άμεσα η κοπτική ακμή του εργαλείου, ενώ υπάρχει και η περίπτωση, ανάλογα τις συνθήκες κοπής, η



ψευδοακμή να φθείρει το εργαλείο κυρίως στην επιφάνεια αποβλήτου του, με τον μηχανισμό της απόξεσης. Η δημιουργία ή αποφυγή της ψευδοακμής μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

## 5.5. Διάρκεια ζωής των κοπτικών

Παρόλο που θεωρητικά το κοπτικό εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι να αστοχήσει τελείως, είναι σκόπιμο να αντικαθιστάται ή να απομακρύνεται για ανατροχίση πριν ακόμη εμφανιστούν τα πρώτα αποτελέσματα της μερικής αστοχίας. Με στόχο τον προσδιορισμό του κατάλληλου κατά περίπτωση χρόνου απομάκρυνσης του κοπτικού εργαλείου, έχει καθιερωθεί η έννοια της «διάρκειας ζωής» του κοπτικού εργαλείου. Στην κυριολεξία ο όρος «διάρκεια ζωής» ή απλά «ζωή» του κοπτικού εργαλείου δηλώνει, ή γενικότερα αντιστοιχεί, στον ωφέλιμο χρόνο χρήσης ενός κοπτικού εργαλείου από την έναρξη της χρησιμοποίησής του, μέχρι την στιγμή της επόμενης απομάκρυνσης του με την αιτιολογία της ακαταλληλότητας προς περαιτέρω χρήση [48]. Η διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων προσδιορίζεται από την εξίσωση του F. W. Taylor [49][52]:

$$VT^n = \text{const}$$

Όπου:  $V$  : η ταχύτητα κοπής,  $T$  : η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.

Τα τελευταία χρόνια ο B. K. Srinivas μετά από πειράματα που εκτέλεσε, προτείνει τη σχέση:

$$c = kT^n s^a d^b$$

Όπου:  $k$  : σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό και τη γεωμετρία του,  $n$   $a$   $b$  : εκθέτες προσδιοριζόμενοι κατόπιν πειραμάτων. Οι εκθέτες  $n$   $a$   $b$  που προτείνει ο B. K. Srinivas, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

	<b>a</b>	<b>n</b>	<b>b</b>
Καρβίδιο WC	-0.30	-0.31	-0.15
Καρβίδιο με επικάλυψη TiC	-0.27	-0.43	-0.13
Καρβίδιο Tic	-0.31	-0.41	-0.23
Νιτρίδια	-0.38	-0.40	-0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.38	-0.48	-0.12

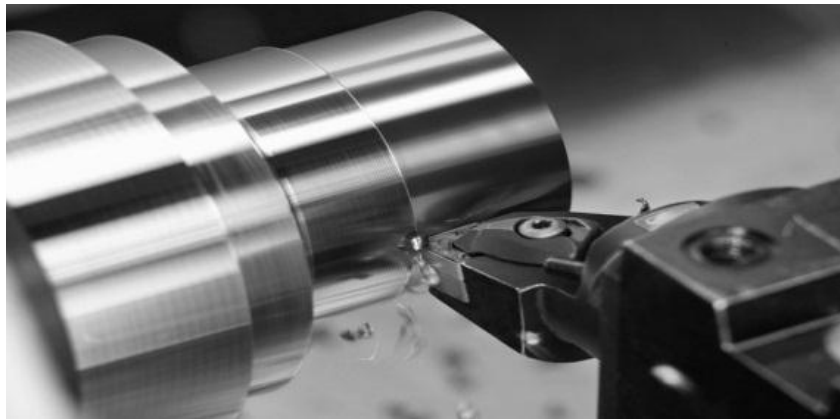
*Πίνακας 5.1 Προτεινόμενοι εκθέτες υπολογισμού διάρκειας ζωής, κατά B. K. Srinivas*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. Η κατεργασία της τórνευσης

Η τórνευση ως κατεργασία χρησιμοποιείται από πολύ πάντα από πολύ παλιά. Γύρω στο 1400 μ.Χ εμφανίστηκαν οι πρώτοι τórνοι που στην αρχή κινούνταν με μυϊκή δύναμη ή με το νερό, όπως η κατοπινοί οι υδρόμυλοι.

Με τórνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής με, κατά κανόνα, κυλινδρική διατομή. Τα κατεργαζόμενα τεμάχια στον τórνο είναι δυνατόν να αποκτούν διαφορετική ποιότητα επιφάνειας στα επιμέρους τμήματά τους, ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας.



*Εικόνα 6.1 Τórνευση*

Κατά την τórνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τórνου. Με αυτόν τον τρόπο, είναι σε επαφή με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει την δυνατότητα διαμήκους και εγκάρσιας μετακίνησης, δηλαδή ευθύγραμμα παράλληλα προς τον άξονα του τεμαχίου ή σε ορθή γωνία ως προς τον άξονα του τεμαχίου.

#### 6.1. Είδη Τórνευσης

Ανάλογα με την επιφάνεια που κατασκευάστηκε τα είδη τórνευσης διακρίνονται σε κυκλική τórνευση, επίπεδη τórνευση, σπειροτομηση, έκκεντρη τórνευση, τórνευση προφίλ και τórνευση με αντιγραφή.



*Εικόνα 6.2 Είδη τόννευσης*

### **Κυκλική τόννευση**

Στην κυκλική τόννευση παράγεται μια κυλινδρική επιφάνεια. Η κίνηση της πρόωσης μπορεί να γίνεται κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής (κυκλική κατά μήκος τόννευση) ή κάθετα προς τον άξονα (κυκλική εγκάρσια τόννευση). Στην αποπεράτωση με πλατύ εργαλείο η κατεργασία εκτελείται με μεγάλη πρόωση και μικρές γωνίες θέσης.

### **Επίπεδη τόννευση**

Στην επίπεδη τόννευση παράγεται μια επίπεδη επιφάνεια κάθετη προς τον άξονα περιστροφής. Διακρίνουμε εγκάρσια επίπεδη τόννευση, εγκάρσια τόννευση αποκοπής και κατά μήκος επίπεδη τόννευση.

### **Σπειροτόμηση**

Η σπειροτόμηση είναι μια τόννευση με ειδικό εργαλείο για την παράγωγή ελικοειδών επιφανειών, κατά την οποία η πρόωση ανά στροφή είναι όση με το βήμα της έλικας.

### **Έκκεντρη τόννευση**

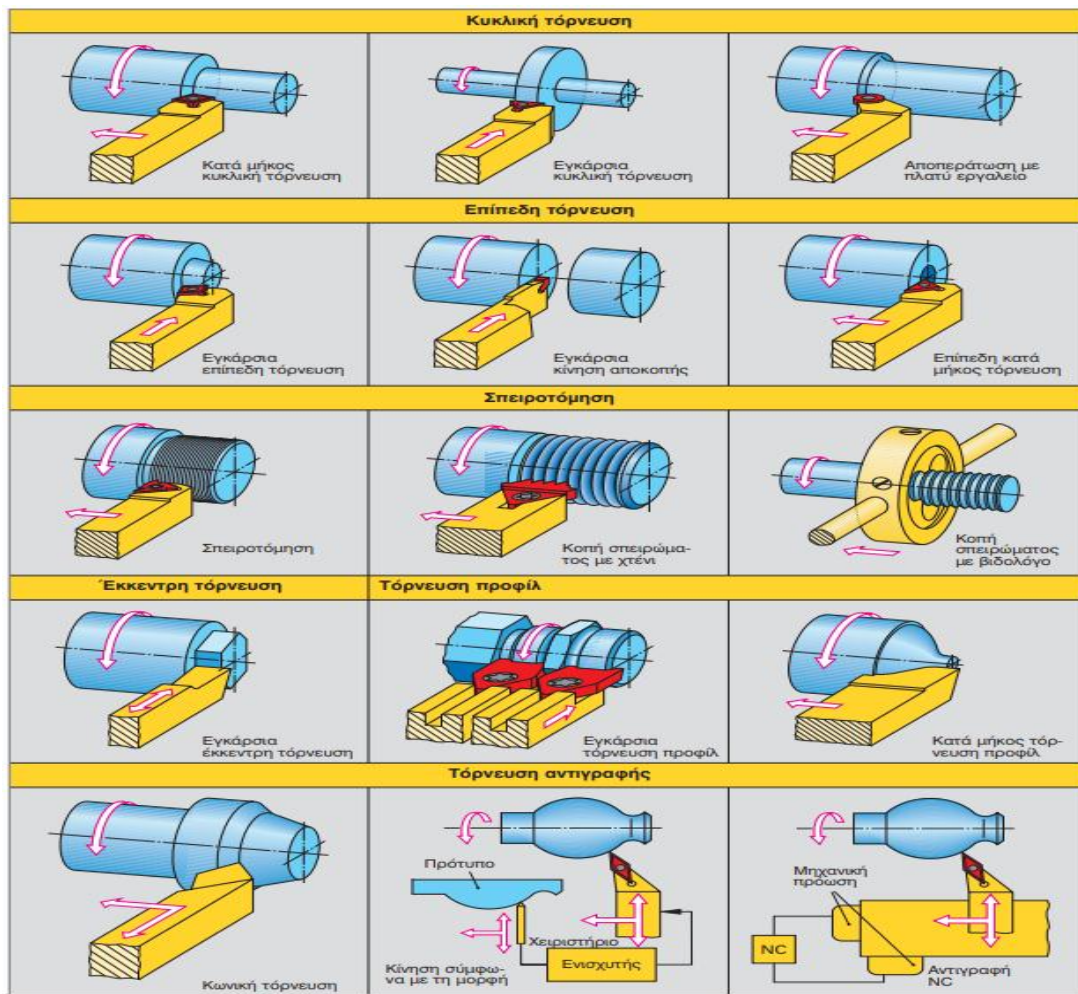
Στην έκκεντρη τόννευση, κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του αντικείμενου μεταβάλλεται η θέση της κόπης του εργαλείου, ανάλογα με τη διατομή που θα παραχθεί.

### **Τόννευση προφίλ**

Στην τόννευση προφίλ μεταφέρεται η μορφή του εργαλείου επάνω στο αντικείμενο.

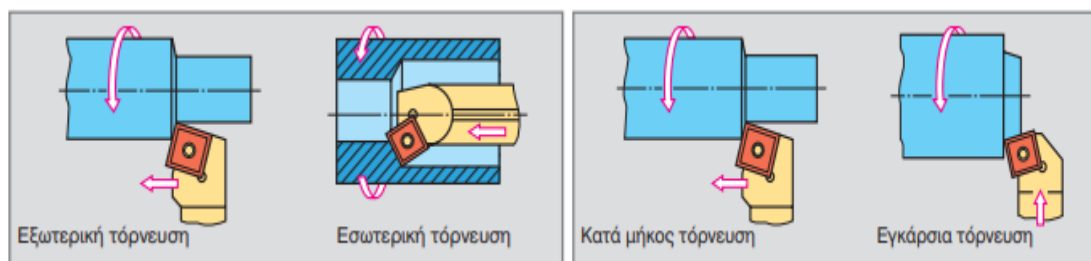
### **Τόννευση αντιγραφής**

Τόννευση αντιγραφής είναι μια μέθοδος κατά την οποία με έλεγχο της κίνησης πρόωσης παράγεται η μορφή του αντικείμενου. Ο έλεγχος της πρόωσης μπορεί να γίνει με το χέρι (ελεύθερη αντιγραφή), από ένα πρότυπο (αντιγραφή από πρότυπο) ή με αριθμητικό έλεγχο (αντιγραφή NC).



**Εικόνα 6.3** Κατάταξη των μεθόδων τόνρευσης

Ανάλογα με την θέση του σημείου κατεργασίας επάνω στο αντικείμενο, διακρίνουμε εσωτερική και εξωτερική τόνρευση. Ανάλογα με τη διεύθυνση πρόωσης διακρίνουμε κατά μήκος τόνρευση και εγκάρσια τόνρευση.



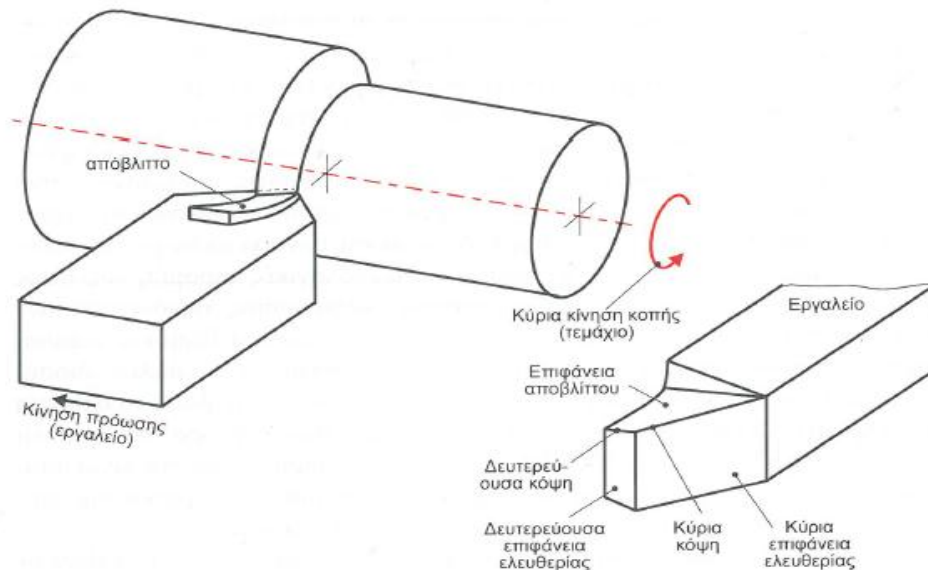
**Εικόνα 6.4** (Αριστερά) Θέση του σημείου κατεργασίας στην τόνρευση . (Δεξιά) Διεύθυνση πρόωσης στην τόνρευση.

Οι μορφές που μπορεί να πάρει το κατεργαζόμενο τεμάχιο με την τόνρευση απαιτούν διαφορετικό συνδυασμό κινήσεων όπως και χρησιμοποίηση του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται

εξαρτάται τόσο από το είδος της παραγόμενης επιφάνειας όσο και από το αν η τόννευση είναι εξωτερική ή εσωτερική στο κομμάτι στην εικόνα παρακάτω παρουσιάζονται διάφορα είδη εξωτερικής και εσωτερικής τόννευσης για την κατεργασία κυλινδρικών και κωνικών επιφανειών ειδικής μορφής και σπειρομάτων [53].

## 6.2. Περιγραφή της κατεργασίας τόννευσης και η τυπική γεωμετρία ενός εργαλείου τόννευσης

Κατά την τόννευση το κοπτικό εργαλείο εκτελεί την κίνηση της πρόωσης, ενώ η κυρία κίνηση της κοπής επιτυγχάνεται μέσω της περιστροφής του τεμαχίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.5 Στην εικόνα επίσης επεξηγείται η τυπική γεωμετρία ενός εργαλείου τόννευσης. Το δημιουργούμενο απόβλιττο μέσω της διείσδυσης του εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο ρέει επί της επιφάνειας του αποβλίττου η επαφή της οποίας με το τεμάχιο οριοθετείται από την κυρία και την δευτερεύουσα κόψη του εργαλείου. Οι κόψεις αυτές είναι οι ακμές τομής της κύριας και της δευτερεύουσας επιφάνειας ελευθερίας με την επιφάνεια αποβλίττου [44].



*Εικόνα 6.5 Τυπική γεωμετρία κοπτικού εργαλείου τόννευσης*

## 6.3. Συνθήκες κοπής και κύριες διαστάσεις στην κατεργασία της τόννευσης

Οι παράμετροι ως συνθήκες κοπής αποτελούν και τις συνθήκες της κατεργασίας της τόννευσης. Οι βασικότερες από αυτές είναι:



**Η ταχύτητα κοπής  $v$  (m/min):** είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής. Είναι η περιφερειακή ταχύτητα του τεμαχίου που τρονεύεται και δείχνει πόσα μέτρα αποβλίττου παράγονται ανά λεπτό. Δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$v = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \text{ (m / min)}$$

όπου:  **$D$**  η αρχική διάμετρος του προς κατεργασία τεμαχίου (mm) ,  **$n$** : η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου (rpm).

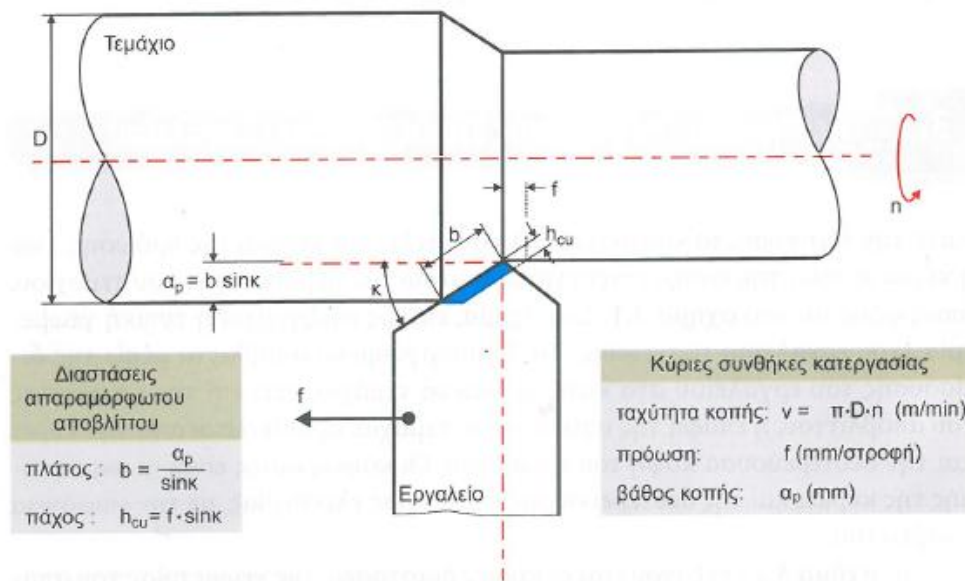
**Το βάθος κοπής  $a_p$ (mm):** είναι το βάθος διεϊσδυσής του κοπτικού εργαλείου μέσα στο τεμάχιο.

**Η πρόωση  $f$  (mm/rev):** Είναι η μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή της ατράκτου κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής του τεμαχίου.

Από το συνδυασμό των  $v$ ,  $f$  και  $a$  εξαρτώνται κατά κύριο λόγο :

- Η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας.
- Ο χρόνος κατεργασίας.
- Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις και η καταναλισκόμενη ισχύς κοπής.
- Η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου

Στην εικόνα 6.6 επεξηγούνται οι κυρίες διαστάσεις της γεωμετρίας του απαραμορφώτου αποβλίττου καθώς και οι κυρίες συνθήκες κατεργασίας κατά την τόννευση. Οι διαστάσεις του απαραμορφώτου αποβλίττου στην συνήθη γραμμική πρόωση της διαμήκους τόννευσης είναι το πλάτος  $b$  και το πάχος  $h_{cu}$  ο δείκτης  $cu$  προέρχεται από την αγγλική λέξη “cutting” και αναφέρεται στις διαστάσεις του αποβλίττου πριν την παραμόρφωση του υλικού που δημιουργείται κατά την κοπή. Οι αντίστοιχες διαστάσεις μετά την κοπή συμβολίζονται με τον δείκτη  $chip$  που σημαίνει στην αγγλική, μεταξύ άλλων και απόβλιττο [DIN 6581]. Επειδή το πάχος του απαραμορφώτου αποβλίττου  $h_{cu}$  είναι συνήθως πολύ μικρότερο από το πλάτος του  $b$  η διατομή του αποβλίττου θεωρείται ότι είναι προσεγγιστικά ορθογωνική με εμβαδόν ίσο με  $h_{cu} \cdot b$  . Οι κυρίες συνθήκες κατεργασίας είναι η ταχύτητα κοπής  $v$ , η πρόωση  $f$  και το βάθος κοπής  $a_p$ . Στην εικόνα 6.6 παρουσιάζονται οι σχέσεις υπολογισμού των διαστάσεων του αποβλίττου λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες κατεργασίας καθώς και τη γωνία τοποθέτησης  $\kappa$  της κόψης του κοπτικού εργαλείου [44].

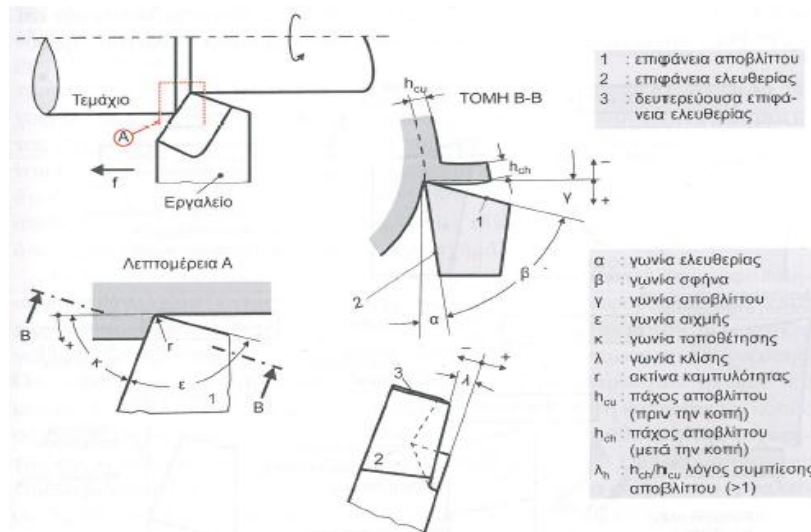


**Εικόνα 6.6** Διαστάσεις απαραμόρφωτου αποβλίττου και κύριες συνθήκες κατεργασίας τόννευσης

## 6.4. Συμβολισμός και οι επιδράσεις γωνιών κοπής του κοπτικού εργαλείου της τόννευσης

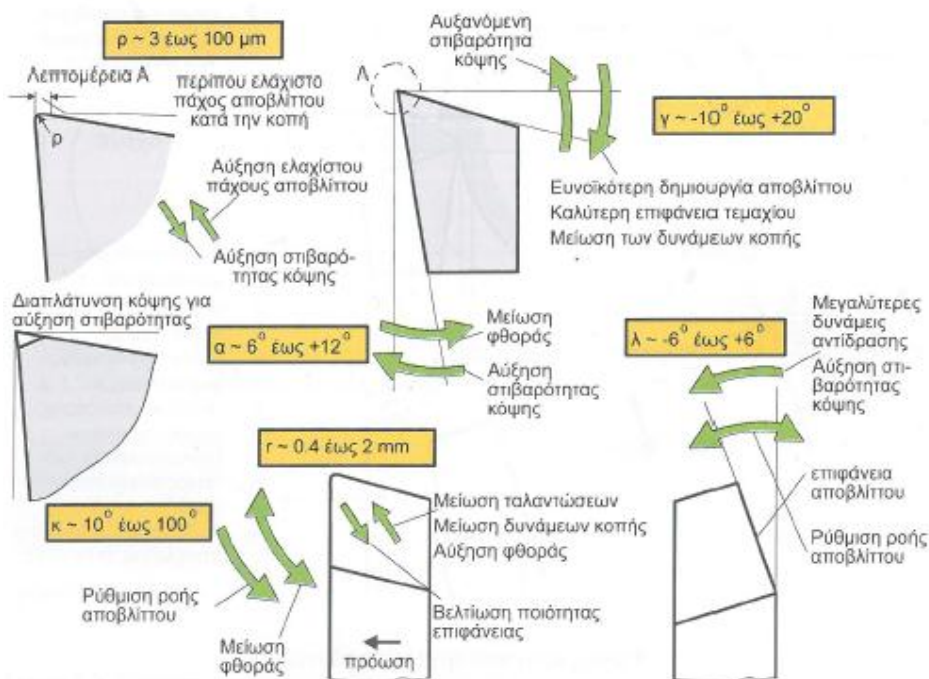
Οι γωνίες του κοπτικού εργαλείου της τόννευσης επεξηγούνται στην εικόνα 6.7. Όλες οι γωνίες συμβολίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία με ελληνικά γράμματα [DIN6581]. Οι γωνίες ορίζονται σε σχέση με τις κύριες επιφάνειες του κοπτικού εργαλείου καθώς και τις διευθύνσεις της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής. Το οριζόντιο επίπεδο που αντιστοιχεί στην μια πλευρά της γωνίας αποβλίττου  $\gamma$  είναι εξ ορισμού κάθετο στη διεύθυνση της κοπής. Το άθροισμα των γωνιών ελευθερίας  $\alpha$ , κοπτικού σφήνα  $\beta$  και γωνιάς αποβλίττου ισούται με 90 μοίρες. Θετική γωνία αποβλίττου οδηγεί σε μείωση της γωνίας  $\beta$  του κοπτικού σφήνα και ταυτόχρονα εξασθένηση του. Η γωνία αιχμής του εργαλείου οριοθετείται από την κύρια και την δευτερεύουσα κόψη. Η καμπυλότητα της μεταβατικής περιοχής μεταξύ κύριας και δευτερεύουσας κόψης χαρακτηρίζεται από την ακτίνα  $r$ . Η γωνία  $\lambda$ , αναφέρεται στην κλίση της κόψης, σε σχέση με το προηγούμενος αναφερθέν οριζόντιο και κάθετο επίπεδο στη διεύθυνση της ταχύτητας κοπής. Ο λόγος μεταξύ των παχών του παραμορφωμένου και του απαραμορφώτου αποβλίττου  $\lambda_h$  είναι πάντα μεγαλύτερος από το ένα.





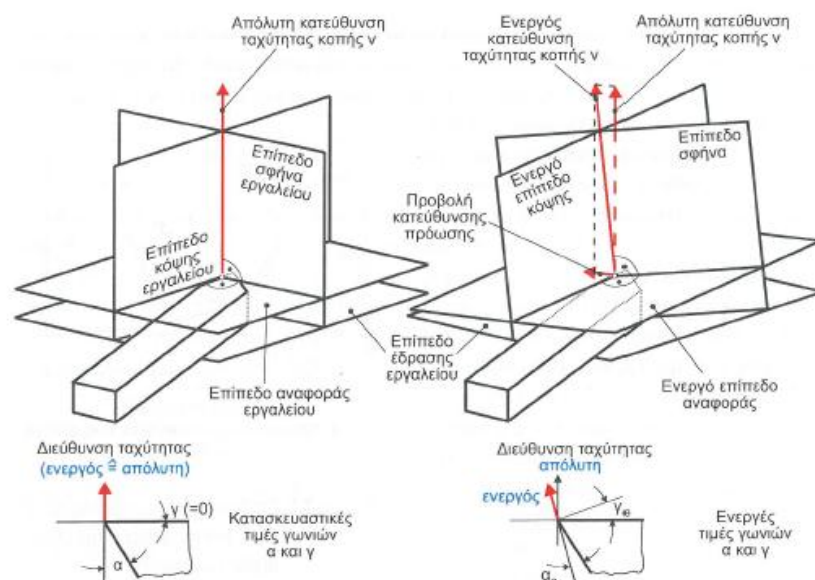
**Εικόνα 6.7** Γωνίες κοπτικού εργαλείου τόννευσης

Χαρακτηριστικές τιμές των γωνιών του κοπτικού εργαλείου καθώς και των ακτίνων καμπυλότητας  $\rho$  της κοπτικής ακμής και  $r$  της μεταβατικής περιοχής μεταξύ της κύριας και δευτερεύουσας κόψης, παρουσιάζονται στην εικόνα 6.8. Στην εικόνα αυτή επεξηγούνται και οι επιδράσεις των μεγεθών αυτών επί της στιβαρότητας της κόψης, της δημιουργίας και της ροής αποβλίπτου, της δύναμης κοπής, της ποιότητας της κατεργαζομένης επιφάνειας του τεμαχίου, της φθοράς του κοπτικού εργαλείου κ.α..



**Εικόνα 6.8** Ενδεικτικές τιμές και επιδράσεις γωνιών κοπής και ακτινών καμπυλότητας

Οι τιμές των κοπτικών γωνιών, που κατασκευάστηκαν κατά την μορφοποίηση ενός εργαλείου (κατασκευαστικές τιμές), μπορεί να διαφοροποιηθούν κατά τη χρησιμοποίηση του εργαλείου λόγω της κινηματικής της κοπής μιας κατεργασίας. Η διαφοροποίηση αυτή θα επεξηγηθεί στην περίπτωση της τόννευσης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.9, η κατασκευαστική γεωμετρία των γωνιών του κοπτικού εργαλείου περιγράφεται, σε σχέση με την απόλυτη κατεύθυνση κοπής σε ένα ακίνητο σύστημα συντεταγμένων αναφοράς. Η διεύθυνση της ταχύτητας της κοπής και η κυρία κόψη του εργαλείου ορίζουν το επίπεδο της κόψης του εργαλείου. Κάθετο στο επίπεδο αυτό είναι το επίπεδο σφήνα του εργαλείου. Τα δύο αυτά επίπεδα τέμνονται από ένα τρίτο επίπεδο κάθετο στο επίπεδο του σφήνα και στην περίπτωση μηδενικής γωνίας κλίσεως  $\lambda$  του εργαλείου παράλληλο στο επίπεδο έδρασης του.



**Εικόνα 6.9** Κατασκευαστική και ενεργός τιμή γωνιών  $\alpha$  και  $\gamma$  (για απλοποίηση  $\gamma=\lambda=0$ )

Η τομή του κοπτικού σφήνα εμφανίζεται στο κάτω αριστερά μέρος της εικόνας. Στην προκειμένη περίπτωση μηδενικής πρόωσης, η απόλυτη διεύθυνση της ταχύτητας ταυτίζεται με την ενεργό και οι κατασκευαστικές τιμές των κοπτικών γωνιών του εργαλείου  $\alpha$  και  $\gamma$  είναι αμετάβλητες κατά την κοπή. Στο περιγραφόμενο παράδειγμα, για λόγους απλοποιήσεως οι γωνίες  $\gamma$  και  $\lambda$  έχουν θεωρηθεί μηδενικές.



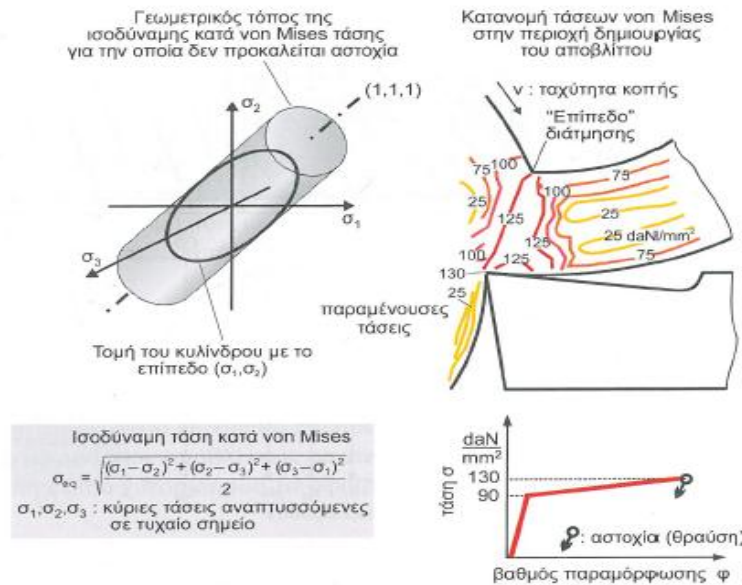
Κατά την κοπή με πρόωση  $f$ , η απόλυτος διεύθυνση της ταχύτητας της κοπής μεταβάλλεται. Η νέα διεύθυνση, που χαρακτηρίζεται σαν ενεργός μπορεί να προσδιοριστεί όπως επεξηγείται δεξιά στην εικόνα. Στο επίπεδο του ενεργού σφήνα προσβάλλεται το άνυσμά της πρόωσης. Από την διανυσματική άθροιση αυτού με την απόλυτη κατεύθυνση της ταχύτητας της κοπής προκύπτει η ενεργός κατεύθυνση της.

Το ενεργό επίπεδο αναφοράς, που περιέχει την κόψη του εργαλείου, είναι τώρα κάθετο στην ενεργό κατεύθυνση της ταχύτητας κοπής. Στην τομή του κοπτικού σφήνα, που είναι κατοχυρωμένη στο κάτω δεξιά μέρος της εικόνας, εύκολα διακρίνεται ότι μέσω της πρόωσης, οι κατασκευαστικές τιμές των κοπτικών γωνιών διαφοροποιούνται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση γωνία ελευθερίας  $\alpha$  μειώνεται ενώ η γωνία απόβλιττου  $\gamma$  μεγαλώνει. Σε κατεργασίες κοπής με συνθέτη κινηματική, όπως τα πολυαξονικά φρεζάρια και ο οδοντοκοπές η γωνία  $\alpha$  μπορεί να λάβει αρνητικές τιμές γεγονός που οδηγεί σε περιορισμό της διάρκειας ζωής του εργαλείου, λόγω φθοράς και σημαντική μείωση της ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας [44].

## **6.5. Καταπονήσεις του υλικού κατά την κατεργασία της τόννευσης**

Η φόρτιση του υλικού του τεμαχίου κατά τη δημιουργία του αποβλίττου σε χαμηλή ταχύτητα κοπής επεξηγείται στην εικόνα 6.10. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και επομένως χαμηλές θερμοκρασίες και ταχύτητες παραμόρφωσης του υλικού μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί ότι δεν διαφοροποιούνται σημαντικά. Στην εξεταζόμενη περίπτωση τα όρια της τάσης και οριακής ελαστικής παραμόρφωσης και θραύσης ανέρχονται σε 90 και 130daN/mm<sup>2</sup> αντίστοιχα. Το υλικό του τεμαχίου κατά την διέλευσή του από το 'επίπεδο διάτμησης' παραμορφώνεται πλαστικά και διαρρέει αφού η αναπτυσσόμενη κατά von Mises ισοδύναμη τάση, περίπου 125daN/mm<sup>2</sup> υπερβαίνει την τάση της οριακής ελαστικής παραμόρφωσης. Μόνο στην περιοχή της κορυφής της κόψης η ισοδύναμη τάση προσεγγίζει αυτήν της θραύσης που ανέρχεται στα 130daN/mm<sup>2</sup>. Η δημιουργούμενη επιφάνεια του τεμαχίου παραμορφώνεται και αυτή πλαστικά με αποτέλεσμα την δημιουργία παραμενουσών τάσεων. Το υλικό του δημιουργούμενου αποβλίττου έχει και αυτό παραμενουσες τάσεις. Γενικά το απόβλιττο μπορεί να

δεχθεί περαιτέρω παραμόρφωση πριν θραυσθεί. Το μέγεθος της παραμόρφωσης αυτής εξαρτάται από το ύψος της φόρτισης του υλικού όταν διέρχεται από το 'επίπεδο διάτμησης' και επηρεάζει σημαντικά την μικροδομή του σχηματιζόμενου αποβλίττου [44].



**Εικόνα 6.10** Πεδίο ισοδύναμων κατά von Mises τάσεων, που δημιουργείται κατά την κοπή, σε χαμηλές ταχύτητες κοπής

## 6.6. Δυνάμεις κοπής και ισχύς κατά την κατεργασία της τórνευσης

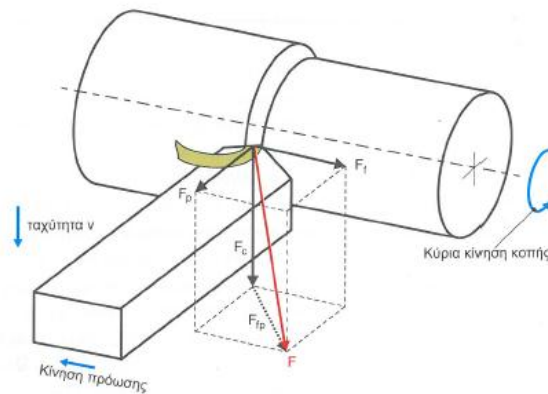
Η συνολική δύναμη κοπής  $F$  αναλύεται στις ακόλουθες συνιστώσες ανά δύο κάθετες μεταξύ τους:

$F_c$  : Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( διεύθυνση  $Z$  )

$F_f$  : Δύναμη πρόωσης ( διεύθυνση  $X$  )

$F_p$  : Δύναμη άπωσης του κοπτικού εργαλείου ( διεύθυνση  $Y$  )

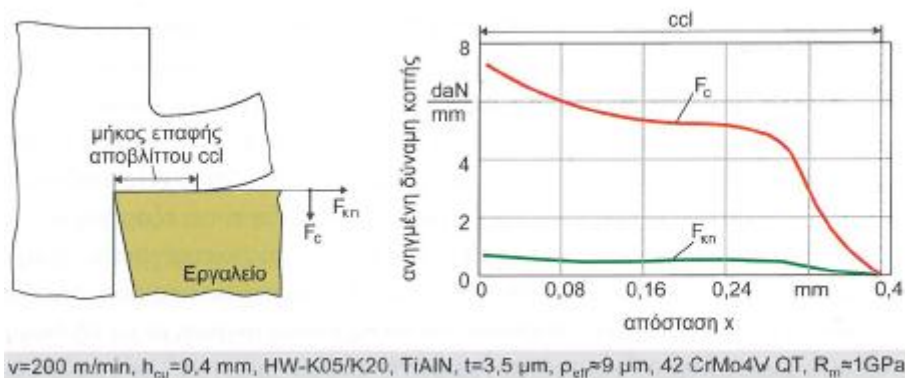
Η δύναμη κοπής  $F_c$  επενεργεί στην άκρη του κοπτικού εργαλείου τείνοντας να το εκτρέψει προς τα κάτω. Αυτή η δύναμη παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια κοπής. Η δύναμη πρόωσης  $F_f$  επενεργεί στην διαμήκη κατεύθυνση. Η δύναμη άπωσης  $F_p$  ασκείται στην ακτινική κατεύθυνση και τείνει να απομακρύνει το εργαλείο από το τεμάχιο. Προφανώς ισχύει :  $F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$



**Εικόνα 6.11** Δύναμη κοπής και συνιστώσες της σε σύστημα αναφοράς της κινηματικής της κατεργασίας

Η απαιτούμενη ισχύς της εργαλειομηχανής κατά την κοπή για την αντιμετώπιση της κύριας δύναμης κοπής δίνεται από την σχέση :  $P_c = F_c \cdot v$

Οι συνιστώσες της δύναμης κοπής δεν ασκούνται σημειακά άλλα κατανέμονται επί της επιφάνειας αποβλίττου στην περιοχή της επαφής της με το δημιουργούμενο απόβλιττο μήκους  $c_{cl}$  όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [44].

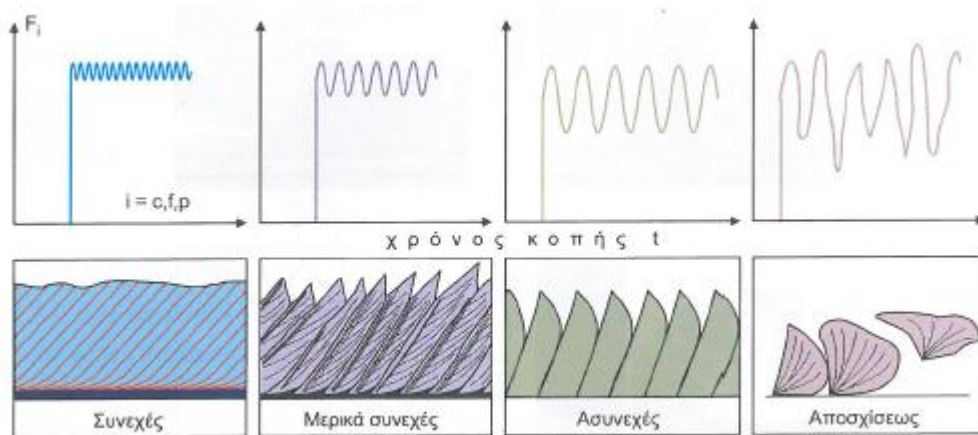


**Εικόνα 6.12** Συνιστώσες δύναμης κοπής και κατανομή των προκαλούμενων μηχανικών φορτίσεων επί της επιφάνειας του αποβλίττου

## 6.7. Επίδραση της μικροδομής του αποβλίττου επί της δύναμης κοπής

Η δύναμη κοπής δεν είναι σταθερή καθώς δημιουργούνται χρονικές διακυμάνσεις των κατανομών των μηχανικών τάσεων στην περιοχή του επιπέδου διάτμησης κατά τη δημιουργία του αποβλίττου. Η συμπίεση και στη συνέχεια η διαρροή του υλικού στην περιοχή του επιπέδου διάτμησης κατά την κοπή δεν είναι

συνεχή διαδικασίες αλλά απαιτούνται συγκεκριμένοι χρόνοι για την εξέλιξη τους, εξαρτώμενοι από τα δεδομένα του υλικού, του εργαλείου και γενικά της κατεργασίας.



**Εικόνα 6.13** Διακυμάνσεις της δύναμης κοπής σε διάφορες περιπτώσεις μικροδομών του αποβλίττου

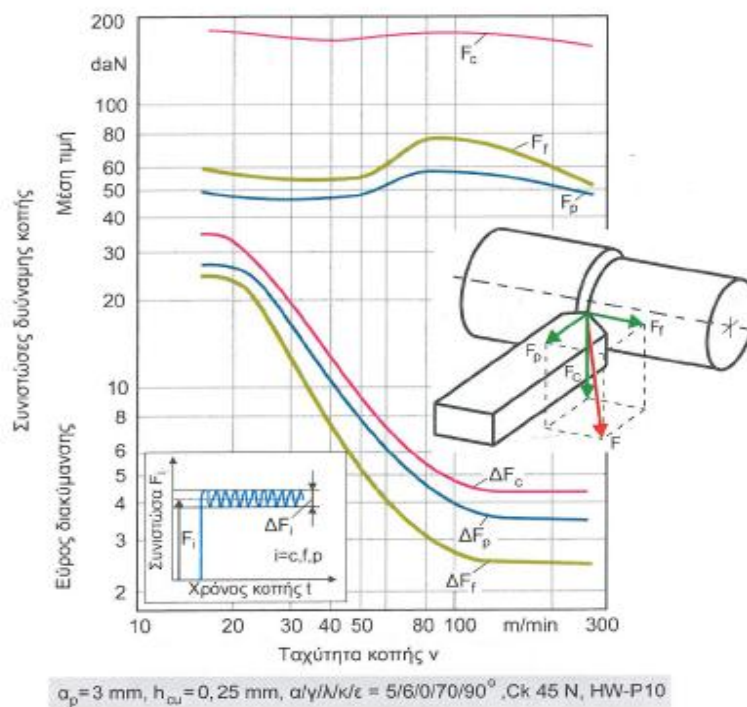
Στην εικόνα 6.13 η διακύμανση της δύναμης κοπής έχει παρασταθεί ποιοτικά για διάφορες περιπτώσεις μικροδομών αποβλίττων. Το συνεχές απόβλιττο γενικά οδηγεί σε μικρές διακυμάνσεις και ψηλές συχνότητες μεταβολής των συνιστωσών της δύναμης κοπής. Στον αντίποδα των διακυμάνσεων αυτών είναι η μεταβολή της δύναμης κοπής κατά τη δημιουργία αποβλίττων απόσχισης. Η μεταβολή της τιμής είναι υψηλή, η δε σχετική συχνότητα χαμηλή και όχι σταθερή σύμφωνα με τη δημιουργία των μεγάλων μικροδομών των αποβλίττων απόσχισης. Μεταξύ αυτών των οριακών καταστάσεων βρίσκονται οι τιμές των σχετικών μεταβολών της δύναμης κοπής όταν σχηματίζονται μερικά συνεχή ή άσυνεχη απόβλιττα [44].

## 6.8. Επίδραση των συνθηκών κατεργασίας επί της δύναμης κοπής

### Επίδραση της ταχύτητας κοπής

Κατά την άνοδο της ταχύτητας κοπής αυξάνεται συγχρόνως και η θερμοκρασία της κοπής. Έτσι ενεργοποιούνται ή καθίστανται ανενεργοί διάφοροι μηχανισμοί που σχετίζονται π.χ. με την δημιουργία των ψευδοκόψεων και την ενδοτράχυνση του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Οι μηχανισμοί αυτοί επιδρούν επί της δύναμης κοπής. Κατά την αύξηση της ταχύτητας κοπής οι συνιστώσες της είναι η διακύμανση των τιμών τους μεταβάλλονται μη γραμμικά. Η δημιουργία της ψευδοκόψης στις χαμηλές

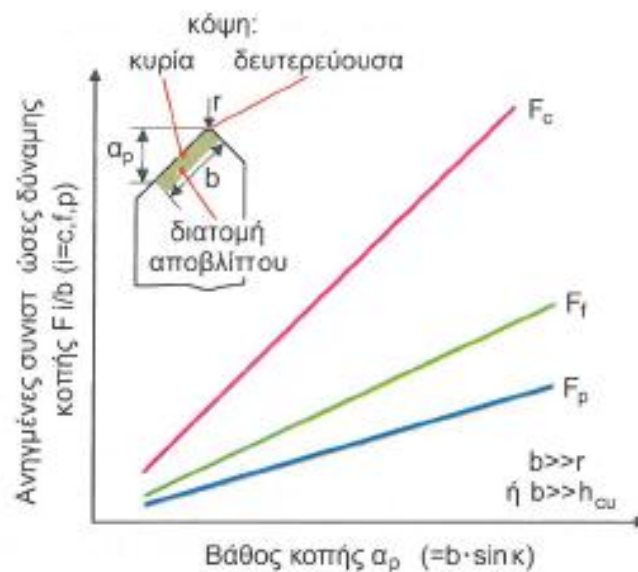
ταχύτητες κοπής ισοδυναμεί με αύξηση της γωνίας αποβλίττου συνεπώς με περιορισμό των τάσεων. Στο παράδειγμα της παρακάτω εικόνας έως περίπου ταχύτητα κοπής 30m/min, παρατηρείται μείωση των συνιστωσών της δύναμης κοπής. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής μέχρι περίπου 90m/min, η δύναμη κοπής αυξάνεται κυρίως λόγω του περιορισμού της γωνίας αποβλίττου, συνέπεια της απενεργοποίησης του μηχανισμού σχηματισμού των ψευδοκόψεων. Η άνοδος της θερμοκρασίας της κοπής σε ταχύτητες άνω των 100m/min οδηγεί σε γρήγορους ρυθμούς ανακρυστάλλωσης και σε περιορισμό της επίδρασης της ενδοτράχυνσης του υλικού, επί της δύναμης κοπής, η οποία τοιουτοτρόπως παρουσιάζει πτωτική πορεία μεταβολής. Συγχρόνως το εύρος της διακύμανσης των τιμών των συνιστωσών της δύναμης κοπής μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Αυτό συμβαίνει καθόσον η μικροδομή του απόβλιττου καθίσταται έντονα συνεχής,. Έτσι διακύμανση της δύναμης κοπής περιορίζεται δραστικά. Κατά την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής η θερμοκρασία της κοπής αυξάνεται σημαντικά και μειώνεται αντίστοιχα η αντίσταση παραμόρφωσης του υλικού. Τοιουτοτρόπως παρατηρείται ελάττωση των συνιστωσών της δύναμης κοπής [44].



**Εικόνα 6.14** Επίδραση της ταχύτητας στην κοπή στην διακύμανση των τιμών των συνιστωσών της δύναμης κοπής

## Επίδραση του βάθους κοπής

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις άρα και η δύναμη κοπής μεταβάλλονται προσεγγιστικά αναλογικά με το πλάτος της διατομής του αποβλίττου. Η θεώρηση αυτή είναι αρκετά ακριβής γιατί οι διαστάσεις της μεταβατικής περιοχής του αποβλίττου, ακτίνας καμπυλότητας  $r$ , από την κυρία στη δευτερεύουσα κόψη του εργαλείου είναι στις περισσότερες περιπτώσεις κοπής πολύ μικρές συγκριτικά με το πλάτος του αποβλίττου. Επίσης το πάχος του απαραμορφώτου αποβλίττου είναι πολύ μικρό σε σχέση με το πλάτος του έτσι ώστε η μεταβατική περιοχή της κόψης δεν επιδρά σημαντικά την γεωμετρία της διατομής του αποβλίττου. Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις οι ανηγμένες στο πλάτος του αποβλίττου συνιστώσες της δύναμης κοπής μεταβάλλονται αναλογικά με το βάθος κοπής όπως φαίνεται στην εικόνα 6.15. Η εξάρτηση αυτή οδηγεί στην αναγωγή των συνιστωσών της δύναμης κοπής στο πλάτος του αποβλίττου για να απλοποιηθεί η διαδικασία μαθηματικής περιγραφής τους από τις συνθήκες κατεργασίας [44].



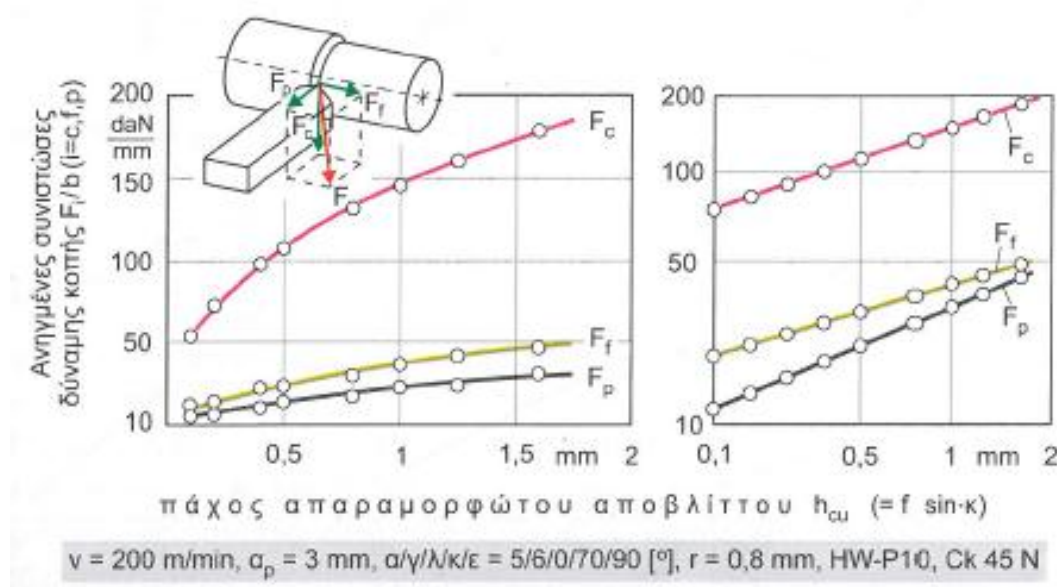
*Εικόνα 6.15 Εξάρτηση των συνιστωσών της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής*

## Επίδραση της πρόωσης

Την εικόνα 6.16 παρουσιάζεται η επίδραση του πάχους του απαραμορφώτου αποβλίττου  $h_{cu}$  παραμέτρου αναλογικής της πρόωσης  $f$  της κατεργασίας επί των ανηγμένων συνιστωσών της δύναμης κοπής στο πλάτος αποβλίττου  $b$ . Στο αριστερό διάγραμμα της εικόνας γίνεται αντιληπτό ότι η άνοδος του απαραμορφώτου πάχους



του αποβλίττου οδηγεί σε φθίνουσες αυξήσεις στις συνιστώσες της δύναμης κοπής. Οι πορείες αυτές μεταβολής, σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα με ικανοποιητική ακρίβεια παριστάνονται με ευθείες γραμμές όπως φαίνεται στο δεξιό διάγραμμα της εικόνας [44].

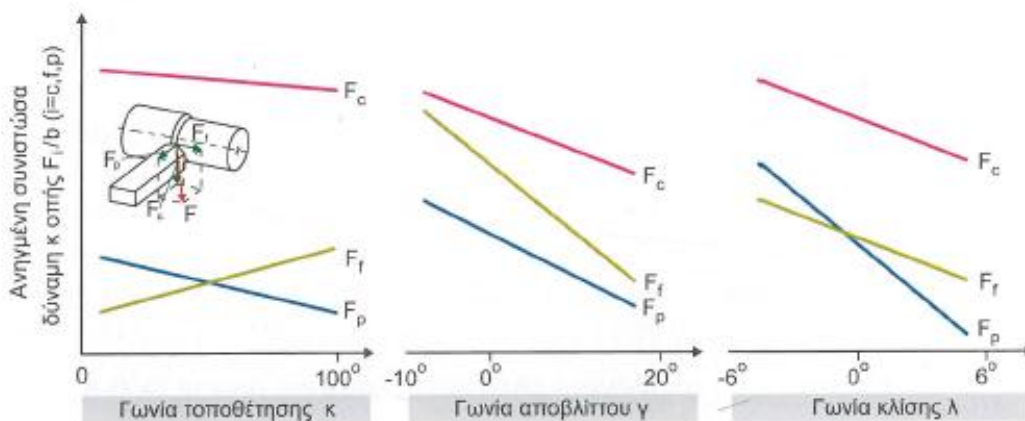


*Εικόνα 6.16 Επίδραση του πάχους του απαραμορφώτου αποβλίττου επί των ανηγμένων συνιστωσών της δύναμης κοπής, στο πλάτος του αποβλίττου, σε απλό και διπλό λογαριθμικό διάγραμμα*

## 6.9. Επίδραση γωνιών της κοπτικής γεωμετρίας επί των συνιστωσών της δύναμης κοπής

Εννοώ η γωνία ελευθερίας  $\alpha$  του κοπτικού σφήνα στη συνήθη περιοχή τιμών της από  $3^\circ$  έως  $12^\circ$  δεν επηρεάζει την δύναμη κοπής αξιοσημείωτες είναι οι αλληλεπιδράσεις των υπολοίπων γωνιών τοποθέτησης  $\kappa$ , αποβλίττου  $\gamma$  και κλίσης  $\lambda$ . Στην εικόνα 6.17 εικονίζονται οι εξαρτήσεις το συνιστωσών  $F_c$ ,  $F_f$  και  $F_p$  της δύναμης κοπής από τις γωνίες αυτές. Περίπου στην περιοχή τιμών της γωνίας τοποθέτησης  $\kappa$  των  $45^\circ$  λόγω του ότι η συνιστώσα  $F_{fp}$  προσεγγιστικά κάθετη στην κυρία κόψη αναλύεται σε δύο ίσες συνιστώσες την κατεύθυνση της πρόωσης και της απώθησης του εργαλείου οι συνιστώσες  $F_f$  και  $F_p$  είναι περίπου ίσες. Οι μεταβολές των συνιστωσών αυτών υπαγορεύονται πρακτικά από την ανάλυση της  $F_{fp}$  στις προηγούμενως αναφερθείσες διευθύνσεις. Από την άλλη πλευρά η κυρία δύναμη κοπής  $F_c$  κατά την αύξηση της γωνίας  $\kappa$  για σταθερό βάθος κοπής  $a_p$  οδηγεί σε

μεγέθυνση του πάχους του απαραμορφώτου αποβλίττου και αναλογική μείωση του πλάτους του. Έπειδή όμως το πλάτος  $b$  του αποβλίττου μειώνει αναλογικά την δύναμη κοπής και τις συνιστώσες της αλλά το πάχος  $h_{cu}$  τις αυξάνει με φθίνουσα εκθετική πορεία μεταβολής δημιουργείται συνολικά η εμφανιζόμενη στην εικόνα καθοδική πορεία της κυρίας δύναμης κοπής  $F_c$  με την αύξηση της γωνίας  $\kappa$  της κόψης. Η αύξηση της γωνίας αποβλίττου  $\gamma$  μειώνει το λόγο συμπίεσης του αποβλίττου  $\lambda_h$  και διευκολύνει τη ροή του κατά την κοπή. Ως εκ τούτου η πορεία μεταβολής των συνιστωσών της δύναμης κοπής με την αύξηση της γωνίας αποβλίττου είναι φθίνουσα περίπου γραμμικά. Παρόμοια είναι και η εξάρτηση της γωνίας κλίσης της κόψης  $\lambda$  της οποίας η αύξηση συμβάλλει στην ευχερή απομάκρυνση του αποβλίττου από το τεμάχιο καθώς και στη ροή του επί της επιφάνειας αποβλίττου και έτσι περιορίζει τη δύναμη κοπής και τις συνιστώσες της [44].



**Εικόνα 6.17** Εξάρτηση των συνιστωσών της δύναμης κοπής από τη γωνία τοποθέτησης  $\kappa$ , αποβλίττου  $\gamma$  και κλίσης  $\lambda$



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

*Έλεγχος κατεργασιμότητας σε τόννευση  
νανοσύνθετων υλικών μήτρας αλουμινίου με  
ενίσχυση νανοδομών γραφενίου*

Διπλωματική Εργασία  
του Παπαδημητρίου  
Δημήτρη

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7. Χύτευση

#### 7.1. Υλικά και εξοπλισμός χύτευσης

Η χύτευση, καθώς και όλες οι απαραίτητες διαδικασίες για την προετοιμασία της, πραγματοποιήθηκαν στο κτίριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας 96,83% και νανοδομές γραφενίου (Graphene nanoplatelets-GNPs). Το αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρχικά σε μορφή ορθογωνικής μπιγιέτας. Με χρήση αυτόματου πριονιού κόπηκαν μικρά κομμάτια ορθογωνικής διατομής, που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σαν υλικό μήτρας για τα χυτά δοκίμια της παρούσας εργασίας. Αναλυτικότερα τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν για την όλη διαδικασία του πειράματος πριν και μετά την χύτευση παρατίθενται παρακάτω:

- Μπιγιέτα κράματος αλουμινίου 96,83%
- Νανοδομές γραφενίου 500m<sup>2</sup>/g (GNPs)
- Αυτόματο πριόνι
- Κεραμικό δοχείο
- Διαιρετό κυλινδρικό καλούπι βαμμένου χάλυβα
- Εργαστηριακός κλίβανος
- Ηλεκτρονικό θερμόμετρο
- Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας
- Γυάλινο δοχείο

#### Φασματογραφικός χαρακτηρισμός του αλουμινίου μήτρας

Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Hf(%)	Mg(%)	T 400604 (%)	Hg(%)	Al(%)
0.18253	0.46088	0.22189	1.06692	0.05671	1.07267	0.07928	0.00045	96.8322
CrMn (%)	Zn(%)	Ti(%)	Cr(%)	Ga(%)	FeMn(%)	FedivSi (%)	FeSi (%)	MgMn(%)
1.085	0.03883	0.02321	0.01793	0.01214	1.528	2.524	0.643	2.140
Ni (%)	Pd (%)	Sn(%)	Na(%)	Ca(%)	B(%)	Bi(%)	Zr(%)	V(%)
0.00416	0.00000	0.00060	0.00000	0.00077	0.00040	0.0032	0.00113	0.00757

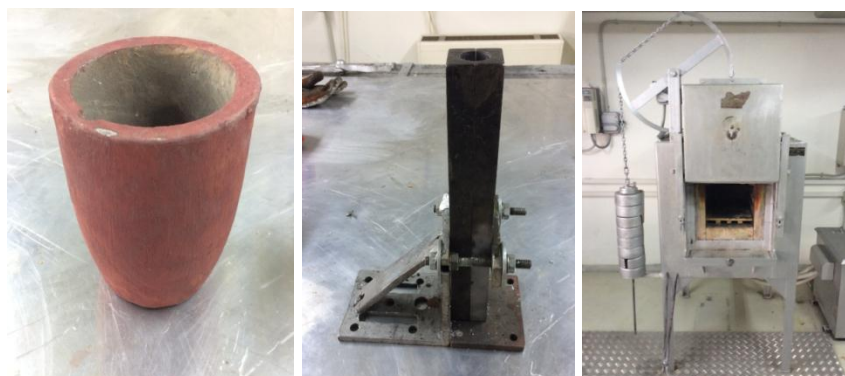


Be(%)	Co(%)	Cd(%)	Sb(%)	P(%)	Li(%)	HeavyMet(%)	Ag(%)	As(%)
0.00002	0.00026	0.00037	0.00000	0.00084	0.00003	0.00000	0.00058	0.00094
In(%)	Se(%)	Sc(%)						
0.00014	0.00085	0.00008						

**Πίνακας 7.1** Φασματογραφικός χαρακτηρισμός του αλουμινίου μήτρας



**Εικόνα 7.1** (Αριστερά) Μπιγιέτα κράματος αλουμινίου 96,83%. (Κέντρο) Νανοδομές γραφενίου (GNPs). (Δεξιά) Αυτόματο πριόνι.



**Εικόνα 7.2** (Αριστερά) Κεραμικό δοχείο. (Κέντρο) Διαιρετό κυλινδρικό καλούπι βαμμένου χάλυβα. (Δεξιά) Εργαστηριακός κλίβανος



**Εικόνα 7.3** (Αριστερά) Ηλεκτρονικό θερμόμετρο. (Κέντρο) Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και Γυάλινο δοχείο. (Δεξιά) Νανοδομές γραφενίου (GNPs)

## Μέτρα Προστασίας

Η χύτευση είναι μία επικίνδυνη διαδικασία, κατά την οποία είναι απαραίτητο να λαμβάνονται αυστηρά τα απαραίτητα μέτρα προστασίας. Σε περίπτωση ταυτόχρονης χρήσης νανοδομών γραφενίου, τα μέτρα προστασίας επιβάλλεται να είναι ακόμα αυστηρότερα. Τα Nanoplatelets γραφενίου μπορεί να προκαλέσουν σοβαρό οφθαλμικό ερεθισμό αν έρθουν σε επαφή με τα μάτια ή και ερεθισμό της αναπνευστικής οδού εάν αυτά εισπνευστούν. Πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά η εισπνοή σκόνης, αναθυμιάσεων, αερίων, σταγονιδίων, ατμών και εκνεφωμάτων που περιέχουν γραφένιο. Είναι απαραίτητο οι συμμετέχοντες σε τέτοιου είδους πειράματα να φορούν μη διαπερατά από νανοσωματίδια γάντια, προστατευτικά ενδύματα ίδιου τύπου και μέσα προστασίας για τα μάτια και το πρόσωπο. Εάν για οποιοδήποτε λόγο το υλικό έρθει σε επαφή με τα μάτια συστήνεται άμεσο ξέπλυμα προσεκτικά με νερό, ενώ σε περίπτωση εισπνοής κρίνεται απαραίτητη η μεταφορά του παθόντος στον καθαρό αέρα και η ξεκούραση του σε στάση που διευκολύνει την αναπνοή. Τα μέτρα προστασίας που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ήταν πιστοποιημένα κατά CE και αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω:

- Δερμάτινη ποδιά
- Πυρίμαχα γάντια
- Γάντια latex μη διαπερατά απο νανοσωματίδια
- Μάσκα για σκόνη επιπέδου προστασίας FFP3 (προστασία απο micro και nano σωματίδια)
- Πλαστικά γυαλιά ασφαλείας
- Μεταλλική λαβίδα



**Εικόνα 7.4** (Αριστερά) Δερμάτινη ποδιά. (Κέντρο) Πυρίμαχα γάντια . (Δεξιά) Γάντια latex μη διαπερατά απο νανοσωματίδια



*Εικόνα 7.5 (Αριστερά) Μάσκα προστασίας προσώπου. (Κέντρο) Πλαστικά γυαλιά ασφαλείας .  
(Δεξιά) Μεταλλική λαβίδα*

## 7.2. Διαδικασία χύτευσης

Η χύτευση είχε σαν σκοπό την δημιουργία έξι σειρών δοκιμών. Μία σειρά δοκιμών από αλουμίνιο καθαρότητας 96,83%, και οι υπόλοιπες πέντε σειρές δοκιμών αλουμινίου με περιεκτικότητα 0.10% w.t. , 0.20% w.t. , 0.30% w.t. , 0.40% w.t. και 0.50% w.t. σε νανοδομές γραφενίου. Η διαδικασία της χύτευσης ξεκίνησε με την τοποθέτηση του κεραμικού δοχείου με αλουμίνιο στον εργαστηριακό κλίβανο στους 750 °C. Προτού την τοποθέτηση αυτή, τα κομμάτια ορθογωνικής διατομής του κράματος αλουμινίου, αφού πλύθηκαν και καθαρίστηκαν μετά την κοπή στο αυτόματο πριόνι, ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν σε ξεχωριστά κεραμικά δοχεία ώστε να αναμειχθούν με τις κατάλληλες ποσότητες νανοδομων γραφενιου, για να παραχθούν τα δοκίμια στις διάφορες περιεκτικότητες.

Για το αλουμίνιο καθαρότητας 96,83% η διαδικασία που ακολούθησε είναι η εξής:

- Τοποθέτηση κεραμικού δοχείου με αλουμίνιο στον εργαστηριακό κλίβανο.
- Θέρμανση εργαστηριακού κλίβανου στους 750 °C
- Ρευστοποίηση αλουμινίου.
- Αφαίρεση οξειδίων από την επιφάνεια τήγματος
- Χύτευση του αλουμινίου στο προθερμασμένο κυλινδρικό καλούπι στους 100 °C με την βοήθεια του θερμοπίστολου.
- Αφαίρεση του διαιρούμενου κυλινδρικού καλουπιού ύστερα από 3 λεπτά
- Ψύξη σε ελεύθερο αέρα θερμοκρασίας δωματίου 20 °C

Για το αλουμίνιο σε διάφορες περιεκτικότητες γραφενίου η διαδικασία που ακλούθησε είναι η εξής:



- Τοποθέτηση κεραμικού δοχείου με αλουμίνιο στον εργαστηριακό κλίβανο.
- Θέρμανση εργαστηριακού κλίβανου στους 750 °C
- Ρευστοποίηση αλουμινίου.
- Αφαίρεση οξειδίων από την επιφάνεια τήγματος
- Προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs) και καλή ανάδευση
- Επανατοποθέτηση του κεραμικού δοχείου στον εργαστηριακό κλίβανο για 15 λεπτά.
- Έξοδος από τον εργαστηριακό κλίβανο και ξανά ανάδευση του τήγματος.
- Επανάληψη 4 φορές της ανάδευσης του τήγματος και της επανατοποθέτησης στον εργαστηριακό κλίβανο με παραμονή 15 λεπτών κάθε φορά.
- Χύτευση του αλουμινίου στο προθερμασμένο στους 100 °C κυλινδρικό καλούπι με την βοήθεια του θερμοπίστολου.
- Αφαίρεση του διαιρούμενου κυλινδρικού καλουπιού ύστερα από 3 λεπτά
- Ψύξη σε ελεύθερο αέρα θερμοκρασίας δωματίου 20 °C

### 7.3. Παραχθέντα δοκίμια



*Εικόνα 7.6 Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια*

Ο σκοπός της χύτευσης ήταν η παράγωγή κυλινδρικών δοκιμίων μήκους 300mm και διαμέτρου 25mm. Τα κυλινδρικά δοκίμια αντιστοιχούσαν σε 2 για κάθε περιεκτικότητα δηλαδή:

- 2 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου καθαρότητας 96,83%
- 2 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου 0.10% w.t
- 2 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου 0.20% w.t
- 2 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου 0.30% w.t
- 2 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου 0.40% w.t
- 2 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου 0.50% w.t



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### 8. Τórνευση

#### 8.1. Προετοιμασία κυλινδρικών δοκιμίων

Η προετοιμασία που έγινε στα κυλινδρικά δοκίμια πριν την τórνευση τους στην CNC εργαλειομηχανή του εργαστηρίου κατεργασιών ήταν να κοπούν οι απολήξεις των κυλινδρικών δοκιμίων και οι προεξοχές που δημιουργήθηκαν κατά την χύτευση αλουμινίου στο κυλινδρικό μεταλλικό καλούπι. Αυτό έγινε με τη βοήθεια του πριονιού μετάλλου και του κόφτη χειρός. Έπειτα να με τη βοήθεια συμβατικού τórνου τα κυλινδρικά δοκίμια ξεχονδρίστηκαν και φινιρίστηκαν για να αποκτήσουν πλήρη κυλινδρικήτητα και να έχουν όλα ίδια διάμετρο των  $\varnothing 21\text{mm}$ . Τέλος δημιουργήθηκαν κατάλληλες αυλακώσεις ώστε σε κάθε κυλινδρικό δοκίμιο να ξεχωρίζετε το κάθε πείραμα με τις επιλεγθείς συνθήκες κοπής. Το μήκος κάθε πειράματος είναι στα  $25\text{mm}$ . Ο συμβατικός τórνος που χρησιμοποιήθηκε για το ξεχόνδρισμα, φινίρισμα και η διαμόρφωση των αυλακώσεων των κυλινδρικών δοκιμίων ήταν Optimum D180 x 300 Vario επίσης χρησιμοποιήθηκαν και τα κατάλληλα κοπτικά εργαλεία για το ξεχόνδρισμα, το φινίρισμα και η διαμόρφωση των αυλακώσεων.



*Εικόνα 8.1 (Αριστερά) Τórνος Optimum D180 x 300 Vario (Δεξιά) Κυλινδρικά δοκίμια ύστερα από την προετοιμασία.*

## 8.2. Υλικά και εξοπλισμός τόνρευσης

### Τόρνος

Για την τόνρευση των κυλινδρικών δοκιμίων και για στις συνθήκες κοπής που επιλέξαμε χρησιμοποιήσαμε την CNC εργαλειομηχανή του εργαστηρίου της εταιρίας Haas στις σειρές LT-1 στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα χαρακτηριστικά του.



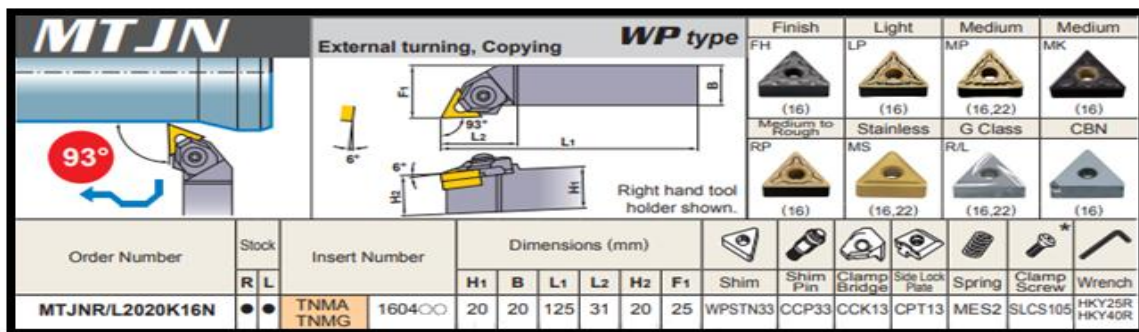
*Εικόνα 8.2 Τόρνος CNC Haas LT-1 του εργαστηρίου*

HAAS TL-1		
SWING DIAMETER	S.A.E.	METRIC
Over Front Apron	20 "	508 mm
Over Cross Slide	11 "	279 mm
CAPACITIES	S.A.E.	METRIC
Chuck (optional)	8 "	203 mm
Max Cutting Diameter (varies with turret)	16 "	406 mm
Max Cutting Length (without workholding)	30 "	762 mm
Between Centers	30 "	762 mm
TRAVELS & FEEDRATES	S.A.E.	METRIC
X Axis	8 "	203 mm
Z Axis	30 "	762 mm
Rapids on X	450 in/min	11.4 m/min
Rapids on Z	450 in/min	11.4 m/min
Max Thrust X	3894 lb	17 321 N
Max Thrust Z	1947 lb	8661 N
SPINDLE	S.A.E.	METRIC
Max Rating	10 hp	7.5 kW
Max Speed	1800 rpm	1800 rpm
Max Torque	108 ft-lb @ 355 rpm	146 Nm @ 355 rpm
Spindle Nose	A2-6	A2-6
Spindle Bore $\varnothing$	3.00 "	76.2 mm
SPINDLE (OPT)	S.A.E.	METRIC
Max Rating	10 hp	7.5 kW
Max Speed	3000 rpm	3000 rpm
Max Torque	108 ft-lb @ 355 rpm	146 Nm @ 355 rpm

*Πίνακας 8.1 Χαρακτηριστικά τόρνου CNC Haas LT-1*

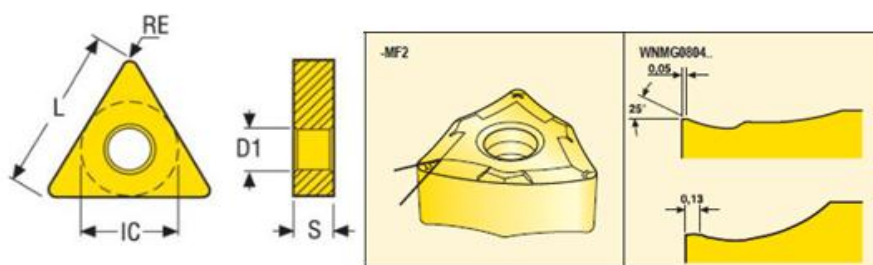
### Κοπτικό εργαλείο

Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το εξής: Ο τύπος της μανέλας τόννευσης είναι MTJNR 2020 K16 και του κοπτικού πλακιδίου της secotools TNMG 160404-MF2 TP200. Όπου στην παρακάτω εικόνα αναγράφονται οι διαστάσεις της μανέλας και επίσης η γωνιά τοποθέτησης  $\kappa=93^\circ$  και γωνιά κλίσης  $\lambda=6^\circ$



**Εικόνα 8.3** Διαστάσεις μανέλας MTJNR 2020 K16

Το κοπτικό πλακίδιο που επιλέξαμε είναι ένα σκληρομεταλλο τύπου cermet με επικάλυψη. Από τον κωδικό ονομασίας του TNMG 160404-MF2 TP200 και με την βοήθεια του κατάλογου της εταιρίας του (secotools) βρήκαμε όλα τα στοιχεία του κοπτικού πλακιδίου όπου στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται όλες οι διαστάσεις του κοπτικού πλακιδίου.



Name	Description	Value
AN	clearance angle major	0.0 deg
Barcode	Product barcode	69737740001006
CEDC	cutting edge count	6
D1	fixing hole diameter	3.8 mm
Designation	Product Designation	TNMG160404-MF2
Designation Ansi	Product ANSI Designation	TNMG331-MF2



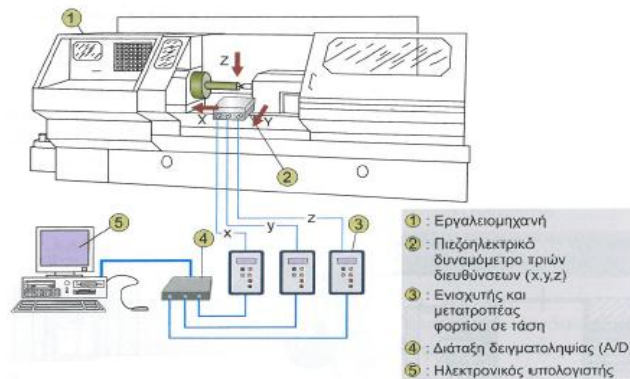
EPSR	insert included angle	60.0 deg
Grade	Grade	TP200
Gradetype	Gradetype	Carbide CVD
IC	inscribed circle diameter	9.5 mm
IH	Insert hand	Neutral
ItemNumber	Item Number	74069737
L	Theoretical cutting edge length	16.5 mm
LE	cutting edge effective length	15.5 mm
RE	corner radius	0.4 mm
RoundedUpWeight	Catalog Weight	0.007 kg
S	Insert thickness	4.8 mm
SC	Insert shape code	T
SSC	Insert seat size code	16

**Πίνακας 8.2** Διαστάσεις κοπτικού πλακιδίου TNMG 160404-MF2 TP200

Όπου οι κύριες διαστάσεις είναι η γωνιά ελευθερίας  $\alpha=0^\circ$ , η γωνιά αποβλίττου  $\gamma=25^\circ$  και ακτίνα καμπυλότητας  $r=0,4\text{mm}$ . Το υλικό του σκληρομεταλλου τύπου cermet στο υπόστρωμα αποτελείται από τα εξής στοιχεία: W,Ti,Ta,Nb,Co,C,N. Η επικάλυψη έγινε με την μέθοδο CVD (χημική εναπόθεση με ατμό) των στοιχείων:  $\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ .

### Εξοπλισμός μέτρησης δυνάμεων κοπής

Για την μέτρηση των δυνάμεων κοπής κατά την τόννευση χρησιμοποιήσαμε το δυναμόμετρο Kistler KIAG SWISS ,Type: 9257A όπου είναι ένα δυναμόμετρο χαλαζία για τη μέτρηση των τριών συνιστωσών μιας δύναμης. Επίσης χρειάστηκαν και οι ενισχυτές του Kistler, Type:5011 ώστε να ενισχυθούν τα σήματα από το δυναμόμετρο και να σταλούν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τέλος με την βοήθεια του προγράμματος LabView αποτυπώθηκαν και αποθηκευτήκαν οι μετρήσεις των δυνάμεων κοπής για κάθε πείραμα. Στην παρακάτω εικόνα εικονίζεται η μετρητική διάταξη των δυνάμεων κοπής στο τόρνο.



**Εικόνα 8.4** Μετρητική διάταξη των δυνάμεων κοπής στον τόρνο



**Εικόνα 8.5** (Αριστερά) Δυναμόμετρο Kistler KIAG SWISS , Type: 9257A. (Κέντρο) Ενισχυτές Kistler, Type: 5011 . (Δεξιά) Πρόγραμμα LabView διαμορφωμένο για την τόνρευση

### 8.3. Διαδικασία τόνρευσης

Οι συνθήκες κοπής που χρησιμοποιήθηκαν για το κάθε πείραμα της τόνρευσης των κυλινδρικών δοκιμίων δημιουργήθηκε με την μεθοδο Taguchi και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Επίσης δεν χρησιμοποιήθηκε υγρό κοπής δηλαδή έγινε με ξηρή κοπή.

Πείραμα	cutting speed $v$ (m/min)	depth of cut $a_p$ (mm)	feed rate $f$ (mm/rev)
1	60	0,5	0,1
2	60	0,75	0,2
3	60	1	0,3
4	90	0,5	0,2
5	90	0,75	0,3
6	90	1	0,1
7	120	0,5	0,3
8	120	0,75	0,1
9	120	1	0,2

**Πίνακας 8.3** Συνθήκες κοπής της τόνρευσης



Για να βρεθούν οι κατάλληλες στροφές του τόννου σύμφωνα με τις αντίστοιχες ταχύτητες κοπής υπολογίζονται με τον τύπο:  $v = \pi \cdot D \cdot n / 1000$  (m / min). Όπου το  $D = 21\text{mm}$  άρα :

v (m/min)	n (rpm)
60	910
90	1365
120	1820

Για την τόννευση των κυλινδρικών δοκιμίων η διαδικασία που ακολούθησε είναι η εξής:

- Γράφεται ο κατάλληλος κώδικας G (βλέπε παράρτημα) με τις συνθήκες κοπής που επιλέξαμε στην εργαλειομηχανή CNC.
- Έπειτα τοποθετείται το κυλινδρικό δοκίμιο στο τσοκ του τόννου
- Μηδενίζεται το κοπτικό εργαλείο στις κατάλληλες θέσεις του κυλινδρικού δοκιμίου.
- Εκτελείται το κώδικα G για το κάθε πείραμα ξεχωριστά.
- Παράλληλα εκτελείται και την διαδικασία μέτρησης της δύναμης κοπής.
- Στο τέλος κάθε πειράματος αφότου σταματήσει η περιστροφή του τσοκ του τόννου και η μέτρηση της δύναμης κοπής συλλέγουμε τα απόβλιττα που δημιουργήθηκαν και τα αποθηκεύουμε για περαιτέρω μελέτη.

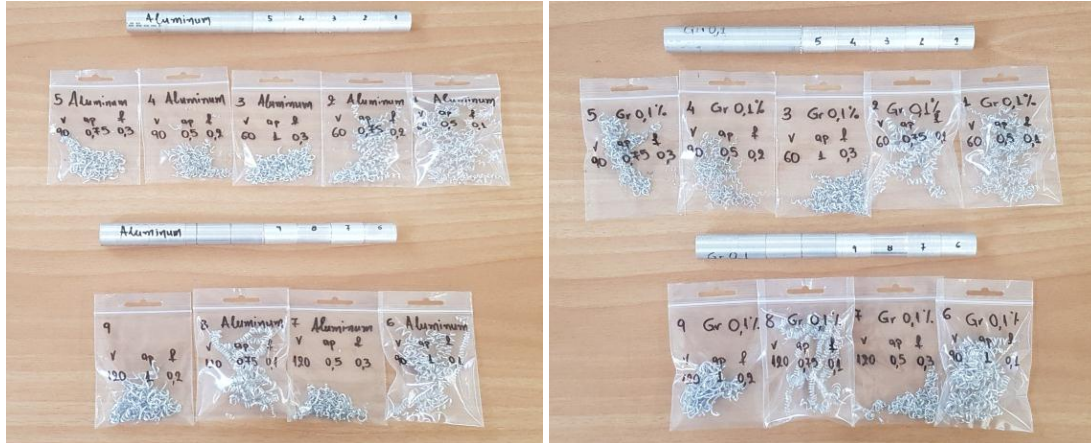
Αυτή η διαδικασία γίνεται για όλα τα κυλινδρικά δοκίμια δηλαδή αυτά τα 9 πειράματα γίνονται σε κάθε περιεκτικότητα που έχουμε .



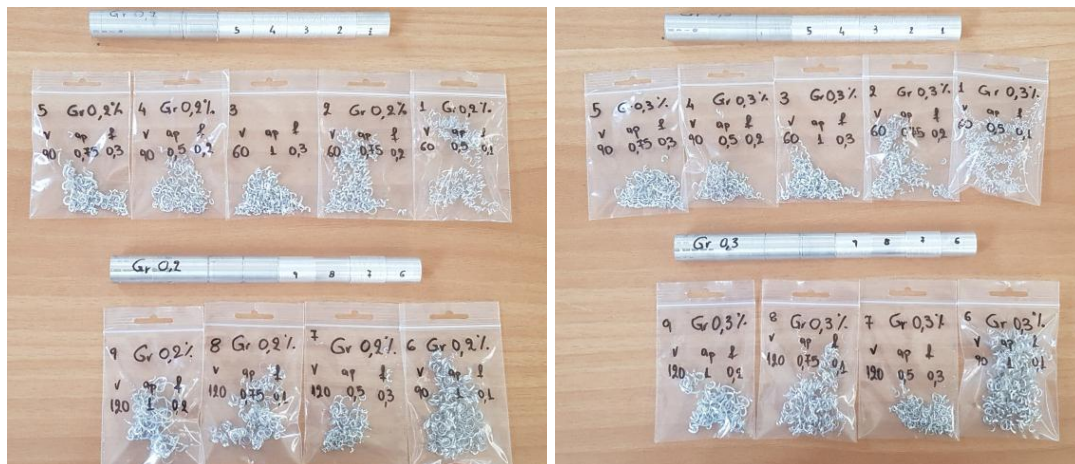
*Εικόνα 8.6 Τοποθετημένο κυλινδρικό δοκίμιο στον CNC τόννο*

## 8.4. Παραχθέντα δοκίμια και απόβλιττα

Στις παρακάτω εικόνες εικονίζονται τα παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια και τα απόβλιττα τους.



**Εικόνα 8.7** Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια και απόβλιττα (Αριστερά) Αλουμίνιο αναφοράς (Δεξιά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,10%



**Εικόνα 8.8** Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια και απόβλιττα (Αριστερά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,20% (Δεξιά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,30%



*Εικόνα 8.9 Παραχθέντα κυλινδρικά δοκίμια και απόβλιττα (Αριστερά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,40% (Δεξιά) Αλουμίνιο με περιεκτικότητα νανοδομών γραφενίου 0,50%*

## 8.5. Μέτρηση τραχύτητας

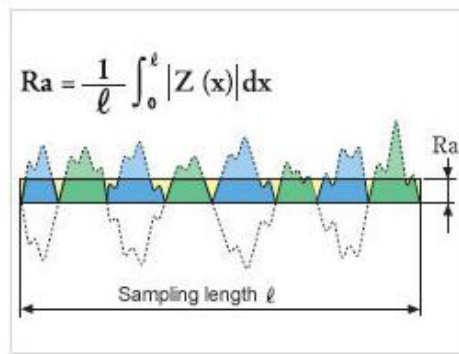
Μετά την τόννευση των κυλινδρικών δοκιμίων μετρήθηκε στην επιφάνεια κάθε πειράματος οι παράμετροι της τραχύτητας: Ra, Rt και Rq ή RMS. Για την μέτρηση της τραχύτητας χρησιμοποιήθηκε το τραχύμετρο Surtronic 3+ της εταιρίας Taylor Hobson με μήκος δειγματοληψίας  $L_c = 0,80\text{mm}$ .



*Εικόνα 8.10 (Αριστερά) Τραχύμετρο Surtronic 3+ (Δεξιά) Μέτρηση τραχύτητας στο κυλινδρικό δοκίμιο*

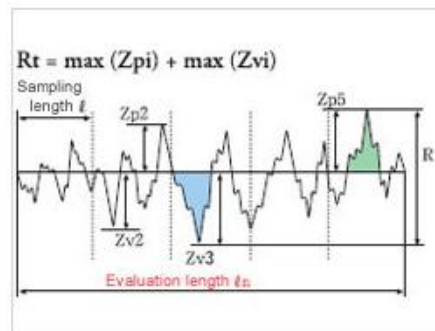
Ra: Είναι η παράμετρος της τραχύτητας που συναντάται συχνότερα. Ορίζεται ως η αριθμητική μέση τιμή όλων των αποκλίσεων των σημείων από την μέση γραμμή. Όλες οι αποκλίσεις λαμβάνονται με θετικό πρόσημο. Λόγω του ότι λαμβάνονται υπόψη όλα τα σημεία, μια μεγάλη απόκλιση ή σφάλμα σε ένα μόνο σημείο δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη μέτρηση.





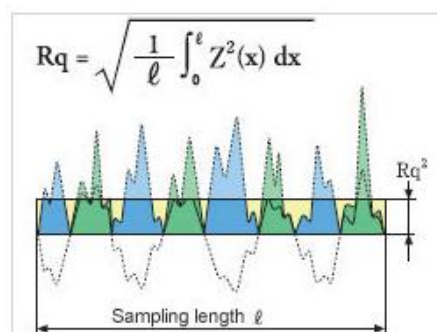
**Εικόνα 8.11** Σχηματική απεικόνιση του  $R_a$

$R_t$ : Το άθροισμα της υψηλότερης κορυφής και της βαθύτερης κοιλάδας κατά το μήκος της δειγματοληψίας ενός δείγματος, αυτή την φορά όμως για όλο το πεδίο που αξιολογείται και όχι μόνο για ένα μήκος δειγματοληψίας.



**Εικόνα 8.12** Σχηματική απεικόνιση του  $R_t$

$R_q$  ή RMS: Συμβολίζει την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των αποκλίσεων που συναντώνται σε όλα τα σημεία σε σχέση με τη μέση γραμμή. Συναντάται και ως RMS (RootMeanSquare). Σε σχέση με το  $R_a$  είναι συνήθως μεγαλύτερη παράμετρος κατά περίπου 10%. Χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α αλλά τα τελευταία χρόνια αντικαθίσταται από το  $R_a$ .

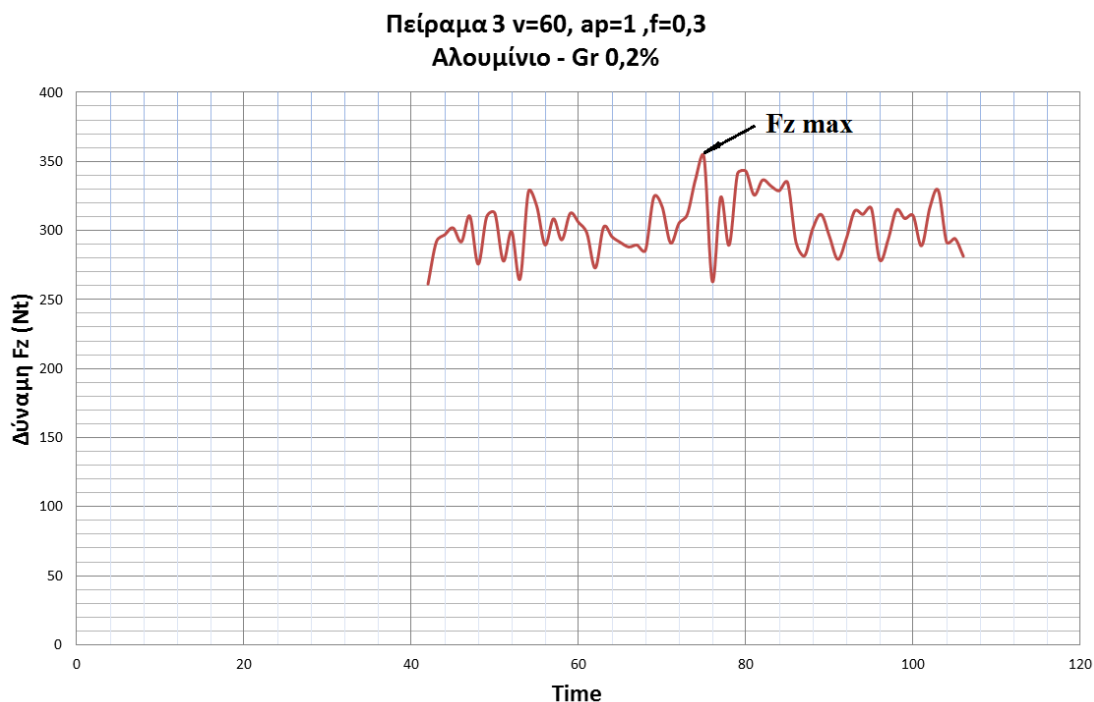


**Εικόνα 8.13** Σχηματική απεικόνιση του  $R_q$  ή RMS

## 8.6. Αποτελέσματα μετρήσεων και παρατηρήσεις στην τόννευση

### 8.6.1. Αποτελέσματα

Οι παρακάτω πινάκες δείχνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων των παραμέτρων της τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_t$  και  $R_q$  ή RMS που μετρήθηκαν με το τραχύμετρο και την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$ ) στην μέγιστη τιμή της και η μέση τιμή της. Ο προσδιορισμός των τιμών δηλαδή της μέγιστης και μέσης τιμής της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής ( $F_z$ ) έγινε με την βοήθεια του excel όπου δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα διαγράμματα για όλα τα πειράματα και για όλες τις περιεκτικότητες γραφενίου. Η μέγιστη τιμή της  $F_z$  προσδιορίστηκε από τη μέγιστη τιμή των διαγραμμάτων όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 8.1. που ακολουθεί. Για τη μέση τιμή της  $F_z$  προσθέσαμε το πλήθος των τιμών του διαγράμματος και τα διαιρέσαμε δια τον αριθμό του πλήθους των τιμών.



Σχήμα 8.1 Παραδειγμα μετρησης της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής ( $F_z$ )



Αλουμίνιο Αναφοράς								
Πείραμα	Cutting speed $v$ (m/min)	Depth of cut $a_p$ (mm)	Feed rate $f$ (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	RMS ( $\mu\text{m}$ )	Fz avg (Nt)	Fz max (Nt)
1	60	0,5	0,1	1,8	8	2	52,5	55,3
2	60	0,75	0,2	5,8	33	7	170	194,2
3	60	1	0,3	11,8	82	14,8	295	349,3
4	90	0,5	0,2	10,6	58	12,8	142	152,9
5	90	0,75	0,3	4,6	28	6	272	283,3
6	90	1	0,1	3	21	3,8	85	100,7
7	120	0,5	0,3	4	22	5,8	191	192,2
8	120	0,75	0,1	1	6	1,4	79	83,6
9	120	1	0,2	4,2	32	5,6	255	281,6

*Πίνακας 8.4 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο αναφοράς*

Αλουμίνιο - Gr 0,10%								
Πείραμα	Cutting speed $v$ (m/min)	Depth of cut $a_p$ (mm)	Feed rate $f$ (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	RMS ( $\mu\text{m}$ )	Fz avg (Nt)	Fz max (Nt)
1	60	0,5	0,1	1,6	10	1,8	53	63,4
2	60	0,75	0,2	10,4	66	13,4	139	155,2
3	60	1	0,3	14,6	114	19,6	315	337,1
4	90	0,5	0,2	3,2	16	3,8	210	224,7
5	90	0,75	0,3	5,2	26	6	250	274,7
6	90	1	0,1	3	19	3,8	78	108,7
7	120	0,5	0,3	4,4	26	5,4	170	171,8
8	120	0,75	0,1	0,8	5	1	75	95
9	120	1	0,2	3,8	23	4,8	230	242,2

*Πίνακας 8.5 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για Αλουμίνιο-GNPs 0,10%*



Αλουμίνιο - Gr 0,20%								
Πείραμα	Cutting speed $v$ (m/min)	Depth of cut $a_p$ (mm)	Feed rate $f$ (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	RMS ( $\mu\text{m}$ )	Fz avg (Nt)	Fz max (Nt)
1	60	0,5	0,1	1,2	7	1,4	47	55,6
2	60	0,75	0,2	5	35	6,6	168	194,6
3	60	1	0,3	17,2	164	21,5	320	353
4	90	0,5	0,2	14	107	18	143	157,2
5	90	0,75	0,3	7,4	50	9,4	270	288,5
6	90	1	0,1	2,8	16	3,2	81	119,8
7	120	0,5	0,3	8,4	52	10,6	140,5	140,7
8	120	0,75	0,1	1,8	9	2	62	73,9
9	120	1	0,2	6,6	45	8,2	208	220

*Πίνακας 8.6 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για  
Αλουμίνιο-GNPs 0,20%*

Αλουμίνιο - Gr 0,30%								
Πείραμα	Cutting speed $v$ (m/min)	Depth of cut $a_p$ (mm)	Feed rate $f$ (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	RMS ( $\mu\text{m}$ )	Fz avg (Nt)	Fz max (Nt)
1	60	0,5	0,1	2	13	2,4	44	49,9
2	60	0,75	0,2	9,6	66	11,8	160	180,4
3	60	1	0,3	15,6	125	20,6	305	320,9
4	90	0,5	0,2	11,8	99	16	144	159,4
5	90	0,75	0,3	7,4	59	9,8	268	277,8
6	90	1	0,1	2,2	22	3	88	102,9
7	120	0,5	0,3	7,8	50	9,8	169,5	173,9
8	120	0,75	0,1	2	13	2,4	67	76,5
9	120	1	0,2	6,4	45	7,8	226,5	231,6

*Πίνακας 8.7 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για  
Αλουμίνιο-GNPs 0,30%*



Αλουμίνιο - Gr 0,40%								
Πείραμα	Cutting speed $v$ (m/min)	Depth of cut $a_p$ (mm)	Feed rate $f$ (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	RMS ( $\mu\text{m}$ )	Fz avg (Nt)	Fz max (Nt)
1	60	0,5	0,1	5,6	39	7	57	61
2	60	0,75	0,2	9	66	11,4	168	187,3
3	60	1	0,3	18,4	163	28,8	290	307,2
4	90	0,5	0,2	11,6	66	14	150	161,5
5	90	0,75	0,3	9,8	80	12,8	277,5	286,7
6	90	1	0,1	2,8	21	3,6	69	82,4
7	120	0,5	0,3	5,8	53	7,8	118	123,8
8	120	0,75	0,1	0,6	7	1	66	75,3
9	120	1	0,2	11,2	123	16,2	198	202,9

*Πίνακας 8.8 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για*

*Αλουμίνιο-GNPs 0,40%*

Αλουμίνιο - Gr 0,50%								
Πείραμα	Cutting speed $v$ (m/min)	Depth of cut $a_p$ (mm)	Feed rate $f$ (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	RMS ( $\mu\text{m}$ )	Fz avg (Nt)	Fz max (Nt)
1	60	0,5	0,1	1,2	8	1,4	41	46,2
2	60	0,75	0,2	10,4	72	13,2	165	188,4
3	60	1	0,3	17	120	22,4	302	329,2
4	90	0,5	0,2	8,8	54	11	126	157,9
5	90	0,75	0,3	9,6	72	12,4	260	269,2
6	90	1	0,1	4	36	5,4	85	102,1
7	120	0,5	0,3	7,8	52	9,6	179	182,4
8	120	0,75	0,1	3,4	20	4	84	90,4
9	120	1	0,2	6	46	7,6	235	295,2

*Πίνακας 8.9 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων τραχύτητας και δυνάμεων Fz για*

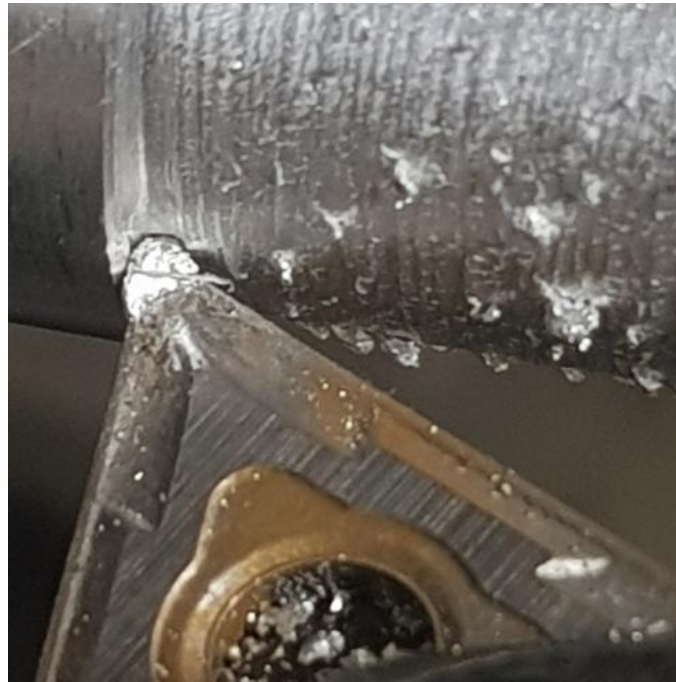
*Αλουμίνιο-GNPs 0,50%*

### 8.6.2. Παρατηρήσεις

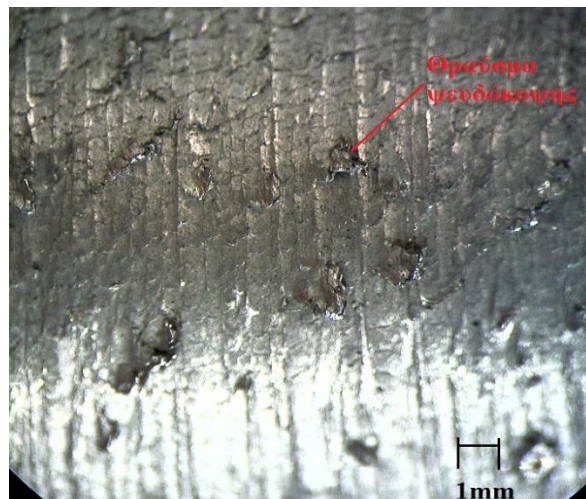
- Κατά την τόννευση των κυλινδρικών δοκιμίων παρουσιάστηκε έντονα το φαινόμενο της ψευδοκόψης στα πειράματα μας. Αυτό οφείλεται στην ολκιμότητα του αλουμινίου και κατά περίπτωση στην μικρή ταχύτητα κοπής και στην μεγάλη πρόωση. Το αποτέλεσμα ήταν ότι μερικά τεμαχίδια (θραύσματα) από τη διάσπαση της ψευδοακμής να προσκολλώνται πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια δηλαδή να έχουμε υποβάθμιση της ποιότητας της. Η υποβάθμιση της ποιότητας της επιφάνειας γίνεται αντιληπτή μέσω της αύξησης της τραχύτητας και των αποκλίσεων των διαστάσεων, λόγω της αστάθειας του απαραμόρφωτου αποβλίττου, συνέπεια θραύσεων της ψευδοκοψής.



*Εικόνα 8.14 Πρόσωση ψευδοακμής*



*Εικόνα 8.15 Κάτοψη ψευδοακμής*



*Εικόνα 8.16 Θραύσματα από τη διάσπαση της ψευδόκοψης*

- Στα κατεργασμένα κυλινδρικά δοκίμια μας βλέπουμε ότι η καλύτερη ποιότητα επιφάνειας, δηλαδή μικρότερες τραχύτητες, συναντώνται στην χαμηλότερη πρόωση  $f=0,1\text{mm/rev}$  ( πείραμα 1, 6, 8) και τα απόβλιττα τους είναι συνεχή. Επίσης παρατηρούμε ότι η πρόωση επηρεάζει σημαντικά την μορφολογία των αποβλίττων όπου για την χαμηλή πρόωση  $f=0,1\text{mm/rev}$  και



απόβλιττα είναι συνεχή όπως αναφέραμε όμως με την αύξηση της πρόωσης  $f=0,2\text{mm/rev}$  δημιουργούνται μερικά συνεχές απόβλιττα και με την περαιτέρω αύξηση της πρόωσης  $f=0,2\text{mm/rev}$  δημιουργούνται ασυνεχες απόβλιττα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας και παραμορφωσης στην κάτω επιφάνεια του απόβλιττου με την άνοδο της πρόωσης. Στην εικόνα 8.16 εικονίζονται τα απόβλιττα από τα δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου Gr 0,30% όπου παρατηρείται οι διάφορες μορφολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτές οι διαφορες παρατηρούνται σε όλα τα δοκίμια τους πειραματος.



**Εικόνα 8.17** Κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου GNPs 0,10%





*Εικόνα 8.18 Απόβλιττα αλουμινίου με περιεκτικότητα γραφενίου GNP's 0,30%*

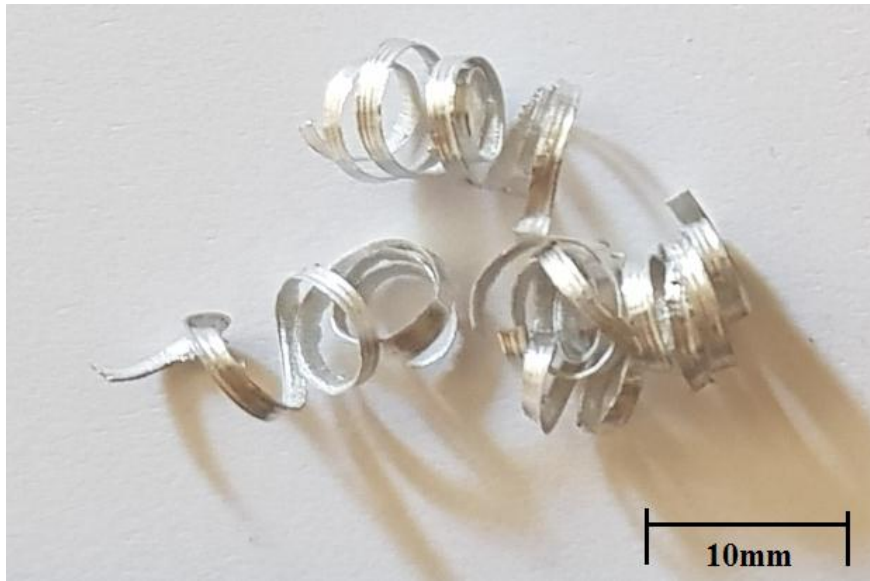
- Στο πείραμα 8 με συνθήκες κοπής  $v=120\text{m/min}$   $a_p=0,75\text{mm}$   $f=0,1\text{mm/rev}$  όπου έχουμε συνεχή απόβλιττα παρατηρείται ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας των νανοδομων του γραφενιου (GNPs) οι κύκλοι του συνεχούς αποβλίττου συσπειρώνονται (από ελικοειδή σε σπειροειδή) και στην περιεκτικότητα γραφενιου 0,50% σχηματίζεται ασυνεχές απόβλιττο. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή της γωνιάς του επίπεδου διάτμησης λόγω της μείωσης της ολκιμότητας του αλουμινίου όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα νανοδομων γραφενιου (GNPs).



**Εικόνα 8.19** Απόβλιττα αλουμινίου αναφοράς  $v=120\text{m/min}$   $a_p=0,75\text{mm}$   $f=0,1\text{mm/rev}$



**Εικόνα 8.20** Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,10%  $v=120\text{m/min}$   
 $a_p=0,75\text{mm}$   $f=0,1\text{mm/rev}$



**Εικόνα 8.21** Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,20%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,75mm f=0,1mm/rev$



**Εικόνα 8.22** Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,30%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,75mm f=0,1mm/rev$



**Εικόνα 8.23** Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,40%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,75mm$   $f=0,1mm/rev$



**Εικόνα 8.24** Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,50%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,75mm$   $f=0,1mm/rev$

- Στο πείραμα 7 με συνθήκες κοπής  $v=120m/min$   $a_p=0,50mm$   $f=0,3mm/rev$  όπου έχουμε ασυνεχή απόβλιττα παρατηρείται ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας των νανοδομών του γραφενίου (GNPs) μειώνεται το μέγεθος των αποβλίτων λόγω της αύξησης της ευθραυστότητας τους διότι αυξάνεται η ψαθυρότητα των κατεργασμένων δοκιμίων με την αύξηση προσθήκης



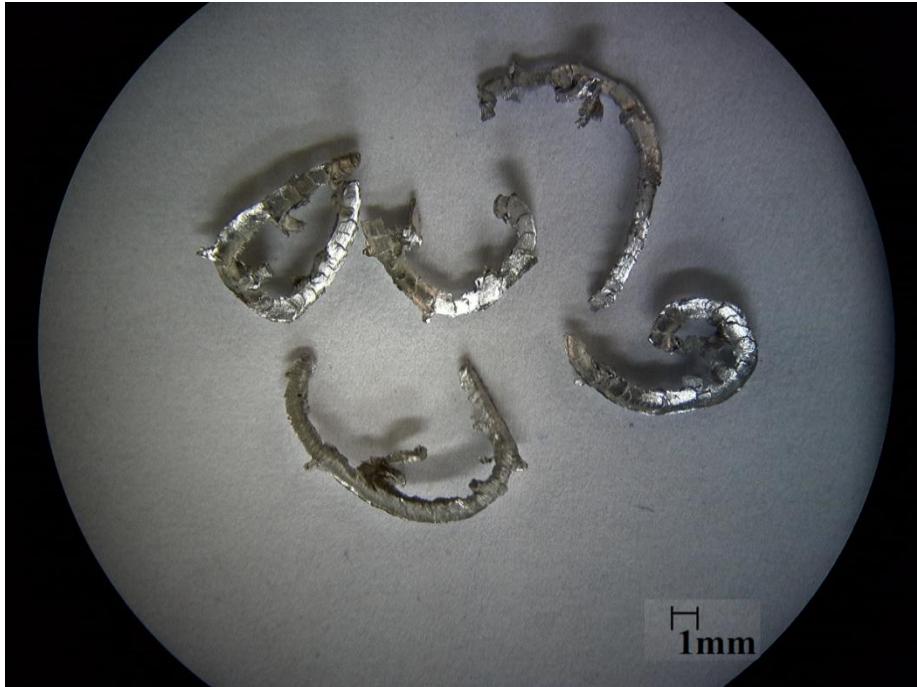
GNPs. Επίσης η μεγάλη διαφορά θερμοχωρητικότητας μεταξύ αλουμινίου και γραφενίου δημιουργεί κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του αποβλίττου κενά και ατέλειες στην διεπιφάνεια αλουμινίου-γραφενίου.



*Εικόνα 8.25 Απόβλιττα αλουμινίου αναφοράς  $v=120m/min$   $a_p=0,50mm$   $f=0,3mm/rev$*



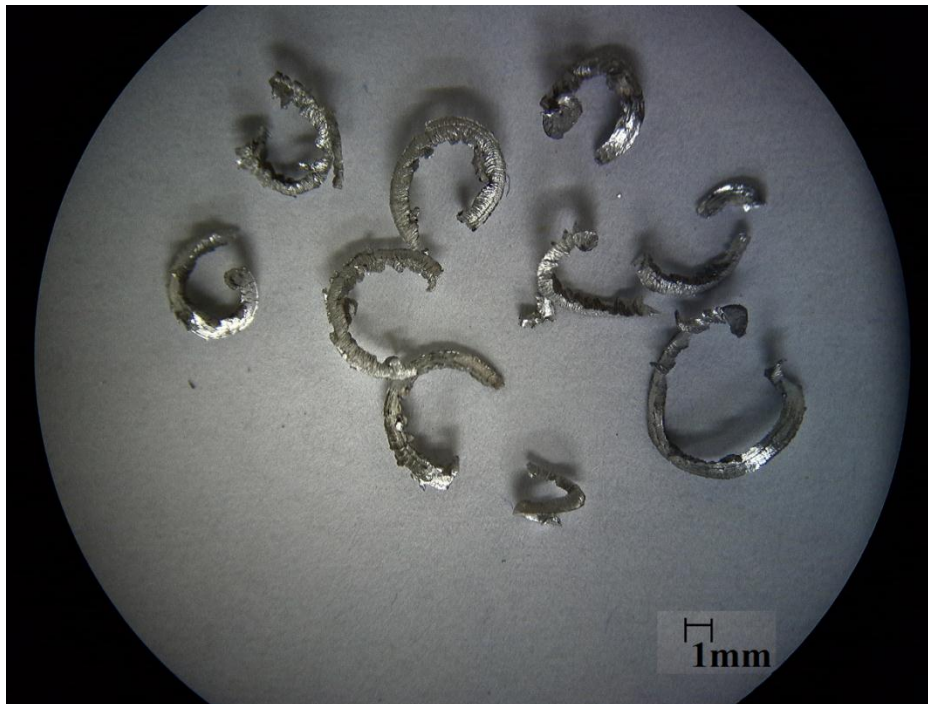
*Εικόνα 8.26 Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,10%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,50mm$   $f=0,3mm/rev$*



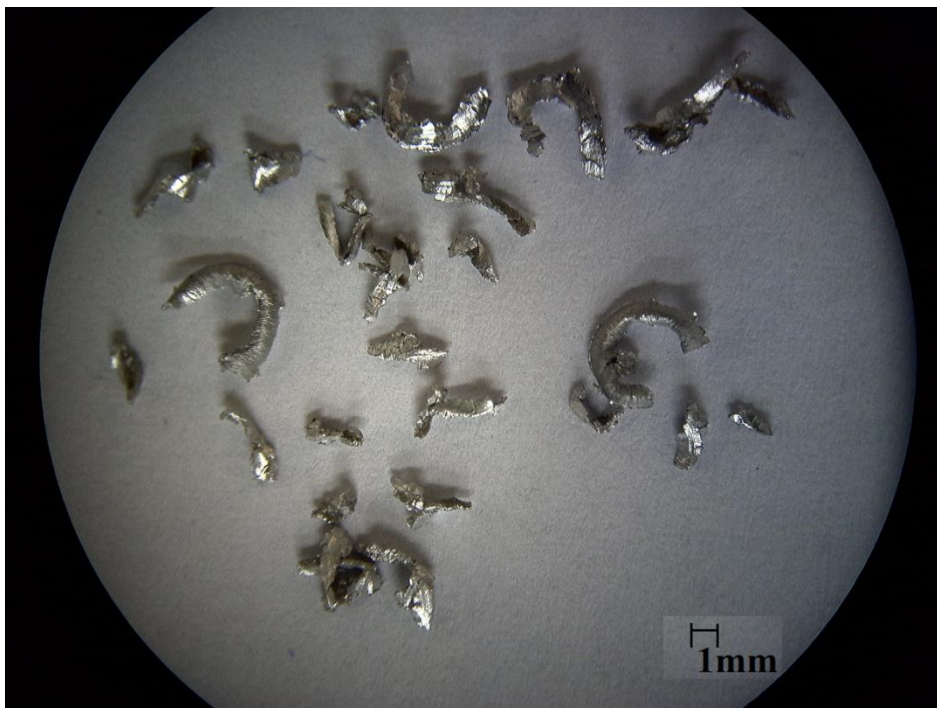
*Εικόνα 8.27 Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,20%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,50mm$   $f=0,3mm/rev$*



*Εικόνα 8.28 Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,30%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,50mm$   $f=0,3mm/rev$*



*Εικόνα 8.29 Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,40%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,50mm$   $f=0,3mm/rev$*



*Εικόνα 8.30 Απόβλιττα αλουμινίου-GNPs 0,50%  $v=120m/min$   
 $a_p=0,50mm$   $f=0,3mm/rev$*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### 9. Στατιστική ανάλυση πειραμάτων

#### 9.1. Περιγραφή

Για τις πειραματικές μετρήσεις διεξήχθη στατιστική ανάλυση προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των συνθηκών κοπής στις τρεις παραμέτρους τραχύτητας της επιφάνειας  $R_a$ ,  $R_t$  και  $R_q$  ή RMS και της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής ( $F_z$ ). Το λογισμικό MINITAB® 17 χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της ανάλυσης και για την απόκτηση και την ερμηνεία των απαραίτητων αποτελεσμάτων.

Προκειμένου να μελετήσουμε όλες παραμέτρους ταυτόχρονα της διαδικασίας της τόννευσης με ένα μικρό μόνο αριθμό πειραμάτων χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Taguchi. Η μέθοδος Taguchi είναι μια πιο αποτελεσματική μέθοδος από τις κλασικές μεθόδους σχεδιασμού πειραμάτων όπου είναι χρονοβόρες και με υψηλό κόστος για την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Δηλαδή στο πείραμα μας αντι για 27 ( $3^3$ ) πειράματα με την μέθοδο Taguchi έχουμε 9 πειράματα ( $L_9$ ). Η μέθοδος Taguchi συνιστά την χρήση της συνάρτησης απώλειας για τον προσδιορισμό της απόκλισης μεταξύ της πειραματικής τιμής του χαρακτηριστικού απόδοσης και την επιθυμητή τιμή του. Η συνάρτηση απώλειας μετασχηματίζεται περαιτέρω στον λόγο S/N, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση της επίδρασης παραμέτρων ανάλογα με την επίπτωσή τους στις μετρηθείσες τιμές. Μετά από αυτό, οι σημαντικές παράμετροι μπορούν να διαχωριστούν από τις παραμέτρους που είναι αμελητέες χρησιμοποιώντας το ANOVA. Έπειτα με την παλινδρόμηση (Regression) δημιουργείται ένα μοντέλο πρόβλεψης που επιτρέπει την πρόβλεψη της επίδρασης των παραμέτρων στους παραγοντες που μελετάμε.

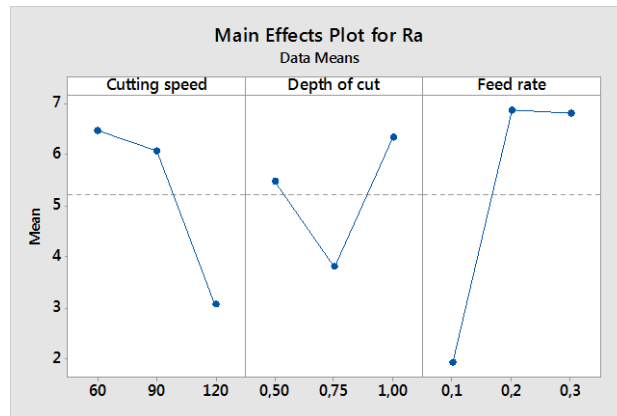
#### 9.2. Αποτελέσματα και παρατηρήσεις στατιστικής μεθόδου

##### 9.2.1. Αλουμίνιο αναφοράς

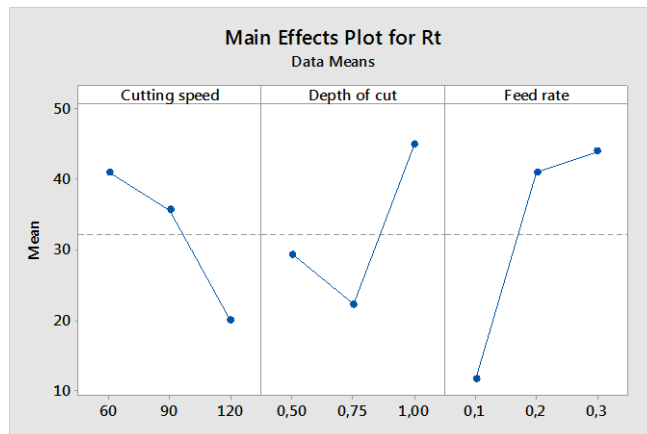




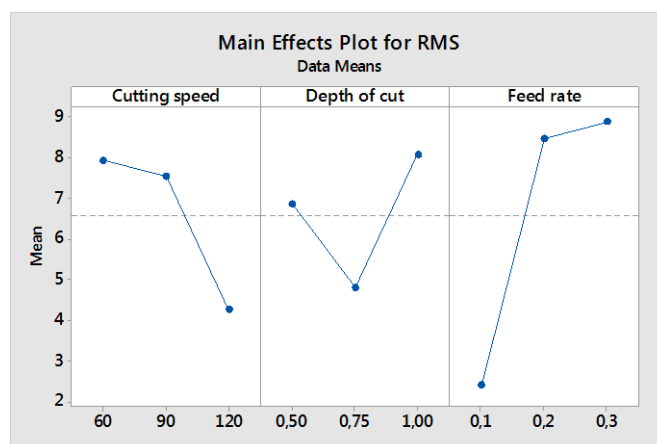
### Αποτελέσματα Taguchi (Taguchi results)



*Σχήμα 9.1 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.*



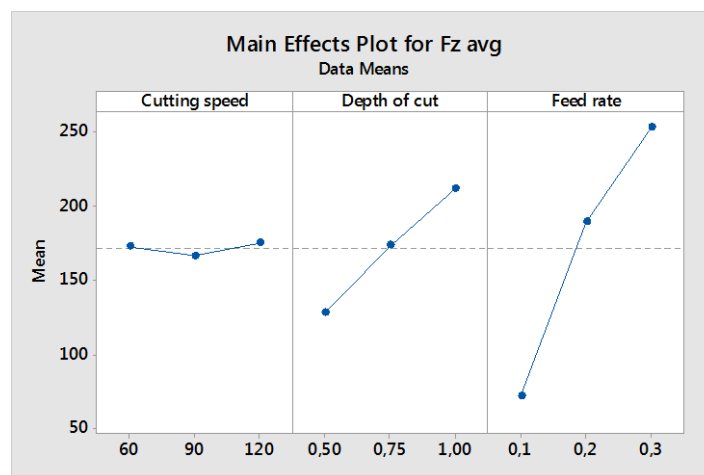
*Σχήμα 9.2 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.*



*Σχήμα 9.3 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*



Για τις παράμετρους της τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μείωση της τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$ . Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση με γρηγορότερο ρυθμό των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm σημαντική μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  αλλά από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου καταλήγει να είναι υψηλότερη από το βάθος κοπής των 0,50mm έτσι συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη κατεργαζόμενη επιφάνεια παρατηρείται στο βάθος κοπής των 0,75mm. Η πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό τις τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev δηλαδή την χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev η τραχύτητα  $R_a$  μειώθηκε ελάχιστα με την αύξηση της πρόωσης όμως οι τραχύτητες  $R_t$  και  $RMS$  αυξήθηκαν με μικρότερο ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι έχουμε μια περαιτέρω με μικρότερο ρυθμό χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας.



**Σχήμα 9.4** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

Για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg) όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε ελάχιστη μείωση της  $F_z$  avg. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε ελάχιστη αύξηση της  $F_z$  avg όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  max δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm αύξηση της  $F_z$  avg όπως και από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση της  $F_z$  avg επίσης παρατηρούμε ότι αυτή η αύξηση είναι σχεδόν γραμμική. Στην πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά

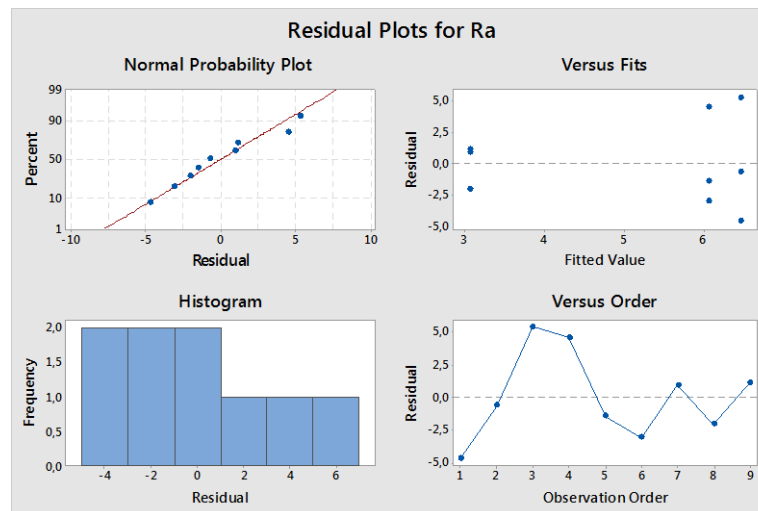


και με γρήγορο ρυθμό την αύξηση της  $F_z \max$  όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev επίσης παρατηρούμε την αύξηση της  $F_z \text{ avg}$  με την αύξηση της πρόωσης με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z \text{ avg}$  επηρεάζεται σημαντικά από την πρόωση.

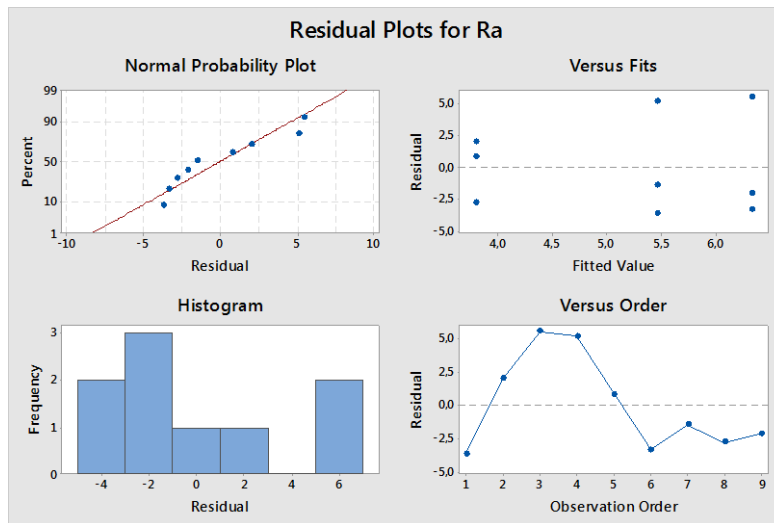
### Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	20,720	18,85%	20,720	10,360	0,66	0,601
Depth of cut	2	9,947	9,05%	9,947	4,973	0,32	0,758
Feed rate	2	48,027	43,69%	48,027	24,013	1,54	0,394
Error	2	31,227	28,41%	31,227	15,613		
Total	8	109,920	100,00%				

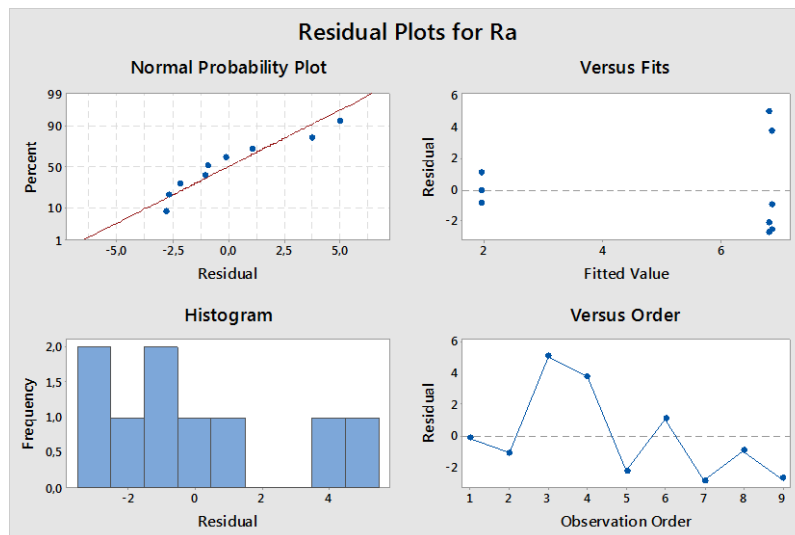
**Πίνακας 9.1** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$



**Σχήμα 9.5** Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$



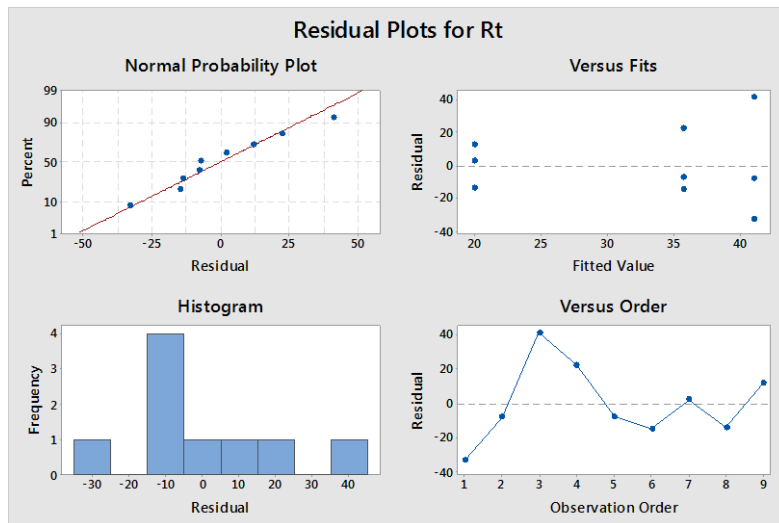
**Σχήμα 9.6** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



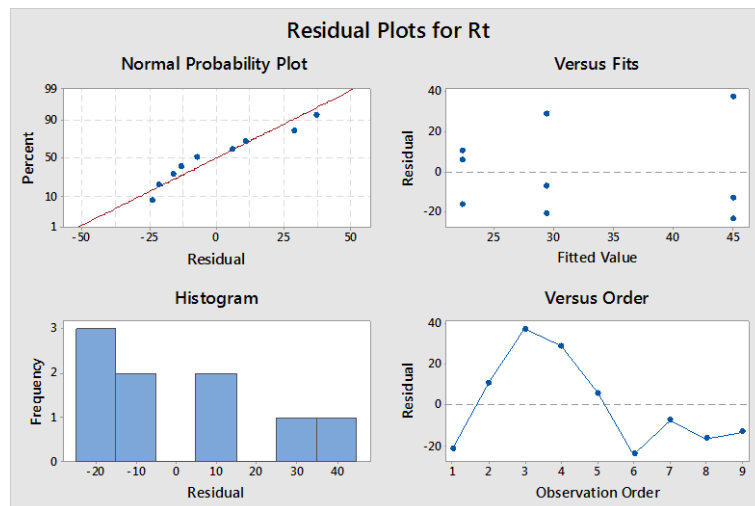
**Σχήμα 9.7** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	714,9	15,32%	714,9	357,4	0,58	0,632
Depth of cut	2	808,2	17,32%	808,2	404,1	0,66	0,603
Feed rate	2	1914,9	41,04%	1914,9	957,4	1,56	0,391
Error	2	1227,6	26,31%	1227,6	613,8		
Total	8	4665,6	100,00%				

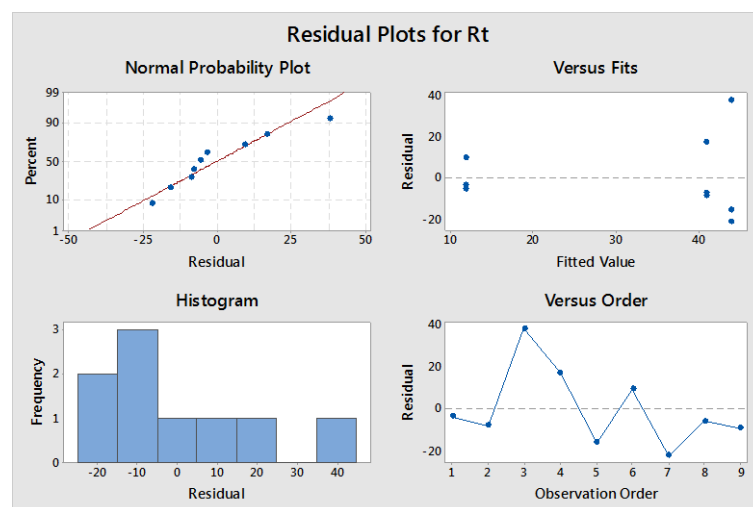
**Πίνακας 9.2** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt



Σχήμα 9.7 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



Σχήμα 9.8 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

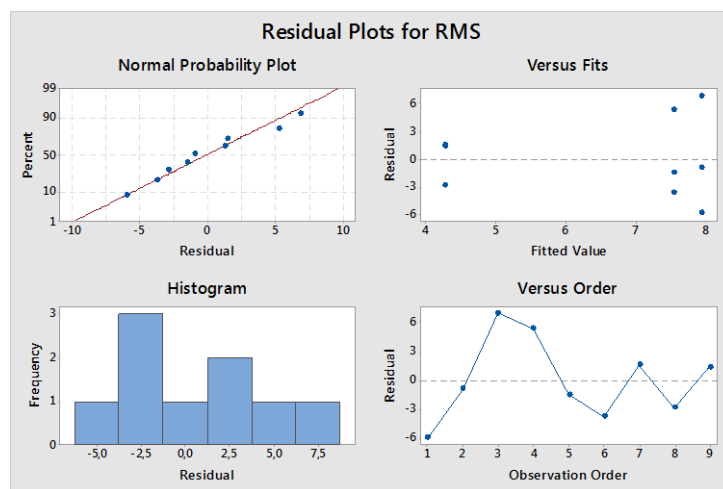


Σχήμα 9.9 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

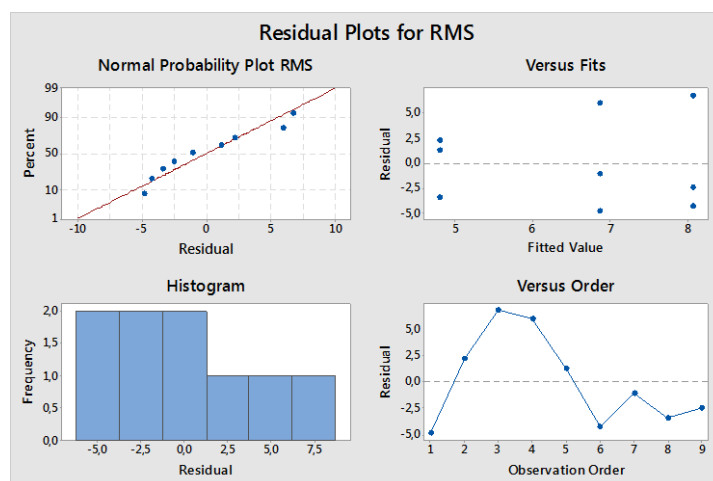


Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	24,28	14,81%	24,28	12,138	0,55	0,647
Depth of cut	2	16,38	10,00%	16,38	8,191	0,37	0,731
Feed rate	2	78,78	48,07%	78,78	39,391	1,77	0,361
Error	2	44,44	27,12%	44,44	22,218		
Total	8	163,88	100,00%				

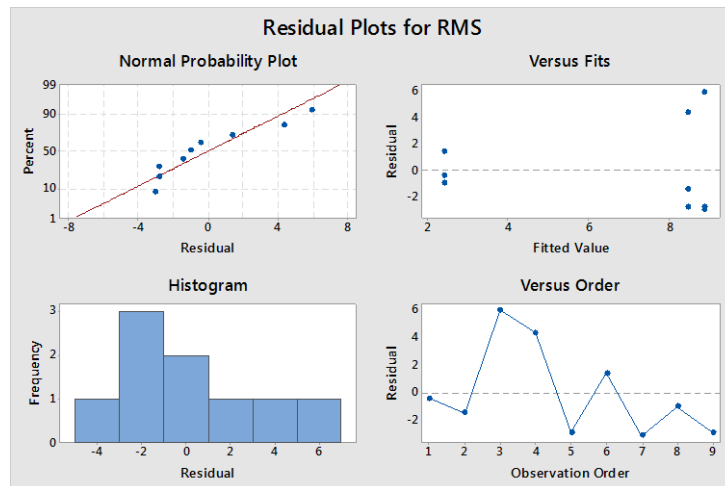
**Πίνακας 9.3** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS



**Σχήμα 9.10** Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS



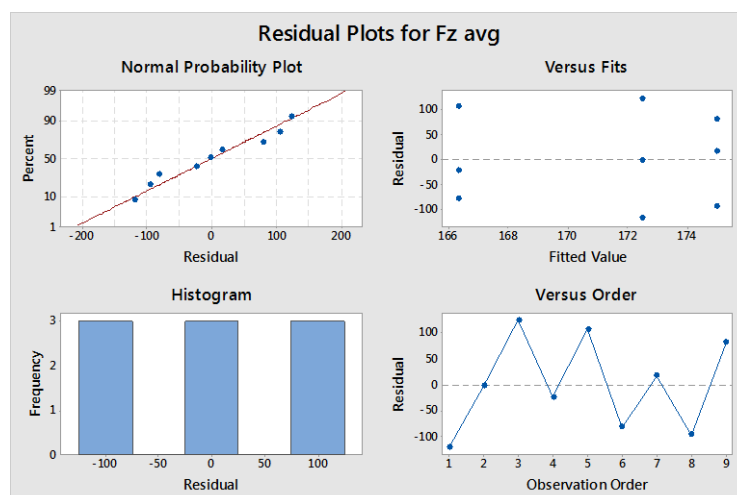
**Σχήμα 9.11** Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS



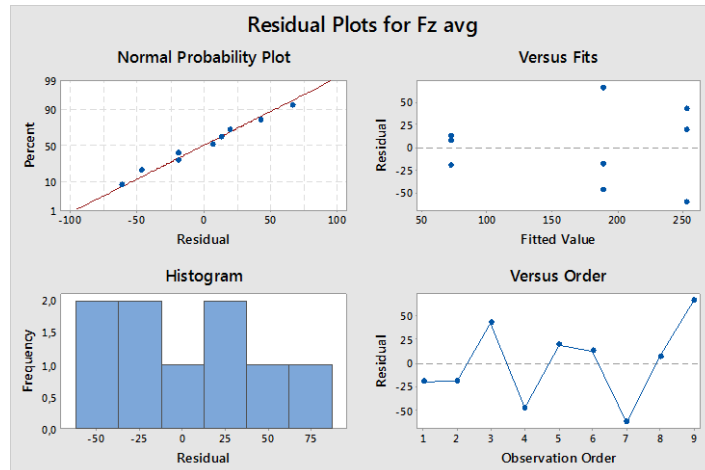
**Σχήμα 9.12** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	119,4	0,19%	119,4	59,7	0,04	0,961
Depth of cut	2	10400,7	16,31%	10400,7	5200,4	3,50	0,222
Feed rate	2	50283,7	78,84%	50283,7	25141,9	16,92	0,056
Error	2	2972,7	4,66%	2972,7	1486,4		
Total	8	63776,6	100,00%				

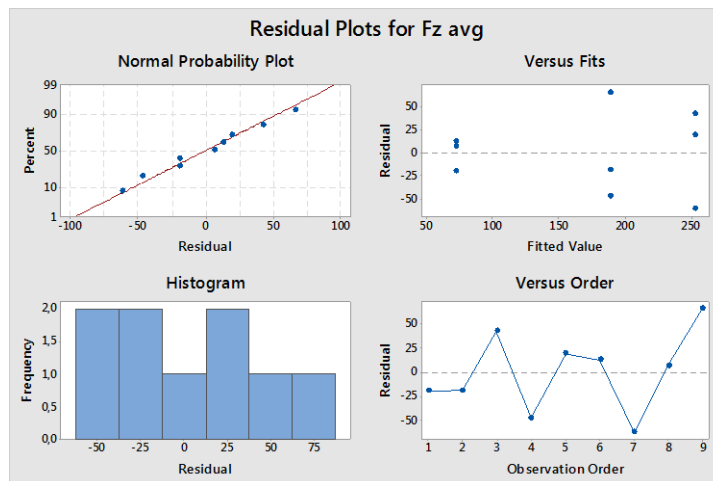
**Πίνακας 9.4** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



**Σχήμα 9.13** Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην  $F_z$  avg



**Σχήμα 9.14** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην Fz avg



**Σχήμα 9.15** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην Fz avg

**Μοντέλα παλιδρόμησης (Regression Models)**

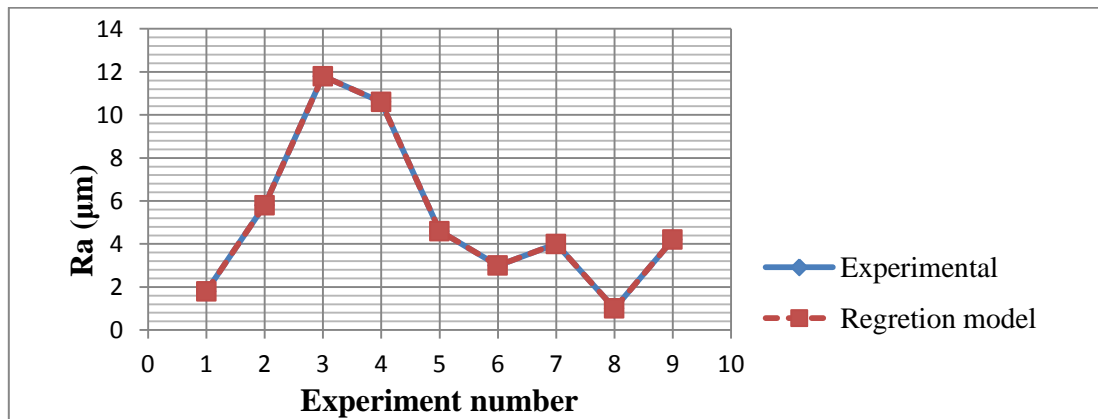
Response	Regression model	R <sup>2</sup> (%)
Ra	$-5,800 + 0,5122 \cdot v - 89,33 \cdot a_p + 241,3 \cdot f - 0,001444 \cdot v^2 + 61,87 \cdot a_p^2 - 286,7 \cdot f^2 - 0,09778 \cdot v \cdot a_p - 1,178 \cdot v \cdot f$	100
Rt	$11,00 + 2,506 \cdot v - 619,3 \cdot a_p + 1428 \cdot f - 0,005741 \cdot v^2 + 424,0 \cdot a_p^2 - 1450 \cdot f^2 - 0,3556 \cdot v \cdot a_p - 7,778 \cdot v \cdot f$	100



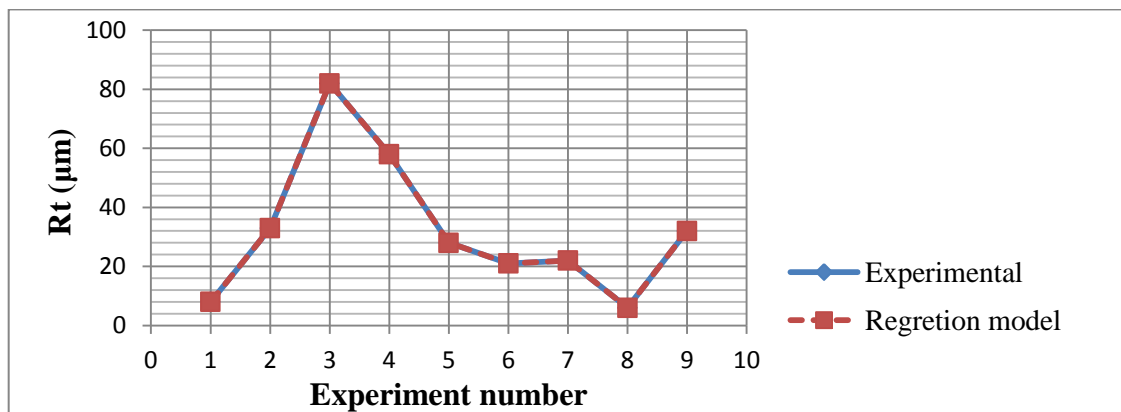


RMS	$-6,400 + 0,6011 \cdot v - 107,5 \cdot a_p + 284,7 \cdot f - 0,001593 \cdot v^2 + 75,73 \cdot a_p^2 - 333,3 \cdot f^2 - 0,1333 \cdot v \cdot a_p - 1,378 \cdot v \cdot f$	100
Fz avg	$228,0 - 4,336 \cdot v - 6108,3 \cdot a_p + 1998 \cdot f + 0,008241 \cdot v^2 + 129,3 \cdot a_p^2 - 433,3 \cdot f^2 + 5,933 \cdot v \cdot a_p - 7,778 \cdot v \cdot f$	100

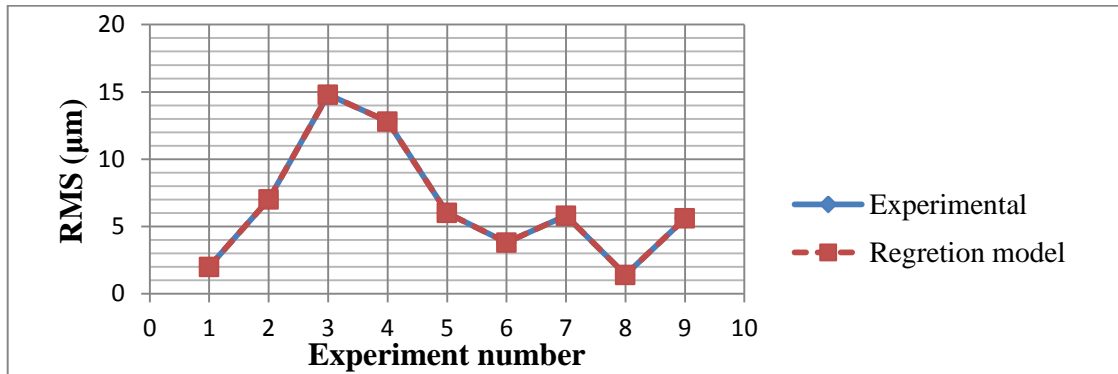
**Πίνακας 9.5** Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους



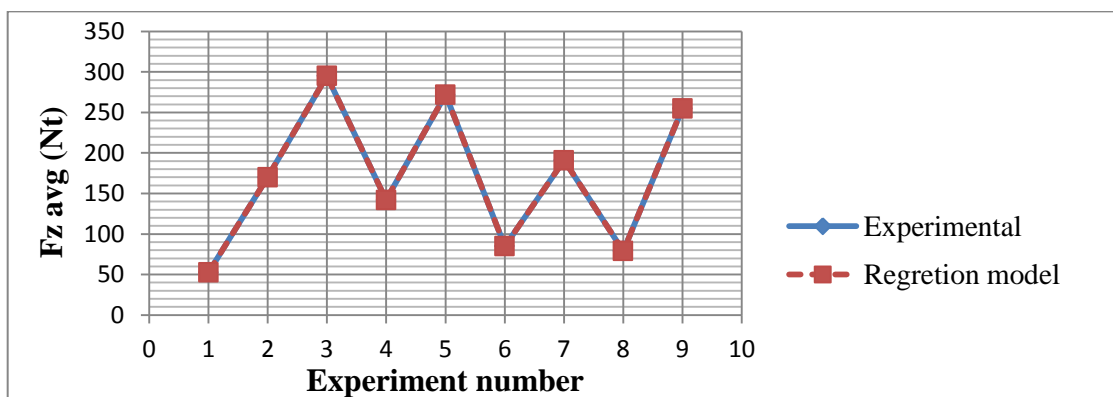
**Σχήμα 9.16** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra



**Σχήμα 9.17** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Rt



*Σχήμα 9.18 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS*



*Σχήμα 9.19 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg)*

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	109,920	100,00%	109,920	13,7400	*	*
Cutting speed	1	17,340	15,78%	10,342	10,3417	*	*
Depth of cut	1	1,127	1,02%	12,681	12,6808	*	*
Feed rate	1	35,527	32,32%	45,980	45,9804	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	3,380	3,07%	3,380	3,3800	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	8,820	8,02%	22,427	22,4267	*	*
Feed rate*Feed rate	1	12,500	11,37%	12,327	12,3267	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	12,500	11,37%	0,807	0,8067	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	18,727	17,04%	18,727	18,7267	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	109,920	100,00%				

*Πίνακας 9.6 Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra*



Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	4665,56	100,00%	4665,56	583,19	*	*
Cutting speed	1	661,50	14,18%	247,45	247,45	*	*
Depth of cut	1	368,17	7,89%	609,49	609,49	*	*
Feed rate	1	1568,17	33,61%	1610,63	1610,63	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	53,39	1,14%	53,39	53,39	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	440,06	9,43%	1053,38	1053,38	*	*
Feed rate*Feed rate	1	346,72	7,43%	315,37	315,37	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	410,89	8,81%	10,67	10,67	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	816,67	17,50%	816,67	816,67	*	*
Error	0	0,00	0,00%	0,00	*		
Total	8	4665,56	100,00%				

**Πίνακας 9.7** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	163,876	100,00%	163,876	20,484	*	*
Cutting speed	1	20,167	12,31%	14,242	14,242	*	*
Depth of cut	1	2,160	1,32%	18,351	18,351	*	*
Feed rate	1	62,727	38,28%	63,975	63,975	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	4,109	2,51%	4,109	4,109	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	14,222	8,68%	33,607	33,607	*	*
Feed rate*Feed rate	1	16,056	9,80%	16,667	16,667	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	18,809	11,48%	1,500	1,500	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	25,627	15,64%	25,627	25,627	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	163,876	100,00%				

**Πίνακας 9.8** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_{MS}$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	63776,6	100,00%	63776,6	7972,07	*	*
Cutting speed	1	9,4	0,01%	741,1	741,10	*	*



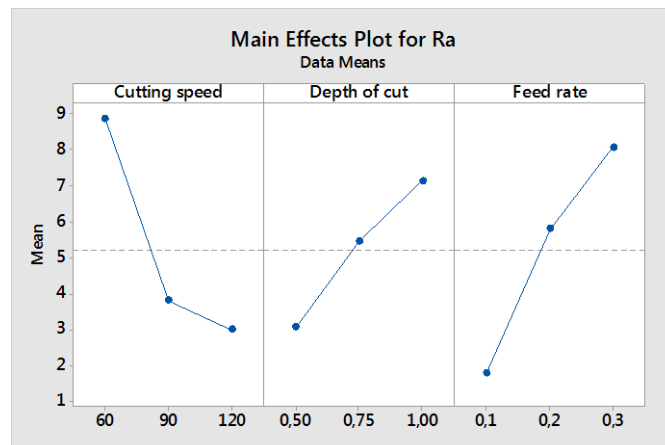
Depth of cut	1	10375,0	16,27%	588,0	588,03	*	*
Feed rate	1	48870,4	76,63%	3152,6	3152,63	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	110,0	0,17%	110,0	110,01	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	25,7	0,04%	98,0	98,01	*	*
Feed rate*Feed rate	1	1413,3	2,22%	28,2	28,17	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	2156,1	3,38%	2970,4	2970,38	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	816,7	1,28%	816,7	816,67	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	63776,6	100,00%				

**Πίνακας 9.9** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

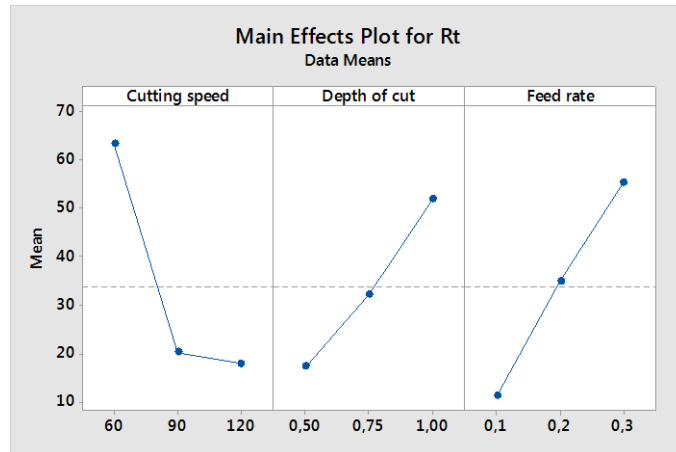
Στο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης παρατηρούμε ότι σε όλους τους παράγοντες που μελετάμε την σημαντικότερη επίδραση στις εξισώσεις πρόβλεψης ασκεί η πρόωση. Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα ποσοστά επίδρασης των παραμέτρων. Επίσης το ποσοστό επιτυχίας όλων των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης είναι 100%.

## 9.2.2. Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,10% (Al – Gr 0,10%)

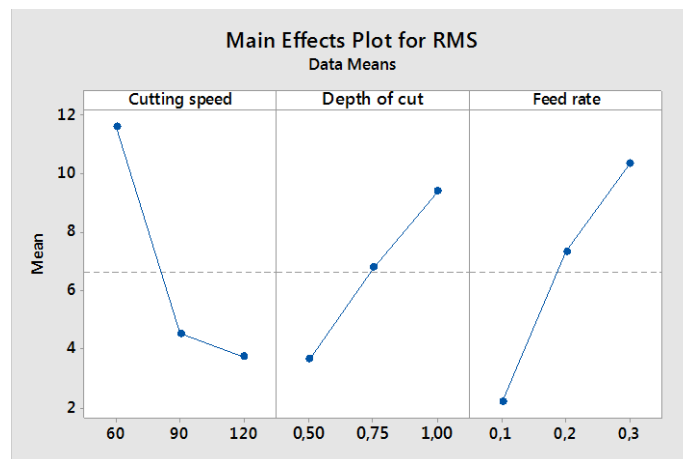
### Αποτελέσματα Taguchi (Taguchi results)



**Σχήμα 9.20** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.



**Σχήμα 9.21** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$ .

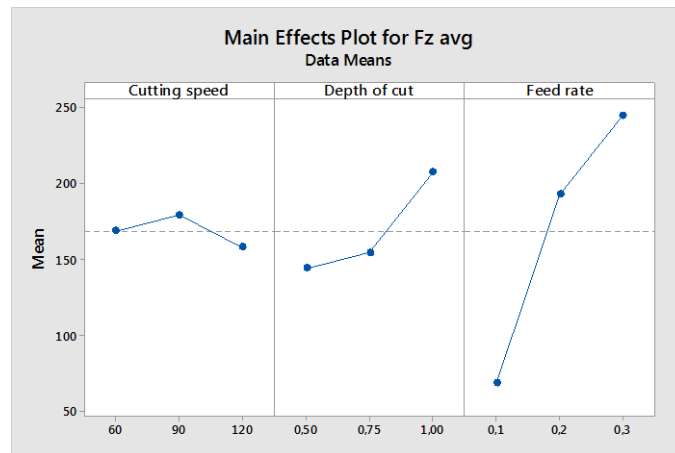


**Σχήμα 9.22** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

Για τις παράμετρος της τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε σημαντική μείωση με γρήγορο ρυθμό της τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$ . Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση με πιο αργό ρυθμό των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm σημαντική μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$ . Από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε επίσης σημαντική μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  σχεδόν συσχετίζονται γραμμικά με το βάθος κοπής. Η πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά τις τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev δηλαδή την χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev οι τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  αυξήθηκαν με το ίδιο ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι



έχουμε μια σχεδόν γραμμική συσχέτιση μεταξύ πρόωσης και των τραχυτήτων Ra, Rt και RMS.



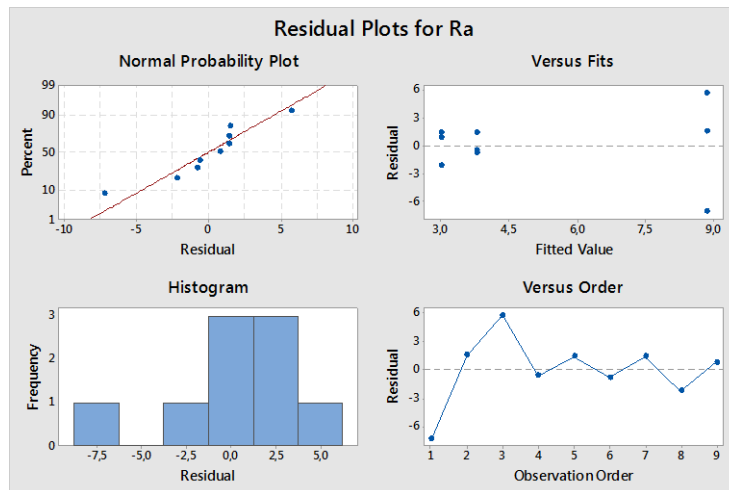
**Σχήμα 9.23** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

Για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg) όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε ελάχιστη αύξηση της  $F_z$  avg. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε ελάχιστη μείωση της  $F_z$  avg όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm αύξηση της  $F_z$  avg όπως και από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση της  $F_z$  avg με γρηγορότερο ρυθμό. Στην πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό την αύξηση της  $F_z$  avg όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev επίσης παρατηρούμε την αύξηση της  $F_z$  avg με την αύξηση της πρόωσης με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg επηρεάζεται σημαντικά από την πρόωση.

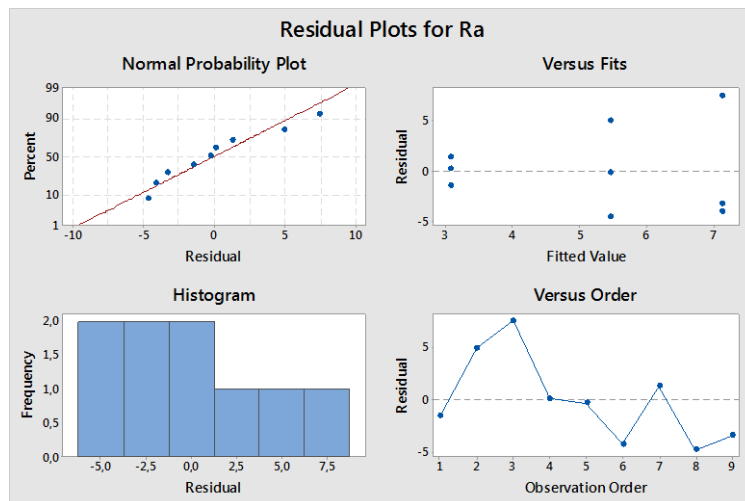
### Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	60,73	38,16%	60,73	30,364	4,69	0,176
Depth of cut	2	25,08	15,76%	25,08	12,538	1,94	0,340
Feed rate	2	60,41	37,96%	60,41	30,204	4,67	0,176
Error	2	12,94	8,13%	12,94	6,471		
Total	8	159,16	100,00%				

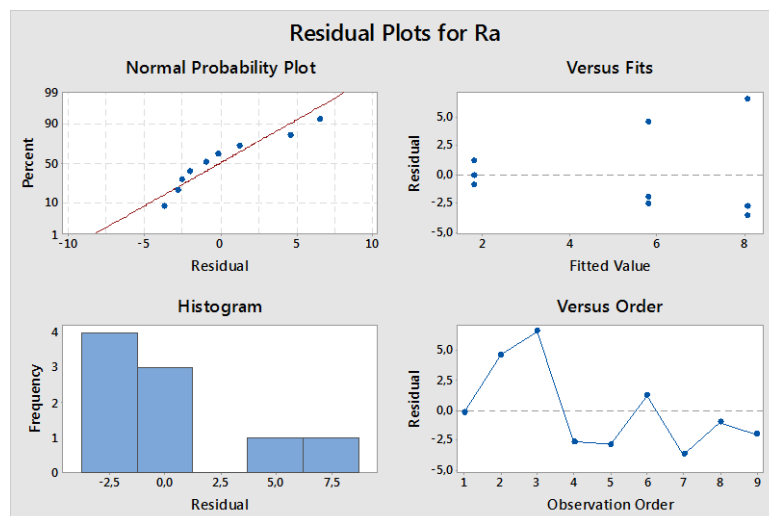
**Πίνακας 9.10** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



*Σχήμα 9.24 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra*



*Σχήμα 9.25 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra*

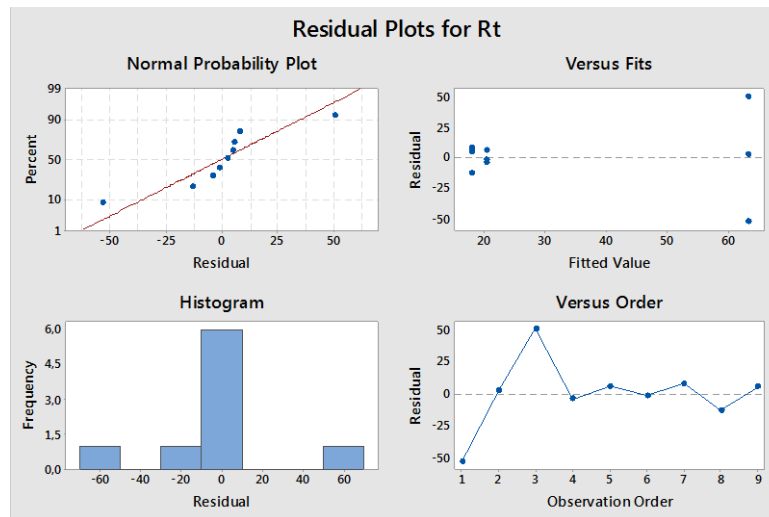


*Σχήμα 9.26 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra*

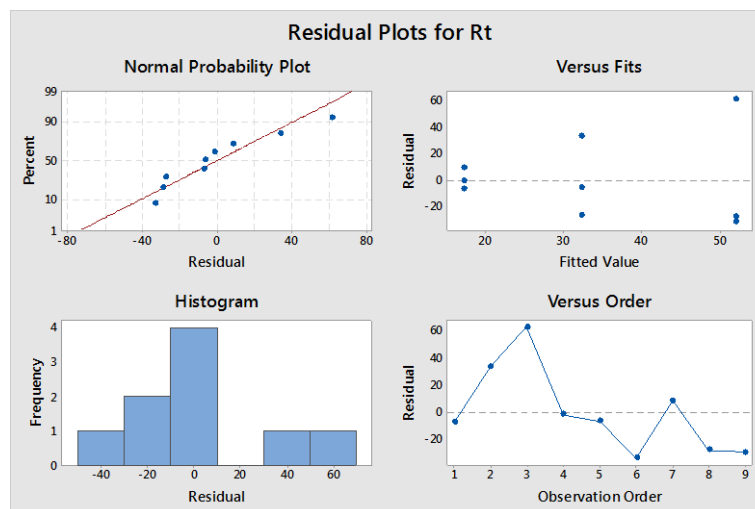


Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	3910	40,56%	3910	1954,8	3,89	0,205
Depth of cut	2	1814	18,81%	1814	906,8	1,80	0,357
Feed rate	2	2910	30,19%	2910	1454,8	2,89	0,257
Error	2	1006	10,44%	1006	503,1		
Total	8	9639	100,00%				

*Πίνακας 9.11* Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

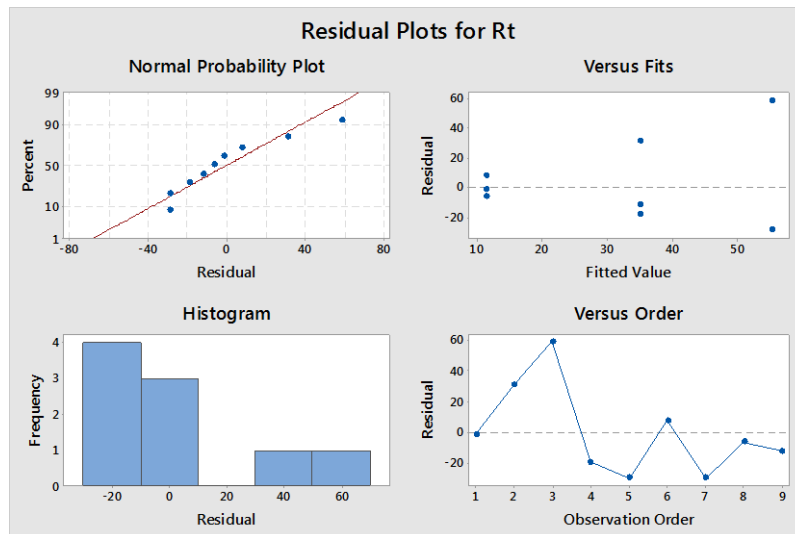


*Σχήμα 9.27* Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



*Σχήμα 9.28* Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

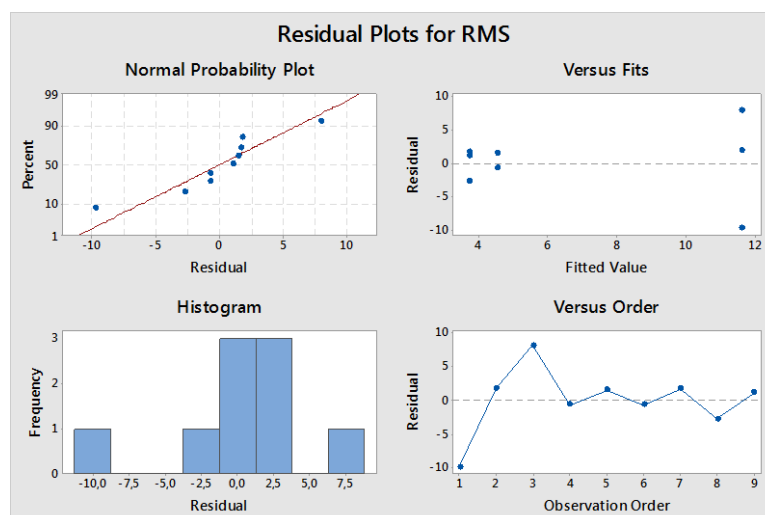




**Σχήμα 9.29** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

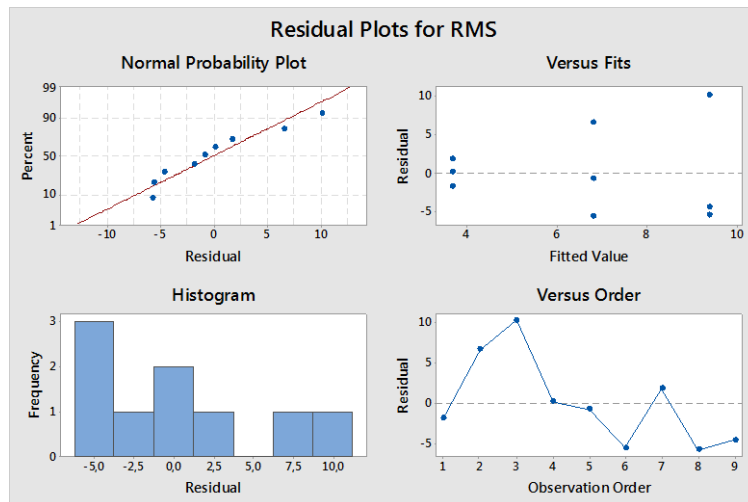
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	112,46	38,73%	112,46	56,23	4,17	0,193
Depth of cut	2	49,45	17,03%	49,45	24,72	1,84	0,353
Feed rate	2	101,50	34,96%	101,50	50,75	3,77	0,210
Error	2	26,94	9,28%	26,94	13,47		
Total	8	290,36	100,00%				

**Πίνακας 9.12** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

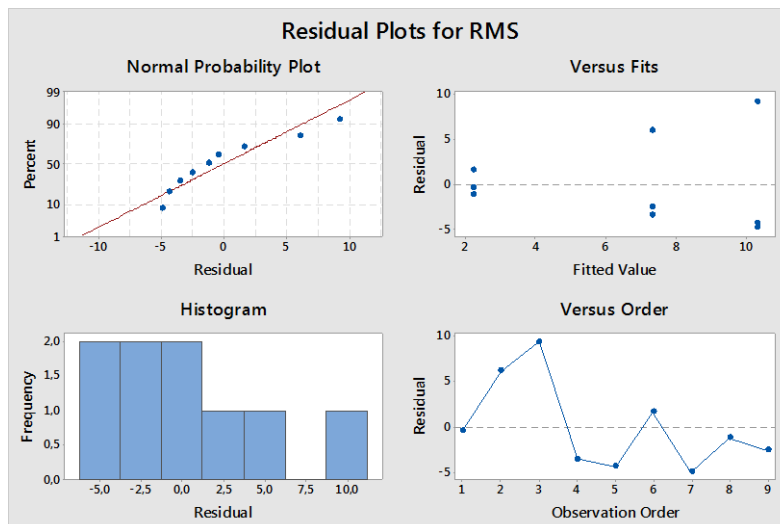


**Σχήμα 9.30** Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας

$RMS$



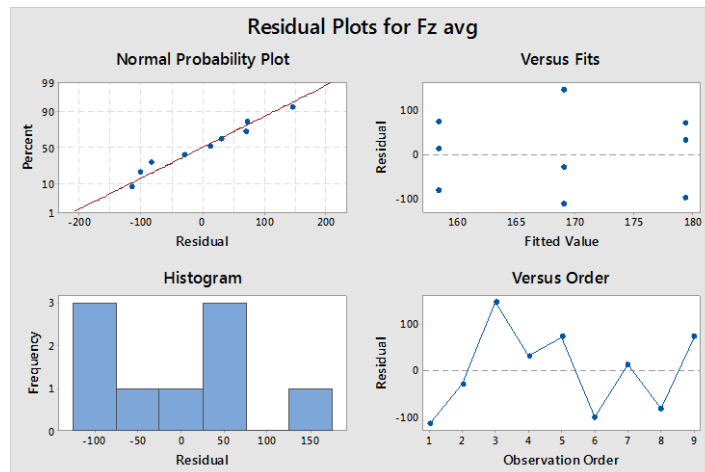
**Σχήμα 9.31** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS



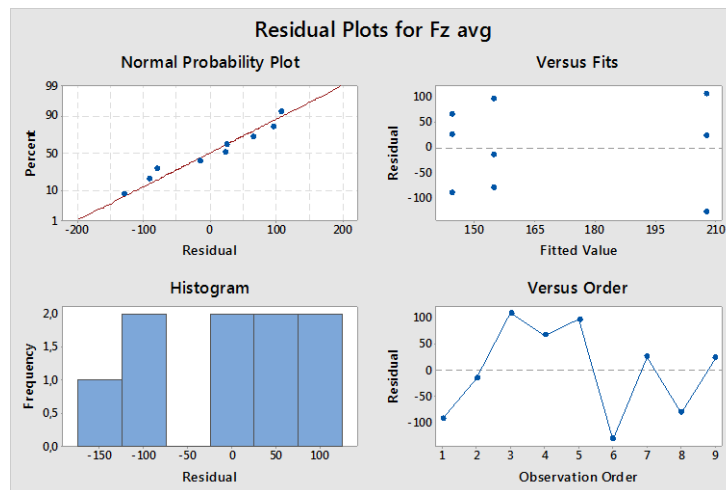
**Σχήμα 9.32** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	661,6	1,02%	661,6	330,8	0,08	0,923
Depth of cut	2	6926,9	10,70%	6926,9	3463,4	0,88	0,533
Feed rate	2	49256,2	76,07%	49256,2	24628,1	6,23	0,138
Error	2	7908,2	12,21%	7908,2	3954,1		
Total	8	64752,9	100,00%				

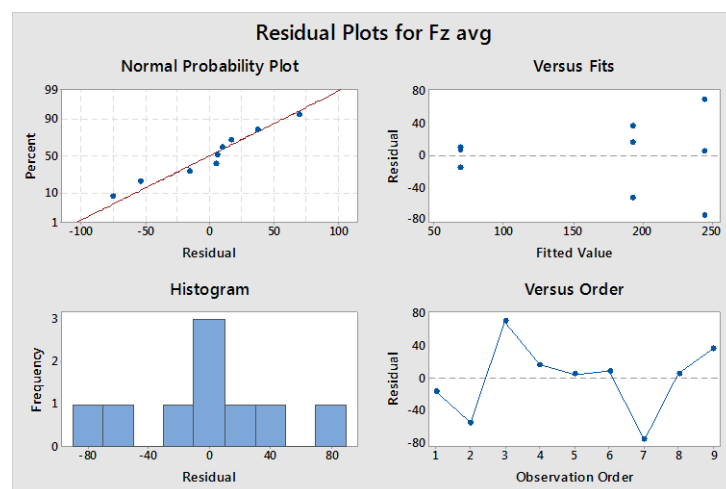
**Πίνακας 9.13** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



Σχήμα 9.33 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην Fz avg



Σχήμα 9.34 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην Fz avg



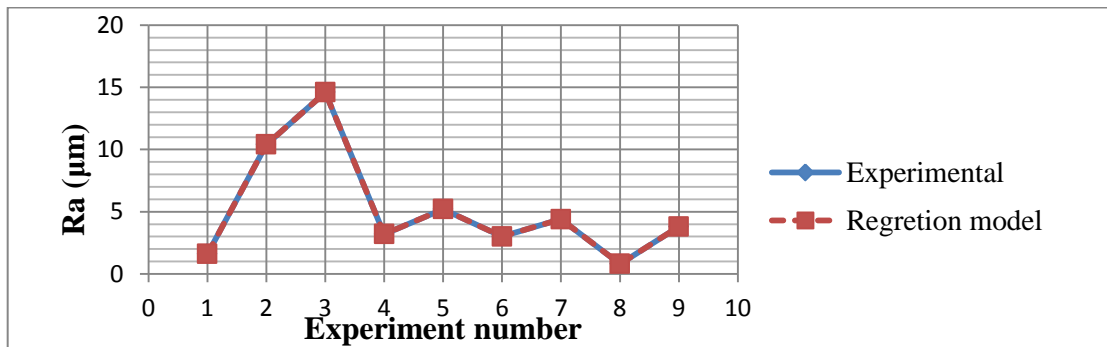
Σχήμα 9.35 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην Fz avg



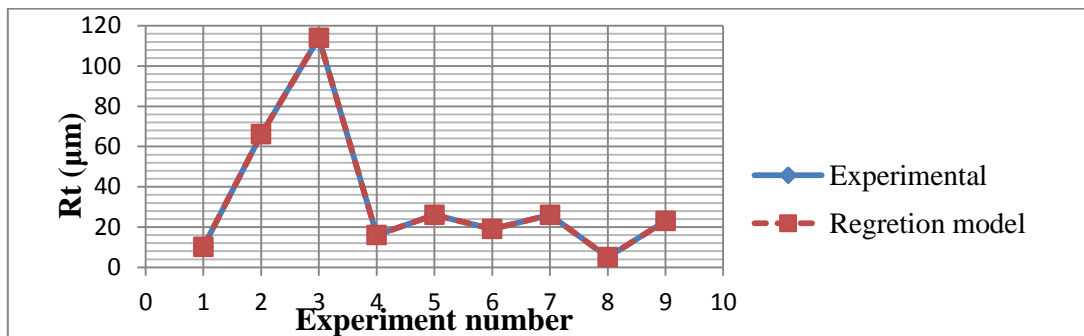
**Μοντέλα παλιδρόμησης (Regression Models)**

Response	Regression model	R <sup>2</sup> (%)
Ra	$-9,800 - 0,2667 \cdot v + 42,00 \cdot a_p + 110,0 \cdot f + 0,002370 \cdot v^2 - 3,733 \cdot a_p^2 - 206,7 \cdot f^2 - 0,3200 \cdot v \cdot a_p - 0,08889 \cdot v \cdot f$	100
Rt	$19,00 - 2,556 \cdot v + 109,3 \cdot a_p + 786,7 \cdot f + 0,02259 \cdot v^2 + 101,3 \cdot a_p^2 - 1033 \cdot f^2 - 2,311 \cdot v \cdot a_p - 2,667 \cdot v \cdot f$	100
RMS	$10,40 - 0,3844 \cdot v + 49,47 \cdot a_p + 151,3 \cdot f + 0,003481 \cdot v^2 + 0,5333 \cdot a_p^2 - 273,3 \cdot f^2 - 0,4444 \cdot v \cdot a_p - 0,2000 \cdot v \cdot f$	100
Fz avg	$287,0 + 2,822 \cdot v - 1963 \cdot a_p + 3728 \cdot f - 0,01741 \cdot v^2 + 909,3 \cdot a_p^2 - 1183 \cdot f^2 + 6,489 \cdot v \cdot a_p - 23,67 \cdot v \cdot f$	100

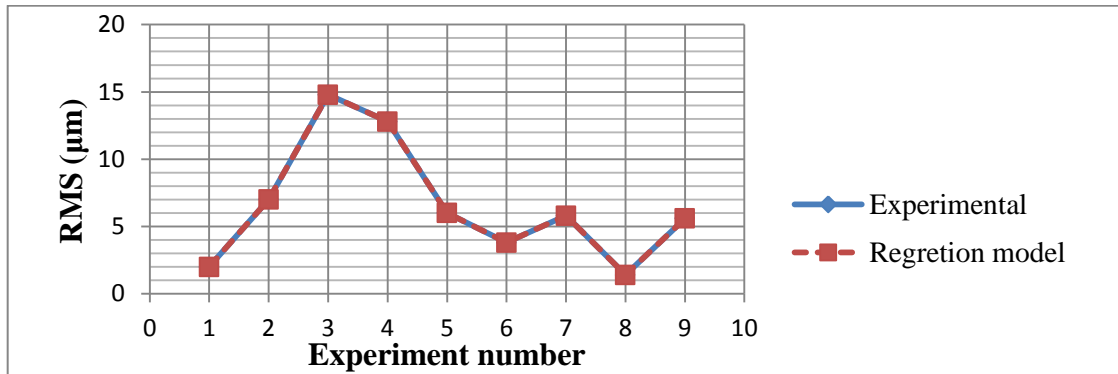
**Πίνακας 9.14** Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους



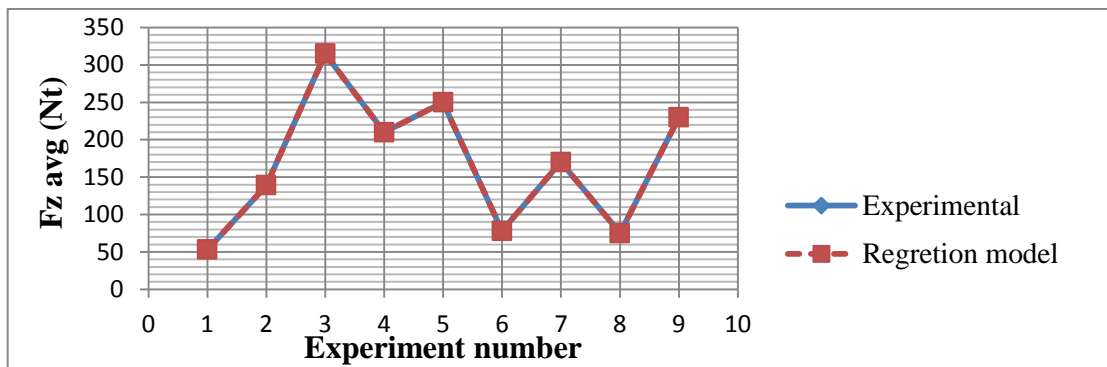
**Σχήμα 9.36** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra



**Σχήμα 9.37** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Rt



*Σχήμα 9.38 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS*



*Σχήμα 9.39 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg)*

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	159,156	100,00%	159,156	19,8944	*	*
Cutting speed	1	51,627	32,44%	2,803	2,8029	*	*
Depth of cut	1	24,807	15,59%	2,803	2,8030	*	*
Feed rate	1	58,907	37,01%	9,553	9,5526	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	9,102	5,72%	9,102	9,1022	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	0,269	0,17%	0,082	0,0817	*	*
Feed rate*Feed rate	1	1,502	0,94%	6,407	6,4067	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	12,836	8,06%	8,640	8,6400	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	0,107	0,07%	0,107	0,1067	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	159,156	100,00%				

*Πίνακας 9.15 Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra*



Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	9638,89	100,00%	9638,89	1204,86	*	*
Cutting speed	1	3082,67	31,98%	257,42	257,42	*	*
Depth of cut	1	1802,67	18,70%	18,99	18,99	*	*
Feed rate	1	2904,00	30,13%	488,56	488,56	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	826,89	8,58%	826,89	826,89	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	10,89	0,11%	60,17	60,17	*	*
Feed rate*Feed rate	1	5,56	0,06%	160,17	160,17	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	910,22	9,44%	450,67	450,67	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	96,00	1,00%	96,00	96,00	*	*
Error	0	0,00	0,00%	0,00	*		
Total	8	9638,89	100,00%				

**Πίνακας 9.16** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	290,356	100,00%	290,356	36,2944	*	*
Cutting speed	1	92,827	31,97%	5,826	5,8256	*	*
Depth of cut	1	49,307	16,98%	3,888	3,8882	*	*
Feed rate	1	99,227	34,17%	18,080	18,0804	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	19,636	6,76%	19,636	19,6356	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	0,142	0,05%	0,002	0,0017	*	*
Feed rate*Feed rate	1	2,276	0,78%	11,207	11,2067	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	26,402	9,09%	16,667	16,6667	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	0,540	0,19%	0,540	0,5400	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	290,356	100,00%				

**Πίνακας 9.17** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	64752,9	100,00%	64752,9	8094,1	*	*
Cutting speed	1	170,7	0,26%	313,9	313,9	*	*
Depth of cut	1	6016,7	9,29%	6125,0	6125,0	*	*
Feed rate	1	46640,2	72,03%	10974,1	10974,1	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	490,9	0,76%	490,9	490,9	*	*



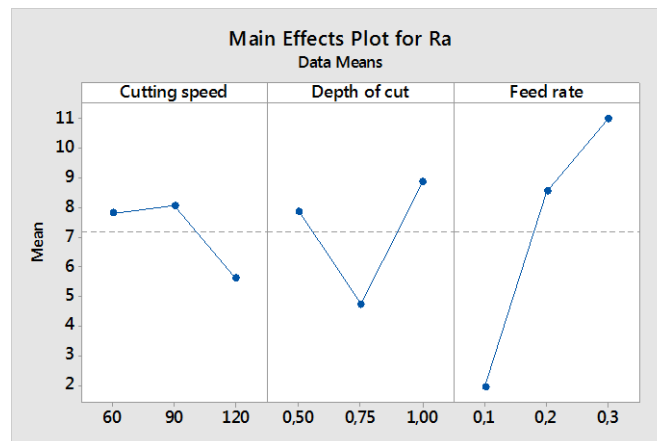
Depth of cut*Depth of cut	1	910,2	1,41%	4845,0	4845,0	*	*
Feed rate*Feed rate	1	2616,1	4,04%	210,0	210,0	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	346,7	0,54%	3552,7	3552,7	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	7561,5	11,68%	7561,5	7561,5	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	64752,9	100,00%				

**Πίνακας 9.18** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

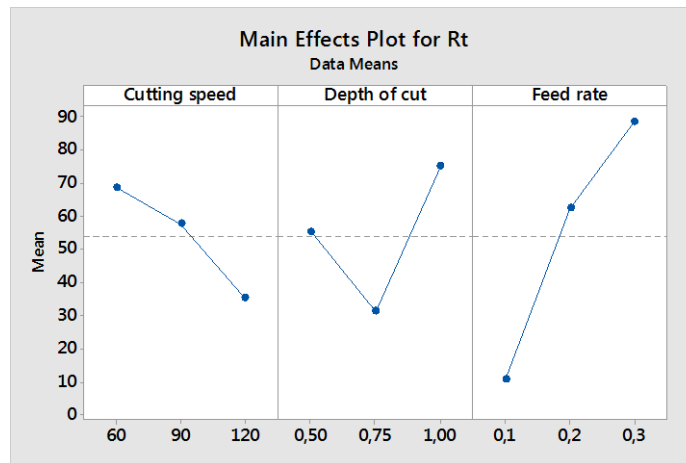
Στο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης παρατηρούμε ότι σε όλους τους παράγοντες που μελετάμε την σημαντικότερη επίδραση στις εξισώσεις πρόβλεψης ασκεί η πρόωση. Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα ποσοστά επίδρασης των παραμέτρων. Επίσης το ποσοστό επιτυχίας όλων των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης είναι 100%.

### 9.2.3. Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,20% (Al – Gr 0,20%)

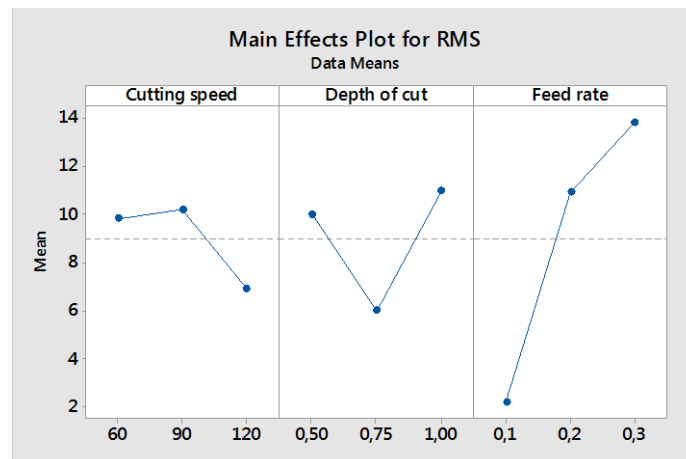
#### Αποτελέσματα Taguchi (Taguchi results)



**Σχήμα 9.40** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.



**Σχήμα 9.41** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$ .



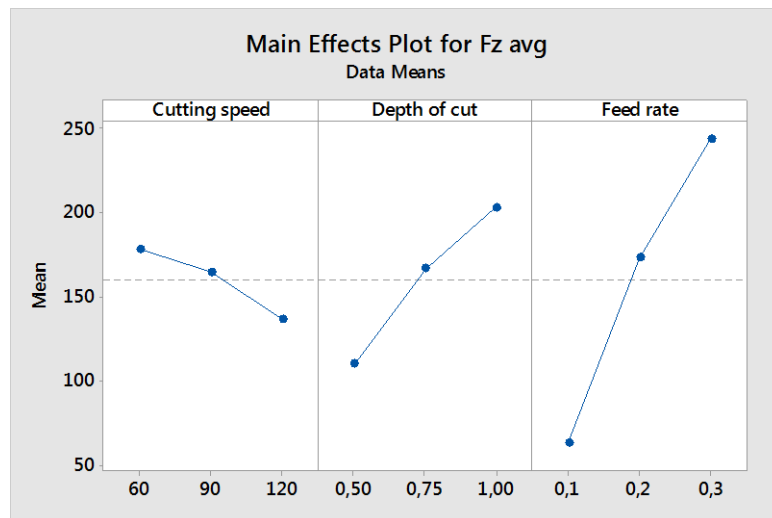
**Σχήμα 9.42** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

Για τις παράμετρος της τραχύτητας  $R_a$  και  $RMS$  όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μικρή αύξηση της τραχυτήτων  $R_a$  και  $RMS$  όμως για την τραχύτητα  $R_t$  παρατηρούμε μια σημαντική μείωση άρα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια έχει μικρότερες σε απόσταση κορυφές και κοιλάδες. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση με γρηγορότερο ρυθμό των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm σημαντική μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  αλλά από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου καταλήγει να είναι υψηλότερη από το βάθος κοπής των 0,50mm έτσι συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη κατεργαζόμενη επιφάνεια παρατηρείται στο βάθος κοπής των 0,75mm. Στην πρόωση





παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό τις τραχύτητες Ra, Rt και RMS όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev δηλαδή την χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev οι τραχύτητες Ra, Rt και RMS αυξήθηκαν με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι έχουμε μια περαιτέρω χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με αύξηση της πρόωσης.



**Σχήμα 9.43** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

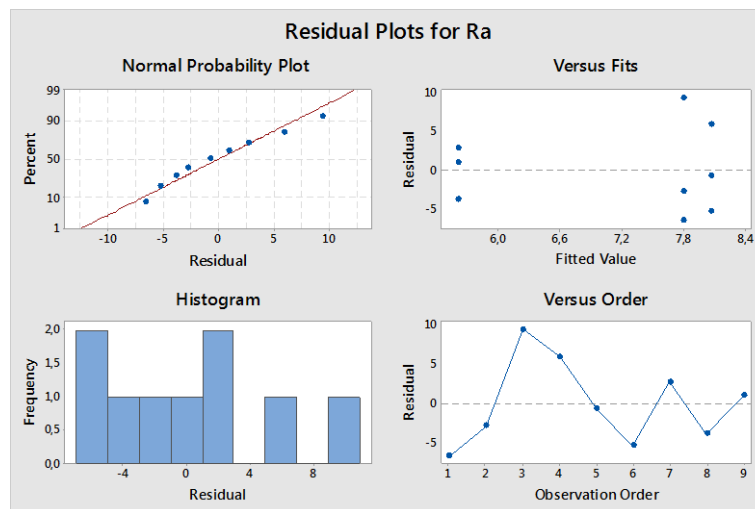
Για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg) όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μείωση της  $F_z$  avg. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση της  $F_z$  avg με πιο γρήγορο ρυθμό όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm αύξηση της  $F_z$  avg όπως και από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση της  $F_z$  avg με λίγο πιο αργό ρυθμό, σχεδόν έχουμε μια γραμμικότητα ανάμεσα στο βάθος κοπής και την  $F_z$  avg. Η πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό την αύξηση της  $F_z$  avg όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev επίσης παρατηρούμε την αύξηση της  $F_z$  avg με την αύξηση της πρόωσης με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg επηρεάζεται σημαντικά από την πρόωση σχεδόν γραμμικά.



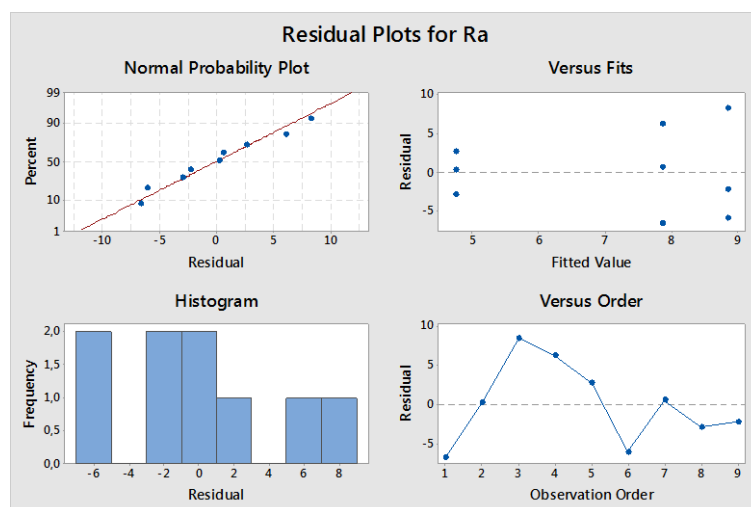
### Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	11,00	4,63%	11,00	5,498	0,16	0,858
Depth of cut	2	27,90	11,75%	27,90	13,951	0,42	0,705
Feed rate	2	131,85	55,53%	131,85	65,924	1,98	0,336
Error	2	66,68	28,08%	66,68	33,338		
Total	8	237,42	100,00%				

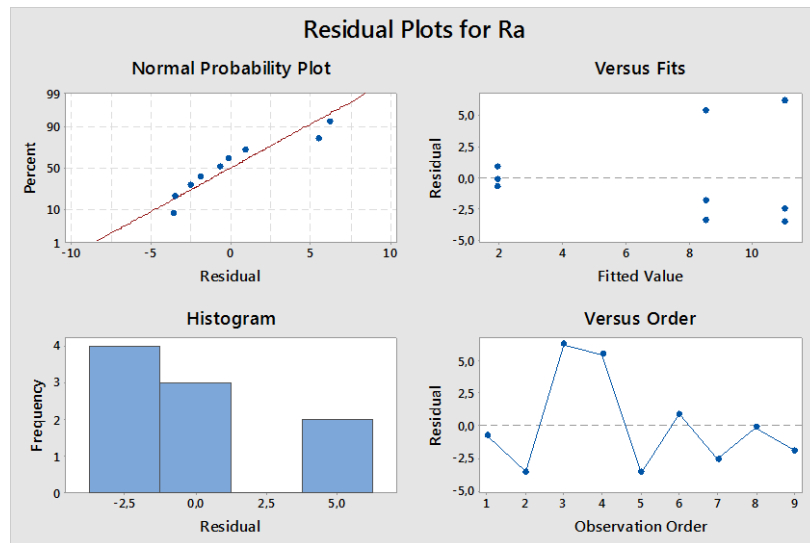
**Πίνακας 9.19** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



**Σχήμα 9.44** Διαγραμμάτια διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



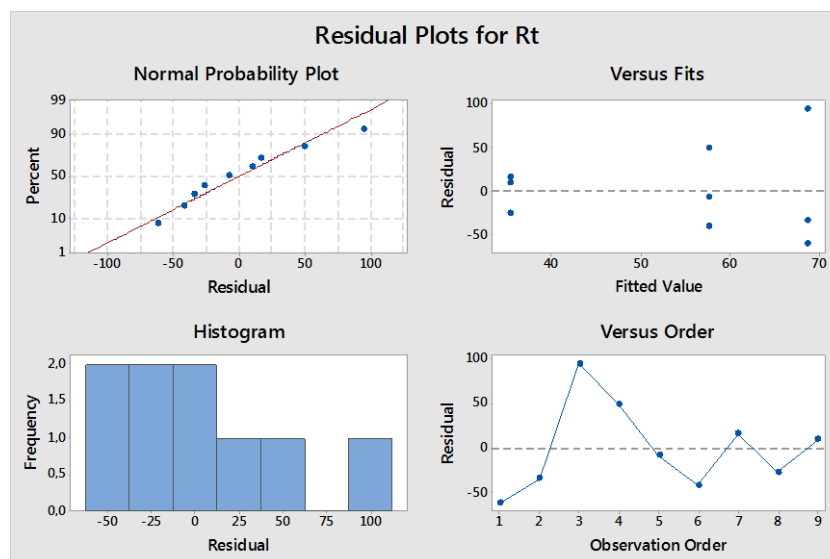
**Σχήμα 9.45** Διαγραμμάτια διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



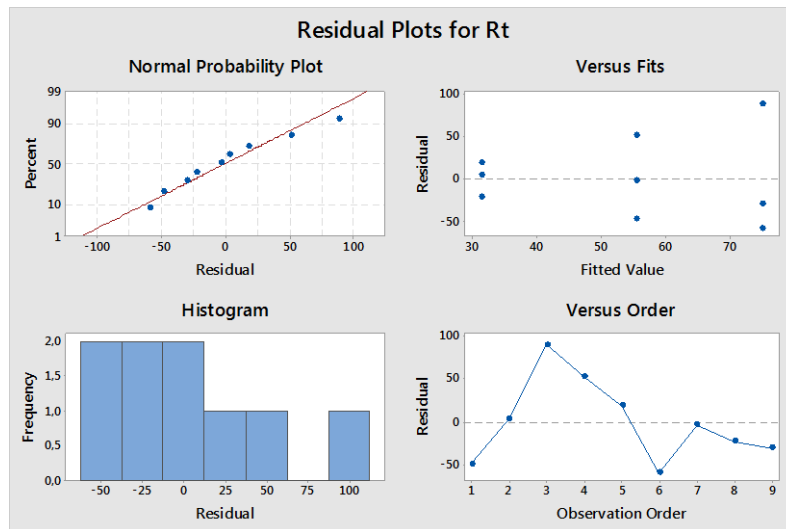
**Σχήμα 9.46** Διαγραμμάτα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	1731	8,22%	1731	865,4	0,25	0,802
Depth of cut	2	2870	13,63%	2870	1434,8	0,41	0,709
Feed rate	2	9447	44,88%	9447	4723,4	1,35	0,426
Error	2	7002	33,26%	7002	3500,8		
Total	8	21049	100,00%				

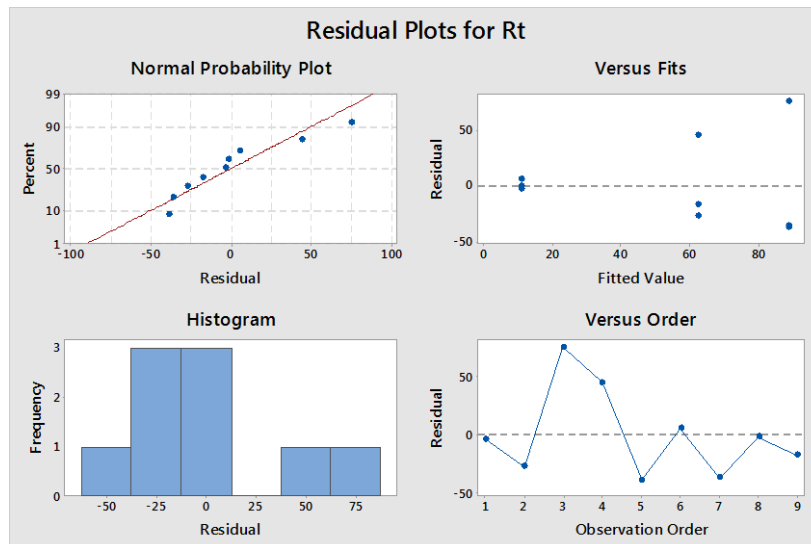
**Πίνακας 9.20** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt



**Σχήμα 9.47** Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Rt



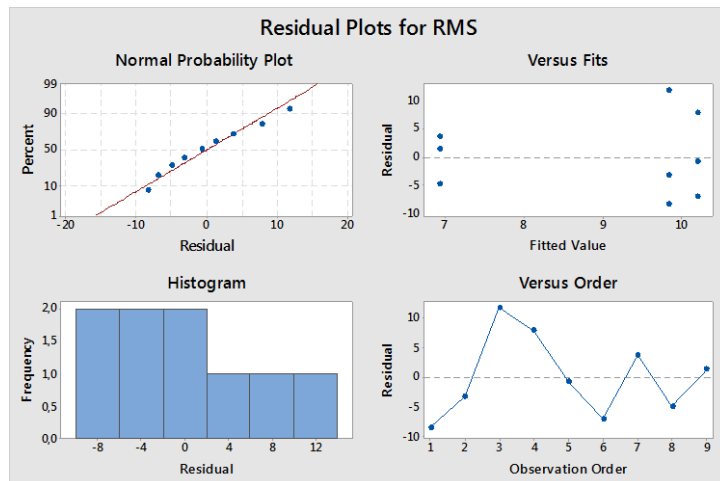
**Σχήμα 9.48** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



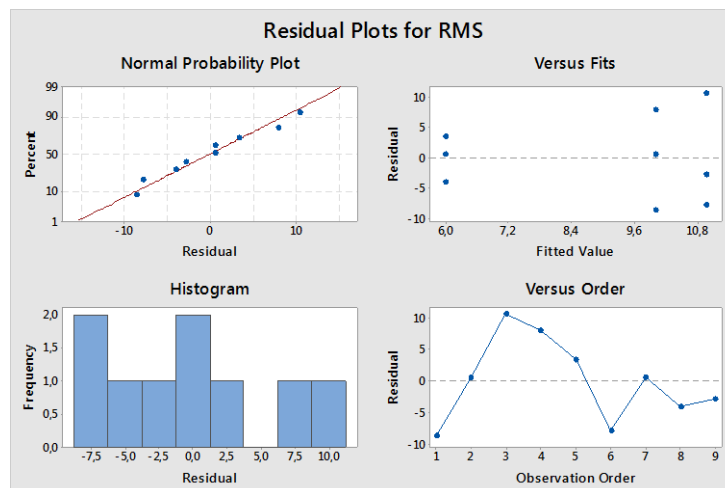
**Σχήμα 9.49** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	19,22	4,97%	19,22	9,608	0,18	0,846
Depth of cut	2	41,60	10,76%	41,60	20,801	0,39	0,718
Feed rate	2	220,02	56,89%	220,02	110,008	2,08	0,325
Error	2	105,94	27,39%	105,94	52,968		
Total	8	386,77	100,00%				

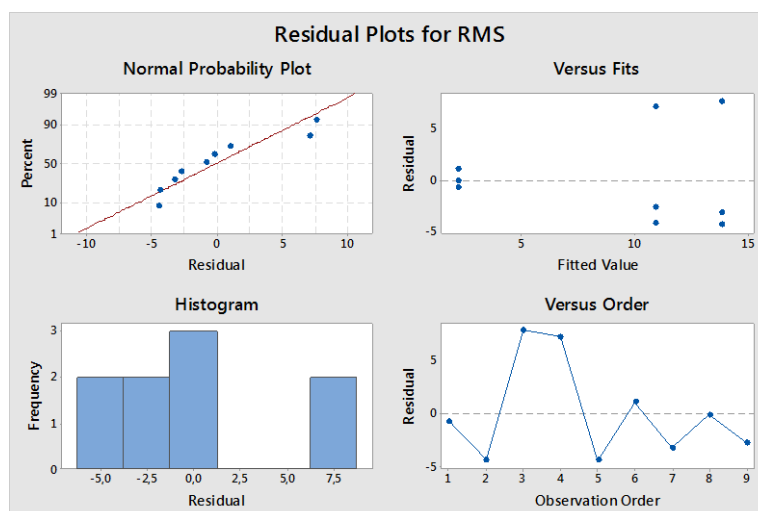
**Πίνακας 9.21** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$



*Σχήμα 9.50 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  
RMS*



*Σχήμα 9.51 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

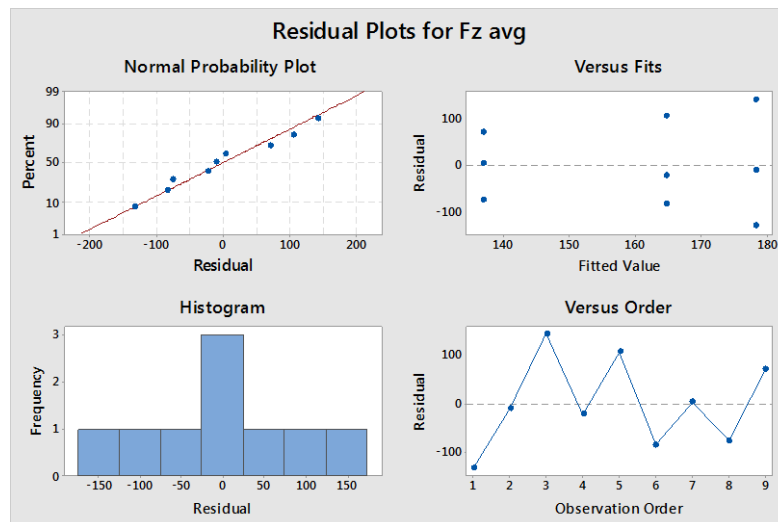


*Σχήμα 9.52 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

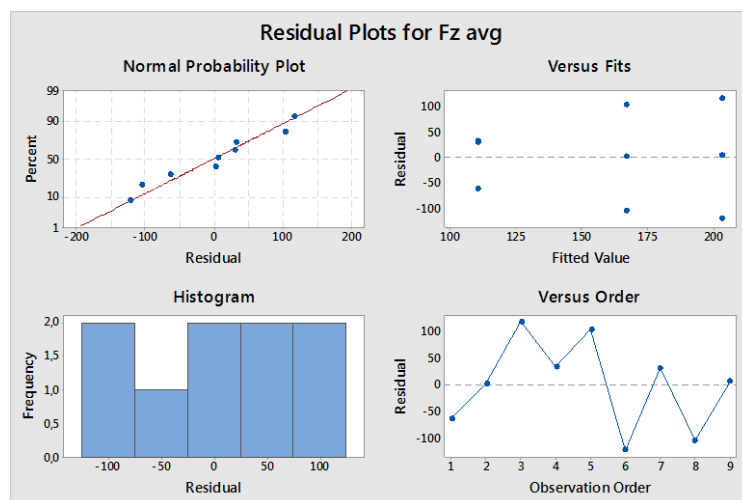


Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	2684	3,87%	2684	1342	0,66	0,603
Depth of cut	2	13130	18,93%	13130	6565	3,22	0,237
Feed rate	2	49457	71,31%	49457	24729	12,12	0,076
Error	2	4080	5,88%	4080	2040		
Total	8	69351	100,00%				

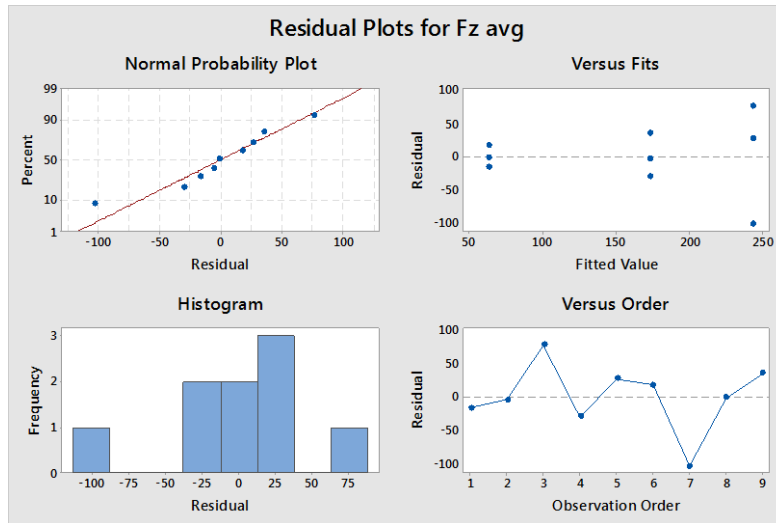
**Πίνακας 9.22** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



**Σχήμα 9.53** Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην  $F_z$  avg



**Σχήμα 9.54** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην  $F_z$  avg

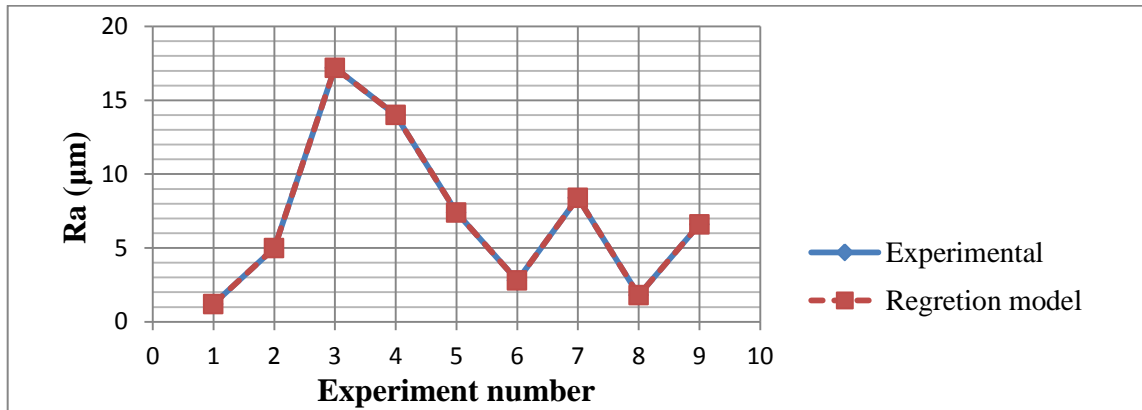


**Σχήμα 9.55** Διαγράμματα διασποράς της πρόωσης στην Fz avg

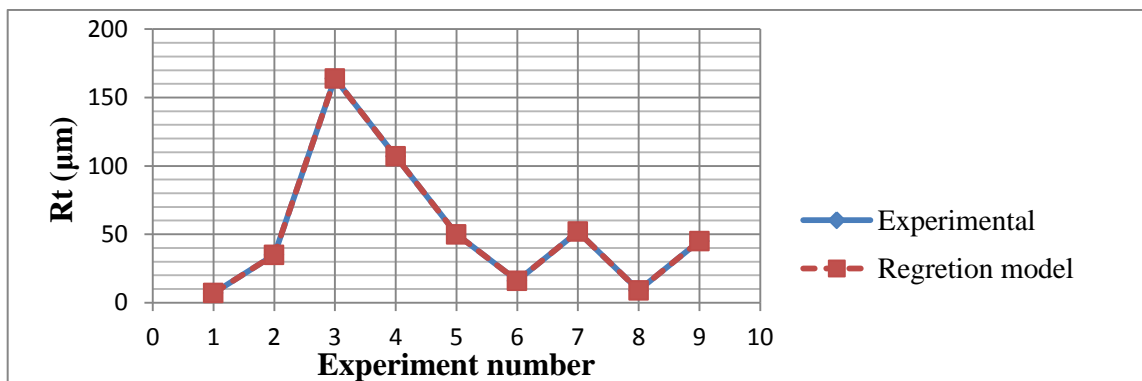
### Μοντέλα παλιδρόμησης (Regression Models)

Response	Regression model	R <sup>2</sup> (%)
Ra	$6,800 + 0,6433 \cdot v - 159,6 \cdot a_p + 301,0 \cdot f - 0,001519 \cdot v^2 + 102,9 \cdot a_p^2 - 223,3 \cdot f^2 - 0,04444 \cdot v \cdot a_p - 1,867 \cdot v \cdot f$	100
Rt	$166,0 + 4,544 \cdot v - 1595 \cdot a_p + 2672 \cdot f - 0,006296 \cdot v^2 + 1013 \cdot a_p^2 - 1283 \cdot f^2 - 0,04444 \cdot v \cdot a_p - 19,67 \cdot v \cdot f$	100
RMS	$5,900 + 0,8306 \cdot v - 198,5 \cdot a_p + 392,8 \cdot f - 0,002019 \cdot v^2 + 128,0 \cdot a_p^2 - 315,0 \cdot f^2 - 0,06222 \cdot v \cdot a_p - 0,2344 \cdot v \cdot f$	100
Fz avg	$116,0 - 0,7806 \cdot v - 746,7 \cdot a_p + 2362 \cdot f - 0,007870 \cdot v^2 + 200,0 \cdot a_p^2 + 300,0 \cdot f^2 + 6,022 \cdot v \cdot a_p - 15,06 \cdot v \cdot f$	100

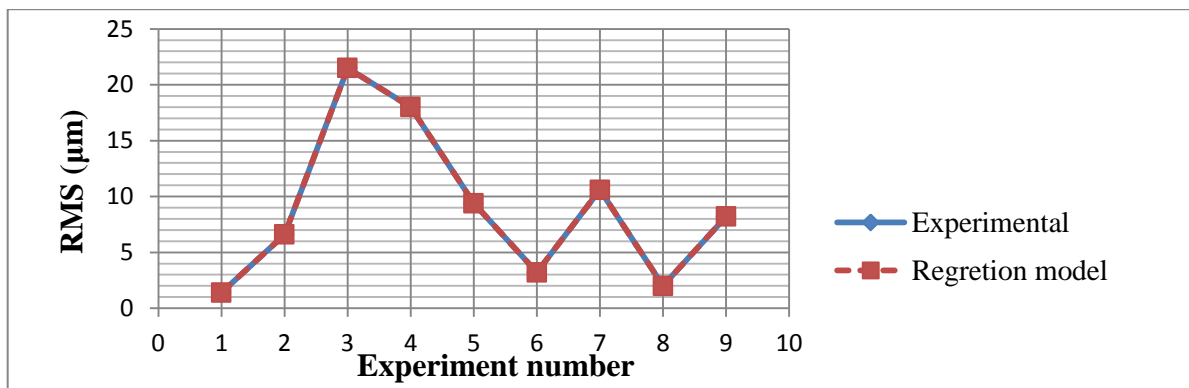
**Πίνακας 9.23** Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους



Σχήμα 9.56 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$

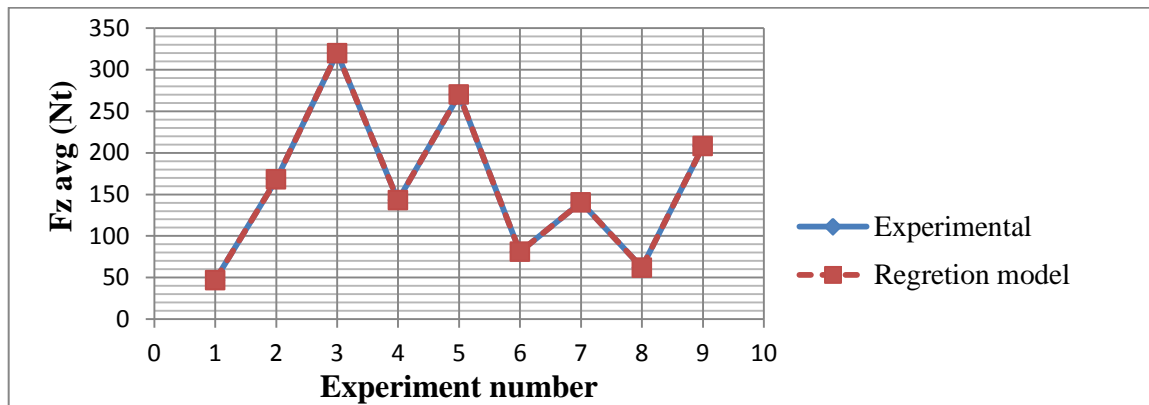


Σχήμα 9.57 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



Σχήμα 9.58 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$





**Σχήμα 9.59** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	237,422	100,00%	237,422	29,6778	*	*
Cutting speed	1	7,260	3,06%	16,313	16,3134	*	*
Depth of cut	1	1,500	0,63%	40,475	40,4748	*	*
Feed rate	1	123,307	51,94%	71,527	71,5271	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	3,736	1,57%	3,736	3,7356	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	26,402	11,12%	62,082	62,0817	*	*
Feed rate*Feed rate	1	8,542	3,60%	7,482	7,4817	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	19,636	8,27%	0,167	0,1667	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	47,040	19,81%	47,040	47,0400	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	237,422	100,00%				

**Πίνακας 9.24** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	21048,9	100,00%	21048,9	2631,11	*	*
Cutting speed	1	1666,7	7,92%	814,0	814,02	*	*
Depth of cut	1	580,2	2,76%	4040,7	4040,72	*	*
Feed rate	1	9126,0	43,36%	5635,1	5635,11	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	64,2	0,31%	64,2	64,22	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	2289,4	10,88%	6016,7	6016,67	*	*
Feed rate*Feed rate	1	320,9	1,52%	247,0	247,04	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	1780,1	8,46%	0,2	0,17	*	*



Cutting speed*Feed rate	1	5221,5	24,81%	5221,5	5221,50	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	21048,9	100,00%				

**Πίνακας 9.25** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	386,769	100,00%	386,769	48,346	*	*
Cutting speed	1	12,615	3,26%	27,190	27,190	*	*
Depth of cut	1	1,402	0,36%	62,631	62,631	*	*
Feed rate	1	203,002	52,49%	121,830	121,830	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	6,601	1,71%	6,601	6,601	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	40,201	10,39%	96,000	96,000	*	*
Feed rate*Feed rate	1	17,014	4,40%	14,884	14,884	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	31,734	8,20%	0,327	0,327	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	74,202	19,19%	74,202	74,202	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	386,769	100,00%				

**Πίνακας 9.26** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	69351,2	100,00%	69351,2	8668,90	*	*
Cutting speed	1	2583,4	3,73%	24,0	24,01	*	*
Depth of cut	1	12927,0	18,64%	885,9	885,88	*	*
Feed rate	1	48690,0	70,21%	4403,3	4403,27	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	100,3	0,14%	100,3	100,35	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	203,3	0,29%	234,4	234,38	*	*
Feed rate*Feed rate	1	767,0	1,11%	13,5	13,50	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	1020,0	1,47%	3060,0	3060,04	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	3060,0	4,41%	3060,0	3060,04	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	69351,2	100,00%				

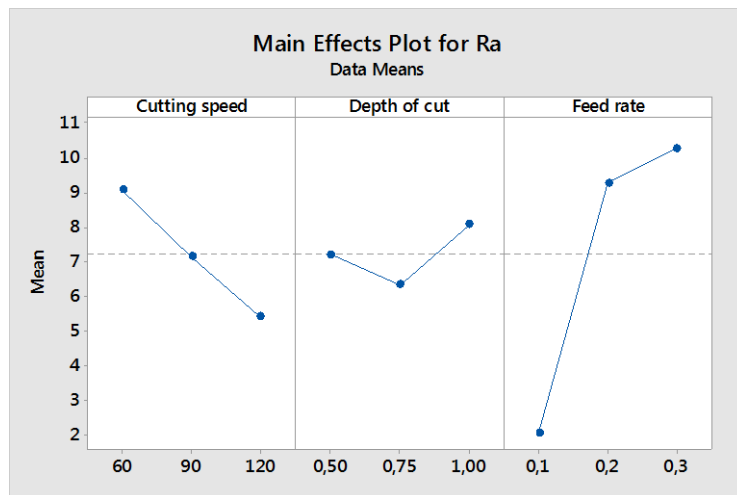
**Πίνακας 9.27** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



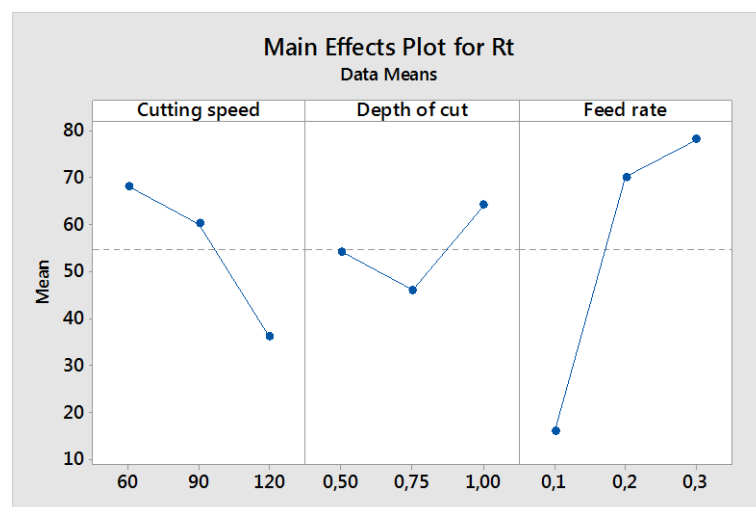
Στο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης παρατηρούμε ότι σε όλους τους παράγοντες που μελετάμε την σημαντικότερη επίδραση στις εξισώσεις πρόβλεψης ασκεί η πρόωση. Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα ποσοστά επίδρασης των παραμέτρων. Επίσης το ποσοστό επιτυχίας όλων των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης είναι 100%.

#### 9.2.4. Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,30% (Al – Gr 0,30%)

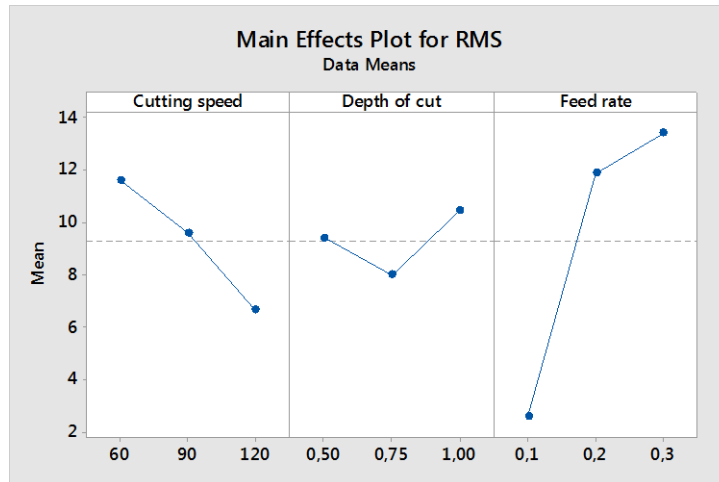
##### Αποτελέσματα Taguchi (Taguchi results)



Σχήμα 9.60 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.

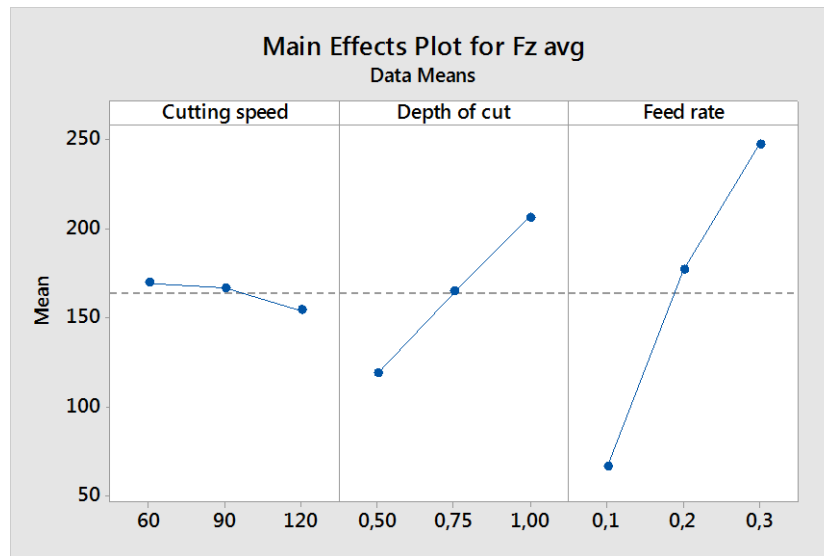


Σχήμα 9.61 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.



*Σχήμα 9.62 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

Για τις παράμετρους της τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  άρα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση με γρηγορότερο ρυθμό της τραχύτητας  $R_t$  και για τις τραχύτητες  $R_a$  και  $RMS$  παρατηρούμε μια γραμμική μείωση όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm σημαντική μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  αλλά από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου καταλήγει να είναι υψηλότερη από το βάθος κοπής των 0,50mm έτσι συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη κατεργαζόμενη επιφάνεια παρατηρείται στο βάθος κοπής των 0,75mm. Στην πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό τις τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev δηλαδή την χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev οι τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  αυξήθηκαν με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι έχουμε μια περαιτέρω χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με αύξηση της πρόωσης.



**Σχήμα 9.63** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

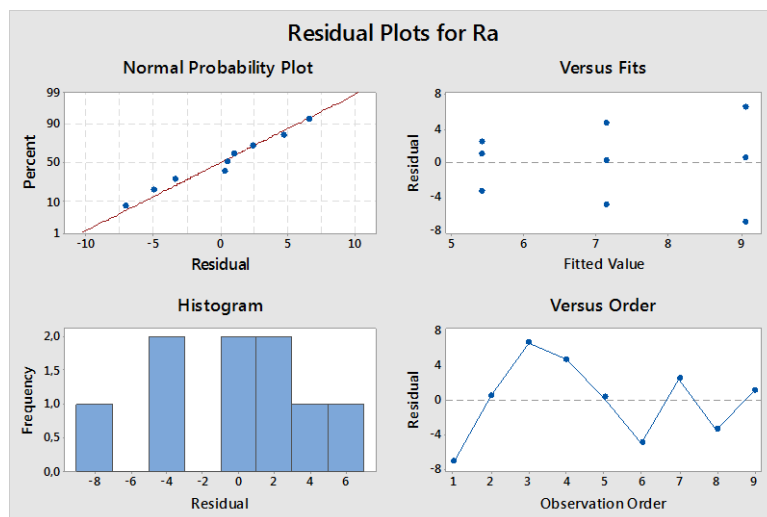
Για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg) όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μικρή μείωση της  $F_z$  avg. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση της  $F_z$  avg με πιο γρήγορο ρυθμό όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από την ταχύτητα κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm αύξηση της  $F_z$  avg όπως και από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση της  $F_z$  avg όπου σχεδόν έχουμε μια γραμμικότητα ανάμεσα στο βάθος κοπής και την  $F_z$  avg. Η πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό την αύξηση της  $F_z$  avg όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev επίσης παρατηρούμε την αύξηση της  $F_z$  avg με την αύξηση της πρόωσης με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg επηρεάζεται σημαντικά από την πρόωση σχεδόν γραμμικά.



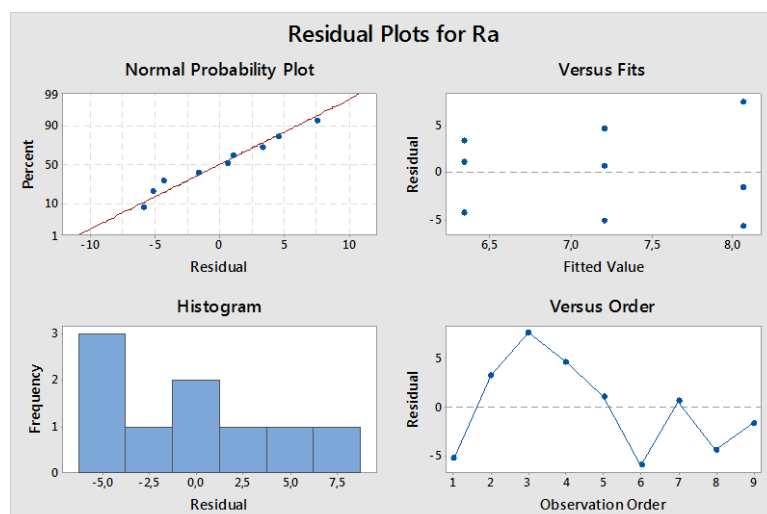
### Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	20,187	11,37%	20,187	10,093	0,61	0,619
Depth of cut	2	4,507	2,54%	4,507	2,253	0,14	0,879
Feed rate	2	120,080	67,61%	120,080	60,040	3,66	0,215
Error	2	32,827	18,48%	32,827	16,413		
Total	8	177,600	100,00%				

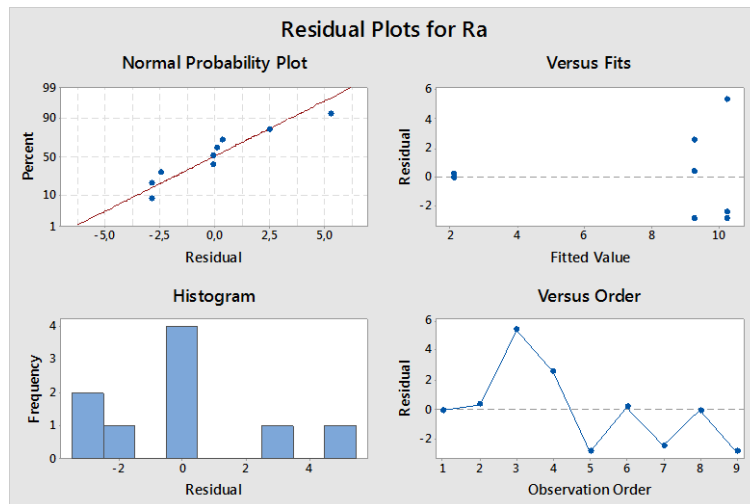
**Πίνακας 9.28** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



**Σχήμα 9.64** Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



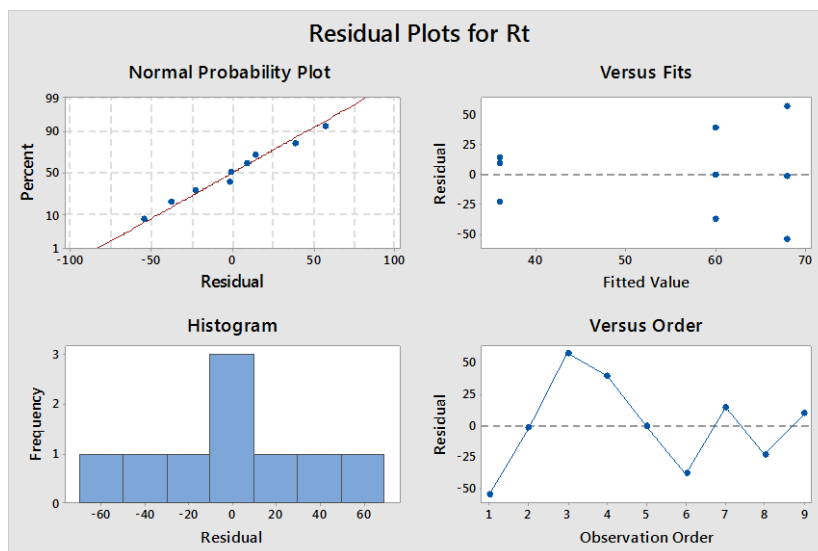
**Σχήμα 9.65** Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



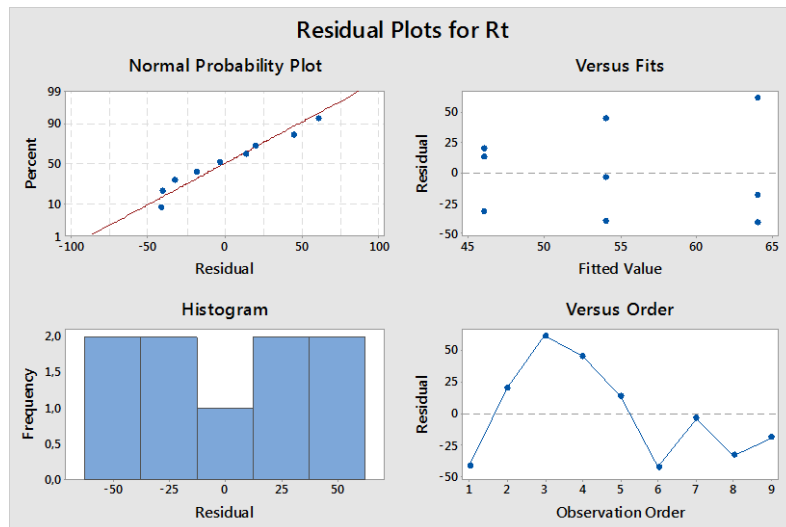
**Σχήμα 9.66** Διαγράμματα διασποράς της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	1664,0	14,21%	1664,0	832,0	0,61	0,622
Depth of cut	2	488,0	4,17%	488,0	244,0	0,18	0,849
Feed rate	2	6824,0	58,26%	6824,0	3412,0	2,49	0,286
Error	2	2738,0	23,37%	2738,0	1369,0		
Total	8	11714,0	100,00%				

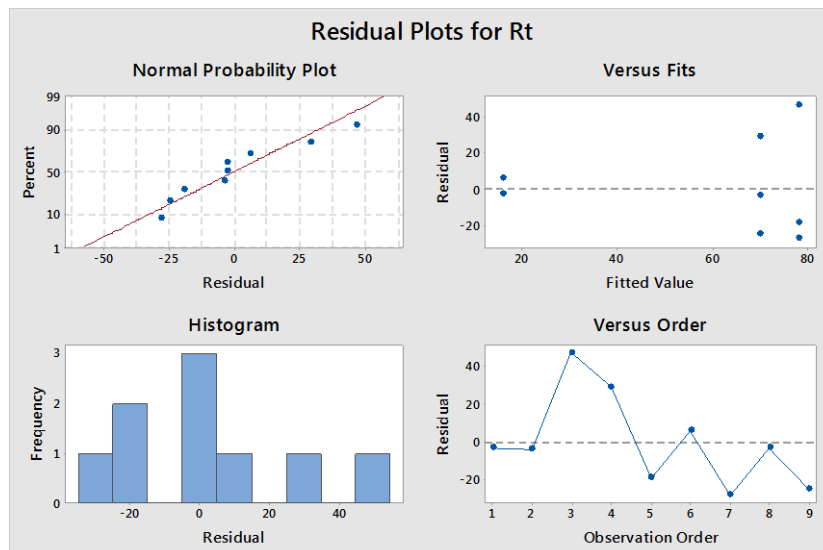
**Πίνακας 9.29** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



**Σχήμα 9.67** Διαγράμματα διασποράς της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



**Σχήμα 9.68** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

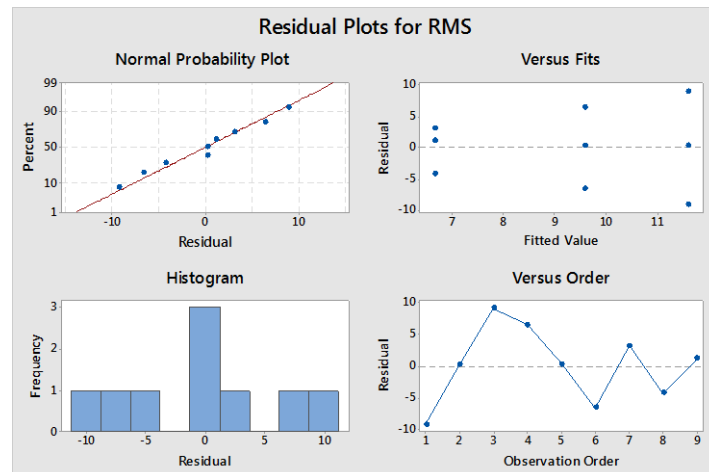


**Σχήμα 9.69** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

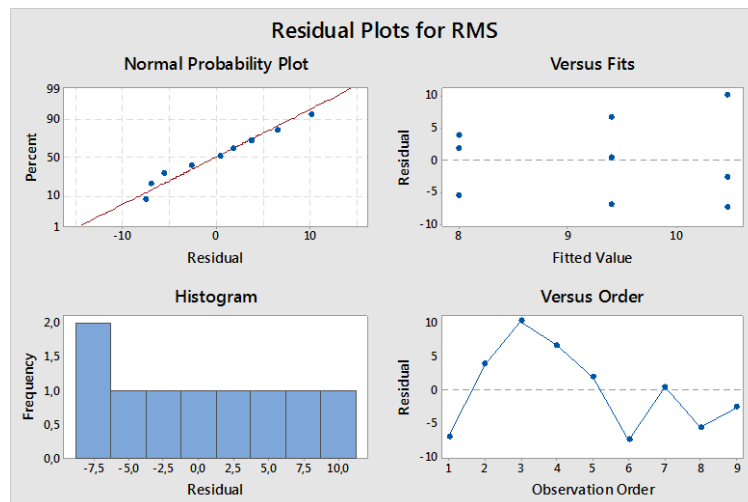
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	36,942	11,67%	36,942	18,471	0,56	0,639
Depth of cut	2	9,182	2,90%	9,182	4,591	0,14	0,877
Feed rate	2	204,862	64,73%	204,862	102,431	3,13	0,242
Error	2	65,502	20,70%	65,502	32,751		
Total	8	316,489	100,00%				

**Πίνακας 9.30** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

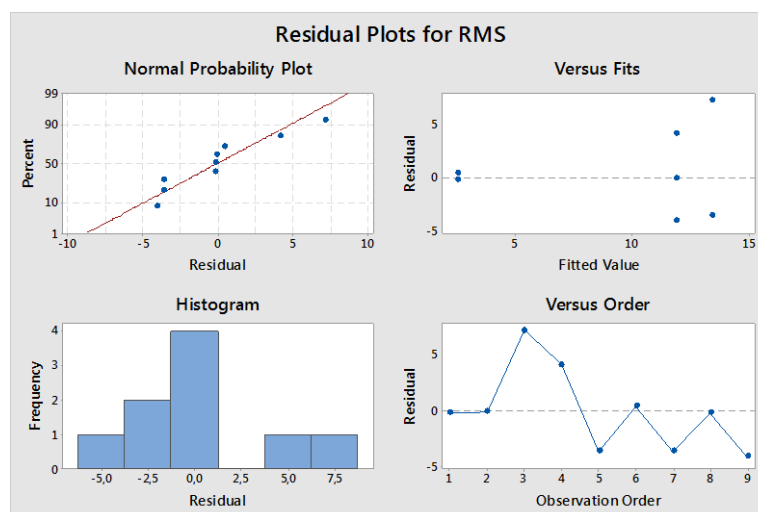




*Σχήμα 9.70 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  
RMS*



*Σχήμα 9.71 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

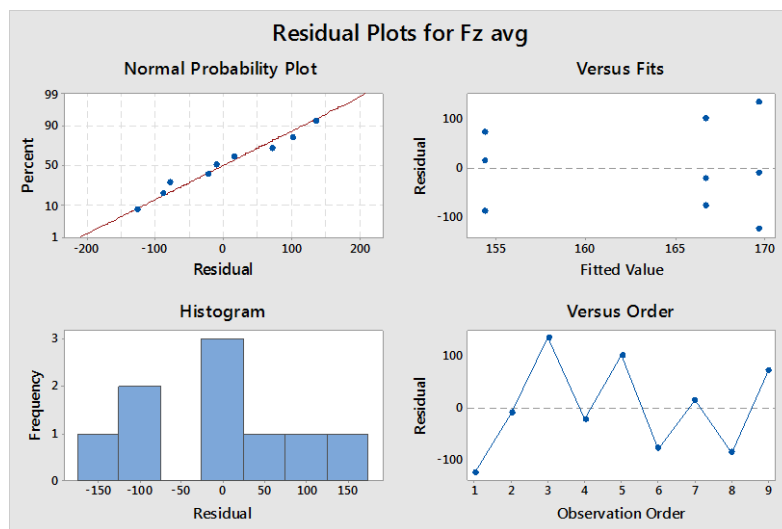


*Σχήμα 9.72 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

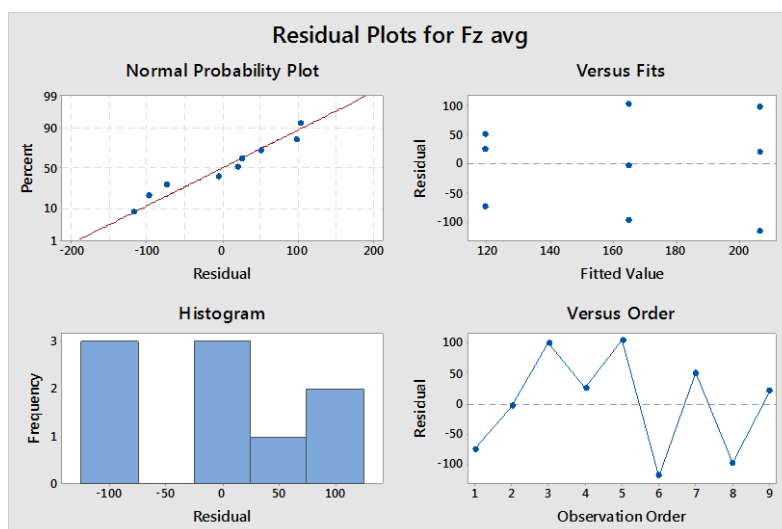


Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	396,2	0,61%	396,2	198,1	0,14	0,875
Depth of cut	2	11450,1	17,72%	11450,1	5725,0	4,15	0,194
Feed rate	2	50025,4	77,40%	50025,4	25012,7	18,12	0,052
Error	2	2761,1	4,27%	2761,1	1380,5		
Total	8	64632,7	100,00%				

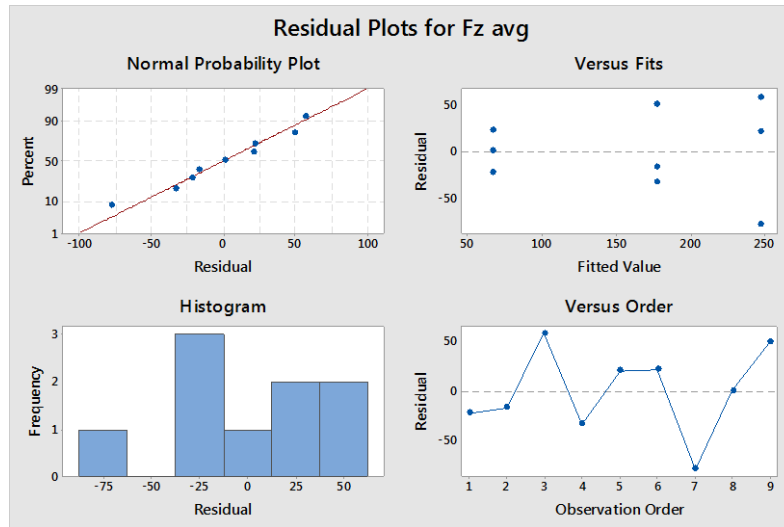
**Πίνακας 9.31** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



**Σχήμα 9.73** Διαγραμμάτα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην  $F_z$  avg



**Σχήμα 9.74** Διαγραμμάτα διασπορας του βάθους κοπής στην  $F_z$  avg

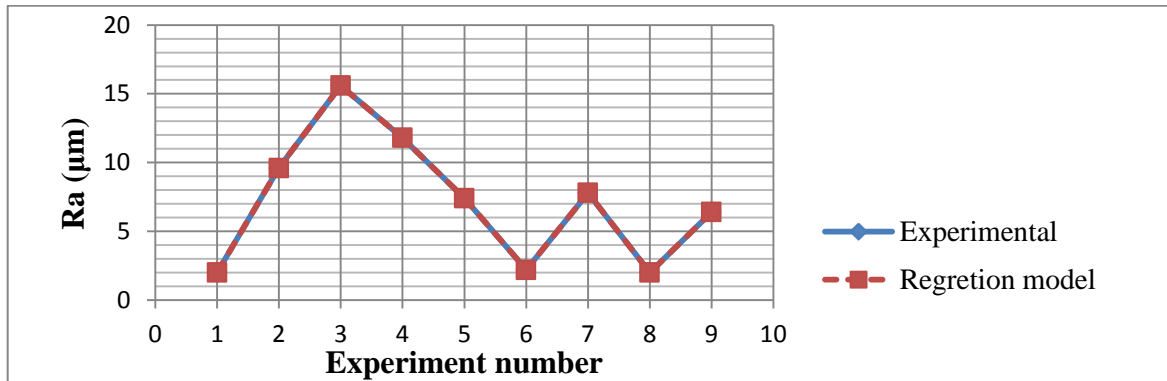


Σχήμα 9.75 Διαγράμματα διασποράς της πρόωσης στην Fz avg

### Μοντέλα παλιδρόμησης (Regression Models)

Response	Regression model	R <sup>2</sup> (%)
Ra	$-8,800 + 0,2633 \cdot v - 60,00 \cdot a_p + 282,0 \cdot f + 0,000111 \cdot v^2 + 46,93 \cdot a_p^2 - 373,3 \cdot f^2 - 0,1689 \cdot v \cdot a_p - 1,089 \cdot v \cdot f$	100
Rt	$-88,00 + 3,967 \cdot v - 670,0 \cdot a_p + 2325 \cdot f - 0,008889 \cdot v^2 + 472,0 \cdot a_p^2 - 2650 \cdot f^2 - 0,9333 \cdot v \cdot a_p - 11,00 \cdot v \cdot f$	100
RMS	$-12,80 + 0,4844 \cdot v - 93,07 \cdot a_p + 375,7 \cdot f - 0,000519 \cdot v^2 + 69,33 \cdot a_p^2 - 463,3 \cdot f^2 - 0,2044 \cdot v \cdot a_p - 1,600 \cdot v \cdot f$	100
Fz avg	$130,0 - 1,167 \cdot v - 717,0 \cdot a_p + 2082 \cdot f - 0,005185 \cdot v^2 + 228,0 \cdot a_p^2 + 25,00 \cdot f^2 + 5,378 \cdot v \cdot a_p - 10,94 \cdot v \cdot f$	100

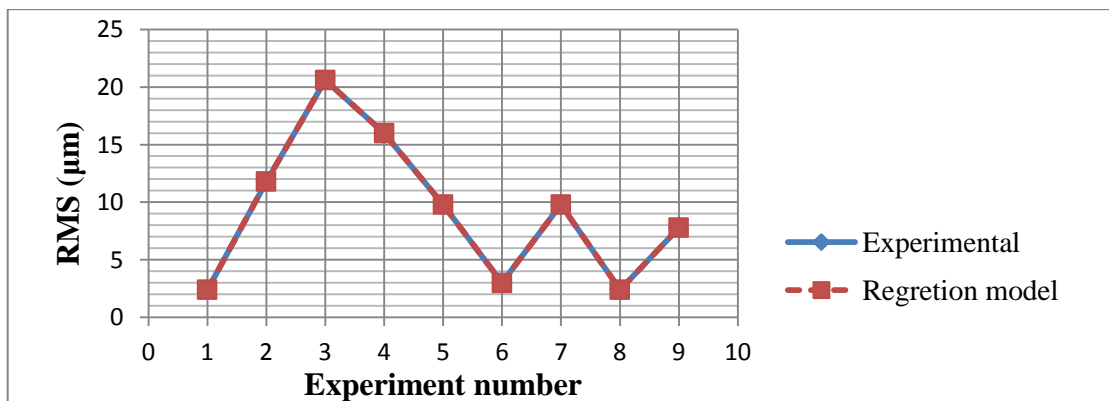
Πίνακας 9.32 Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους



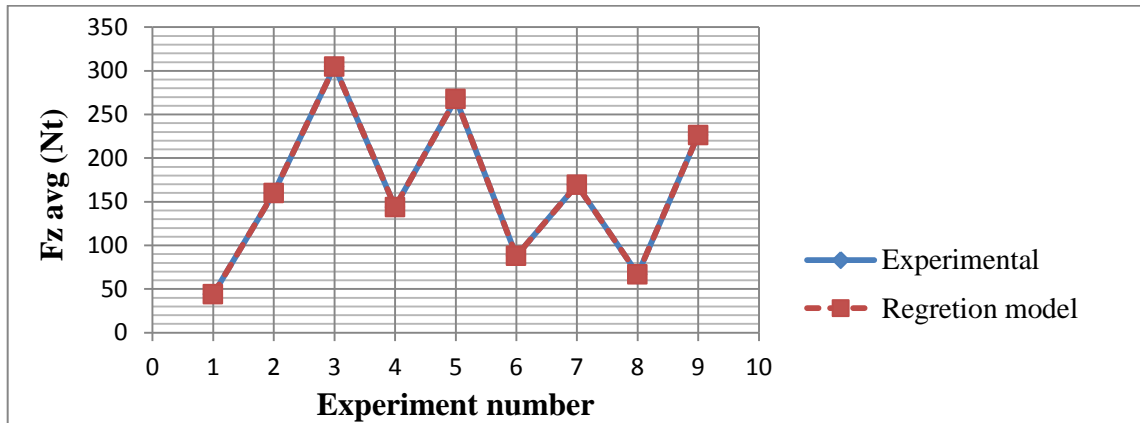
*Σχήμα 9.76 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra*



*Σχήμα 9.77 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Rt*



*Σχήμα 9.78 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας RMS*



**Σχήμα 9.79** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z avg$ )

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	177,600	100,00%	177,600	22,2000	*	*
Cutting speed	1	20,167	11,36%	2,733	2,7333	*	*
Depth of cut	1	1,127	0,63%	5,720	5,7203	*	*
Feed rate	1	100,860	56,79%	62,782	62,7821	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	0,020	0,01%	0,020	0,0200	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	3,380	1,90%	12,907	12,9067	*	*
Feed rate*Feed rate	1	19,220	10,82%	20,907	20,9067	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	16,820	9,47%	2,407	2,4067	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	16,007	9,01%	16,007	16,0067	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	177,600	100,00%				

**Πίνακας 9.33** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	11714,0	100,00%	11714,0	1464,25	*	*
Cutting speed	1	1536,0	13,11%	620,2	620,19	*	*
Depth of cut	1	150,0	1,28%	713,3	713,29	*	*
Feed rate	1	5766,0	49,22%	4267,6	4267,60	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	128,0	1,09%	128,0	128,00	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	338,0	2,89%	1305,4	1305,38	*	*
Feed rate*Feed rate	1	1058,0	9,03%	1053,4	1053,37	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	1104,5	9,43%	73,5	73,50	*	*



Cutting speed*Feed rate	1	1633,5	13,94%	1633,5	1633,50	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	11714,0	100,00%				

**Πίνακας 9.34** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	316,489	100,00%	316,489	39,561	*	*
Cutting speed	1	36,507	11,53%	9,250	9,250	*	*
Depth of cut	1	1,707	0,54%	13,763	13,763	*	*
Feed rate	1	174,960	55,28%	111,415	111,415	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	0,436	0,14%	0,436	0,436	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	7,476	2,36%	28,167	28,167	*	*
Feed rate*Feed rate	1	29,902	9,45%	32,202	32,202	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	30,942	9,78%	3,527	3,527	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	34,560	10,92%	34,560	34,560	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	316,489	100,00%				

**Πίνακας 9.35** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	64632,7	100,00%	64632,7	8079,09	*	*
Cutting speed	1	352,7	0,55%	53,6	53,65	*	*
Depth of cut	1	11440,7	17,70%	816,9	816,88	*	*
Feed rate	1	49232,0	76,17%	3423,8	3423,79	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	43,6	0,07%	43,6	43,56	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	9,4	0,01%	304,6	304,59	*	*
Feed rate*Feed rate	1	793,3	1,23%	0,1	0,09	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	1144,0	1,77%	2440,2	2440,17	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	1617,0	2,50%	1617,0	1617,04	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	64632,7	100,00%				

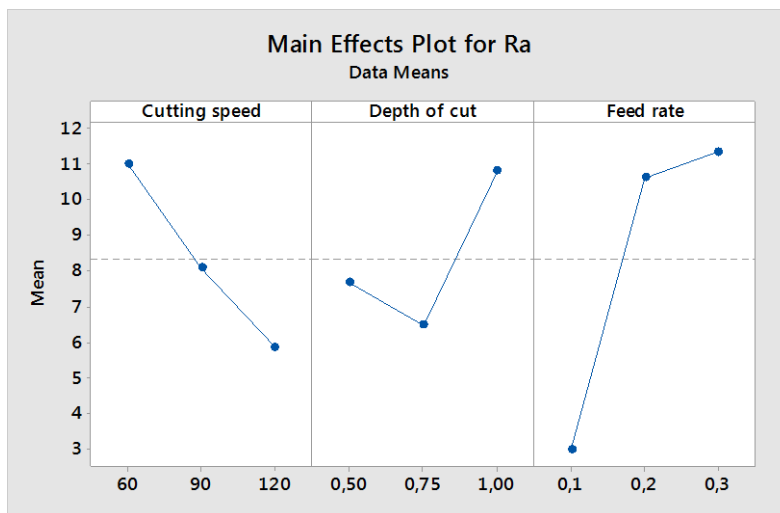
**Πίνακας 9.36** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



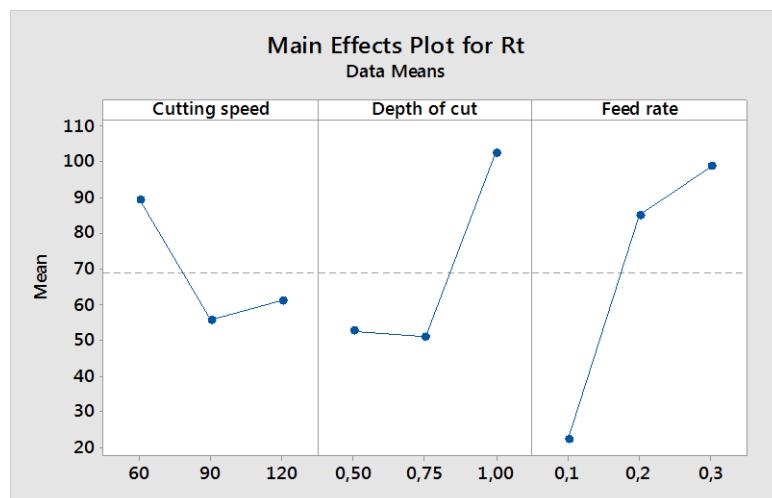
Στο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης παρατηρούμε ότι σε όλους τους παράγοντες που μελετάμε την σημαντικότερη επίδραση στις εξισώσεις πρόβλεψης ασκεί η πρόωση. Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα ποσοστά επίδρασης των παραμέτρων. Επίσης το ποσοστό επιτυχίας όλων των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης είναι 100%.

### 9.2.5. Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,40% (Al – Gr 0,40%)

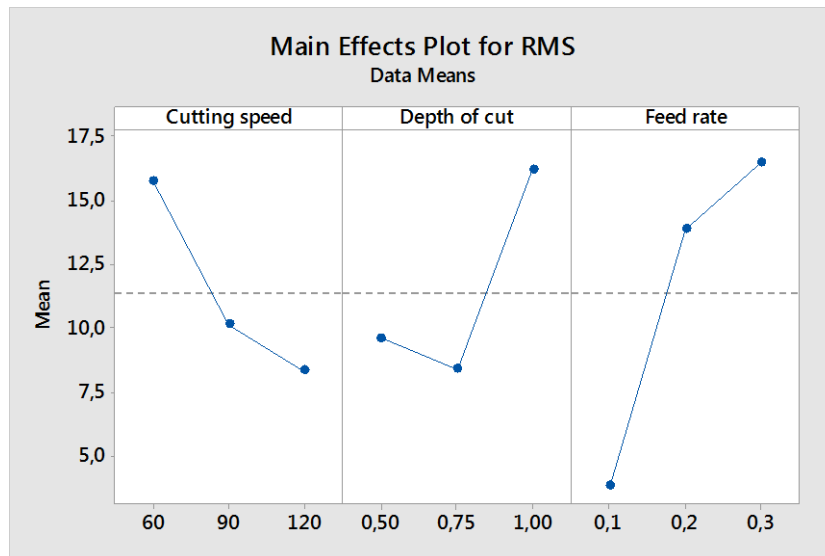
#### Αποτελέσματα Taguchi (Taguchi results)



*Σχήμα 9.80* Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.



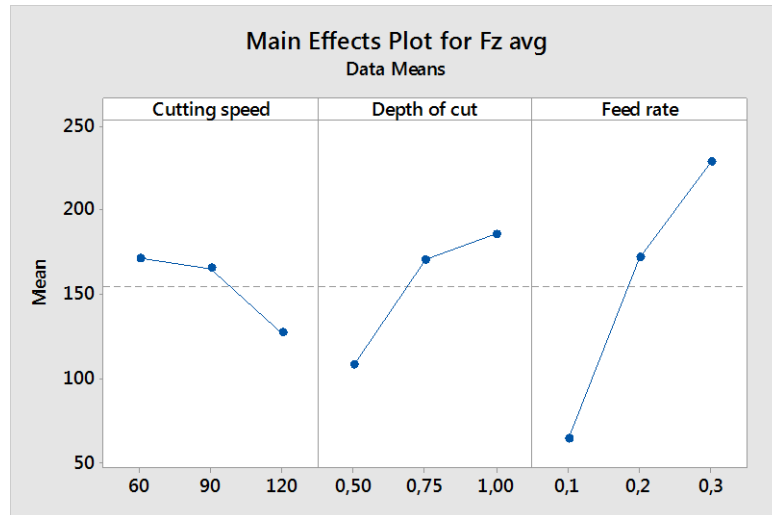
*Σχήμα 9.81* Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.



*Σχήμα 9.82 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

Για τις παράμετρους της τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  άρα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση με πιο αργό ρυθμό για τις τραχύτητες  $R_a$  και  $RMS$  όπου στην  $R_a$  παρατηρούμε σχεδόν μια γραμμική μείωση της, όμως στην  $R_t$  παρατηρούμε την αύξηση της άρα την αύξηση της μέγιστης απόστασης ανάμεσα στην κορυφή και κοιλάδα. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm την μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου η τραχύτητα  $R_t$  έχει πολύ μικρό ρυθμό μείωσης, αλλά από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όπου καταλήγει να είναι υψηλότερη από το βάθος κοπής των 0,50mm έτσι συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη κατεργαζόμενη επιφάνεια παρατηρείται στο βάθος κοπής των 0,75mm. Στην πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό τις τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev δηλαδή την χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev οι τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και  $RMS$  αυξήθηκαν με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι έχουμε μια περαιτέρω χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με αύξηση της πρόωσης.





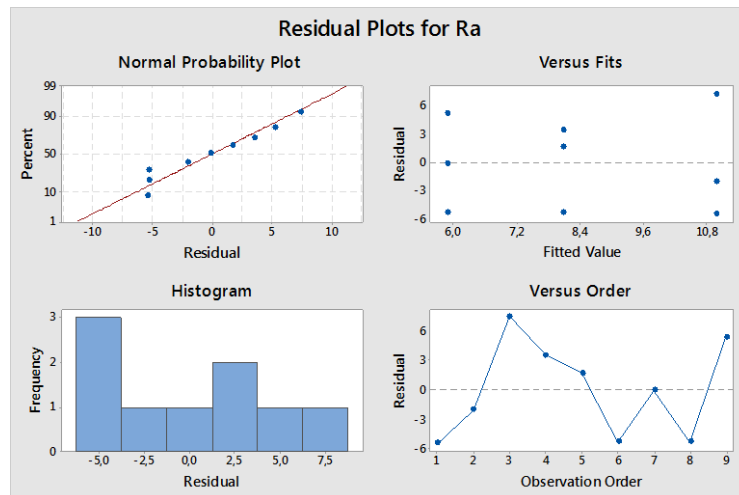
**Σχήμα 9.83** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

Για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg) όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μικρή μείωση της  $F_z$  avg. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση της  $F_z$  avg με πιο γρήγορο ρυθμό όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg επηρεάζεται από την ταχύτητα κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm αύξηση της  $F_z$  avg όπως και από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση της  $F_z$  avg με μικρότερο ρυθμό. Η πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό την αύξηση της  $F_z$  avg όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev επίσης παρατηρούμε την αύξηση της  $F_z$  avg με την αύξηση της πρόωσης με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι η  $F_z$  avg επηρεάζεται σημαντικά από την πρόωση σχεδόν γραμμικά.

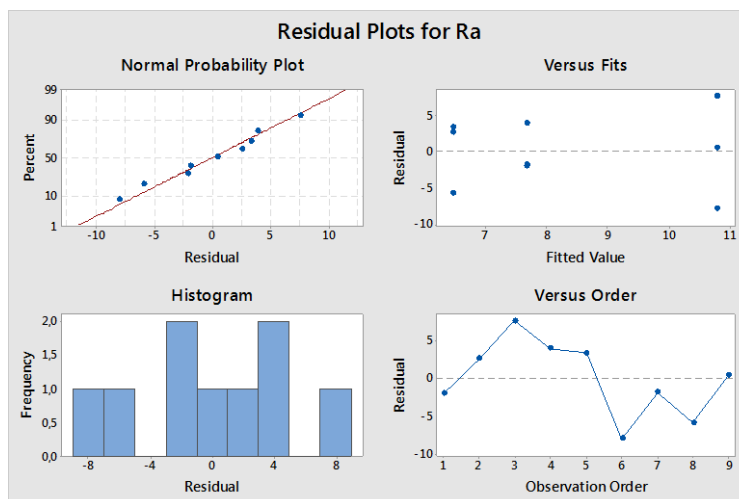
### Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	39,80	17,52%	39,80	19,90	1,35	0,426
Depth of cut	2	30,04	13,22%	30,04	15,02	1,02	0,496
Feed rate	2	127,74	56,24%	127,74	63,87	4,32	0,188
Error	2	29,56	13,01%	29,56	14,78		
Total	8	227,13	100,00%				

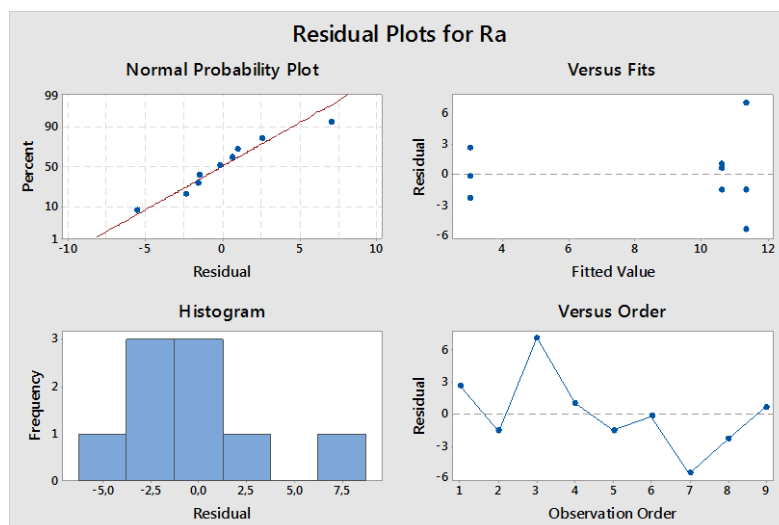
**Πίνακας 9.37** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$



*Σχήμα 9.84 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra*



*Σχήμα 9.85 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra*

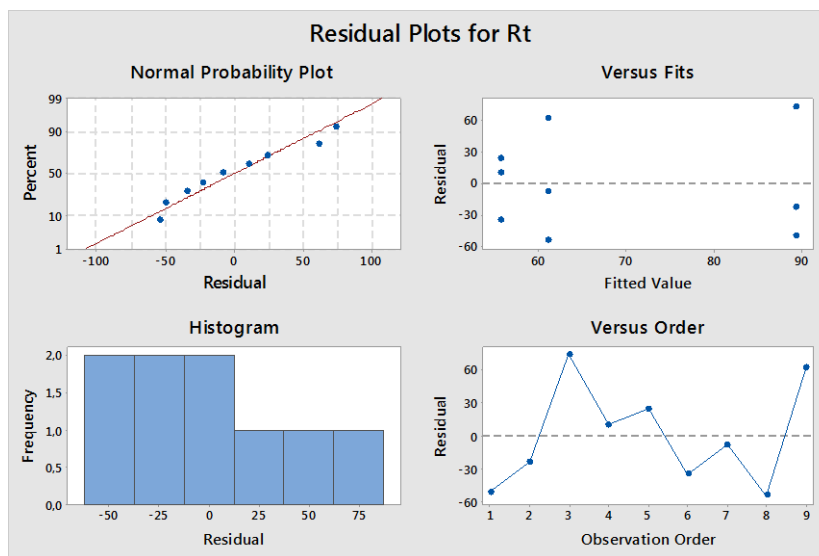


*Σχήμα 9.86 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra*

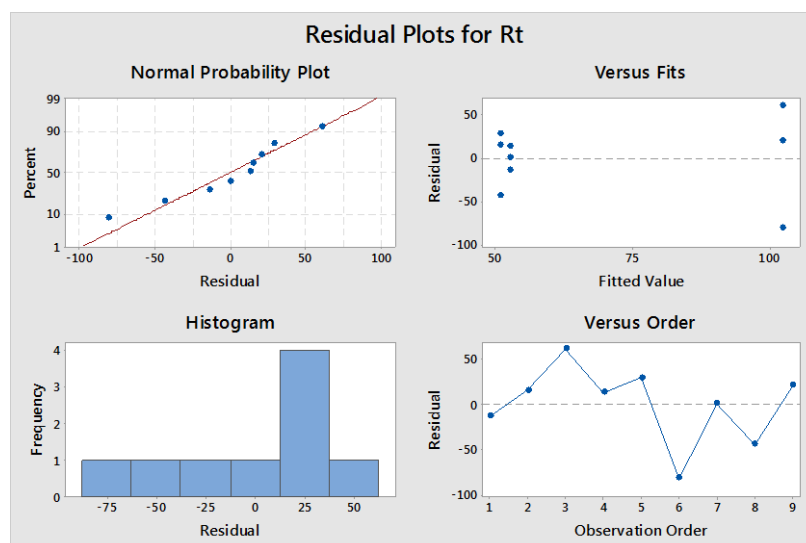


Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	1965	10,24%	1965	982,3	0,90	0,526
Depth of cut	2	5105	26,60%	5105	2552,3	2,34	0,300
Feed rate	2	9941	51,79%	9941	4970,3	4,55	0,180
Error	2	2184	11,38%	2184	1092,0		
Total	8	19194	100,00%				

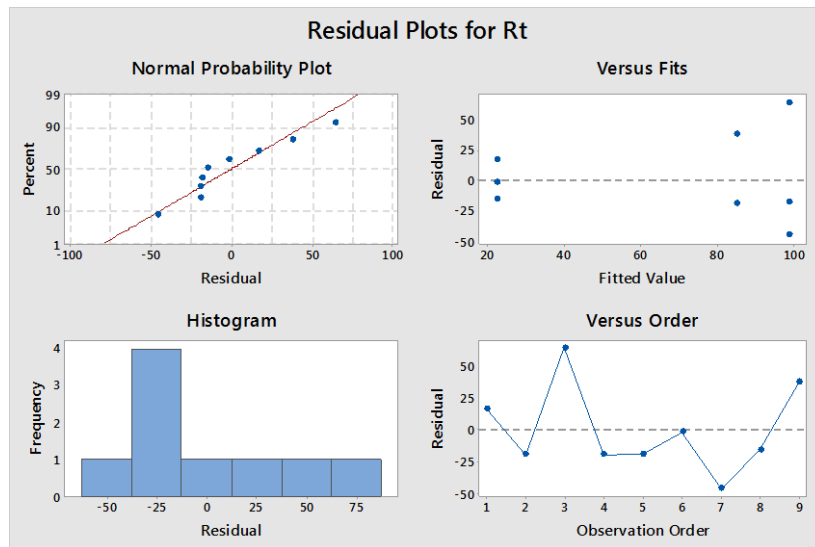
**Πίνακας 9.38** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



**Σχήμα 9.87** Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



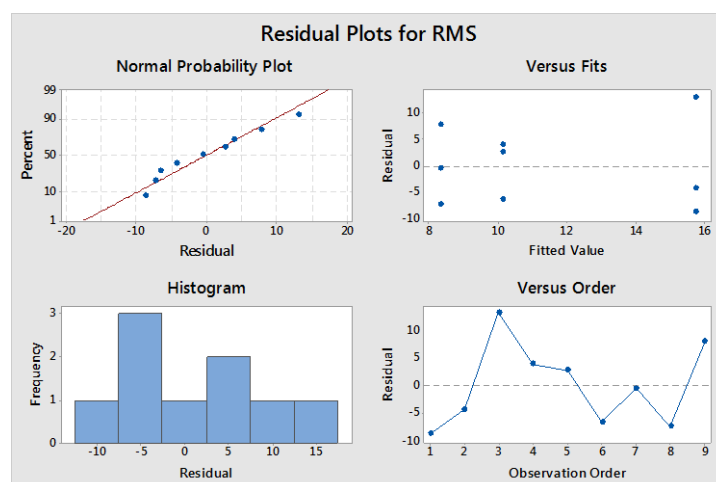
**Σχήμα 9.88** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



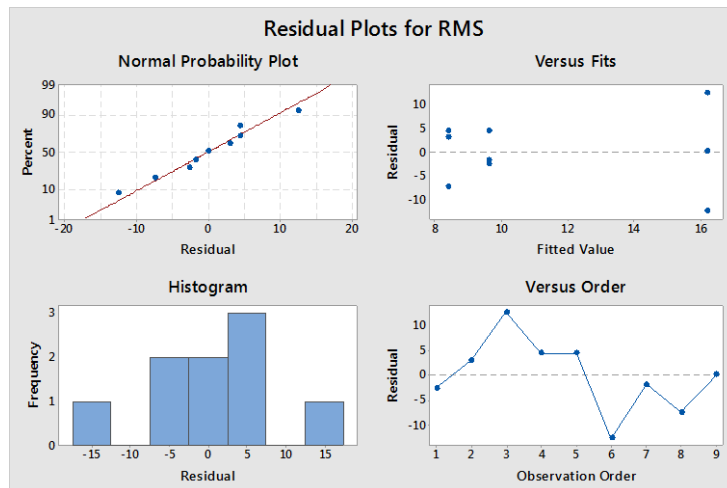
**Σχήμα 9.89** Διαγραμμάτα διασποράς της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	89,36	16,68%	89,36	44,68	1,19	0,457
Depth of cut	2	105,84	19,75%	105,84	52,92	1,41	0,415
Feed rate	2	265,52	49,55%	265,52	132,76	3,53	0,221
Error	2	75,12	14,02%	75,12	37,56		
Total	8	535,84	100,00%				

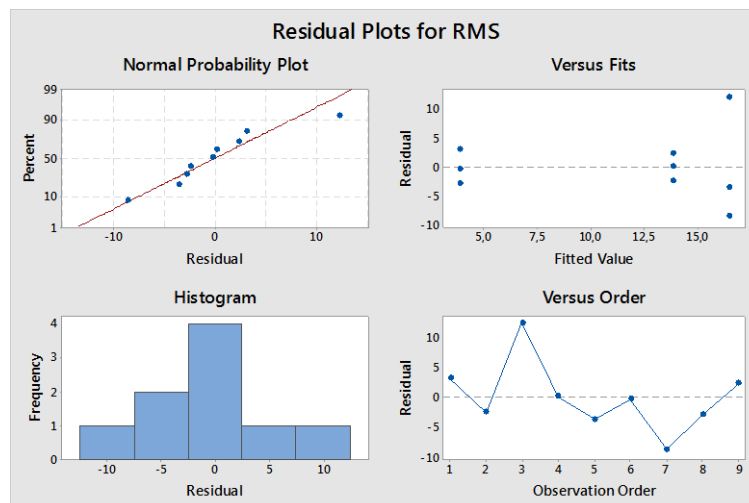
**Πίνακας 9.39** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$



**Σχήμα 9.90** Διαγραμμάτα διασποράς της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$



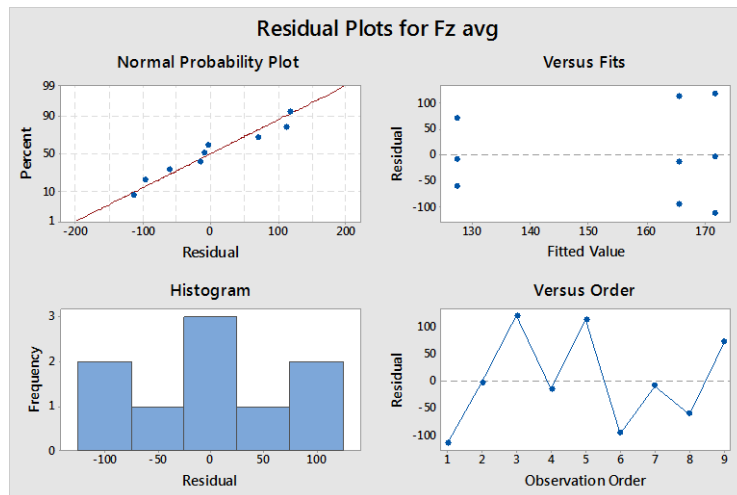
**Σχήμα 9.91** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS



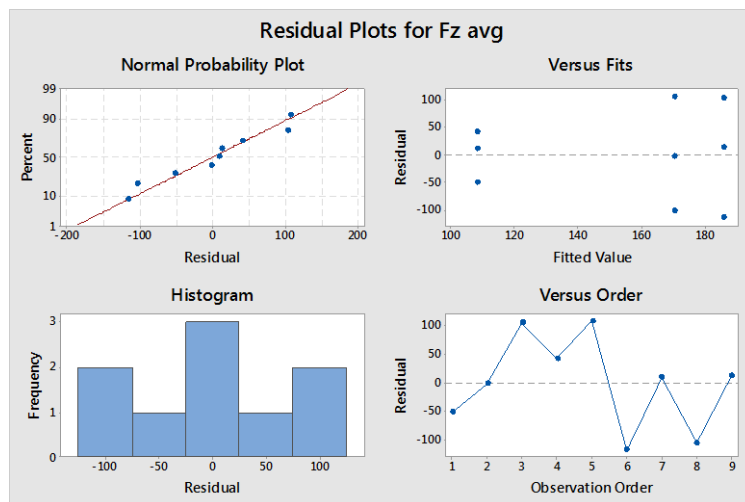
**Σχήμα 9.92** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	3460	5,62%	3460	1730	0,57	0,639
Depth of cut	2	10075	16,37%	10075	5038	1,65	0,378
Feed rate	2	41916	68,09%	41916	20958	6,86	0,127
Error	2	6112	9,93%	6112	3056		
Total	8	61564	100,00%				

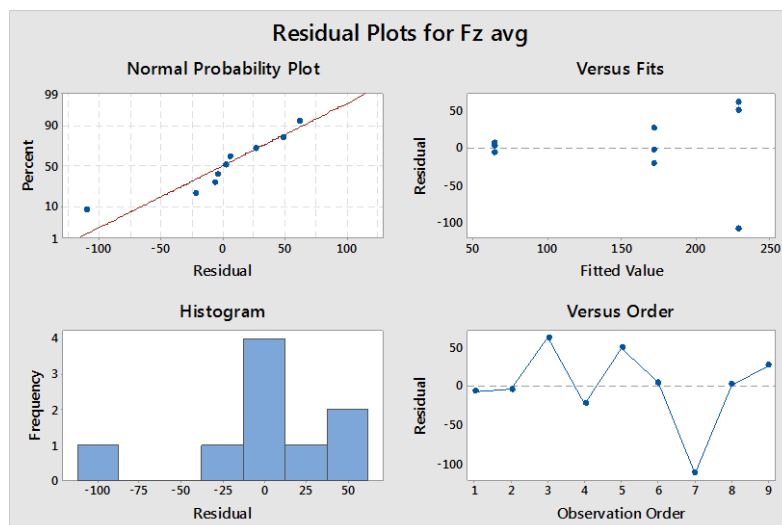
**Πίνακας 9.40** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



Σχήμα 9.93 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην Fz avg



Σχήμα 9.94 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην Fz avg



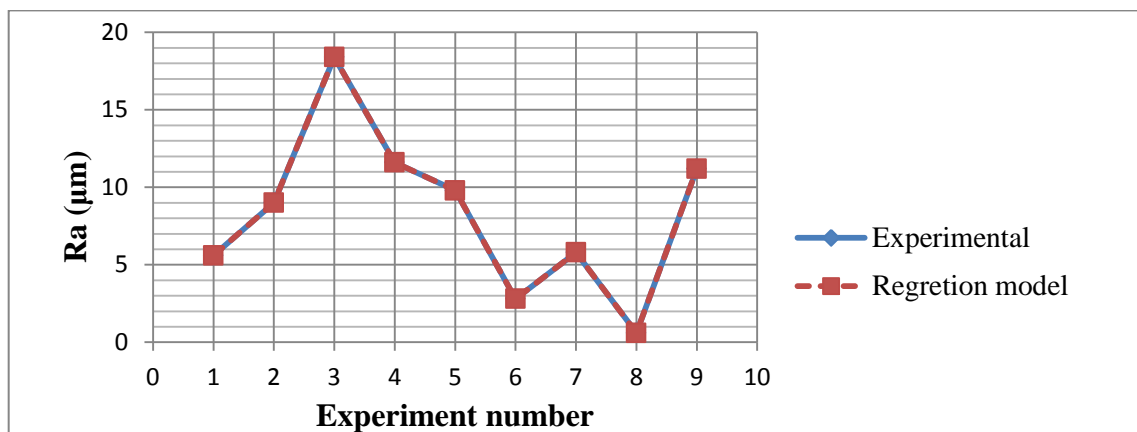
Σχήμα 9.95 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην Fz avg



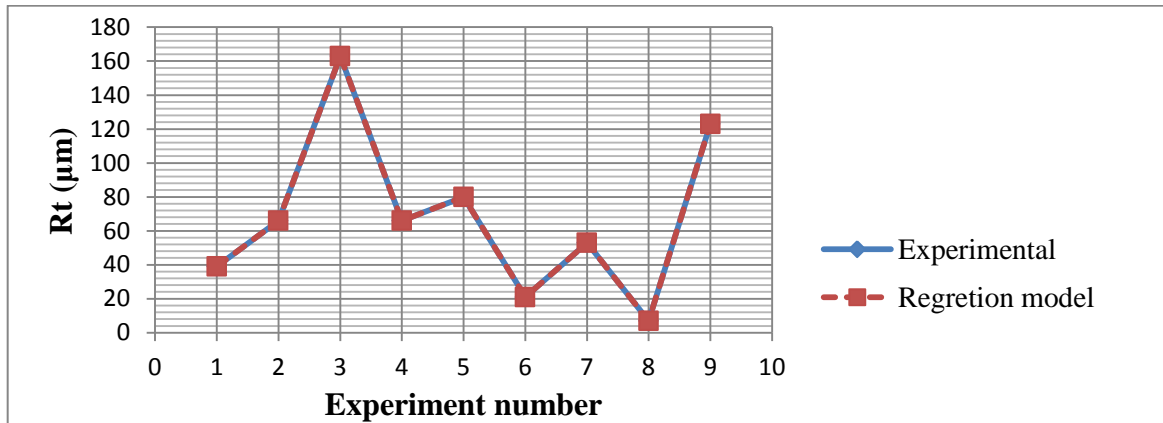
### Μοντέλα παλιδρόμησης (Regression Models)

Response	Regression model	R <sup>2</sup> (%)
Ra	$45,20 - 0,1700 \cdot v - 156,8 \cdot a_p + 264,0 \cdot f + 0,000407 \cdot v^2 + 78,93 \cdot a_p^2 - 193,3 \cdot f^2 - 0,4000 \cdot v \cdot a_p - 1,444 \cdot v \cdot f$	100
Rt	$580,0 - 5,639 \cdot v - 1393 \cdot a_p + 1812 \cdot f + 0,02167 \cdot v^2 + 680,0 \cdot a_p^2 - 750,0 \cdot f^2 + 4,533 \cdot v \cdot a_p - 10,67 \cdot v \cdot f$	100
RMS	$81,20 - 0,4767 \cdot v - 245,6 \cdot a_p + 355,0 \cdot f + 0,002111 \cdot v^2 + 128,0 \cdot a_p^2 - 150,0 \cdot f^2 + 0,5867 \cdot v \cdot a_p - 2,333 \cdot v \cdot f$	100
Fz avg	$81,00 - 0,1000 \cdot v - 696,0 \cdot a_p + 2475 \cdot f - 0,01778 \cdot v^2 + 26,67 \cdot a_p^2 + 383,3 \cdot f^2 + 7,889 \cdot v \cdot a_p - 16,78 \cdot v \cdot f$	100

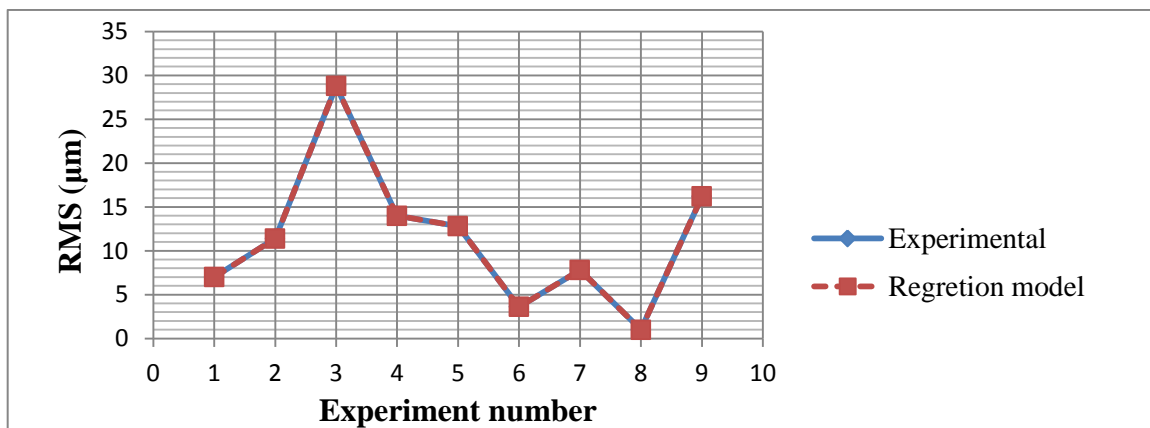
**Πίνακας 9.41** Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους



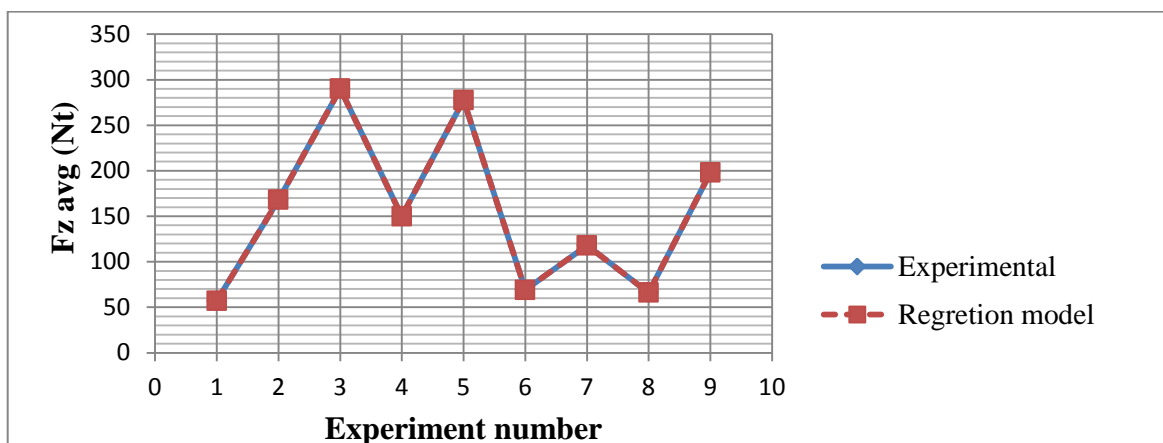
**Σχήμα 9.96** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας Ra



*Σχήμα 9.97 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$*



*Σχήμα 9.98 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$*



*Σχήμα 9.99 Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z \text{ avg}$ )*





Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	227,129	100,00%	227,129	28,3911	*	*
Cutting speed	1	39,527	17,40%	1,139	1,1391	*	*
Depth of cut	1	14,727	6,48%	39,067	39,0671	*	*
Feed rate	1	104,167	45,86%	55,023	55,0232	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	0,269	0,12%	0,269	0,2689	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	15,309	6,74%	36,507	36,5067	*	*
Feed rate*Feed rate	1	23,576	10,38%	5,607	5,6067	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	1,389	0,61%	13,500	13,5000	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	28,167	12,40%	28,167	28,1667	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	227,129	100,00%				

**Πίνακας 9.42** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	19194,0	100,00%	19194,0	2399,25	*	*
Cutting speed	1	1204,2	6,27%	1253,3	1253,32	*	*
Depth of cut	1	3700,2	19,28%	3081,9	3081,87	*	*
Feed rate	1	8740,2	45,54%	2591,2	2591,16	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	760,5	3,96%	760,5	760,50	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	1404,5	7,32%	2709,4	2709,38	*	*
Feed rate*Feed rate	1	1200,5	6,25%	84,4	84,37	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	648,0	3,38%	1734,0	1734,00	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	1536,0	8,00%	1536,0	1536,00	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	19194,0	100,00%				

**Πίνακας 9.43** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	535,840	100,00%	535,840	66,980	*	*
Cutting speed	1	82,140	15,33%	8,956	8,956	*	*
Depth of cut	1	65,340	12,19%	95,846	95,846	*	*
Feed rate	1	238,140	44,44%	99,493	99,493	*	*



Cutting speed*Cutting speed	1	7,220	1,35%	7,220	7,220	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	40,500	7,56%	96,000	96,000	*	*
Feed rate*Feed rate	1	27,380	5,11%	3,375	3,375	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	1,620	0,30%	29,040	29,040	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	73,500	13,72%	73,500	73,500	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	535,840	100,00%				

**Πίνακας 9.44** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας *RMS*

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	61564,0	100,00%	61564,0	7695,50	*	*
Cutting speed	1	2948,2	4,79%	0,4	0,39	*	*
Depth of cut	1	8970,7	14,57%	769,7	769,73	*	*
Feed rate	1	40590,4	65,93%	4836,0	4836,02	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	512,0	0,83%	512,0	512,00	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	1104,5	1,79%	4,2	4,17	*	*
Feed rate*Feed rate	1	1326,1	2,15%	22,0	22,04	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	2312,0	3,76%	5251,0	5251,04	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	3800,2	6,17%	3800,2	3800,17	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	61564,0	100,00%				

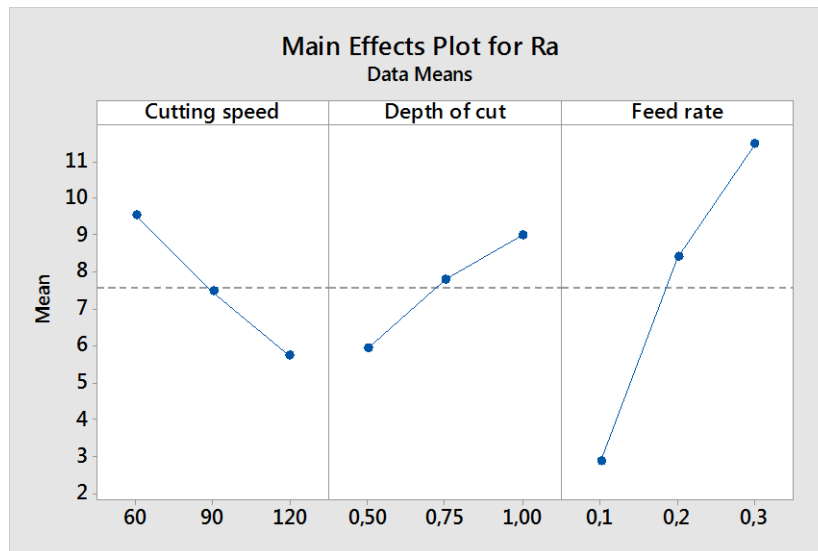
**Πίνακας 9.45** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (*Fz avg*)

Στο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης παρατηρούμε ότι σε όλους τους παράγοντες που μελετάμε την σημαντικότερη επίδραση στις εξισώσεις πρόβλεψης ασκεί η πρόωση. Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα ποσοστά επίδρασης των παραμέτρων. Επίσης το ποσοστό επιτυχίας όλων των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης είναι 100%.

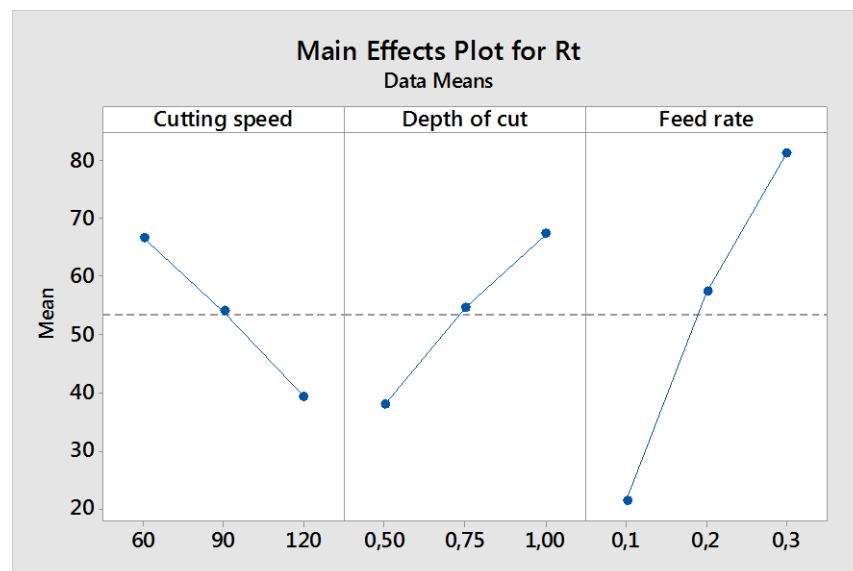


## 9.2.6. Αλουμίνιο με περιεκτικότητα Gr 0,50% (Al – Gr 0,50%)

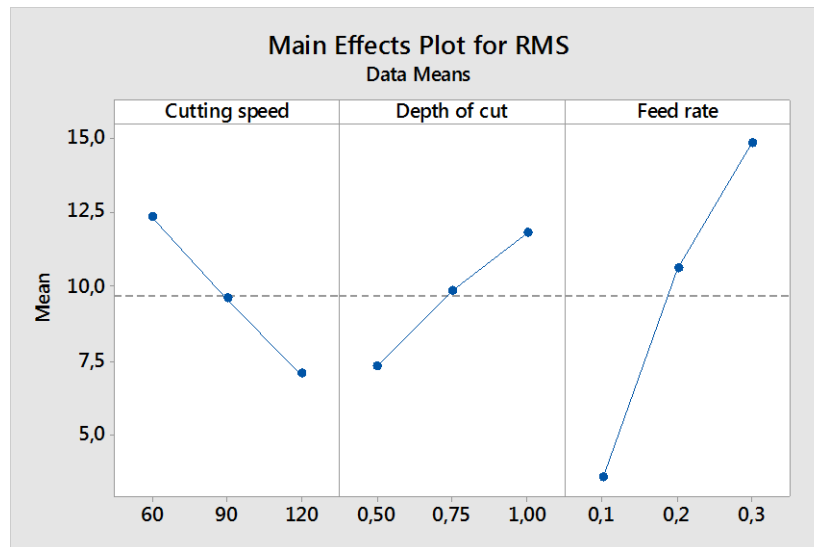
### Αποτελέσματα Taguchi (Taguchi results)



Σχήμα 9.100 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra.

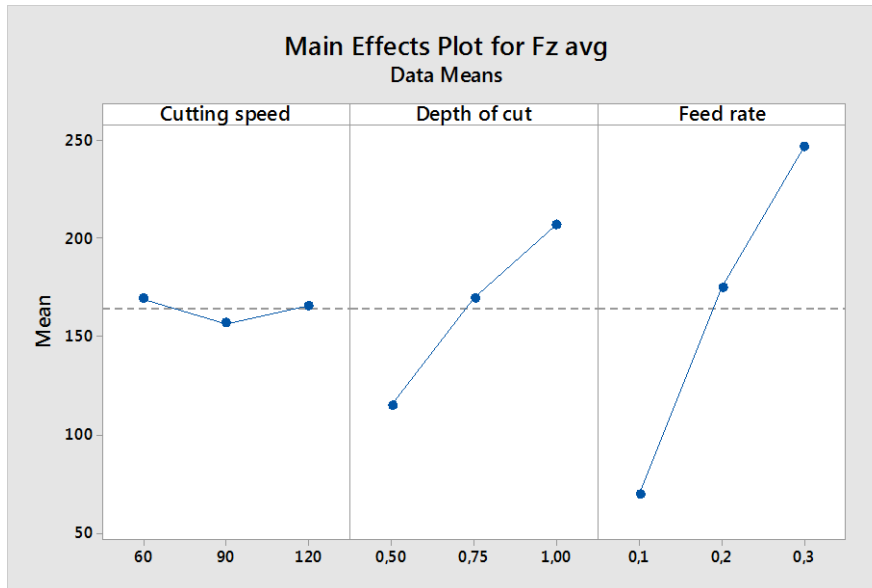


Σχήμα 9.101 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Rt.



**Σχήμα 9.102** Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS

Για τις παράμετρους της τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_t$  και RMS όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μείωση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και RMS άρα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε μείωση με τον ίδιο ρυθμό επίσης παρατηρούμε μια γραμμική μείωση όλων των τραχυτήτων όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η κατεργαζόμενη επιφάνεια βελτιώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm σημαντική αύξηση των τραχυτήτων  $R_a$ ,  $R_t$  και RMS όπου συνεχίζεται σχεδόν γραμμικά και στην περιοχή από 0,75mm έως 1,00mm έτσι συμπεραίνουμε ότι οι τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και RMS αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του βάθους κοπής. Στην πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό τις τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και RMS όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev δηλαδή την χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev οι τραχύτητες  $R_a$ ,  $R_t$  και RMS αυξήθηκαν με λίγο πιο αργό ρυθμό αλλά σχεδόν γραμμικά άρα συμπεραίνουμε ότι έχουμε μια περαιτέρω χειροτέρευση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με αύξηση της πρόωσης.



*Σχήμα 9.103 Επίδραση της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg)*

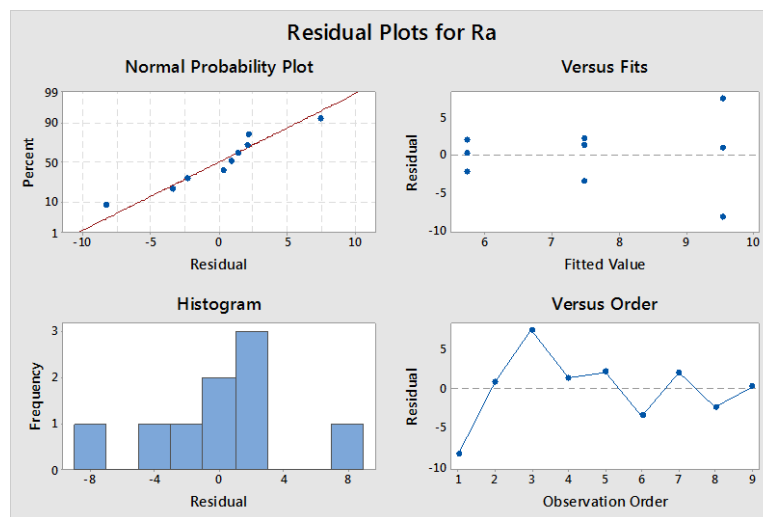
Για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (Fz avg) όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής από 60m/min έως 90m/min παρατηρούμε μικρή μείωση της Fz avg. Για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής από 90m/min έως 120m/min παρατηρούμε πολύ μικρή αύξηση της Fz avg όπου εύκολα συμπεραίνουμε ότι η Fz max επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από την ταχύτητα κοπής. Για το βάθος κοπής παρατηρούμε από 0,50mm έως 0,75mm αύξηση της Fz avg όπως και από 0,75mm έως 1,00mm παρατηρούμε αύξηση της Fz avg όπου σχεδόν έχουμε μια γραμμικότητα ανάμεσα στο βάθος κοπής και την Fz avg. Η πρόωση παρατηρούμε ότι επηρεάζει σημαντικά και με γρήγορο ρυθμό την αύξηση της Fz avg όταν αυξάνεται από 0,1mm/rev έως 0,2mm/rev. Από 0,2mm/rev έως 0,3mm/rev επίσης παρατηρούμε την αύξηση της Fz avg με την αύξηση της πρόωσης με λίγο πιο αργό ρυθμό άρα συμπεραίνουμε ότι η Fz avg επηρεάζεται σημαντικά από την πρόωση σχεδόν γραμμικά.



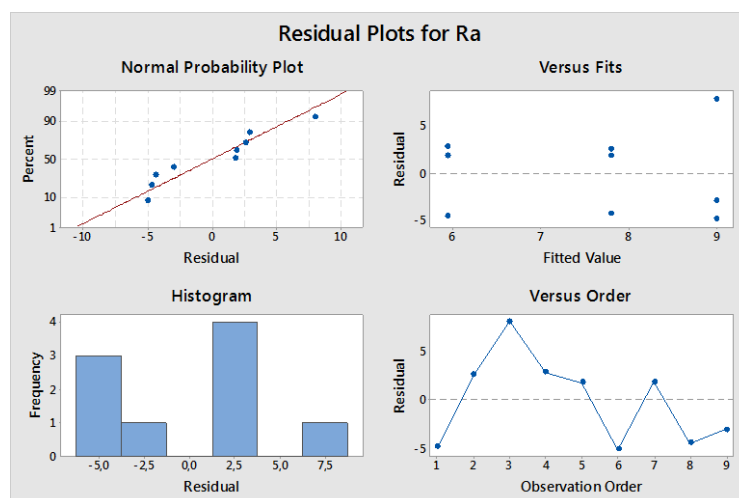
### Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	21,72	12,35%	21,72	10,858	0,84	0,543
Depth of cut	2	14,33	8,15%	14,33	7,164	0,56	0,643
Feed rate	2	113,98	64,84%	113,98	56,991	4,42	0,184
Error	2	25,77	14,66%	25,77	12,884		
Total	8	175,80	100,00%				

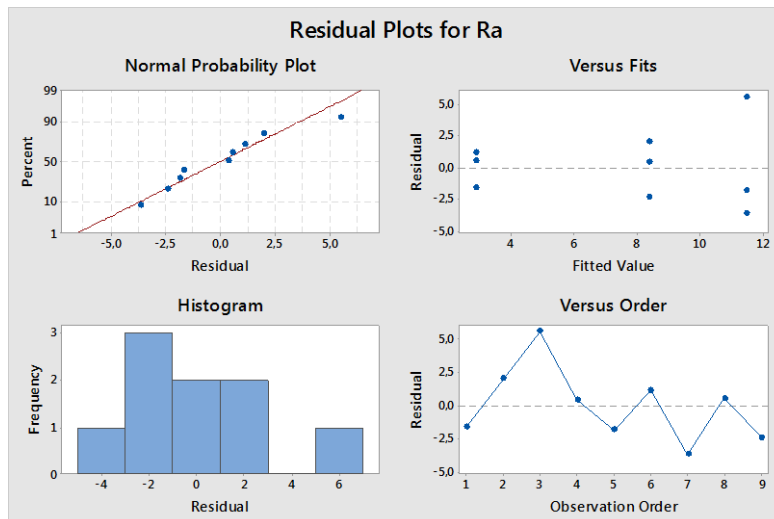
*Πίνακας 9.46* Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



*Σχήμα 9.104* Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



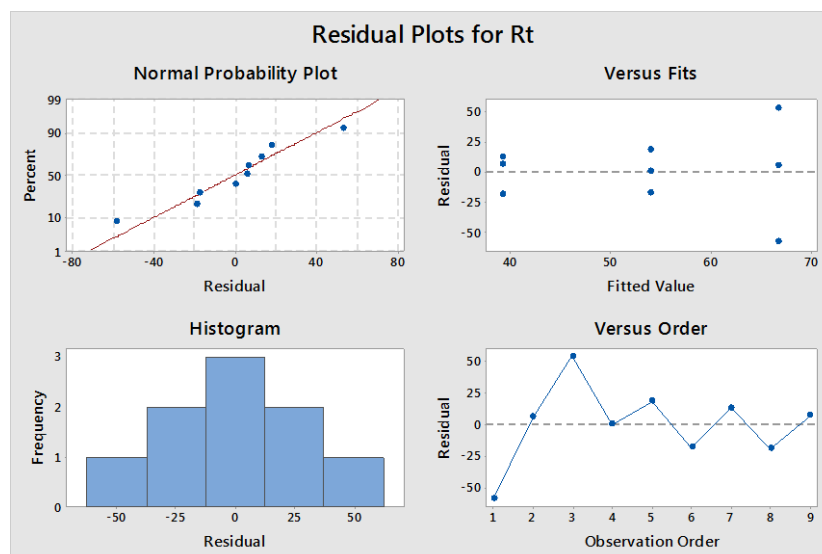
*Σχήμα 9.105* Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας Ra



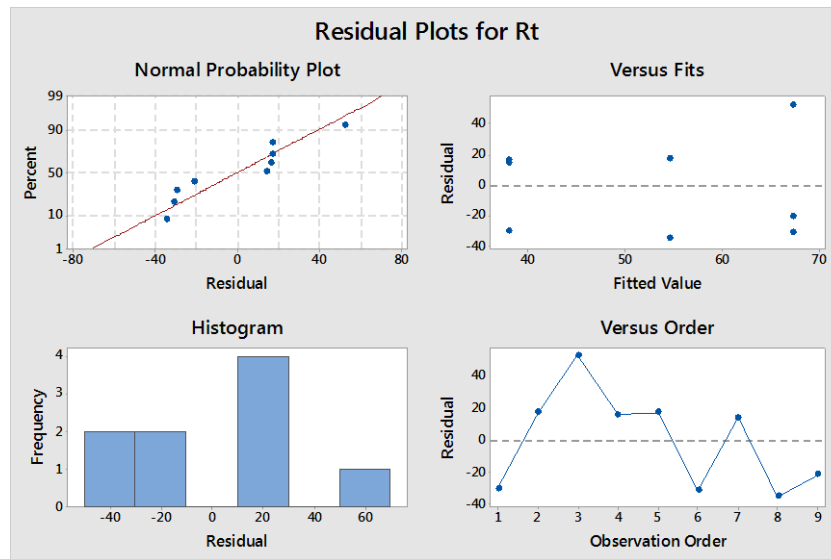
**Σχήμα 9.106** Διαγράμματα διασποράς της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	1122,7	12,96%	1122,7	561,3	1,46	0,407
Depth of cut	2	1298,7	14,99%	1298,7	649,3	1,69	0,372
Feed rate	2	5472,0	63,16%	5472,0	2736,0	7,10	0,123
Error	2	770,7	8,90%	770,7	385,3		
Total	8	8664,0	100,00%				

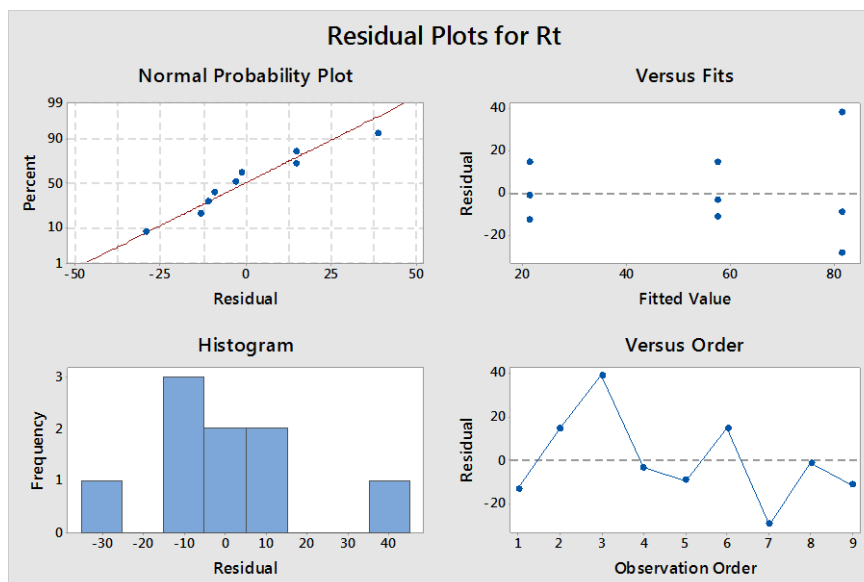
**Πίνακας 9.47** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



**Σχήμα 9.107** Διαγράμματα διασποράς της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$



**Σχήμα 9.108** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

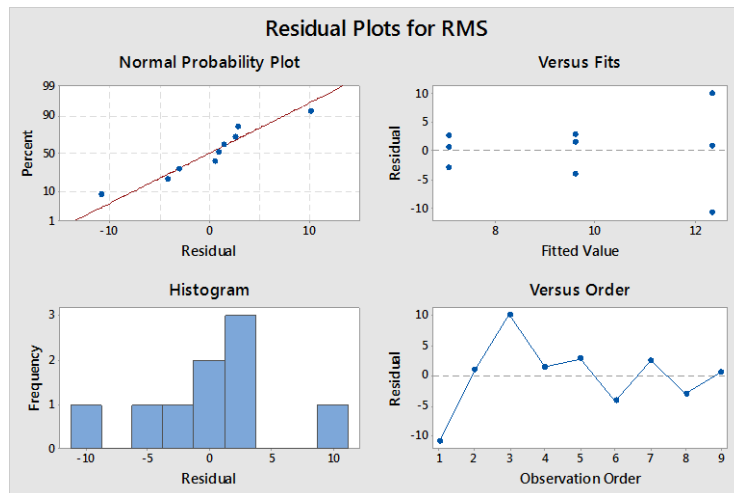


**Σχήμα 9.109** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

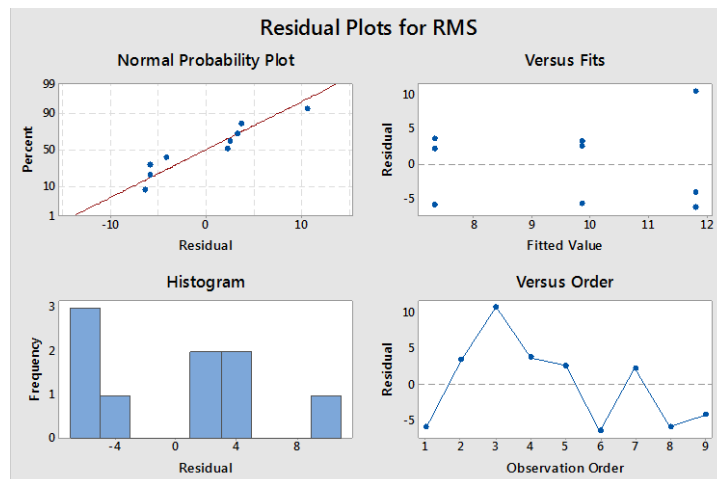
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	41,63	13,57%	41,63	20,81	0,97	0,508
Depth of cut	2	30,11	9,81%	30,11	15,05	0,70	0,588
Feed rate	2	192,08	62,61%	192,08	96,04	4,47	0,183
Error	2	42,99	14,01%	42,99	21,49		
Total	8	306,80	100,00%				

**Πίνακας 9.48** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

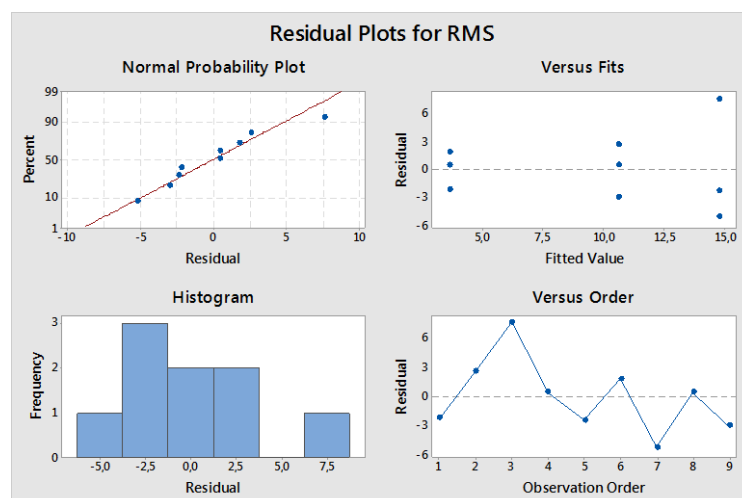




*Σχήμα 9.110 Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας  
RMS*



*Σχήμα 9.111 Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

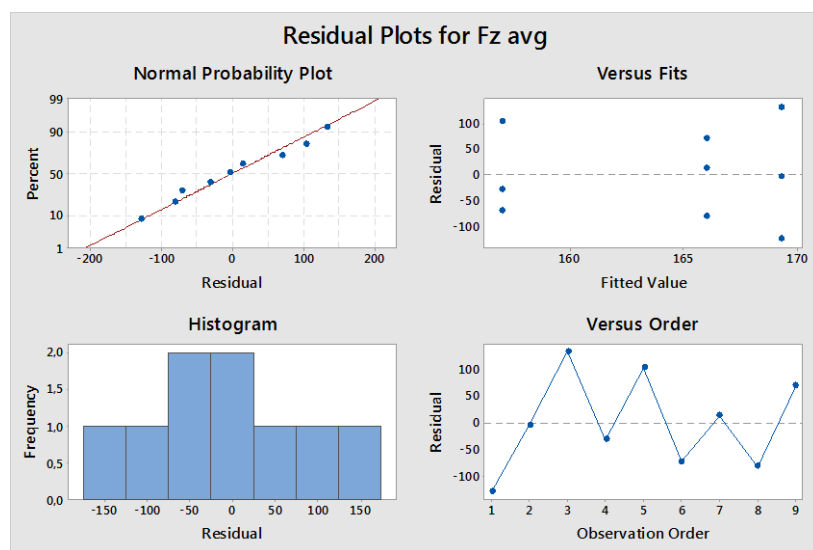


*Σχήμα 9.112 Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην παράμετρο της τραχύτητας RMS*

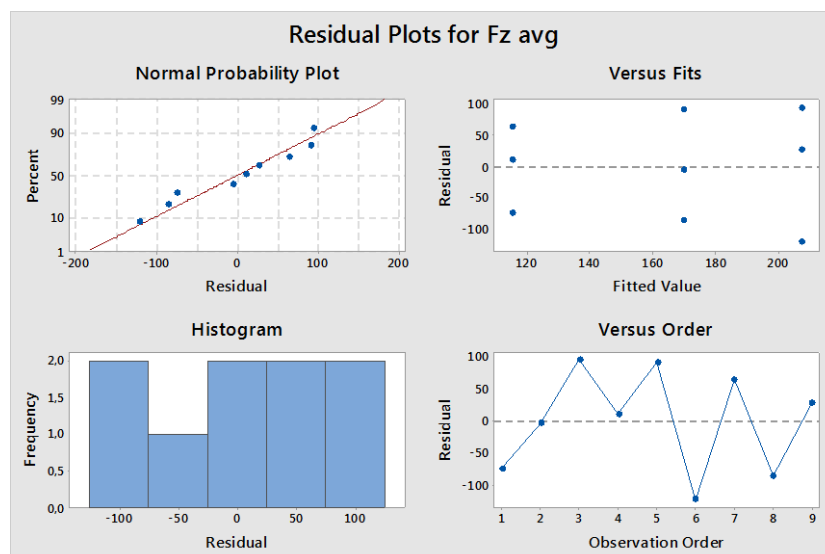


Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Cutting speed	2	244,2	0,39%	244,2	122,1	0,12	0,896
Depth of cut	2	12834,9	20,46%	12834,9	6417,4	6,11	0,141
Feed rate	2	47560,2	75,80%	47560,2	23780,1	22,63	0,042
Error	2	2101,6	3,35%	2101,6	1050,8		
Total	8	62740,9	100,00%				

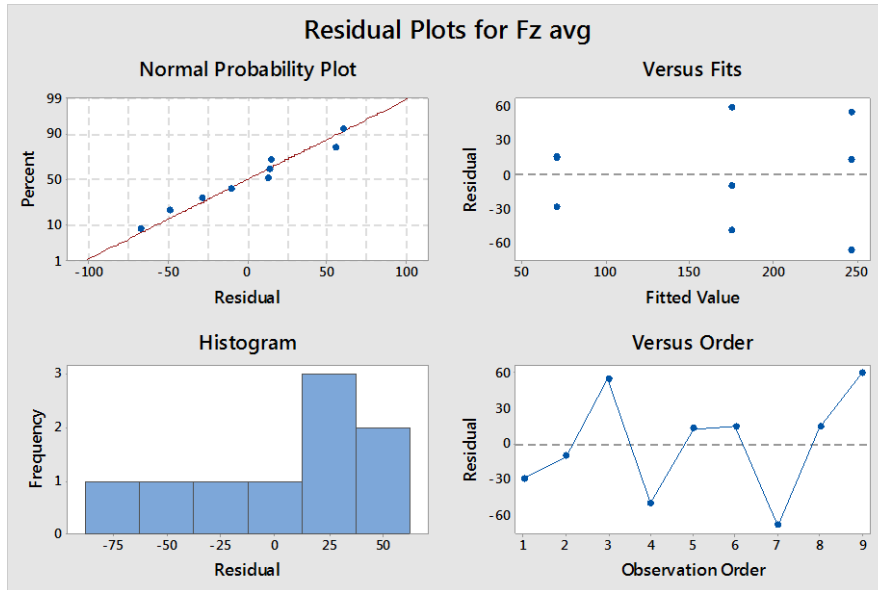
**Πίνακας 9.49** Ανάλυση διακύμανσης που αφορά την παράμετρο της ταχύτητας κοπής, του βάθους κοπής και της πρόωσης στην μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)



**Σχήμα 9.113** Διαγράμματα διασπορας της ταχύτητας κοπής στην  $F_z$  avg



**Σχήμα 9.114** Διαγράμματα διασπορας του βάθους κοπής στην  $F_z$  avg

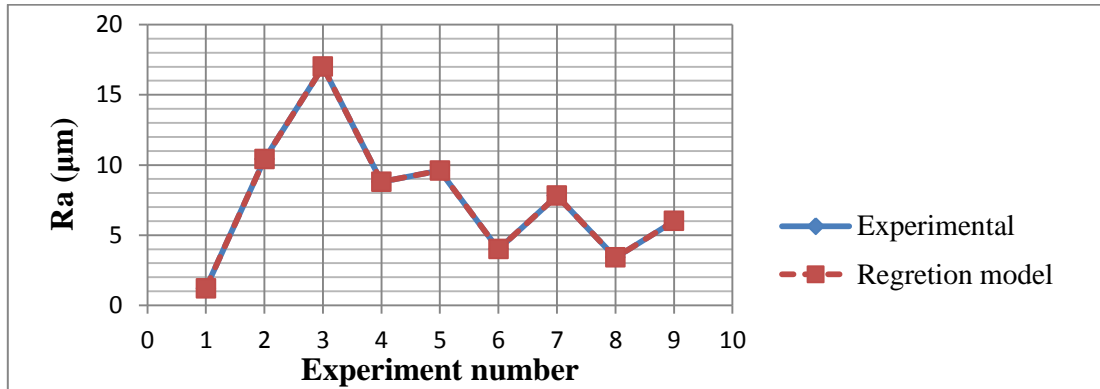


**Σχήμα 9.115** Διαγράμματα διασπορας της πρόωσης στην Fz avg

**Μοντέλα παλιδρόμησης (Regression Models)**

Response	Regression model	R <sup>2</sup> (%)
Ra	$23,60 + 0,2389 \cdot v + 3,067 \cdot a_p + 189,3 \cdot f + 0,000185 \cdot v^2 + 13,33 \cdot a_p^2 - 213,3 \cdot f^2 - 0,2400 \cdot v \cdot a_p - 0,7778 \cdot v \cdot f$	100
Rt	$-168,0 + 1,633 \cdot v + 84,00 \cdot a_p + 1050 \cdot f - 0,001111 \cdot v^2 + 58,67 \cdot a_p^2 - 1167 \cdot f^2 - 1,511 \cdot v \cdot a_p - 3,778 \cdot v \cdot f$	100
RMS	$-29,60 + 0,3233 \cdot v + 0,4000 \cdot a_p + 238,0 \cdot f + 0,000111 \cdot v^2 + 19,73 \cdot a_p^2 - 253,3 \cdot f^2 - 0,3022 \cdot v \cdot a_p - 1,022 \cdot v \cdot f$	100
Fz avg	$153,0 - 3,911 \cdot v - 431,3 \cdot a_p + 1853 \cdot f + 0,01185 \cdot v^2 + 88,00 \cdot a_p^2 + 100,0 \cdot f^2 + 4,756 \cdot v \cdot a_p - 9,222 \cdot v \cdot f$	100

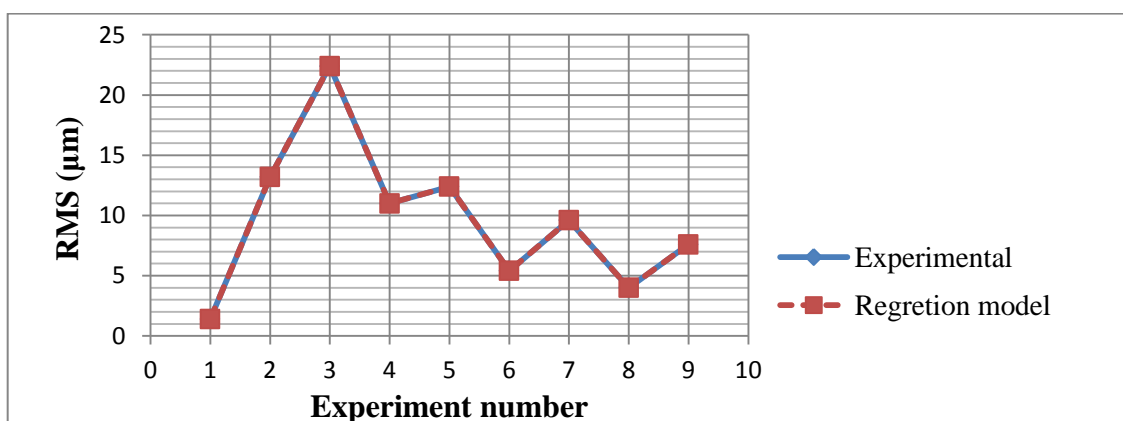
**Πίνακας 9.53** Συγκεντρωτικός πίνακας των εξισώσεων μοντέλου πρόβλεψης και το ποσοστό επιτυχίας τους



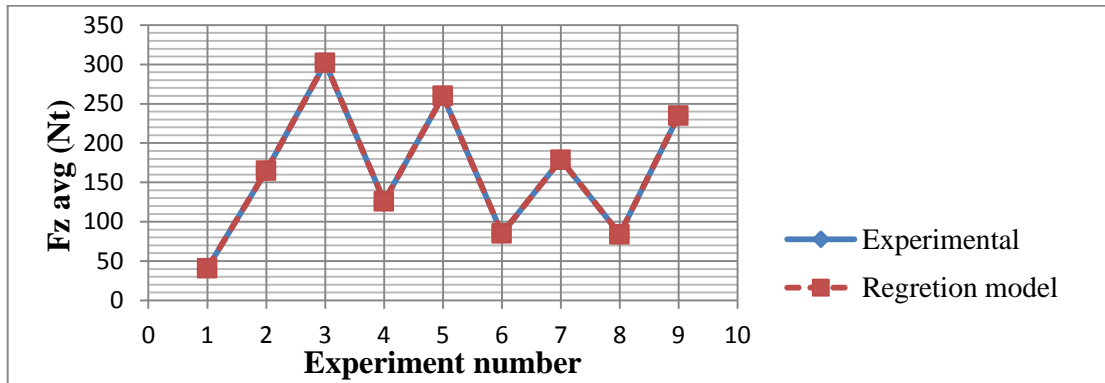
*Σχήμα 9.116* Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $Ra$



*Σχήμα 9.117* Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $Rt$



*Σχήμα 9.118* Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντελο πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$



**Σχήμα 9.119** Διαγράμμα πειράματος με το θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης για την μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z$  avg)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	175,796	100,00%	175,796	21,9744	*	*
Cutting speed	1	21,660	12,32%	2,249	2,2494	*	*
Depth of cut	1	14,107	8,02%	0,015	0,0149	*	*
Feed rate	1	110,940	63,11%	28,300	28,3004	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	0,056	0,03%	0,056	0,0556	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	0,222	0,13%	1,042	1,0417	*	*
Feed rate*Feed rate	1	3,042	1,73%	6,827	6,8267	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	17,602	10,01%	4,860	4,8600	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	8,167	4,65%	8,167	8,1667	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	175,796	100,00%				

**Πίνακας 9.49** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	8664,00	100,00%	8664,00	1083,00	*	*
Cutting speed	1	1120,67	12,93%	105,15	105,15	*	*
Depth of cut	1	1290,67	14,90%	11,21	11,21	*	*
Feed rate	1	5400,00	62,33%	870,39	870,39	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	2,00	0,02%	2,00	2,00	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	8,00	0,09%	20,17	20,17	*	*
Feed rate*Feed rate	1	72,00	0,83%	204,17	204,17	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	578,00	6,67%	192,67	192,67	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	192,67	2,22%	192,67	192,67	*	*



Error	0	0,00	0,00%	0,00	*
Total	8	8664,00	100,00%		

**Πίνακας 9.50** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	306,800	100,00%	306,800	38,3500	*	*
Cutting speed	1	41,607	13,56%	4,121	4,1207	*	*
Depth of cut	1	29,927	9,75%	0,000	0,0003	*	*
Feed rate	1	188,160	61,33%	44,719	44,7189	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	0,020	0,01%	0,020	0,0200	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	0,180	0,06%	2,282	2,2817	*	*
Feed rate*Feed rate	1	3,920	1,28%	9,627	9,6267	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	28,880	9,41%	7,707	7,7067	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	14,107	4,60%	14,107	14,1067	*	*
Error	0	0,000	0,00%	0,000	*		
Total	8	306,800	100,00%				

**Πίνακας 9.51** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την παράμετρο της τραχύτητας  $RMS$

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	62740,9	100,00%	62740,9	7842,61	*	*
Cutting speed	1	16,7	0,03%	602,9	602,94	*	*
Depth of cut	1	12696,0	20,24%	295,6	295,63	*	*
Feed rate	1	46993,5	74,90%	2711,7	2711,72	*	*
Cutting speed*Cutting speed	1	227,6	0,36%	227,6	227,56	*	*
Depth of cut*Depth of cut	1	138,9	0,22%	45,4	45,37	*	*
Feed rate*Feed rate	1	566,7	0,90%	1,5	1,50	*	*
Cutting speed*Depth of cut	1	953,4	1,52%	1908,2	1908,17	*	*
Cutting speed*Feed rate	1	1148,2	1,83%	1148,2	1148,17	*	*
Error	0	0,0	0,00%	0,0	*		
Total	8	62740,9	100,00%				

**Πίνακας 9.52** Πίνακας ποσοστών επίδρασης στην εξίσωση μοντέλου πρόβλεψης για την μέγιστη κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ( $F_z \max$ )



Στο θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης παρατηρούμε ότι σε όλους τους παράγοντες που μελετάμε την σημαντικότερη επίδραση στις εξισώσεις πρόβλεψης ασκεί η πρόωση. Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα ποσοστά επίδρασης των παραμέτρων. Επίσης το ποσοστό επιτυχίας όλων των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης είναι 100%.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ‘Αργίλιο’, viewed 18 March 2018, <<https://el.wikipedia.org/wiki/Αργίλιο>>
- [2] ‘Οξείδιο του αργιλίου (αλουμίνα) Aluminium oxide (alumina)’, viewed 18 March 2018, <[http://195.134.76.37/chemicals/chem\\_Al2O3.htm](http://195.134.76.37/chemicals/chem_Al2O3.htm)>
- [3] Kvande H, 2011, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Elsevier, pp. 46-69.
- [4] ‘Aluminium scrap’, viewed 18 March 2018, <<http://recycling.worldaluminium.org/resources/materials.html>>
- [5] ASM International Handbook Committee, 1990, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM international, pp. 164-177.
- [6] Χρυσουλάκης Δ. Γιάννης, Παντελής Ι. Δημήτρης, 2008, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [7] Μάμαλης Γ. Αθανάσιος, 1996, *Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Υλικά*, Φοίβος, Αθήνα.
- [8] Kaufman Gilbert John, 1999, *Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep and Fatigue Data at High and Low Temperatures*, ASM International, pp. 107-108.
- [9] Mandal R. N, 2001, *Aluminum Welding*, Woodhead Publishing, pp. 14-15.
- [10] ‘7075 Alloy’, viewed 22 March 2018, <[http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/01\\_applications.asp?AlloyID=28](http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/01_applications.asp?AlloyID=28)>
- [11] ‘8xxx Series Alloys’, viewed 21 March 2018, <<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417087>>
- [12] ‘Τα κράματα του αλουμινίου’, viewed 23 March 2018, <<http://docplayer.gr/1610105-4-ta-kramata-toy-aloyminiouy.html>>





- [13] ‘Aluminium alloys’, The Aluminum Association, Inc, viewed 23 March 2018, <<http://www.aluminum.org/>>
- [14] ‘Άνθρακας’, viewed 28 March 2018, <<https://el.wikipedia.org/wiki/Άνθρακας>>
- [15] ‘Allotropes\_of\_carbon’, viewed 28 March 2018, <[http://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes\\_of\\_carbon](http://en.wikipedia.org/wiki/Allotropes_of_carbon)>
- [16] Landau L. D and Lifshitz E. M, 1980, *Statistical Physics, Part I*, Pergamon Press, Oxford.
- [17] Mermin N. D, 1968, *Crystalline order in two dimensions*, Phys. Rev, pp. 250-254.
- [18] Geim A. K and Novoselov K. S, 2007, *The rise of grapheme*, Nature Materials, pp. 183-191
- [19] Novoselov K. S, 2004, *Electric field effect in atomically thin carbon films*, Science, pp. 666-669.
- [20] Βισκαδούρος Γ, 2011, *Ανάπτυξη καινοτόμων οπτοηλεκτρονικών διατάξεων πολυμερούς-νανοδομών για εφαρμογές σε οργανικά φωτοβολταϊκά και εκπομπή πεδίου*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [21] Novoselov K.S, 2004, *Two dimensional atomic crystal*, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, pp. 10451-10453.
- [22] Forbeaux I, Themlin J, Debever J. M, 1998, *Heteroepitaxial graphite on 6H-SiC (0001): Interface formation through conduction band electronic structure*, Phys. Rev, pp. 16396-16406.
- [23] Berger C, 2004, *Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene based nanoelectronics*, Phys. Chem, pp. 19912-19916.
- [24] Nagashima A, 1993, *Electronic states of monolayer graphite formed on TiC (111) surface*, Surf. Sci, pp. 93-98.



- [25] Zhang Y, Tau J. W, Stormer H. L, Kim P, 2005, *Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in grapheme*, Nature 438, pp. 201-204.
- [26] Chen J. H, 2008, *Intrinsic and Extrinsic Performance Limits of Graphene devices on SiO<sub>2</sub>*, Nature nanotechnology, pp. 206-209.
- [27] Avouris P, Chen Z, and Perebeinos V, 2007, *Carbon based electronics*, Nature Nanotechnology, pp. 605-615.
- [28] Kuzmenko A. B, Van Heumen E, Carbone F, Vander Marel D, 2008, *Universal infrared conductance of graphite*, Physical Review Letters.
- [29] Zhang H, 2012, *Z-scan measurement of the nonlinear refractive index of graphene*, Optics Letters, pp. 1856-1858.
- [30] Balandin A. A, 2008, *Superior Thermal Conductivity of Single layer Graphene*. Nano Letters ASAP 8 (3), pp. 902-907.
- [31] Shaushan Chen, Qingzhi Wu, Columbia Mishra, Junyong Kang, Hengji Zhang, Kyeongjae Cho, Weiwei Cai, Balandin A. Alexander, 2012, *Thermal conductivity of isotopically modified graphene*, Nature materials, pp. 203.
- [32] Changuu Lee, 2008, *Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene*, Science 321, pp. 385.
- [33] 'Graphene', viewed 30 March 2018, < <https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene>>
- [34] Wang K, Wang Y, Fan Z, Yan J, Wei T, 2011, *Material Reserach Bulletin*, pp. 315.
- [35] Walker L.S, Marotto V.R, Rafiee M. A, Koratkar N, Corral E. L, 2011, *Toughening in Graphene Ceramic Composites*, ACS Nano, pp. 3182.
- [36] Kvetková L, Duszová A, Hvizdoš P, Dusza J, Kun P, Balázsi C, 2012, *Script Material*, pp. 66.
- [37] Liu J, Yan H, Reece M. J, Jiang K, Eur J, 2015, *Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets*, Progress in Natural Science:Materials



International, pp. 460-470.

[38] Sherif E. M, Almajid A. A, Latif F. H, Junaedi H, Int. J, 2011, *Electrochemical Science*, pp. 1085.

[31] Saxena M, Modi O. P, Yegneswaran H. A, Rohatgi K. P, 1987, *Corrosion Science*, pp. 249

[40] Yeh T. C, Huang T. C, Huang Y. H, Huang P. Y, Cai T. Y, Lin T. S, Wei Y, Yeh M. J, 2012, *Polymer Chemistry*, pp. 630-637.

[41] Πετρόπουλος Γ. Πέτρος, 1998, *Μηχανουργική Τεχνολογία-Τεχνολογία κατεργασιών κοπής των μετάλλων*, Εκδόσεις Ζήση, Θεσσαλονίκη.

[42] Σερδάρης Π, 2014, *Εκπόνηση εκπαιδευτικού λογισμικού στις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού*, Διπλωματική Εργασία, ΕΕΔΜ, Θεσσαλονίκη.

[43] Μανωλάκος Ε. Δ, 2011, *Κατεργασίες II Πρόχειρες σημειώσεις*, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

[44] Μπουζάκης Ε. Κ-Δ, 2010, *Μηχανική και τεχνολογία μηχανουργικών μορφοποιήσεων με αφαίρεση υλικού*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

[45] ‘Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού’, viewed 19 April 2018,  
<<http://docplayer.gr/2932103-Katergasies-me-afairesi-ylikoy.html>>

[46] Erdel P. Bert, 2003, *High-Speed Machining*, Society of Manufacturing Engineers.

[47] Davim J. Paulo, 2008, *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer.

[48] Μπουζάκης Ε. Κ-Δ, 2001, *Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

[49] Μπότσαρης Ν. Π, Σπάρης Δ. Π, 2008, *Στοιχεία Τεχνολογίας Παραγωγής*, Ξάνθη.

[50] Kalpakjan S, 1984, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison Wesley.



- [51] Ramaswami R, 1970, *The effect of the built- up- edge (bue) on the wear of cutting tools*, Elsevier Sequoia SA.
- [52] Choudhury A. I, El-Baradie A. M, 1998, *Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN)*, Journal of Materials Processing Technology, pp. 319-326.
- [53] ‘Τόννευση’, viewed 30 April 2018, <<http://static.eudoxus.gr/books/19/chapter-14419.pdf>>



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας G για πείραμα 1 έως 5

000301

G40 G18 G80 G90 G99 G56 G21 ;

S910 M03 T8 ;

G00 Z0.3 ;

G00 X10. ;

G01 X-1. F0.1 ;

G01 Z-26. F0.1 ;

G01 X-1.5 F0.1 ;

G01 Z-53. F0.2 ;

G01 X-2. F0.1 ;

G01 Z-79. F0.3 ;

G01 X-1. F0.1 ;

G01 Z-106. F0.2 ;

G01 X-1.5 F0.1 ;

G01 Z-132. F0.3 ;

G00 X50. ;

M05 ;

M30 ;

Κώδικας G για πείραμα 6 έως 9

000301

G40 G18 G80 G90 G99 G56 G21 ;

S1365 M03 T8 ;

G00 Z0.3 ;

G00 X10. ;

G01 X-2. F0.1 ;



G01 Z-26. F0.1 ;

S1820 M03 ;

G01 X-1. F0.1 ;

G01 Z-53. F0.3 ;

G01 X-1.5 F0.1 ;

G01 Z-79. F0.1 ;

G01 X-2. F0.1 ;

G01 Z-106. F0.2 ;

G00 X50. ;

M05 ;

M30 ;