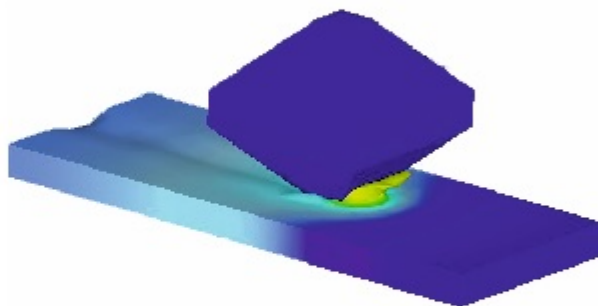




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

**ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



**ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΔΑΣΚΑΛΑΚΗΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Δρ. Μηχ. ΜΑΡΙΑ ΠΑΠΠΑ

ΑΡ. ΔΙΠΛ. : 54

ΧΑΝΙΑ 2016

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθήγητη κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, καθώς και την Δρ. Μηχ. Μαρία Παππά για την βοήθεια που μου πρόσφεραν, αλλά και για την υπομονή που έδειξαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την βοήθεια που μου έχει προσφέρει τόσα χρόνια, καθώς και τα παιδιά του εργαστηρίου για την βοήθεια και την παρέα που πρόσφεραν κατά την διάρκεια που βρισκόμουν στο εργαστήριο.

Περιεχόμενα.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	6
2.1 Προσομοίωση επιπέδου λειάνσεως.....	6
2.2 Εξισώσεις Kienzle	7
2.3 Φάσεις λείανσης.....	7
2.4 Υπολογισμοί δυνάμεων και συνιστωσών.....	8
2.5 Περιοχές μετρήσεως	9
2.6 Λείανση	12
2.6.1 Είδη λείανσης	13
2.6.2 Υλικό κόκκων	13
2.6.3 Συνδετικό υλικό	14
2.7 Πεπερασμένα στοιχεία	15
2.7.1 Μοντέλα προσομοίωσης Euler – Lagrange	15
2.7.2 Μέθοδος FEA και FDM.....	16
3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (COMSOL Multiphysics).....	19
3.1 Δημιουργία Μοντέλου.....	19
3.1.1 Geometry	20
3.1.2 Definitions	20
3.1.3 Materials	20
3.1.4 Solid Mechanics	20
3.1.5 Mesh	20
3.1.6 Study.....	21
3.1.7 Results	21
3.2 Δημιουργία προσομοιωτικού μοντέλου και επιβεβαίωση του μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων	21
3.3 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία	25
3.3.1 Προσομοίωση λείανσης εργαλείων μεταβλητής γεωμετρίας	25
3.3.2 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για διάφορους κόκκους εργαλείων.....	29
3.3.3 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για διάφορα υλικά στο τεμάχιο.....	33
4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Deform 3D).....	37
4.1 Δημιουργία Μοντέλου.....	37

4.1.1	Operation 1	39
4.1.2	Τεμάχιο Επεξεργασίας	41
4.1.3	Κόκκος	43
4.1.4	Inter-Object	45
4.1.5	Δημιουργία Δεδομένων(Database Generation).....	47
4.2	Αποτελέσματα θερμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία με χρήση τροχού	48
4.3	Αποτελέσματα θερμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για διάφορες διαστάσεις κόκκου	49
4.3.1	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.1mm και τεμάχιο DIN-16MnCr5.....	51
4.3.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.1mm και τεμάχιο Aluminum 7075.....	55
4.3.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.18mm και τεμάχιο DIN-16MnCr5.....	60
4.3.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.18mm και τεμάχιο Aluminum 7075.....	65
4.3.5	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.2mm και τεμάχιο DIN-16MnCr5.....	70
4.3.6	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.2mm και τεμάχιο Aluminum 7075.....	75
4.3.7	Αποτελέσματα προσομοιώσεων κόκκων	80
5.	Συμπεράσματα	85
6.	Βιβλιογραφία.....	86

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λείανση είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη διεργασία αποπεράτωσης και χρησιμοποιείται ευρέως όταν στο επεξεργαζόμενο υλικό παρουσιάζεται μεγάλη σκληρότητα, μεγάλη ψαθυρότητα και όταν επιθυμείτε υψηλή επιφανειακή ποιότητα και διαστατική ακρίβεια στο υλικό.

Κατά τη διάρκεια της λείανσης αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις, τάσεις και θερμοκρασίες, τόσο στο λειαντικό τροχό όσο και στο επεξεργαζόμενο υλικό, όπου με τη σειρά τους δημιουργούν επιφανειακό κάψιμο, ρωγμές, καταστροφή της μεταλλικής δομής στο υπόστρωμα της επιφάνειας, μείωση της επιφανειακής σκληρότητας και υπομένουσες τάσεις στην επιφάνεια του κομματιού. Για αυτό το λόγο, η ανάλυση των δυνάμεων, των τάσεων και των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη λείανση είναι πολύ σημαντική, τόσο για τον προσδιορισμό και τον έλεγχο τους όσο και για την αποφυγή των φθορών που δημιουργούνται και πραγματοποιείται με τη βοήθεια μακροσκοπικών ή μικροσκοπικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε δυναμική και θερμική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα σφαιρικό εργαλείο λείανσης διαμέτρου 25mm, φτιαγμένο από πολυμερές υλικό εμπλουτισμένο με νανοπρόσθετα στοιχεία από σκληρά μέταλλα. Αρχικά πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος Comsol Multiphysics και στη συνέχεια θερμική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος Deform-3D, όπου με τις παραπάνω επιμέρους αναλύσεις, μπορεί να γίνει, με αρκετή ακρίβεια, ο προσδιορισμός των ασκούμενων δυνάμεων και των μεταβολών θερμοκρασίας που δημιουργούνται στο εργαλείο της λείανσης και στο επεξεργαζόμενο τεμάχιο.

2.1 Προσομοίωση επιπέδου λειάνσεως

Το 1986 η κ. Χαρίκλεια Καραχάλιου τελείωσε τη διδακτορική διατριβή της, που υποβλήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με θέμα «*Προσομοίωση Επιπέδου Λειάνσεως: Τοπομορφία Λειαντικού Τροχού και Δυνάμεις Κοπής*». Σκοπός της Διδακτορικής Διατριβής ήταν να γίνει προσπάθεια ακριβούς προσδιορισμού της τρισδιάστατης γεωμετρικής μορφής των κοπτικών ακμών του λειαντικού τροχού, ο οποίος θα βασίζεται στη μετρημένη, μέσω τραχυγραφημάτων, τοπογραφία του τροχού. Επιχείρησε ακριβείς υπολογιστικούς προσδιορισμούς της τρισδιάστατης γεωμετρικής μορφής των δεισδύσεων μεταξύ των κοπτικών ακμών και του κατεργαζόμενου κομματιού, της γεωμετρικής μορφής των απαραμόρφωτων αποβλίπτων, καθώς και των συνιστωσών της δυνάμεως κοπής, που αναπτύσσεται σε κάθε κοπτική ακμή κάθε κόκκου του λειαντικού τροχού. Έτσι υπολόγισε τη χρονική μεταβολή των συνιστωσών της δυνάμεως κοπής που ασκούνται στο λειαντικό τροχό κατά τη λείανση. Τέλος, παρουσιάστηκε, με τη βοήθεια πειραμάτων, η επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στη γεωμετρική μορφή του απαραμόρφωτου αποβλίπτου και στη δύναμη κοπής και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες υπολογισμένες. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε για λειαντικούς τροχούς με διάφορα τεχνολογικά χαρακτηριστικά για διάφορες συνθήκες κατεργασίας κατά τη διαμήκη περιφερική λείανση επιπέδων επιφανειών. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψαν τιμές γενικευμένων τεχνολογικών παραμέτρων ακριβούς περιγραφής των δυνάμεων κοπής, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χρήσιμα εργαλεία μέχρι και σήμερα.

Για τον ακριβή προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων στα πλαίσια της μελέτης αυτής, αναπτύχθηκε μεθοδολογία υπολογισμού βασισμένη στην αριθμητική ανάλυση, κατά την οποία ο λειαντικός τροχός θεωρήθηκε ότι αποτελείται από ακολουθία τρισδιάστατων συστημάτων κόψεων, καθένα με επιμέρους κοπτικές ακμές, οι οποίες έχουν το δικό τους μήκος και διεύθυνση. Το σύνολο των παραπάνω υπολογισμών βασίστηκαν στην αυτοματοποιημένη αποτίμηση τιμών τραχύτητας της επιφάνειας του λειαντικού τροχού, καθέτων στη διεύθυνση περιστροφής του τροχού, για τον προσδιορισμό συστημάτων κόψεων του λειαντικού τροχού. Οι μετρήσεις της τραχύτητας του τροχού έγιναν με όργανο μετρήσεων τραχύτητας επιφάνειας τύπου στυλίσκου.

Τα υπολογισμένα συστήματα κόψεων, η κινηματική της λειάνσεως, οι συνθήκες κατεργασίας, το υλικό του κομματιού και η γεωμετρία του λειαντικού τροχού αποτελούν τη βάση για τον ακριβή υπολογισμό χαρακτηριστικών παραμέτρων της λειάνσεως. Η γεωμετρική μορφή των ακολουθιών των συστημάτων κόψεων ενός λειαντικού τροχού, η συνολική κινηματική αλυσίδα λειαντικού τροχού- λειαντικής μηχανής – τροχού, η γεωμετρία του κομματιού και του λειαντικού τροχού καθώς και οι συνθήκες κοπής αποτελούν τη βάση για τον προσδιορισμό, με τη βοήθεια μεθόδων της αριθμητικής ανάλυσης, των δεισδύσεων στο χώρο μεταξύ λειαντικού τροχού και κομματιού. Η προσομοίωση αυτή έχει τη δυνατότητα αναλυτικού υπολογισμού της γεωμετρικής μορφής των δεισδύσεων των συστημάτων κόψεων του λειαντικού τροχού εντός του υλικού, της γεωμετρικής μορφής του απαραμόρφωτου αποβλίπτου κάθε επιμέρους κοπτικής ακμής, κάθε κόκκου του λειαντικού τροχού καθώς και άλλων χαρακτηριστικών παραμέτρων της λειάνσεως, όπως των δυνάμεων κοπής, της τραχύτητας επιφάνειας και άλλων.

Για τη μαθηματική περιγραφή των δεισδύσεων μεταξύ λειαντικού τροχού και κομματιού η κ. Καραχάλιου διεξήγαγε τους εξής υπολογισμούς:

- Μαθηματική περιγραφή της κινηματικής αλυσίδας λειαντικού τροχού – λειαντικής μηχανής – κομματιού.
- Μαθηματική περιγραφή των στιγμιαίων περιγραμμάτων της μορφής του κομματιού, ως αποτέλεσμα των διεισδύσεων μεταξύ διαδοχικών συστημάτων κόψεων και κομματιού.
- Μαθηματικός προσδιορισμός της γεωμετρικής μορφής του απαραμόρφωτου αποβλήτου.

2.2 Εξισώσεις Kienzle

Η γνώση των δυνάμεων κοπής, που αναπτύσσονται κατά τη λείανση, είναι ένα από τα απαραίτητα, μεταξύ άλλων, στοιχεία για την περαιτέρω μελέτη και επιρροή των αποτελεσμάτων της λειάνσεως, όπως της διαστατικής ακρίβειας, της βέλτιστης χρησιμοποίησης της μηχανής και ακόμη του σχεδιασμού της λειαντικής μηχανής. Για την απόκτηση αυτής της γνώσης η συγγραφέας αναφέρθηκε στη μέθοδο μαθηματικής εκφράσεως των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής στην κατεργασία της επίπεδης λειάνσεως, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής που επιδρούν στις επιμέρους κοπτικές ακμές ενός συστήματος κόψεων σε διαδοχικές θέσεις περιστροφής του λειαντικού τροχού κατά την κατεργασία της λειάνσεως, με τη βοήθεια των εξισώσεων Kienzle. Οι τεχνολογικές σταθερές, που περιέχονται στις εξισώσεις Kienzle προσδιορίζονται, όπως και στην τόννευση, με τη βοήθεια μετρήσεων των δυνάμεων κοπής και αναπτύσσεται και η μεθοδολογία εκτίμησης των μεγεθών των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής, που ασκούνται κατά τη λείανση, ώστε να καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός των τιμών των τεχνολογικών σταθερών.

Η στοιχειώδης δύναμη κοπής F_i , που επηρεάζει την επιμέρους κοπτική ακμή i ενός συστήματος κόψεων του λειαντικού τροχού, αναλύεται στη δύναμη κοπής F_{ci} , στη διεύθυνση της ταχύτητας κοπής, στη δύναμη F_{kni} κάθετη στην ακμή και στη δύναμη F_{kti} , κάθετη στις προηγούμενα ορισμένες συνιστώσες F_{ci} και F_{kni} . Οι συνιστώσες αυτές αντιστοιχούν στις δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται και στην περίπτωση του τόννου. Γνωρίζοντας το πλάτος Δb της i κοπτικής ακμής και το πάχος του αποβλήτου της h_i οι συνιστώσες της δύναμης κοπής υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων Kienzle:

$$\begin{aligned} F_{ci} &= K_{c1.1} h_i^{1-m_c} \Delta b \\ F_{kni} &= K_{kn1.1} h_i^{1-m_{kn}} \Delta b \\ F_{kti} &= K_{kt1.1} h_i^{1-m_{kt}} \Delta b \end{aligned}$$

όπου οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται με την παραδοχή ότι οι τιμές των σταθερών που περιέχονται στις εξισώσεις του Kienzle, παραμένουν σταθερές για όλο το χρόνο διείσδυσης μεταξύ του τροχού και του κομματιού.

2.3 Φάσεις λείανσης

Κατά τη διείσδυση του κοπτικού κόκκου του λειαντικού τροχού μέσα στο υλικό του κατεργαζόμενου κομματιού διακρίνονται τρεις φάσεις, οι οποίες διέπονται από τρεις διαφορετικούς νόμους. Κατά τη τρίτη φάση, η διείσδυση των λειαντικών κόκκων εντός του υλικού είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα οι ανακρίβειες που δημιουργούνται λόγω περιγραφής των δυνάμεων κοπής με το νόμο που διέπει τη Τρίτη φάση, οδηγούν σε σφάλματα, τα οποία μόνο κατά μικρό ποσοστό επηρεάζουν τη συνολική πορεία μεταβολής των δυνάμεων κοπής. Αυτό συμβαίνει, γιατί σε μία τυχαία θέση περιστροφής του λειαντικού τροχού η συνολική δύναμη κοπής είναι συνισταμένη των συνιστωσών δυνάμεων των κόκκων, που βρίσκονται σε επαφή με το κατεργαζόμενο κομμάτι και οι οποίοι είναι κατανεμημένοι σε διαφορετικές φάσεις διεισδύσεως με αποτέλεσμα να πιστοποιείται η

εγκυρότητα της απλοποίησης αυτής εξαιτίας της σχετικής συμφωνίας μεταξύ των τιμών της μετρημένης και των μεγεθών της υπολογισμένης χρονικής μεταβολής των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής. Ο προσδιορισμός της χρονικής μεταβολής των συνιστωσών της συνολικής δύναμης κοπής που αναπτύσσεται κατά την κατεργασία της λειάνσεως βασίστηκε στον επιμέρους προσδιορισμό της χρονικής μεταβολής των συνιστωσών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε σύστημα κόψεων του λειαντικού τροχού, κατά τη διεξόδυσή του στο υλικό.

2.4 Υπολογισμοί δυνάμεων και συνιστωσών

Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν, τα συστήματα κόψεων, η γεωμετρία του λειαντικού τροχού, η κινηματική της λειάνσεως και οι συνθήκες κατεργασίας. Ο υπολογισμός ξεκίνησε με τον προσδιορισμό του κινηματικού πάχους του αποβλίπτου σε επιμέρους κοπτική ακμή, κάθε συστήματος κόψεων σε διάφορες θέσεις περιστροφής του λειαντικού τροχού. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι στοιχειώδεις δυνάμεις F_{Cijk} , F_{KNijk} , F_{KTijk} επί των επιμέρους κοπτικών ακμών, κάθε συστήματος κόψεων σε διάφορες θέσεις περιστροφής k , με τη βοήθεια των εξισώσεων Kienzle. Οι στοιχειώδεις αυτές δυνάμεις αναλύθηκαν στις συνιστώσες F_{xiju} , F_{yiju} και F_{ziju} και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι συνιστώσες των συνολικών δυνάμεων κοπής F_{xjk} , F_{yjk} και F_{zjk} κάθε συστήματος κόψεων j για κάθε θέση περιστροφής k του τροχού. Τέλος υπολογίστηκαν οι συνιστώσες των συνολικών δυνάμεων κοπής F_{xk} , F_{yk} και F_{zk} που εξασκούνται κατά την κατεργασία της λειάνσεως σε κάθε θέση περιστροφής k του λειαντικού τροχού, στο σύστημα αναφοράς του κομματιού, καθώς και σε οποιοδήποτε άλλο σύστημα αναφοράς απαιτείται.

Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της συνολικής δύναμης κοπής, στο σύστημα αναφοράς του κομματιού σε κάθε θέση περιστροφής του λειαντικού τροχού, πρέπει να είναι γνωστός ο συνολικός αριθμός των διαδοχικών συστημάτων κόψεων, που έρχονται συγχρόνως σε επαφή με το κομμάτι σε κάθε θέση περιστροφής. Το πλήθος αυτό των συστημάτων κόψεων εξαρτάται από την ακτίνα του λειαντικού τροχού R και το εκάστοτε βάθος κοπής a . Το τόξο επαφής φ προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\varphi = \text{τοξ} \eta \mu \frac{R-a}{R},$$

και με γνωστή την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών συστημάτων κόψεων υπολογίστηκε το πλήθος των συστημάτων κόψεων που συγχρόνως βρίσκονται σε επαφή με το κατεργαζόμενο υλικό.

Ως τιμές των σταθερών των εξισώσεων Kienzle λήφθηκαν υπόψη αυτές που προσδιορίζονται με τη βοήθεια προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή εκτιμήσεως των τιμών των μετρημένων συνιστωσών δυνάμεων, όπως στην περίπτωση του φραιζαρίσματος με πάχος αποβλίπτου μικρότερο των $10\mu\text{m}$. Οι αρχικές τιμές των σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν στις εξισώσεις του Kienzle είναι:

$$K_{c1.1} = 140,49 \text{ daN/mm}^2 \quad 1-m_c = 0,727$$

$$K_{kn1.1} = 103,63 \text{ daN/mm}^2 \quad 1-m_{kn} = 0,799$$

$$K_{kt1.1} = 11,53 \text{ daN/mm}^2 \quad 1-m_{kt} = 0,91$$

όπου οι τιμές αυτές είναι οι τιμές των τεχνολογικών σταθερών των εξισώσεων Kienzle, όπως προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, στην περίπτωση του ξηρού φραιζαρίσματος, σε περιοχή αποβλίπτου μικρότερη των $10\mu\text{m}$.

Για τον έλεγχο των υπολογισμένων τιμών των συνιστωσών των δυνάμεων κοπής, διεξήχθησαν πειράματα για τη μέτρηση των αντίστοιχων δυνάμεων κοπής, όπου το εύρος διακριτοποίησης των αναλογικών σημάτων της μετρημένης κοπτικής δύναμης για τη μετατροπή τους σε αντίστοιχα ψηφιακά ανέρχεται στα 5μs. Αυτές οι τιμές των συνιστωσών της δύναμης συγκρίνονται με τις αντίστοιχες υπολογισμένες.

Στη κατεργασία της λείανσης, τα πάχη των αποβλίπτων μεταβάλλονται, οι δε μετρήσεις των δυνάμεων κοπής αναφέρονται στο σύνολο των δυνάμεων που αναπτύσσονται επί του λειαντικού τροχού. Με διάφορες παραλλαγές στις αρχικές τιμές των τεχνολογικών σταθερών των εξισώσεων Kienzle και με τη βοήθεια του προγράμματος "GPROPA" που χρησιμοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, έγιναν διαδοχικές προσεγγίσεις των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής στις αντίστοιχες μετρημένες κατά την κατεργασία της λείανσης. Έτσι προσδιορίστηκαν οι παρακάτω τιμές των τεχνολογικών σταθερών, που επιφέρουν ικανοποιητική ταύτιση υπολογισμένων και αντίστοιχων μετρημένων δυνάμεων κοπής:

$$K_{c1.1} = 86,32 \text{ daN/mm}^2 \quad 1-m_c = 0,625$$

$$K_{kn1.1} = 23,20 \text{ daN/mm}^2 \quad 1-m_{kn} = 0,469$$

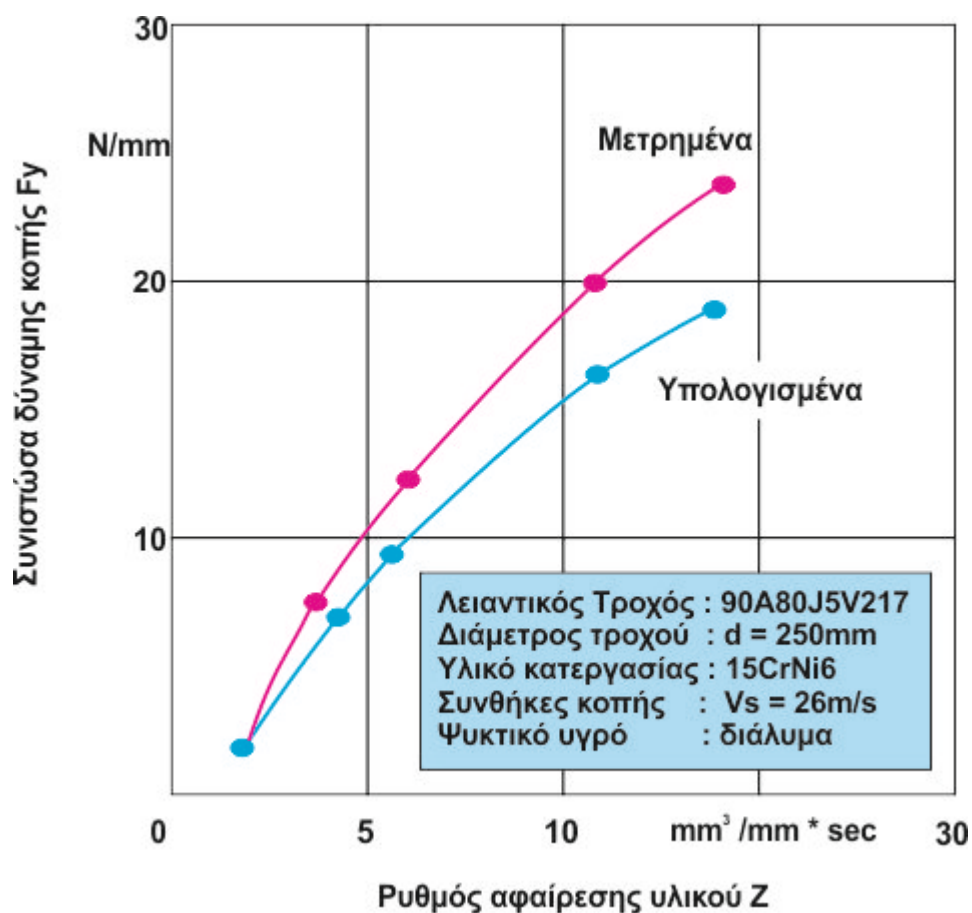
$$K_{kt1.1} = 1,0 \text{ daN/mm}^2 \quad 1-m_{kt} = 0,99$$

Υπολογίστηκε και η χρονική μεταβολή των συνιστωσών της δυνάμεως κοπής που αναπτύσσονται κατά τη λείανση σε άλλο λειαντικό τροχό με διαφορετικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά, όπου ο υπολογισμός των δυνάμεων έγινε με τις νέες προσδιορισμένες τιμές των σταθερών και με ίδιο υλικό κατεργασίας, και επιβεβαιώθηκε η ορθότητα της διαδικασίας λόγω της πλήρους συμφωνίας μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων συνιστωσών της δύναμης κοπής. Στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ενός πειράματος, στο οποίο φαίνονται οι υπολογισμένες και οι αντίστοιχες μετρημένες δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά τη λείανση με δύο λειαντικούς τροχούς, σύμφωνα με τη μεθοδολογία και τις σταθερές που περιγράφηκαν σε κατεργαζόμενο υλικό 15GrNi6.

2.5 Περιοχές μετρήσεως

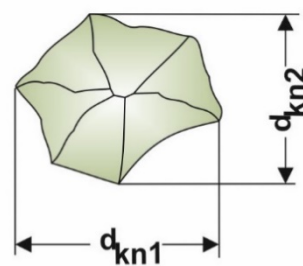
Για τον προσδιορισμό των συστημάτων κόψεων ορίζονται περιοχές μετρήσεως ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων του λειαντικού τροχού. Το πλάτος των περιοχών μετρήσεως ορίζεται περίπου ίσο προς τη μέγιστη διάμετρο των κόκκων του μετρούμενου λειαντικού τροχού. Το μήκος των περιοχών μέτρησης ορίζεται ίσο προς το δειγματοληπτικό μήκος του οργάνου μέτρησης ταχύτητας. Οι περιοχές μέτρησης περιλαμβάνουν ανάλογο πλήθος ιχνών διαδρομών μέτρησης. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι μέσοι διάμετροι των κόκκων για διάφορες τιμές κόκκωσης. Αυτό συμβαίνει για να γίνει πιο εύκολος ο εντοπισμός των κοπτικών ακμών των κόκκων.

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι περιοχές μέτρησης και τα διακριτά διαστήματα των ιχνών μετρητικών διαδρομών, καθώς και μία υποθετική μετρημένη τραχύτητα στο πρώτο ίχνος διαδρομής της ακίδας του τραχύμετρου πάνω στο λειαντικό τροχό.

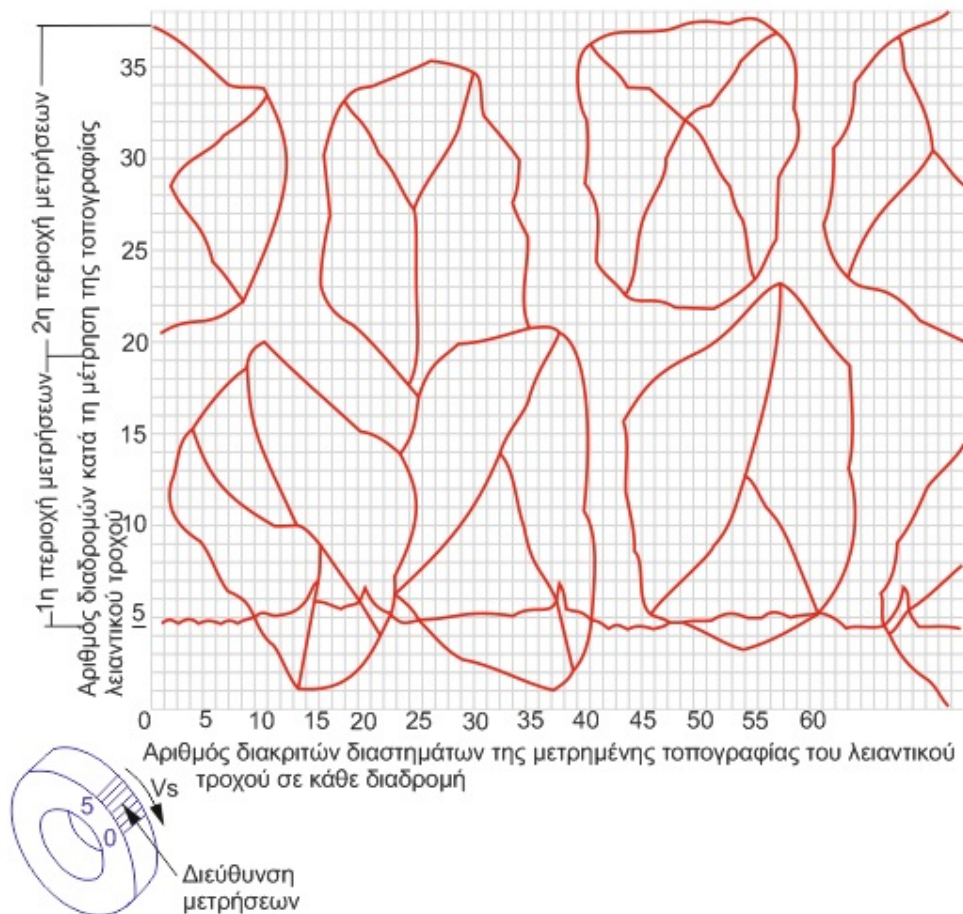


Σχήμα 2.1: Διάγραμμα δυνάμεων κοπής συναρτήσει του ρυθμού αφαίρεσης υλικού, με λειαντικό τροχό 90A80J5V217 και διάμετρο 250mm.

Κόκκωση	Διαστάσεις κόκκου [mm]	
	Τυποποιημένη διάμετρος $d_{kn1}-d_{kn2}$	Μέση διάμετρος d_k
24	0.85 -0.70	0.777
36	0.60 -0.50	0.550
46	0.42 -0.355	0.387
60	0.30 -0.25	0.275
80	0.21 -0.18	0.195
100	0.15 -0.125	0.137
120	0.125 -0.105	0.115



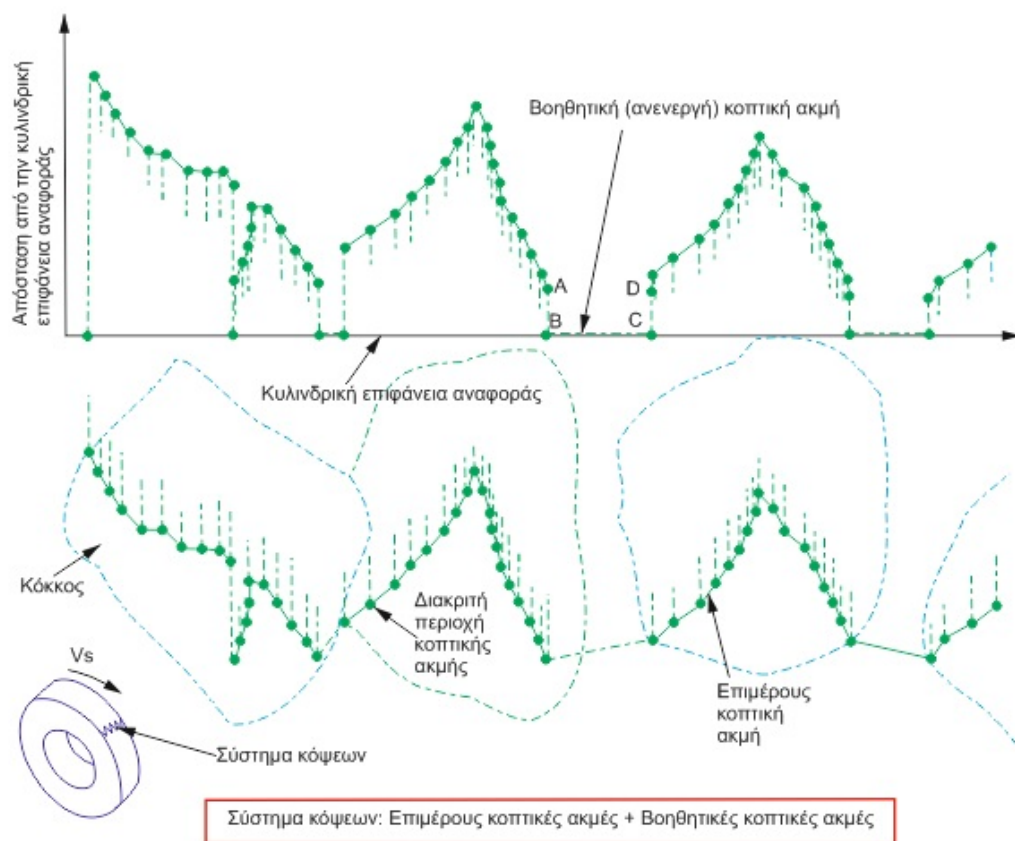
Σχήμα 2.2: Μέση διάμετρος κόκκου για διάφορες τιμές κόκκωσης.



Σχήμα 2.3: Μετατροπή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά των τραχυγραφημάτων που λαμβάνονται κατά την περιγραφή της τοπογραφίας του λειαντικού τροχού.

Οι μετρημένες αυτές τιμές της τραχύτητας στα διακριτά διαστήματα κάθε ίχνους διαδρομής, στις οποίες αντιστοιχούν μία επιμέρους κοπτική ακμή χαρακτηρίζονται με τέσσερις δείκτες. Ο πρώτος δείκτης είναι ο αύξων αριθμός των διακριτών διαστημάτων της αναλογικής-ψηφιακής μετατροπής. Ο δεύτερος δείκτης είναι ο αύξοντας αριθμός κάθε ίχνους διαδρομής και ο τρίτος δείκτης είναι ο αριθμός της περιοχής μέτρησης. Ο τέταρτος δείκτης απαριθμεί το πλήθος των διακριτών διαστημάτων που περιέχουν επιμέρους κοπτικές ακμές και τα οποία λαμβάνοντας υπόψη τη φορά περιστροφής του λειαντικού τροχού βρίσκονται πριν από το θεωρούμενο διακριτό διάστημα μέσα σε κάθε περιοχή μέτρησης. Αναφέρεται ότι το διακριτό διάστημα είναι το διακριτό διάστημα το οποίο ανήκει σε υψηλό σημείο (κορυφή) της καταγεγραμμένης τοπομορφίας του ίχνους διαδρομής του λειαντικού τροχού. Επίσης, ως υψηλό σημείο της καταγεγραμμένης τοπομορφίας ορίζεται το διακριτό διάστημα του οποίου η τιμή της τραχύτητας είναι μεγαλύτερη από την τιμή της τραχύτητας του αμέσως προηγούμενου και επόμενου διακριτού διαστήματος.

Στο σχήμα 2.4 απεικονίζονται οι βοηθητικές κοπτικές ακμές, οι οποίες είναι αυτές με τις διακεκομμένες γραμμές. Τα συστήματα κόψεων έχουν ενιαία αρίθμηση, αρχίζοντας από την πρώτη περιοχή μετρήσεως. Η αρχή της σύνδεσης των κοπτικών ακμών σε σύστημα κόψεων γίνεται κατανοητή με τη βοήθεια του Σχήματος 2.4. Η βοηθητική κοπτική ακμή BC βρίσκεται πάνω σε νοητή κυλινδρική επιφάνεια αναφοράς μακριά από την περιφέρεια του λειαντικού τροχού. Οι βοηθητικές κοπτικές ακμές AB και DC είναι κάθετες στην κοπτική ακμή BC. Όλες οι βοηθητικές κοπτικές ακμές, λόγω της θέσεως τους πάνω στο λειαντικό τροχό, δεν συμμετέχουν στην κοπή και για αυτό είναι ανενεργές.



Σχήμα 2.4: Σύνδεση επιμέρους κοπτικών ακμών σε σύστημα κόψεων, με τη βοήθεια προγράμματος Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

Στο πείραμα αυτό οι δυνάμεις καταχωρήθηκαν σε σχέση με το ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Η αύξηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού προκαλεί μία αναμενόμενη αύξηση των συνιστωσών της δύναμης κοπής και είναι εμφανής η ταύτιση των υπολογισμένων μέσω των τιμών των συνιστωσών και των αντίστοιχων μετρημένων τιμών της δύναμης και για τους δύο τροχούς. Η σύγκριση των δυνάμεων κοπής που εξασκούνται στους λειαντικούς τροχούς δείχνει ότι η δύναμη κοπής επί του λειαντικού τροχού είναι κατά το ίδιο ποσοστό μεγαλύτερη από την αντίστοιχη δύναμη κοπής επί του λειαντικού τροχού. Η επίδραση της μέσης διαμέτρου των κόκκων δεν είναι τόσο αποφασιστική στη δύναμη κοπής όσο το συνολικό πλάτος των ενεργών κόψεων, που επηρεάζει αναλογικά τις εξισώσεις Kienzle. Αυτό επιβεβαιώνει τη θεώρηση ότι οι κόκκοι έχουν περίπου σφαιρικό σχήμα με διατεταγμένες ακμές ακτίνας καμπυλότητας $6\mu\text{m}$, το δε απόβλιπτο τάξεως $1\mu\text{m}$ έρχεται σε επαφή με τις προεξέχουσες κόψεις και όχι με τη συνολική επιφάνειες του κόκκου. Δεδομένης της μακροσκοπικής μελέτης της λείανσης, το μοντέλο που περιέγραψε η κ. Καραχάλιου στη διατριβή της αντιπροσωπεύεται από κόκκους που έχουν προχωρημένη φθορά κάτι που πλησιάζει την πραγματικότητα μιας κατεργασίας σε πραγματικό περιβάλλον.

2.6 Λείανση

Λείανση χαρακτηρίζεται η κατεργασία αφαίρεσης υλικού (συνήθως κατεργασία αποπεράτωσης) με κοπτικό εργαλείο, το λειαντικό τροχό (grinding wheel) που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Ο λειαντικός τροχός αποτελείται από πολλές κοπτικές ακμές, τους λειαντικούς κόκκους (abrasives, grits), οι οποίοι είναι άμορφοι χωρίς καθορισμένη γεωμετρία. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ενεργούν ταυτόχρονα στην αποβολή υλικού μεγάλοι αριθμός λειαντικών κόκκων. Επομένως η λείανση μπορεί να χαρακτηριστεί ως κατεργασία κοπής πολλαπλής σημειακής επαφής.

2.61 Είδη λείανσης

Τα είδη λείανσης είναι τα εξής:

- **Επίπεδη λείανση**

Πρόκειται για λείανση επίπεδων επιφανειών και διακρίνεται σε περιφερειακή και μετωπική λείανση, ανάλογα με τη διάταξη του κοπτικού τμήματος του τροχού ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια. Είναι μια διαδικασία τελικής επεξεργασίας που χρησιμοποιεί ένα περιστρεφόμενο τροχό λείανσης για να εξομαλύνει την επίπεδη επιφάνεια μεταλλικών ή μη μεταλλικών υλικών για να τους δώσει μια πιο εκλεπτυσμένη εμφάνιση.

- **Κυλινδρική λείανση**

Χρησιμοποιείται για την κατεργασία κυλινδρικών επιφανειών. Διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική κυλινδρική λείανση. Κυλινδρικό τρόχισμα χρησιμοποιείται για να λειάνει τις κυλινδρικές επιφάνειες και τους ώμους του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το τεμάχιο τοποθετείται σε κέντρα και περιστρέφεται από μία συσκευή, γνωστή ως σκυλί δίσκο (drive dog) ή οδηγό του κέντρου (center driver). Ο τροχός λείανσης και το τεμάχιο περιστρέφονται από χωριστούς κινητήρες και σε διαφορετικές ταχύτητες.

- **Άκεντρη λείανση**

Στην άκεντρη λείανση το τεμάχιο υποστηρίζεται από μία λεπίδα αντί με κέντρα ή τσοκ. Χρησιμοποιούνται δύο τροχοί, ο μεγαλύτερος χρησιμοποιείται για να λειάνει την επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας και ο μικρότερος τροχός χρησιμοποιείται για να ρυθμίζει την αξονική κίνηση του τεμαχίου εργασίας.

- **Λείανση μορφής**

Λείανση μορφής είναι ένας εξειδικευμένος τύπος κυλινδρικής λείανσης όπου ο τροχός λειάνσεως έχει το ακριβές σχήμα του τελικού προϊόντος. Ο τροχός λείανσης δεν διασχίζει το τεμάχιο εργασίας. Ο λειαντικός τροχός έχει ειδικά διαμορφωμένο περίγραμμα, το οποίο μεταφέρει στο τεμάχιο κατά την κατεργασία.

- **Αποκοπή υλικού με λειαντικό δίσκο.**

Εφευρέθηκε στη Γερμανία στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τον Edmund και Gerhard Lang . Ο λειαντικός τροχός έχει πολύ μικρό πάχος (3 mm) και ικανή ελαστικότητα ώστε να εκτελεί κατεργασία αποκοπής στο τεμάχιο (σωλήνας, άξονας κλπ.). Σε αντίθεση με την κανονική λείανση, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για να τελειώσει τις κατεργασίες επιφανειών, η αποκοπή υλικού με λειαντικό τροχό χρησιμοποιείται για υψηλά ποσοστά αφαίρεσης υλικού, που ανταγωνίζονται το φραιζάρισμα και ως επιλογή διαδικασίας κατεργασίας.

2.6.2 Υλικό κόκκων

Τα πιο συνηθισμένα υλικά κόκκων σε λειαντικούς τροχούς είναι:

- **Φυσικό ή τεχνητό κορούνδιο.**

Πρόκειται για το Al_2O_3 .Λαμβάνεται φυσικά από το ορυκτό σμύριδα ή παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο από βωξίτη. Οι τροχοί που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν διάφορα χρώματα, ανάλογα με τις προσμίξεις που περιέχουν. Τα συνήθη χρώματα τροχών είναι: μαύρο (Α), καφέ (Β), κόκκινο (C) και λευκό (D). Το κόστος του τροχού αυξάνεται από την κατηγορία Α προς την κατηγορία D (είναι πιο καθαρής σύνθεσης). Χρησιμοποιούνται για λείανση σκληρών και συνεκτικών υλικών.

- **Ανθρακοπυρίτιο (SiC).**
Παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο με πρώτες ύλες χαλαζιακή άμμο και άνθρακα (C). Οι κόκκοι ανθρακοπυριτίου έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από τους κόκκους κορουνδίου. Οι τροχοί ανθρακοπυριτίου χρησιμοποιούνται για όλα τα ψαθυρά υλικά – μαλακά ή σκληρά – καθώς επίσης για τα πολύ μαλακά υλικά.
- **Ζιρκόνιο-Κορούνδιο.**
Κατασκευάζεται με την τήξη ενός μείγματος από ZrO_2 και Al_2O_3 σε ακριβώς καθορισμένες αναλογίες ανάμειξης. Σε μια θερμοκρασία γύρω στους $1900^{\circ}C$ δημιουργείται μια μικροκρυσταλλική δομή, όπου ελευθερώνονται συνεχώς νέες επιφάνειες κοπής και εμφανίζεται ένα φαινόμενο αυτοτροχίσματος. Είναι εξαιρετικά τραχύ υλικό και κατάλληλο για την επεξεργασία χάλυβα.
- **Διαμάντι**
- **Κυβικός βοριονιτρίτης (CBN).**
Η χρήση τροχών από CBN βαίνει συνεχώς αυξανόμενη (πιο αποτελεσματική λείανση). Μοναδικό τους μειονέκτημα το υψηλό κόστος.

2.6.3 Συνδετικό υλικό

Ανάλογα με το υλικό του δεσμού, ο λειαντικός τροχός χαρακτηρίζεται ως εξής:

- **V:** Δεσμός από κεραμικό υλικό (υαλώδες, ψαθυρό και υψηλής αντοχής). Δεν επηρεάζεται από το νερό ή το λάδι και αντέχει σε ελαφρά θέρμανση. Είναι κατάλληλος για ξηρή και υγρή λείανση. Αντιπροσωπεύει πάνω από το 75% του συνόλου των χρησιμοποιούμενων λειαντικών τροχών.
- **S:** Δεσμός από υδρύαλο (πυριτικό υλικό). Κατάλληλος για τρόχιση ειδικών εργαλείων, όπου η παραγωγή θερμότητας πρέπει να είναι ελάχιστη και δεν ενδιαφέρει η φθορά του τροχού.
- **B:** Δεσμός από συνθετικές ρητίνες, με σημαντική αντοχή σε κρούση. Χρησιμοποιείται σε λείανση μεγάλης ταχύτητας, όπου προέχει ο υψηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού, καθώς επίσης και σε τροχούς κοπής.
- **BF:** Δεσμός από ρητινικό υλικό ενισχυμένο με ίνες.
- **R:** Δεσμός από ελαστικό, με πολύ υψηλή αντοχή σε κρούση. Προσφέρεται για μεγάλες ταχύτητες λείανσης. Δεν ανέχεται υψηλές θερμοκρασίες και χρήση ψυκτικού υγρού. Κατασκευάζεται με πάχος μέχρι 3 mm και χρησιμοποιείται σε ειδικές και δύσκολες εφαρμογές (κοπή σκληρών υλικών).
- **RF:** Δεσμός από ελαστικό υλικό ενισχυμένο με ίνες.
- **M:** Δεσμός από μεταλλικό υλικό (Al, κράματα Cu-ορείχαλκου, μπρούντζος και σπάνια χάλυβας). Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε αδαμαντοτροχούς λόγω της πολύ υψηλής αντοχής του και στους τροχούς ηλεκτροχημικής λείανσης λόγω της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας.

2.7 Πεπερασμένα στοιχεία

Λόγω της συνεχούς αύξησης της πολυπλοκότητας των προβλημάτων κατεργασίας και των γεωμετρικών σχημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτά έπρεπε να αναπτυχθούν λογισμικά που να τα επιλύουν. Δημιουργήθηκε δηλαδή η ανάγκη προσεγγιστικού υπολογισμού πολλών και περίπλοκων διαφορικών εξισώσεων για την περιγραφή των κατεργασιών. Στα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται γίνεται προσπάθεια να συνδεθούν παράγοντες και συνθήκες κοπής μιας κατεργασίας με τις δυνάμεις και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, τα απόβλητα, τις τάσεις και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να βρει εφαρμογή σε όλα τα προβλήματα κατεργασιών.

Το 1944 ο Merchant πρότεινε το πρώτο αναλυτικό μοντέλο που έθεσε τα πλαίσια για τη μοντελοποίηση της ορθογωνικής κοπής. Με την εφεύρεση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, οι τεχνικές με πεπερασμένα στοιχεία (**FEM-Fine Element Modeling**) άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κατεργασιών.

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα, τρίγωνα ή πολύγωνα και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που έχουν περισσότερο ενδιαφέρον και είναι αραιότερα σε περιοχές μικρότερου ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων.

2.7.1 Μοντέλα προσομοίωσης Euler – Lagrange

Δύο είναι τα βασικότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση κατεργασιών κοπής, του **Euler** και του **Lagrange**. Κατά τη διατύπωση του Euler, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι χωρικά σταθερό και το υλικό ρέει μέσα από αυτό προκειμένου να προσομοιώσει το σχηματισμό του αποβλήτου. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι η ποσότητα των στοιχείων για τη μοντελοποίηση του κομματιού προς κατεργασία και του αποβλήτου είναι μικρή και το γεγονός ότι δεν υφίστανται στρέβλωση, δεδομένου ότι το πλέγμα είναι εκ των προτέρων γνωστό, άρα και η μορφή του αποβλήτου. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί δύσκολο προγραμματισμό και από πειραματικά δεδομένα πρέπει να είναι ήδη γνωστά, πριν από την κατασκευή του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από ερευνητές για την προσομοίωση της σταθερής κατάστασης της διαδικασίας κοπής.

Στη μέθοδο Lagrange, τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με το υλικό και το εργαλείο σε σχέση με το τεμάχιο. Το απόβλιτο σχηματίζεται με τη χρήση ενός κριτηρίου διαχωρισμού μπροστά από την ακμή του εργαλείου. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη παραμόρφωση του πλέγματος που παρατηρείται κατά την προσομοίωση. Λόγω της σύνδεσης του πλέγματος στο υλικό του τεμαχίου το πλέγμα καταστρέφεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης στη ζώνη κοπής. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα εφαρμόζεται ένας συνεχής επανασχηματισμός (remeshing) του πλέγματος και μια προσαρμογή του πλέγματος που επιβαρύνουν τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού.

Πλέον, το μοντέλο του Lagrange προτιμάται περισσότερο από το μοντέλο του Euler στον τομέα της έρευνας. Ενώ παράλληλα έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που χρησιμοποιούν ένα

συνδυασμό και των δύο μεθόδων δίνοντας έμφαση στα προτερήματα τους. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιεί την τεχνική του διαχωρισμού των κόμβων με τη μέθοδο διάδοσης ρωγμής για να μελετήσει την περιοχή αποκόλλησης του αποβλήτου από το τεμάχιο. Έτσι όταν ο τελευταίος κόμβος της κοπτικής ακμής πλησιάζει πιο κοντά από μια απόσταση τον κόμβο του τεμαχίου και ικανοποιούνται ορισμένες φυσικές παράμετροι, αυτός με τη σειρά του διασπάται σε δύο κόμβους. Και οι δύο μέθοδοι στοιχίζουν υπολογιστικά αρκετά και συγχρόνως απαιτείται τοπική πύκνωση του πλέγματος του τεμαχίου κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με το κοπτικό εργαλείο.

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα, τρίγωνα ή πολύγωνα και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που έχουν περισσότερο ενδιαφέρον και είναι αραιότερα σε περιοχές μικρότερου ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων.

Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και καθορίζονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρωική μορφή και υπολογίζονται οι τιμές κάθε βαθμού ελευθερίας. Όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει άπειρους κόμβους. Ωστόσο ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξηθεί απεριόριστα ο αριθμός των κόμβων αν είναι επιθυμητό το αποτέλεσμα σε σύντομο χρόνο. Η χρήση του υπολογιστή επιβάλλεται για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος FEM και εκτός των γρήγορων υπολογισμών μπορεί επιπλέον να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

Πιο συγκεκριμένα για τις κατεργασίες, δεν είναι πλέον απαραίτητος ο προγραμματισμός όλης της παραπάνω διαδικασίας καθώς κυκλοφορούν αξιόπιστοι εμπορικοί κώδικες. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα υπόλοιπα δεδομένα που απαιτούνται, π.χ. ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής και πρόωση. Η διαδικασία αυτή γίνεται με προγράμματα που ονομάζονται επιλυτές (pre-processors). Μόλις ετοιμαστούν τα δεδομένα εισάγονται στο solver ο οποίος είναι το μέσο για την επίλυση του προβλήματος και χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για τη διεκπαιρέωση του. Τέλος για την εξαγωγή γραφημάτων και αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται ειδικό πρόγραμμα που ονομάζεται post processor και το οποίο μπορεί να είναι ανεξάρτητο ή ένα πακέτο προγράμματος.

2.7.2 Μέθοδος FEA και FDM

Η μέθοδος FEA και η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (FDM), εφαρμόζονται για μοντέλα τα οποία περιγράφουν μέσω διαφορικών εξισώσεων, όπως οι διαφορικές εξισώσεις του Laplace, έναν μεγάλο αριθμό φυσικών διαδικασιών. Στις παραπάνω μεθόδους, η πραγματική διαδικασία μετασχηματίζεται σε ένα μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία οριοθετούνται από στοιχεία-κόμβους. Συγκεκριμένα, στη FDM σχηματίζεται μια δομή πλέγματος από τα στοιχεία και οι επιμέρους εξισώσεις διαφοράς λύνονται από ένα σύστημα εξισώσεων. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η δυσκολία για την εφαρμογή της σε σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας και πως δεν είναι εφικτή η ανάλυση ενός μέρους της πλεγματικής δομής αλλά ολόκληρης. Ωστόσο, η FDM αποτελεί το κατάλληλο μοντέλο για την ανάλυση της θερμικής αγωγιμότητας στη λείανση για ορισμένα προβλήματα.

Στη FEA, οι διαφορικές εξισώσεις επιλύονται εφαρμόζοντας τις λεγόμενες “συναρτήσεις σχήματος ή συναρτήσεις παρεμβολής”, οι οποίες οδηγούν σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με γνωστές τις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου και το θερμικό ή μηχανικό φορτίο. Η ακαμψία εξαρτάται από το υλικό και τη γεωμετρία του τεμαχίου. Το πλεονέκτημα στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η δυνατότητα δημιουργίας ακανόνιστων πλεγμάτων για σύνθετες δομές, καθώς και η δυνατότητα προσαρμογής του πλέγματος τοπικά, ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλα μοντέλα.

Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα FEA μπορούν να διαχωριστούν σε μακροσκοπικές και μικροσκοπικές έννοιες για την προσομοίωση των κατεργασιών λείανσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμόζεται η μακροσκοπική προσομοίωση προκειμένου να υπολογιστούν οι επιδράσεις της θερμότητας και της μηχανικής επιφανειακής πίεσης σε ολόκληρο το τεμάχιο, όσον αφορά την κατανομή της θερμοκρασίας. Οι υπολογισμοί βασίζονται κυρίως στα θερμομηχανικά και ελαστικομηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού, ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η συμπεριφορά του υλικού στην πλαστική παραμόρφωση και ο σχηματισμός του αποβλίπτου. Αντίθετα, η μικροσκοπική προσομοίωση περιορίζεται σε αναλύσεις της ζώνης επαφής. Με αυτόν τον τρόπο μοντελοποιείται ένα μικρό τμήμα του τεμαχίου. Η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί την πιο λεπτομερή προσέγγιση της πραγματικής διαδικασίας λείανσης μέχρι σήμερα, αλλά πρέπει να περιλαμβάνει την ελαστικό-πλαστική συμπεριφορά του υλικού και το σχηματισμό του αποβλίπτου. Ωστόσο, δεν υπάρχει η δυνατότητα από τους H/Y να αναπτύξουν επαρκώς ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για ολόκληρο τον τροχό λείανσης στις μικροσκοπικές προσομοιώσεις, ή να συμπεριληφθεί ο σχηματισμός του αποβλίπτου στις μακροσκοπικές προσομοιώσεις.

Για τη διεξαγωγή λείανσης σε εικονικό περιβάλλον, είναι απαραίτητο να μειωθούν οι μεταβλητές του συστήματος, ενώ στη συνέχεια γίνεται ολοκλήρωση όλων των σχετικών παραμέτρων της διαδικασίας και των οριακών συνθηκών. Οι παράμετροι εισόδου για μια τυπική προσομοίωση FEA είναι η γεωμετρία του τεμαχίου, οι δυνάμεις λείανσης, οι παράμετροι της διαδικασίας, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ψυκτικού και του τεμαχίου, οι συνθήκες ψύξης και οι οριακές συνθήκες.

Ο τροχός λείανσης στα περισσότερα μακροσκοπικά μοντέλα παρουσιάζεται ως ο συνδυασμός της πηγής θερμότητας και της επιφανειακής πίεσης, ο οποίος μετακινείται πάνω στο τεμάχιο με την ταχύτητα πρόωσης. Για να προκύψουν ρεαλιστικές παράμετροι πρέπει να περιγραφεί με ακριβή τρόπο η κατανομή της πηγής θερμότητας εντός της ζώνης επαφής μεταξύ του τεμαχίου και του τροχού λείανσης. Επειδή όμως αυτή η μέθοδος προσδιορισμού του προφίλ της πηγής θερμότητας είναι αρκετά χρονοβόρα, τα προφίλ συχνά θεωρούνται ιδανικά, με την υπόθεση πως είναι ορθογώνια, τριγωνικά, παραβολικά ή τραπεζοειδούς μορφής για απλούστευση της διαδικασίας. Για το σχεδιασμό αυτών των απλουστευμένων πηγών θερμότητας, είναι αναγκαίο να είναι γνωστές οι τιμές για την πυκνότητα θερμοροής \dot{q}_w . Είναι γνωστό πως η πυκνότητα ροής εκτός από τις παραμέτρους της διαδικασίας (όπως η ταχύτητα κοπής v_c) και τις γεωμετρικές συνθήκες επαφής (το μήκος επαφής l_g , το πλάτος του τροχού στη ζώνη επαφής b_k), εξαρτάται και από τη διάχυση ενέργειας KV , τη διανομή της θερμότητας KW και την αξονική δύναμη F_t .

Για την προσομοίωση μιας πραγματικής διαδικασίας λείανσης απαιτείται να ληφθεί υπόψη το ψυκτικό. Μια εφικτή προσέγγιση παρουσιάστηκε από τους Lowin και Des Ruisseaux. Με τη χρήση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας “α”, λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις στην επιφάνεια του τεμαχίου του ψυκτικού και της απαγωγής της θερμότητας. Μέσω πειραμάτων

ή μέσω συνθηκών ροής για επίπεδη πλάκα με εξαναγκασμένη συναγωγή (αναλυτική μέθοδος), καθορίζεται και η τιμή του “α”.

Η προσομοίωση FEA επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της κατεργασίας και βοηθά το χρήστη στην ανάλυση σύνθετων πειραματικών αποτελεσμάτων.

Αρκετά μοντέλα FEA αναπτύχθηκαν για την επιφανειακή λείανση. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο εφαρμόστηκε από τον Hoffmeister για να προσομοιώσει την κατανομή της θερμοκρασίας κατά τη λείανση. Μια άλλη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βασίστηκε στο μοντέλο του Jaeger για δύο διαστάσεις και είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών πεδίων στο τεμάχιο. Το συγκεκριμένο μοντέλο το οποίο μετέπειτα βελτιώθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των κρίσιμων θερμοκρασιών για τις επιδράσεις στη σκλήρυνση. Μια ακόμη μέθοδος είναι η τρισδιάστατη προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση της παροδικής μεταφοράς θερμότητας σε συνθήκες HEDG. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η στατική κατάσταση μεταφοράς θερμότητας επιτυγχάνεται μόλις επιτυγχάνεται το μέγιστο μήκος επαφής. Ακόμα, μελετάται η επίδραση της ψύξης του τοιχώματος με συναγωγή από το υγρό κατά τη λείανση σε λεπτές πλάκες χάλυβα 2 χιλιοστών (mm).

Η μέθοδος FEA εφαρμόζεται επίσης για την προσομοίωση προφίλ τεμαχίων που έχουν κατεργαστεί. Ο καθορισμός του προφίλ του φορτίου βοηθά στο να γίνει αντιληπτή η φθορά του εργαλείου στα πειράματα. Ακόμα, είναι σημαντικό το γεγονός πως ήδη έχει συμπεριληφθεί η επίπτωση μιας τυχαίας αλλαγής σε μία παράμετρο της διαδικασίας και έτσι μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων οι νέες παράμετροι.

Ένα επιπλέον παράδειγμα της εφαρμογής των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο υπολογισμός τόσο των θερμοκρασιών, όσο και των τάσεων στη λείανση σκληρυμένου χάλυβα. Το θερμικό φορτίο κατά τη διάρκεια της λείανσης προσομοιώνεται ως μία ομοιόμορφα ή τριγωνικά κατανεμημένη πηγή θερμότητας, η οποία κινείται σε ολόκληρη την επιφάνεια ενός θερμικά μονωμένου συστήματος. Οι υπολογισμένες θερμικές κατανομές βασίζονται στην ανάλυση των επιδράσεων της πρόωσης, της ροής θερμότητας και έχουν παρόμοιες τιμές με αυτές των πειραμάτων.

3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (COMSOL Multiphysics)

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα ισχυρό διαδραστικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση και την επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων που περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις (ΜΔΕ). Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις αποτελούν τη βάση για πολλούς από τους νόμους της επιστήμης και της φυσικής και παρέχουν τη βάση για τη μοντελοποίηση ευρέος φάσματος φαινομένων. Κατά την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων, το COMSOL Multiphysics χρησιμοποιεί την ιδιαίτερα επιτυχημένη και διαδεδομένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Σημαντικό πλεονέκτημα του COMSOL είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασής του με το MATLAB πράγμα που διευκολύνει πάρα πολύ, καθώς είναι εφικτή η αποθήκευση ενός υπολογιστικού μοντέλου σε μορφή κώδικα, στον οποίο μπορεί εύκολα να γίνονται αλλαγές και τροποποιήσεις.

Το COMSOL διαθέτει μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένους τομείς και είναι διαθέσιμα στην περιοχή add-on modules:

- Ενότητα AC/DC
- Ακουστική Ενότητα
- Ενότητα Χημικών Μηχανικών
- Ενότητα Επιστημών της Γης
- Ενότητα Μετάδοσης Θερμότητας
- Ενότητα MEMS
- Ενότητα RF
- Ενότητα Μηχανικής Κατασκευών

Αυτά τα έτοιμα προς εκτέλεση μοντέλα καλύπτουν πολλά κλασικά προβλήματα. Τα μοντέλα Multiphysics περιλαμβάνουν τη σύζευξη πολλών εξαρτημένων μεταβλητών διαφορετικής φύσης στο ίδιο μοντέλο.

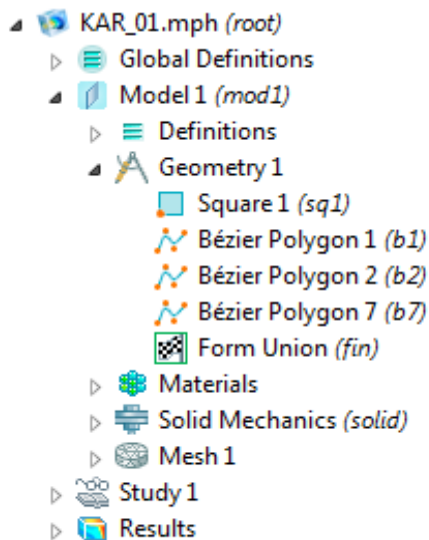
Για την επιτυχή δημιουργία ενός μοντέλου θα πρέπει να γίνουν με τη σειρά με την οποία παρουσιάζονται, οι παρακάτω διαδικασίες:

1. Κατασκευή της γεωμετρίας
2. Προσδιορισμός της φυσικής του προβλήματος-οριακές συνθήκες
3. Δημιουργία του πλέγματος (meshing)
4. Επίλυση του προβλήματος (solving)
5. Μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων (post-processing).

Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση της δημιουργίας του μοντέλου, πάνω στο οποίο έγιναν τα πειράματα, στο Comsol.

3.1 Δημιουργία Μοντέλου

Για να δημιουργηθεί το μοντέλο, αρχικά γίνεται επιλογή στο Model Wizard των διαστάσεων που πρέπει να έχει το μοντέλο, που στην περίπτωση που μελετάται είναι 2D, καθώς και τις ιδιότητες του μοντέλου, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι Structural Mechanics: Solid Mechanics. Στη συνέχεια εμφανίζεται το Study type που θα έχει το μοντέλο και για την παρούσα μελέτη θα είναι stationary (στατικό). Τέλος με την εντολή finish δημιουργείται το μοντέλο.



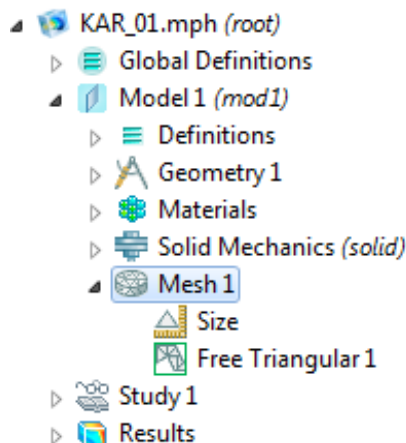
Σχήμα 3.1: Δημιουργία Γεωμετρίας του μοντέλου στο Comsol

3.1.1 Geometry

Από τη στιγμή που έχει δημιουργηθεί το μοντέλο, αυτό που επακολουθεί είναι ο ορισμός της γεωμετρίας των κομματιών που απαρτίζουν το μοντέλο. Αυτό πραγματοποιείται στο geometry του modeltree. Στην περίπτωση του προγράμματος δόθηκαν 4 γεωμετρίες(σχήμα 3.1).

3.1.2 Definitions

Αφού δόθηκε η γεωμετρία των κομματιών του μοντέλου, στη συνέχεια πρέπει να οριστούν τα ζεύγη επαφής (contact pairs), δηλαδή τα κομμάτια του μοντέλου τα οποία θα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους κατά το πείραμα, τα όρια του συστήματος (Boundary system) και οι άξονες (axis) που πρέπει να έχουν τα κομμάτια. Αυτό πραγματοποιείται στο Definitions (Ορισμοί) του model tree.



Σχήμα 3.2: Δημιουργία Meshing στα κομμάτια του μοντέλου

3.1.3 Materials

Από τη στιγμή που έχει δοθεί στο μοντέλο η γεωμετρία και αφού έχουν ορισθεί τα Definitions, πρέπει να επιλεγεί το υλικό από το οποίο θα είναι κάθε κομμάτι του μοντέλου. Αυτό πραγματοποιείται στον κόμβο των Materials του model tree. Επιλέγοντας κάποιο υλικό από τη λίστα του Materials, ταυτόχρονα παίρνει το κομμάτι τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του υλικού.

3.1.4 Solid Mechanics

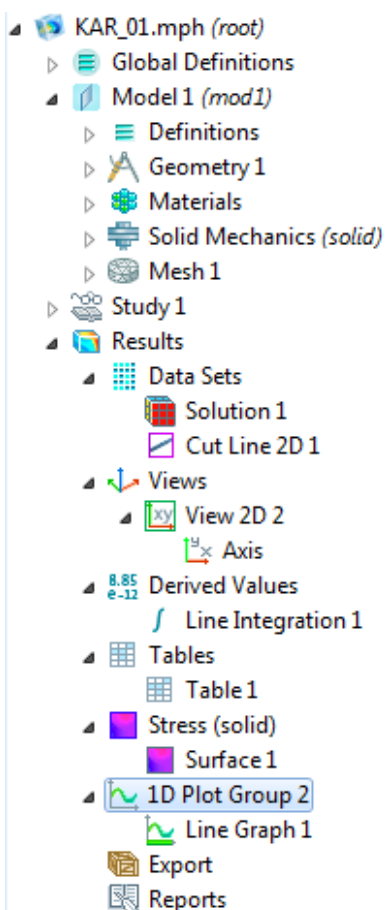
Στη συνέχεια, έπρεπε να οριστούν τα πεδία (domains) των κομματιών, οι εξισώσεις που θα ισχύουν για τα κομμάτια του μοντέλου, τα όρια (boundaries) κάθε κομματιού, όπως και τα σημεία που θα έρθουν σε επαφή (contacts) μεταξύ τους, και μετατόπιση (prescribed displacement) του σφαιρικού πολυμερούς και του

κόκκου. Αυτό πραγματοποιείται στον κόμβο Solid Mechanics, έτσι ώστε να δοθούν στα κομμάτια και οι ιδιότητες της στερεής μηχανικής.

3.1.5 Mesh

Το τελευταίο βήμα πριν τρέξει το πρόγραμμα και να επέλθουν επιθυμητά αποτελέσματα είναι το meshing (πλέγμα) των κομματιών του προβλήματος.

Σε αυτό τον κόμβο του model tree, ορίζεται το μέγεθος των στοιχείων (elementsize), η βαθμονόμηση (calibrate) των στοιχείων, δηλαδή αν είναι general physics, fluid dynamics ή plasma, την πυκνότητα της βαθμονόμησης των στοιχείων, αν θα είναι normal, fine, finer, coarse, coarser κ.λπ., τις παραμέτρους του μεγέθους των στοιχείων και τον τριγωνισμό τους (triangulation) (σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.3: Αποτελέσματα της διεργασίας του μοντέλου

3.1.6 Study

Τέλος στον κόμβο Study δίνεται η εντολή στο πρόγραμμα να τρέξει τα δεδομένα του πειράματος.

3.1.7 Results

Μόλις τελειώσει η λειτουργία του κόμβου Study, τότε εμφανίζονται τα αποτελέσματα στον κόμβο Results, τα οποία όπως φαίνονται και στο σχήμα 3.3 είναι τα συνολικά δεδομένα(data sets) του μοντέλου στο οποίο συμπεριλαμβάνονται οι λύσεις του, η προβολή(views) του μοντέλου στη διάσταση 2D, οι προκύπτουσες τιμές(derived values), όπου φαίνονται τα αποτελέσματα των δυνάμεων που ασκήθηκαν στη διάρκεια του πειράματος, οι πίνακες(tables) με τα δεδομένα του πειράματος, τα αποτελέσματα των πιέσεων του συστήματος(stress) και οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων(plot group).

3.2 Δημιουργία προσομοιωτικού μοντέλου και επιβεβαίωση του μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων

Ένας ασφαλής τρόπος επιβεβαίωσης ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι η προσομοίωση δεδομένων που έχουν επαληθευτεί και επιβεβαιωθεί μέσω πολλών πειραματικών μελετών. Επομένως για το μοντέλο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε απαραίτητη

η επιβεβαίωση του μοντέλου εργασίας στα πεπερασμένα στοιχεία και συγκεκριμένα στο πρόγραμμα COMSOL που περιγράφηκε, μέσω της προσομοίωσης των πειραμάτων λείανσης που πραγματοποιήθηκαν στη διατριβή της κ. Καραχάλιου.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η κ. Καραχάλιου πραγματοποίησε πειράματα και υπολογισμούς λείανσης με τροχούς διαμέτρων 250mm και βάθη κοπής 25μm και 15μm, με ταχύτητα περιστροφής ίση με 26m/min και χρήση υλικού 15CrNi6 σε δύο διαφορετικούς τροχούς, τους 90A80J5V217 και 50A60M4V217. Στο σχήμα 3.4, είναι ευδιάκριτα τα χαρακτηριστικά των δύο λειαντικών τροχών που χρησιμοποίησε η κ. Καραχάλιου, καθώς και το σύστημα συμβολισμού των λειαντικών τροχών. Οι δύο αυτοί τροχοί είναι παρόμοιων προδιαγραφών με κύρια διαφορά το μέγεθος της κόκκωσης. Δεδομένου ότι η κόκκωση είναι ένα μέγεθος που εκφράζει τη μέση διάσταση των κόκκων δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της λείανσης με εργαλείο μοναδικό κόκκο με διαστάσεις προερχόμενες από την ανάλυση της κόκκωσης. Έτσι μελετιούνται δύο περιπτώσεις λείανσης με κόκκους κόκκωσης 60 και 80. Η κόκκωση είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που σύμφωνα με τη διατριβή της κ. Καραχάλιου και το σχήμα 2.2 αντιστοιχεί σε κόκκους μέσης διάστασης 275μm και 195μm αντίστοιχα.

Στο σχήμα φαίνεται επίσης η διάμετρος των δύο τροχών, η οποία και στις δύο περιπτώσεις είναι 250mm. Οι συνθήκες κοπής και στις δύο περιπτώσεις έχουν βάθος κοπής $A = 25\mu\text{m}$ ή $15\mu\text{m}$, $q = 104$ και ταχύτητα περιστροφής $V_s = 26\text{m/s}$, το υλικό κατεργασίας και οι δυνάμεις που ασκήθηκαν κατά τη διεργασία, με τιμές $F_x = 12\text{N/mm}$ και $F_y = 15\text{N/mm}$, για τον άξονα x και y αντίστοιχα, για τον πρώτο τροχό και $F_x = 5.8\text{N/mm}$ και $F_y = 8\text{N/mm}$, για τον άξονα x και y αντίστοιχα, για το δεύτερο τροχό. Αυτές τις δυνάμεις αντίδρασης κατά την κοπή πρέπει να επιβεβαιωθούν, έτσι ώστε να είναι εφικτά τα αποτελέσματα του πειράματος της

κ.Καραχάλιου. Έτσι θα επιβεβαιωθεί και η ορθότητα του μοντέλου πετρερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε για τα νέα εργαλεία.

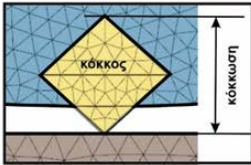
Λειαντικός Τροχός	90A80J5V217	50A60M4V217
Διάμετρος τροχού	250mm	250mm
Συνθήκες κοπής	A=25μm q=104, vs=26m/s	A=25μm q=104, vs=26m/s
Υλικό κατεργασίας	15CrNi6N	15CrNi6N
κόκκωση (μέγεθος κόκκου)	80 0.195mm	60 0.275mm
Uy 25μm	Fx	12 N/mm
	Fy	15 N/mm
Uy 15μm	Fx	7 N/mm
	Fy	10 N/mm

υλικό κόκκων σκληρότητα τύπος συνδετικού

π.χ.: **51 - A - 36 - L - 5 - V - 23**

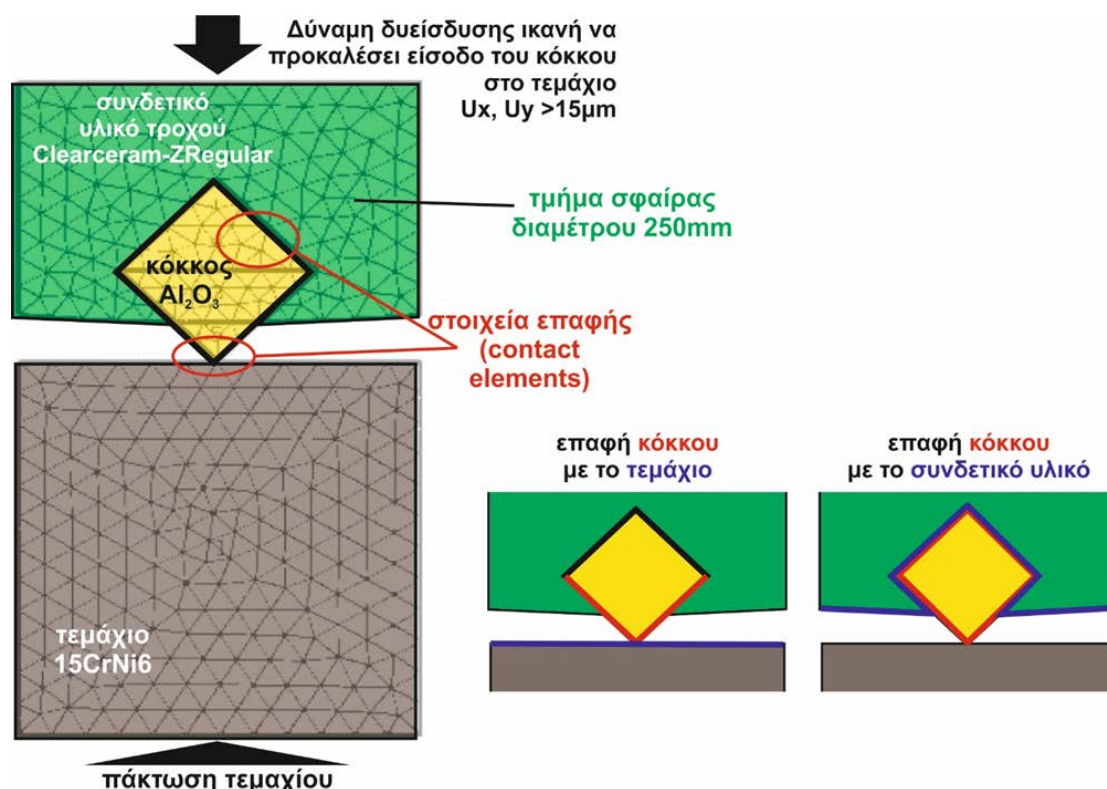
υπογραφή κατασκευαστή **κόκκωση** υφή υπογραφή κατασκευαστή

χονδρόκοκκος	μέσης κόκκωσης	λεπτόκοκκος	πολύ λεπτόκοκκος
8	30	70	220
10	36	80	240
12	46	90	280
14	54	100	320
16	60	120	400
20		150	500
24		180	600



κόκκωση χαρακτηρίζεται εκείνη η παράμετρος που περιγράφει το μέσο μέγεθος των κόκκων του λειαντικού τροχού. Αναφέρεται στη διάμετρο των μεμονομένων κόκκων.

Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστικά λειαντικών τροχών και συνθήκες λείανσης στη διατριβή της Καραχάλιου



Σχήμα 3.5: Μοντέλο προσομοίωσης για επαλήθευση

Για να γίνουν οι δοκιμές που χρειάζονται, για να επιβεβαιωθούν τα πειράματα της κ.Καραχάλιου, έπρεπε να δημιουργηθούν τα απαραίτητα μοντέλα. Τα δύο μοντέλα που τελικά δημιουργήθηκαν για επιβεβαίωση, έχουν τη μορφή του σχήματος 3.5 και διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος του κόκκου.

Σύμφωνα με τις μελέτες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, η γωνία κλίσης του κόκκου με την οποία εισάγεται ο κόκκος στο τεμάχιο, παίζει σημαντικό ρόλο και επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε σε αυτά τα μοντέλα γωνία κλίσης ίση με 45° που είναι μια ενδιάμεση κατάσταση επιρροής της αιχμής του κόκκου. Ο κόκκος είναι συνδεδεμένος με το σύνολο του τροχού και το συνδετικό υλικό του και επομένως ένα σωστό μοντέλο προσομοίωσης απαιτεί να υπάρχει και ο τροχός στο σύνολο. Σχεδιάστηκε λοιπόν ο τροχός με διάμετρο 250mm. Με τέτοια διάσταση τροχού το μοντέλο θα ήταν τεράστιο και το σημείο ενδιαφέροντος πολύ πολύ μικρό με αποτέλεσμα να χρειάζεται πολύς χρόνος επίλυσης και μεγάλη υπολογιστική δυνατότητα. Έτσι σχεδιάστηκε μόνο ένα μικρό κομμάτι του τροχού, γύρω από τον κόκκο του ενδιαφέροντος.

Στο σχήμα είναι ευδιάκριτο το σημείο στο οποίο γίνεται η πάκτωση του τεμαχίου, η διεύθυνση της δύναμης διεύθυνσης, του συνδετικού υλικού και του κόκκου, καθώς και τα στοιχεία επαφής μεταξύ του συνδετικού υλικού του κόκκου και του τεμαχίου. Η δημιουργία των μοντέλων αυτών, πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση τους.

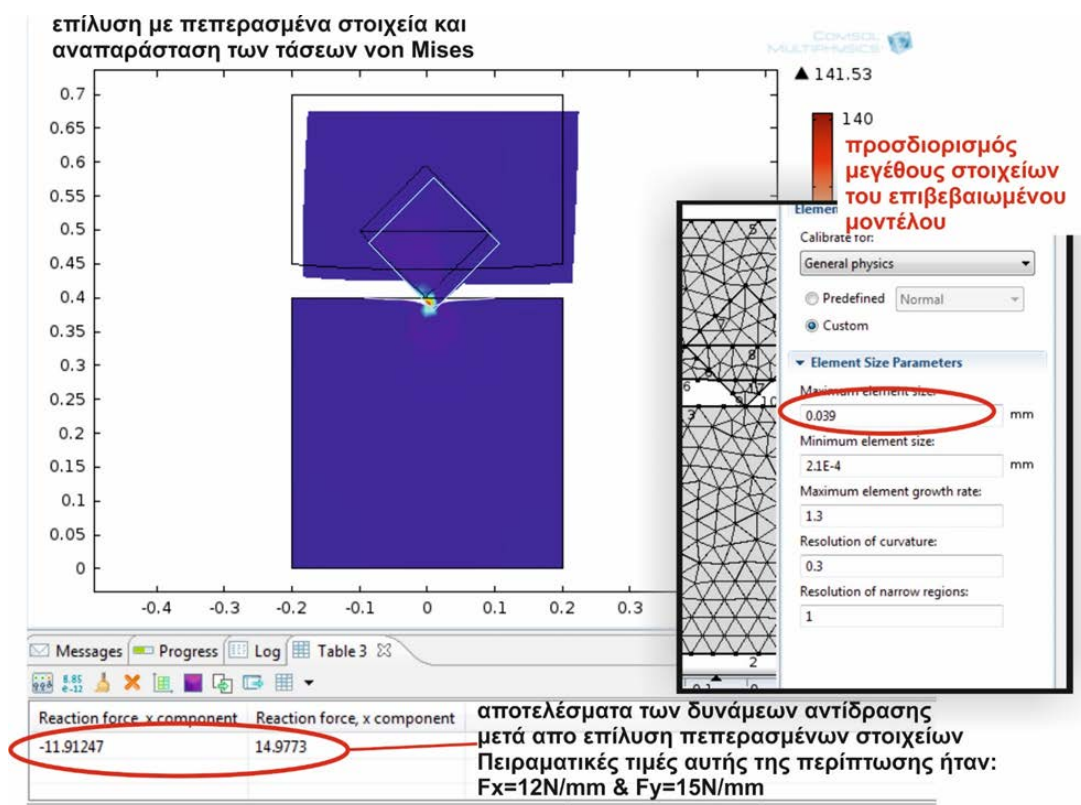
Αρχικά γίνεται η επιλογή των μαθηματικών μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση. Επιλέχθηκε 2D επίλυση Structural Mechanics προβλήματος σε στατική κατάσταση. Για τη δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου, σχεδιάστηκαν 4 γεωμετρικά σχήματα. Ένα τετράγωνο διαστάσεων πλευράς 0.4mm, το οποίο είναι το δοκίμιο στο οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία της λείανσης, δύο πολύγωνα τύπου Bezier, τα οποία απαρτίζουν τον κόκκο αιχμής 45° του πειράματος, και ένα πολύγωνο τύπου Bezier τμήμα σφαίρας διαμέτρου 250mm το οποίο και αντιπροσωπεύει τον τροχό της λείανσης.

Στη συνέχεια, έγινε ο ορισμός των Definitions ή contact elements. Σε αυτό τον κόμβο, του model tree, έγινε ο ορισμός των κομματιών που θα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 και έπειτα ορίστηκαν τα όρια των αξόνων του συστήματος, οι οποίοι είναι Global Cartesian (spatial) και είναι τριών διευθύνσεων. Αφού έγινε και ο ορισμός των Definitions, σειρά έχει ο ορισμός των υλικών από το οποίο θα αποτελείται κάθε κομμάτι του μοντέλου. Στην περίπτωση του μοντέλου, το τεμάχιο το οποίο είναι προς επεξεργασία, να είναι το 15CrNi6N, είναι υλικό σκληρό και δύσκαμπτο. Ο τροχός σύμφωνα με τις πληροφορίες της ονοματολογίας των τροχών από τον κατασκευαστή, είναι από κεραμικό (glass-ceramic) υλικό και διαθέτει όλες τις ιδιότητες ελαστοπλαστικού υλικού. Τέλος, για το υλικό του κόκκου σύμφωνα με την ονοματολογία είναι Al_2O_3 (οξειδίο του αλουμινίου), το οποίο είναι το πιο κατάλληλο από τα υλικά για αυτή τη χρήση.

Μετά τον ορισμό και των υλικών των τεμαχίων, το επόμενο στάδιο είναι να δοθεί στα κομμάτια η ιδιότητα της στερεής μηχανικής, όπως και να ορισθούν τα όρια της μέσα στο σύστημα. Αρχικά, δόθηκαν σε όλα τα πεδία των κομματιών οι ιδιότητες των γραμμικών ελαστικών υλικών, που στην περίπτωση του μοντέλου δίνονται αυτόματα από τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί πιο πάνω, και ορίσθηκαν και οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν από το πρόγραμμα κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας. Στη συνέχεια ορίσθηκαν, ξανά, τα σημεία τα οποία θα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, τα οποία είναι τα ίδια που έχουν προαναφερθεί, για να πάρουν τις ιδιότητες της στερεής μηχανικής, καθώς και τα σημεία που θα δεχθούν σταθερή πίεση. Τέλος, ορίζεται η μετατόπιση, η οποία θα ασκηθεί πάνω στο τεμάχιο και θα δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Σύμφωνα με τα δεδομένα της διατριβής θα εφαρμοστούν για κάθε μοντέλο 2 διαφορετικές μετατοπίσεις της τάξης των 25μm και 15μm.

Το τελευταίο στάδιο, πριν γίνει η επεξεργασία των δεδομένων, είναι ο ορισμός του Meshing (πλέγματος). Αυτό πραγματοποιήθηκε στον κόμβο Meshing, του model tree, όπου ορίστηκε το μέγεθος των στοιχείων του meshing και η βαθμονόμηση του μεγέθους. Η παράμετρος του μεγέθους του πλέγματος είναι στην ουσία το μεταβλητό στοιχείο στις προσομοιώσεις που έχουν δημιουργηθεί έτσι ώστε να προκύψουν τα πραγματικά δεδομένα της διατριβής. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν θα παραμένουν σταθερά όλα τα δεδομένα εκτός του μεγέθους των στοιχείων του πλέγματος το οποίο και θα μεταβάλλεται αναλόγως ώστε να προκύψουν οι δυνάμεις αντίδρασης των πειραμάτων.

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται τυπικά μια επίλυση όπου επιτεύχθηκαν οι επιθυμητές δυνάμεις αντίδρασης στο μοντέλο λείανσης. Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται αριθμητικά και αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα για τους 2 τροχούς που μελετήθηκαν και για τα 2 βάθη κοπής.



Σχήμα 3.6: Επίλυση λείανσης με πεπερασμένα στοιχεία για τον τροχό 90A80J4V217 σε βάθος 25μm με σκοπό την επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων της διατριβής της κ. Καραχάλιου

Σύμφωνα με τις επιλύσεις που έγιναν στο πλαίσιο επιβεβαίωσης του μοντέλου παρατηρήθηκε ότι για τον κάθε τροχό προέκυψε ένα ενιαίο μοντέλο ανεξάρτητα από το βάθος κοπής που επιτεύχθηκε. Στην περίπτωση του τροχού με τους μικρούς κόκκους το μέγεθος των στοιχείων προσδιορίστηκε ίσο με περίπου 4 μm ενώ στην περίπτωση τροχού με μεγαλύτερους κόκκους (274μm) το μέγεθος των στοιχείων της προσομοίωσης απαιτήθηκε να μεγαλώσει και να προσαρμοστεί στα περίπου 5 μm. Ένα αποτέλεσμα αναμενόμενο για τη φιλοσοφία των πεπερασμένων στοιχείων.

	Μετατόπιση τροχού/κόκκου $U_y=25\mu\text{m}$	Μετατόπιση τροχού/κόκκου $U_y=15\mu\text{m}$
Λειαντικός τροχός 90A80J5V217	Δυνάμεις (Reaction Forces): $F_y= 15 \text{ N/mm}$ $F_x= 12 \text{ N/mm}$	Δυνάμεις (Reaction Forces): $F_y= 8 \text{ N/mm}$ $F_x= 5.8 \text{ N/mm}$
	μέγεθος στοιχείων (element size) = 0.039 mm	μέγεθος στοιχείων (element size) = 0.038 mm
Λειαντικός τροχός 50A60M4V217	Δυνάμεις (Reaction Forces): $F_y= 10 \text{ N/mm}$ $F_x= 7 \text{ N/mm}$	
	μέγεθος στοιχείων (element size) = 0.049 mm	

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων επαλήθευσης της διατριβής Καραχάλιου για δημιουργία έμπιστου μοντέλου προσομοίωσης.

3.3 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία

3.3.1 Προσομοίωση λείανσης εργαλείων μεταβλητής γεωμετρίας

Αφού έγινε η επιβεβαίωση των μοντέλων, της κ. Καραχάλιου, το επόμενο βήμα είναι να γίνει χρήση διαφορετικών υλικών στον κόκκο του μοντέλου, στο συνδετικό υλικό και στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, ώστε να επιτευχθεί η σωστή προσομοίωση της λείανσης με παραμορφώσιμα εργαλεία. Η αλλαγή στα υλικά των κομματιών του μοντέλου έγιναν με σκοπό να γίνουν μετρήσεις στις μεταβολές που σημειώνονται μεταξύ των υλικών ως προς τις τάσεις von Mises, αλλά και των reaction Forces.

Οι προσομοιώσεις της δυναμικής συμπεριφοράς έγιναν σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (FEM) COMSOL multiphysics όπου το εργαλείο παρομοιάζεται με ένα τροχό σφαιρικής γεωμετρίας διαμέτρου 25mm, ο κόκκος της λείανσης παρομοιάζεται με ρόμβο διάστασης 275μm και το τεμάχιο που λειανείται με κύβο. Έγινε επανάληψη της προσομοίωσης για διάφορες συνθήκες ώστε να προσδιοριστούν όλες οι δυνατές συμπεριφορές του νέου εργαλείου πριν από τη δημιουργία του.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την περίπτωση των δοκιμών, είναι το μοντέλο με τροχό διαμέτρου 250mm, βάθος κοπής 25μm, ταχύτητα περιστροφής ίση με $V_s= 26\text{m/min}$ και με παραμέτρους πλέγματος (meshing):

- Μέγιστο μέγεθος στοιχείου ίσο με 0.0039mm.
- Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου ίσο με $2.1\text{e-}4\text{mm}$.
- Μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης στοιχείου ίσο με 1.3.
- Ανάλυση της καμπυλότητας ίση με 0.3.
- Ανάλυση των στενών περιοχών ίση με 1.

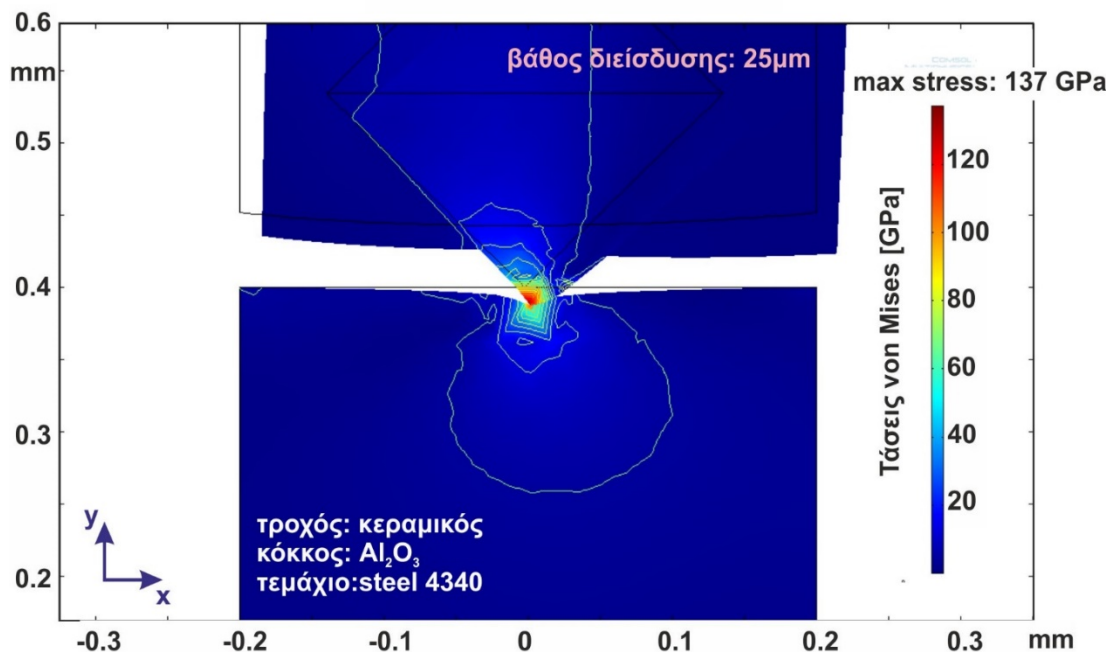
Αρχικά έγινε αλλαγή μόνο στον κόκκο του μοντέλου, με υλικό τεμαχίου το Steel AISI 4340 και υλικό τροχού το Clearceram-ZRegular, και στη συνέχεια έγιναν διάφορες αλλαγές ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά των μεταβλητών εργαλείων ανάλογα με το υλικό χρήσης.

Τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον κόκκο του μοντέλου είναι τα εξής:

- Οξειδίο του Αλουμινίου (Al_2O_3)
- Ανθρακοπυρίτιο (SiC)
- Διοξειδίο του Πυριτίου (SiO_2)
- Καρβίδιο του Τιτανίου (TiC)
- Διοξειδίο του Ζιρκονίου (ZrO_2)

3.3.1.1 Κόκκος οξειδίου του αλουμινίου Al_2O_3

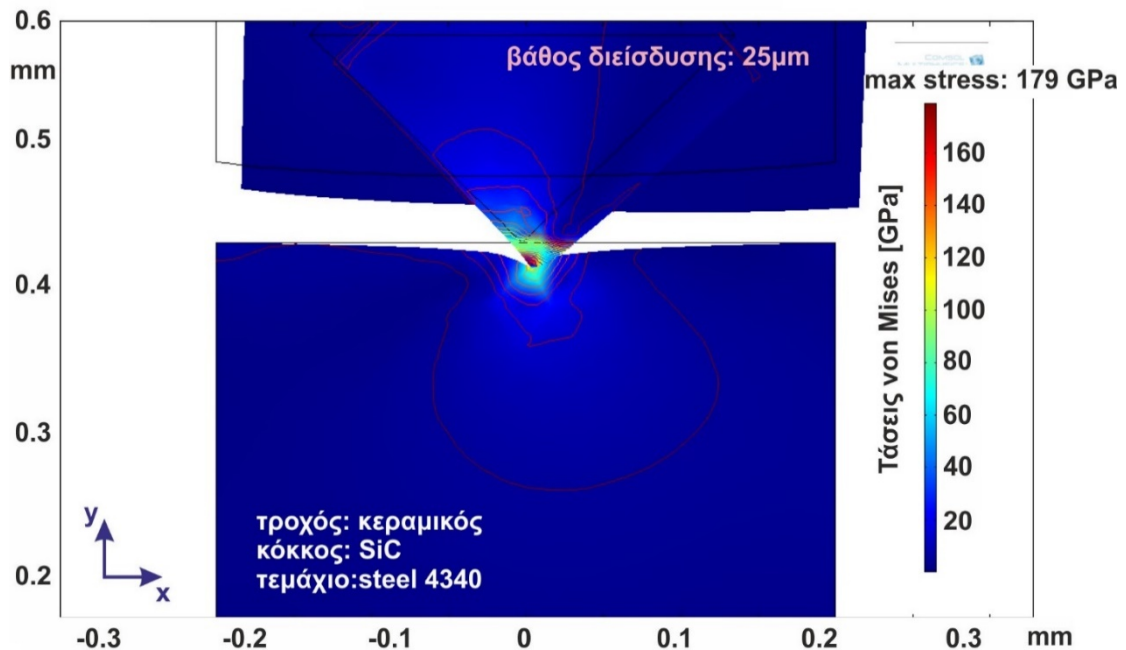
Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Clearceram-Z με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 137GPa.



Σχήμα 3.7: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση κόκκου Al_2O_3

3.3.1.2 Κόκκος ανθρακοπυριτίου SiC

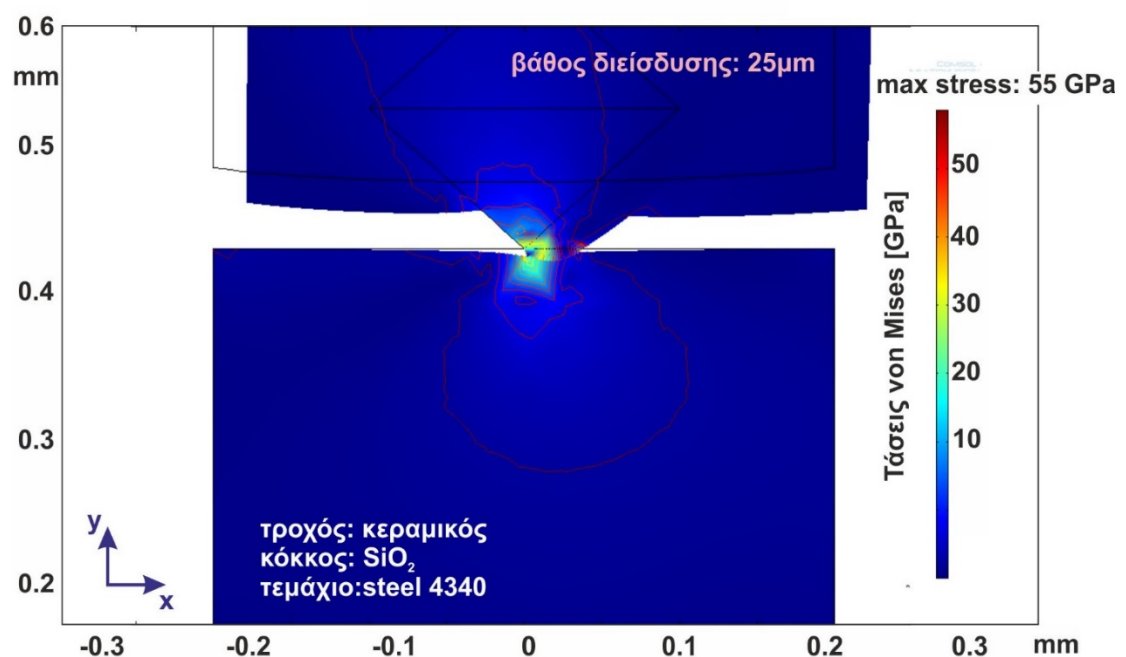
Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Clearceram-Z με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 179GPa.



Σχήμα 3.8: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση κόκκου SiC

3.3.1.3 Κόκκος οξειδίου του πυριτίου SiO₂

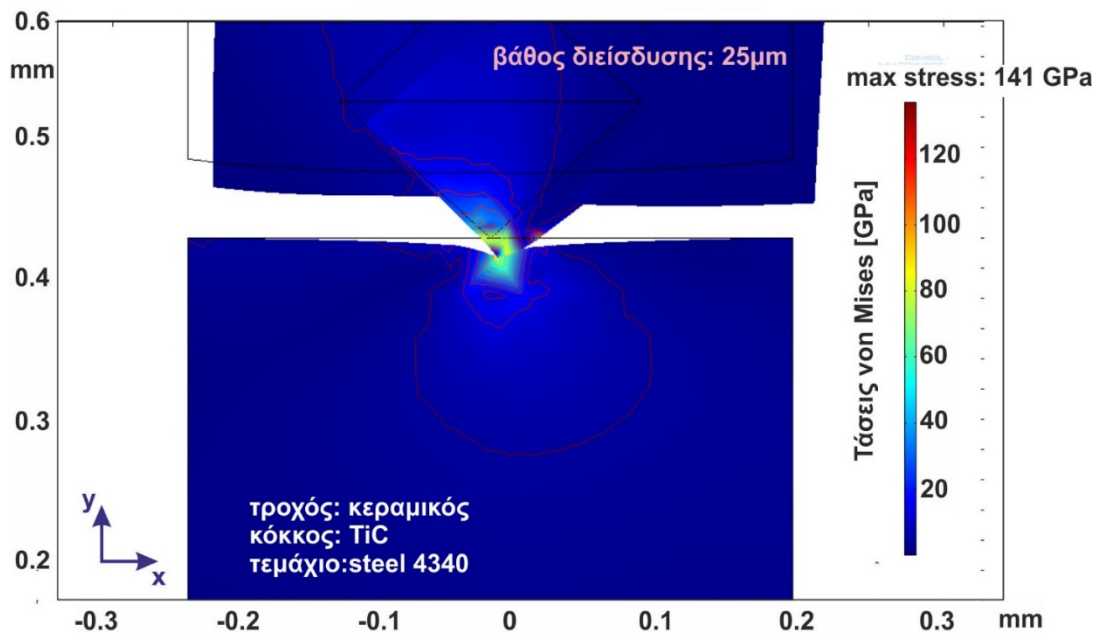
Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiO₂, τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Clearceram-Z με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 55GPa.



Σχήμα 3.9: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση κόκκου SiO₂

3.3.1.4 Κόκκος καρβιδίου του Τιτανίου TiC

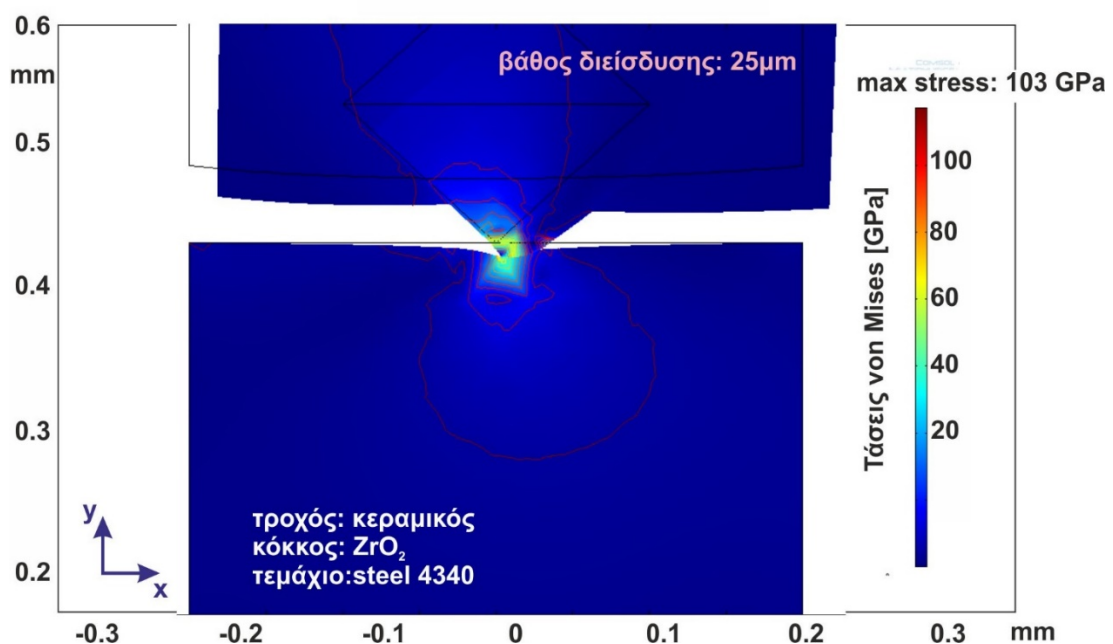
Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου TiC, τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Clearceram-Z με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 141GPa.



Σχήμα 3.10: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση κόκκου TiC

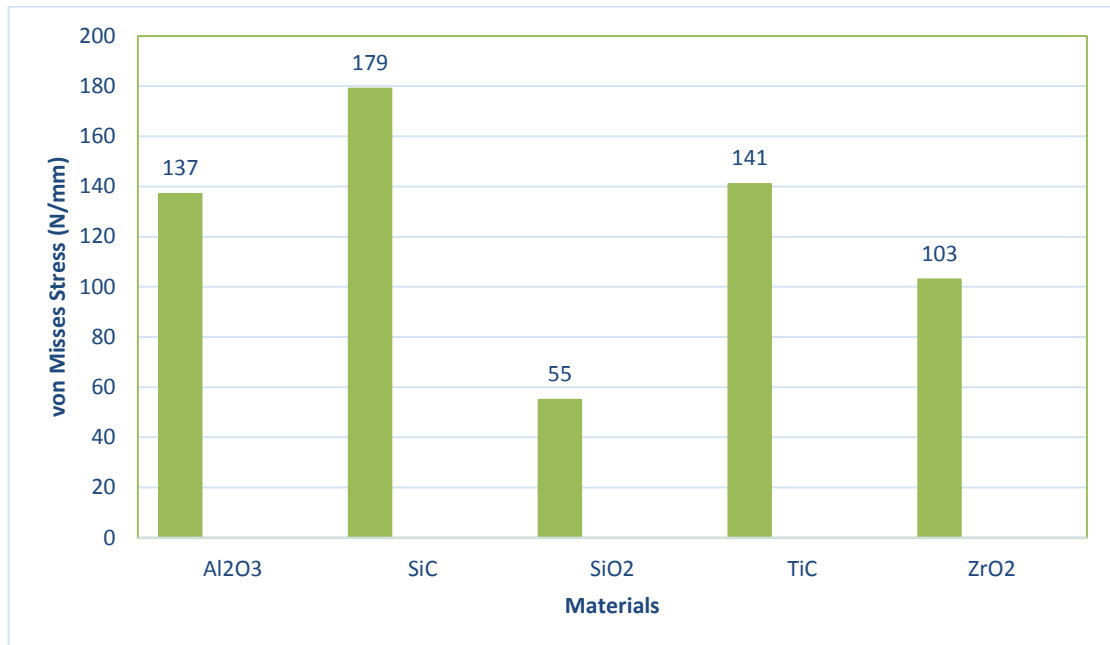
3.3.1.5 Κόκκος διοξειδίου του Ζιρκονίου ZrO₂

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου ZrO₂, τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Clearceram-Z με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 103GPa.



Σχήμα 3.11: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση κόκκου ZrO₂

Από τα πειράματα προέκυψε, ότι το πιο κατάλληλο υλικό, για χρήση στον κόκκο, από πλευράς μεγαλύτερης τιμής τάσης von Misses του μοντέλου είναι το Ανθρακοπυρίτιο με τιμή von Misses 179GPa, αμέσως μετά το Καρβίδιο του Τιτανίου με τιμή von Misses 141GPa, το Οξειδίο του Αργιλίου με τιμή von Misses 137GPa, Ζιρκόνιο με τιμή von Misses 103GPa και τελευταίο το Διοξείδιο του Πυριτίου με τιμή von Misses 55GPa. (πίνακας 3.2)



Πίνακας 3.2: Μέγιστες τάσεις von Misses ανά υλικό κόκκου για τροχό Clearceram και τεμάχιο Stell 4340.

3.3.2 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για διάφορους κόκκους εργαλείων

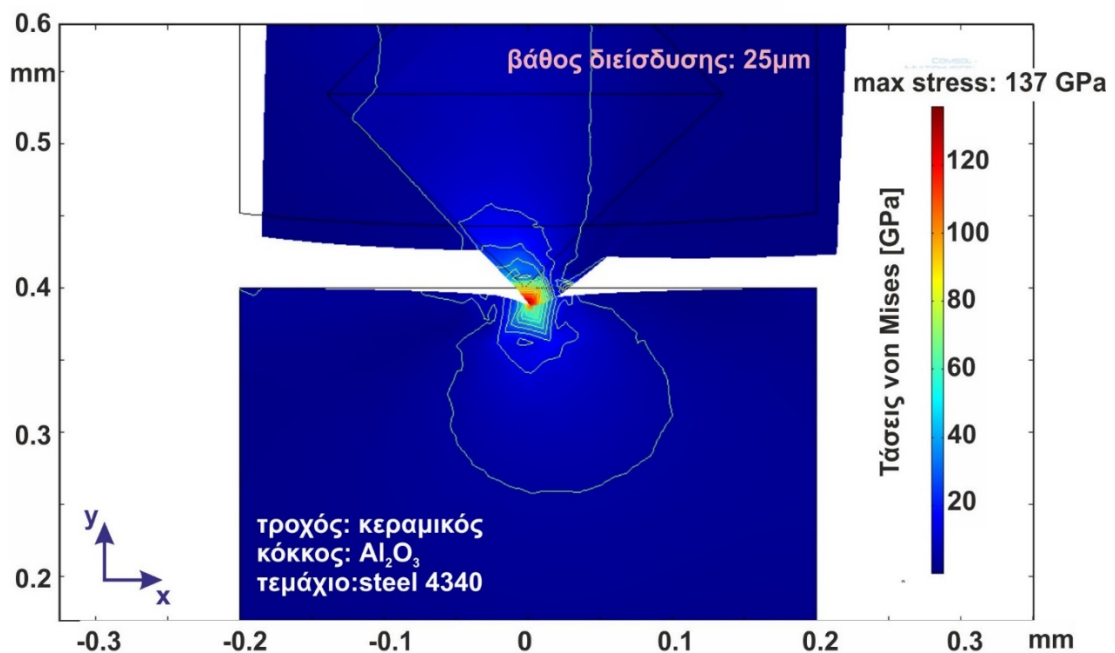
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την περίπτωση των δοκιμών, είναι το ίδιο μοντέλο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση δοκιμών με τροχό διαμέτρου 250mm, βάθος κοπής 25μm και μέγιστο μέγεθος στοιχείου ίσο με 0.0039mm. Έγινε αλλαγή μόνο στο υλικό του τροχού του μοντέλου (δηλ. στο συνδετικό υλικό μεταξύ των κόκκων), με υλικό τεμαχίου το Steel AISI 4340 και υλικό κόκκου το οξειδίο του αλουμινίου (Al₂O₃), και στη συνέχεια έγιναν διάφορες αλλαγές ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά των μεταβλητών εργαλείων ανάλογα με το υλικό χρήσης.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως συνδετικό υλικό είναι τα παρακάτω:

- Clear ceram- Z HS
- Εποξική Ρητίνη EPON 838 (Epoxyepon 838))
- Εποξική Ρητίνη X238 (Filled epoxyresin (X238))
- Πολυσιλικόνη (Polysilicon)
- Διοξείδιο του Πυριτίου (SiO₂)
- Σιλικόνη (Silicon)

3.3.2.1 Τροχός/συνδετικό υλικό κεραμικού

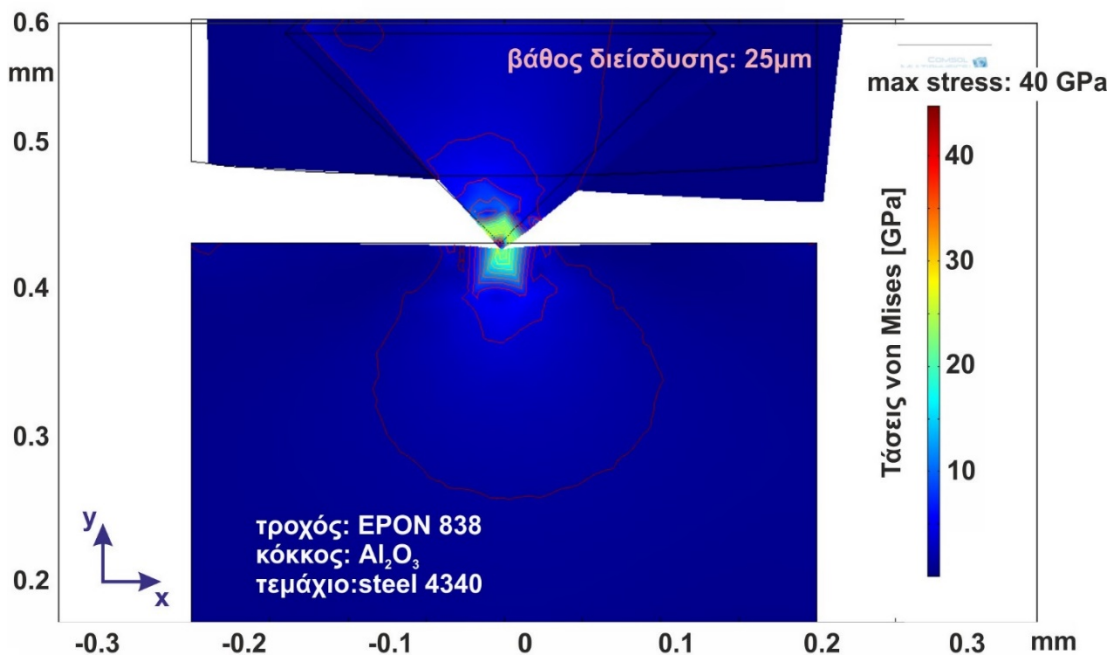
Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Clearceram-Z HS με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 137GPa.



Σχήμα 3.12: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση κεραμικού συνδετικού υλικού

3.3.2.2 Τροχός/συνδετικό υλικό εποξικής ρητίνης EPON 838

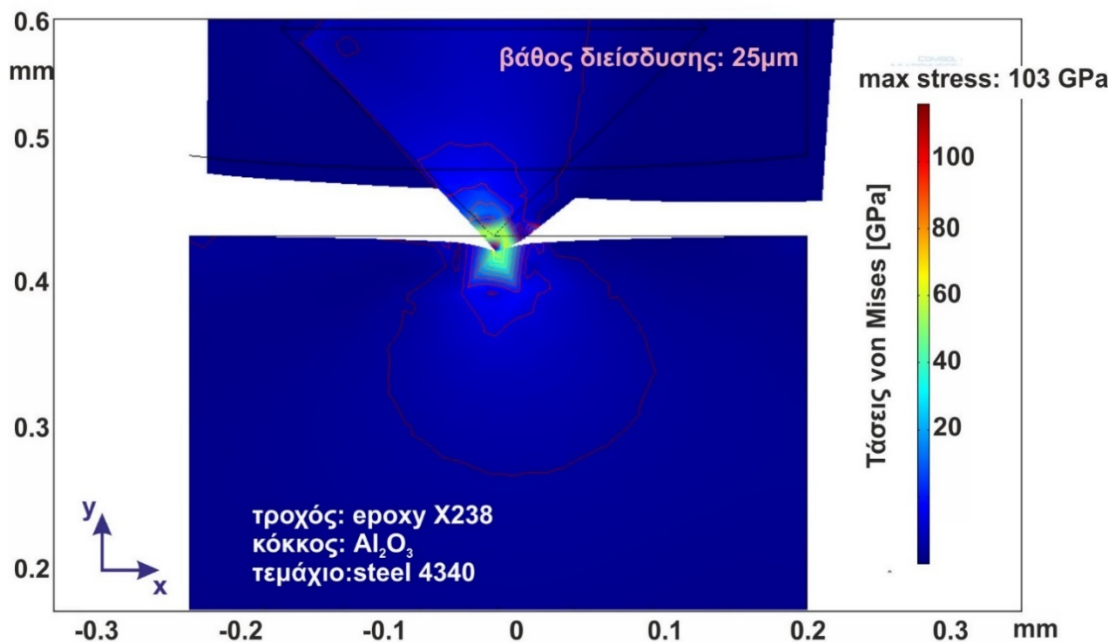
Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού EPON 838 με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 40GPa.



Σχήμα 3.13: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση συνδετικού υλικού εποξικής ρητίνης EPON 838

3.3.2.3 Τροχός/συνδετικό υλικό Εποξικής ρητίνης X238

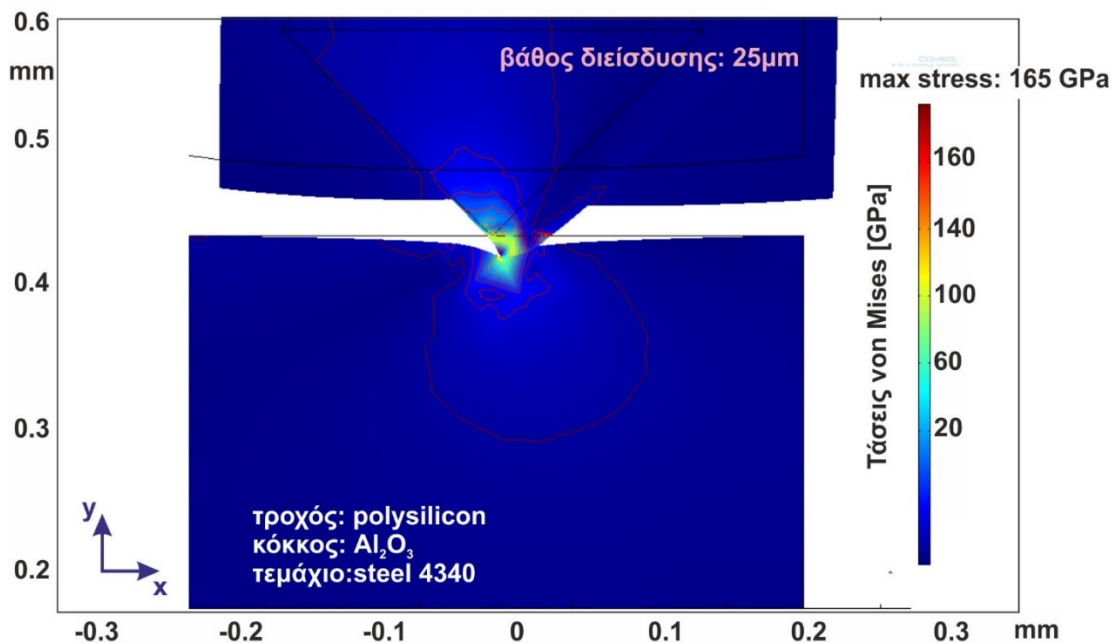
Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού EPON epoxy X238 με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 103GPa.



Σχήμα 3.14: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση συνδετικού υλικού εποξικής ρητίνης X238

3.3.2.4 Τροχός/συνδετικό υλικό polysilicon

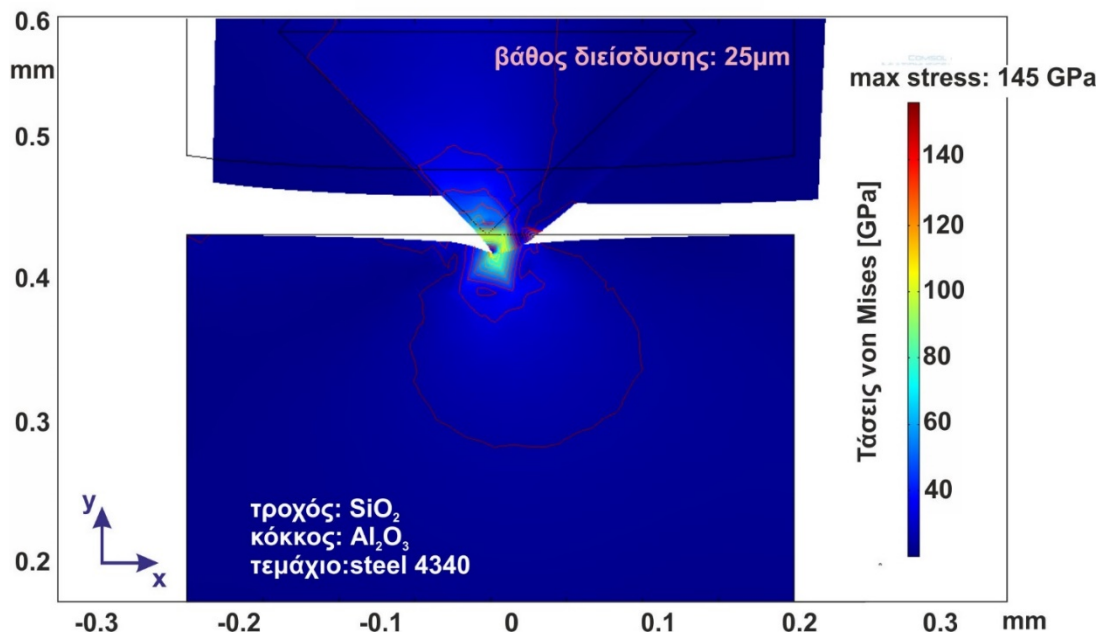
Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Polysilicon με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 165GPa.



Σχήμα 3.15: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση συνδετικού υλικού πολυσιλικόνης

3.3.2.5 Τροχός/συνδετικό υλικό SiO_2

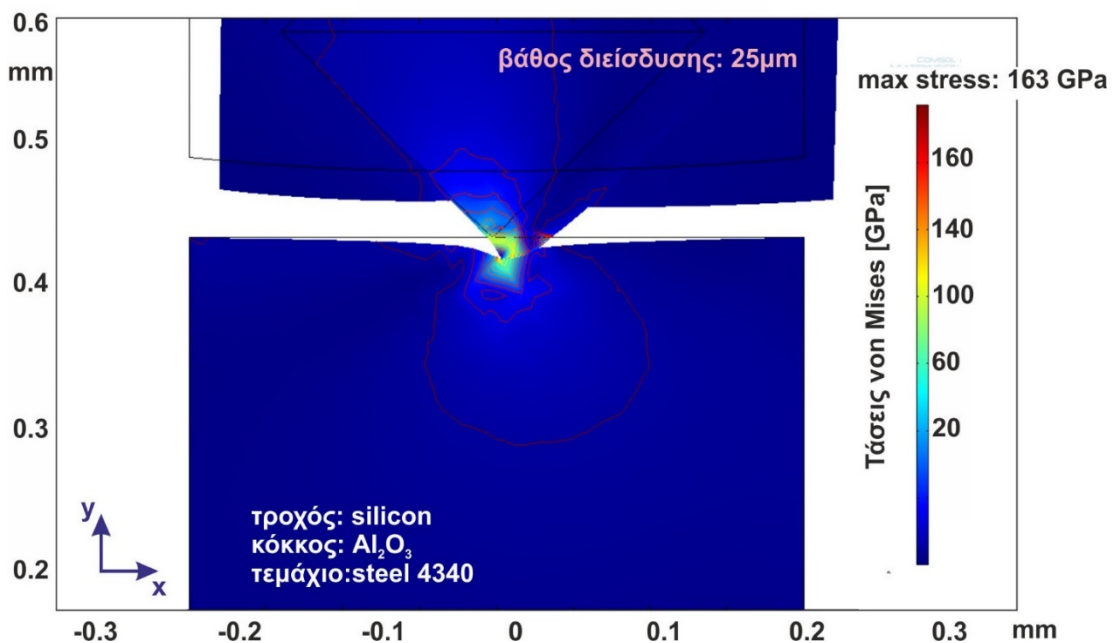
Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού SiO_2 με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 145GPa.



Σχήμα 3.16: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση συνδετικού SiO_2

3.3.2.6 Τροχός/συνδετικό υλικό σιλικόνης

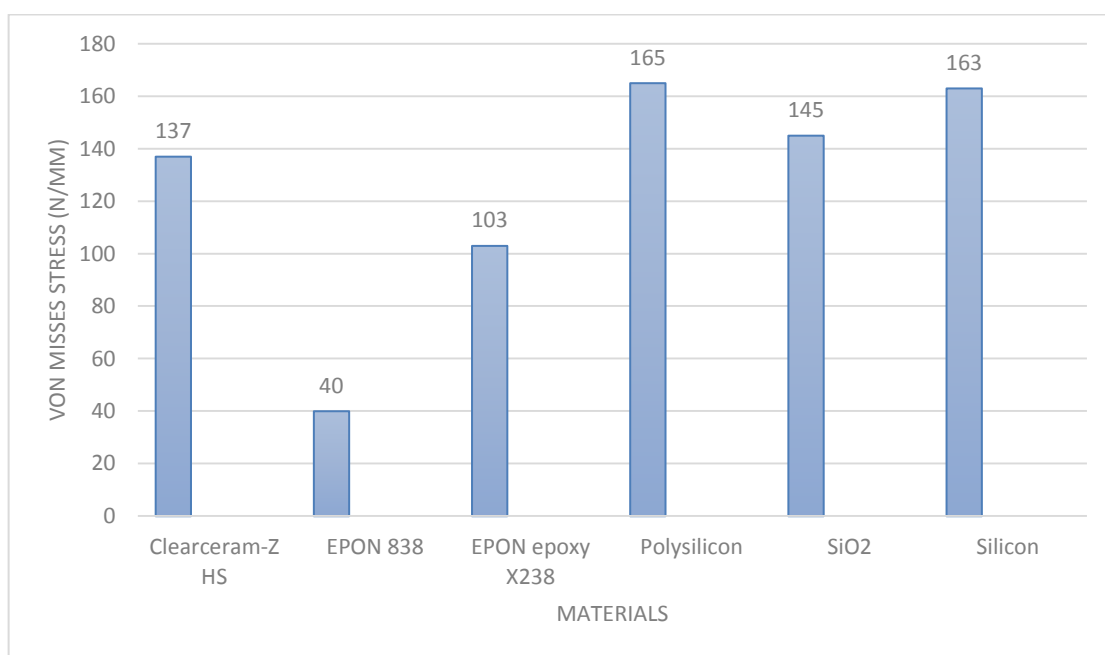
Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού Silicon με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 163GPa.



Σχήμα 3.17: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση συνδετικού υλικού σιλικόνης

Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν και από τη μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού του τροχού. Μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα το είδος του υλικού προέκυψαν και αναμενόμενη κοινή συμπεριφορά σε υλικά της ίδιας κατηγορίας όπως είναι οι σιλικόνες και οι εποξικές ρητίνες. Παράλληλα παρατηρήθηκε αστάθεια στη συμπεριφορά του τροχού και στο σχήμα του στην περίπτωση των εποξικών ρητινών, κάτι που ήταν αναμενόμενο λόγω της φύσης του υλικού και παράλληλα είναι εξυπηρετικό για την παραμόρφωση του εργαλείου σύμφωνα με την προτίμηση του χειριστή όπως προβλέπει το ζητούμενο ερευνητικό πρόγραμμα.

Από τα πειράματα προέκυψε, επίσης, ότι το πιά κατάλληλο υλικό, για χρήση στο υλικό τροχού, από πλευράς μεγαλύτερης τιμής τάσης von Misses του μοντέλου είναι η Πολυσιλικόνη με τιμή von Misses 165GPa, αμέσως μετά η Σιλικόνη με τιμή von Misses 163GPa, το Διοξείδιο του Πυριτίου με τιμή von Misses 145GPa, το Clearceram- ZHS με τιμή von Misses 137GPa, η Εποξική Ρητίνη X238 με τιμή von Misses 103GPa και τελευταία η Εποξική Ρητίνη EPON 838 με τιμή von Misses 40GPa. (πίνακας 3.3)



Πίνακας 3.3: Μέγιστες τάσεις von Misses ανά υλικό τροχού για κόκκο Al_2O_3 και τεμάχιο Steel 4340.

3.3.3 Αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για διάφορα υλικά στο τεμάχιο

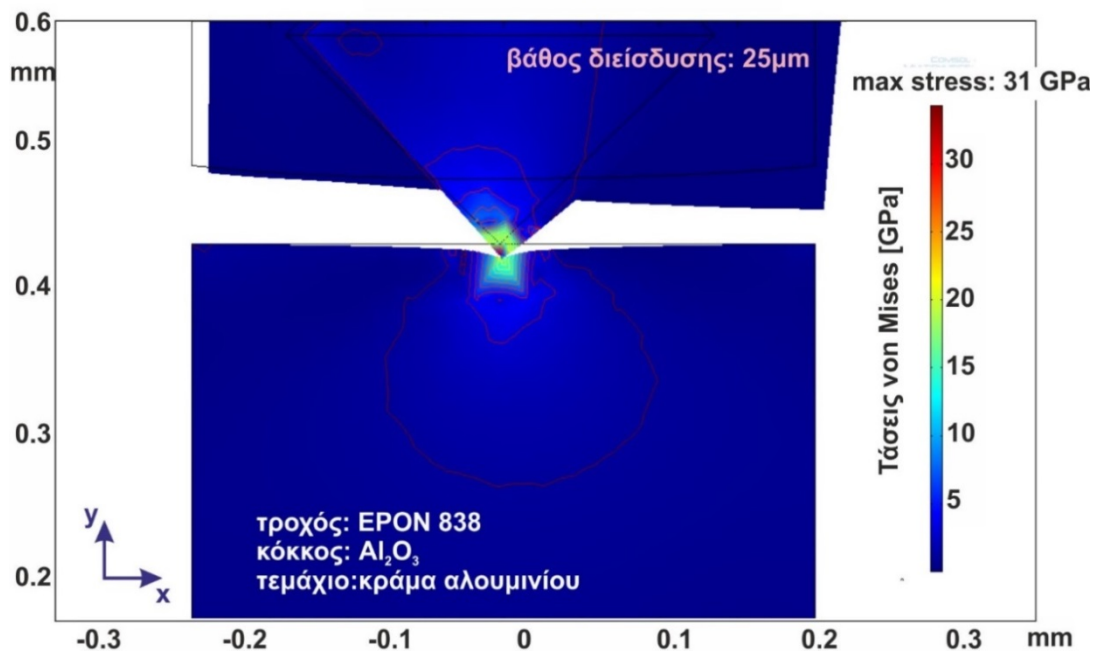
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την περίπτωση των δοκιμών, είναι το ίδιο μοντέλο με τροχό διαμέτρου 250mm, βάθος κοπής 25μm και με μέγεθος στοιχείου ίσο με 0.0039mm. Τέλος έγινε αλλαγή μόνο στο υλικό του τεμαχίου του μοντέλου, χρησιμοποιώντας υλικό τροχού την εποξική ρητίνη (EPON 838) και υλικό στον κόκκο του εργαλείου το οξείδιο του αλουμινίου (Al_2O_3), και στη συνέχεια έγιναν διάφορες αλλαγές ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά των μεταβλητών εργαλείων ανάλογα με το υλικό χρήσης.

Τα διάφορα υλικά που δοκιμάστηκαν στο τεμάχιο κατεργασίας είναι:

- Αλουμίνιο (Aluminium)
- Υψηλής Αντοχής Κράμα Χάλυβος (High strength alloy steel)
- Πλαστικό (PVC)
- Steel AISI 4340

3.3.3.1 Κράμα αλουμινίου ως υλικό τεμαχίου

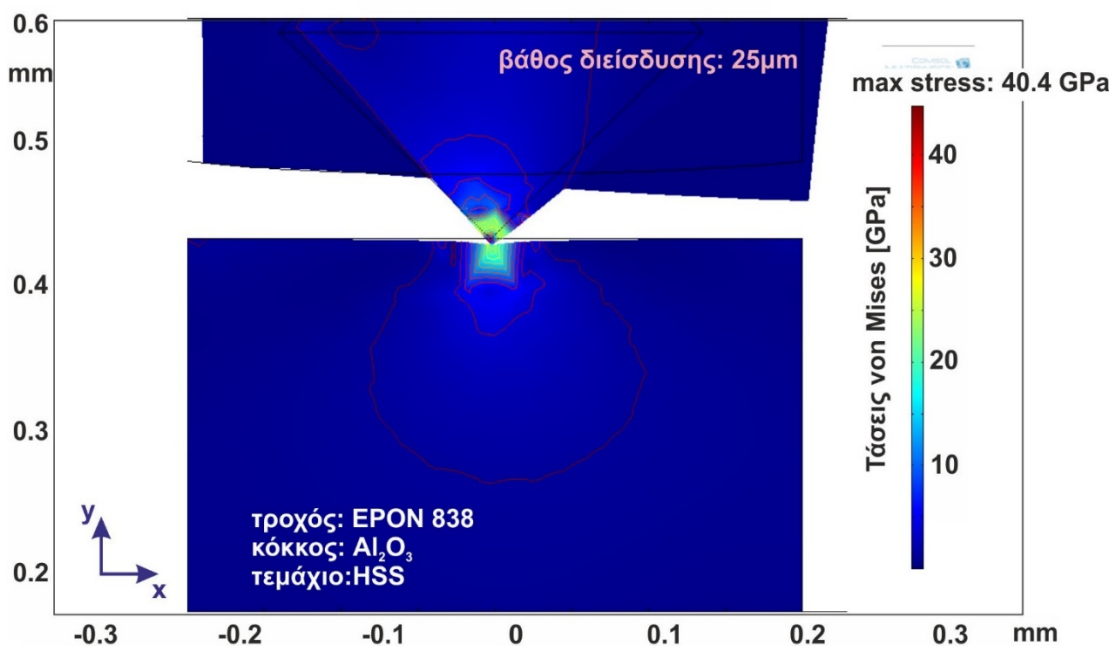
Στο σχήμα 3.18 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminium και τροχού EPON 838 με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 31GPa.



Σχήμα 3.18: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση αλουμινίου ως υλικό τεμαχίου

3.3.3.2 Υψηλής αντοχής Κράμα χάλυβα HSS ως υλικό τεμαχίου

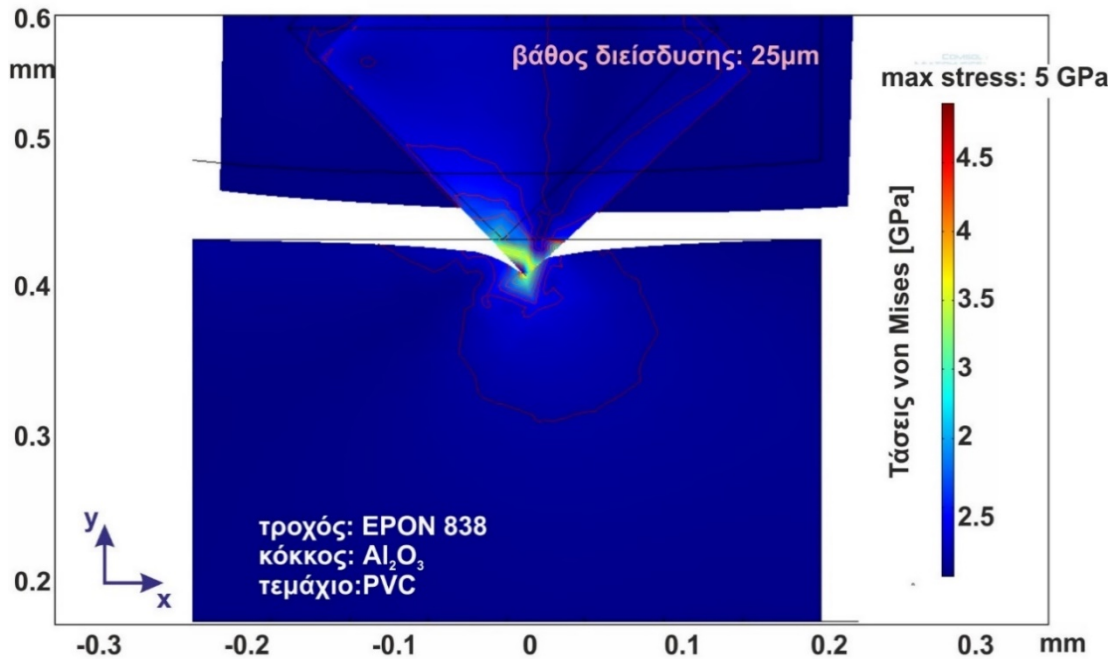
Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου HSS και τροχού EPON 838 με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής τάσης von Mises ίση με 40.4GPa.



Σχήμα 3.19: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση HSS ως υλικό τεμαχίου

3.3.3.3 Πλαστικό (PVC) υλικό τεμαχίου

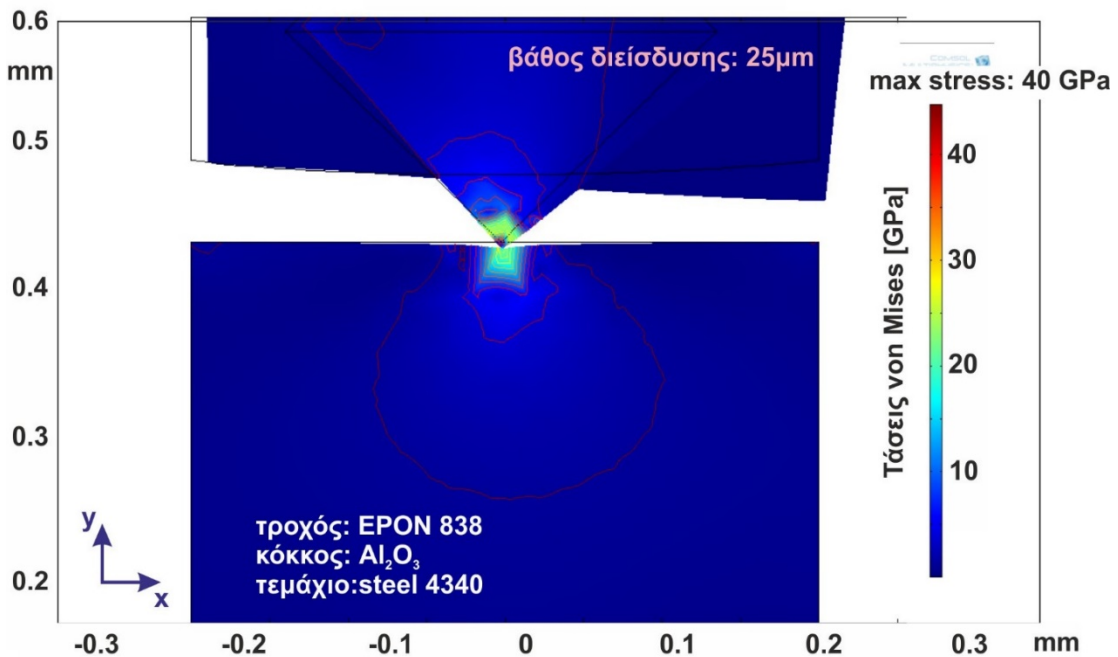
Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου PVC και τροχού EPON 838 με βάθος κοπής 25 μm και με τιμή τάσης von Mises ίση με 5GPa.



Σχήμα 3.20: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση πλαστικού τεμαχίου

3.3.3.4 Χάλυβας Steel AISI 4340 ως υλικό τεμαχίου

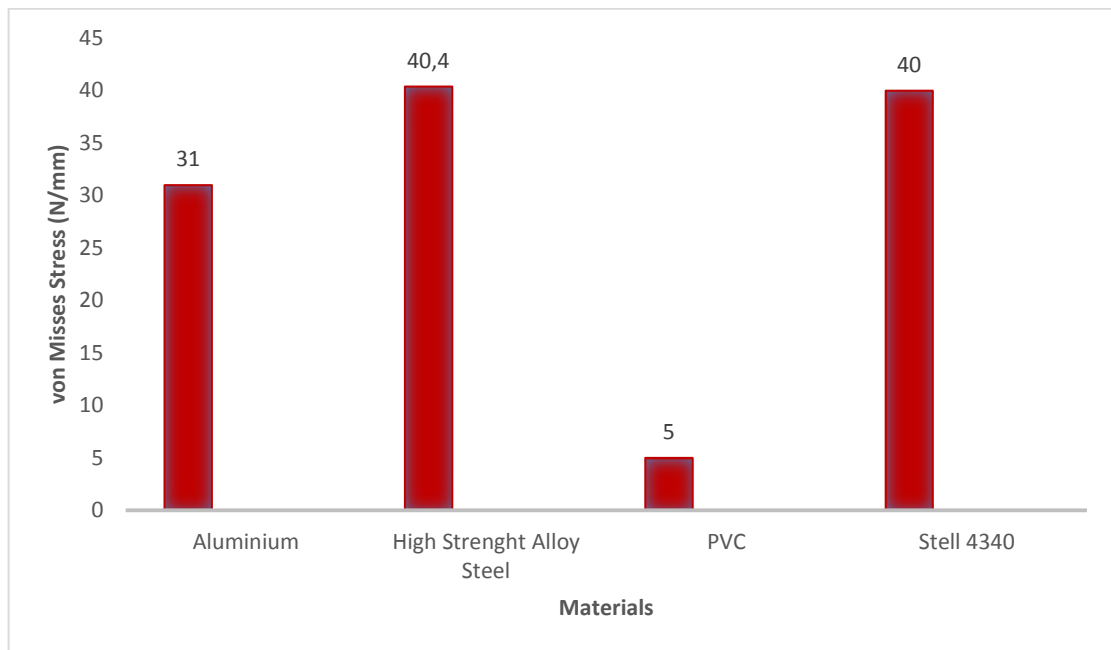
Στο σχήμα 3.21 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Steel 4340 και τροχού EPON 838 με βάθος κοπής 25 μm και με τιμή τάση von Mises ίση με 40GPa.



Σχήμα 3.21: Αποτελέσματα τάσεων von Mises για την περίπτωση χαλύβδινου τεμαχίου

Παρατηρήθηκε ότι παρ'όλες τις διαφορές μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν ριζικά εκτός από την περίπτωση της κοπής πλαστικού τεμαχίου.

Ακόμα, παρατηρήθηκε ότι το πιο κατάλληλο υλικό, για χρήση στο υλικό του τεμαχίου, από πλευράς μεγαλύτερης τιμής τάσης von Misses του μοντέλου είναι ο Υψηλής Αντοχής Κράμα Χάλυβος (High strength alloy steel) με τιμή von Misses 40.4GPa, αμέσως μετά το Stell 4340 με τιμή von Misses 40GPa, η Αλούμινα με τιμή von Misses 31GPa και τελευταίο το PVC με τιμή von Misses 5GPa.(πίνακας 3.4)



Πίνακας 3.4: Μέγιστες τάσεις von Misses ανά υλικό τεμαχίου για κόκκο Al_2O_3 και τροχό EPON 838.

4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Deform 3D)

Το Deform-3D είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό ανάλυσης στο κόσμο για τη βελτιστοποίηση μετάλλων, γυαλιού και άλλων μη μεταλλικών σχηματισμών, θερμικών επεξεργασιών και των διαδικασιών κατεργασίας. Επίσης βοηθάει στη βελτιστοποίηση της ποιότητας των προϊόντων και στη μείωση του κόστους παραγωγής και των προθεσμιών για τις διαδικασίες της σφυρηλάτησης, της εξώθησης, της κύλισης, της στρέψης και της διάτρησης. Ακόμα, με το Deform, υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της μικροδομικής εξέλιξης, των παραμορφώσεων του προϊόντος και των φάσεων μετασχηματισμού.

Επίσης, είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να γίνεται ακριβής, γρήγορη και εύκολη προσομοίωση κρύας, ζεστής και καυτής κατασκευαστικής διαδικασίας για τη βελτιστοποίηση του προπλάσματος, της διαδικασίας αντιμετώπισης προβλημάτων και της ανάλυσης των τάσεων.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται από κατασκευαστές που εργάζονται για την κατασκευή εξοπλισμού αεροδιαστημικών, πυρηνικών, αυτοκινητοβιομηχανικών και βιομηχανικών εταιριών, καθώς και από κορυφαία ερευνητικά ιδρύματα μεταλλουργίας και προηγμένης παραγωγής.

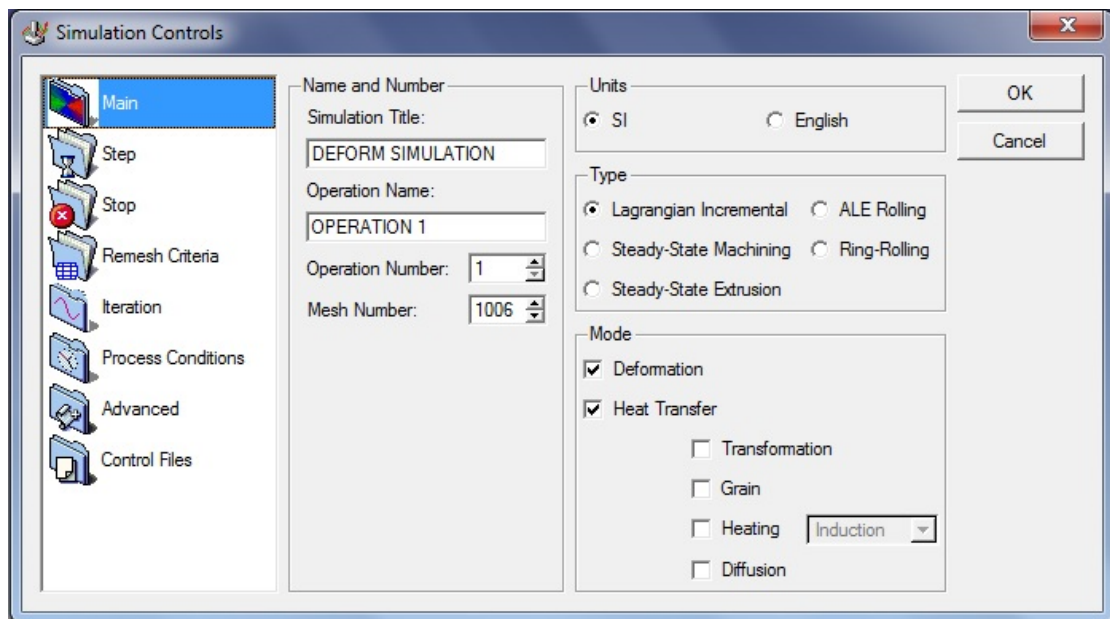
Το Deform είναι γνωστό για το ότι επιφέρει σημαντικά οφέλη στην ανάπτυξη νέων καινοτόμων μεθόδων παραγωγής, στην κατασκευή αξιόπιστων εργαλείων, στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ελέγχου και ποιότητας και στη δημιουργία ανώτερης μικροδομής και δύναμης στα προϊόντα.

Επομένως, το Deform είναι σε θέση να μελετήσει όλο το σύνολο της αλυσίδας παραγωγής από τη δημιουργία του πλινθώματος, της διαμόρφωσης, της μεταλλοτεχνίας και της θερμικής επεξεργασίας, μέχρι τη δημιουργία του τελικού προϊόντος. Ταυτόχρονα, η σύγχρονη διεπαφή του χρήστη έχει σχεδιαστεί, έτσι, ώστε να είναι προσβάσιμη τόσο στους μηχανικούς παραγωγής όσο και στους ερευνητές.

Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση της δημιουργίας του μοντέλου, πάνω στο οποίο έγιναν τα πειράματα, στο Deform 3-D.

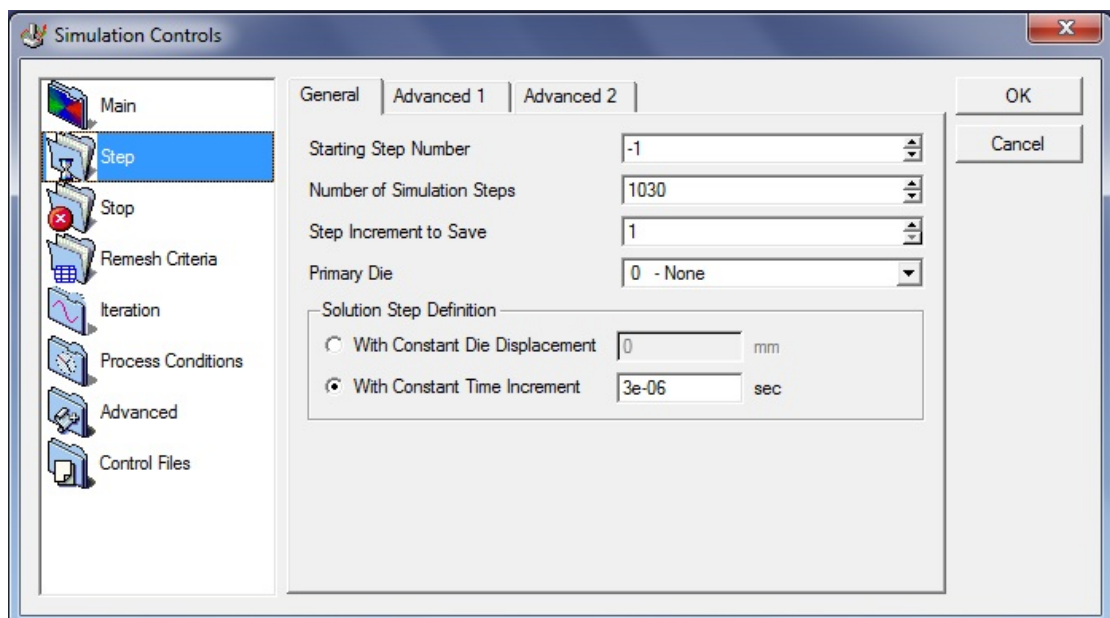
4.1 Δημιουργία Μοντέλου

Για τη δημιουργία του μοντέλου, αρχικά, γίνεται επιλογή, στις γενικές ρυθμίσεις προσομοίωσης (Simulation Controls), στο κύριο παράθυρο του προσομοιωτικού προγράμματος, των μονάδων του προγράμματος από το Αγγλικό σύστημα στο σύστημα του SI. Στη συνέχεια, γίνεται επιλογή του τύπου του προγράμματος να είναι Lagrangian Incremental, και της λειτουργίας του, όπου στην περίπτωση του μοντέλου είναι το Deformation και Heat Transfer. Τέλος, γίνεται η επιλογή του meshing, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι 1006. (σχήμα 4.1)



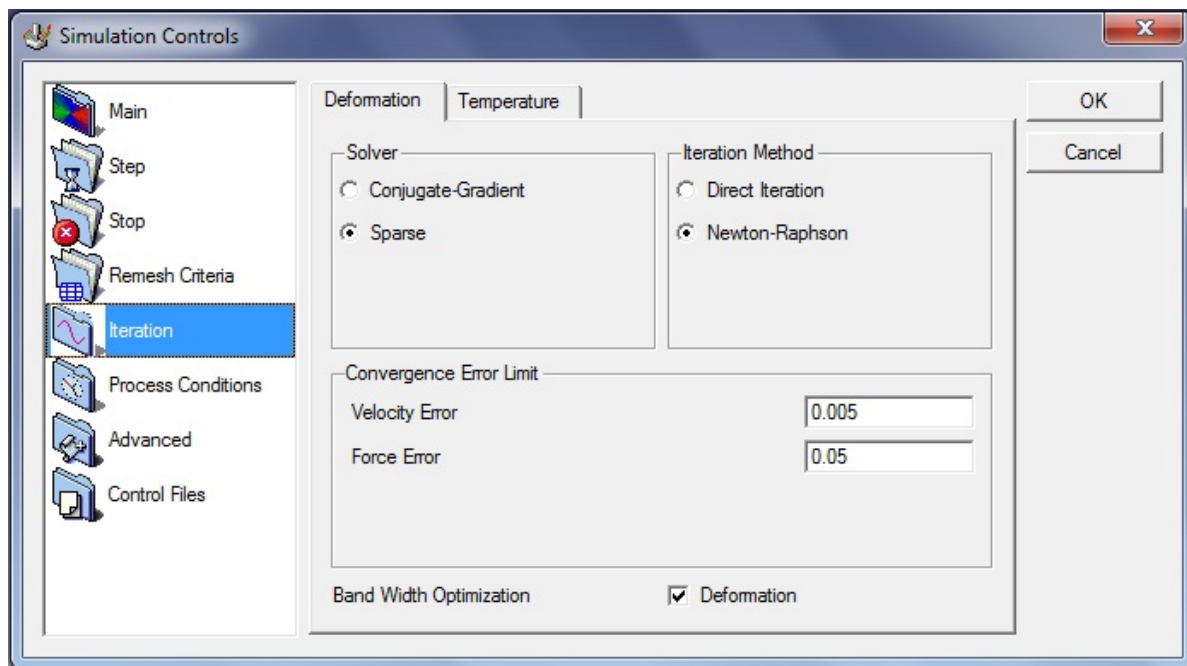
Σχήμα 4.1: Πίνακας Γενικών Ρυθμίσεων Προσομοίωσης

Στη συνέχεια, στο παράθυρο του προσομοιωτικού προγράμματος για τα βήματα(Steps), γίνεται επιλογή για το αρχικό βήμα του μοντέλου(Starting Step Number), το οποίο είναι το -1, τον αριθμό των βημάτων που θα πραγματοποιήσει το μοντέλο(Number of Simulation Steps), το οποίο ισούται με 1030, τον αριθμό των βημάτων που θα αποθηκεύονται(Step Increment to Save), και στην προκειμένη περίπτωση όλα αποθηκεύονται και τέλος τις λύσεις των ορισμένων βημάτων(Solution Step Definition) με σταθερό χρονικό βήμα(with constant time increment) ίσο με $3e-06$ sec.([σχήμα 4.2](#))



Σχήμα 4.2: Παράθυρο του προσομοιωτικού προγράμματος για τα βήματα(Steps)

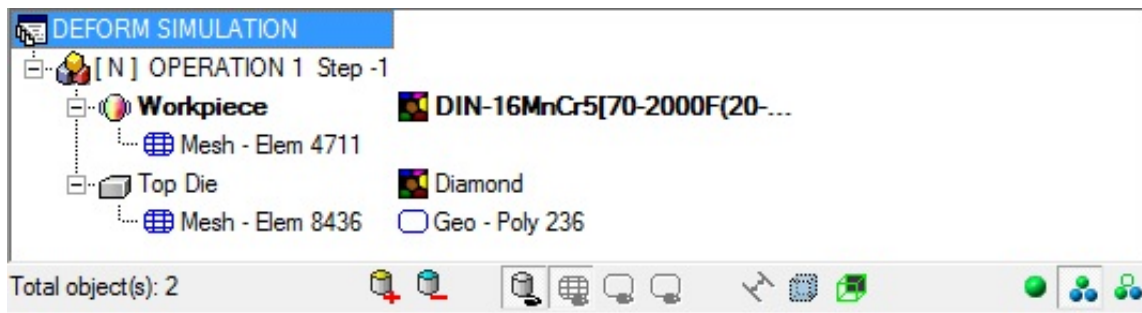
Το τελευταίο βήμα πριν τη δημιουργία των σχημάτων του μοντέλου, στο παράθυρο του προσομοιωτικού προγράμματος για τις επαναλήψεις(Iteration)([σχήμα 4.3](#)) που θα πραγματοποιηθούν, γίνεται ορισμός των επιλυτών και των μεθόδων επανάληψης που θα χρησιμοποιηθούν για το πρόγραμμα, όπου στην περίπτωση αυτή έγινε επιλογή για το πρώτο το Sparse και για το δεύτερο το Newton-Raphson.



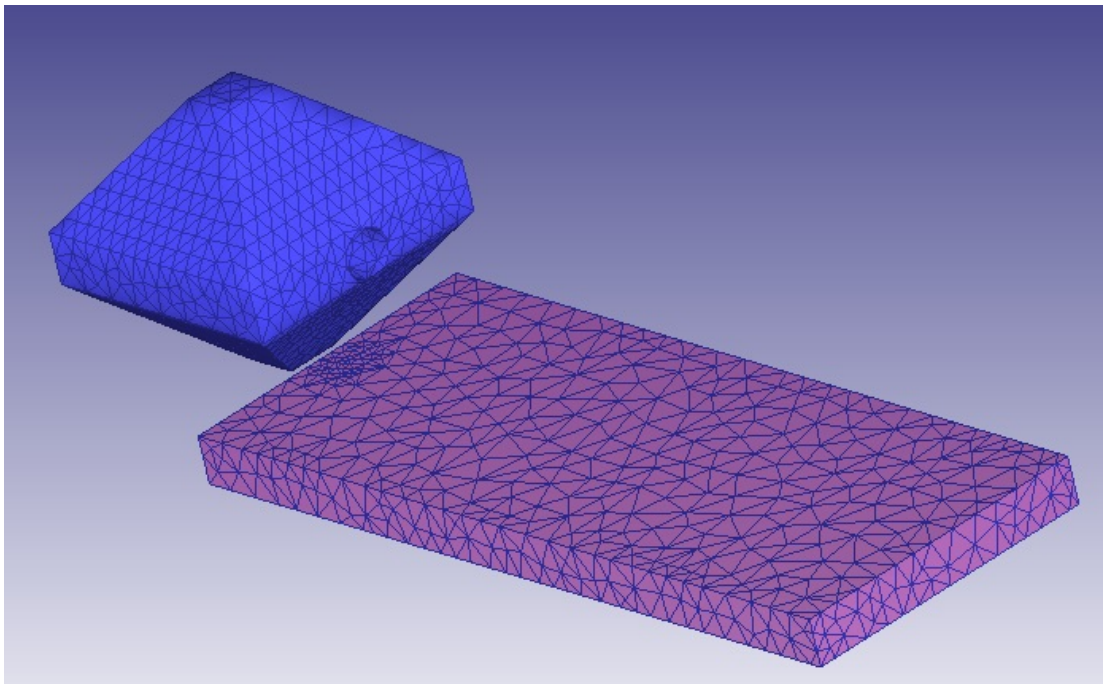
Σχήμα 4.3: Παράθυρο του προσομοιωτικού προγράμματος για τις επαναλήψεις(Iteration)

4.1.1 Operation 1

Αφού έγιναν οι ορισμοί στις γενικές ρυθμίσεις προσομοίωσης, σειρά έχει η δημιουργία των σχημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία του μοντέλου. Αρχικά, έγινε εισαγωγή του κόκκου(Top Die) ρομβοειδούς γεωμετρίας μέγιστης διάστασης 180μm και γωνίας κλίσης 45° και του δοκιμίου προς επεξεργασία(Workpiece) διαστάσεων 0.5x0.2x0.03mm(σχήμα 4.4) και πήραμε το μοντέλο του σχήματος 4.5.

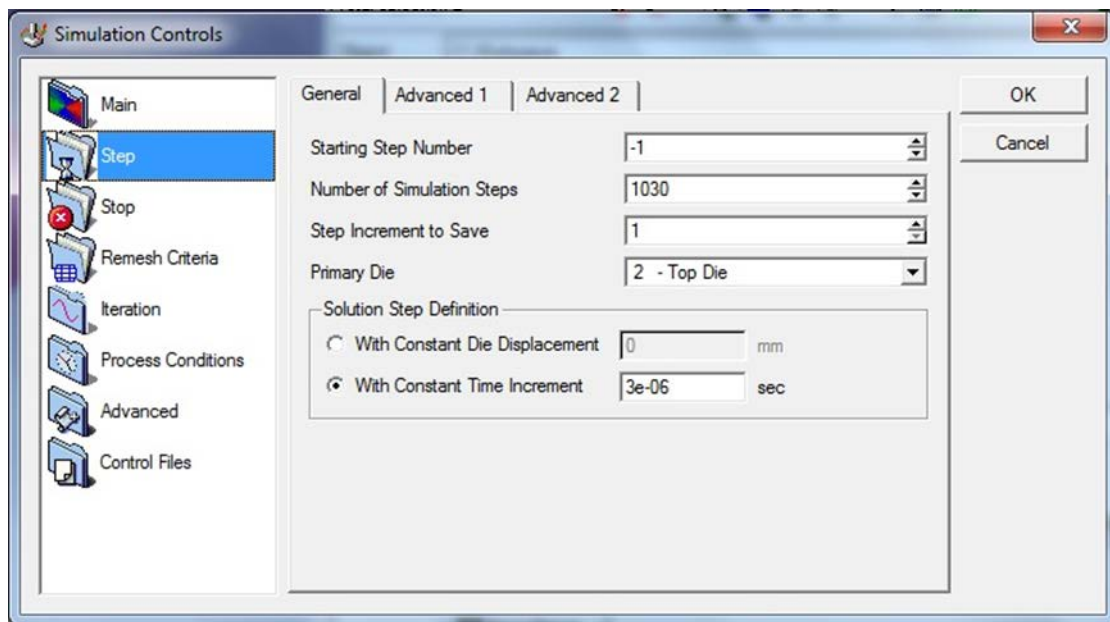


Σχήμα 4.4: Δημιουργία Operation 1

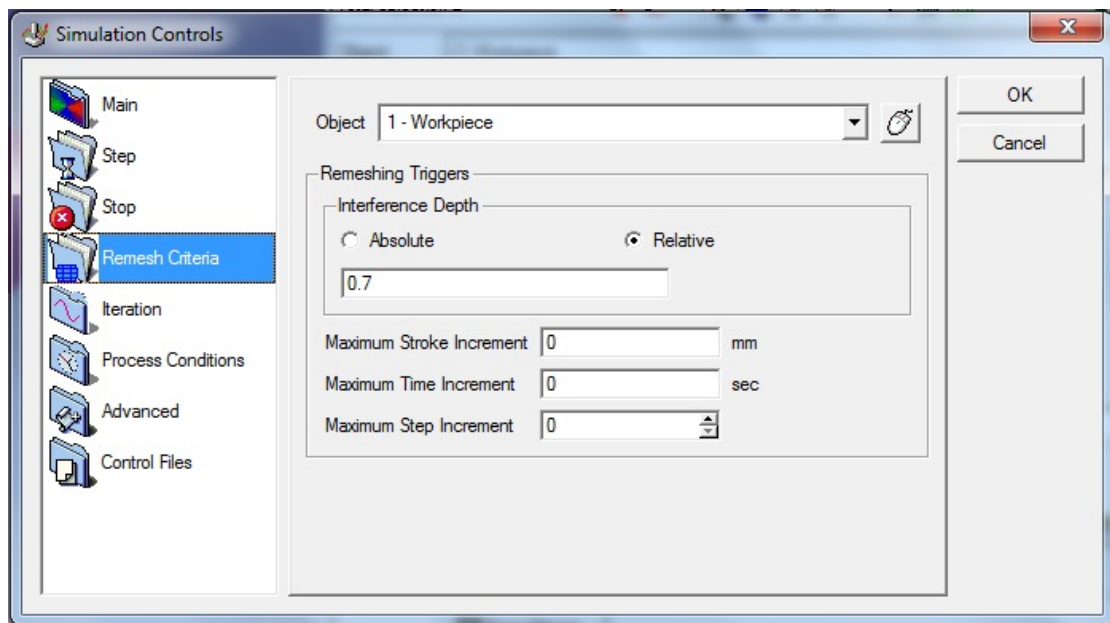


Σχήμα 4.5: Μορφή μοντέλου

Αφού έγινε η εισαγωγή των σχημάτων, στη συνέχεια, έπρεπε να γίνει, στις γενικές ρυθμίσεις προσομοίωσης, ορισμός, στο παράθυρο Step, του primary die του προγράμματος(σχήμα 4.6), όπου στην περίπτωση αυτή είναι το Top die και, στο παράθυρο Remesh Criteria, του Object του προγράμματος, που είναι το Workpiece, και του παρεμβολικού βάθους(Interference Depth), όπου είναι το Relative με τιμή 0.7.(σχήμα 4.7)



Σχήμα 4.6: Ορισμός Primary Die

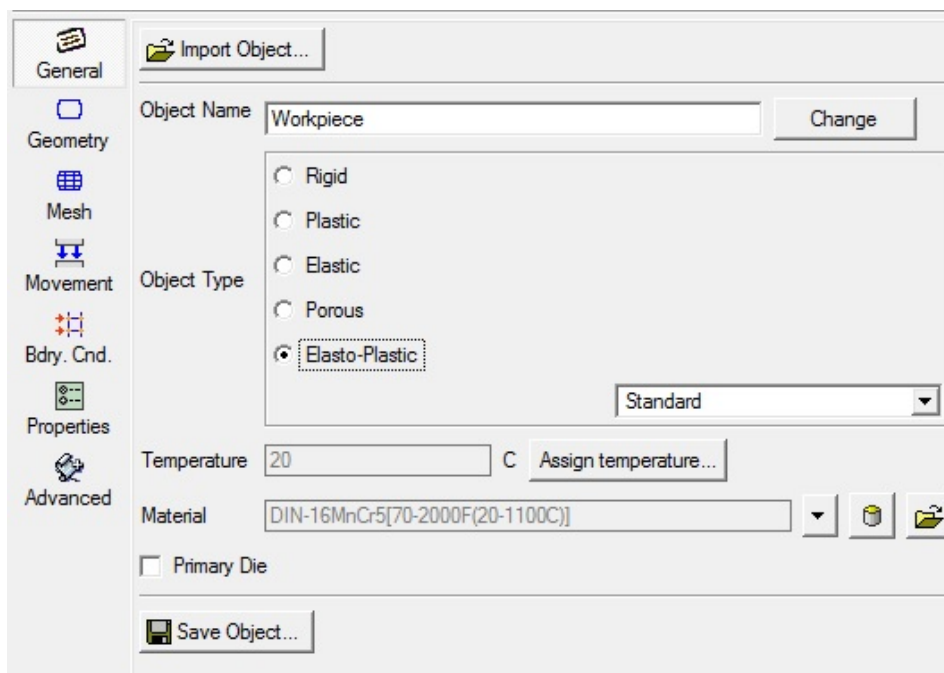


Σχήμα 4.7: Ορισμός Object και Relative

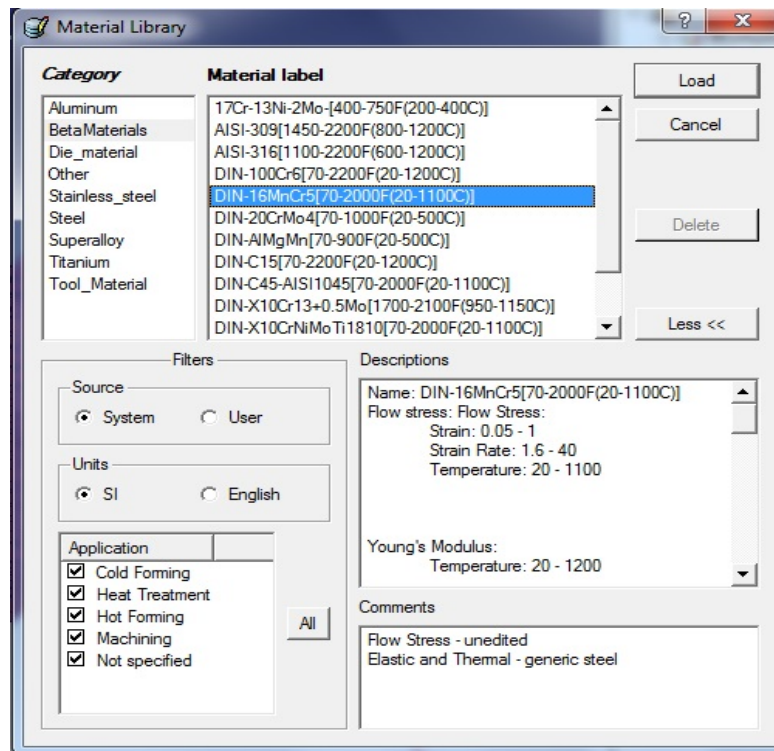
4.1.2 Τεμάχιο Επεξεργασίας

4.1.2.1 Γενικά(General)

Αφού έγινε η εισαγωγή των σχημάτων, συνέχεια έχει ο ορισμός των χαρακτηριστικών του δοκιμίου(workpiece). Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το παράθυρο(General) στο οποίο έγιναν οι ορισμοί του τύπου(object type) του δοκιμίου και του υλικού(Material), στο οποίο δόθηκε ελαστοπλαστικός τύπος(Elasto-Plastic), και στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το παράθυρο(Material Library) στο οποίο δόθηκε το υλικό από το οποίο θα είναι το δοκίμιο, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι DIN-16MnCr5.



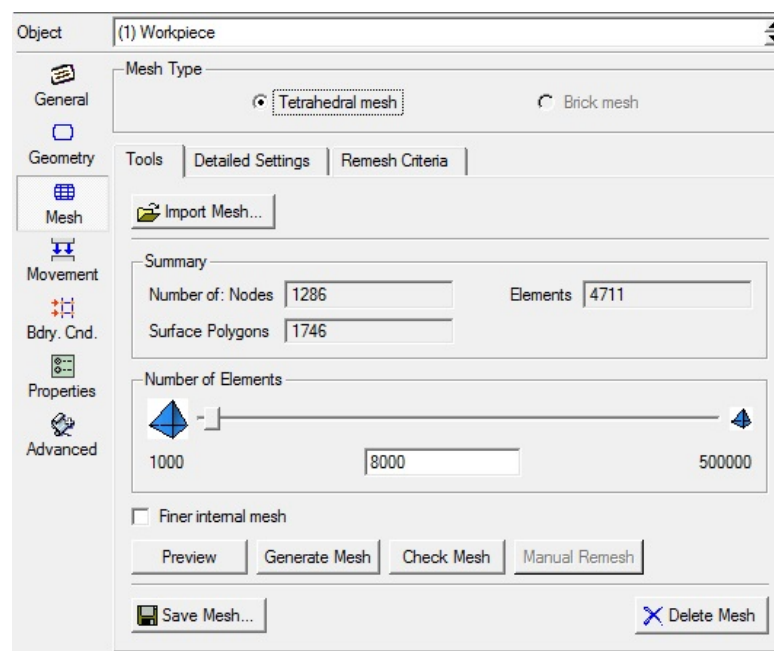
Σχήμα 4.8: Παράθυρο General για Workpiece



Σχήμα 4.9: Παράθυρο του Material Library

4.1.2.2 Πλέγμα(Mesh)

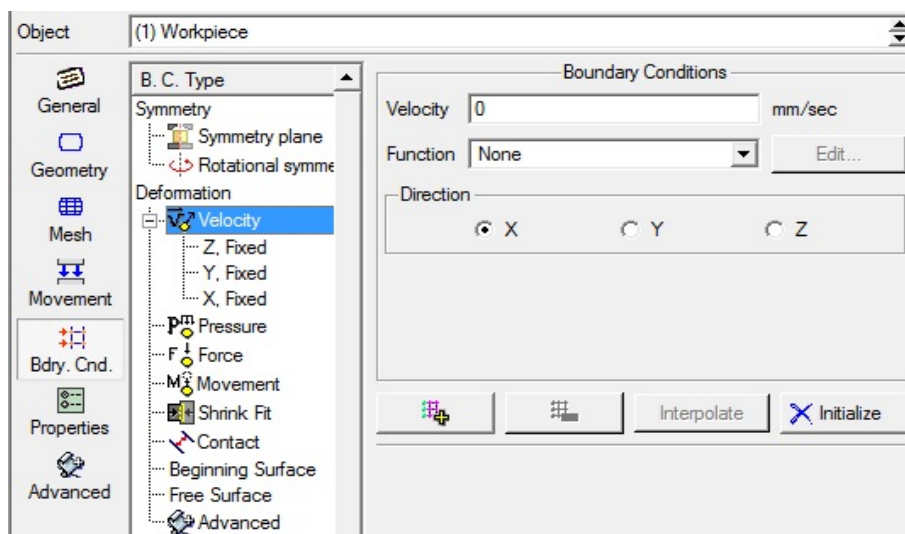
Αφού έγινε ο ορισμός του τύπου και του υλικού του δοκιμίου σειρά έχει ο ορισμός του meshing του. Στο σχήμα 4.10 που ακολουθεί παρουσιάζεται το παράθυρο του Mesh, όπου γίνεται ο ορισμός του τύπου του mesh(Mesh Type), όπου στην περίπτωση αυτή είναι Tetrahedral mesh, του αριθμού των κόμβων(Number of nodes) με τιμή ίση με 1286, του αριθμού των στοιχείων(Elements) που υπάρχουν πάνω στο δοκίμιο με τιμή ίση με 4711, των πολυγώνων της επιφάνειας(Surface polygons) με τιμή ίση με 1746 και του αριθμού των στοιχείων(Number of Elements) μέχρι τα οποία θα μπορούσε να έχει το δοκίμιο με τιμή ίση με 8000.



Σχήμα 4.10: Παράθυρο Mesh

4.1.2.3 Οριακές Συνθήκες(Boundary conditions)

Τέλος, γίνεται ο ορισμός των ορίων(boundaries) του δοκιμίου. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε αλλαγή μόνο στην ταχύτητα(velocity) παραμόρφωσης(deformation) του δοκιμίου, έτσι ώστε να μην γίνει περιστροφή του δοκιμίου, κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, επειδή το δοκίμιο δεν βρίσκεται σε πάκτωση.([σχήμα 4.11](#))

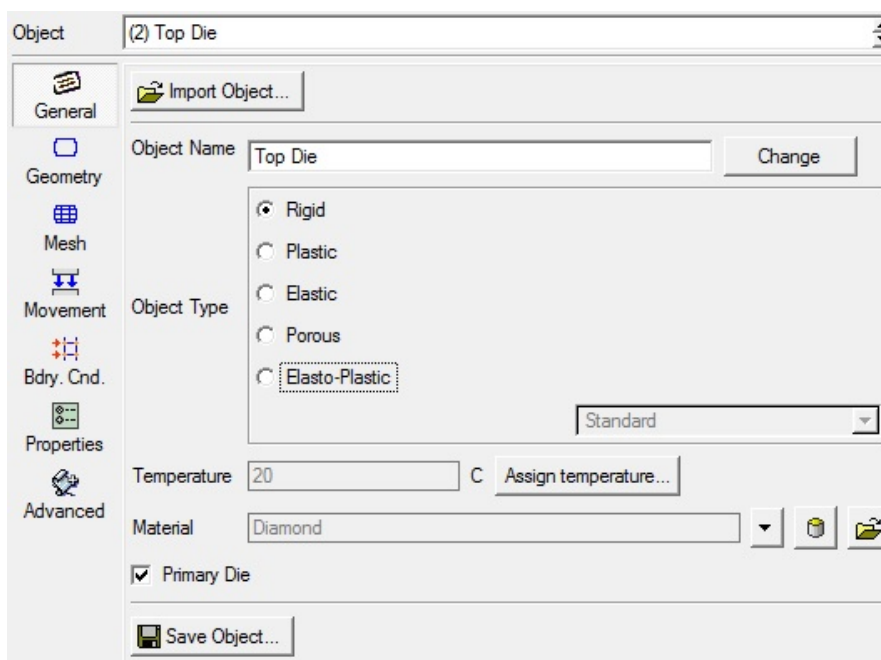


Σχήμα 4.11: Ορισμός των ορίων(Boundaries)

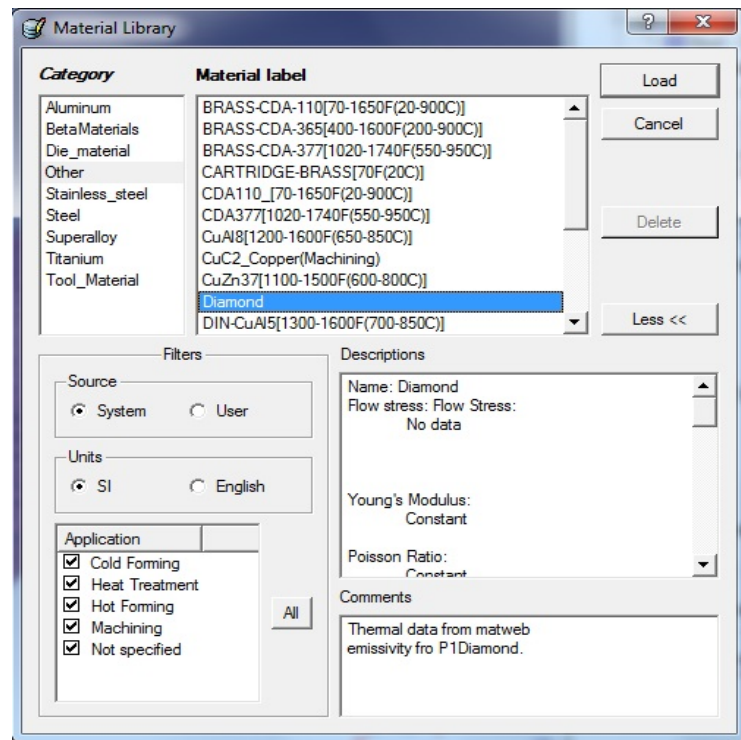
4.1.3 Κόκκος

4.1.3.1 Γενικά(General)

Μετά των ορισμό των χαρακτηριστικών και των ορίων του δοκιμίου, σειρά έχει ο ορισμός των χαρακτηριστικών του κόκκου του μοντέλου. Αρχικά, στο παράθυρο General([σχήμα 4.12](#)) ορίστηκε ο τύπος του κόκκου(object type), όπου στην περίπτωση αυτή είναι άκαμπτο(Rigid) και το υλικό(Material) που επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος(Material Library)([σχήμα 4.13](#)), το οποίο είναι το Διαμάντι(Diamond).



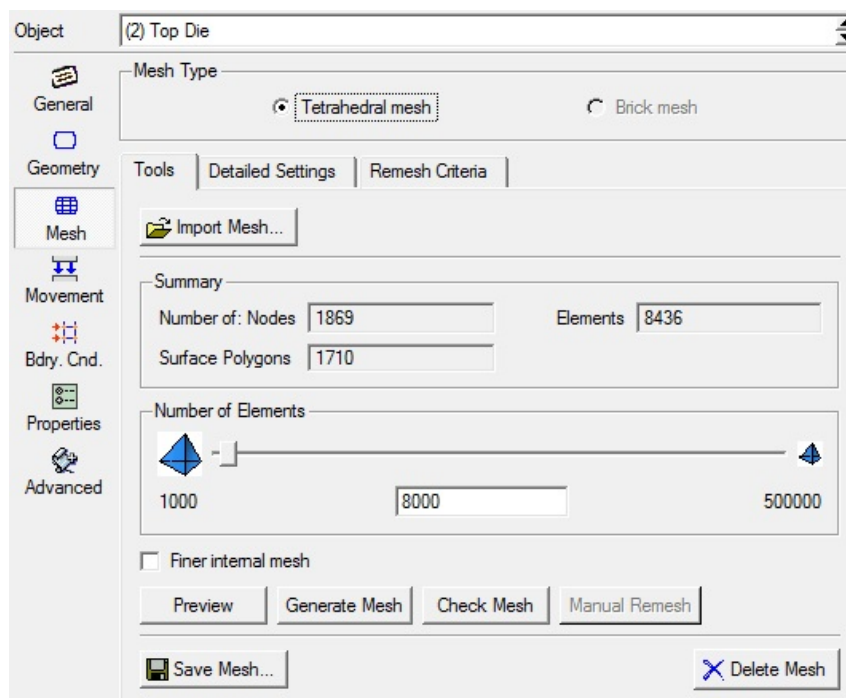
Σχήμα 4.12: Παράθυρο General για Top Die



Σχήμα 4.13: Παράθυρο του Material Library

4.1.3.2 Πλέγμα(Mesh)

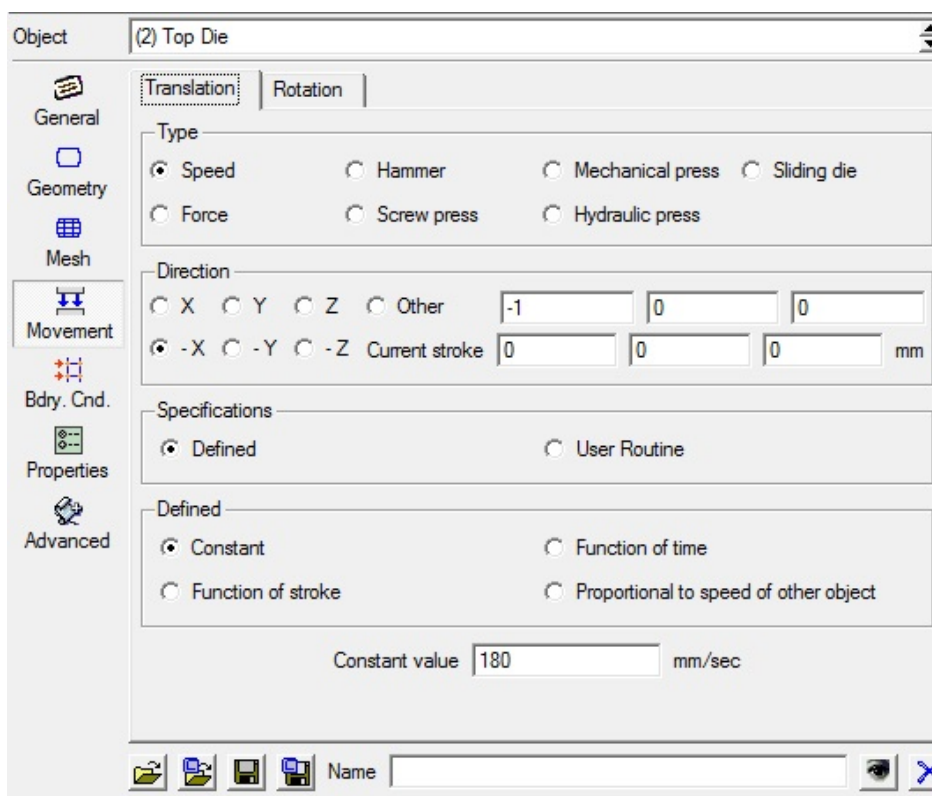
Αφού έγινε ο ορισμός του τύπου και του υλικού του κόκκου σειρά έχει ο ορισμός του meshing του. Στο σχήμα 4.14 που ακολουθεί παρουσιάζεται το παράθυρο του Mesh, όπου γίνεται ο ορισμός του τύπου του mesh(Mesh Type), όπου στην περίπτωση αυτή είναι Tetrahedral mesh, του αριθμού των κόμβων(Number of nodes) με τιμή ίση με 1869, του αριθμού των στοιχείων(Elements) που υπάρχουν πάνω στο κόκκο με τιμή ίση με 8436, των πολυγώνων της επιφάνειας(Surface polygons) με τιμή ίση με 1710 και του αριθμού των στοιχείων(Number of Elements) μέχρι τα οποία θα μπορούσε να έχει ο κόκκος με τιμή ίση με 8000.



Σχήμα 4.14: Παράθυρο Mesh

4.1.3.3 Κίνηση(Movement)

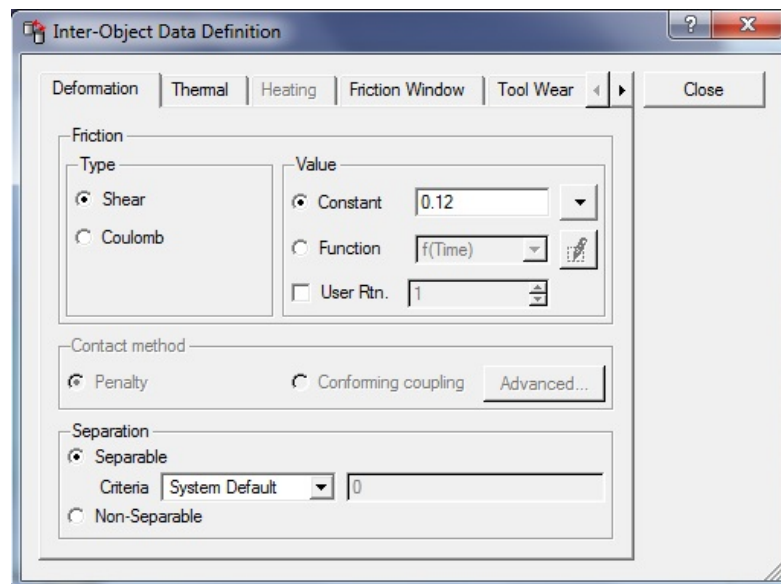
Σε αντίθεση με το δοκίμιο, στον κόκκο δεν υπήρχε ανάγκη για κάποια αλλαγή στα όρια(boundaries) του, αλλά επειδή είναι το αντικείμενο, του μοντέλου, το οποίο κινείται έπρεπε να επιλεγεί στο παράθυρο του Movement(σχήμα 4.15) ο τύπος(Type) που θα χρησιμοποιεί ο κόκκος για να κινείται, όπου στην περίπτωση αυτή είναι Speed, τη διεύθυνση(Direction) στην οποία θα κινείται, η οποία είναι στη διεύθυνση -X, τον προσδιορισμό(Defined) την κίνησης του κόκκου, όπου είναι συνεχής(Constant), και την τιμή του(Constant value) με τιμή 180mm/sec.



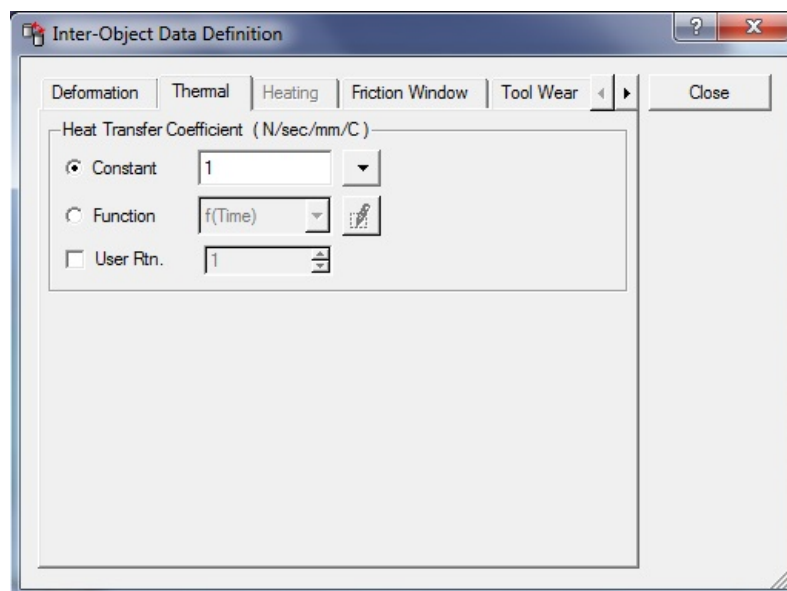
Σχήμα 4.15: Παράθυρο Movement

4.1.4 Inter-Object

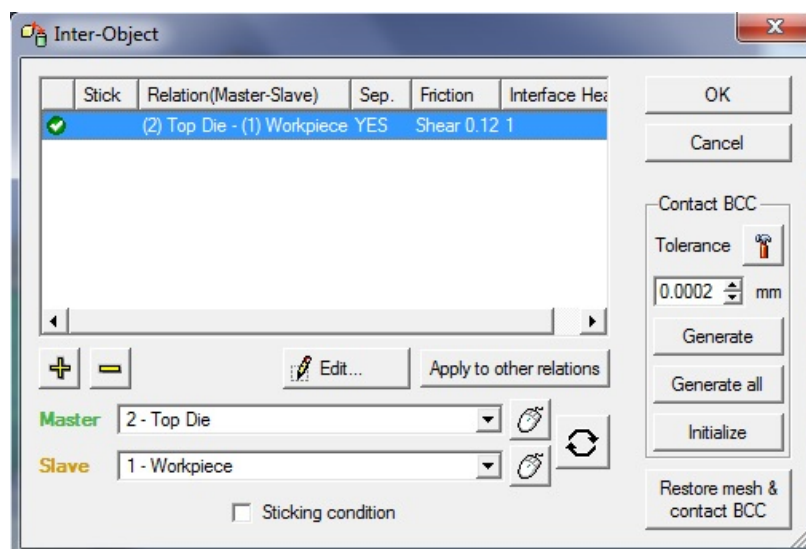
Αφού τελείωσε και ο ορισμός των χαρακτηριστικών του κόκκου, σειρά έχει ο ορισμός της σχέσης που θα έχουν τα δύο αντικείμενα, ο κόκκος με το δοκίμιο, κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης που πραγματοποιείται στο παράθυρο Inter-Object Data Definition. Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται ο τύπος της τριβής(Friction) που θα πραγματοποιηθεί μεταξύ τους, όπου είναι η διάτμηση(Shear), και η τιμή της τριβής που είναι 0.12. Επίσης, στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η τιμή του συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας(Heat Transfer Coefficient) με τιμή 1 N/sec/mm/C και στο σχήμα 4.18 η επιβεβαίωση ότι η σχέση του κόκκου με του δοκιμίου είναι εφικτή.



Σχήμα 4.16: Ορισμός της Τριβής(Friction)



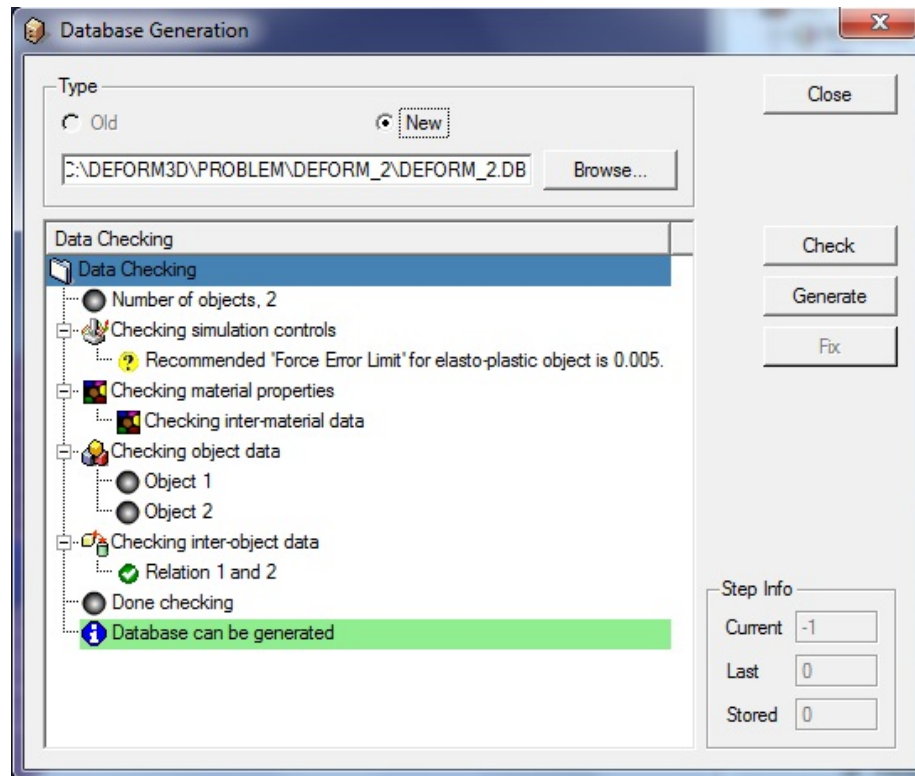
Σχήμα 4.17: Ορισμός του συντελεστή μεταβολής της θερμότητας



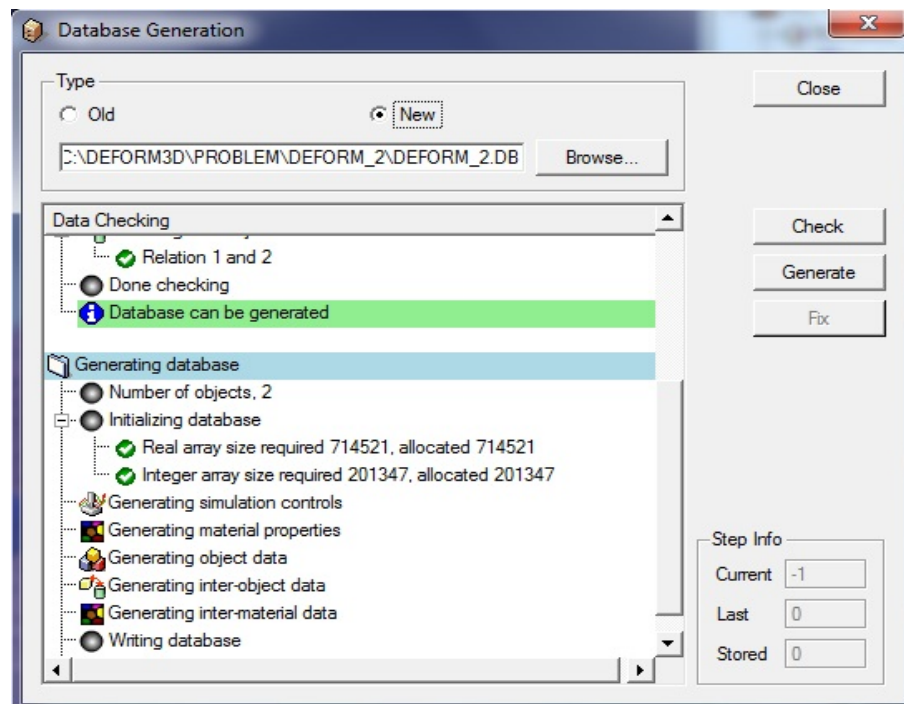
Σχήμα 4.18: Παράθυρο επιβεβαίωσης σχέσης του κόκκου με το δοκίμιο

4.1.5 Δημιουργία Δεδομένων(Database Generation)

Αφού τελείωσε και ο ορισμός της σχέσης των αντικειμένων κατα την επαφή τους, μετέπεται έχει σειρά η δημιουργία της βάσης δεδομένων του μοντέλου. Αυτό πραγματοποιείται στο Database Generation, με τις εντολές Check(σχήμα 4.19) και Generate(σχήμα 4.20) και μόλις γίνει η ολοκλήρωση της δημιουργίας τους, στον προσομοιωτή του προγράμματος τρέχουν(Run) τα δεδομένα του.

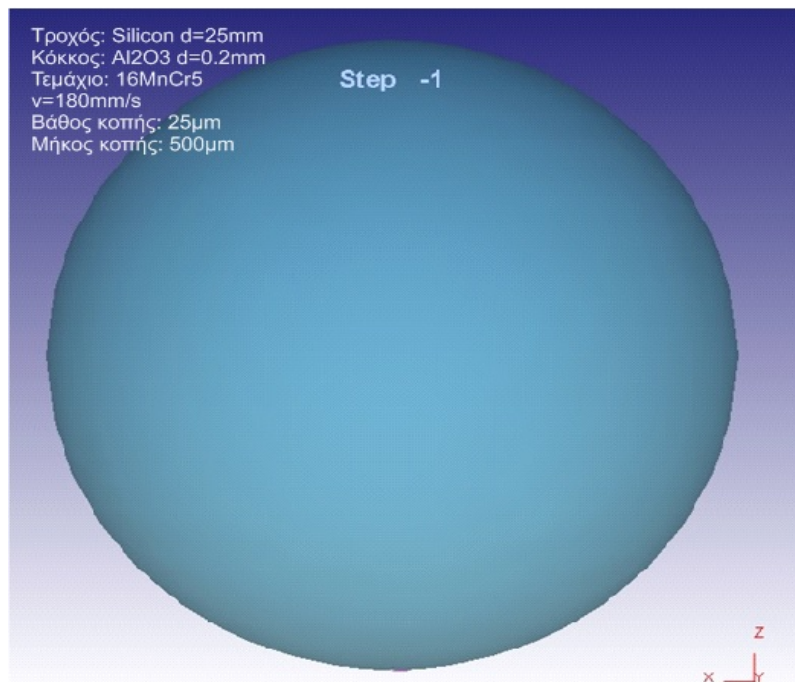


Σχήμα 4.19: Παράθυρο Database Generation για την ενεργοποίηση της εντολής Check



Σχήμα 4.20: Παράθυρο Database Generation για την ενεργοποίηση της εντολής Generate

4.2 Αποτελέσματα θερμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία με χρήση τροχού



Αρχικά, για να γίνει η επιβεβαίωση ότι χρειάζεται να πραγματοποιηθεί χρήση τροχού σε όλες τις περιπτώσεις των προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές προσομοιώσεις, όπου στην μία έγινε χρήση του τροχού και στην άλλη όχι και στην συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

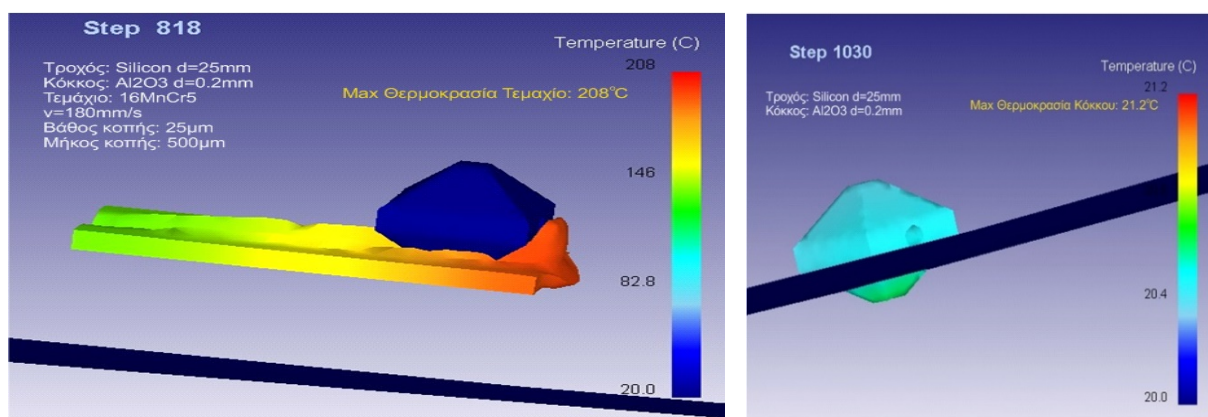
Σε αυτές τις προσομοιώσεις έγινε χρήση τροχού Silicon, κόκκου Al₂O₃ και τεμαχίου Aluminum 7075. Η διάσταση του τροχού είναι 25mm, η διάσταση του κόκκου 0.2mm, η διάσταση του τεμαχίου

Σχήμα 4.21: Μοντέλο Τροχού Silicon

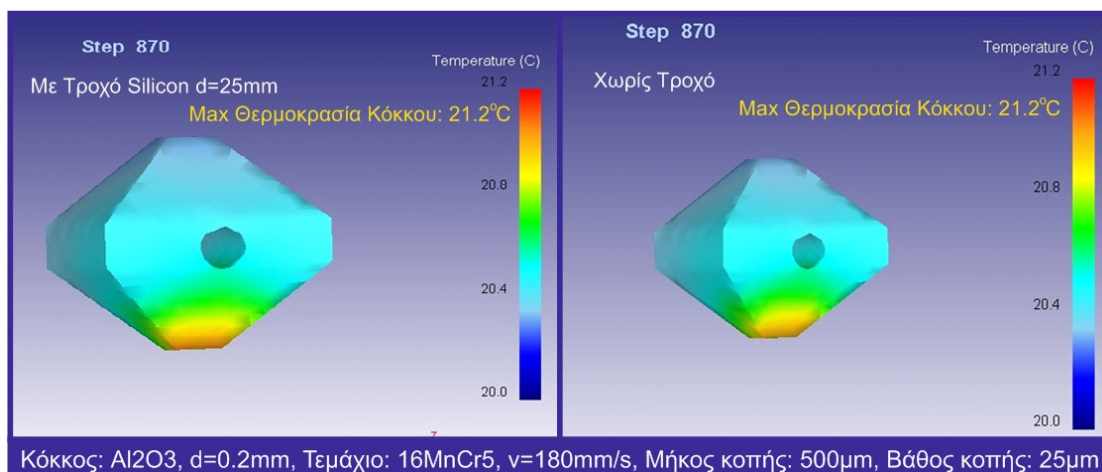
0.5x0.2x0.03mm, το βάθος κοπής 25μm και η ταχύτητα κίνησης 180mm/sec και με τον τύπο του τροχού να είναι elastic.

Τα αποτελέσματα που πάρθηκαν δεν επέφεραν μεγάλη αλλαγή στα αποτελέσματα της μεταβολής της θερμοκρασίας και ο τροχός δεν είχε καμία απολύτως αλλαγή στη θερμοκρασία του, σε σχέση με την ίδια περίπτωση δοκιμών χωρίς τη χρήση του τροχού, οπότε στις μετέπειτα προσομοιώσεις δεν είναι αναγκαία η χρήση του τροχού.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλου με τον τροχό, τα αποτελέσματα των δοκιμών και η σύγκριση τους με την περίπτωση του μοντέλου χωρίς τον τροχό.



Σχήμα 4.22: Αποτέλεσμα προσομοίωσης λείανσης Τροχού Silicon κόκκου Al₂O₃ σε τεμάχιο 16MnCr5 και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 500μm βάθους 25μm



Σχήμα 4.23: Συγκριτικά αποτελέσματα Κόκκων με χρήση και μη Τροχού Silicon

4.3 Αποτελέσματα θερμικής συμπεριφοράς μέσω αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για διάφορες διαστάσεις κόκκου

Αφού ολοκληρώθηκαν οι προσομοιώσεις με τον τροχό και έγινε η σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χωρίς τροχό, στην συνέχεια έγινε μετατροπή στις διαστάσεις του τεμαχίου προς κατεργασία σε $1 \times 0.3 \times 0.3 \text{ mm}$ και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για διαστάσεις κόκκου 0.1mm, 0.18mm και 0.2mm και για τρία διαφορετικά βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το υλικό του κόκκου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Διαμάντι(Diamond)
- Ανθρακοπυρίτιο(SiC)
- Οξείδιο του Αργιλίου(Al_2O_3)

Ενώ το υλικό του τεμαχίου είναι Aluminum 7075 και DIN-16MnCr5.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται όλες οι περιπτώσεις των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Deform 3D και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τους.

Διαστάσεις Κόκκου	Υλικό Κόκκου	Υλικό Τεμαχίου	Βάθος κοπής
0.1mm	Diamond	DIN-16MnCr5	5μm
0.1mm	Diamond	DIN-16MnCr5	10μm
0.1mm	Diamond	DIN-16MnCr5	25μm
0.1mm	SiC	DIN-16MnCr5	5μm
0.1mm	SiC	DIN-16MnCr5	10μm
0.1mm	SiC	DIN-16MnCr5	25μm
0.1mm	Al_2O_3	DIN-16MnCr5	5μm
0.1mm	Al_2O_3	DIN-16MnCr5	10μm
0.1mm	Al_2O_3	DIN-16MnCr5	25μm
0.1mm	Diamond	Aluminum 7075	5μm
0.1mm	Diamond	Aluminum 7075	10μm
0.1mm	Diamond	Aluminum 7075	25μm

0.1mm	SiC	Aluminum 7075	5μm
0.1mm	SiC	Aluminum 7075	10μm
0.1mm	SiC	Aluminum 7075	25μm
0.1mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	5μm
0.1mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	10μm
0.1mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	25μm
0.18mm	Diamond	DIN-16MnCr5	5μm
0.18mm	Diamond	DIN-16MnCr5	10μm
0.18mm	Diamond	DIN-16MnCr5	25μm
0.18mm	SiC	DIN-16MnCr5	5μm
0.18mm	SiC	DIN-16MnCr5	10μm
0.18mm	SiC	DIN-16MnCr5	25μm
0.18mm	Al ₂ O ₃	DIN-16MnCr5	5μm
0.18mm	Al ₂ O ₃	DIN-16MnCr5	10μm
0.18mm	Al ₂ O ₃	DIN-16MnCr5	25μm
0.18mm	Diamond	Aluminum 7075	5μm
0.18mm	Diamond	Aluminum 7075	10μm
0.18mm	Diamond	Aluminum 7075	25μm
0.18mm	SiC	Aluminum 7075	5μm
0.18mm	SiC	Aluminum 7075	10μm
0.18mm	SiC	Aluminum 7075	25μm
0.18mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	5μm
0.18mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	10μm
0.18mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	25μm
0.2mm	Diamond	DIN-16MnCr5	5μm
0.2mm	Diamond	DIN-16MnCr5	10μm
0.2mm	Diamond	DIN-16MnCr5	25μm
0.2mm	SiC	DIN-16MnCr5	5μm
0.2mm	SiC	DIN-16MnCr5	10μm
0.2mm	SiC	DIN-16MnCr5	25μm
0.2mm	Al ₂ O ₃	DIN-16MnCr5	5μm
0.2mm	Al ₂ O ₃	DIN-16MnCr5	10μm
0.2mm	Al ₂ O ₃	DIN-16MnCr5	25μm
0.2mm	Diamond	Aluminum 7075	5μm
0.2mm	Diamond	Aluminum 7075	10μm
0.2mm	Diamond	Aluminum 7075	25μm
0.2mm	SiC	Aluminum 7075	5μm
0.2mm	SiC	Aluminum 7075	10μm
0.2mm	SiC	Aluminum 7075	25μm
0.2mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	5μm
0.2mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	10μm
0.2mm	Al ₂ O ₃	Aluminum 7075	25μm

Πίνακας 4.1: Περιπτώσεις προσομοιώσεων ελέγχου θερμικής συμπεριφοράς στο πρόγραμμα Deform 3d

4.3.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.1mm και τεμάχιο DIN-16MnCr5

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θερμικής προσομοίωσης κόκκου διαστάσεων 0.1mm για τρία διαφορετικά βάθους κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

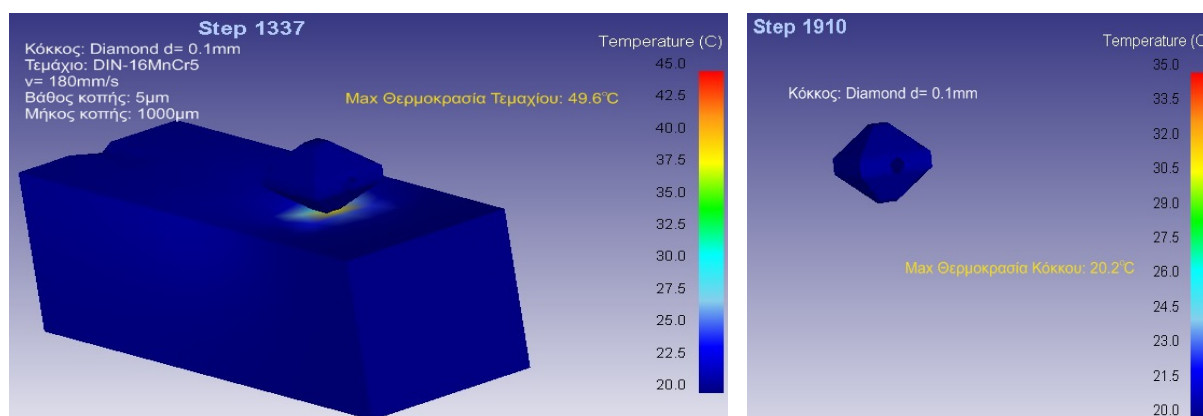
Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το υλικό του κόκκου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Διαμάντι(Diamond)
- Ανθρακοπυρίτιο(SiC)
- Οξείδιο του Αργιλίου(Al_2O_3)

Ενώ το υλικό του τεμαχίου είναι DIN-16MnCr5.

4.3.1.1 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

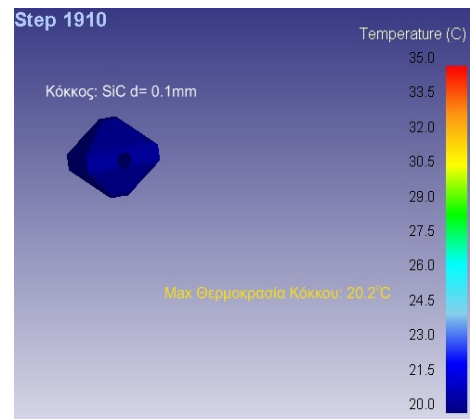
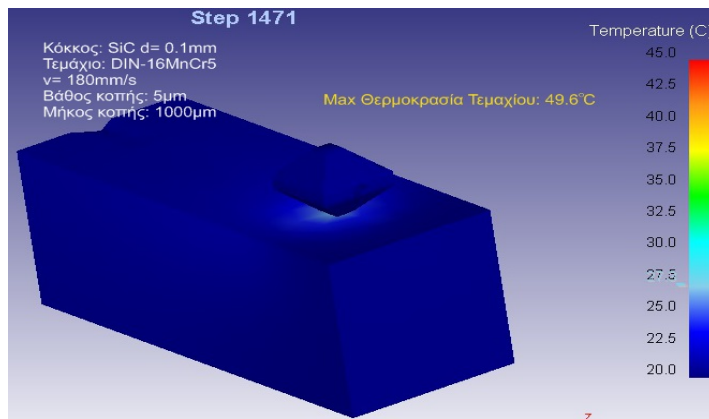
Στο [σχήμα 4.24](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 49.6°C για το τεμάχιο και 20.2°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.24: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.1.2 Ανθρακοπυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

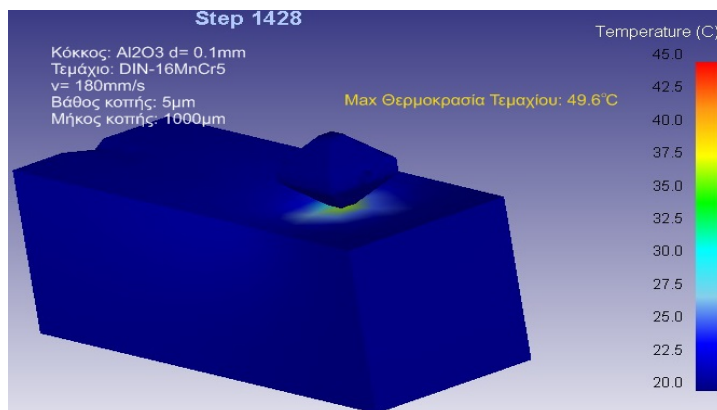
Στο [σχήμα 4.25](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 49.6°C για το τεμάχιο και 20.2°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.25: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5 μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.1.3 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5 μm

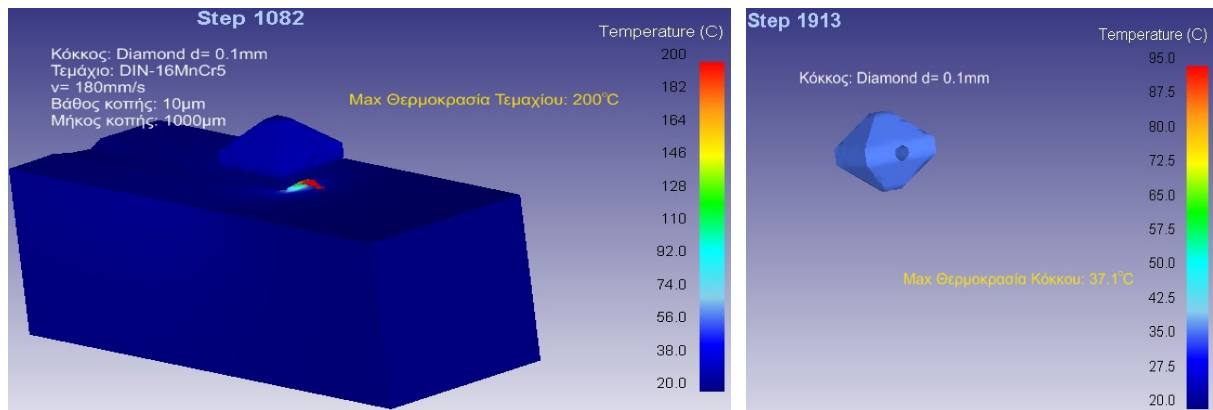
Στο σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 49.6°C για το τεμάχιο και 20.8°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.26: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5 μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.1.4 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10 μm

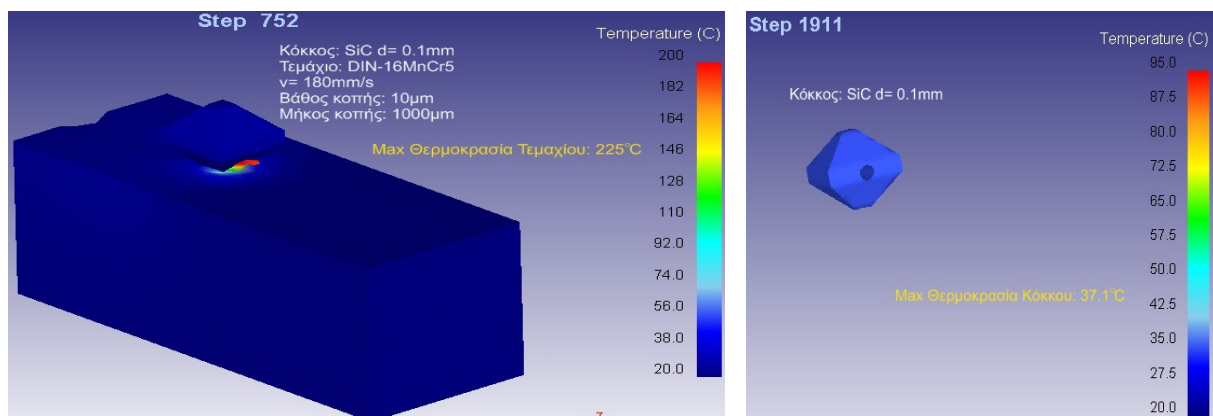
Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 200°C για το τεμάχιο και 37.1°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.27: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.1.5 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

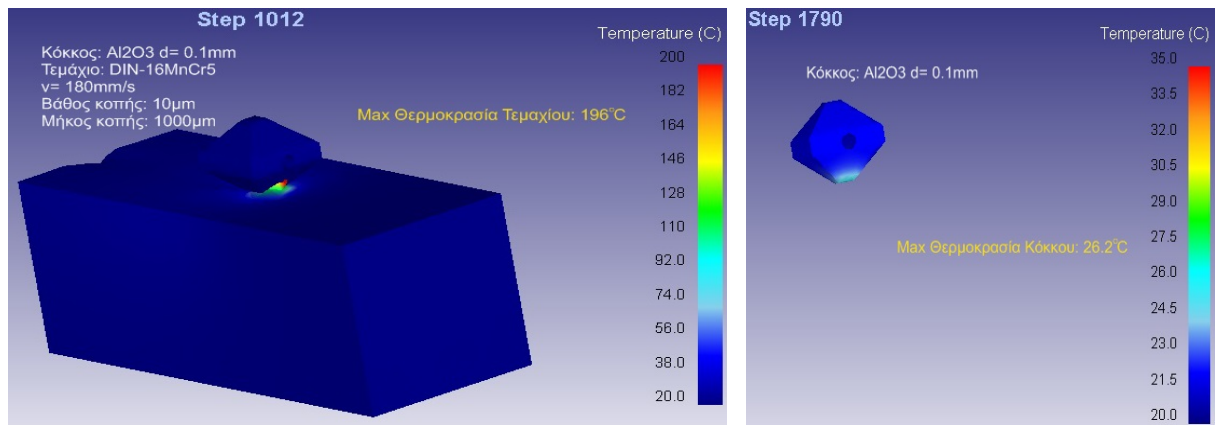
Στο σχήμα 4.28 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 225°C για το τεμάχιο και 37.1°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.28: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.1.6 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

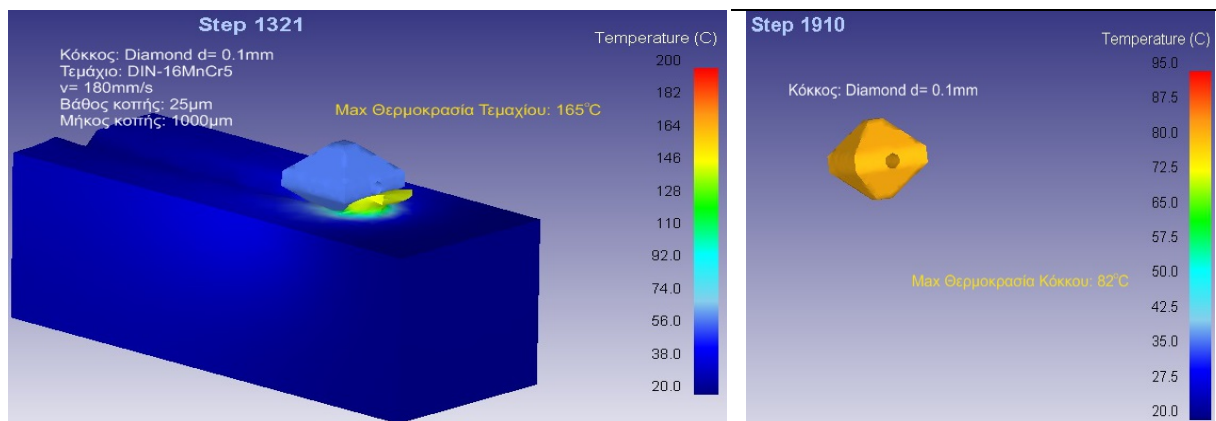
Στο σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 196°C για το τεμάχιο και 26.2°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.29: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al₂O₃ διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.1.7 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

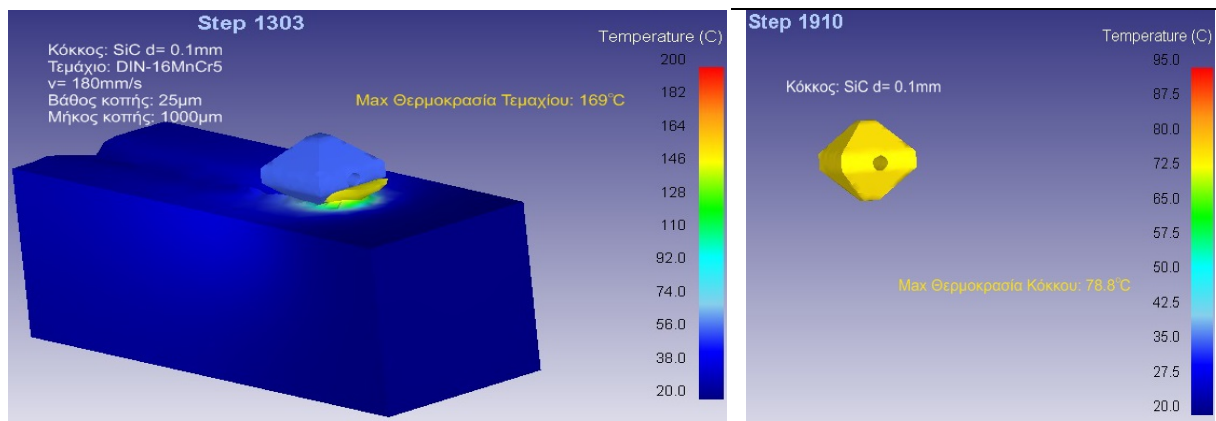
Στο σχήμα 4.30 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 165°C για το τεμάχιο και 82°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.30: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.1.8 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

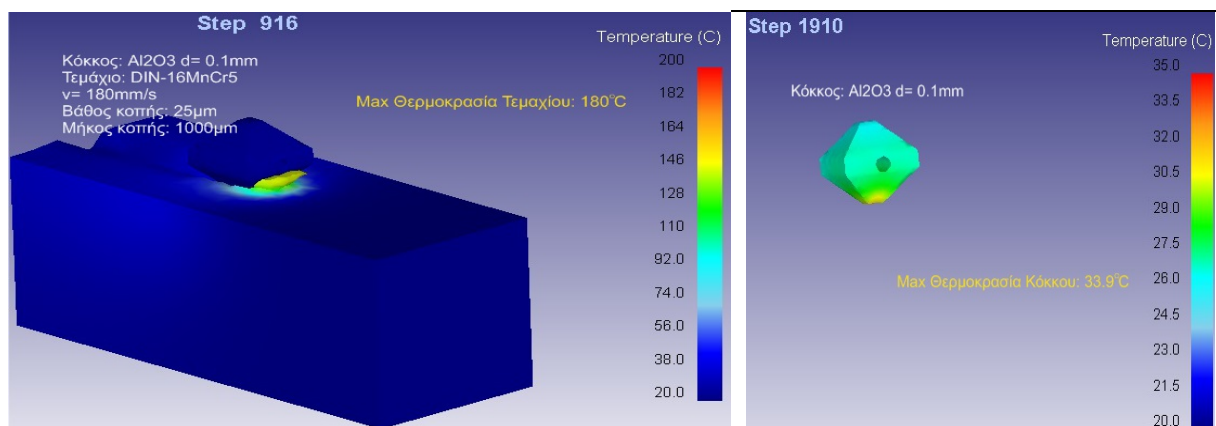
Στο σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 169°C για το τεμάχιο και 78.8°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.31: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.1.9 Οξειδίο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

Στο σχήμα 4.32 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 180°C για το τεμάχιο και 33.9°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.32: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε ότι και στα τρία βάθη κοπής υπήρχαν ελάχιστες ή μηδαμινές διαφορές μεταξύ των θερμικών μεταβολών των υλικών του κόκκου και τεμαχίου, με εξαίρεση τις θερμικές μεταβολές του κόκκου στο βάθος κοπής 25μm, όπου το υλικό Al_2O_3 εμφάνισε μεταβολή θερμοκρασίας 33.9°C σε αντίθεση με τα Diamond και SiC που είχαν ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους.

4.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.1mm και τεμάχιο Aluminum 7075

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θερμικής προσομοίωσης κόκκου διαστάσεων 0.1mm για τρία διαφορετικά βάθους κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

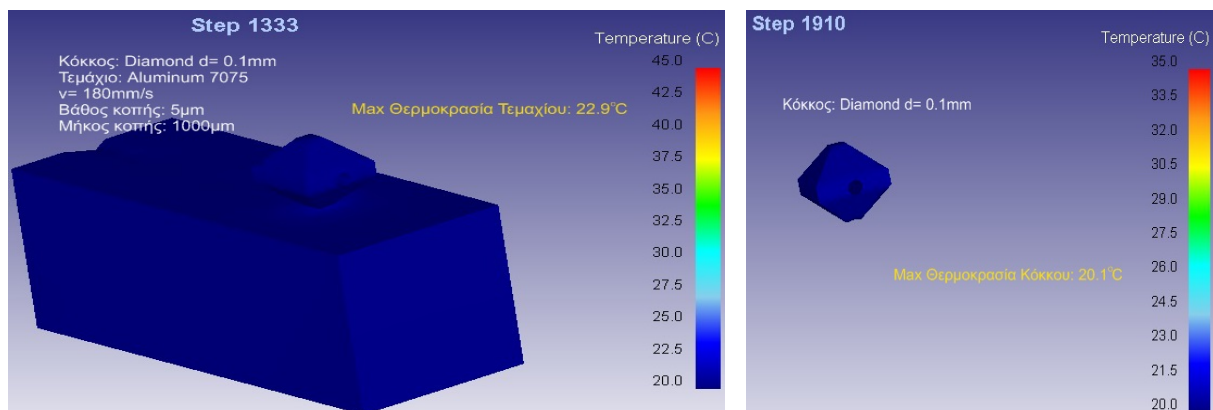
Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το υλικό του κόκκου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Διαμάντι(Diamond)
- Ανθρακοκυρίτιο(SiC)
- Οξείδιο του Αργιλίου(Al_2O_3)

Ενώ το υλικό του τεμαχίου είναι Aluminum 7075.

4.3.2.1 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5 μm

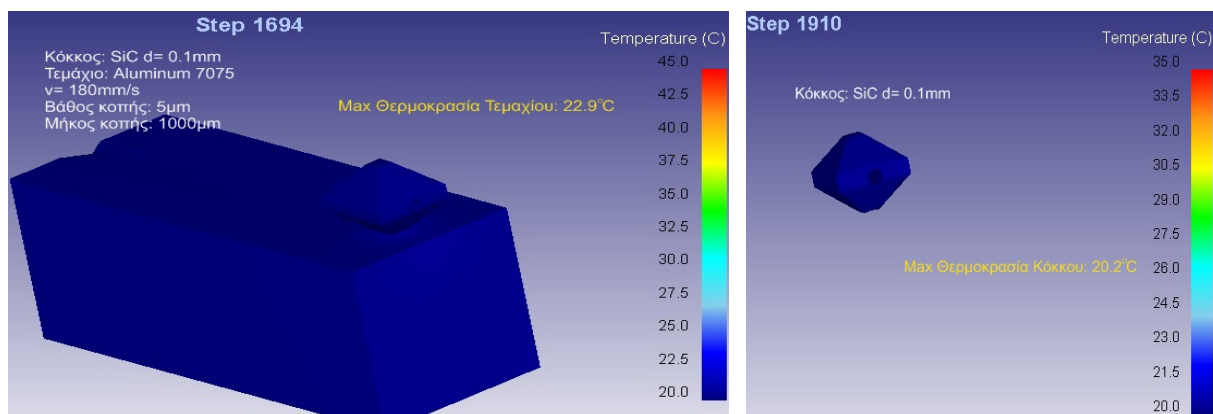
Στο σχήμα 4.33 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 22.9 $^{\circ}\text{C}$ για το τεμάχιο και 20.1 $^{\circ}\text{C}$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.33: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5 μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.2.2 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5 μm

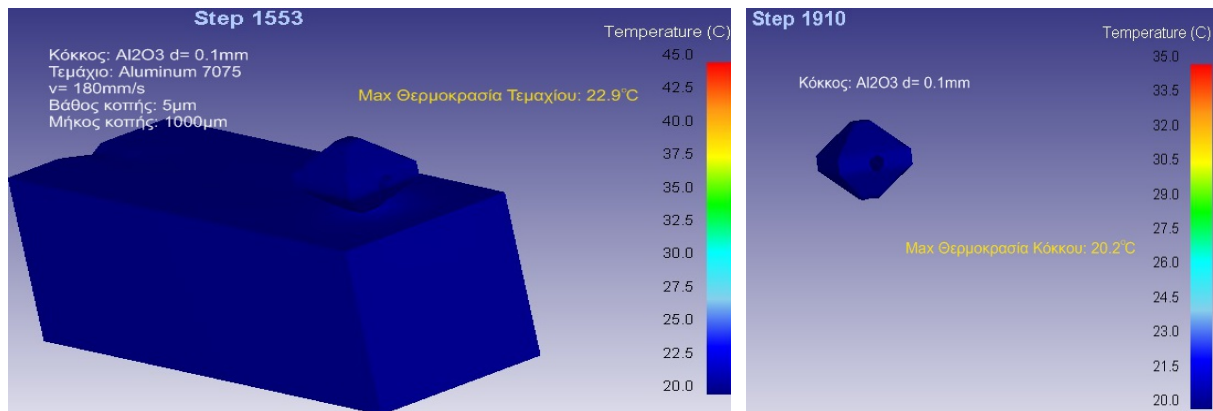
Στο σχήμα 4.34 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 22.9 $^{\circ}\text{C}$ για το τεμάχιο και 20.2 $^{\circ}\text{C}$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.34: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5 μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.2.3 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5 μ m

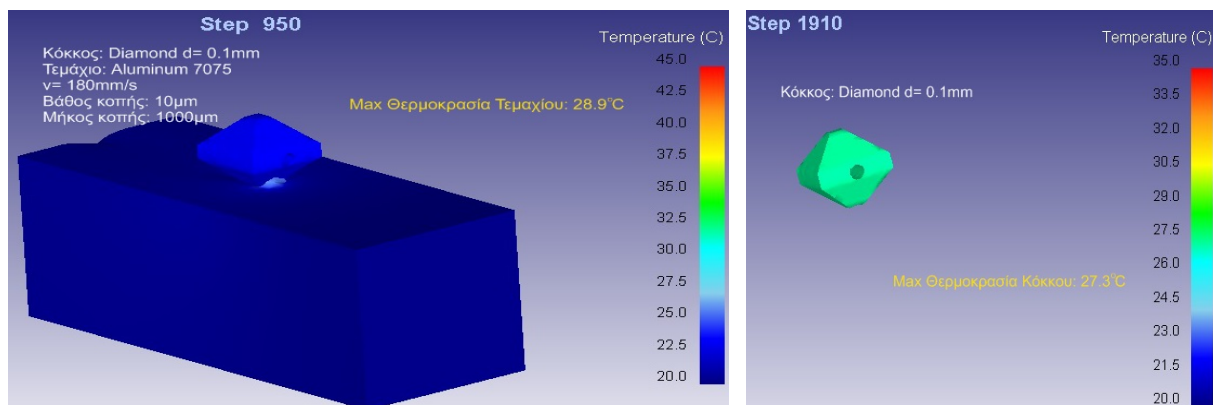
Στο σχήμα 4.35 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5 μ m με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 22.9 $^{\circ}C$ για το τεμάχιο και 20.2 $^{\circ}C$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.35: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5 μ m και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μ m

4.3.2.4 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10 μ m

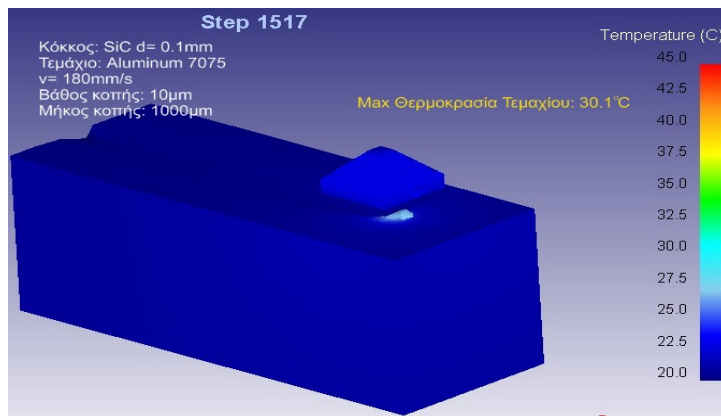
Στο σχήμα 4.36 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10 μ m με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 28.9 $^{\circ}C$ για το τεμάχιο και 27.3 $^{\circ}C$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.36: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10 μ m και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μ m

4.3.2.5 Ανθρακοπυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10 μ m

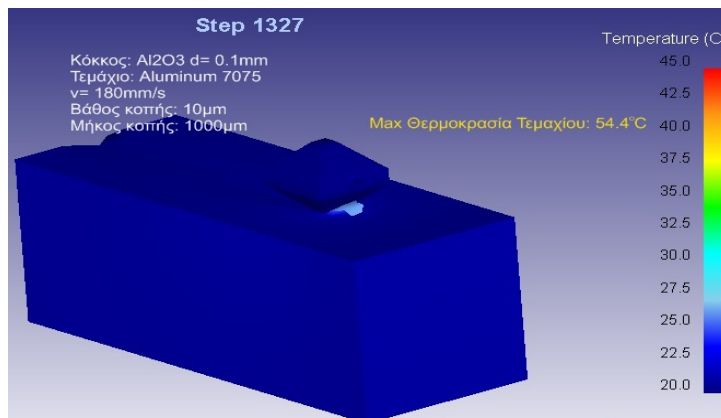
Στο σχήμα 4.37 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10 μ m με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 30.1 $^{\circ}C$ για το τεμάχιο και 24 $^{\circ}C$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.37: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.2.6 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

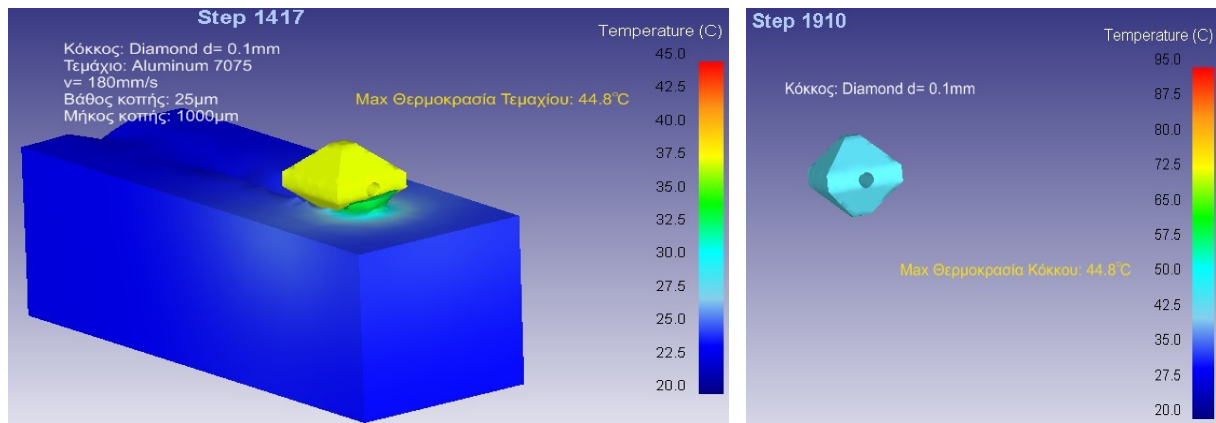
Στο σχήμα 4.38 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με $54.4^{\circ}C$ για το τεμάχιο και $20.7^{\circ}C$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.38: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.2.7 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

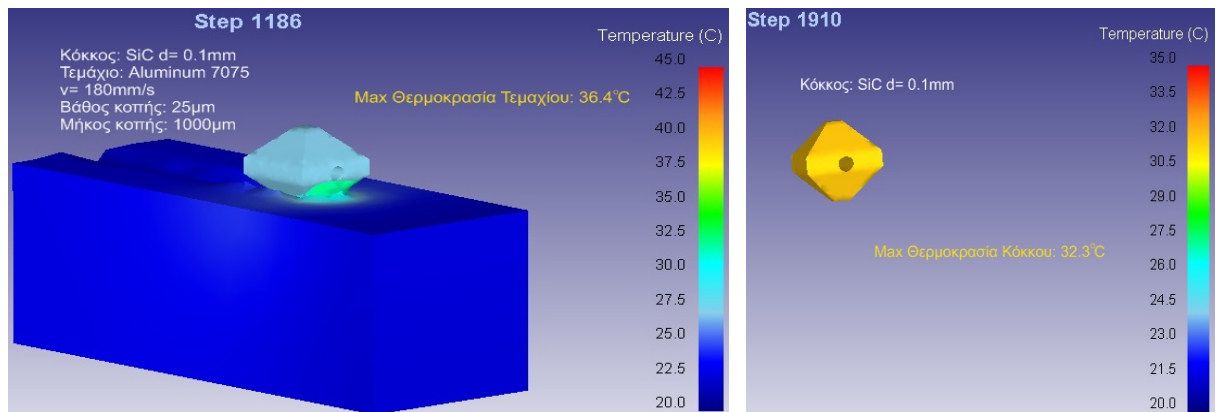
Στο σχήμα 4.39 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με $44.8^{\circ}C$ για το τεμάχιο και $44.8^{\circ}C$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.39: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.2.8 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

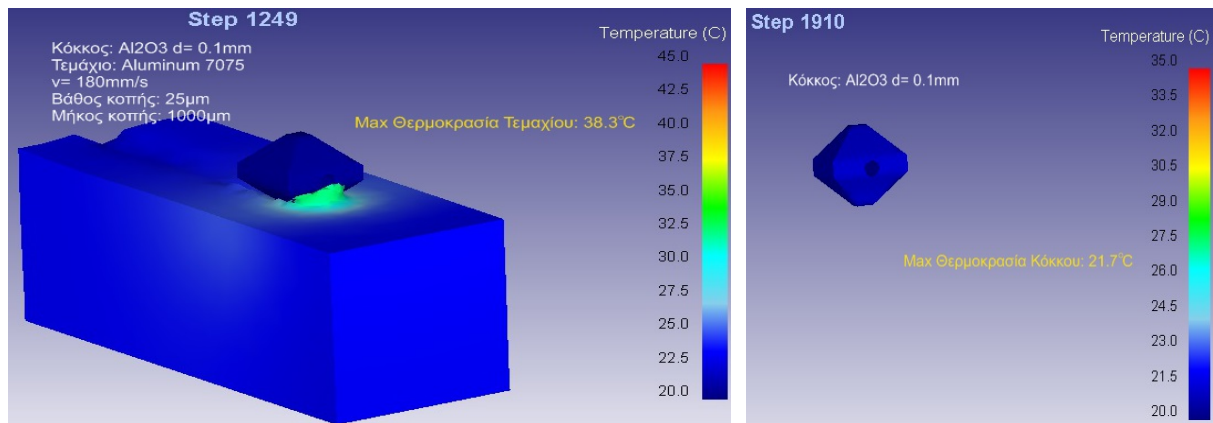
Στο σχήμα 4.40 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 36.4°C για το τεμάχιο και 32.3°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.40: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.2.9 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

Στο σχήμα 4.41 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 38.3°C για το τεμάχιο και 21.7°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.41: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.1mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε ότι στο βάθος κοπής 5μm δεν υπήρχαν διαφορές στις θερμοκρασίες ούτε στον κόκκο, ούτε στο τεμάχιο. Στα αποτελέσματα του βάθους κοπής 10μm την μεγαλύτερη μεταβολή θερμοκρασίας την είχε το Al_2O_3 στο τεμάχιο, αλλά την μικρότερη στον κόκκο. Τέλος στο βάθος κοπής 25μm υπήρχαν μικρές μεταβολές θερμοκρασίας στο τεμάχιο, αλλά στον κόκκο την μεγαλύτερη θερμοκρασία την παρουσίασε το Διαμάντι και την μικρότερη το Οξείδιο του Αργιλίου.

4.3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.18mm και τεμάχιο DIN-16MnCr5

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θερμικής προσομοίωσης κόκκου διαστάσεων 0.18mm για τρία διαφορετικά βάθους κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

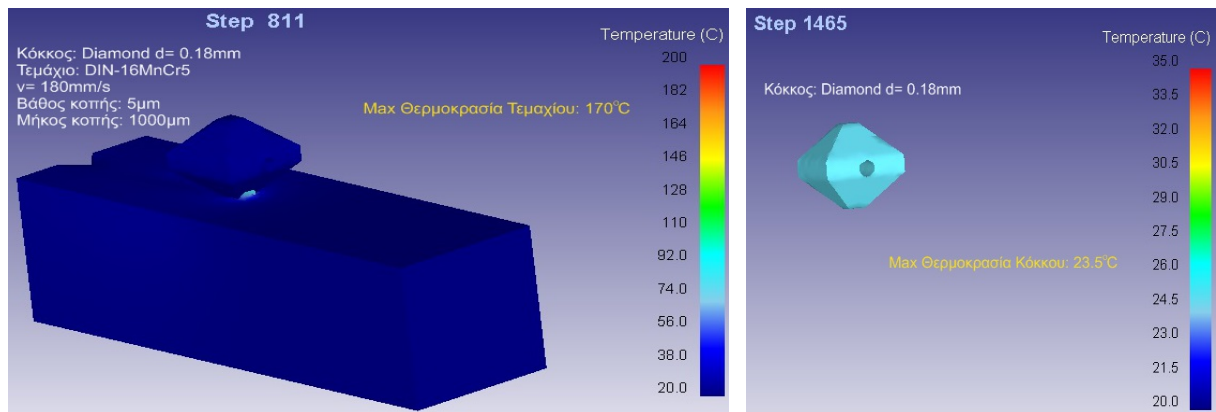
Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το υλικό του κόκκου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Διαμάντι(Diamond)
- Ανθρακοπυρίτιο(SiC)
- Οξείδιο του Αργιλίου(Al_2O_3)

Ενώ το υλικό του τεμαχίου είναι DIN-16MnCr5.

4.3.3.1 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

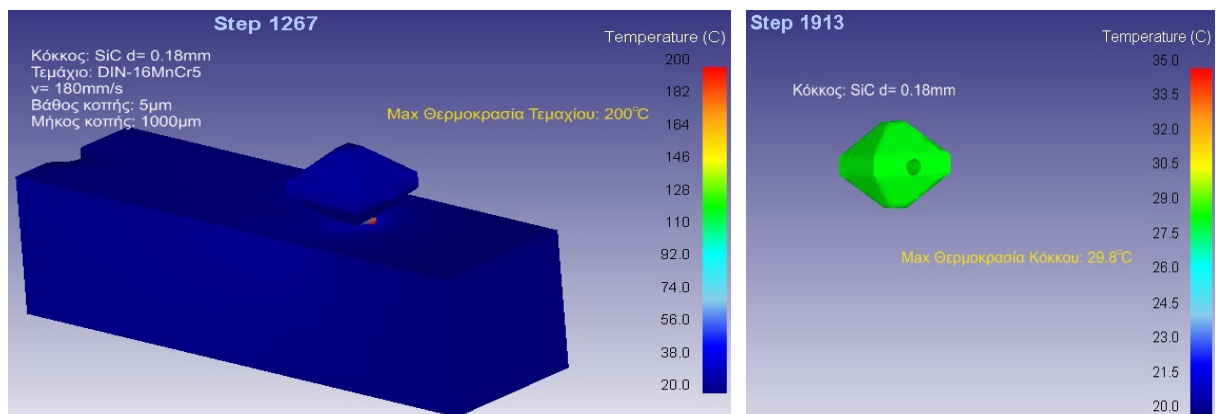
Στο σχήμα 4.42 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 170°C για το τεμάχιο και 23.5°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.42: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.3.2 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

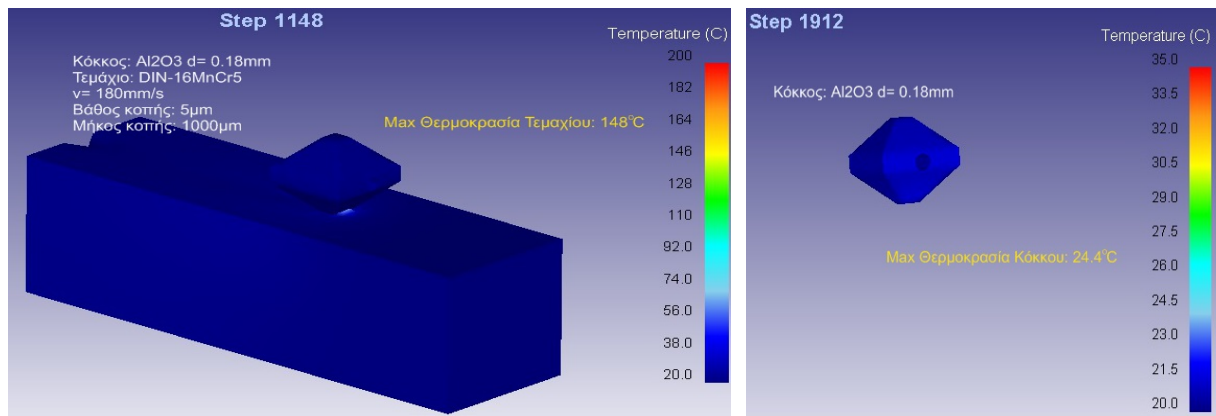
Στο σχήμα 4.43 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 200°C για το τεμάχιο και 29.8°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.43: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.3.3 Οξειδίο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

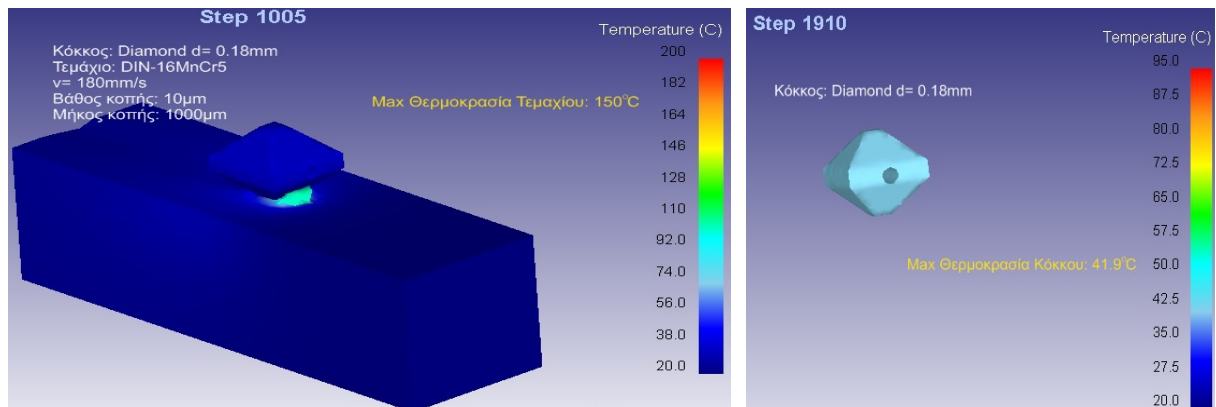
Στο σχήμα 4.44 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 148°C για το τεμάχιο και 24.4°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.44: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al₂O₃ διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.3.4 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

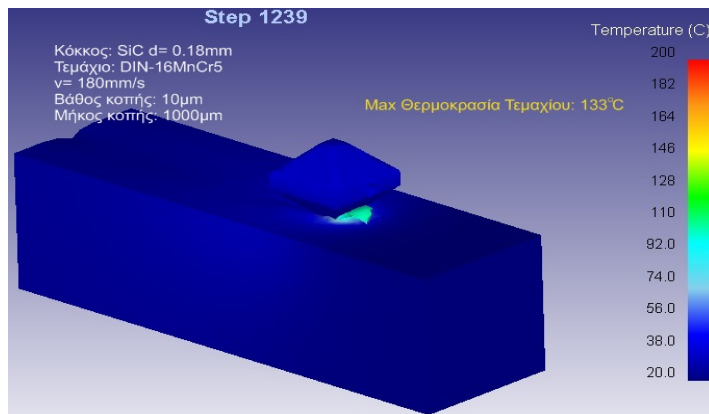
Στο [σχήμα 4.45](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 150°C για το τεμάχιο και 41.9°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.45: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.3.5 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

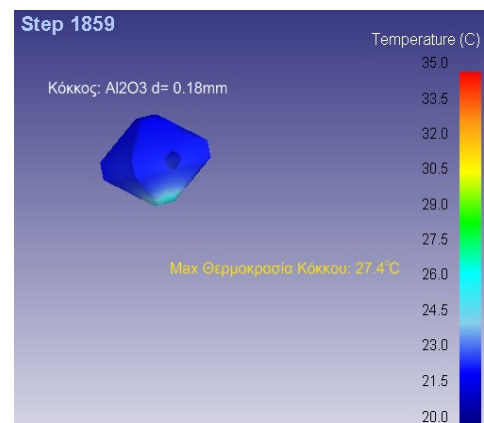
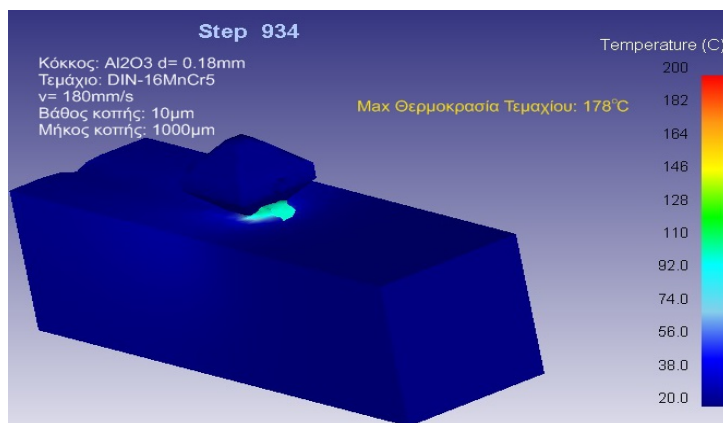
Στο [σχήμα 4.46](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 133°C για το τεμάχιο και 41.7°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.46: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10 μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.3.6 Οξειδίο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10 μm

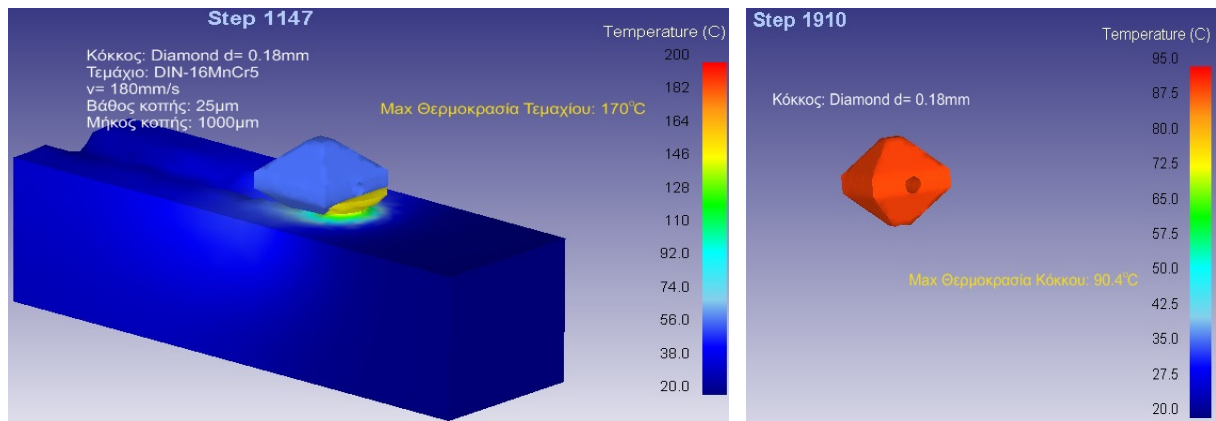
Στο σχήμα 4.47 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 178°C για το τεμάχιο και 27.4°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.47: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10 μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.3.7 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25 μm

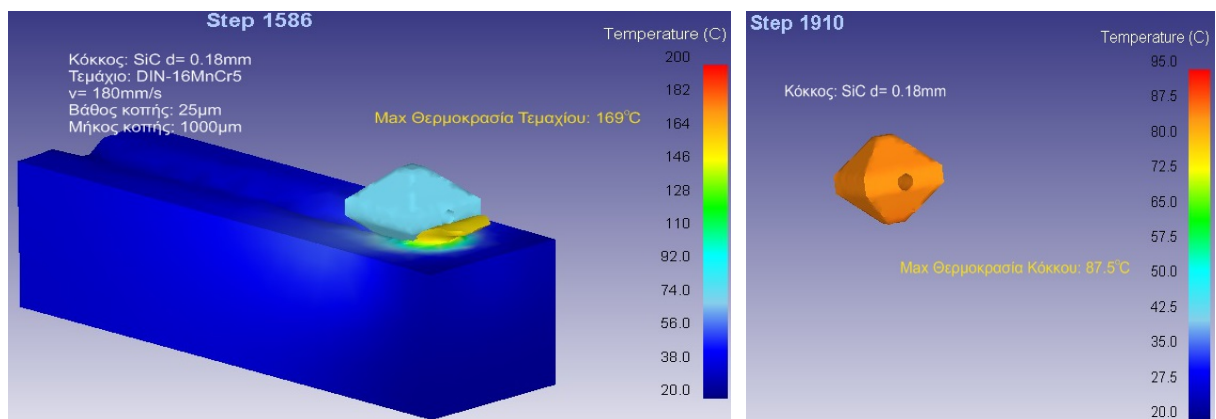
Στο σχήμα 4.48 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 170°C για το τεμάχιο και 90.4°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.48: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.3.8 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

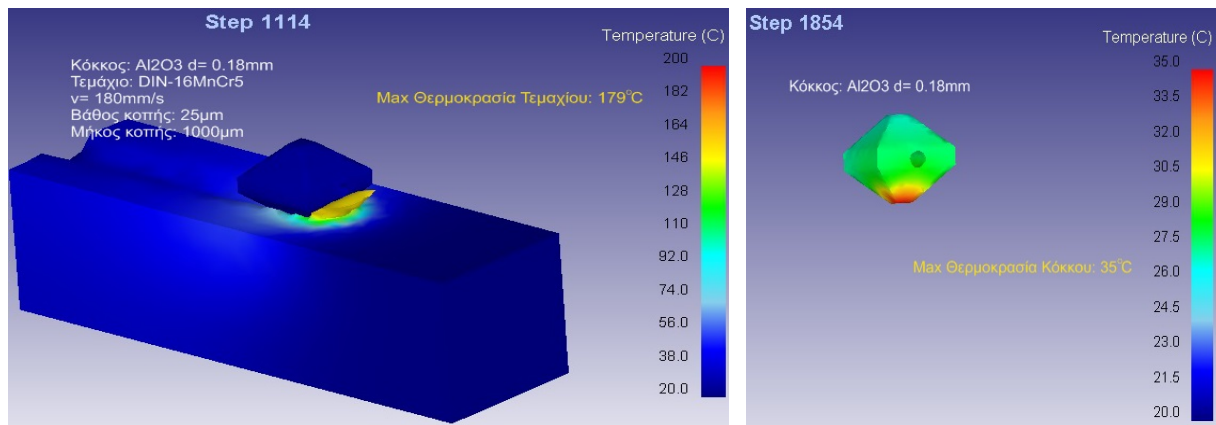
Στο σχήμα 4.49 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 169°C για το τεμάχιο και 87.5°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.49: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.3.9 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

Στο σχήμα 4.50 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 179°C για το τεμάχιο και 35°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.50: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25µm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000µm

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε ότι στο βάθος κοπής 5µm την μεγαλύτερη θερμοκρασία στο τεμάχιο την παρουσίασε το Ανθρακοπυρίτιο, ενώ την μικρότερη το Οξειδίο του Αργιλίου, και στο κόκκο πάλι το Ανθρακοπυρίτιο, ενώ την μικρότερη το Διαμάντι. Στο βάθος κοπής 10µm την μεγαλύτερη θερμοκρασία στο τεμάχιο την εμφάνισε το Οξειδίο του Αργιλίου, ενώ την μικρότερη το Ανθρακοπυρίτιο, και στο κόκκο την μικρότερη θερμοκρασία την παρουσιάζει το Οξειδίο του Αργιλίου, ενώ τα δύο άλλα υλικά εμφανίζουν την ίδια περίπου θερμοκρασία. Τέλος στο βάθος κοπής 25µm υπήρχε μικρή διαφορά στις θερμοκρασίες στο τεμάχιο, ενώ στο κόκκο την μεγαλύτερη θερμοκρασία εμφάνισε το Διαμάντι με μικρή διαφορά από το Ανθρακοπυρίτιο, σε αντίθεση με το Οξειδίο του Αργιλίου που εμφάνισε πολύ μικρή μεταβολή θερμοκρασίας.

4.3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.18mm και τεμάχιο Aluminum 7075

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θερμικής προσομοίωσης κόκκου διαστάσεων 0.18mm για τρία διαφορετικά βάθους κοπής 5µm, 10µm και 25µm.

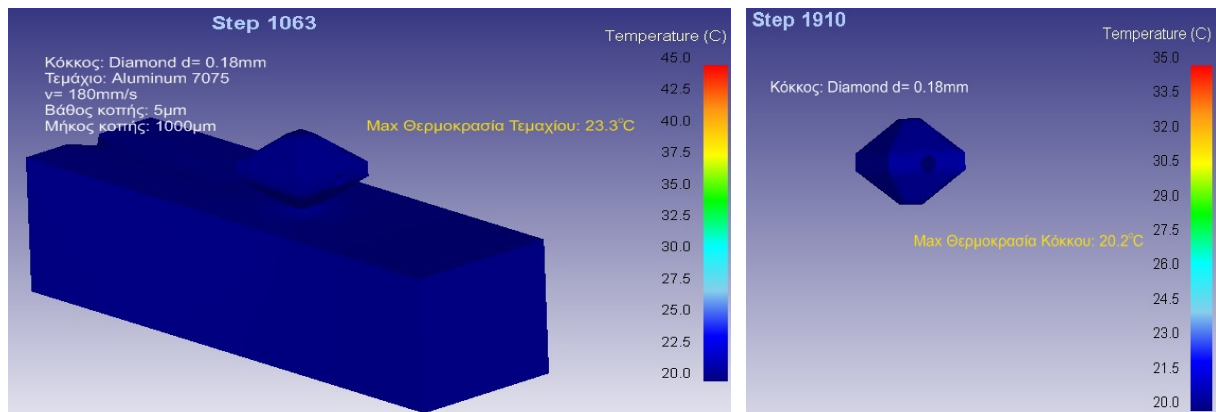
Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το υλικό του κόκκου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Διαμάντι(Diamond)
- Ανθρακοπυρίτιο(SiC)
- Οξειδίο του Αργιλίου(Al_2O_3)

Ενώ το υλικό του τεμαχίου είναι Aluminum 7075.

4.3.4.1 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5µm

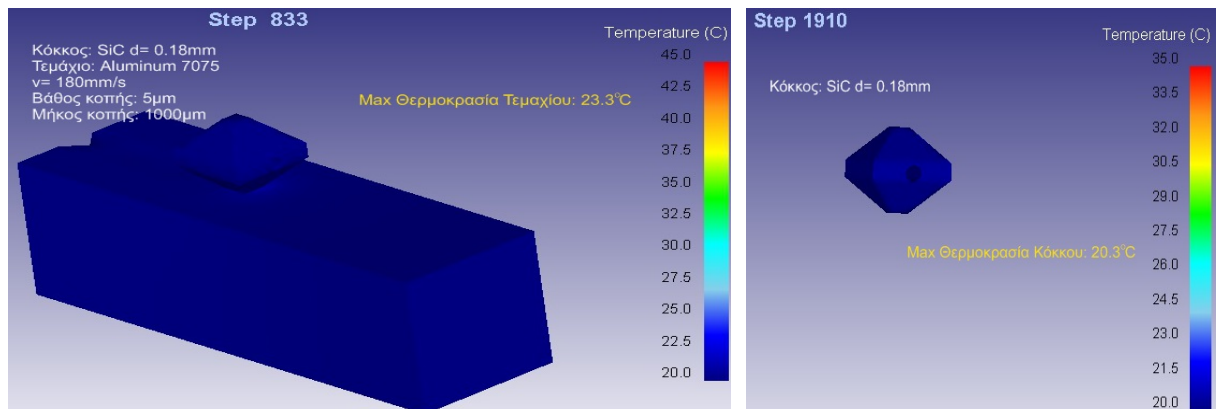
Στο σχήμα 4.51 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5µm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 23.3°C για το τεμάχιο και 20.2°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.51: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.2 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

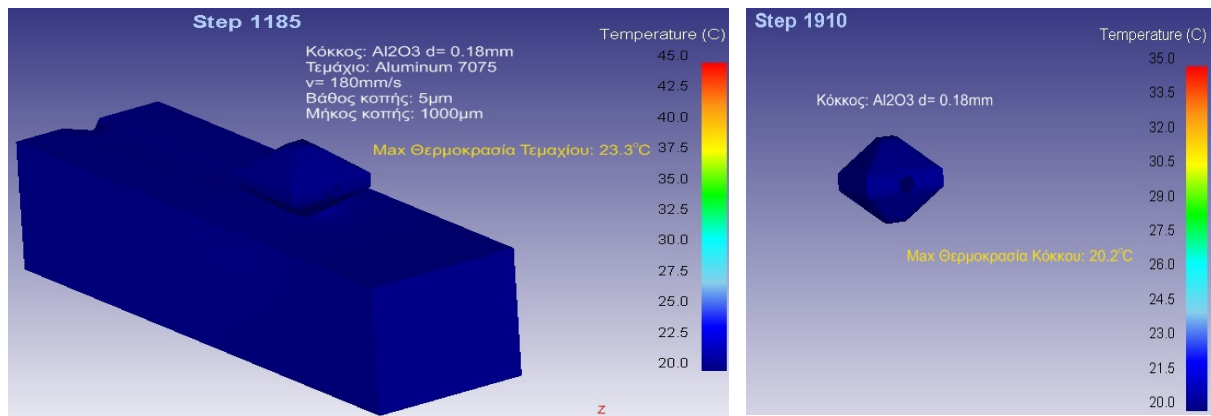
Στο σχήμα 4.52 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 23.3°C για το τεμάχιο και 20.3°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.52: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.3 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

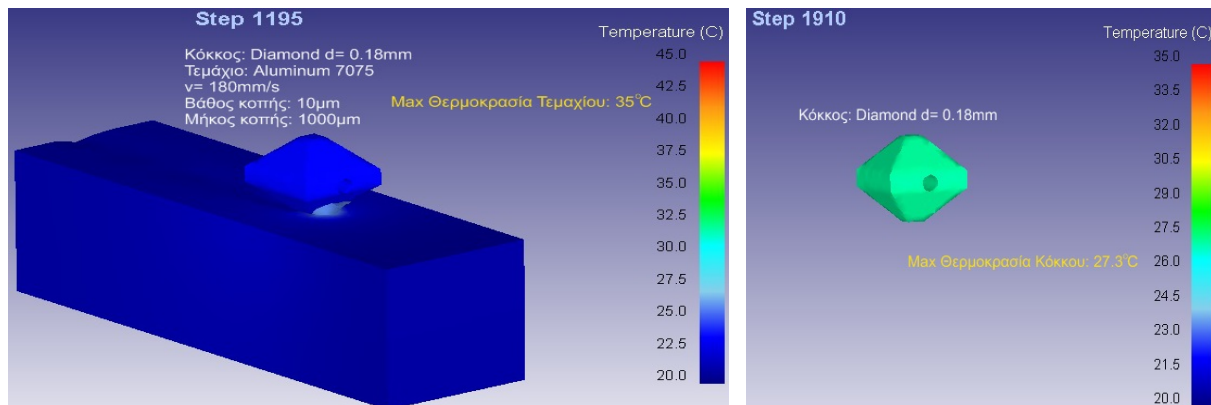
Στο σχήμα 4.53 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 23.3°C για το τεμάχιο και 20.2°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.53: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.4 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

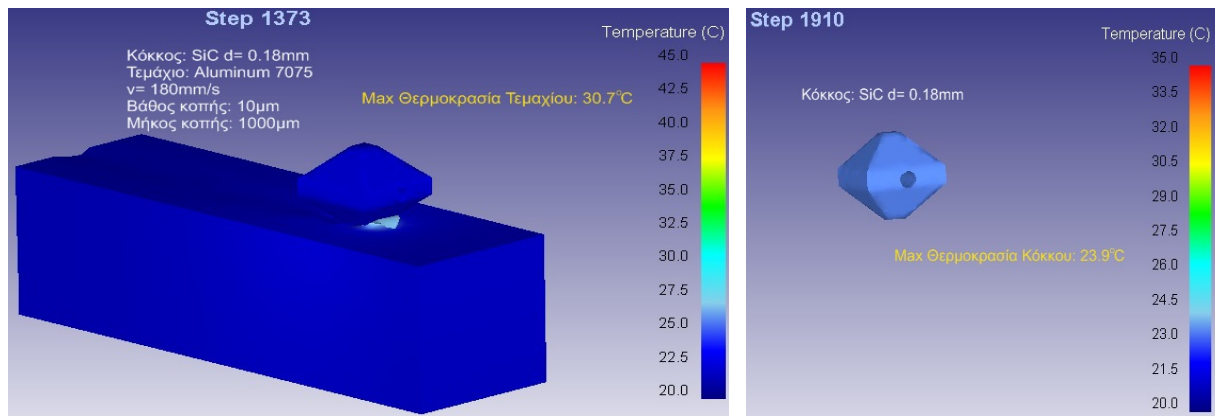
Στο σχήμα 4.54 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 35°C για το τεμάχιο και 27.3°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.54: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.5 Ανθρακοτυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

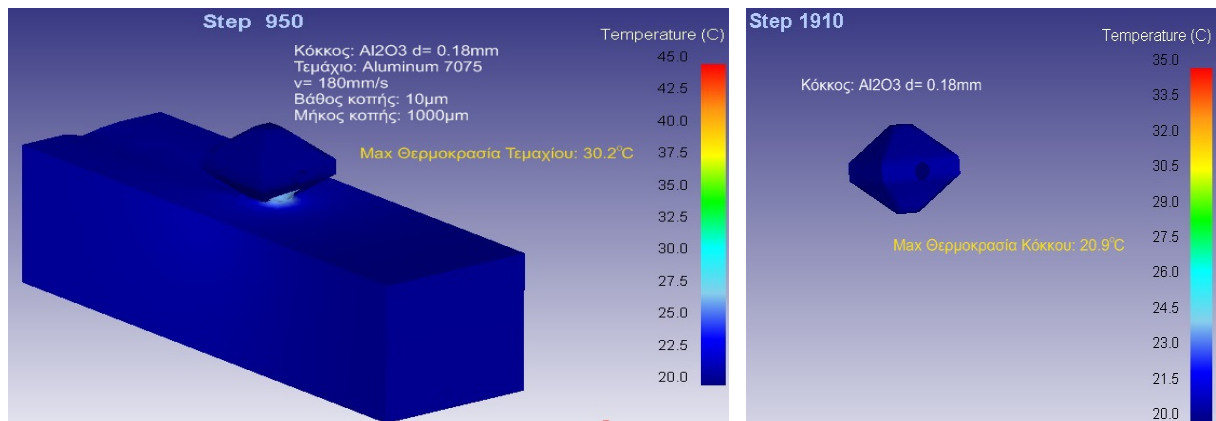
Στο σχήμα 4.55 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 30.7°C για το τεμάχιο και 23.9°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.55: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.6 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

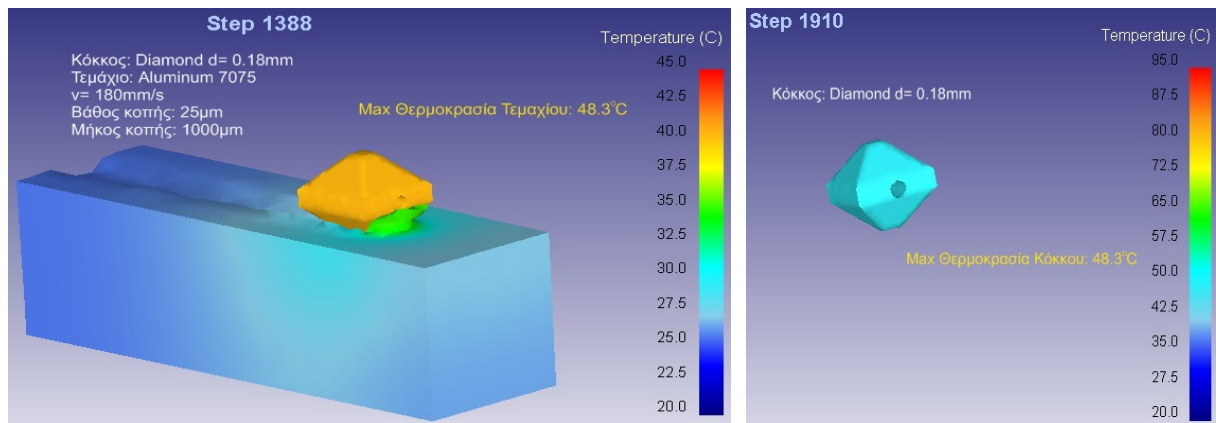
Στο σχήμα 4.56 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 30.2°C για το τεμάχιο και 20.9°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.56: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.7 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

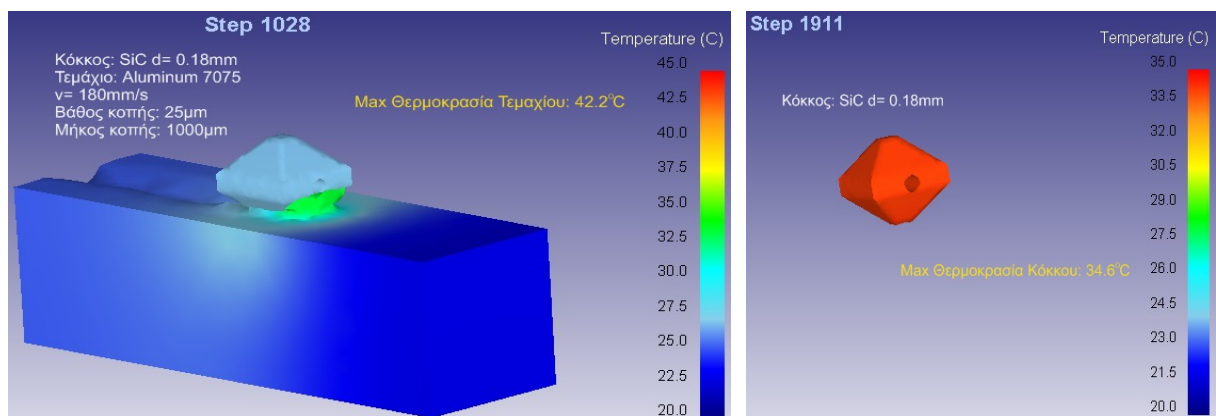
Στο σχήμα 4.57 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 48.3°C για το τεμάχιο και 48.3°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.57: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.8 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

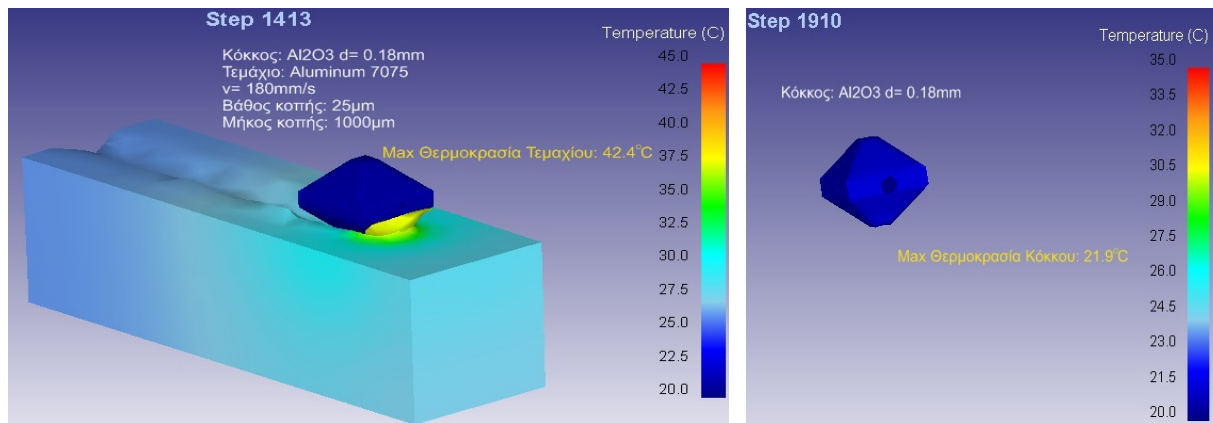
Στο σχήμα 4.58 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 42.2°C για το τεμάχιο και 34.6°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.58: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.4.9 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

Στο σχήμα 4.59 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 42.4°C για το τεμάχιο και 21.9°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.59: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.18mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε ότι στο βάθος κοπής 5μm σε όλες τις περιπτώσεις η μεταβολή θερμοκρασίας ήταν ίδια, ενώ στο κόκκο δεν υπήρχε μεγάλη διαφορά στις θερμοκρασίες των υλικών. Στο βάθος κοπής 10μm την μεγαλύτερη θερμοκρασία στο τεμάχιο την εμφάνισε το Διαμάντι, ενώ την μικρότερη το Οξείδιο του Αργιλίου με μικρή διαφορά με το Ανθρακοπυρίτιο, και στο κόκκο την μικρότερη θερμοκρασία την παρουσιάζει το Οξείδιο του Αργιλίου, ενώ τα δύο άλλα υλικά εμφανίζουν την ίδια περίπου θερμοκρασία. Τέλος στο βάθος κοπής 25μm υπήρχε μικρή διαφορά στις θερμοκρασίες στο τεμάχιο, ενώ στο κόκκο την μεγαλύτερη θερμοκρασία εμφάνισε το Διαμάντι, σε αντίθεση με το Οξείδιο του Αργιλίου που εμφάνισε πολύ μικρή μεταβολή θερμοκρασίας.

4.3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.2mm και τεμάχιο DIN-16MnCr5

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θερμικής προσομοίωσης κόκκου διαστάσεων 0.2mm για τρία διαφορετικά βάθους κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

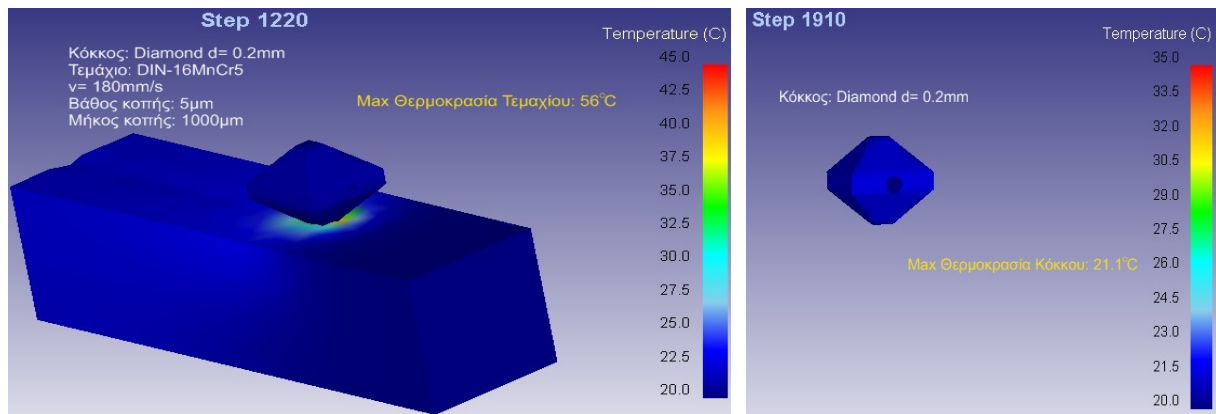
Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το υλικό του κόκκου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Διαμάντι(Diamond)
- Ανθρακοπυρίτιο(SiC)
- Οξείδιο του Αργιλίου(Al_2O_3)

Ενώ το υλικό του τεμαχίου είναι DIN-16MnCr5.

4.3.5.1 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

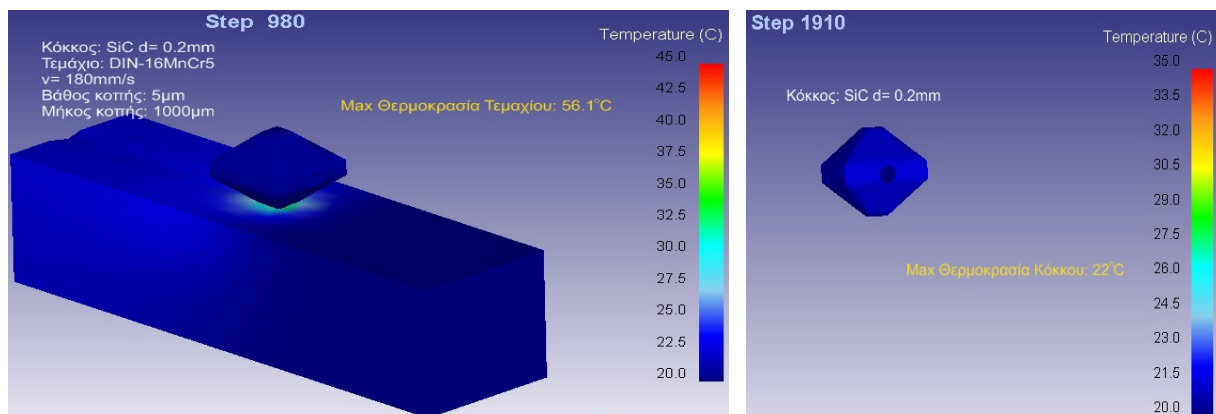
Στο σχήμα 4.60 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 56°C για το τεμάχιο και 21.1°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.60: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.5.2 Ανθρακοπυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

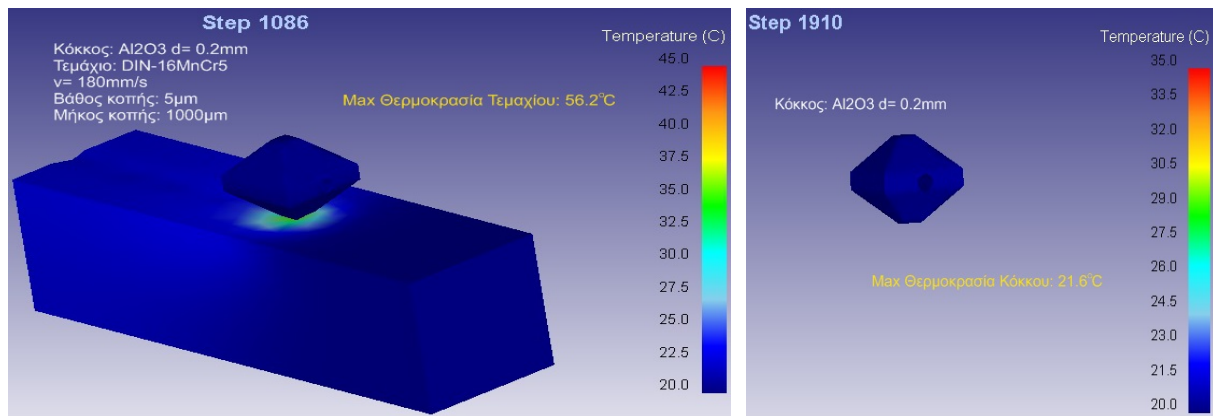
Στο [σχήμα 4.61](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 56.1°C για το τεμάχιο και 22°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.61: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.5.3 Οξειδίο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

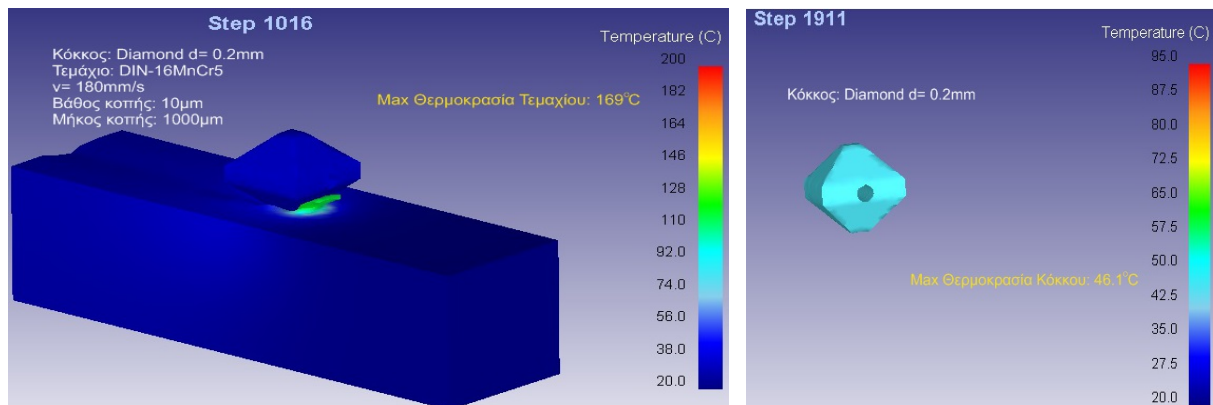
Στο [σχήμα 4.62](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 56.2°C για το τεμάχιο και 21.6°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.62: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.5.4 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

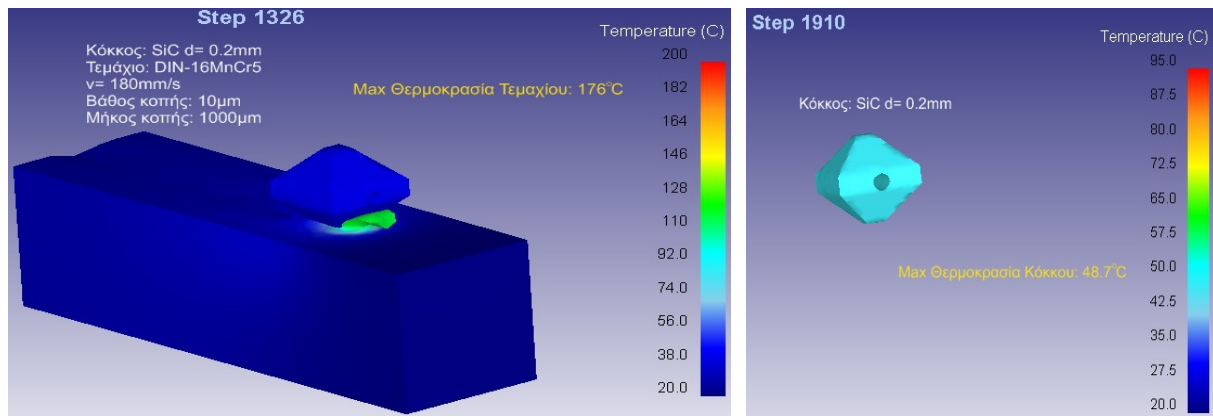
Στο [σχήμα 4.63](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 169°C για το τεμάχιο και 46.1°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.63: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.5.5 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

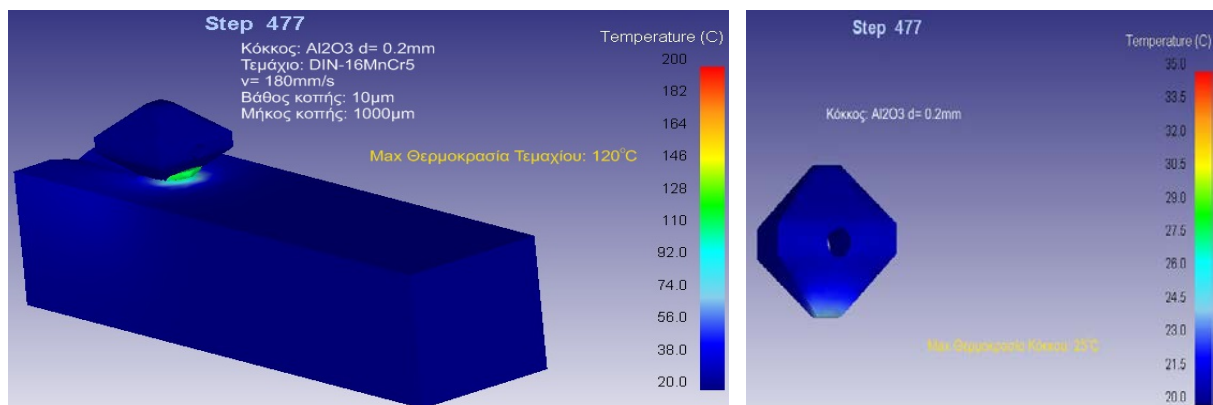
Στο [σχήμα 4.64](#) παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 176°C για το τεμάχιο και 48.7°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.64: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10 μm και κατανομής θερμοκρασίας στον κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.5.6 Οξειδίο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10 μm

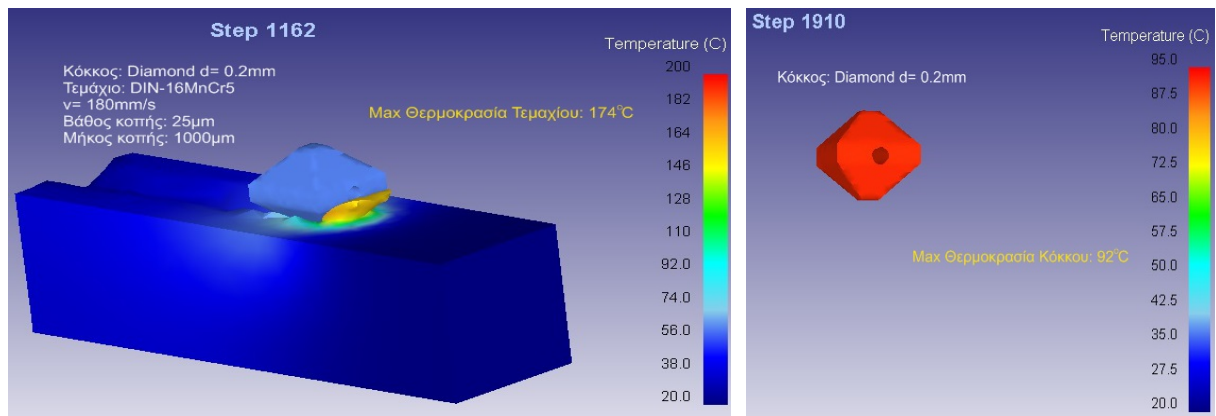
Στο σχήμα 4.65 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 10 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 120°C για το τεμάχιο και 25°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.65: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 10 μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

4.3.5.7 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25 μm

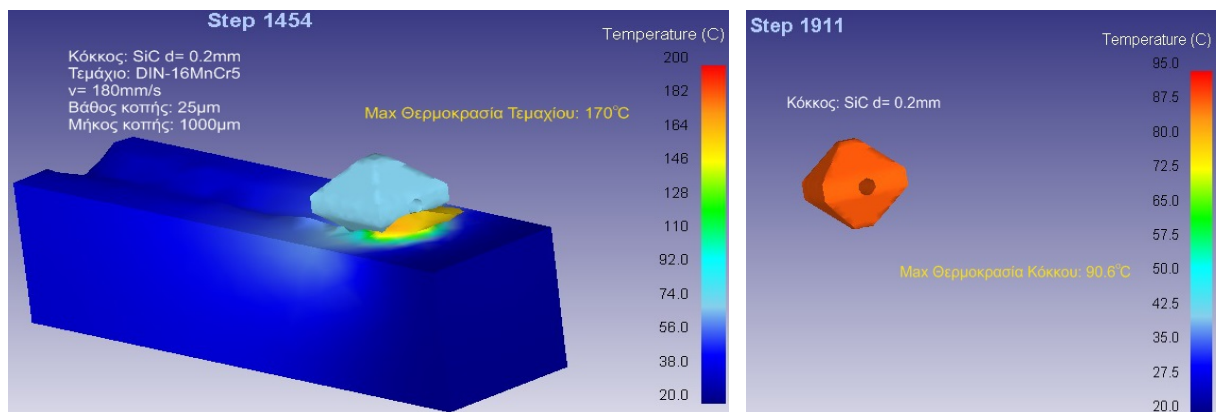
Στο σχήμα 4.66 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 174°C για το τεμάχιο και 92°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.66: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.5.8 Ανθρακοπυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

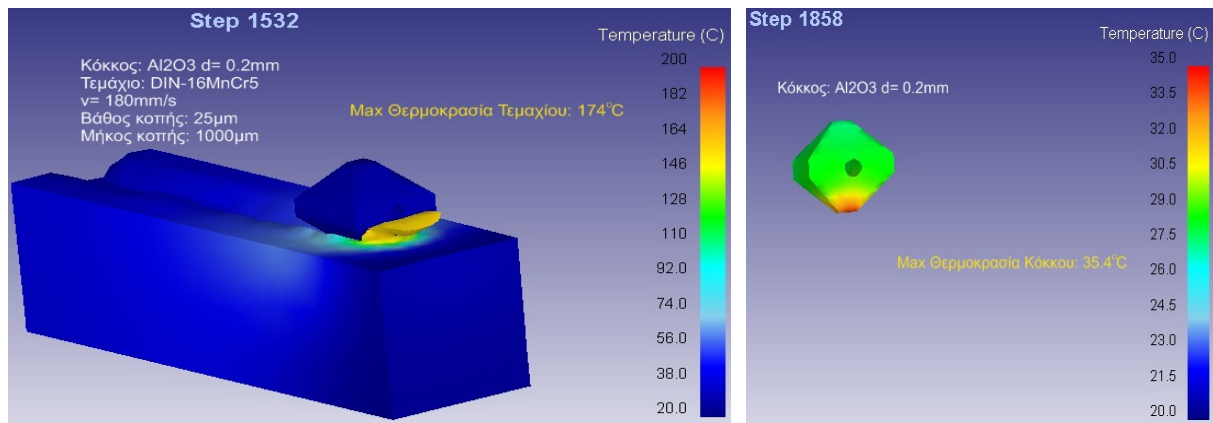
Στο σχήμα 4.67 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 170°C για το τεμάχιο και 90.6°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.67: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.5.9 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

Στο σχήμα 4.68 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου DIN-16MnCr5 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 174°C για το τεμάχιο και 35.4°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.68: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο DIN-16MnCr5 βάθους κοπής 25 μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000 μm

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε ότι στο βάθος κοπής 5 μm και στις τρεις περιπτώσεις εμφανίστηκε περίπου η ίδια μεταβολή θερμοκρασίας και το ίδιο παρατηρήθηκε και στο κόκκο. Στο βάθος κοπής 10 μm την μεγαλύτερη θερμοκρασία στο τεμάχιο την εμφάνισε το Ανθρακοπυρίτιο, ενώ την μικρότερη το Οξείδιο του Αργιλίου, και στο κόκκο την μικρότερη θερμοκρασία την παρουσιάζει το Οξείδιο του Αργιλίου, ενώ τα δύο άλλα υλικά εμφανίζουν την ίδια περίπου θερμοκρασία. Τέλος στο βάθος κοπής 25 μm υπήρχε μικρή διαφορά στις θερμοκρασίες στο τεμάχιο, ενώ στο κόκκο την μεγαλύτερη θερμοκρασία εμφάνισε το Διαμάντι με μικρή διαφορά από το Ανθρακοπυρίτιο, σε αντίθεση με το Οξείδιο του Αργιλίου που εμφάνισε πολύ μικρή μεταβολή θερμοκρασίας.

4.3.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση κόκκου 0.2mm και τεμάχιο Aluminum 7075

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θερμικής προσομοίωσης κόκκου διαστάσεων 0.2mm για τρία διαφορετικά βάθους κοπής 5 μm , 10 μm και 25 μm .

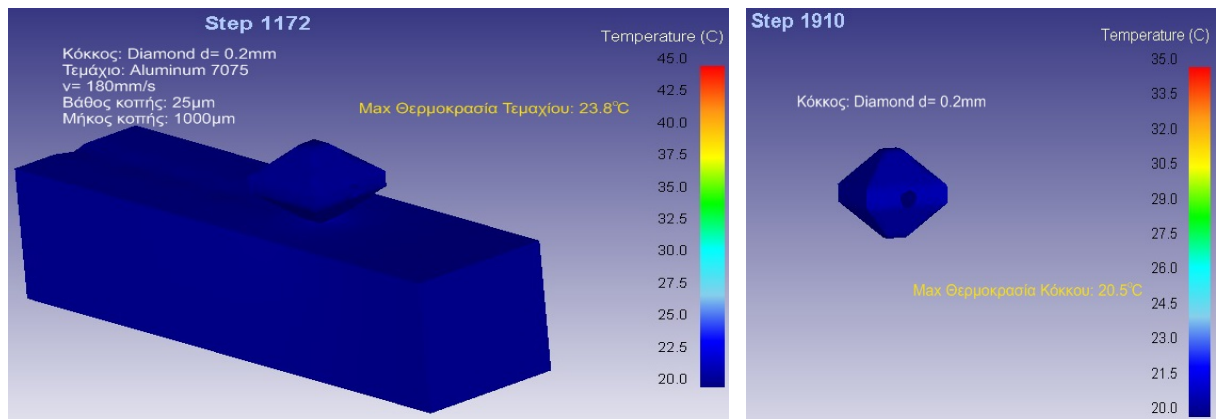
Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το υλικό του κόκκου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

- Διαμάντι(Diamond)
- Ανθρακοπυρίτιο(SiC)
- Οξείδιο του Αργιλίου(Al_2O_3)

Ενώ το υλικό του τεμαχίου είναι Aluminum 7075.

4.3.6.1 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5 μm

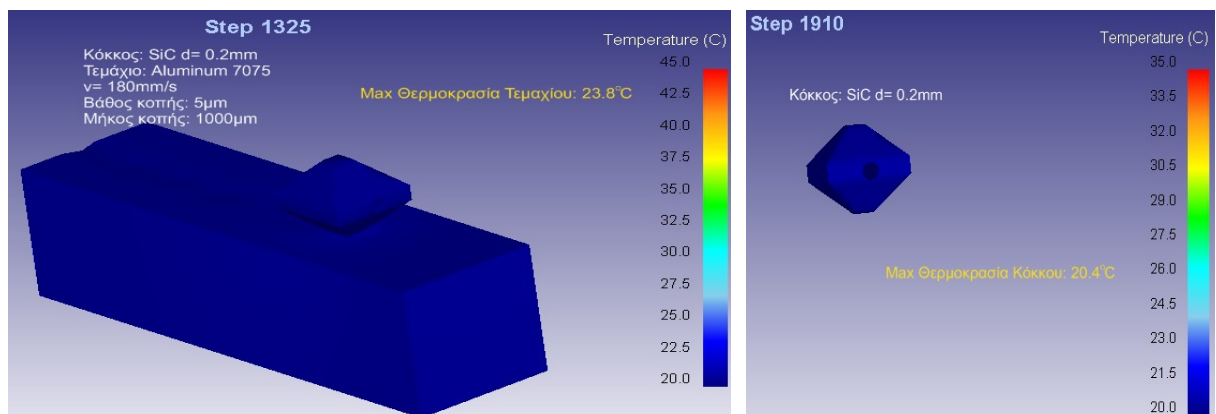
Στο σχήμα 4.69 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5 μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 23.8 $^{\circ}\text{C}$ για το τεμάχιο και 20.5 $^{\circ}\text{C}$ για τον κόκκο.



Σχήμα 4.69: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.2 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

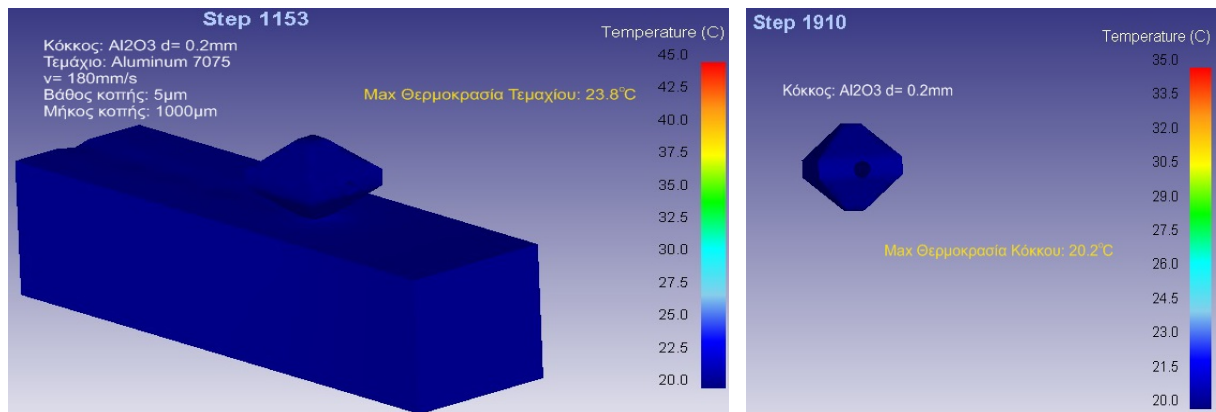
Στο σχήμα 4.70 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 23.8°C για το τεμάχιο και 20.4°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.70: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.3 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 5μm

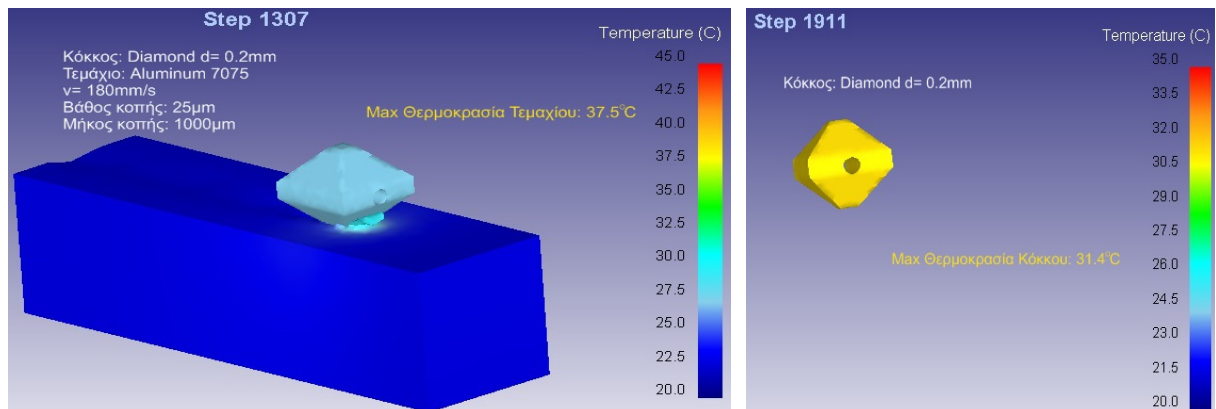
Στο σχήμα 4.71 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 5μm με αποτέλεσμα τιμής θερμικής συμπεριφοράς ίση με 23.8°C για το τεμάχιο και 20.2°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.71: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al₂O₃ διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 5μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.4 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

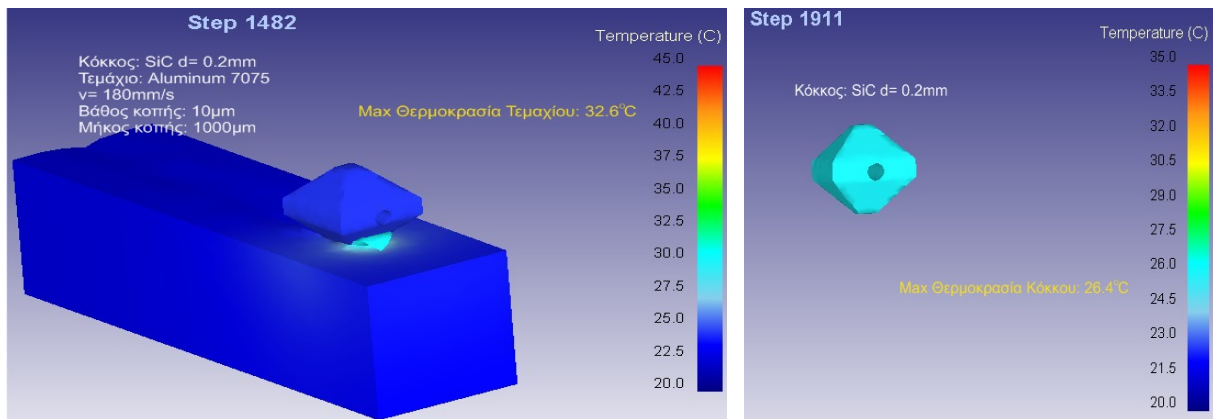
Στο σχήμα 4.72 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 37.5°C για το τεμάχιο και 31.4°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.72: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.5 Ανθρακοκυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

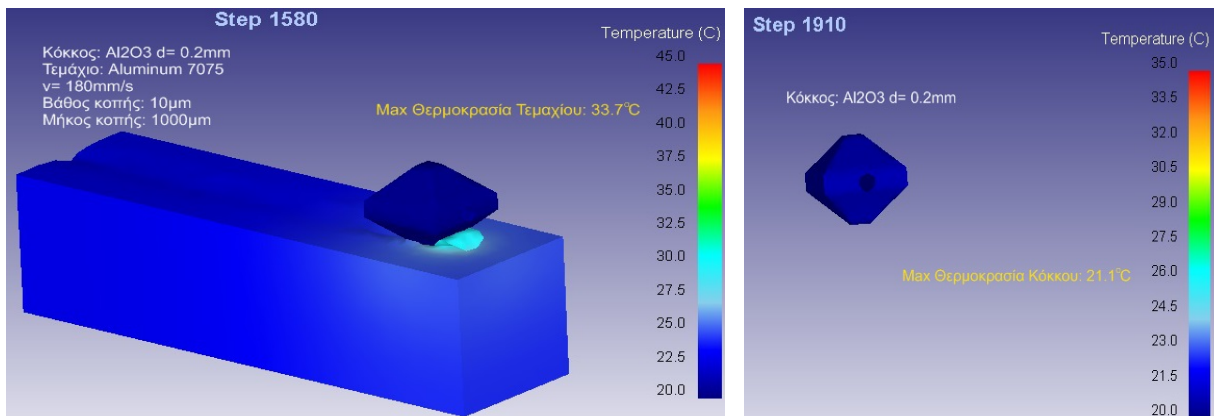
Στο σχήμα 4.73 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 32.6°C για το τεμάχιο και 26.4°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.73: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.6 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 10μm

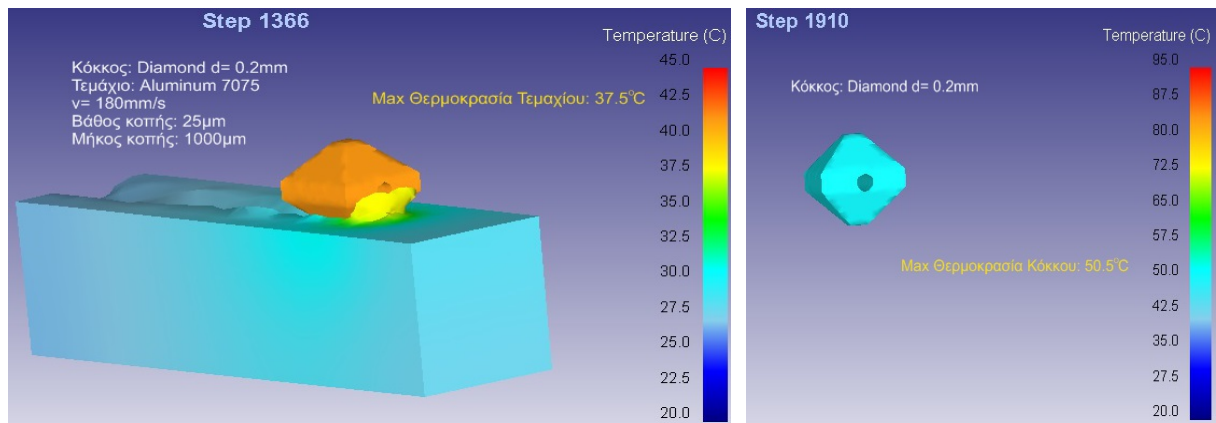
Στο σχήμα 4.74 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 10μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 33.7°C για το τεμάχιο και 21.1°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.74: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al_2O_3 διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 10μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.7 Διαμάντι ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

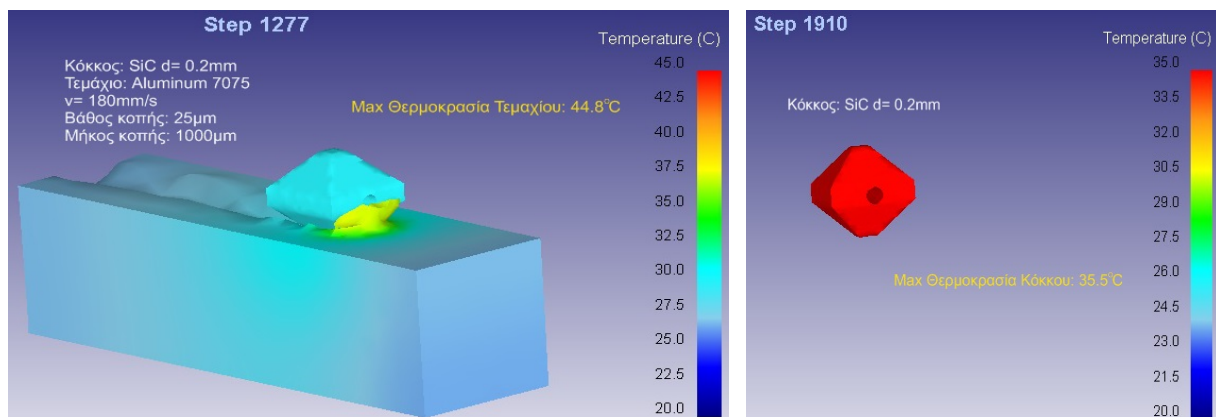
Στο σχήμα 4.75 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Diamond, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 37.5°C για το τεμάχιο και 50.5°C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.75: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Diamond διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.8 Ανθρακοπυρίτιο ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

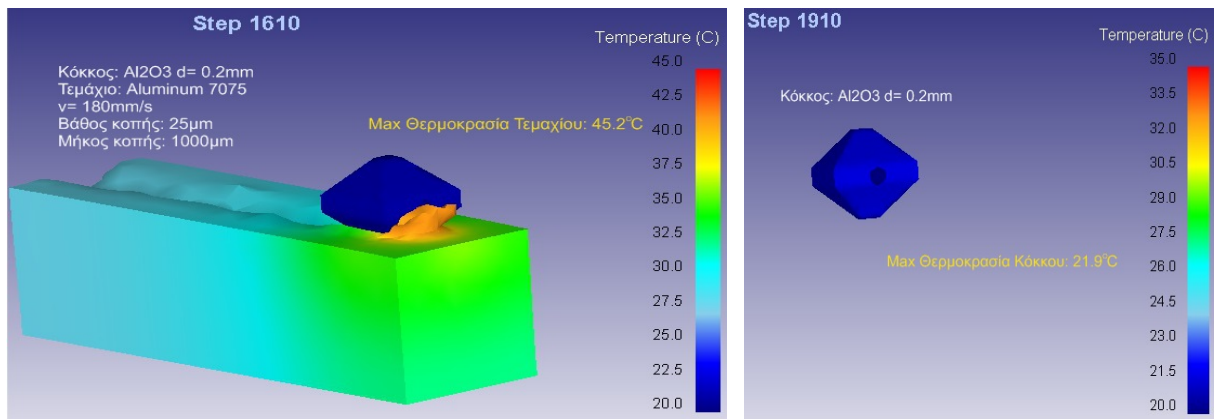
Στο σχήμα 4.76 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου SiC, τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 44.8 °C για το τεμάχιο και 35.5 °C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.76: Προσομοίωση λείανσης κόκκου SiC διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

4.3.6.9 Οξείδιο του Αλουμινίου ως υλικό κόκκου βάθους κοπής 25μm

Στο σχήμα 4.77 παρουσιάζεται η περίπτωση του πειράματος κόκκου Al_2O_3 , τεμαχίου Aluminum 7075 με βάθος κοπής 25μm με αποτέλεσμα τιμές θερμικής συμπεριφοράς ίση με 45.2 °C για το τεμάχιο και 21.9 °C για τον κόκκο.



Σχήμα 4.77: Προσομοίωση λείανσης κόκκου Al₂O₃ διαμέτρου 0.2mm με τεμάχιο Aluminum 7075 βάθους κοπής 25μm και κατανομής θερμοκρασίας στο κόκκο μετά από μήκος διαδρομής 1000μm

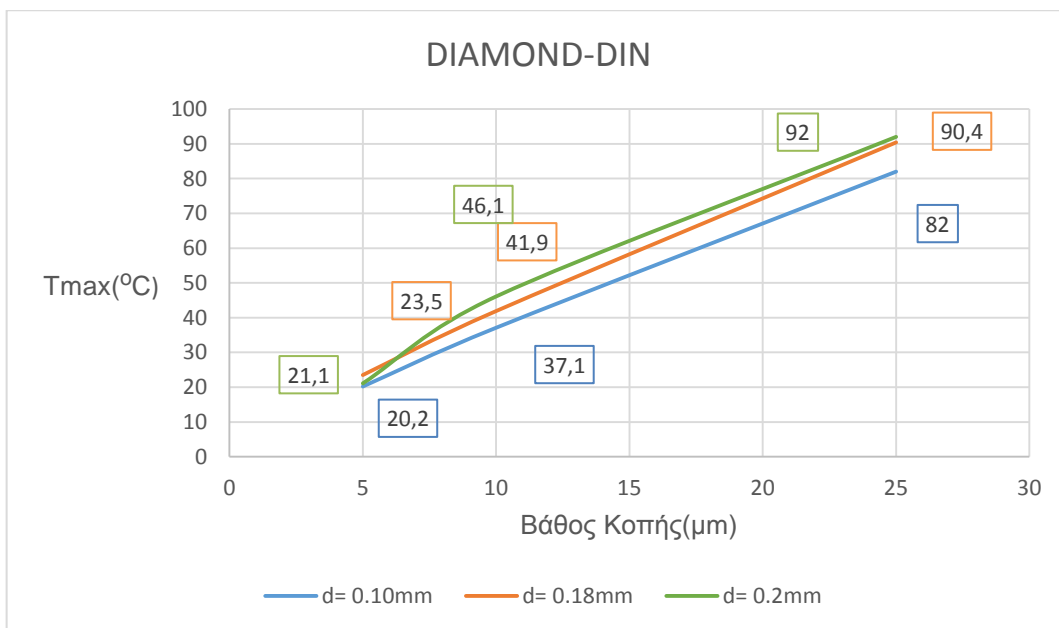
Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων προέκυψε ότι στο βάθος κοπής 5μm σε όλες τις περιπτώσεις η μεταβολή θερμοκρασίας ήταν ίδια, ενώ στο κόκκο δεν υπήρχε μεγάλη διαφορά στις θερμοκρασίες των υλικών. Στο βάθος κοπής 10μm την μεγαλύτερη θερμοκρασία στο τεμάχιο την εμφάνισε το Διαμάντι, ενώ την μικρότερη το Ανθρακοπυρίτιο με μικρή διαφορά με το Οξειδίο του Αργιλίου, και στο κόκκο την μικρότερη θερμοκρασία την παρουσιάζει το Οξειδίο του Αργιλίου, ενώ τη μεγαλύτερη το Διαμάντι. Τέλος στο βάθος κοπής 25μm υπήρχε μικρή διαφορά στις θερμοκρασίες στο τεμάχιο, ενώ στο κόκκο την μεγαλύτερη θερμοκρασία εμφάνισε το Διαμάντι, σε αντίθεση με το Οξειδίο του Αργιλίου που εμφάνισε τη μικρότερη μεταβολή θερμοκρασίας.

4.3.7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων κόκκων

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται, συνοπτικά, τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων των κόκκων που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω προσομοιώσεις για τα τρία βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm, κατανεμημένα ανά υλικό κόκκου και υλικό τεμαχίου.

4.3.7.1 Αποτελέσματα κόκκου Diamond σε τεμάχιο DIN-16MnCr5

Στο σχήμα 4.78 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κόκκων υλικού Diamond διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm, 0.2mm κατά την κατεργασία λείανσης τεμαχίου DIN-16MnCr5 σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

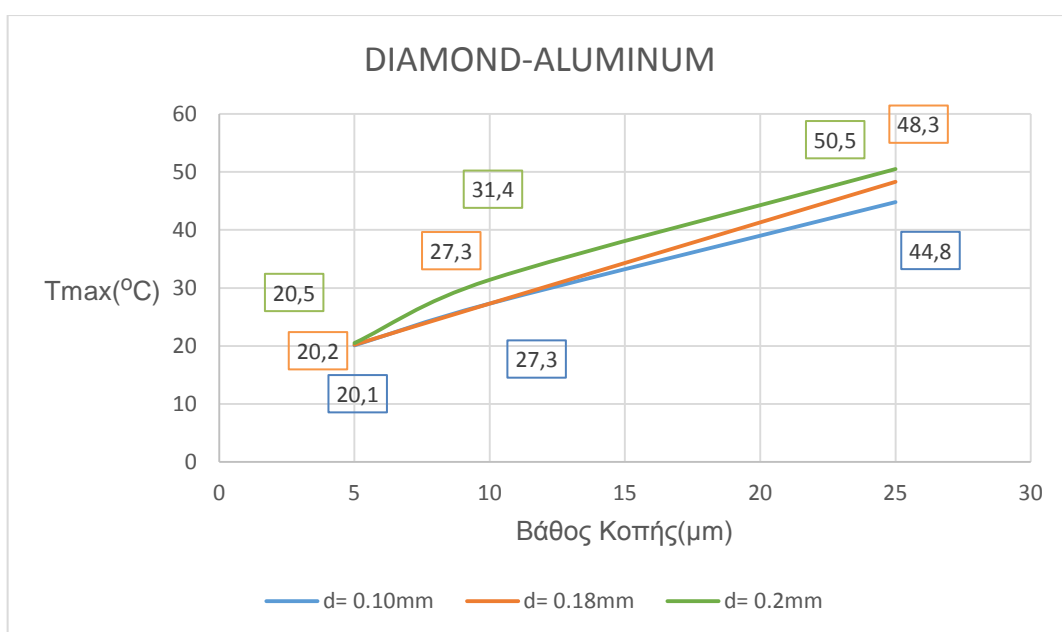


Σχήμα 4.78: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κόκκου Diamond διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm και 0.2mm σε βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm

Από το παραπάνω σχήμα διακρίνεται ότι αρχικά την μεγαλύτερη θερμοκρασία στα 5μm βάθους κοπής την εμφανίζει ο κόκκος διάστασης d= 0.18mm, ενώ την μικρότερη ο κόκκος διάστασης d= 0.1mm, αλλά καθώς αυξάνεται το βάθος κοπής την μεγαλύτερη θερμοκρασία την εμφανίζει ο κόκκος διάστασης d=0.2mm και στα δύο βάθη κοπής 10μm και 25μm, ενώ όπως ήταν αναμενόμενο ο κόκκος διάστασης d= 0.10mm και στα άλλα δύο βάθη κοπής έχει την μικρότερη μεταβολή θερμοκρασίας.

4.3.7.2 Αποτελέσματα κόκκου Diamond σε τεμάχιο Aluminum 7075

Στο σχήμα 4.79 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κόκκων υλικού Diamond διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm, 0.2mm κατά την κατεργασία λείανσης τεμαχίου Aluminum 7075 σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

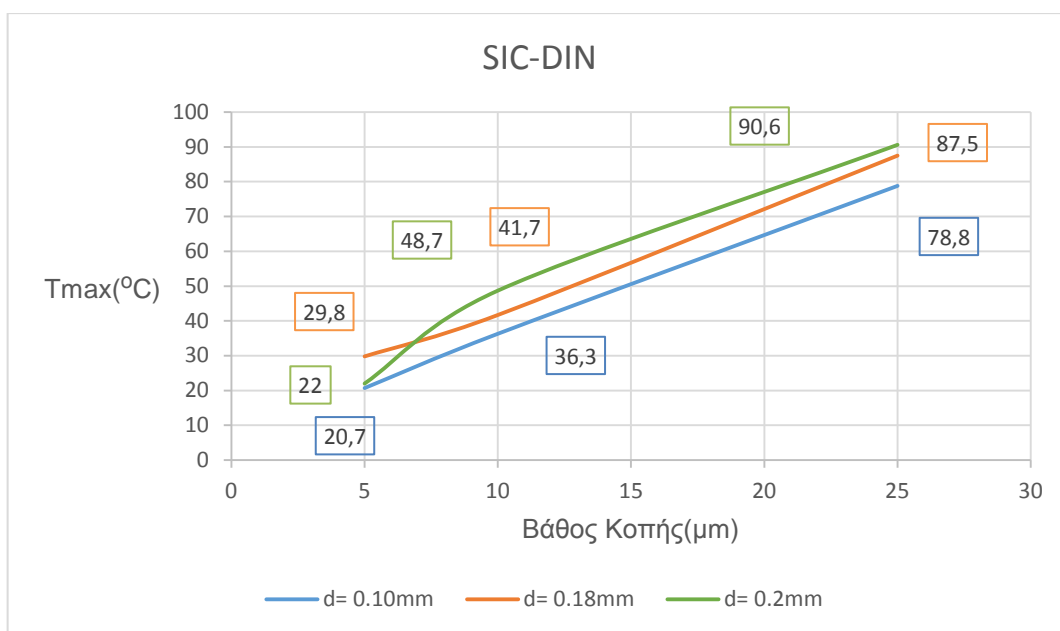


Σχήμα 4.79: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κόκκου Diamond διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm και 0.2mm σε βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm

Από το συγκεκριμένο σχήμα συμπεραίνεται ότι για το βάθος κοπής 5 μ m η διαφορά θερμοκρασίας και στους τρεις κόκκους είναι σχεδόν μηδαμινή, ενώ στο βάθος κοπής 10 μ m οι κόκκοι διάστασης 0.1mm και 0.18mm παρουσιάζουν την ίδια μεταβολή θερμοκρασίας. Για βάθος κοπής 25 μ m για τον κόκκο διάστασης d= 0.18mm παρατηρείται γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας του σε σχέση με τον κόκκο διάστασης d= 0.1mm ο οποίος καταλήγει να εμφανίζει την μικρότερη θερμοκρασία και για τους τρεις κόκκους, ενώ ο κόκκος διάστασης 0.2mm σε όλες τις περιπτώσεις εμφανίζει την μεγαλύτερη μεταβολή θερμοκρασίας.

4.3.7.3 Αποτελέσματα κόκκου Diamond σε τεμάχιο DIN-16MnCr5

Στο σχήμα 4.80 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κόκκων υλικού SiC διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm, 0.2mm κατά την κατεργασία λείανσης τεμαχίου DIN-16MnCr5 σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής 5 μ m, 10 μ m και 25 μ m.

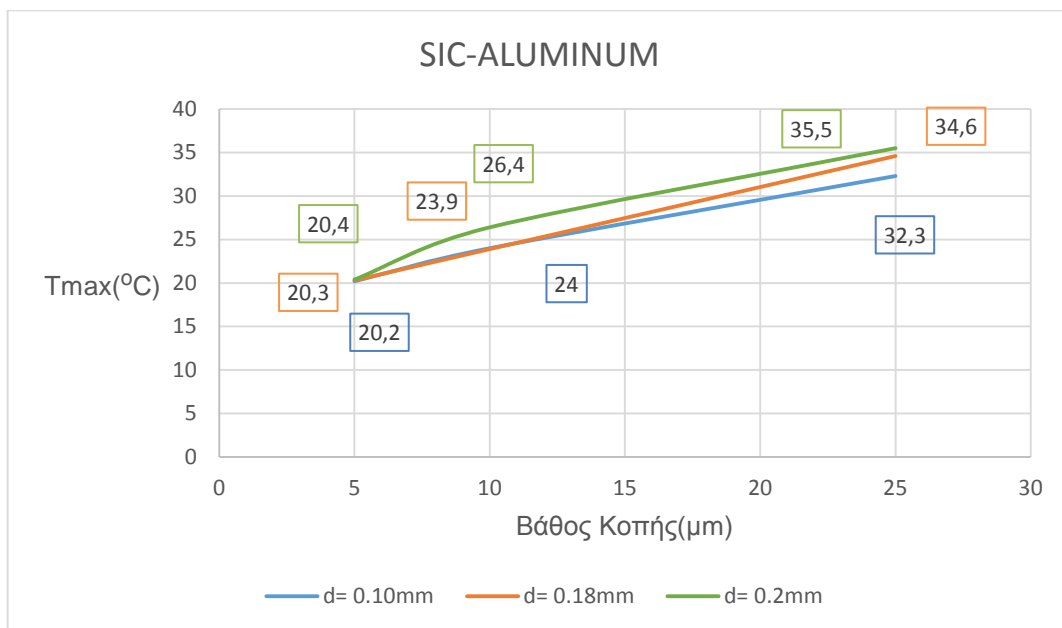


Σχήμα 4.80: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κόκκου SiC διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm και 0.2mm σε βάθη κοπής 5 μ m, 10 μ m και 25 μ m

Στο εν λόγω σχήμα, παρατηρείται ότι αρχικά, για το βάθος κοπής 5 μ m, ο κόκκος διάστασης d= 0.18mm έχει την μεγαλύτερη, με διαφορά από τους άλλους δύο κόκκους, μεταβολή θερμοκρασίας, ενώ ο κόκκος διάστασης d= 0.1mm έχει, και για τα τρία βάθη κοπής, την μικρότερη μεταβολή θερμοκρασίας. Για το βάθος κοπής 10 μ m ο κόκκος διάστασης d= 0.2mm αποκτά την μεγαλύτερη θερμοκρασία, όπως και για το βάθος κοπής 25 μ m, σε αντίθεση με τον κόκκο d= 0.18mm που αρχικά είχε την μεγαλύτερη θερμοκρασία.

4.3.7.4 Αποτελέσματα κόκκου Diamond σε τεμάχιο Aluminum 7075

Στο σχήμα 4.80 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κόκκων υλικού SiC διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm, 0.2mm κατά την κατεργασία λείανσης τεμαχίου Aluminum 7075 σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής 5 μ m, 10 μ m και 25 μ m.

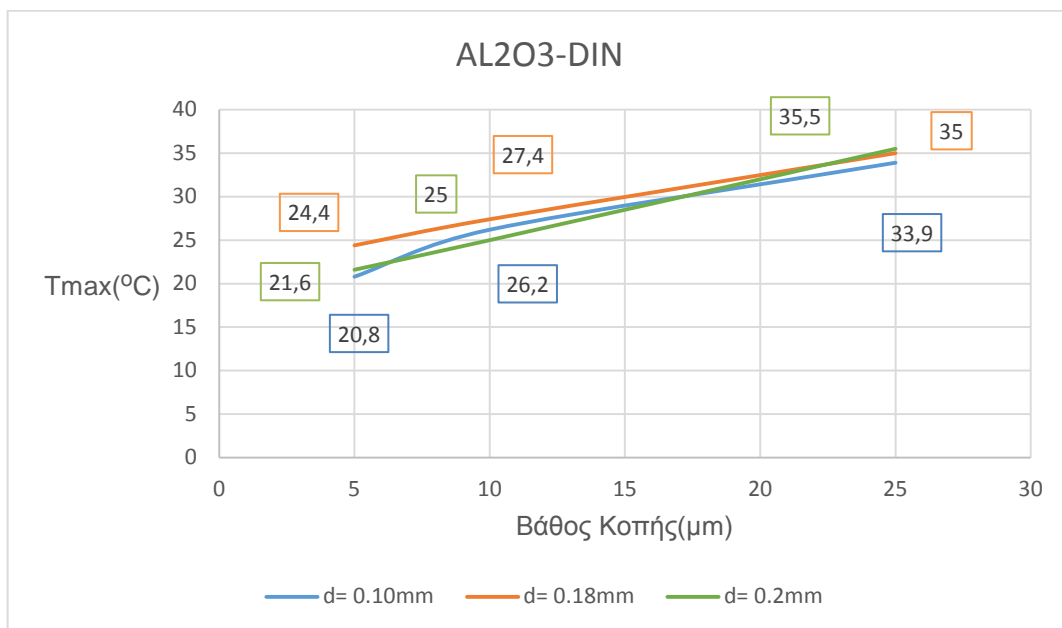


Σχήμα 4.80: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κόκκου SiC διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm και 0.2mm σε βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι αρχικά, για βάθος κοπής 5μm, και οι τρεις κόκκοι είχαν μικρή διαφορά στις μεταβολές θερμοκρασίας. Για το βάθος κοπής 10μm ο κόκκος διάστασης d= 0.18mm παρουσίασε την μικρότερη θερμοκρασία με ελάχιστη διαφορά με τον κόκκο d=0.1mm, ενώ ο κόκκος διάστασης d=0.2mm παρουσίασε πάλι την μεγαλύτερη θερμοκρασία. Τέλος για το βάθος κοπής 25μm τη μεγαλύτερη θερμοκρασία την εμφάνισε ο κόκκος διάστασης d= 0.2mm, ενώ την μικρότερη ο κόκκος διάστασης d=0.1mm.

4.3.7.5 Αποτελέσματα κόκκου Diamond σε τεμάχιο DIN-16MnCr5

Στο σχήμα 4.81 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κόκκων υλικού Al₂O₃ διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm, 0.2mm κατά την κατεργασία λείανσης τεμαχίου DIN-16MnCr5 σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm.

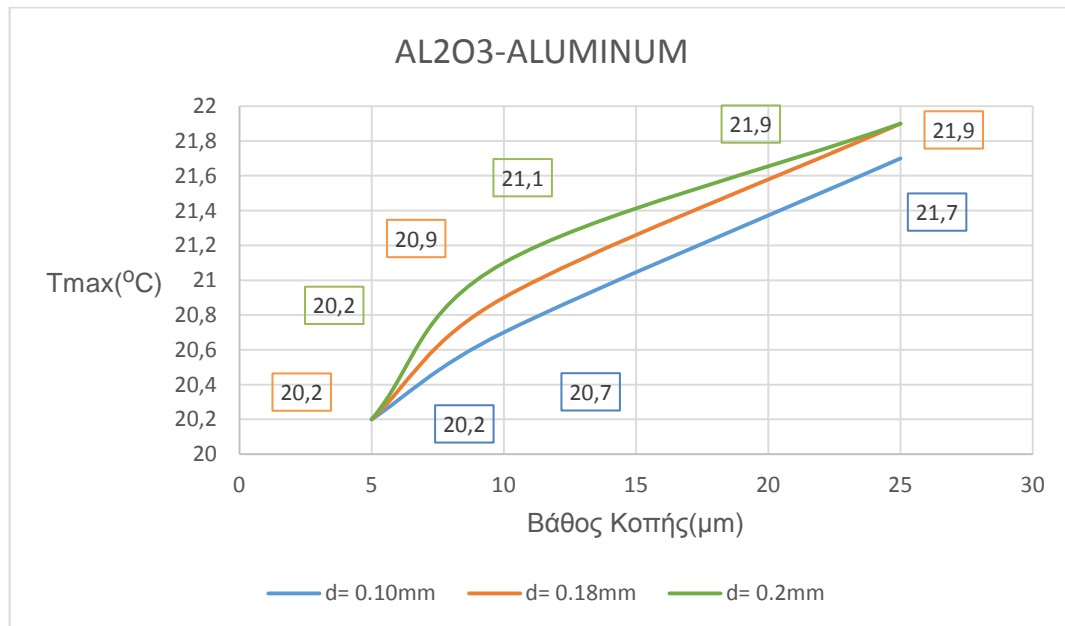


Σχήμα 4.81: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κόκκου SiC διαστάσεων 0.1mm, 0.18mm και 0.2mm σε βάθη κοπής 5μm, 10μm και 25μm

Από το συγκεκριμένο σχήμα παρατηρείται ότι για το βάθος κοπής την μεγαλύτερη θερμοκρασία την παρουσιάζει ο κόκκος διάστασης $d=0.18\text{mm}$, ενώ την μικρότερη ο κόκκος $d=0.1\text{mm}$. Στο βάθος κοπής $10\mu\text{m}$ την μικρότερη θερμοκρασία την παρουσιάζει ο κόκκος διάστασης $d=0.2\text{mm}$, σε αντίθεση με τον κόκκο διάστασης $d=0.18\text{mm}$ που παρουσιάζει την μεγαλύτερη θερμοκρασία, ενώ για το βάθος κοπής $25\mu\text{m}$ ο κόκκος διάστασης $d=0.2\text{mm}$ παρουσιάζει την μεγαλύτερη θερμοκρασία, ενώ ο κόκκος $d=0.1\text{mm}$ την μικρότερη.

4.3.7.6 Αποτελέσματα κόκκου Diamond σε τεμάχιο Aluminum 7075

Στο σχήμα 4.82 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κόκκων υλικού Al_2O_3 διαστάσεων 0.1mm , 0.18mm , 0.2mm κατά την κατεργασία λείανσης τεμαχίου Aluminum 7075 σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ και $25\mu\text{m}$.



Σχήμα 4.82: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κόκκου SiC διαστάσεων 0.1mm , 0.18mm και 0.2mm σε βάθη κοπής $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ και $25\mu\text{m}$

Στο παραπάνω σχήμα, αρχικά, για βάθος κοπής $5\mu\text{m}$, και οι τρεις κόκκοι εμφανίζουν την ίδια θερμοκρασία, ενώ στη συνέχεια για βάθος κοπής την μικρότερη θερμοκρασία την παρουσιάζει ο κόκκος διάστασης $d=0.1\text{mm}$, ενώ την μέγιστη ο κόκκος διάστασης $d=0.2\text{mm}$. Τέλος για το βάθος κοπής $25\mu\text{m}$ οι κόκκοι διάστασης $d=0.18\text{mm}$ και $d=0.2\text{mm}$ παρουσιάζουν την ίδια θερμοκρασία, ενώ ο κόκκος διάστασης $d=0.1\text{mm}$ παρουσιάζει την μικρότερη θερμοκρασία.

5. Συμπεράσματα

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων και αφού έγινε η επιβεβαίωση του μοντέλου της κ.Καραχάλιου, συμπεραίνεται ότι από όλα τα διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, για τη μελέτη της αντοχής τους στις δυνάμεις και στις τάσεις που ασκήθηκαν σε αυτά, το καταλληλότερο από όλα για χρήση σε κόκκο λόγω της αντοχής του είναι το Ανθρακοπυρίτιο, ενώ για τον τροχό/συνδετικό υλικό το καταλληλότερο με μικρή διαφορά είναι η Πολυσιλικόνη, αν και η Εποξική Ρητίνη 838, παρ' όλο που εμφάνισε τη μικρότερη αντοχή, λόγω της φύσης του να είναι ασταθές, είναι πολύ εξυπηρετικό για την παραμόρφωση του εργαλείου, βάσει των προδιαγραφών του ερευνητικού προγράμματος.

Επίσης, από τα αποτελέσματα για τις μεταβολές θερμοκρασίας συμπεραίνεται ότι το υλικό το οποίο είχε τις μικρότερες μεταβολές, για τα βάθη κοπής για τα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις, είναι με διαφορά το Οξείδιο του Αργιλίου και το οποίο κατατάσσεται πρώτο σε προτίμηση. Το Ανθρακοπυρίτιο, το οποίο κατατάσσεται δεύτερο σε αντοχή στις μεταβολές θερμοκρασίας μετά το Οξείδιο του Αργιλίου, όπου για συγκεκριμένα βάθη κοπής σημείωσε τις μικρότερες ή ίσες μεταβολές θερμοκρασίας με το Οξείδιο του Αργιλίου. Το Διαμάντι, το οποίο κατατάσσεται τρίτο σε προτίμηση, σημείωσε σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τις μέγιστες μεταβολές θερμοκρασίας με εξαίρεση σε κάποιες σπάνιες περιπτώσεις όπου εμφάνισε την ίδια θερμοκρασία με τα άλλα δύο υλικά και όπου σε μία μοναδική περίπτωση σημείωσε την μικρότερη θερμοκρασία από τα άλλα δύο υλικά.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Fabienne Pennec, Hikmat Achkar, David Peyrou, Robert Plana, Patrick Pons, Frédéric Courtade, 2005, Verification of Contact Modeling With Comsol Multiphysics Software
- [2] R. White, 2012, Comsol Acoustics Introduction
- [3] Introduction to Comsol Multiphysics Version 4.3, May 2012
- [4] Introduction to Comsol Multiphysics Version 4.4, December 2013
- [5] Introduction to the Structural Mechanics Module Version 4.3 Comsol, May 2012
- [6] Χαρίκλεια Καραχάλιου, 1986, Προσομοίωση Επιπέδου Λειάνσεως: - Τοπογραφία Λειαντικού Τροχού – Δυνάμεις Κοπής
- [7] Xie, H., Gu, H., Fujii, M., & Zhang, X. , 2006, Short hot wire technique for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of various materials 17(1),Pages 208–214
- [8] De Ferri, L., Lotti-ci, P. P., Lorenzi, A., Montenero, A. & Salvioli-Mariani, E., 2011, Study of silica nanoparticles – polysiloxane hydrophobic treatments for stone-based monument protection, Issue 12, Pages 356-363
- [9] Umboh, M., Adachi, T., Oishi, K., Higuchi, M. & Major, Z., 2013, Mechanical Properties of Nano-silica Particulate-reinforced Epoxy Composites Considered in Terms of Crosslinking Effect in Matrix Resins, Issue 48, Pages 5148-5156
- [10] Du, F.-P., Tang, H., & Huang, D.-Y., 2013, Thermal Conductivity of Epoxy Resin Reinforced with Magnesium Oxide Coated Multiwalled Carbon Nanotubes, 1-5
- [11] Zhou, T, 2013, Improving the Thermal Conductivity of Epoxy Resin by the Addition of a Mixture of Graphite Nanoplatelets and Silicon Carbide Microparticles 7(7), Pages 585–594
- [12] Klocke, F., 2012, Modelling and Simulation in Grinding, Issues 8.1-8.27
- [13] Παραμορφώσιμα Εργαλεία Μικροκοπής Μεταβλητής Γεωμετρίας Αποτελούμενα από Κοπτικά Νανοσωματίδια, Ενότητα 1-3, 2014
- [14] Παραμορφώσιμα Εργαλεία Μικροκοπής Μεταβλητής Γεωμετρίας Αποτελούμενα από Κοπτικά Νανοσωματίδια, Προσομοίωση Κατεργασιών με τη βοήθεια των Ενεργών Παραμορφώσιμων Μικροεργαλείων, Ενότητα 4, 2015
- [15] Παραμορφώσιμα Εργαλεία Μικροκοπής Μεταβλητής Γεωμετρίας Αποτελούμενα από Κοπτικά Νανοσωματίδια, Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία της Θερμικής και Δυναμικής Συμπεριφοράς των Ενεργών Παραμορφώσιμων Μικροεργαλείων σε Τόρνευση και Φραιζάρισμα, Ενότητα 5, 2014