



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

Διπλωματική Εργασία

**Προσδιορισμός των Θερμικών Ιδιοτήτων Θερμοπλαστικών
Υλικών μέσω της Κατεργασίας Κοπής**



Κωνσταντίνος Τζίμας

Επιβλέπων: Σουλίωτης Εμμανουήλ

Συνεπιβλέπων : Μυρισίδης Ιωάννης

Κοζάνη, Μάρτιος , 2020

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως στόχο την μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων δύο θερμοπλαστικών υλικών, του Πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) και του Πολυκαρβονικού (PC). Οι δύο θερμικές ιδιότητες των υλικών που μελετήθηκαν είναι η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα. Οι ιδιότητες αυτές των υλικών έχουν απασχολήσει αλλά και συνεχίζουν να απασχολούν την επιστημονική κοινότητα. Στη σύγχρονη εποχή ένα πλήθος πειραματικών διατάξεων και ειδικευμένων μηχανών έχει δημιουργηθεί για τον προσδιορισμό των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών. Κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ο προσδιορισμός των θερμικών ιδιοτήτων θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια των μηχανουργικών κατεργασιών αφαίρεσης υλικού και ειδικότερα της κατεργασίας τόννευσης. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα κοπής των δύο θερμοπλαστικών υλικών και παραλλήλως καταγραφή των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του αποβλίττου μέσω χρήσης της θερμοκάμερας. Έπειτα ακολούθησε η δισδιάστατη προσομοίωση της κατεργασίας κοπής των δύο θερμοπλαστικών σε ειδικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά έγινε ο σχεδιασμός της δισδιάστατης γεωμετρίας στο λογισμικό Solidworks. Στη συνέχεια, δόθηκε έμφαση στη βιβλιογραφική μελέτη και έρευνα των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων των θερμοπλαστικών υλικών που διερευνώνται. Οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες που προέρχονται από τη βιβλιογραφία, αλλά και παρέχονται από τον κατασκευαστή των θερμοπλαστικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, εισήχθησαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (DEFORM2D). Πιο συγκεκριμένα για την εισαγωγή των δύο θερμικών ιδιοτήτων που μελετώνται δημιουργήθηκαν καμπύλες (διαγράμματα) τάσης-παραμόρφωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας και του βαθμού παραμόρφωσης, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τα δεδομένα του κατασκευαστή όσο και της βιβλιογραφίας. Κατά την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων της αναλυτικής προσομοίωσης, πραγματοποιείται σύγκριση της μορφής των αποβλίττων με αυτά των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η σύγκριση οδήγησε σε ασφαλή συμπεράσματα για την ορθότητα των θερμοκρασιών κατά την προσομοίωση και στη σωστή αποτύπωση των καμπύλων/τιμών των εξεταζόμενων θερμικών ιδιοτήτων των θερμοπλαστικών υλικών.

Λέξεις κλειδιά : Θερμική αγωγιμότητα, Ειδική θερμοχωρητικότητα, Θερμοπλαστικά υλικά, PVC, PC, Κατεργασία κοπής, Τόννευση, Μορφή αποβλίττου, Θερμοκρασία, Ταχύτητα κοπής.

Abstract

In the present Diploma thesis, the thermal properties of Poly(vinyl chloride) (PVC) and Polycarbonate (PC) were investigated. Both PVC and PC are thermoplastic polymers. The thermal properties that were investigated in this study were thermal conductivity and specific heat capacity. Both thermal properties have been and continue to be investigated by the scientific community. Nowadays a number of experimental devices and specialized machines have been developed to determine materials's thermal properties. During the preparation of this Diploma thesis, both thermoplastic workpieces were machined using a lathe. While the turning process was taking place, the chip temperatures were being recorded using a Thermal-Camera. Subsequently, a finite element software that specializes in cutting process was used to develop a two-dimensional (2D) simulation. Firstly, the 2D geometry of both workpiece and cutting tool was designed using Solidworks (CAD) software. Afterwards, emphasis was put on studying about the mechanical and thermal properties of both PVC and PC, from literature and scientific papers. Taking into account the data from the literature that was studied and from the material manufacturer, the mechanical and thermal properties of both materials were loaded into the finite element software (DEFORM2D). Specifically, for the two thermal properties that are being investigated, stress-strain curves were created characterising these thermal properties as a function of temperature and strain rate, considering both the manufacturer's data and the literature. After the extraction of the analytical simulation results, the chip formation of the examined cases was compared with those of the experimental results. The comparison led to a good agreement concerning the simulation temperatures and also the correct equation/values of the investigated thermal properties of the thermoplastic materials.

Keywords : Thermal Conductivity, Specific heat capacity, Thermoplastic Materials, PVC, PC, Cutting Process, Turning, Chip formation, Temperature, Cutting speed.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Σουλιώτη Εμμανουήλ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Μυρισίδη Ιωάννη για τον πολύτιμο χρόνο, τις γνώσεις και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και το Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας (ΕΕΔΜ) του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για την παραχώρηση του ειδικευμένου λογισμικού κατεργασιών κοπής DEFORM 2D.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Συντομογραφίες	8
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	9
1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	9
Κεφάλαιο 2 : Αρχές της κοπής.....	10
2.1 Μηχανική της κοπής με εργαλεία προκαθορισμένης γεωμετρίας κόπης -Τόρνευση	10
2.2 Θερμοκρασίες κατά την κοπή	17
2.3 Προσομοίωση της κοπής μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).....	18
Κεφάλαιο 3 : Θερμοπλαστικά Υλικά	22
3.1 Εισαγωγή στα θερμοπλαστικά υλικά	22
3.2 Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	25
3.3 Πολυκαρβονικό (PC)	29
Κεφάλαιο 4 : Πειραματικά αποτελέσματα κοπής κατά την κατεργασία τόρνευσης των θερμοπλαστικών υλικών	33
4.1 Πειραματική διάταξη	33
4.2 Κατεργασία κοπής των θερμοπλαστικών.....	35
4.3 Αποτελέσματα μέτρησης θερμοκρασίας με τη βοήθεια της θερμοκάμερας AGEMA 570.....	39
Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση κατεργασίας κοπής με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM).....	43
5.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό FEM.....	43
5.1.1 Εισαγωγή των κύριων συνθηκών κατεργασίας κοπής.....	43
5.1.2 Εισαγωγή της γεωμετρίας	44
5.1.3 Εισαγωγή των υλικών	48
5.1.4 Εισαγωγή οριακών συνθηκών.....	53
5.2 Αποτελέσματα της προσομοίωσης κοπής θερμοπλαστικών	56
5.2.1 Αποτελέσματα διερεύνησης επιρροής της θερμοχωρητικότητας κατά την κοπή	56
5.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης κοπής του PVC	58
5.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης κοπής του PC	62
5.3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αναλυτικής προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	65
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	69
6.1 Συμπεράσματα	69
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	70
Βιβλιογραφία.....	71
Παράρτημα.....	73

Συντομογραφίες

Συντομογραφία	Ερμηνεία
PVC	Poly(vinyl Chloride)
PC	Polycarbonate
FEM	Finite Element Methods
CAD	Computer Aided Design
TC	Thermal Conductivity
SHC	Specific Heat Capacity

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

Τα θερμοπλαστικά υλικά ανήκουν στην κατηγορία των πλαστικών υλικών και στην ευρύτερη κατηγορία των πολυμερών υλικών. Παράγονται ετησίως εκατομμύρια τόνοι θερμοπλαστικών υλικών σε όλο τον κόσμο. Οι μεγάλοι αριθμοί παραγωγής θερμοπλαστικών υλικών δικαιολογούνται από τις πάρα πολλές χρήσεις τους, όπως π.χ. σε σωληνώσεις, σε μόνωση κτηρίων, στην αυτοκινητοβιομηχανία κ.α.

Οι θερμικές ιδιότητες σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού είναι και αυτές που συνήθως καθορίζουν τις χρήσεις του υλικού. Η μελέτη και ο προσδιορισμός των θερμικών ιδιοτήτων έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα για αρκετά χρόνια και συνεχίζει μέχρι και σήμερα. Με τον όρο θερμική ιδιότητα νοείται η απόκριση ενός υλικού στην εφαρμογή θερμότητας. Οι κύριες θερμικές ιδιότητες των υλικών είναι η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική διαστολή. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται η διερεύνηση των δύο πρώτων ιδιοτήτων. Για τον προσδιορισμό αυτών των ιδιοτήτων με την πάροδο των χρόνων έχουν ανακαλυφθεί διάφορες μέθοδοι που βασίζονται πάνω σε ειδικές πειραματικές διατάξεις και εξειδικευμένες μηχανές. Ενδεικτικά τέτοιες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας, είναι η μέθοδος Transient hot wire, η μέθοδος Laser Flash Diffusivity, μέθοδος θερμής πλάκας - Guarded Hot Plate method κ.α. Κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών και τιμών θερμικής αγωγιμότητας και για την εξαγωγή αποτελεσμάτων απαιτούνται διαφορετικοί χρόνοι, π.χ. η μέθοδος Guarded Hot Plate μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εύρος θερμοκρασιών από -150°C έως 600°C , για θερμικές αγωγιμότητες από 0.001 έως 5 W/mK (χαμηλές θερμικές αγωγιμότητες) και απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε να δώσει τα αποτελέσματα των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας των υλικών που μελετώνται. Ενώ για τον προσδιορισμό της θερμοχωρητικότητας μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος θερμομετρίας σάρωσης-Differential scanning calorimetry (DSC). Πέραν των μεθόδων αυτών, καθώς η χρήση των λογισμικών που βασίζονται στις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (FEM), γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη, είναι δυνατόν να γίνει προσδιορισμός τέτοιων ιδιοτήτων μέσω της σύγκρισης αποτελεσμάτων μεταξύ πειραματικού αποτελέσματος και αναλυτικής προσομοίωσης, βασιζόμενοι στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των λογισμικών. Οι θερμικές ιδιότητες με κυριότερη την θερμική αγωγιμότητα, παίζουν πολύ μεγάλο ρόλο στην μηχανουργική κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας είναι συνήθως αυτή που επηρεάζει την αύξηση της θερμοκρασίας κατά την μηχανουργική κατεργασία και έτσι μπορεί να καθορίσει διάφορες παραμέτρους της, όπως π.χ. το υλικό και ο τύπος του κοπτικού εργαλείου, η χρήση ψυκτικού κ.α. Οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο κοπτικό εργαλείο και στο απόβλιττο παρουσιάζουν μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον και αποτελούν συνεχές θέμα έρευνας.

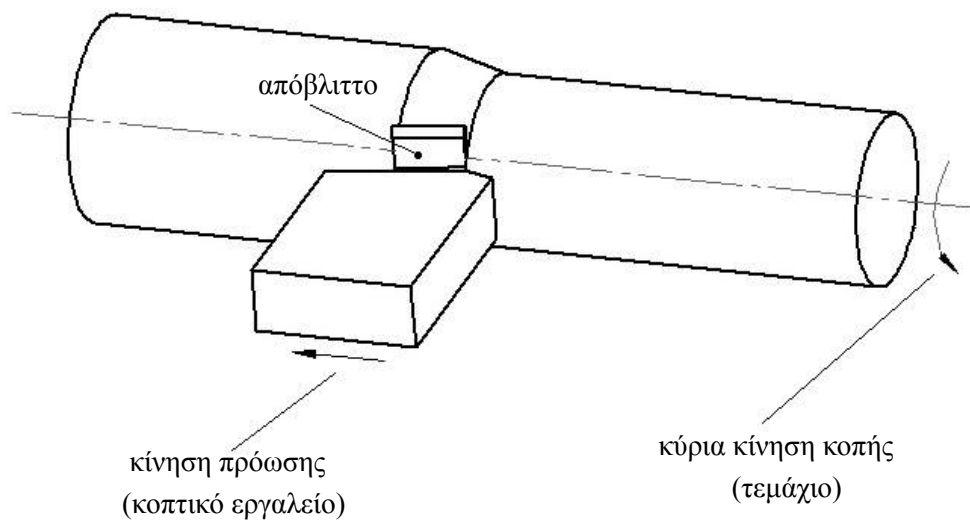
1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι, αφού μελετηθούν και κατανοηθούν οι βασικές αρχές της κατεργασίας της κοπής, αλλά και οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών υλικών, να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας δύο θερμοπλαστικών υλικών, του Πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) και του Πολυκαρβονικού (PC). Η επίτευξη του σκοπού αυτού γίνεται μέσω της σύγκρισης μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από την κατεργασία κοπής (τόρνευση) των δύο θερμοπλαστικών και των αποτελεσμάτων της δισδιάστατης προσομοίωσης κοπής (τόρνευσης) που έγινε σε ειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Κεφάλαιο 2 : Αρχές της κοπής

2.1 Μηχανική της κοπής με εργαλεία προκαθορισμένης γεωμετρίας κόψης - Τόρνευση

Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόρνου. Η περιστροφή αυτή του κατεργαζόμενου τεμαχίου αποτελεί την κύρια κίνηση της κοπής. Το τεμάχιο έρχεται σε επαφή με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει τη δυνατότητα διαμήκουσ μετακίνησης (κίνηση πρόωσης) και εγκάρσιας μετακίνησης. Με την εγκάρσια μετακίνηση καθορίζεται το βάθος εισχώρησης του κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο το οποίο αποτελεί το βάθος κοπής. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι κινήσεις αυτές και η τυπική γεωμετρία ενός εργαλείου τόρνευσης παρουσιάζονται στο **σχήμα 2.1**.



Σχήμα 2.1 : Τυπική γεωμετρία τόρνου.

Οι κύριες συνθήκες κατεργασίας κατά την τόρνευση είναι η ταχύτητα κοπής v , η πρόωση f και το βάθος κοπής a_p και δίνονται αναλυτικά παρακάτω.

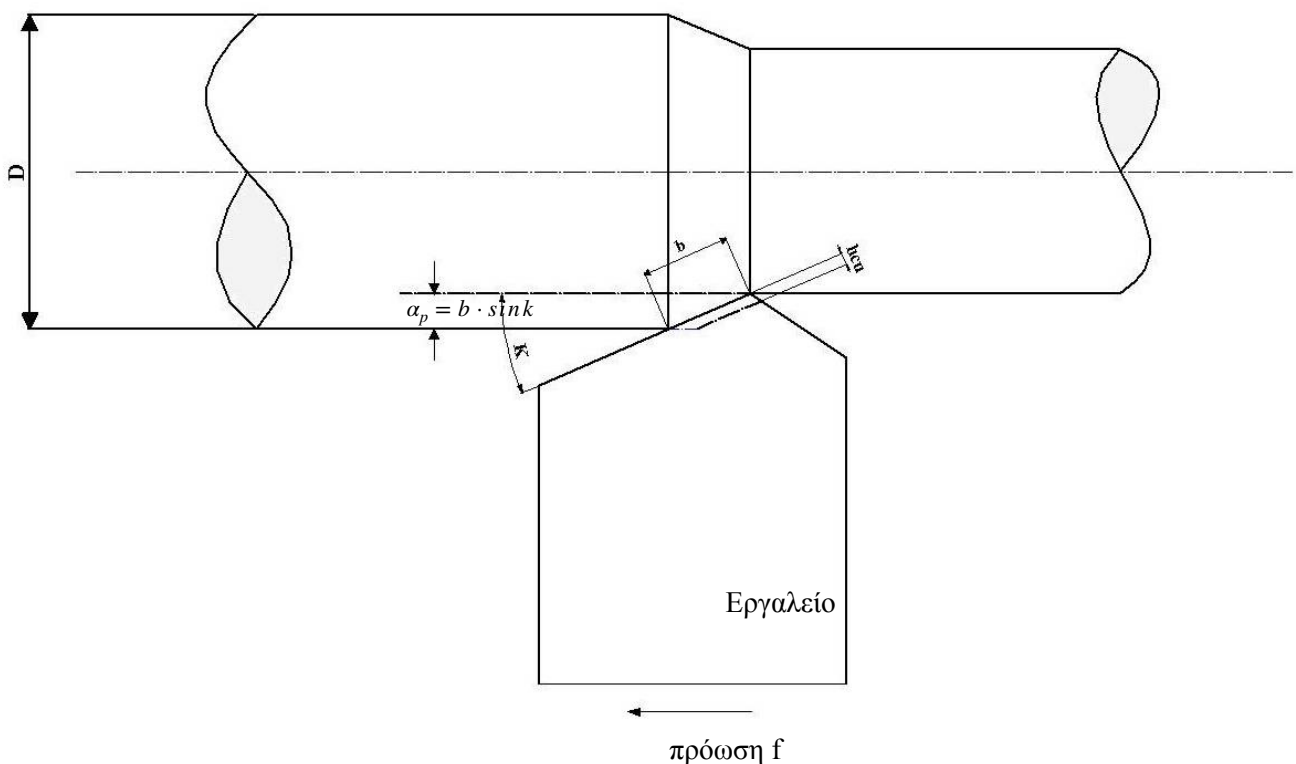
- ταχύτητα κοπής : $v = \pi \cdot D \cdot n$ (m/min) (2.1)
- πρόωση : f (mm/στροφή)
- βάθος κοπής : a_p (mm)

Ιδιαίτερη σημασία κατά την κατεργασία αφαίρεσης υλικού είναι ο σχηματισμός αποβλίττου. Οι διαστάσεις του απαραμόρφωτου αποβλίττου στη γραμμική πρόωση της διαμήκους τόννευσης είναι το πλάτος b και το πάχος h_{cu} και φαίνονται στο **σχήμα 2.2** όπου :

$$h_{cu} = f \cdot \sin \kappa \quad (2.2)$$

$$b = \frac{\alpha_p}{\sin \kappa} \quad (2.3)$$

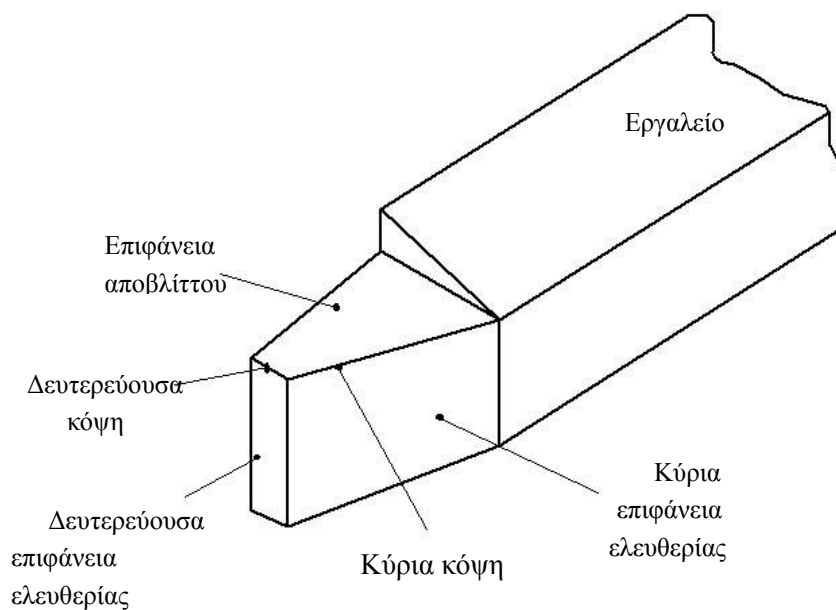
Στις παραπάνω σχέσεις το κ ονομάζεται η γωνία τοποθέτησης της κόψης του κοπτικού εργαλείου. Για την μελέτη του σχηματισμού του αποβλίττου, επειδή το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου h_{cu} είναι συνήθως πολύ μικρότερο από το πλάτος του b , η διατομή του αποβλίττου θεωρείται προσεγγιστικά ορθογωνική, με εμβαδόν ίσο με $h_{cu} \cdot b$. Ο δείκτης cu προέρχεται από την αγγλική λέξη cutting ενώ το πάχος του παραμορφωμένου αποβλίττου (μετά την κοπή) ονομάζεται h_{ch} επειδή το απόβλιττο στην αγγλική γλώσσα ονομάζεται “chip”. Ο λόγος των h_{ch} προς h_{cu} ονομάζεται λόγος συμπίεσης αποβλίττου και συμβολίζεται με λ_h .



Σχήμα 2.2 : Διαστάσεις απαραμόρφωτου αποβλίττου.

Το δημιουργούμενο απόβλιττο από τη διείσδυση του κοπτικού εργαλείου στο κατεργαζόμενο τεμάχιο ρέει επί της “επιφάνειας του αποβλίττου”, η επαφή της με το τεμάχιο οριοθετείται από την κύρια και τη δευτερεύουσα κόψη του εργαλείου. Η κατεργασία αφαίρεσης υλικού μπορεί να προσομοιωθεί με την είσοδο του κοπτικού εργαλείου στο τεμάχιο ως μορφή σφήνας. Αυτή η απλουστευμένη προσέγγιση ονομάζεται ορθογωνική κοπή και φέρει το κοπτικό κάθετο στη διεύθυνση κοπής. Το μοντέλο της ορθογωνικής κοπής είναι ευρέως διαδεδομένο και με βάση αυτό έχουν αναπτυχθεί σημαντικές θεωρίες, όπως π.χ. το μοντέλο του Oxley, το μοντέλο των Lee & Shaffer κ.α. Η κοπτική σφήνα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες κατεργασίας. Η τυπική γεωμετρία της κοπτικής σφήνας φαίνεται στο **σχήμα 2.3**. Οι δύο κύριες επιφάνειες της κοπτικής σφήνας είναι :

- επιφάνεια αποβλίττου : είναι αυτή στην οποία πάνω της ρέει το απόβλιττο,
- ελεύθερη επιφάνεια : είναι η επιφάνεια προς το μέρος της νεοσχηματισμένης επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



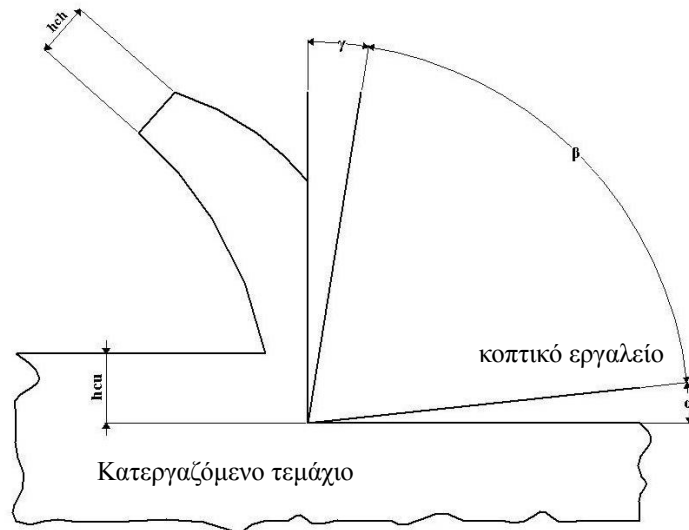
Σχήμα 2.3 : Τυπική γεωμετρία κοπτικής σφήνας.

Οι κύριες επιφάνειες του κοπτικού σε συνδυασμό με τις διευθύνσεις της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής ορίζουν τις γωνίες κοπής. Οι χαρακτηριστικές γωνίες της κοπής είναι οι α , β και γ και συμβολίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία με ελληνικά γράμματα. Πιο αναλυτικά :

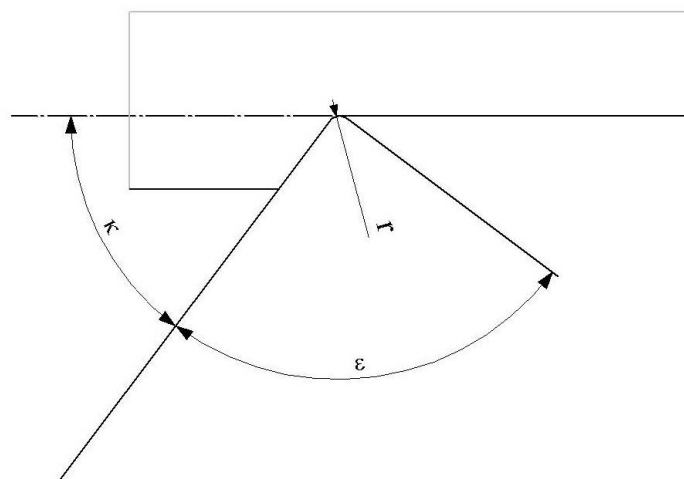
- γωνία α : γωνία ελευθερίας, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου (δηλαδή στην επιφάνεια που κείται προς την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου) και την κατεύθυνση της κοπής. Η γωνία α επηρεάζει τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.
- γωνία β : γωνία κοπτικού σφήνα, η οποία είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στις επιφάνειες αποβλίττου και ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου και χαρακτηρίζει ουσιαστικά την αιχμή του κοπτικού εργαλείου.

- γωνία γ : γωνία του αποβλίττου, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου (δηλαδή στην επιφάνεια επάνω στην οποία κινείται το απόβλιττο) και την κάθετο στην κατεύθυνση της κοπής. Η γωνία γ μπορεί να πάρει θετικές τιμές, αρνητικές ή μηδέν.

Οι χαρακτηριστικές γωνίες της κοπής καθώς και οι γωνίες κ , η γωνία αιχμής ϵ και η ακτίνα καμπυλότητας r φαίνονται στο **σχήμα 2.4.α** και **σχήμα 2.4.β** αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4.α : Χαρακτηριστικές γωνίες κοπής.



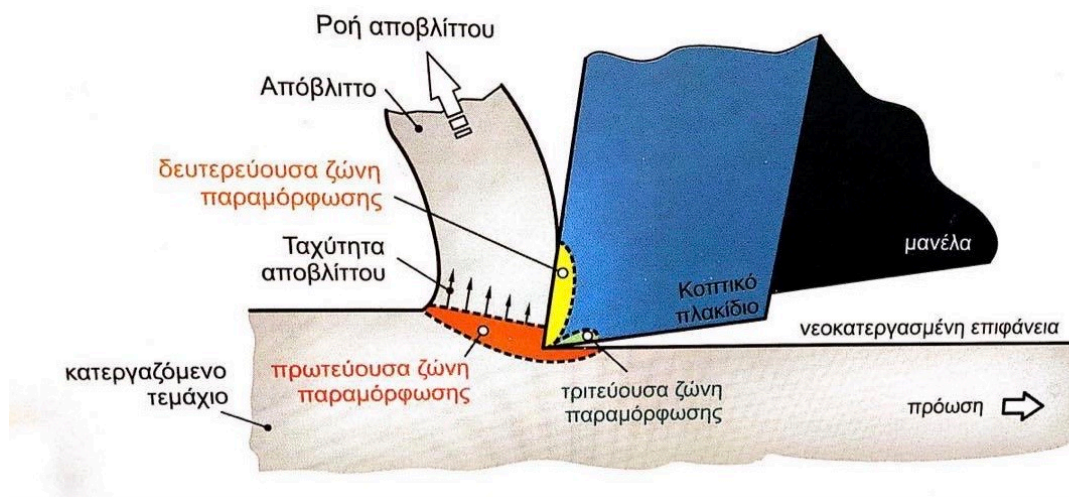
Σχήμα 2.4.β : Γωνίες κ, ϵ και ακτίνα καμπυλότητας r .

Μεταξύ των χαρακτηριστικών γωνιών κοπής ισχύει η σχέση :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (2.4)$$

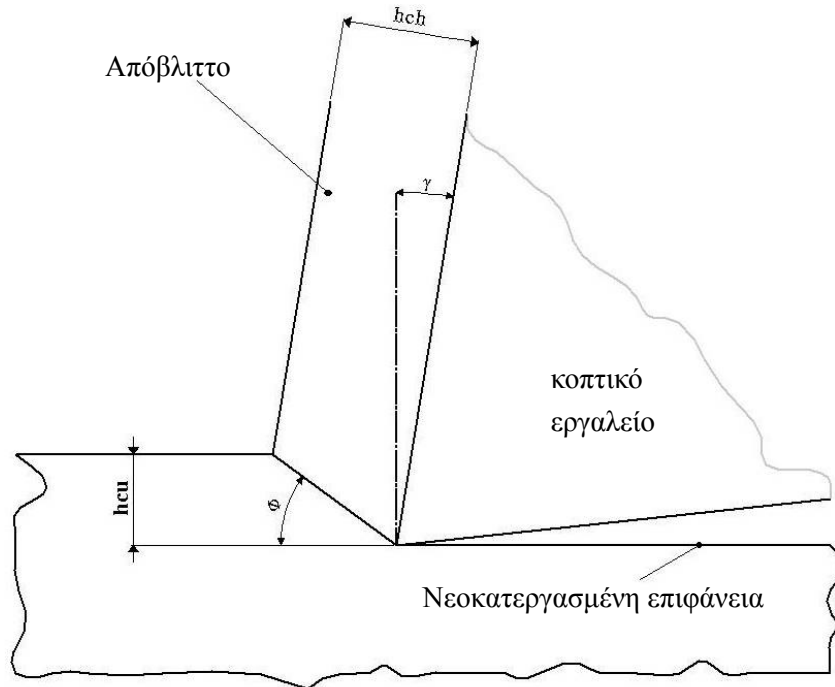
Οι τρεις γωνίες είναι αλληλοεξαρτώμενες από την σχέση (2.4) οπότε η αλλαγή της μίας επηρεάζει τις υπόλοιπες. Με μείωση της γωνίας ελευθερίας α συνεπάγεται αύξηση της τριβής μεταξύ τεμαχίου και της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού, το οποίο οδηγεί σε φθορά του κοπτικού εργαλείου αλλά και σε αύξηση της στιβαρότητας της κόπης. Αντιθέτως αύξηση της γωνίας ελευθερίας οδηγεί σε μείωση της τριβής και της φθοράς του κοπτικού. Οι συνιστώμενες τιμές της γωνίας ελευθερίας είναι από 6 έως 12 μοίρες. Η αύξηση της γωνίας αποβλίττου οδηγεί σε ομαλότερη ροή του αποβλίττου, μείωση των δυνάμεων κοπής και καλύτερη ποιότητα στην κατεργασία. Επιπλέον οδηγεί σε μείωση της γωνίας β του κοπτικού σφήνα και ταυτοχρόνως της εξασθένηση του. Μείωση της γωνίας αποβλίττου οδηγεί σε αύξηση της στιβαρότητας κόπης και παίρνει τιμές από -10 έως +20 μοίρες.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην ορθογωνική κοπή το απόβλιττο δημιουργείται με την διείσδυση του κοπτικού στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η παραμόρφωση του υλικού ξεκινάει όταν το υλικό φτάνει στο επίπεδο διάτμησης. Στο επίπεδο αυτό (που στην πραγματικότητα είναι μία περιοχή) που αλλιώς ονομάζεται πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης, το υλικό καθώς κινείται κατά μήκος της λεπτής ζώνης διάτμησης, οι ισοδύναμες τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν την τιμή της τάσης που αντιστοιχεί στην οριακή ελαστική παραμόρφωση του υλικού, με συνέπεια την έναρξη της πλαστικής διαρροής του. Ένα μικρό ποσό παραμορφώνεται στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης, ενώ στην τριτεύουσα ζώνη η παραμόρφωση είναι ισοδύναμη με την τριβή ολίσθησης με σταθερό συντελεστή τριβής. Όλες οι ζώνες φαίνονται στο **σχήμα 2.5**.



Σχήμα 2.5 : Ζώνες παραμόρφωσης, Πηγή [2].

Το επίπεδο διάτμησης σχηματίζει με τη διεύθυνση της ταχύτητας κοπής γωνία Φ η οποία ονομάζεται γωνία διάτμησης, η οποία φαίνεται στο **σχήμα 2.6**.



Σχήμα 2.6 : Γωνία διάτμησης.

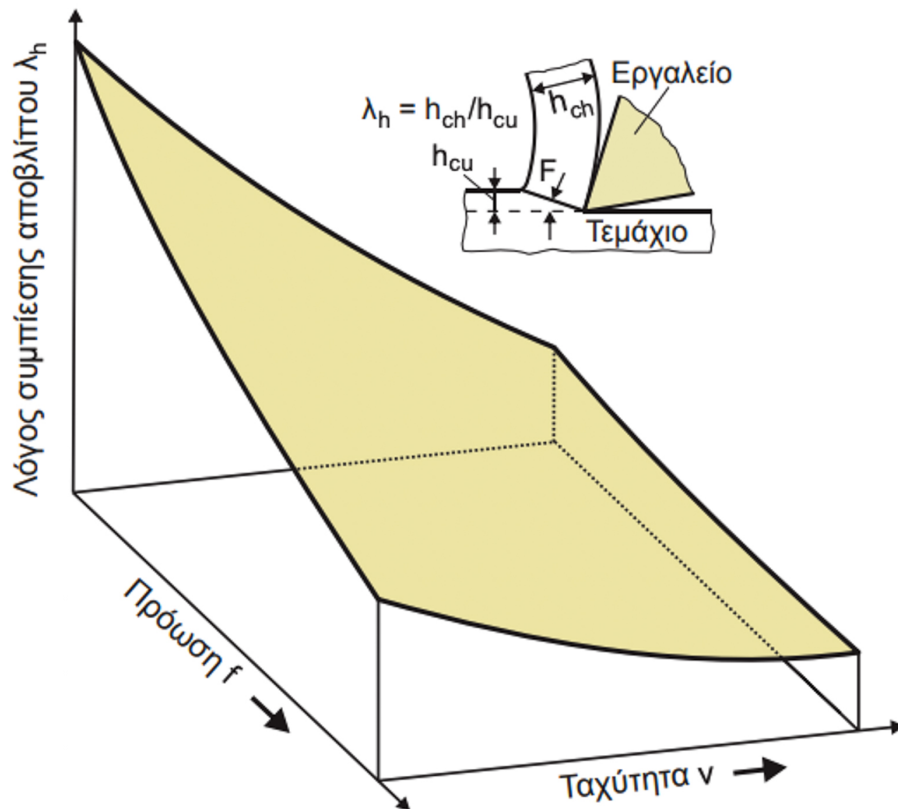
Η γωνία διάτμησης έχει άμεση σχέση με τον λόγο συμπίεσης λ_h που αναφέρθηκε πιο πάνω και που ισούται με :

$$\lambda_h = \frac{h_{ch}}{h_{cu}} \quad (2.5)$$

Αύξηση του λόγου συμπίεσης λ_h οδηγεί σε μείωση της γωνίας διάτμησης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος συμπίεσης, τόσο ομαλότερη είναι η κατεργασία κοπής μιας και το υλικό δεν παραμορφώνεται ισχυρά, συμπερένεται ότι οι μεγάλες γωνίες διάτμησης συνοδεύουν πιο εύκολη κοπή, γεγονός με μεγάλη πρακτική σημασία.

Εκτός από τη γωνία διάτμησης ο λόγος συμπίεσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την πρόωση και την ταχύτητα κοπής. Όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει η πρόωση ή η ταχύτητα κοπής, τόσο μικραίνει ο λόγος συμπίεσης, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 2.7** επηρεάζοντας θετικά τον σχηματισμό αποβλίττου. Παρόλα αυτά, η επίδραση της μίας παραμέτρου επηρεάζει πολλές άλλες παραμέτρους της κατεργασίας. Αύξηση της ταχύτητας κοπής μειώνει σε μεγάλο βαθμό την επίδραση της πρόωσης στο λόγο συμπίεσης λ_h , όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα.

Από όλα τα παραπάνω μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η ταχύτητα κοπής έχει μεγαλύτερη επίδραση στο σχηματισμό αποβλίττου από ότι η πρόωση. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με την ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στον λόγο συμπίεσης [2].



Σχήμα 2.7 : Επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής στο λόγο συμπίεσης αποβλίττου λ_h , Πηγή : [3].

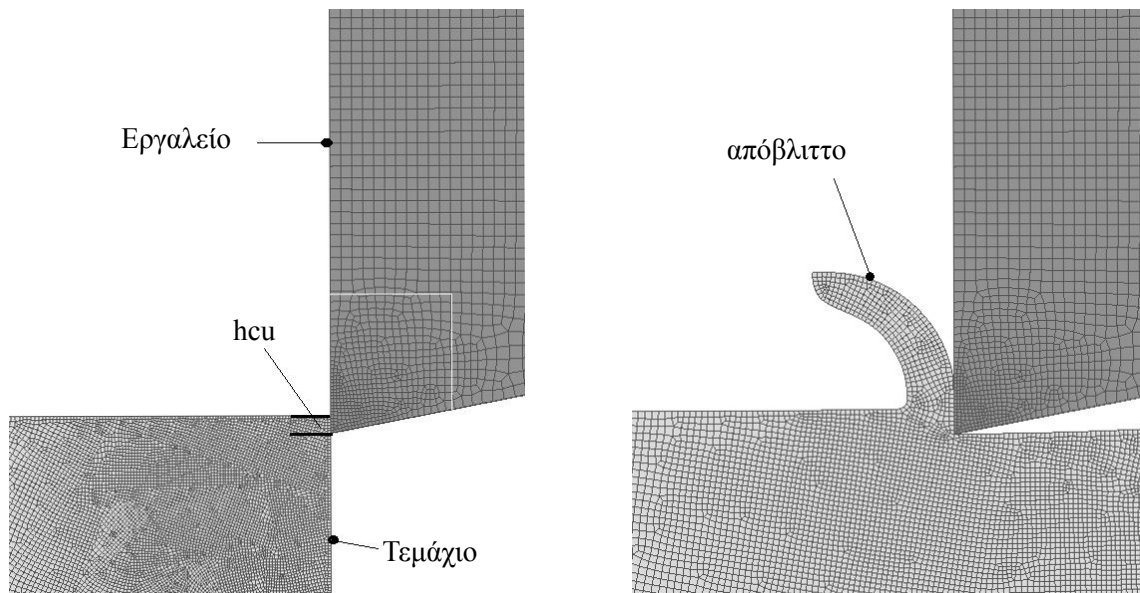
2.2 Θερμοκρασίες κατά την κοπή

Η ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια κατεργασία κοπής καταναλώνεται σε δύο βασικά περιοχές, στη πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης (ή αλλιώς ζώνη διάτμησης) και στη ζώνη τριβής ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το απόβλιττο δηλαδή στη δευτερεύουσα ζώνη παραμόρφωσης, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2.5. Ένα μικρό ποσό ενέργειας καταναλώνεται στη θέση τριβής της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού και της νεοκατεργασμένης επιφάνειας του τεμαχίου. Σε αυτές τις τρεις περιοχές το κατεργαζόμενο υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Η ενέργεια της πλαστικής παραμόρφωσης μετατρέπεται σε θερμότητα στις τρεις αυτές περιοχές. Η παραγόμενη θερμότητα στη ζώνη διάτμησης (σε ποσοστό έως και 80%) έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία στην περιοχή αυτή και να μεταφέρεται θερμότητα προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο και προς το απόβλιττο. Αντιστοίχως, η παραγόμενη θερμότητα στη ζώνη τριβής κοπτικού και αποβλίττου αυξάνει την θερμοκρασία της περιοχής και θερμότητα μεταφέρετε προς το απόβλιττο και το κοπτικό εργαλείο. Έτσι γίνεται εμφανές ότι το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας παραλαμβάνεται από το απόβλιττο έπειτα από το κοπτικό και τέλος από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αύξηση της ταχύτητας κοπής οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού της θερμότητας που παραλαμβάνει το απόβλιττο και μείωση του ποσοστού που λαμβάνει το κοπτικό εργαλείο [2]. Αξίζει να αναφερθεί πως στην κατεργασία μετάλλων το ποσό που παραλαμβάνει το απόβλιττο από την πρωτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης συνολικά είναι έως και 70% της θερμότητας. Στη κατεργασία όμως των πλαστικών η παραλαβή θερμότητας από το απόβλιττο μπορεί να φτάσει και το 90% της συνολικής θερμότητας που παράγεται στην ζώνη διάτμησης [5]. Το απόβλιττο που παραλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας κινείται και αποσύρεται γρήγορα από την κοπή, ενώ το κοπτικό εργαλείο που δέχεται πολύ μικρότερο ποσό θερμότητας, συνεχίζει να παραμένει στην κοπή και δέχεται έτσι συνεχώς θερμότητα για όσο χρόνο γίνεται η κατεργασία. Η μέγιστη θερμότητα του κοπτικού εργαλείου δε βρίσκεται στη μύτη του κοπτικού αλλά πιο ψηλά στην επιφάνεια του και αυτό οφείλεται στη ροή του αποβλίττου πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Η χρήση επικάλυψης στο κοπτικό εργαλείο μειώνει σημαντικά την θερμοκρασία κατά την κοπή και την θερμοροή προς το κοπτικό. Έτσι επιβραδύνεται η άνοδος της θερμοκρασίας στον κοπτικό σφήνα και αυξάνεται η θερμοκρασία του αποβλίττου. Η θερμοκρασία του αποβλίττου κατά την κοπή με επικαλυμμένο κοπτικό εργαλείο είναι υψηλότερη από ότι κατά την κοπή του ίδιο υλικού από ακάλυπτο εργαλείο [3].

2.3 Προσομοίωση της κοπής μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Στη σύγχρονη εποχή η χρήση των προσομοιώσεων στη δουλειά των μηχανικών έχει αποκτήσει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία, καθώς πολύπλοκα προβλήματα μπορούν να ληφθούν μέσω χρήσης Η/Υ όπως π.χ. προβλήματα μηχανικής ρευστών, ταλαντωτικών φαινομένων κ.α. Η επιστήμη αυτή της υπολογιστικής μηχανικής ολοένα και εξελίσσεται. Έτσι και στη σύγχρονη βιομηχανία η πρόβλεψη μεγεθών που αφορούν τις μηχανουργικές κατεργασίες έχει καθοριστική σημασία. Η πρόβλεψη μέσω προσομοιώσεων έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, στην μείωση του αριθμού των ελαττωματικών προϊόντων, στην αύξηση της παραγωγικότητας και στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Πριν την εμφάνιση και την εκμετάλλευση των προσομοιώσεων, η βελτιστοποίηση των κατεργασιών κοπής γινόταν μόνο μέσω της επιλογής των κατάλληλων συνθηκών κατεργασίας η οποία στηριζόταν αποκλειστικά και μόνο στην ανθρώπινη εμπειρία. Η χρήση των προσομοιώσεων δίνει ένα πολύ μεγάλο εύρος αποτελεσμάτων για οποιοδήποτε υλικό χρειάζεται να κατεργαστεί σε οποιοδήποτε συνθήκες κατεργασίας, στο **σχήμα 2.8** φαίνεται μια δισδιάστατη προσομοίωση μηχανισμού κοπής μέσω FEM. Τα συχνότερα προβλήματα στα οποία ζητείται να δώσουν απαντήσεις οι προσομοιώσεις είναι στην πρόβλεψη :

- της διάρκειας ζωής των εργαλείων
- της διαστατικής ακρίβειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου
- της ποιότητας της τελικής επιφάνειας
- των δυνάμεων που ασκούνται στο κοπτικό εργαλείο και στο τεμάχιο
- του μηχανισμού δημιουργίας και ροής αποβλίτου



Σχήμα 2.8 : Προσομοίωση μηχανισμού κοπής μέσω FEM.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι η κυριότερη αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης που χρησιμοποιείται σε θέματα προσομοίωσης κατεργασιών κοπής στη βιομηχανία.

Για την προσομοίωση του μηχανισμού κοπής μέσω λογισμικού FEM υπάρχουν τα εξής στάδια :

1. Αρχικά εισάγονται τα δεδομένα τα οποία περιλαμβάνουν διαστάσεις ή τριδιάστατες γεωμετρίες του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου οι οποίες έχουν δημιουργηθεί συνήθως σε περιβάλλον CAD ή και στο ίδιο το λογισμικό. Επίσης εισάγονται οι συνθήκες κατεργασίας (ταχύτητα κοπής, βάθος κοπής, πρόωση) αλλά και οι μηχανικές, θερμικές και τριβολογικές ιδιότητες των υλικών του τεμαχίου, του κοπτικού εργαλείου και της επικάλυψης του.
2. Στη συνέχεια γίνεται η διακριτοποίηση των δύο αυτών γεωμετριών, επιλέγεται ο τρόπος επίλυσης και εισάγονται επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται για την επίτευξη της προσομοίωσης όπως η κινηματική, οι οριακές συνθήκες, συνθήκες επαφής, το χρονικό βήμα κ.α. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε προγράμματα που καλούνται προ-επεξεργαστές (pre-processors).
3. Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος σε προγράμματα που καλούνται επιλυτές (solvers) τα οποία χρησιμοποιούν τις υπολογιστικές μεθόδους.
4. Το τελευταίο στάδιο αφορά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ώστε αυτά να παρουσιαστούν σωστά. Ουσιαστικά γίνεται οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Τα προγράμματα που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα και τα οπτικοποιούν ονομάζονται post-processors.

Τυπικά αποτελέσματα που δίνουν τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων για την κατεργασία της κοπής είναι :

- μορφή αποβλίττου
- προσδιορισμός των δυνάμεων κοπής
- υπολογισμός τάσεων
- υπολογισμός θερμοκρασιών
- πεδία παραμορφώσεων
- παραμένουσες τάσεις
- κατανομή σκληροτήτων
- προσδιορισμός αναπτυσσόμενης φθοράς κοπτικών εργαλείων
- κρυσταλλικοί μετασχηματισμοί

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια και με μεγάλη ταχύτητα μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και έτσι μπορούν να αποφευχθούν δαπανηρά και χρονοβόρα πειράματα στη βιομηχανία.

Οι υπολογιστικές μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφουν την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών, για διάφορες τάξεις μεγέθους διακριτοποίησης του συνεχούς μέσου, από την κλίμακα ατομικού πλέγματος, μέχρι τη μακροσκοπική περιγραφή [3]. Για την μαθηματική περιγραφή σχετικών προβλημάτων, καταστρώνονται μερικές διαφορικές εξισώσεις. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατάστρωση των μερικών διαφορικών εξισώσεων είναι κυρίως οι κατά Lagrange και κατά Euler.

Στη μέθοδο Euler το πλέγμα (mesh) των πεπερασμένων στοιχείων είναι σταθερό ως προς το χώρο και το συνεχές μέσο κινείται σε σχέση με το πλέγμα. Αφού το πλέγμα στη μέθοδο Euler δεν μεταβάλλεται, αυτό σημαίνει πως η μορφή του αποβλίττου, η γωνία διάτμησης και οι συνθήκες

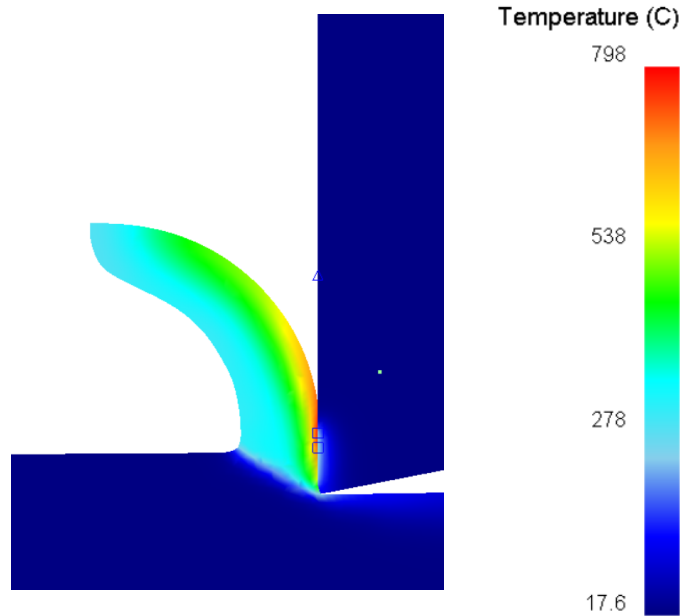
επαφής, θα πρέπει να έχουν προκαθοριστεί είτε πειραματικά είτε με κάποια υπόθεση. Το πλέγμα με βάση τη μέθοδο Euler έχει πλεονέκτημα μόνο στην κοπτική ακμή του εργαλείου όπου συμβαίνει πολύ μεγάλη παραμόρφωση του υλικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πλέγμα κατά Euler μπορεί να χειριστεί τη ροή του υλικού στην περιοχή αυτή χωρίς να υφίσταται παραμόρφωση του πλέγματος [4]. Έτσι για προβλήματα προσομοίωσης κοπής η μέθοδος κατά Euler δεν μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά αφού η μορφή του δημιουργούμενου αποβλίττου συνήθως δεν είναι γνωστή αλλά αντιθέτως σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

Στη μέθοδο Lagrange τα στοιχεία του πλέγματος είναι συνδεδεμένα στο υλικό. Κατά την κοπή του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου από το κοπτικό εργαλείο το υλικό παραμορφώνεται και μαζί του και το πλέγμα. Στη μέθοδο Lagrange οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που καταστρώνονται παρέχουν την δυνατότητα ανακατάταξης του πλέγματος (remesh) του υλικού συνεκτιμώντας τις παραμορφώσεις που έχουν ήδη αναπτυχθεί, με αποτέλεσμα η προσομοίωση να γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, τέτοιες μεγάλες παραμορφώσεις του πλέγματος μπορούν να οδηγήσουν, σε μερικές περιπτώσεις, σε αποτυχία της ανάλυσης και του μοντέλου της προσομοίωσης.

Η υπολογιστική μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων που έχει επικρατήσει στη βιομηχανία για προσομοιώσεις κοπής είναι η ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) η οποία είναι ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων. Σε ένα μοντέλο ALE, το πλέγμα δεν είναι ούτε συνδεδεμένο με το υποκείμενο υλικό, ούτε σταθεροποιείται στο χώρο, δεν είναι δηλαδή ούτε πλέγμα κατά Lagrange ούτε κατά Euler, αλλά μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα. Στη μέθοδο ALE γίνεται αρχική κατάστρωση και επίλυση κατά Lagrange για τον προσδιορισμό της συνοριακής επιφάνειας του παραμορφωμένου συνεχούς μέσου και στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη αυτή την επιφάνεια γίνεται κατάστρωση και επίλυση κατά Euler. Σε ένα πλέγμα ALE η παραμόρφωση είναι μικρότερη από ένα πλέγμα κατά Lagrange.

Ένα από τα αποτελέσματα που μπορούμε να πάρουμε από ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων και έχει μεγάλο ενδιαφέρον, είναι ο προσδιορισμός των θερμοκρασιακών πεδίων που αναπτύσσονται κατά την κοπή. Όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα, όπως π.χ. σε μία πειραματική διάταξη για κοπή, και αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.2, τα αποτελέσματα του λογισμικού FEM είναι πολύ κοντά στα πραγματικά. Το μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας παραλαμβάνεται από το απόβλιττο και αυτό συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας του. Ένα μικρότερο ποσοστό θερμότητας παραλαμβάνεται από το κοπτικό εργαλείο καθόλη τη διάρκεια της κατεργασίας και τέλος ένα ακόμα μικρότερο ποσοστό θερμότητας παραλαμβάνεται από το κατεργαζόμενο τεμάχιο στην τριτεύουσα ζώνη παραμόρφωσης. Η μέγιστη θερμοκρασία δεν εμφανίζεται στην κόψη του εργαλείου αλλά πλησίον της κόψης λίγο ψηλότερα όπως φαίνεται και στο **σχήμα 2.9**.

Κατά την προσομοίωση κοπής μέσω FEM το μόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο σχηματίζεται σε μικρό χρονικό διάστημα κόβοντας λίγα χιλιοστά του τεμαχίου, χωρίς να χρειαστεί όπως στην πραγματικότητα να γίνει η κατεργασία για αρκετή ώρα και να κοπούν αρκετά μέτρα υλικού μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία. Επίσης εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί μέσω FEM ότι η χρήση επικάλυψης στο κοπτικό εργαλείο οδηγεί σε μικρότερες θερμοκρασίες κοπής, και σε λιγότερη θερμοροή προς τον κοπτικό σφήνα, αλλά σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες αποβλίττου, μέσω μίας σύγκρισης προσομοιώσεων καλυμμένου και ακάλυπτου κοπτικού εργαλείου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο κεφάλαιο 2.2.



Σχήμα 2.9 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά τον σχηματισμό αποβλίττου σε κοπή μετάλλου μέσω λογισμικού FEM.

Όπως αναφέρθηκε στο στάδιο 1, για την προσομοίωση του μηχανισμού κοπής και για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των αριθμητικών διαδικασιών περιγραφής της κοπής πρέπει να είναι γνωστές οι μηχανικές και οι θερμικές ιδιότητες των υλικών του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου. Η τάση πλαστικής διαρροής ενός υλικού εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία, το βαθμό παραμόρφωσης και την ταχύτητα παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}$. Οι ταχύτητες παραμόρφωσης κατά την κατεργασία της κοπής είναι της τάξης $10^3 - 10^4 \text{ s}^{-1}$. Η υψηλή αυτή ταχύτητα παραμόρφωσης επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών. Για την περιγραφή της τάσης πλαστικής διαρροής του υλικού, συναρτήσει της παραμόρφωσης, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας παραμόρφωσης, έχουν αναπτυχθεί τρόποι μαθηματικής περιγραφής της. Οι μαθηματικές διαδικασίες χαρακτηρίζονται ως νόμοι του υλικού και περιορίζουν τους υπολογιστικούς χρόνους κατά την προσομοίωση του μηχανισμού κοπής. Κάποιοι από τους πιο γνωστούς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε FEM λογισμικά, είναι ο νόμος του υλικού Johnson-Cook και ο νόμος κατά Oxley [3]. Τέτοιοι νόμοι χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τις μηχανικές ιδιότητες μετάλλων κατά την κατεργασία τους. Μια μέθοδος πειραματικού προσδιορισμού της τάσης διαρροής η οποία ίσως θεωρείται και η πιο σημαντική είναι η μέθοδος Split-Hopkinson-Pressure-Bar (SHPB) [19]. Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων παραμόρφωσης της τάξης 10^4 s^{-1} , αλλά επιτρέπει και την ρύθμιση της θερμοκρασίας. Έτσι από τις μετρήσεις μετά την εκτέλεση του πειράματος γίνεται εφικτή η κατάστρωση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα μπορούν να περαστούν στο λογισμικό FEM και έτσι να γίνει ολοκληρωμένη περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, η οποία θα οδηγήσει και σε μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων κατά την προσομοίωση της κοπής.

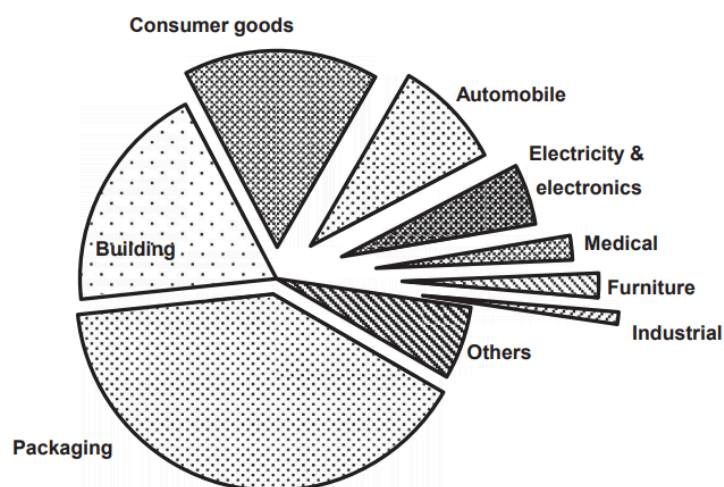
Κεφάλαιο 3 : Θερμοπλαστικά Υλικά

3.1 Εισαγωγή στα θερμοπλαστικά υλικά

Θερμοπλαστικά υλικά είναι μία κατηγορία πλαστικών υλικών (η άλλη είναι τα θερμοσκληρυνόμενα) και ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των πολυμερών υλικών. Τα θερμοπλαστικά υλικά γίνονται μαλακότερα, πιο εύκαμπτα και εύπλαστα όταν θερμαίνονται και βρίσκονται πάνω από κάποια θερμοκρασία, ενώ στερεοποιούνται και σκληραίνουν όταν ψυχθούν. Η ιδιότητα τους αυτή (να λιώνουν σε υψηλές θερμοκρασίες και να ξαναστερεοποιούνται σε χαμηλές) είναι αναστρέψιμη και επιτρέπει στα θερμοπλαστικά υλικά να ανακυκλώνονται και να αναδιαμορφώνονται αρκετές φορές χωρίς οι μηχανικές τους ιδιότητες να αλλάζουν. Μερικά από τα πιο γνωστά θερμοπλαστικά με τη μεγαλύτερη χρήση είναι :

- πολυαιθυλένιο (PE)
- πολυπροπυλένιο (PP)
- πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)
- πολυαμίδιο/Nylon
- πολυκαρβονικό (PC)
- πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA)
- Τέφλον (PTFE)
- πολυστυρένιο (PS)

Αυτά τα θερμοπλαστικά αντιπροσωπεύουν περίπου το 76% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης πλαστικών [6]. Οι κυριότερες χρήσεις τους είναι στις συσκευασίες προϊόντων, στην κατασκευή κτιρίων, στα καταναλωτικά αγαθά, στην αυτοκινητοβιομηχανία και τις μεταφορές, στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, στον τομέα της ιατρικής κ.α. Τα ποσοστά της χρήσης των θερμοπλαστικών φαίνονται και στο **σχήμα 3.1**.

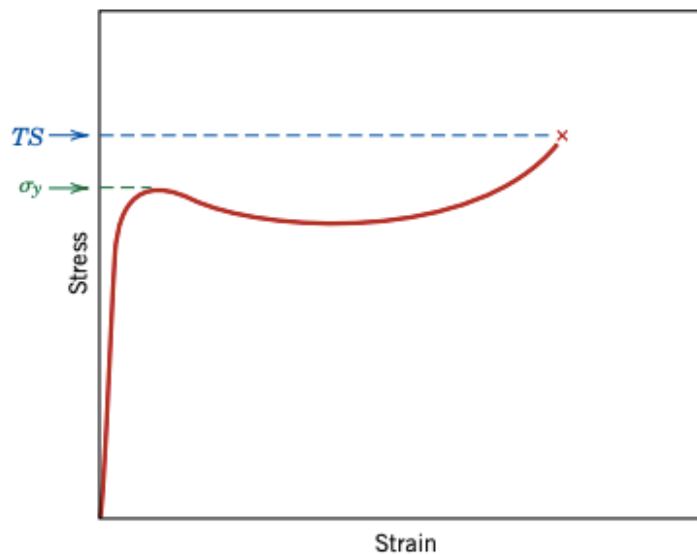


Σχήμα 3.1 : Οι οκτώ κύριοι τομείς χρήσης θερμοπλαστικών. Πηγή [6].

Οι μηχανικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών ως πολυμερή υλικά προσδιορίζονται από το μέτρο ελαστικότητας, την εφελκυστική αντοχή και την αντοχή σε κρούση και κόπωση. Για τα θερμοπλαστικά (ως πλαστικά πολυμερή υλικά) ισχύει ο Νόμος του Hooke για την ελαστική περιοχή.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τον νόμο του Hooke και η σταθερά αναλογίας E ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young (Young's Modulus). Τα ελληνικά γράμματα σ και ε συμβολίζουν την τάση και την παραμόρφωση αντιστοίχως. Στο **σχήμα 3.2** παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πλαστικού υλικού.

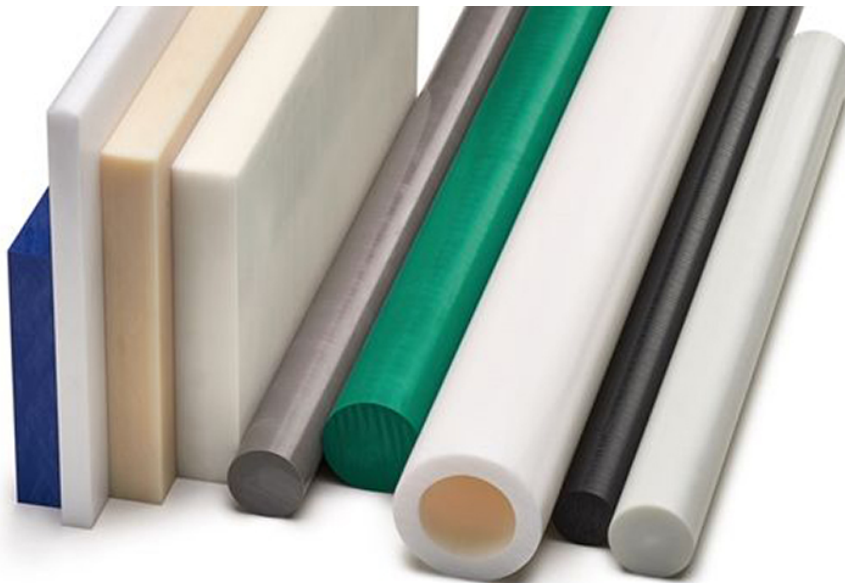


Σχήμα 3.2 : Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για ένα πλαστικό πολυμερές, Πηγη : [7].

Ο δείκτης στον άξονα της τάσης σ_y ονομάζεται αντοχή διαρροής και για τα πλαστικά πολυμερή το σημείο αυτό θεωρείται μέγιστο στην καμπύλη και είναι ακριβώς μετά από το τέλος της ελαστικής περιοχής [7]. Ο δείκτης TS (tensile strength) ονομάζεται αντοχή στον εφελκυσμό και αντιστοιχεί στην τάση στην οποία πραγματοποιείται θραύση, μπορεί να έχει τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη της σ_y . Η μηχανική συμπεριφορά των θερμοπλαστικών υλικών είναι εξαρτώμενη από το χρόνο και από τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δημιουργούνται πάντα κάτω από σταθερή θερμοκρασία και ρυθμό παραμόρφωσης. Γενικά αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας και της εφελκυστικής αντοχής. Ίδια επίδραση στη σχέση τάσης-παραμόρφωσης έχει και η μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης, ενώ η αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης οδηγεί σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, του ορίου διαρροής και της εφελκυστικής αντοχής. Τα θερμοπλαστικά ως πολυμερή υλικά έχουν μέτρο ελαστικότητας από 7 MPa έως 4 GPa σε ακραίες περιπτώσεις, ενώ συγκριτικά τα μέταλλα παίρνουν τιμές από 48 GPa έως 410

GPa. Επίσης οι μεγαλύτερες εφελκυστικές αντοχές στα πολυμερή είναι της τάξης των 100 MPa, ενώ σε ορισμένα κράμματα μετάλλων φτάνουν στα 4.1 GPa.

Οι θερμικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών υλικών είναι η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα ή η ειδική θερμότητα και η θερμική διαστολή. Ως θερμική αγωγιμότητα ορίζεται η ιδιότητα που χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός υλικού να μεταφέρει θερμότητα και συμβολίζεται με k . Για τα θερμοπλαστικά υλικά η θερμική αγωγιμότητα είναι της τάξης των $0,2 \text{ W/mK}$, δηλαδή πολύ μικρή εάν την συγκρίνουμε με των μετάλλων που η τιμή της μπορεί να φτάσει π.χ. τα $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Για αυτόν το λόγο πολλά θερμοπλαστικά πολυμερή χρησιμοποιούνται και ως θερμικοί μονωτές. Η θερμοχωρητικότητα είναι μια ιδιότητα, ενδεικτική της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά ενέργεια από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντιπροσωπεύει το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας κατά μια μονάδα, συμβολίζεται με C και έχει μονάδες μέτρησης στο S.I. J/K . Συχνότερα χρησιμοποιείται ο όρος ειδική θερμοχωρητικότητα ή ειδική θερμότητα (συμβολίζεται με το γράμμα c) η οποία αντιστοιχεί στην θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας ($\text{J/g}\cdot\text{K}$). Τη θερμική διαστολή αντιπροσωπεύει η παράμετρος α (που ονομάζεται γραμμικός συντελεστής της θερμικής διαστολής) και είναι η ιδιότητα του υλικού ενδεικτική της έκτασης την οποία το υλικό αποκτά λόγω διαστολής κατά τη θέρμανση και έχει μονάδες αντίστροφης θερμοκρασίας K^{-1} . Καθώς τα πολυμερή δέχονται στην πλειοψηφία τους πολύ μεγάλες θερμικές διαστολές ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται περίπου από $50\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ έως $400\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [7].



Εικόνα 3.1 : Τεμάχια θερμοπλαστικών υλικών. Πηγή : <https://www.supplyservices.co.nz/>.

3.2 Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)

Το Πολυβινυλοχλωρίδιο (Polyvinyl chloride ή Poly(Vinyl Chloride)) ή συντετμημένα PVC, είναι το τρίτο πιο διαδεδομένο παραγόμενο συνθετικό πλαστικό πολυμερές, μετά το πολυαιθυλένιο (PE) και το πολυπροπυλένιο (PP). Συναντάται σε δύο μορφές το uPVC (το γράμμα u σημαίνει unplasticised) το οποίο είναι δύσκαμπτο και σε εύκαμπτη μορφή (με χρήση πλαστικοποιητικών ουσιών). Οι μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές και χημικές του ιδιότητες σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος καθιστούν το PVC εύχρηστο σε πολλούς διαφορετικούς τομείς και η χρήση του σε παγκόσμιο επίπεδο αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό 3,2% . Ενδεικτικά το 2013 από μετρήσεις προέκυψε ότι καταναλώθηκαν 39,3 εκατομμύρια τόνοι PVC. Μερικές από τις κύριες εφαρμογές του PVC είναι σε :

1. Σωληνώσεις, καθώς αντέχει σε επαφή με οξέα, άλατα, βάσεις, λίπη, καθιστώντας το ανθεκτικό στις διαβρωτικές επιδράσεις των λυμάτων, γι 'αυτό και χρησιμοποιείται εκτενώς στα συστήματα σωληνώσεων αποχέτευσης, αλλά και ύδρευσης. Χοντρικά θεωρείται ότι πάνω από τη μισή ετήσια παραγωγή Πολυβινυλοχλωρίδιου το χρόνο χρησιμοποιείται για την δημιουργία σωληνώσεων. Το χαμηλό κόστος, βάρος και οι χαμηλές απαιτήσεις σε συντήρηση το καθιστούν καλύτερη επιλογή έναντι άλλων υλικών όπως τα μέταλλα.
2. Ηλεκτρικά καλώδια. Το PVC είναι καλός μονωτής του ρεύματος και στη μορφή του εύκαμπτου PVC χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικά καλώδια ποικίλων χρήσεων.
3. Κατασκευές και κτήρια. Χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην κατασκευαστική βιομηχανία ως υλικό χαμηλής συντήρησης με αντοχή στο χρόνο. Εκτός από τις σωληνώσεις στα κτήρια, το PVC χρησιμοποιείται σε κουφώματα παραθύρων καθώς είναι καλός μονωτής της θέρμανσης, παρέχει αποτελεσματική ηχομόνωση και είναι ανθεκτικό σε φυσικές ή χημικές διαβρώσεις. Επίσης χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο του βαμμένου ξύλου (π.χ. σε δάπεδα).
4. Αντικείμενα που χρησιμοποιούνται στο χώρο της Υγείας. Στην Ευρώπη η κατανάλωση PVC για ιατρικές συσκευές είναι περίπου 85.000 τόνοι τον χρόνο. Τέτοιες συσκευές είναι οι καθετήρες, συσκευές αιμοκάθαρσης, σωληνώσεις για λήψη και παροχή αίματος κ.α.
5. Ένδυση, όπως π.χ. σε χιονοδρομικό εξοπλισμό, αδιάβροχο εξοπλισμό, σαν υποκατάστατο των δερμάτινων ρούχων κ.α.



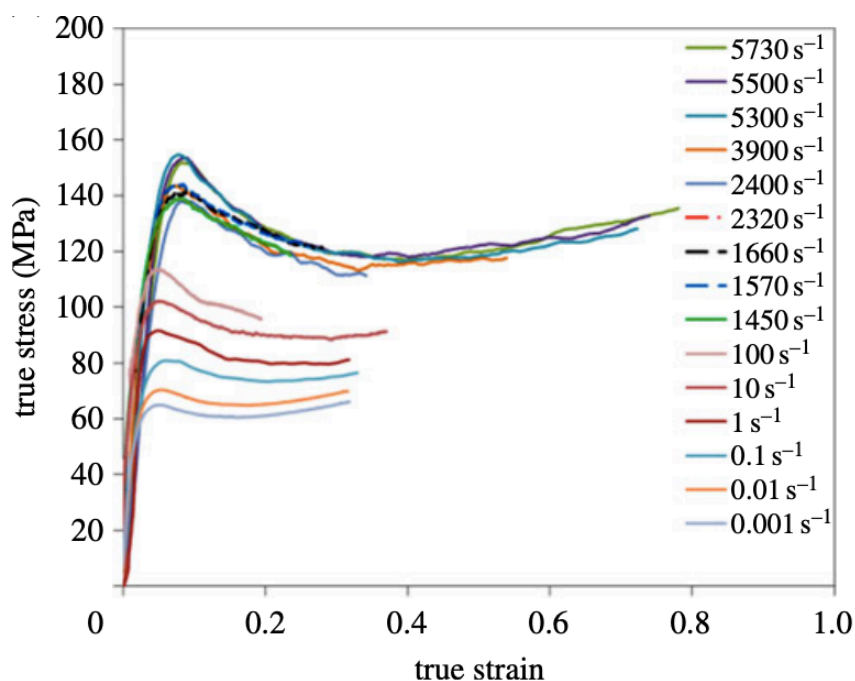
Εικόνα 3.2 : Σωλήνες από PVC, Πηγή : <https://www.thoughtco.com/>

Οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του PVC είναι και αυτές που επιτρέπουν τις ποικίλες χρήσεις του. Μερικές από τις ιδιότητες αυτές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη συγκεκριμένη Διπλωματική εργασία παρουσιάζονται στον **πίνακα 3.1**:

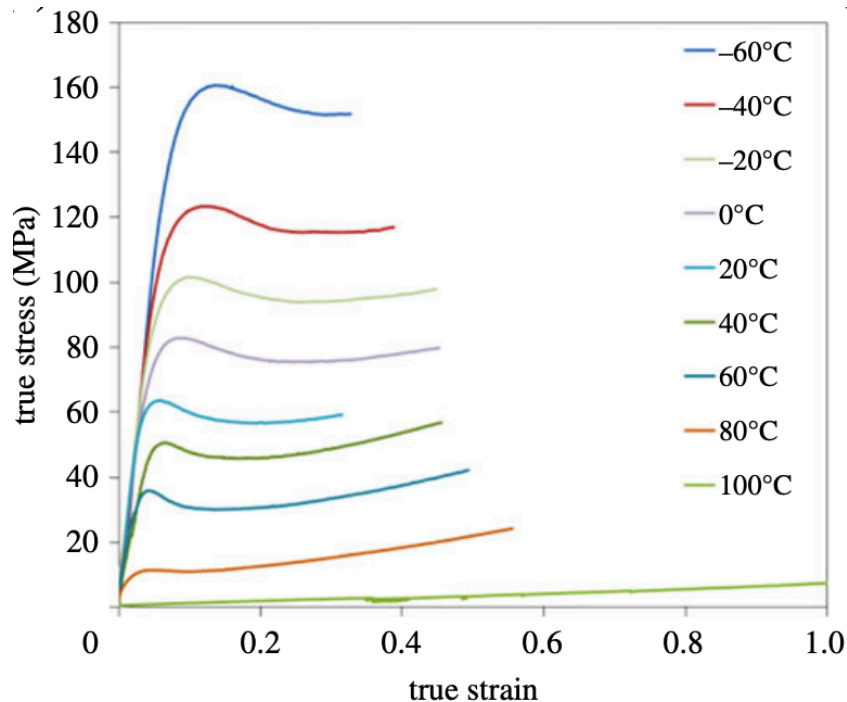
Ιδιότητα	Μονάδες Μέτρησης	Τιμή
Μέτρο Ελαστικότητας	MPa	1500-3500
Λόγος Poisson	-	0.38-0.4
Θερμική Αγωγιμότητα	W/mK	0.13-0.28
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	J/gK	0.9-1.2
Συντελεστής θερμικής διαστολής	C ⁻¹	3.5e ⁻⁵ -8e ⁻⁵

Πίνακας 3.1 : Μηχανικές ιδιότητες του PVC (uPVC). Πηγή : [1,8].

Οι τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής του PVC και διαφέρουν σε μικρό βαθμό από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Πολύ σημαντικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού παίζουν και οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες παρουσιάζονται στα **σχήματα 3.3** και **3.4**.



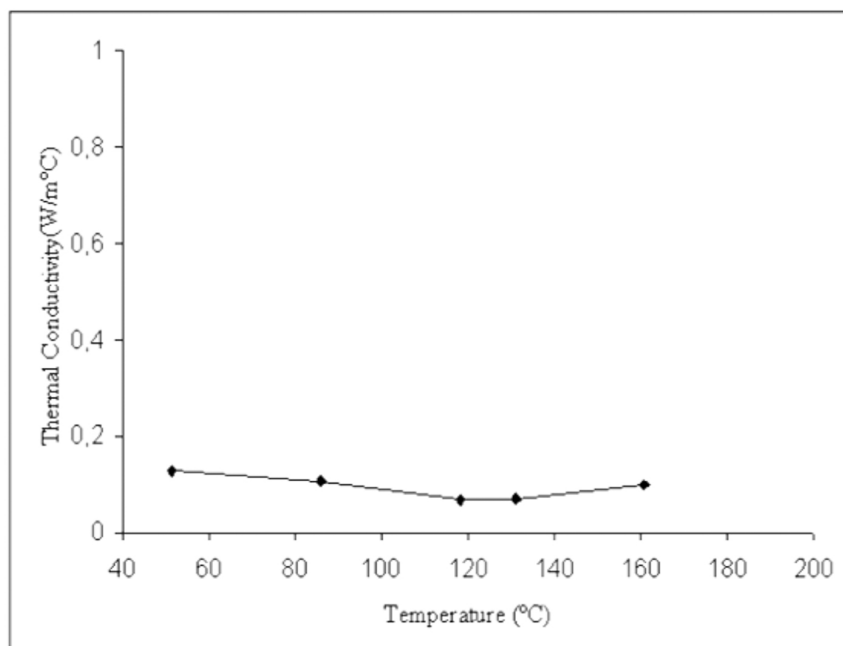
Σχήμα 3.3 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης του PVC σε θερμοκρασία 20°C. Πηγή : [9].



Σχήμα 3.4 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες του PVC σε ταχύτητα παραμόρφωσης 10^{-2} s^{-1} . Πηγή : [9].

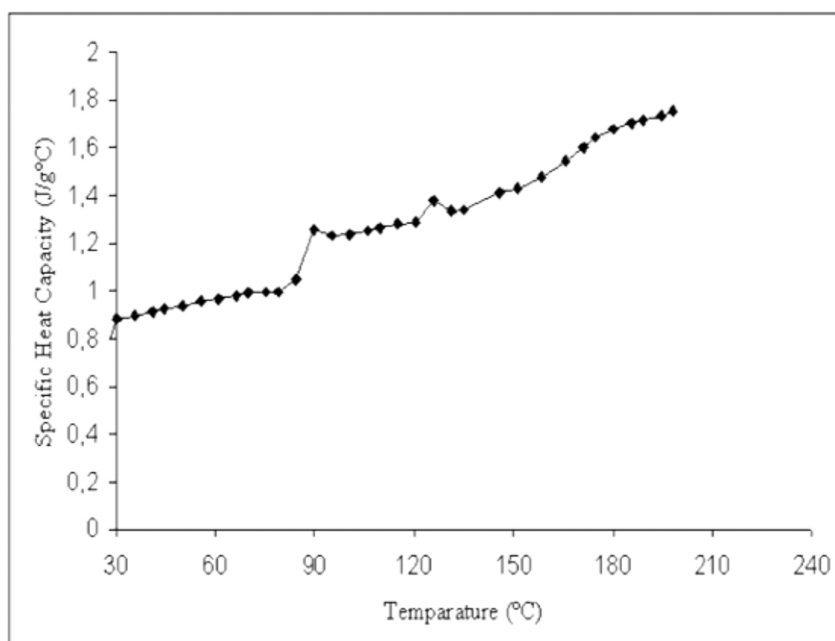
Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των σχημάτων 3.3 και 3.4 έχουν προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα [9]. Όπως παρατηρείται από τα σχήματα αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας και του ορίου διαρροής ενώ η αύξηση στην ταχύτητα παραμόρφωσης οδηγεί σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και του ορίου διαρροής. Οι συνιστώμενες θερμοκρασίες λειτουργίας του PVC είναι μέχρι τους 60°C . Πάνω από την θερμοκρασία των 60°C , το PVC αρχίζει και γίνεται πιο μαλακό και οι μηχανικές του ιδιότητες φθίνουν. Το PVC έχει σημείο τήξης ανάμεσα στις θερμοκρασίες 100°C - 230°C [1]. Η θερμική αγωγιμότητα κυμαίνεται στις τιμές του πίνακα 3.1 και καθορίζεται από τον κατασκευαστή, συνήθως η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για τα υλικά όπως και για το PVC δίνεται σαν σταθερός αριθμός ή δίνεται η τιμή της για μία θερμοκρασία (συνήθως για θερμοκρασία δωματίου $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$). Στη πραγματικότητα η θερμική αγωγιμότητα δεν είναι μια σταθερά για κάθε υλικό αλλά μεταβάλλεται σε μικρό βαθμό συναρτήσει της θερμοκρασίας. Το διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας - θερμοκρασίας για το PVC φαίνεται στο **σχήμα 3.5**. Η εξίσωση που χαρακτηρίζει την καμπύλη του σχήματος 3.5 είναι $TC = - 0.0009T + 0.1729$, όπου T η θερμοκρασία και παίρνει τιμές από 50 έως 120°C .

Η σημασία ενός τέτοιου διαγράμματος αυξάνεται σε περιπτώσεις προσομοιώσεων οι οποίες δίνουν θερμικά αποτελέσματα, καθώς αυξάνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, οδηγούν δηλαδή σε μικρότερες αποκλίσεις αποτελεσμάτων προσομοιώσεως σε H/Y και πραγματικών πειραμάτων.



Σχήμα 3.5 : Καμπύλη Θερμικής Αγωγιμότητας - Θερμοκρασίας του PVC. Πηγη : [10].

Ομοίως με την θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα των υλικών δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά η τιμή της μεταβάλλεται σε μικρό βαθμό με την αλλαγή θερμοκρασίας. Η καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PVC σε συνάρτηση με την θερμοκρασία παρουσιάζεται στο **σχήμα 3.6**. Η εξίσωση της καμπύλης του σχήματος 3.6 είναι $SPH = 5 \cdot 10^{-5}T^2 - 0.0029T + 0.9182$, όπου T η θερμοκρασία από 30 έως 90°C.



Σχήμα 3.6 : Καμπύλη Ειδικής Θερμοχωρητικότητας - Θερμοκρασίας του PVC. Πηγη : [10].

3.3 Πολυκαρβονικό (PC)

Το Πολυκαρβονικό (Polycarbonate) ή συντετμημένα PC είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα θερμοπλαστικά. Η παγκόσμια ζήτηση του PC ξεπερνάει του 4 εκατομμύρια τόνους ανά έτος και αυξάνεται συνεχώς. Η κύρια ιδιότητα που χαρακτηρίζει το Πολυκαρβονικό είναι η διαφάνεια. Η ιδιότητα του αυτή, του να είναι διάφανο πλαστικό υλικό συνεπάγει και τη χρήση του σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπου η μετάδοση του φωτός είναι απαραίτητη. Επιπλέον οι πολύ καλές μηχανικές και θερμικές του ιδιότητες αυξάνουν ακόμα περισσότερο τις εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Οι κυριότερες εφαρμογές του PC είναι :

1. Σε κτίρια και κατασκευές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του γυαλιού σε διάφορες εφαρμογές παραθύρων, μπορεί επίσης να χρωματιστεί μειώνοντας το ηλιακό φως που αντανακλά μέσα σε ένα κτήριο και συμβάλλοντας στην ελαχιστοποίηση του κόστους εσωτερικής ψύξης το καλοκαίρι. Το PC είναι ελαφρύτερο του γυαλιού και πολύ πιο ανθεκτικό και μπορεί να αντικαταστήσει το γυαλί στις περισσότερες εφαρμογές του σε κτίρια και κατασκευές. Επίσης χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που χρειάζονται μέτρα ασφαλείας ως τζάμι ασφαλείας π.χ. σε τράπεζες. Τέλος έχει καλές ιδιότητες θερμομόνωσης και ηχομόνωσης.
2. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, το PC είναι το κυριότερο υλικό για τους φακούς των προβολέων των αυτοκινήτων. Επιπλέον χρησιμοποιείται στις οροφές συγκεκριμένων μοντέλων αυτοκινήτων. Επίσης είναι το κύριο υλικό από το οποίο κατασκευάζονται αλεξίσφαιρα τζάμια.
3. Σε ιατρικά μηχανήματα και εργαλεία. Το PC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χειρουργικό εξοπλισμό και σε εργαλεία που έχουν άμεση επαφή με ασθενείς καθώς οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του, επιτρέπουν την αποστείρωση τέτοιων εργαλείων χωρίς να φθείρουν το υλικό π.χ. αποστείρωση στους 120°C.
4. Σε ηλεκτρικές και τηλεπικοινωνιακές συσκευές ως μόνωση στους πυκνωτές των συσκευών αυτών επίσης σε κινητά τηλέφωνα, CDs (Compact Disks) και DVDs (digital versatile discs).
5. Σε φακούς, όπως σε φακούς οπτικών οράσεως, ηλίου και προστασίας, σε φακούς φωτισμού χειρός κ.α.



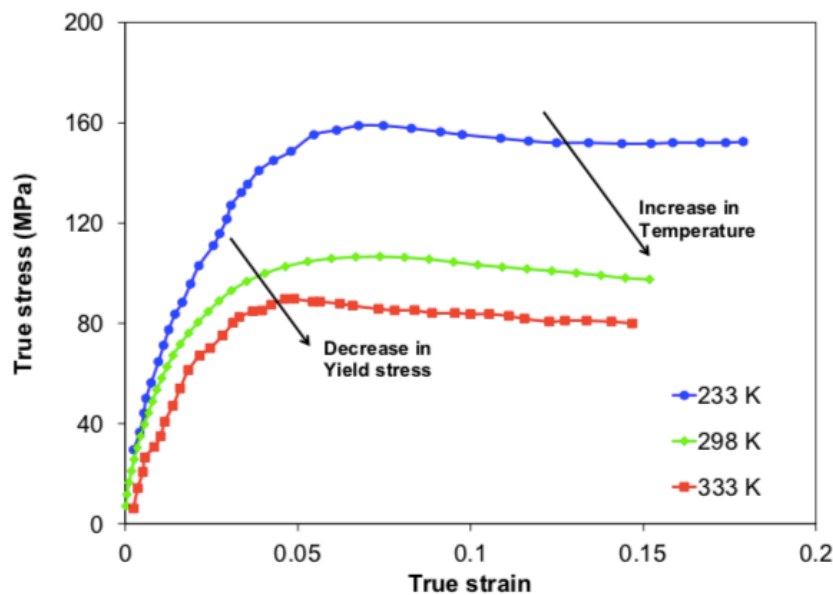
Εικόνα 3.3 :Τεμάχια Πολυκαρβονικού.

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του Πολυκαρβονικού οδηγούν σε πολλές εφαρμογές του. Το PC χαρακτηρίζεται από διαφάνεια, πολύ υψηλή αντοχή σε κρούση, υψηλή επιφανειακή σκληρότητα και καλή διαστατική σταθερότητα. Μερικές από τις μηχανικές του και θερμικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στον **πίνακα 3.2**.

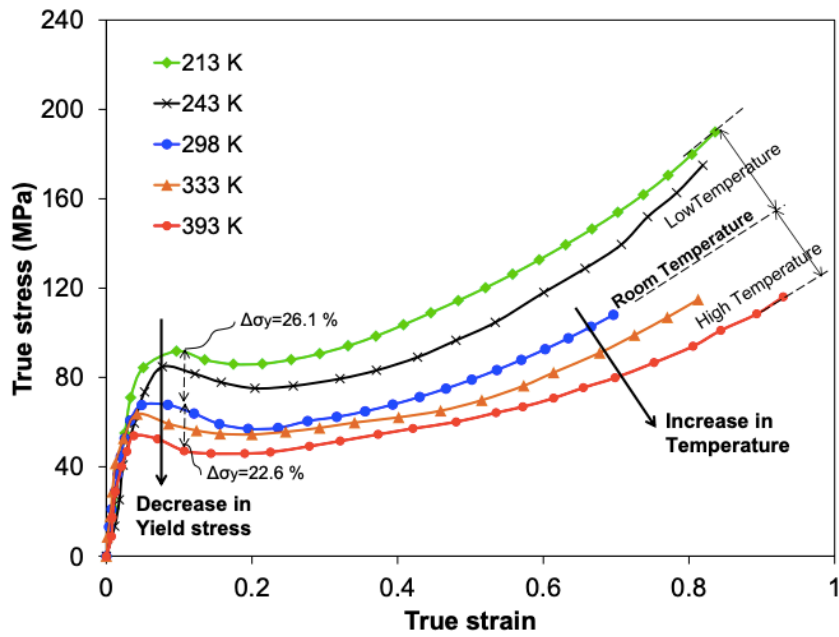
Ιδιότητα	Μονάδες Μέτρησης	Τιμή
Μέτρο Ελαστικότητας	MPa	2000-2600
Λόγος Poisson	-	0.37-0.42
Θερμική Αγωγιμότητα	W/mK	0.19-0.25
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	J/gK	1.17-1.26
Συντελεστής θερμικής διαστολής	C ⁻¹	6e ⁻⁵ -7.5e ⁻⁵

Πίνακας 3.2 : Μηχανικές ιδιότητες του PC. Πηγή : [1,8].

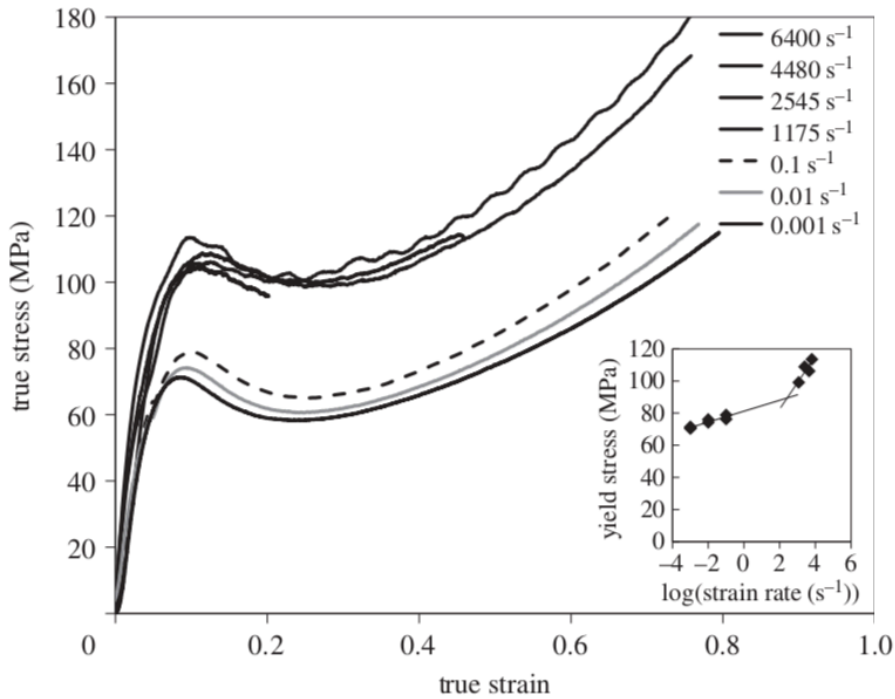
Όπως αναφέρθηκε για το PVC έτσι και για το PC, οι τιμές του παραπάνω πίνακα μπορεί να είναι διαφορετικές ανάλογα με την παραγωγή και τον κατασκευαστή. Τη μηχανική συμπεριφορά του Πολυκαρβονικού μας τη δείχνουν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες παρουσιάζονται στα **σχήματα 3.7** έως **3.10** για διάφορες θερμοκρασίες και ταχύτητες παραμόρφωσης.



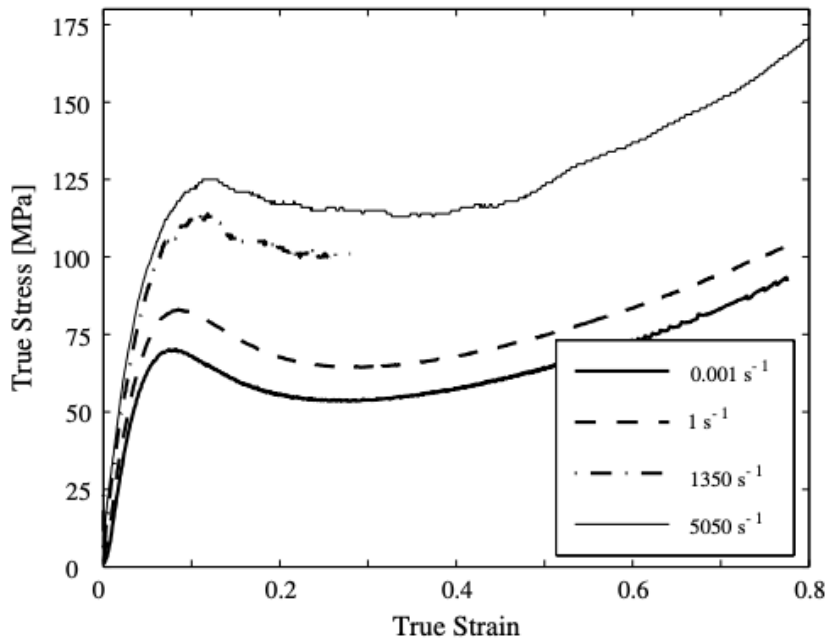
Σχήμα 3.7 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες του PC σε ταχύτητα παραμόρφωσης 1350s⁻¹. Πηγή : [11].



Σχήμα 3.8 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες του PC σε ταχύτητα παραμόρφωσης $0.008s^{-1}$. Πηγή : [11].



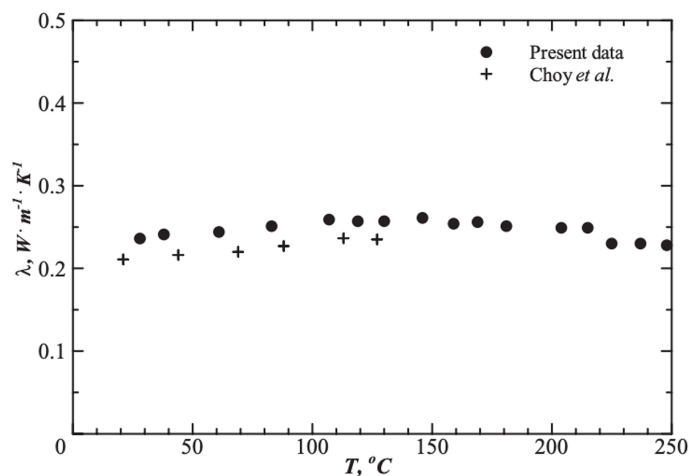
Σχήμα 3.9 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης του PC σε $20^{\circ}C$. Πηγή : [12].



Σχήμα 3.10 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης του PC σε 25°C. Πηγή : [13].

Από τα σχήματα 3.7 και 3.8 φαίνεται ότι με αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται το όριο διαρροής και από τα σχήματα 3.9 και 3.10 ότι το όριο διαρροής αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης.

Οι θερμικές ιδιότητες του PC του επιτρέπουν να λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -40 έως 130°C. Μετά την θερμοκρασία των 130°C αρχίζει να γίνεται πιο μαλακό ενώ αρχίζει να λιώνει μετά τους 145°C. Η θερμική αγωγιμότητα του PC μεταβάλλεται με την θερμοκρασία σε πολύ μικρό βαθμό, όπως φαίνεται από το σχήμα 3.11 με τις τιμές που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη έρευνα να κυμαίνονται από 0,21 έως 0,25 W/mK. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του PC είναι σχεδόν σταθερή και ίση με 1.2 J/gK [1,8].

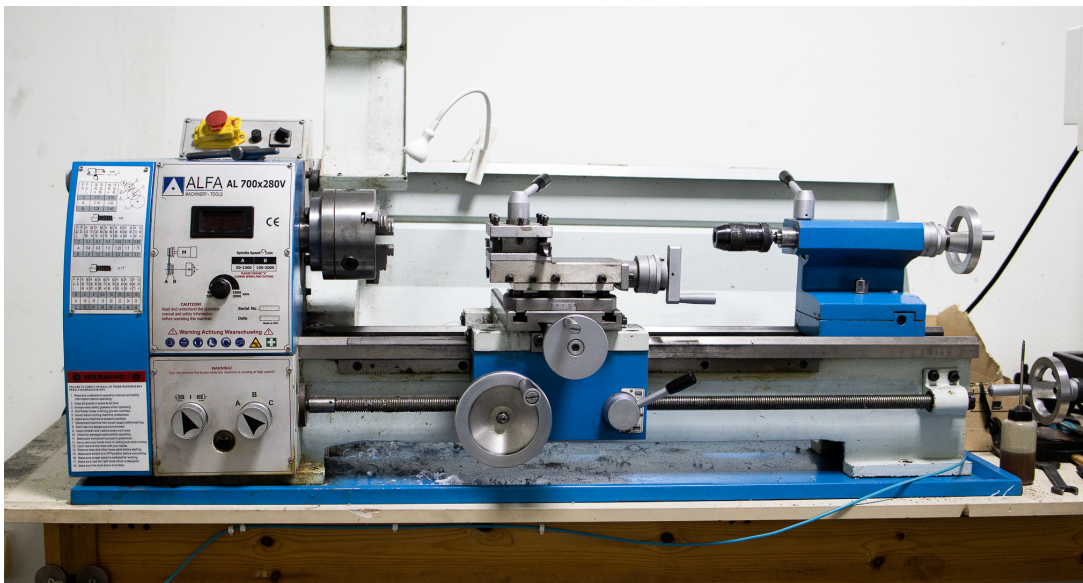


Σχήμα 3.11 : Καμπύλη Θερμικής Αγωγιμότητας - Θερμοκρασίας του PC. Πηγή : [14].

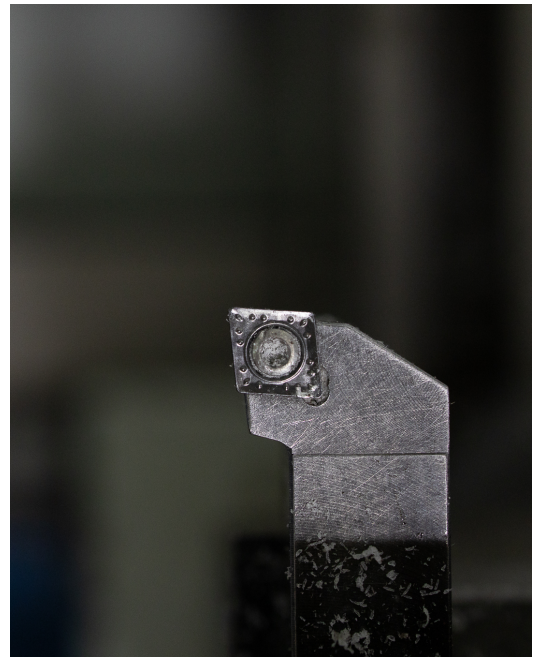
Κεφάλαιο 4 : Πειραματικά αποτελέσματα κοπής κατά την κατεργασία τórνευσης των θερμοπλαστικών υλικών

4.1 Πειραματική διάταξη

Το πειράματα της παρούσας Διπλωματικής εργασίας έγιναν στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Τα θερμοπλαστικά υλικά Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και Πολυκαρβονικό (PC) προμηθεύτηκαν από την εταιρία STEMPLAST HATZIAVGoustis ENGINEERING PLASTICS η οποία βρίσκεται στην περιοχή της Σίνδου στη Θεσσαλονίκη. Τα τεμάχια του PVC και του PC ήταν διαμέτρου 30mm και κόπηκαν σε μέγεθος (μήκος) περίπου 25cm ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στον τórνο που διαθέτει το Εργαστήριο. Ο μηχανολογικός τórνος που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο AL700X280V της εταιρίας ALFA MACHINERY και φαίνεται στην **εικόνα 4.1**. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την τórνευση των θερμοπλαστικών υλικών είναι το CCMT060204-PM5 WSM30 με επικάλυψη TiN (Νιτρίδιο του Τιτανίου) και φαίνεται στην **εικόνα 4.2**. Για την καταγραφή των θερμοκρασιών κατά την κοπή χρησιμοποιήθηκε η Θερμοκάμερα AGEMA 570 της εταιρίας FLIR η οποία φαίνεται παρακάτω στην **εικόνα 4.3**.



Εικόνα 4.1 : Ο μηχανολογικός τórνος AL700X280V της εταιρίας ALFA MACHINERY.



Εικόνα 4.2 : Κοπτικό εργαλείο επικάλυψης TiN.



Εικόνα 4.3 : Η Θερμοκάμερα AGEMA 570.

4.2 Κατεργασία κοπής των θερμοπλαστικών

Κατά την κοπή των θερμοπλαστικών, το κάθε τεμάχιο τοποθετείται στον σφικτήρα (τσόκ) του τόρνου και ενώ ο τόρνος βρίσκεται σε λειτουργία και εκτελείται η κοπή εξάγονται φωτογραφίες εστιάζοντας στο απόβλιττο ώστε να αποτυπωθούν οι θερμοκρασίες που εμφανίζονται κατά την κοπή. Οι συνθήκες κατεργασίας ορίστηκαν ως :

- ταχύτητες περιστροφής : $n = 112 \text{ rpm}$, $n = 530 \text{ rpm}$ και $n = 800 \text{ rpm}$ οπότε προκύπτουν οι
- ταχύτητες κοπής : $v = 175,85 \text{ mm/sec}$, $v = 832 \text{ mm/sec}$ και $v = 1256 \text{ mm/sec}$
- πρόωση : $f = 0.1 \text{ mm/στροφή}$
- βάθος κοπής : $a_p = 0.4 \text{ mm}$

Οι παραπάνω συνθήκες ορίστηκαν ίδιες και για τα δύο θερμοπλαστικά υλικά. Ορίστηκαν τρεις ταχύτητες κοπής ώστε να προκύψουν ποικίλα αποτελέσματα θερμοκρασιών και να διαπιστωθεί καλύτερα η θερμική συμπεριφορά των δύο υλικών κατά την τόννευση. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες την ώρα της κατεργασίας του PVC (Εικόνα 4.4 έως 4.6) και έπειτα του PC.

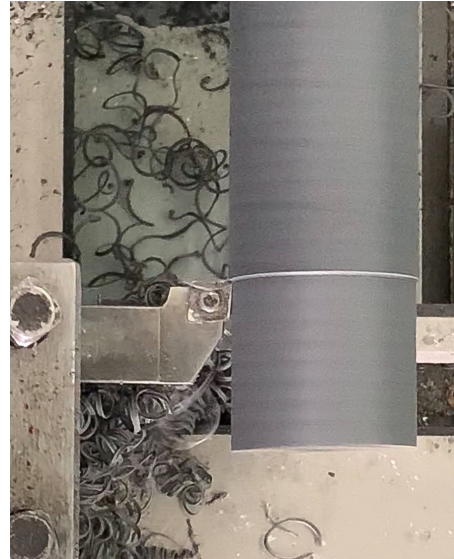
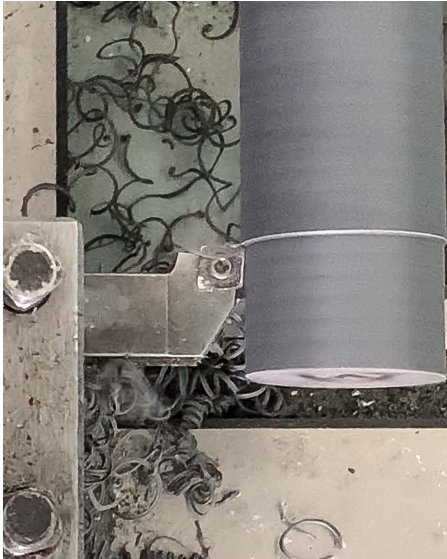


Εικόνα 4.4 : Τόννευση PVC.



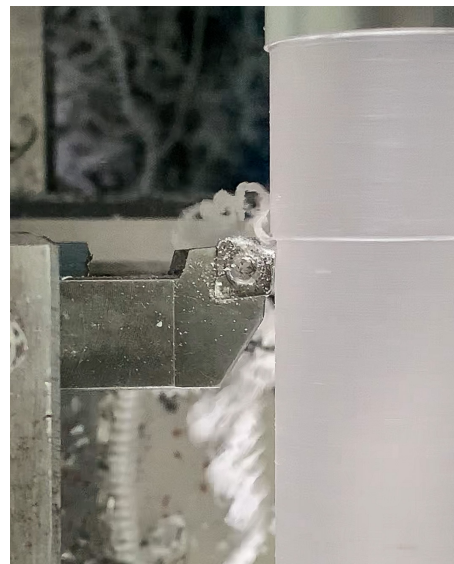
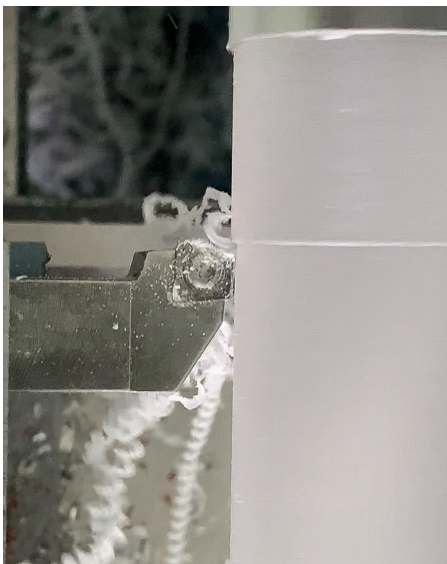
Εικόνα 4.5 : Τόρνευση PVC στις 112 rpm.

Κατά την κατεργασία της κοπής του PVC με ταχύτητα περιστροφής 112 rpm παρατηρήθηκε ότι το απόβλιττο περιπλέκεται γύρω από το τεμάχιο κατά την τόννευση, αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή ταχύτητα περιστροφής και στην μορφή του αποβλίττου που είναι ελικοειδής τύπου ροδέλας (μακρύ) (ISO 3685-1977) [16].



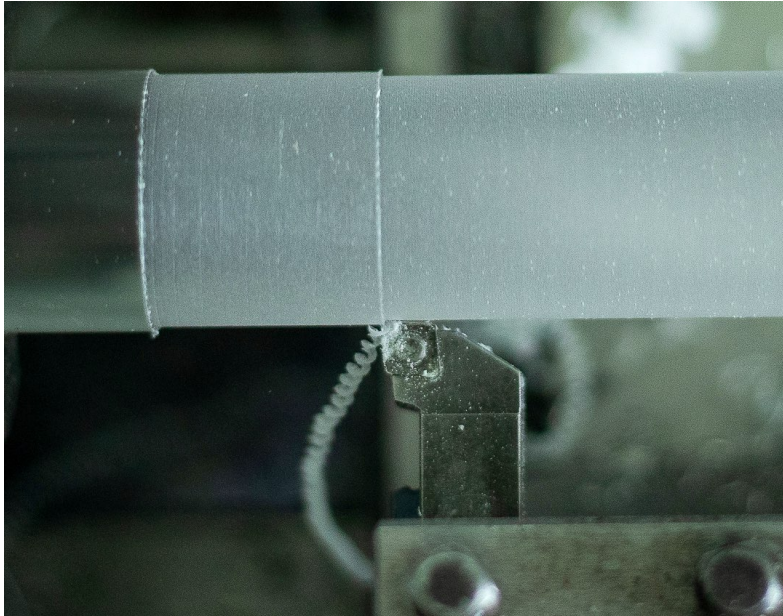
Εικόνα 4.6 : Τόρνευση PVC στις 530 rpm.

Κατά την κοπή του PVC σε 530 rpm το απόβλιττο παραμένει μορφής ελικοειδής τύπου ροδέλας (μακρύ) [16], αλλά δεν περιπλέκεται στο τεμάχιο. Η **εικόνα 4.6** είναι ενδεικτική και για ταχύτητα περιστροφής 800 rpm καθώς η μορφή του αποβλίττου είναι τελείως ίδια.



Εικόνα 4.7 : Τόρνευση PC στις 112 rpm.

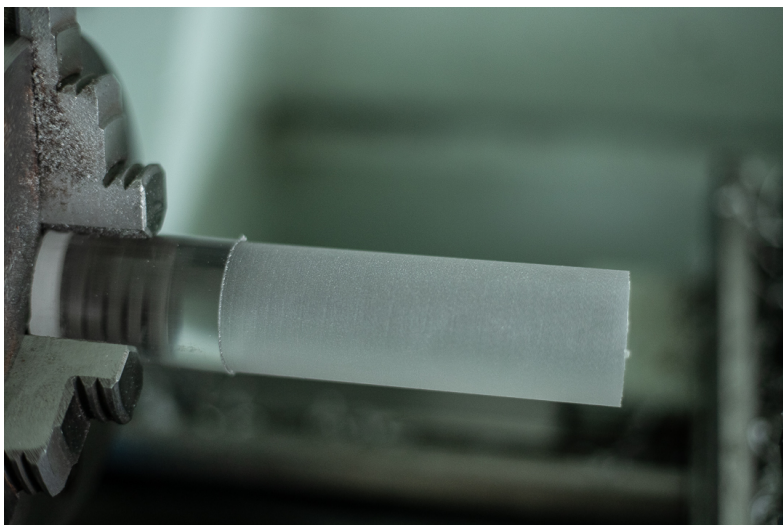
Κατά την κατεργασία της κοπής του PC σε 112 rpm το απόβλιττο είναι ελικοειδής τύπου ροδέλας (περιπλεγμένο) [16], όπως φαίνεται και στην **εικόνα 4.7**.



Εικόνα 4.8 : Τόρνευση PC στις 530 rpm.

Κατά την τόρνευση του PC στις 530 rpm (όπως φαίνεται στην **εικόνα 4.8**) το απόβλιττο είναι μορφής ελικοειδής τύπου ροδέλας (κοντό) [16].

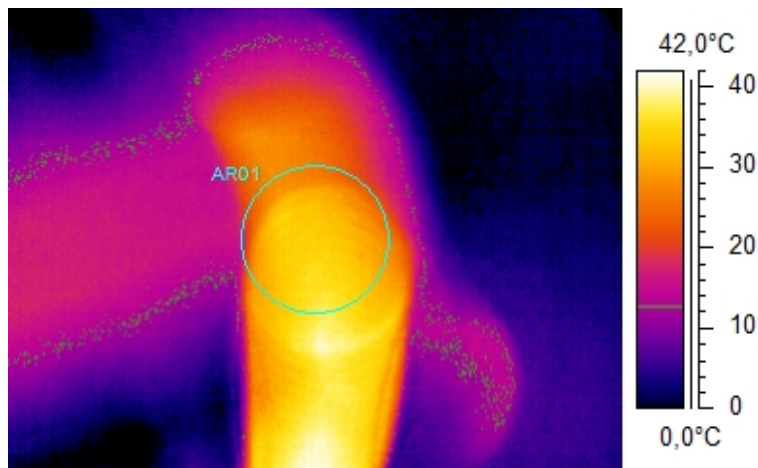
Μετά την κατεργασία του Πολυκαρβονικού, όπως φαίνεται και στην **εικόνα 4.9**, το Πολυκαρβονικό (PC) χάνει την ιδιότητα της διαφάνειας που είχε πριν την κατεργασία. Επίσης, η εικόνα 4.8 είναι ενδεικτική και για ταχύτητα περιστροφής 800 rpm καθώς η μορφή του αποβλίττου είναι τελείως ίδια.



Εικόνα 4.9 : Κατεργασμένο τεμάχιο PC.

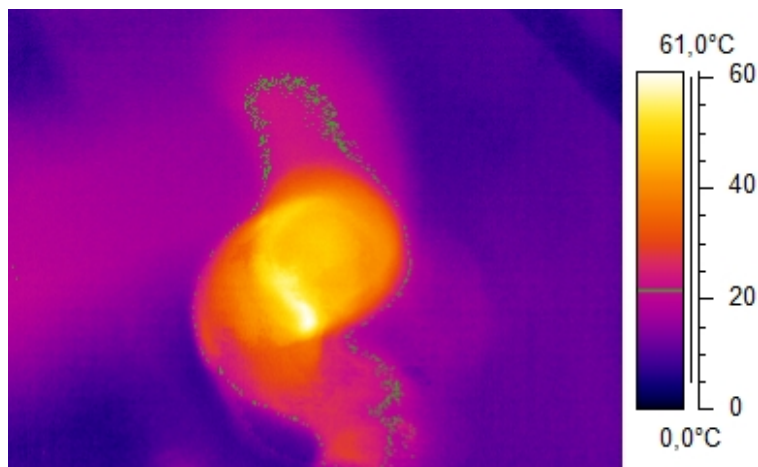
4.3 Αποτελέσματα μέτρησης θερμοκρασίας με τη βοήθεια της θερμοκάμερας AGEMA 570

Οι θερμικές φωτογραφίες της κάμερας AGEMA 570 οπτικοποιήθηκαν και επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού της εταιρίας FLIR Tools. Οι θερμικές φωτογραφίες του υλικού PVC κατά την κοπή του παρουσιάζονται στα **σχήματα 4.10** έως **4.12**.



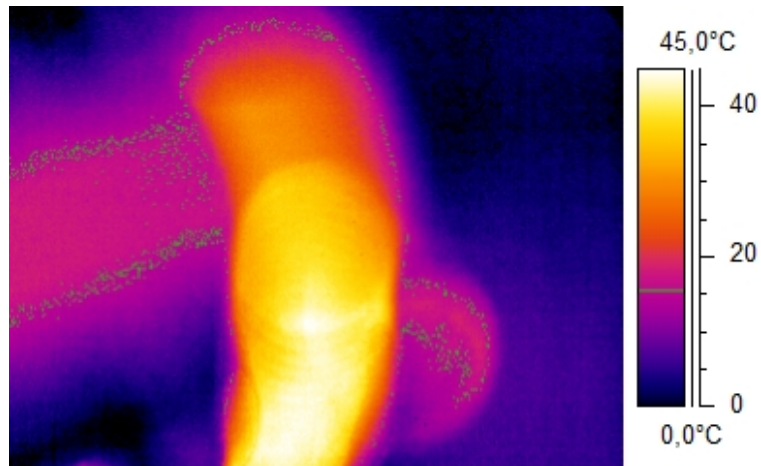
Εικόνα 4.10 : Θερμοκρασίες κοπής του PVC σε 112 rpm.

Για ταχύτητα περιστροφής 112 rpm το PVC ανεβάζει θερμοκρασίες τοπικά μέχρι και 42°C. Οι θερμοκρασία του αποβλίττου είναι λίγο λιγότερο περίπου στους 40°C.



Εικόνα 4.11: Θερμοκρασίες κοπής του PVC σε 530 rpm.

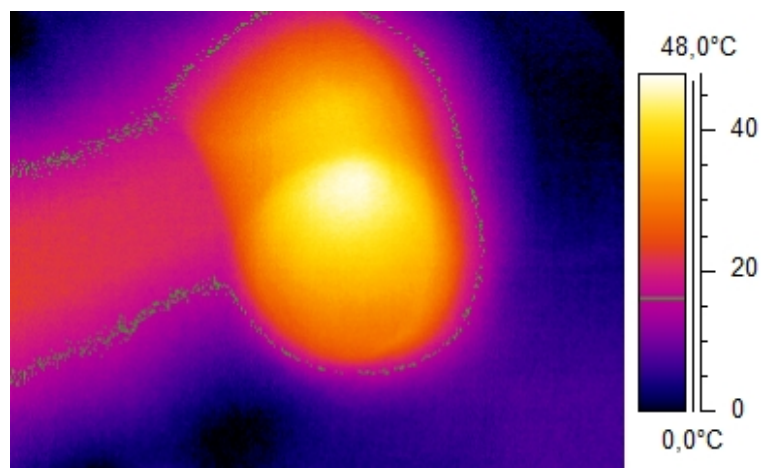
Για ταχύτητα περιστροφής 530 rpm, το PVC ανεβάζει θερμοκρασίες σε μια μικρή επιφάνεια 61°C. Οι θερμοκρασίες που φαίνεται να υπάρχουν στο απόβλιττο εκτός της επιφάνειας αυτής είναι λιγότερο γύρω στους 50-55°C. Αυτές οι θερμοκρασίες σε ταχύτητα 530 rpm είναι και οι μέγιστες που παρατηρήθηκαν κατά την κοπή του τεμαχίου PVC.



Εικόνα 4.12: Θερμοκρασίες κοπής του PVC σε 800 rpm.

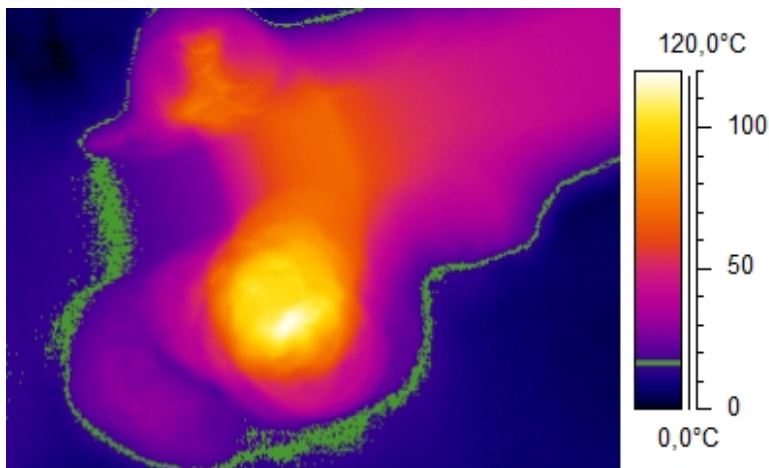
Σε ταχύτητα περιστροφής 800 rpm, το απόβλιττο έχει μέγιστη θερμοκρασία 45°C. Σε ένα μικρότερο κομμάτι του αποβλίττου η θερμοκρασία είναι λίγο χαμηλότερη των 45°C. Στην κοπή με 800 rpm παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία αποβλίττου είναι χαμηλότερη σε σχέση με την κοπή σε 530 rpm.

Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών αποβλίττου κατά την τόννευση του τεμαχίου PC παρουσιάζονται στις εικόνες 4.13 έως 4.15.



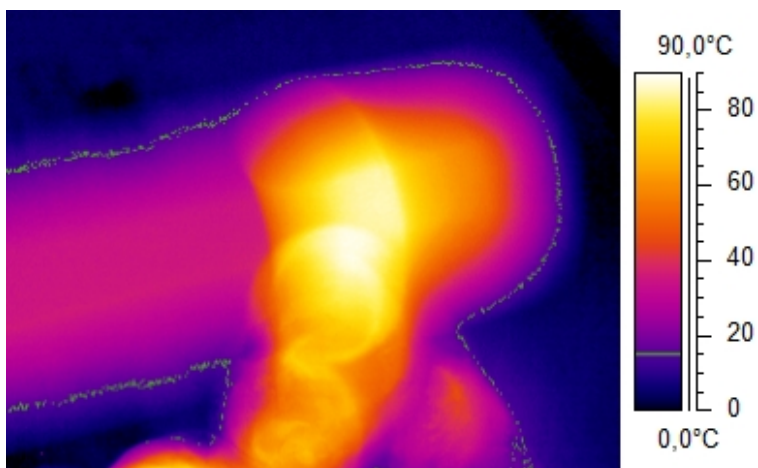
Εικόνα 4.13: Θερμοκρασίες κοπής του PC σε 112 rpm.

Κατά την κατεργασία του PC σε ταχύτητα περιστροφής 112 rpm, η θερμοκρασία αποβλίττου είναι από 42-48°C με μέγιστη θερμοκρασία τους 48°C.



Εικόνα 4.14: Θερμοκρασίες κοπής του PC σε 530 rpm.

Σε ταχύτητα περιστροφής 530 rpm, η μέγιστη θερμοκρασία του αποβλίττου είναι 120°C και σε ένα μεγάλο μέρος η θερμοκρασία είναι γύρω στους 100°C και άνω. Η θερμοκρασία των 120°C είναι και η μέγιστη θερμοκρασία αποβλίττου που παρατηρήθηκε κατά την τόννευση του τεμαχίου του PC.



Εικόνα 4.15 : Θερμοκρασίες κοπής του PC σε 800 rpm.

Σε ταχύτητα περιστροφής 800 rpm, η μέγιστη θερμοκρασία αποβλίττου είναι 90°C και η θερμοκρασία αυτή φαίνεται να είναι σε μεγάλο μέρος του αποβλίττου και όχι σημειακά. Η θερμοκρασία του αποβλίττου κυμαίνεται από 85-90°C.

Στους **Πίνακες 4.1** και **4.2** συνοψίζονται οι θερμοκρασίες αποβλίττου και η μορφή αποβλίττου αντιστοίχως.

	112	530	800
PVC	40-42°C	50-55°C	40-45°C
PC	42-48°C	98-105°C	85-90°C

Πίνακας 4.1 : Αποτελέσματα αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών για το PVC και το PC.

	112	530	800
PVC	ελικοειδής τύπου ροδέλας (μακρύ)	ταινιοειδής (μακρύ)	ταινιοειδής (μακρύ)
PC	ελικοειδής τύπου ροδέλας (περιπλεγμένο)	ελικοειδής τύπου ροδέλας (κοντό)	ελικοειδής τύπου ροδέλας (κοντό)

Πίνακας 4.2 : Μορφή αποβλίττου για το PVC και το PC.

Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση κατεργασίας κοπής με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Η προσομοίωση της κατεργασίας κοπής - τόννευσης έρχεται να συμπληρώσει τα αποτελέσματα του πειράματος για την μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων των δύο θερμοπλαστικών υλικών. Η προσομοίωση της κοπής έγινε σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (DEFORM2D). Σκοπός της προσομοίωσης είναι αφού γίνει η εισαγωγή δεδομένων και επιτευχθεί η λύση του προβλήματος στον επίλυτή (solver), να εξαχθούν τα αποτελέσματα της και να συγκριθούν με τα πειραματικά. Με τον τρόπο αυτό, βασιζόμενοι στην αξιοπιστία του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να γίνει ο προσδιορισμός των θερμικών των δύο θερμοπλαστικών υλικών. Για την προσομοίωση της τόννευσης των δύο θερμοπλαστικών υλικών, επιλέχθηκε λογισμικό προσομοίωσης με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων σε επίπεδο δύο διαστάσεων (2D) που προσομοιώνει την ορθογωνική κοπή η οποία αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.

5.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό FEM

Για την επίλυση μιας προσομοίωσης κοπής με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό πακέτο. Η εισαγωγή δεδομένων περιλαμβάνει :

1. Εισαγωγή των κύριων συνθηκών κατεργασίας κοπής
2. Εισαγωγή της γεωμετρίας κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου
3. Δημιουργία των υλικών κοπτικού και τεμαχίου
4. Εισαγωγή οριακών συνθηκών

5.1.1 Εισαγωγή των κύριων συνθηκών κατεργασίας κοπής

Τα δεδομένα τα οποία πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό πακέτο με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων είναι οι κύριες συνθήκες κατεργασίας, οι οποίες πρέπει να είναι ίδιες με τις πειραματικές. Για $n= 112 \text{ rpm}$, $n= 530 \text{ rpm}$ και $n= 800 \text{ rpm}$ και διάμετρο $D= 30 \text{ mm}$ σε συνδυασμό με την σχέση (2.1) προκύπτουν οι ταχύτητες κοπής :

- $v= 176 \text{ mm/sec}$
- $v= 832 \text{ mm/sec}$
- $v= 1256 \text{ mm/sec}$

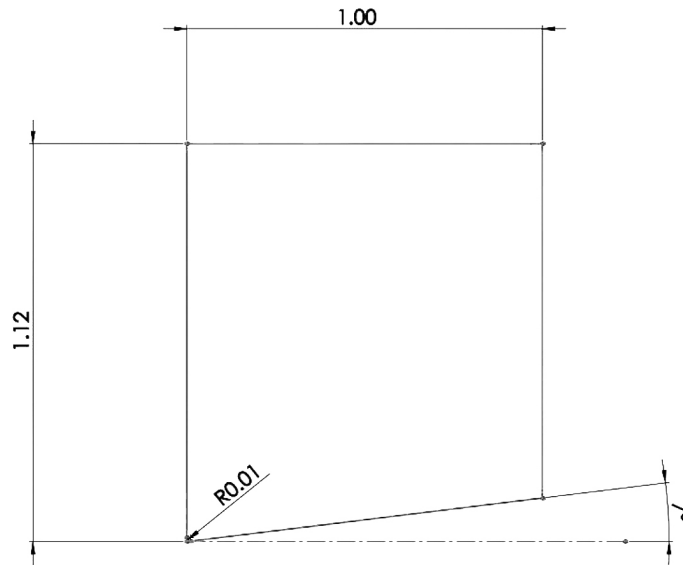
Ομοίως με το πείραμα επιλέγονται

- βάθος κοπής (depth of cut) : $a_p = 0.4 \text{ mm}$ και
- πρόωση (feed rate) : $f= 0.1 \text{ mm/στροφή}$

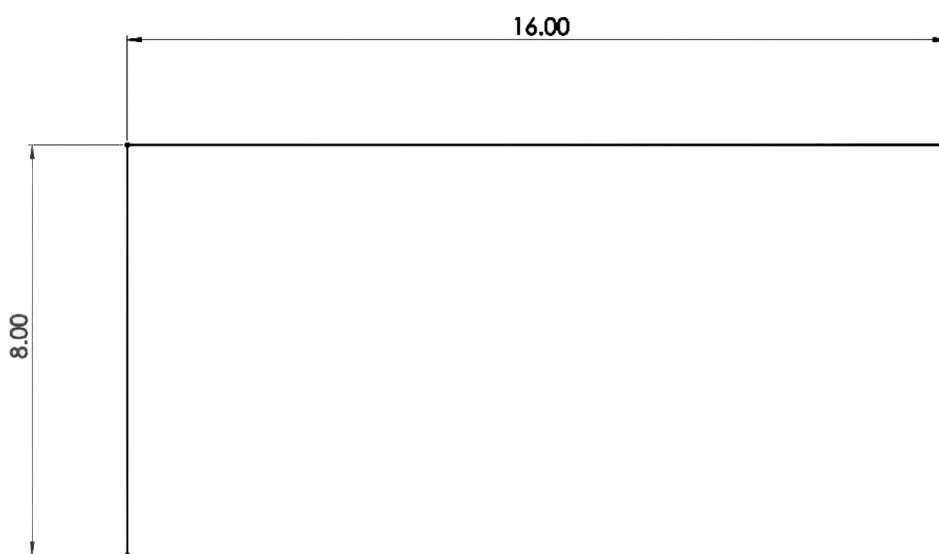
Πρέπει να οριστεί επίσης ο συντελεστής τριβής Coulomb (friction coefficient) και η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο συντελεστής τριβής ορίστηκε : $\mu =0.45$ [15] και για τα δύο θερμοπλαστικά και η θερμοκρασία περιβάλλοντος ορίστηκε 20°C .

5.1.2 Εισαγωγή της γεωμετρίας

Μετά την εισαγωγή των κύριων συνθηκών κατεργασίας, πρέπει να γίνει εισαγωγή της γεωμετρίας αρχικά του κοπτικού εργαλείου και έπειτα του κατεργαζομένου τεμαχίου. Οι δύο απλές διδιάστατες γεωμετρίες σχεδιάστηκαν στο λογισμικό Solidworks και φαίνονται στα **σχήματα 5.1** και **5.2**.



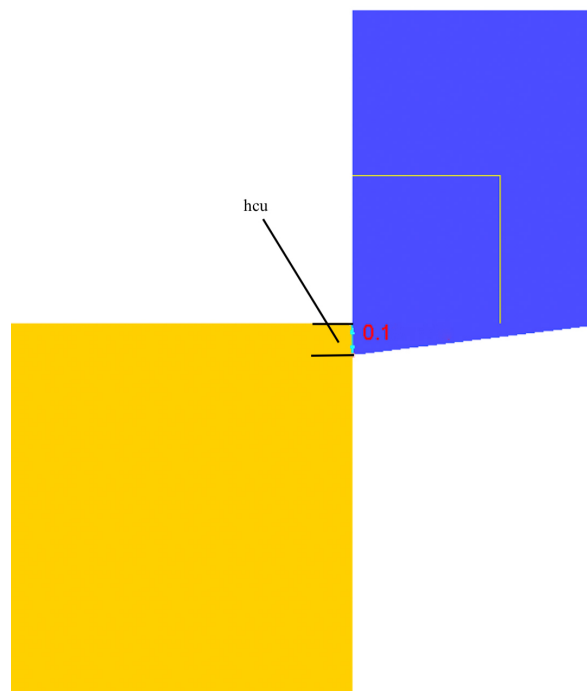
Σχήμα 5.1 : Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 5.2 : Γεωμετρία κατεργαζομένου τεμαχίου.

Οι διαστάσεις του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι σε mm. Η επιλογή των διαστάσεων αυτών σε mm έγινε καθώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν επηρεάζονται από τις διαστάσεις. Η επιλογή της μικρής γεωμετρίας οδηγεί σε χρήση λιγότερων πεπερασμένων στοιχείων (αργότερα στο βήμα της διακριτοποίησης - meshing) κάτι που μειώνει και τους μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους στο κομμάτι της επίλυσης. Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου σχεδιάστηκε για το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο-πλακίδιο του πειράματος όπως προβλέπεται από τις διαστάσεις του και κατά ISO 1832:2004 [16], με γωνία αποβλίττου $\gamma = 0^\circ$ και γωνία ελευθερίας $\alpha = 7^\circ$. Στην κοπτική ακμή δημιουργήθηκε καμπυλότητα 10 μ m. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο σχεδιάστηκε σαν ορθογώνιο με διαστάσεις 16mm και 8mm. Εφόσον πραγματοποιηθεί η εισαγωγή των δύο γεωμετριών, κοπτικού και τεμαχίου, γίνεται η τοποθέτηση τους σύμφωνα με το δισδιάστατο μοντέλο κοπής.

Η τοποθέτηση γίνεται, είτε αυτόματα από το λογισμικό, είτε από το χρήστη, καθώς στην τόνρευση η γωνία κ είναι ίση με 90° . Αυτό σημαίνει πως από τη σχέση (2.2) προκύπτει $f = h_{cu}$ και άρα με βάση τις κύριες συνθήκες κατεργασίας προκύπτει ότι το $h_{cu} = 0.1$ mm όπως φαίνεται και παρακάτω στο **σχήμα 5.3**.



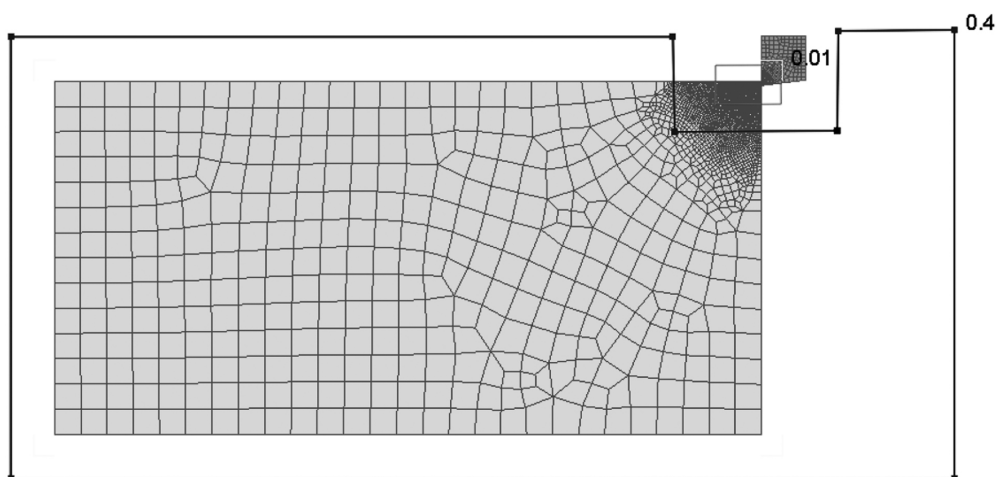
Σχήμα 5.3 : Τοποθέτηση κοπτικού και τεμαχίου, με πάχος απαραμόρφωτου αποβλίττου $h_{cu} = 0.1$.

Στο **σχήμα 5.4** παρουσιάζεται η γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου μετά την τοποθέτησή τους για την κατεργασία κοπής.



Σχήμα 5.4 : Τοποθέτηση κοπτικού και τεμαχίου για την κατεργασία κοπής.

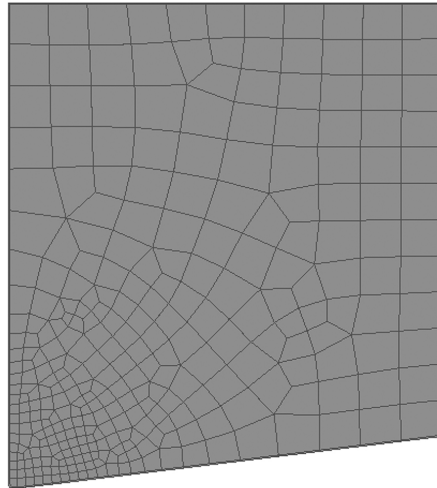
Το επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίησή τους (mesh). Η διακριτοποίηση του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου στην δισδιάστατη προσομοίωση κοπής γίνεται με την δημιουργία πυκνού πλέγματος κοντά στην περιοχή της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου, όπου και συμβαίνει η κοπή, τόσο στο τεμάχιο όσο και στο κοπτικό, ενώ λιγότερο πυκνό πλέγμα δημιουργείται στην υπόλοιπη επιφάνεια της γεωμετρίας. Η δημιουργία του πλέγματος (mesh) γίνεται ανεξάρτητα για το κάθε σώμα. Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας φαίνεται στο **σχήμα 5.5**.



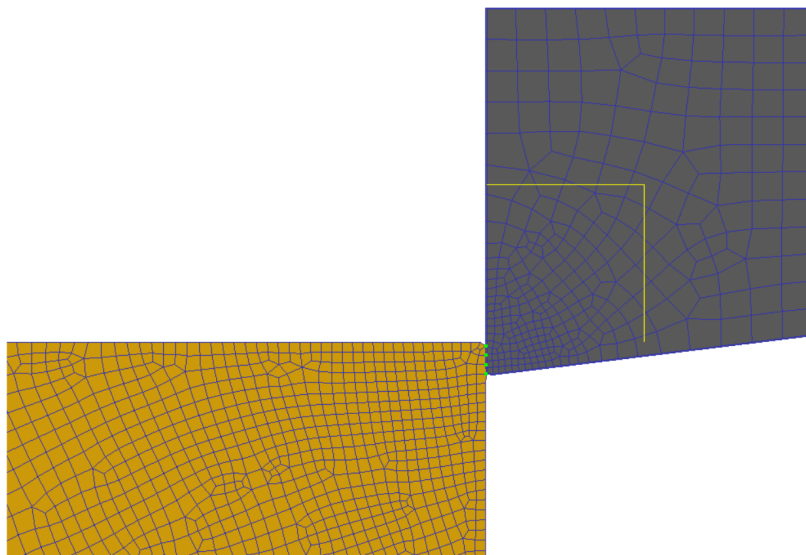
Σχήμα 5.5 : Πλέγμα διακριτοποίησης (mesh) της γεωμετρίας κοπτικού και τεμαχίου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5, έχουν δημιουργηθεί δύο παράθυρα πλέγματος (mesh windows) με αναλογίες 0.4 προς 0.01 (δηλαδή 40 προς 1), τα οποία καθώς η κοπή εξελίσσεται ακολουθούν την γεωμετρία η οποία κινείται (είτε το κοπτικό όταν το τεμάχιο είναι σταθερό είτε το αντίθετο). Η δημιουργία των παραθύρων αυτών μειώνει τους υπολογιστικούς χρόνους χωρίς να επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Για την διακριτοποίηση του κοπτικού πρέπει να

δημιουργηθεί και ένα πολύ λεπτό πλέγμα στην εξωτερική πλευρά της γεωμετρίας στο οποίο σε επόμενο στάδιο θα εισαχθεί το υλικό της επικάλυψης του κοπτικού. Στο **σχήμα 5.6** φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε συμπεριλαμβανομένου και του πλέγματος της επικάλυψης του κοπτικού εργαλείου πάχους 3μm σύμφωνα με την επικάλυψη TiN του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε. Στο **σχήμα 5.7** φαίνονται τα σημεία επαφής κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 5.6 : Πλέγμα κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 5.7 : Σημεία επαφής κοπτικού-τεμαχίου.

5.1.3 Εισαγωγή των υλικών

Αφού γίνει η εισαγωγή των γεωμετριών του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου και ολοκληρωθεί και η διακριτοποίηση τους (δημιουργία πλέγματος), πρέπει να γίνει η εισαγωγή των υλικών στις γεωμετρίες. Εισαγωγή των υλικών σημαίνει εισαγωγή των ιδιοτήτων τους (μηχανικών και θερμικών) ώστε κατά το στάδιο της επίλυσης να γίνουν σωστά οι υπολογισμοί και να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για το κοπτικό εργαλείο η εισαγωγή των υλικών στη γεωμετρία του γίνεται άμεσα από τη βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού η οποία έχει δημιουργηθεί από την εταιρία κατασκευής του συγκεκριμένου λογισμικού. Έτσι στο κύριο πλέγμα του κοπτικού ορίστηκε το υλικό WC (σκληρομέταλλο) και στο πλέγμα της επικάλυψης πάχους 3μm ορίστηκε το υλικό TiN (νιτρίδιο του Τιτανίου). Τα υλικά αυτά είναι και τα πραγματικά υλικά από τα οποία αποτελείται το κοπτικό εργαλείο του πειράματος.

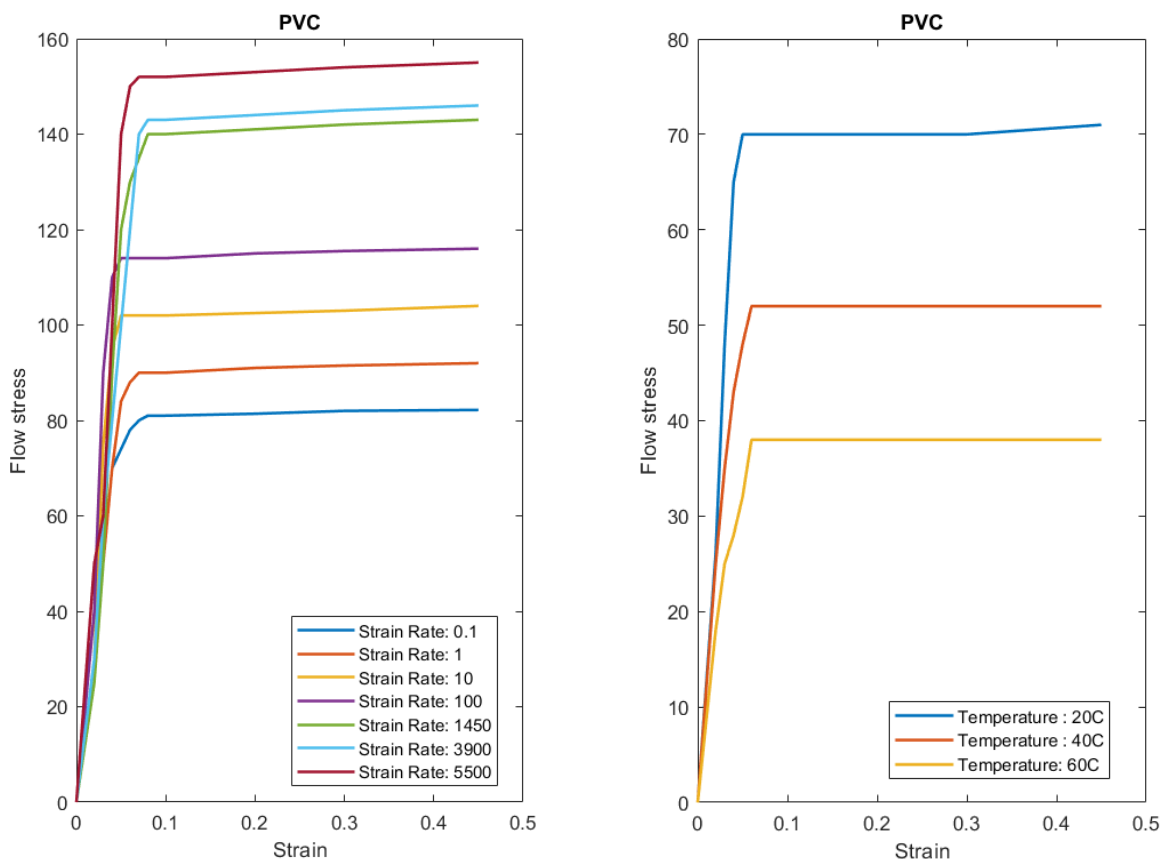
Για το κατεργαζόμενο τεμάχιο καθώς τα υλικά τα οποία μελετάμε είναι θερμοπλαστικά και δεν υπήρχαν στην βιβλιοθήκη του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε έπρεπε να δημιουργηθεί από την αρχή το προφίλ των υλικών αυτών, εισάγοντας τις ιδιότητες τους. Αυτό έγινε λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του δελτίου δεδομένων προϊόντος της εταιρίας STEMLAST HATZIAVGoustis από την οποία προμηθεύτηκαν τα δύο θερμοπλαστικά αλλά και της διεθνούς βιβλιογραφίας η οποία αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.

Για το Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), οι ιδιότητες που είναι σημαντικές για την σωστή εισαγωγή του υλικού και παρέχονται από τον προμηθευτή παρουσιάζονται στον **πίνακα 5.1**

Ιδιότητα	Μονάδες Μέτρησης	Τιμή
Μέτρο Ελαστικότητας	MPa	3000
Θερμική Αγωγιμότητα	W/mK	0.16 (23°C)
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	J/gK	0.9 - 1.0
Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής	C ⁻¹	80·10 ⁻⁶ (23-60°C)

Πίνακας 5.1 : Ιδιότητες του PVC από STEMLAST HATZIAVGoustis.

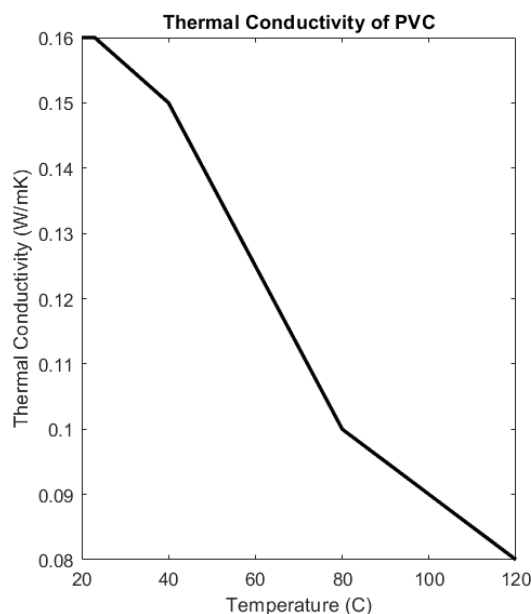
Εκτός των παραπάνω ιδιοτήτων για να γίνουν σωστά οι υπολογισμοί της πλαστικής συμπεριφοράς του PVC και να ολοκληρωθεί το προφίλ του υλικού, είναι απαραίτητο να γίνει εισαγωγή των διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης του PVC τα οποία παρουσιάστηκαν στο **σχήμα 3.3** και **σχήμα 3.4**. Τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης παρουσιάζονται παρακάτω όπως ακριβώς έγινε η εισαγωγή τους στο λογισμικό.



Σχήμα 5.8 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης του PVC για σταθερή θερμοκρασία 20°C και διαφορετικές ταχύτητες παραμόρφωσης (αριστερά) και για σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης 0.01s^{-1} και διαφορετικές θερμοκρασίες (δεξιά).

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα στις καμπύλες τάσης - βαθμού παραμόρφωσης έχει εφαρμοστεί διγραμμικός νόμος. Στην κατεργασία κοπής μας ενδιαφέρει η γεωμετρία και η μορφή του αποβλίττου. Στην περίπτωση που γίνει εισαγωγή των καμπύλων στο λογισμικό με την μορφή που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2, με περαιτέρω παραμόρφωση των θερμοπλαστικών το όριο διαρροής σ_y ελαττώνεται, με αποτέλεσμα να έχουμε απλή παραμόρφωση του υλικού και όχι δημιουργία αποβλίττου, το οποίο είναι και το ζητούμενο στην κατεργασία κοπής. Έτσι όλα τα διαγράμματα σ - ϵ έχουν εισαχθεί σε αυτή τη μορφή και για τα δύο θερμοπλαστικά.

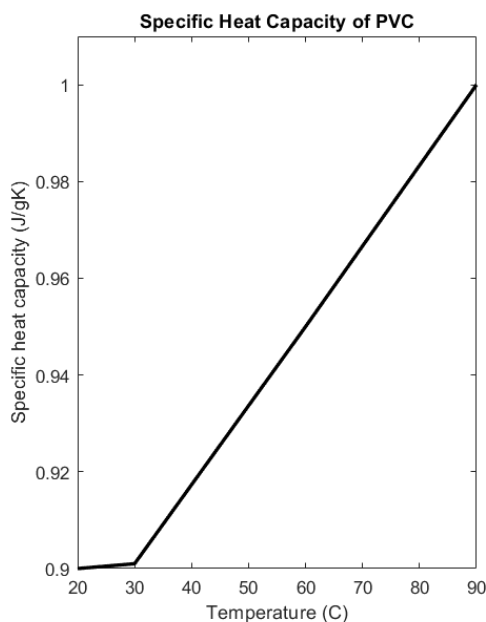
Λαμβάνοντας υπόψη την θερμική αγωγιμότητα που μας παρέχει ο προμηθευτής ($k= 0.16\text{ W/mK}$ στους 23°C) αλλά και την συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας που προέκυψε από το σχήμα 3.5, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία του παρακάτω διαγράμματος που φαίνεται στο **σχήμα 5.9**. Παρομοίως, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα κυμαίνεται από 0.9 έως 1.0 J/gK, αλλά και το σχήμα 3.6 έγινε η δημιουργία του διαγράμματος ειδικής θερμοχωρητικότητας - θερμοκρασίας όπως παρουσιάζεται στο **σχήμα 5.10**.



Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας - θερμοκρασίας για το PVC.

Η συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας που χαρακτηρίζει το σχήμα 5.9 είναι :

$TC = 5 \cdot 10^{-6} T^2 - 0.0015T + 0.1902$, όπου TC η θερμική αγωγιμότητα και T η θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται από 20 έως 120°C. Η παραπάνω καμπύλη εισήχθει στο λογισμικό προσομοίωσης (DEFORM2D) [20]. Κατά την επίλυση της προσομοίωσης, η συνάρτηση θα τροποποιηθεί καταλλήλως, αν χρειαστεί, ώστε η τελική μορφή του αποβλήττου αλλά και το αναπτυσσόμενο θερμοκρασιακό πεδίο να συμπίπτει με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα ειδικής θερμοχωρητικότητας - θερμοκρασίας για το PVC.

Η συνάρτηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας που χαρακτηρίζει το σχήμα 5.10 είναι :

$SHC = 7 \cdot 10^{-6} T^2 + 0.0007T + 0.8798$, όπου SHC η ειδική θερμοχωρητικότητα και T η θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται από 20 έως 90°C. Η παραπάνω καμπύλη εισήχθει στο λογισμικό προσομοίωσης. Κατά την επίλυση της προσομοίωσης, η συνάρτηση θα τροποποιηθεί καταλλήλως, αν χρειαστεί, ώστε

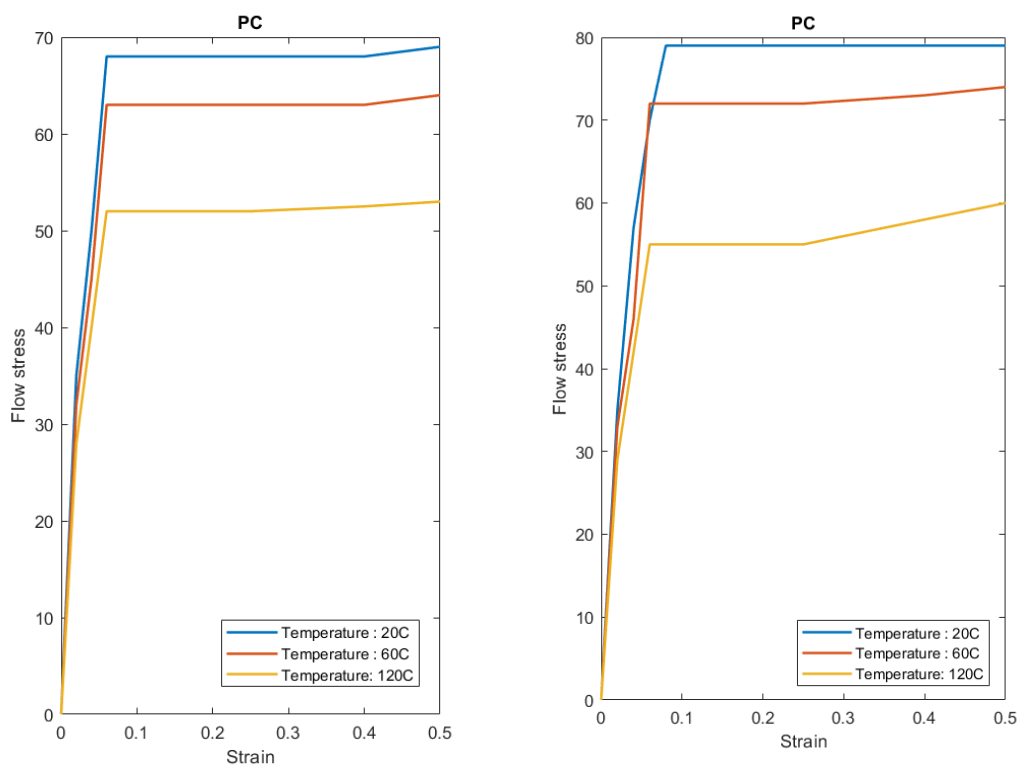
η τελική μορφή του αποβλίττου αλλά και το αναπτυσσόμενο θερμοκρασιακό πεδίο να συμπίπτει με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για το Πολυκαρβονικό (PC) οι ιδιότητες που είναι σημαντικές για την σωστή εισαγωγή του υλικού και παρέχονται από τον κατασκευαστή παρουσιάζονται στον **πίνακα 5.2**.

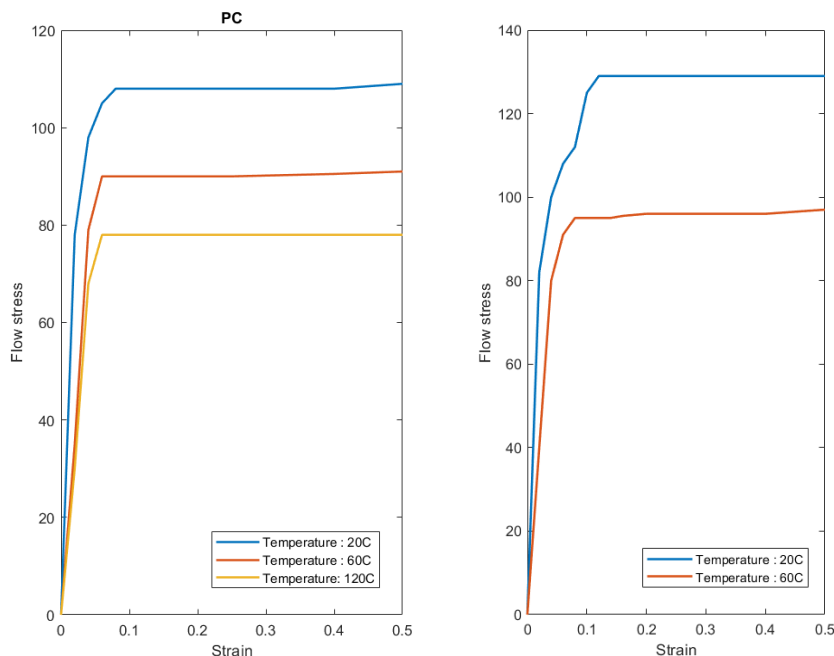
Ιδιότητα	Μονάδες Μέτρησης	Τιμή
Μέτρο Ελαστικότητας	MPa	2300
Θερμική Αγωγιμότητα	W/mK	0.21 (23°C)
Ειδική Θερμοχωρητικότητα	J/gK	1.2
Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής	C ⁻¹	60-70·10 ⁻⁶ (23-60°C)

Πίνακας 5.2 : Ιδιότητες του PC από STEMLAST HATZIAVGOUTIS.

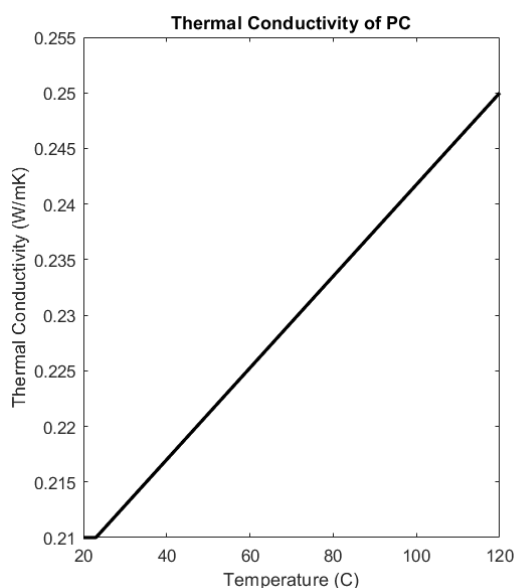
Ομοίως με το PVC έτσι και για το PC πρέπει να γίνει εισαγωγή των διαγραμμάτων τάσης - βαθμού παραμόρφωσης ώστε να γίνουν σωστά οι υπολογισμοί της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Έτσι έγινε η εισαγωγή των διαγραμμάτων που φαίνονται στα **σχήματα 5.11** και **5.12** με βάση τα σχήματα 3.7 έως 3.10 του κεφαλαίου 3.



Σχήμα 5.11 : Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης του PC για σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης 0.008s⁻¹ (αριστερά) και 0.1s⁻¹ (δεξιά) για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Σχήμα 5.12 : Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης του PC για σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης $1350s^{-1}$ (αριστερά) και $5500s^{-1}$ (δεξιά) για διαφορετικές θερμοκρασίες.

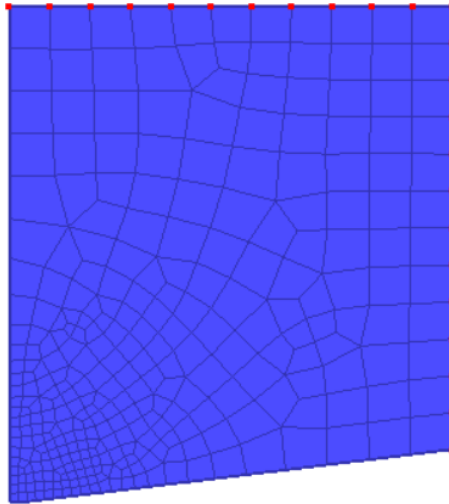


Σχήμα 5.13 : Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας - θερμοκρασίας για το PC.

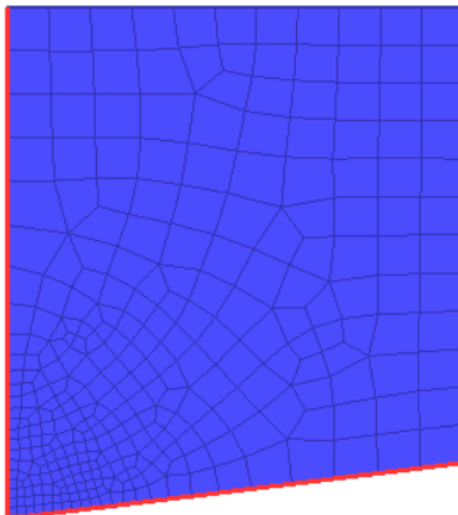
Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του κατασκευαστή (0.21 W/mK στους 23°C) αλλά και το σχήμα 3.11, έγινε η εισαγωγή της γραμμικής συνάρτησης όπως φαίνεται στο **σχήμα 5.13**, όπου στους 20°C η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας είναι 0.21 W/mK και στους 120°C 0.25 W/mK. Η συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας που χαρακτηρίζει την παραπάνω καμπύλη είναι : $TC= 0.0004T + 0.2005$, όπου T η θερμοκρασία από 20 έως 120°C. Θα πρέπει να αναφερθεί πως η καμπύλη δεν ξεκινάει από το μηδέν καθώς μέσα στο λογισμικό έχει οριστεί ότι η κατεργασία κοπής θα πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δηλαδή 20°C.

5.1.4 Εισαγωγή οριακών συνθηκών

Μετά την εισαγωγή των υλικών στις διακριτοποιημένες γεωμετρίες του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, το τελευταίο βήμα στον προ-επεξεργαστή (pre-processor) είναι η εισαγωγή των οριακών συνθηκών στις γεωμετρίες. Αρχικά για το κοπτικό εργαλείο γίνεται εισαγωγή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (20°C) καθώς επίσης ορίζεται η πλευρά από την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας (η πλευρά της κοπτικής ακμής). Οι δύο αυτές οριακές συνθήκες φαίνονται στα **σχήματα 5.14** και **5.15** αντίστοιχα.

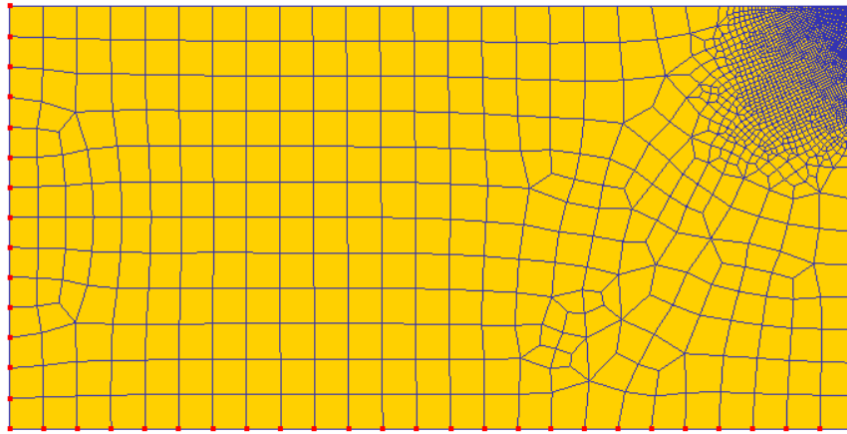


Σχήμα 5.14 : Ορισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το κοπτικό.

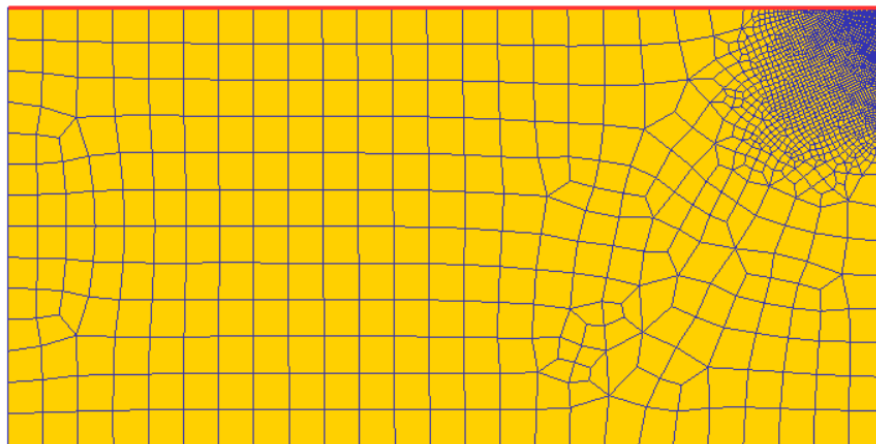


Σχήμα 5.14 : Ορισμός της πλευράς από την οποία γίνεται μετάδοση θερμότητας για το κοπτικό.

Ομοίως για το κατεργαζόμενο τεμάχιο ορίζεται η συνθήκη για την θερμοκρασία περιβάλλοντος από τη μια πλευρά και από την άλλη ορίζεται η πλευρά από την οποία θα γίνεται η μετάδοση θερμότητας στην οποία οι θερμοκρασίες θα μεταβάλλονται ανάλογα με τους υπολογισμούς κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Οι δύο αυτές συνθήκες φαίνονται στα **σχήματα 5.15** και **5.16**.

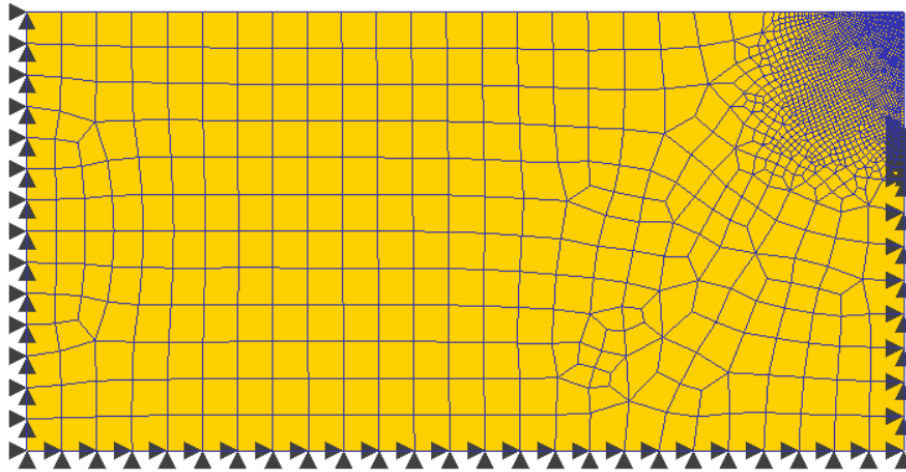


Σχήμα 5.15 : Ορισμός της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το κατεργαζόμενο τεμάχιο.



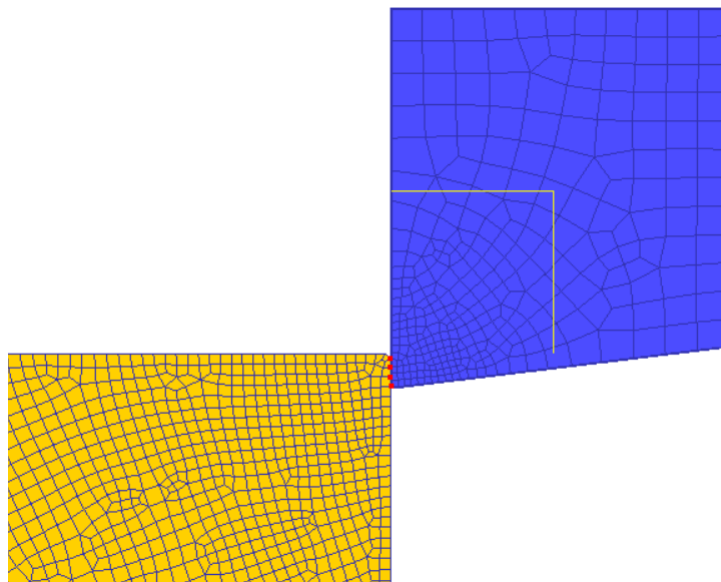
Σχήμα 5.16 : Ορισμός της πλευράς από την οποία γίνεται μετάδοση θερμότητας για το κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Επιπλέον, πρέπει να οριστεί ποια από τις δύο γεωμετρίες κοπτικό εργαλείο ή κατεργαζόμενο τεμάχιο θα είναι σταθερή και ποια θα κινείται. Στη προσομοίωση κοπής θερμοπλαστικών επιλέχθηκε να είναι σταθερή η γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου και η κίνηση να γίνεται από το κοπτικό εργαλείο. Παρακάτω στο σχήμα 5.17 φαίνονται οι οριακές συνθήκες όπου η ταχύτητα του τεμαχίου στους άξονες x και y ορίζονται ίσες με το μηδέν.



Σχήμα 5.17 : Οριακές συνθήκες ταχύτητας στους άξονες x και y ($v_x=0$, $v_y=0$).

Επίσης αυτομάτως ορίζονται και οι συνθήκες επαφής κοπτικού και κατεργαζόμενου τεμαχίου όπως φαίνονται στο **σχήμα 5.18**.



Σχήμα 5.18 : Σημεία επαφής κοπτικού εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου.

5.2 Αποτελέσματα της προσομοίωσης κοπής θερμοπλαστικών

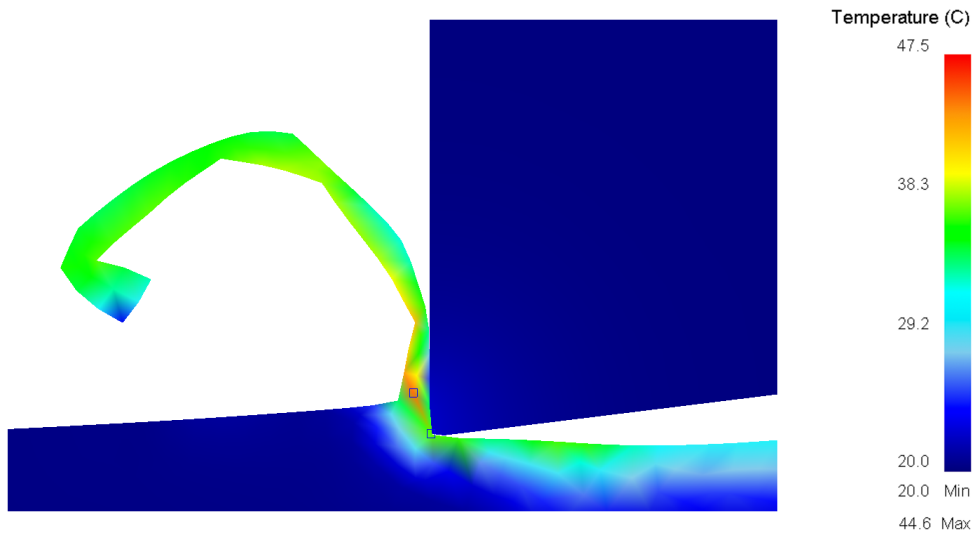
Μετά την είσοδο όλων των παραπάνω δεδομένων γίνεται η δημιουργία της βάσης δεδομένων (generate database) και πλέον έχουν ολοκληρωθεί όλα τα βήματα του προεπεξεργαστή. Έτσι ξεκινάει το υπολογιστικό κομμάτι της προσομοίωσης τον επιλυτή (solver) του λογισμικού. Λόγω της αναδιάταξης του πλέγματος (remeshing) ο χρόνος ολοκλήρωσης της προσομοίωσης απαιτεί αρκετές ώρες. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά οκτώ προσομοιώσεις, στις δύο πρώτες προσομοιώσεις έγινε διερεύνηση της επιρροής της ειδικής θερμοχωρητικότητας κατά την κοπή. Οι υπόλοιπες έξι προσομοιώσεις αντιστοιχούν στις ταχύτητες που έγινε η τόνρευση κατά τη διάρκεια του πειράματος (τρεις όμοιες ταχύτητες για κάθε υλικό).

5.2.1 Αποτελέσματα διερεύνησης επιρροής της θερμοχωρητικότητας κατά την κοπή

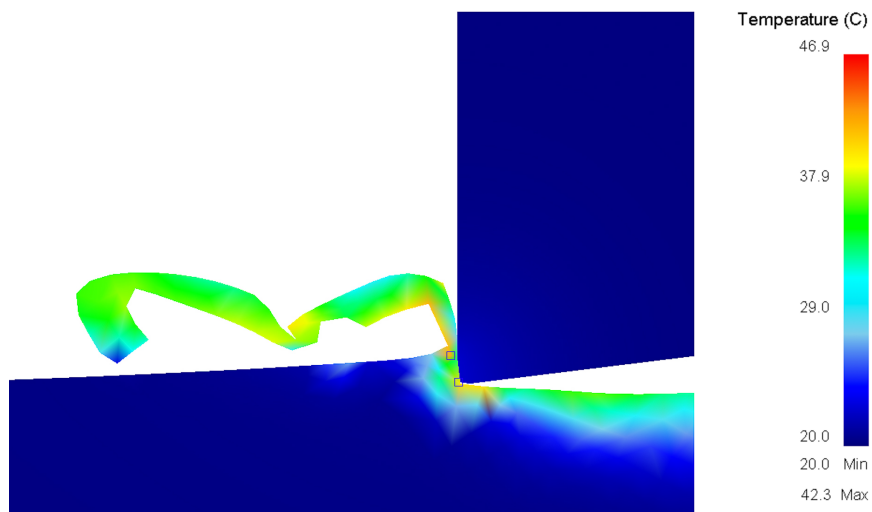
Για τον προσδιορισμό της επιρροής της ειδικής θερμοχωρητικότητας κατά την κοπή πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις που έγιναν είναι και οι δύο για το Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) σε ταχύτητα περιστροφής 112 rpm και συνθήκες κατεργασίας ίδιες με το πείραμα. Οι δύο προσομοιώσεις έγιναν ακριβώς με τον ίδιο τρόπο και τα ίδια δεδομένα αλλάζοντας μόνο την τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας. Όλα τα δεδομένα των προσομοιώσεων παρουσιάστηκαν αναλυτικά στα κεφάλαια 5.1.1 έως 5.1.4 με τη διαφορά ότι η θερμική αγωγιμότητα ορίστηκε και στις δύο προσομοιώσεις ως σταθερός αριθμός με τιμή 0.16 W/mK. Η τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας ορίστηκε 0.9 J/gK στη μια προσομοίωση και 1.0 J/gK στην άλλη. Τα αποτελέσματα των δύο αυτών προσομοιώσεων φαίνονται στα **σχήματα 5.19** και **5.20**.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.19 και 5.20 παρατηρούμε ότι με αύξηση της τιμής της θερμοχωρητικότητας από 0.9 σε 1.0 J/gK οι θερμοκρασίες κατά την κοπή μειώνονται ελάχιστα, η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας κατά την κοπή από 47.5°C και με αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας, η τιμή μειώνεται σε 46.9°C.

Η μείωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για αλλαγή της ειδικής θερμοχωρητικότητας της τάξης 0.1 J/gK στα θερμοπλαστικά υλικά, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία δεν αλλάζει. Πολύ μεγαλύτερη αλλαγή φαίνεται στη μορφή του απόβλιττου. Και στις δύο περιπτώσεις το απόβλιττο είναι συνεχές, στην πρώτη περίπτωση το απόβλιττο είναι ελικοειδές τύπου ροδέλας (μακρύ) όπως είναι και στο πείραμα, στη δεύτερη όμως το απόβλιττο αλλάζει μορφή (ταινιοειδές μακρύ) [16].



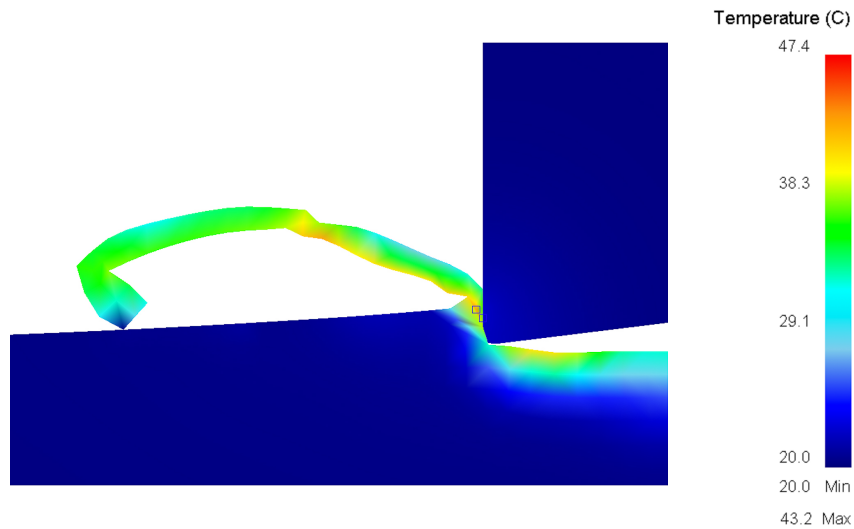
Σχήμα 5.19 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PVC σε 112 rpm για ειδική θερμοχωρητικότητα 0.9 J/gK.



Σχήμα 5.20 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PVC σε 112 rpm για ειδική θερμοχωρητικότητα 1.0 J/gK.

5.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης κοπής του PVC

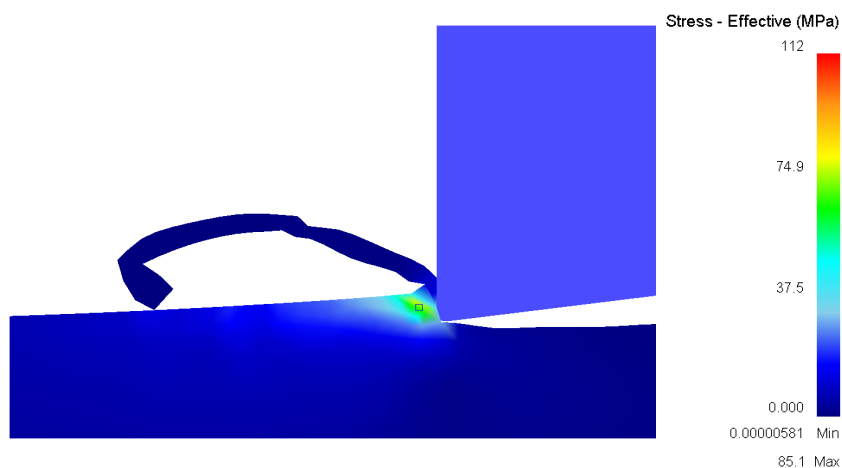
Κατά την προσομοίωση του PVC σε 112 rpm έγινε η επιλογή της χρήσης των δύο συναρτήσεων που φαίνονται στα σχήματα 5.9 και 5.10 οι οποίες εκφράζουν την θερμική αγωγιμότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και τάσεων της προσομοίωσης κοπής του PVC φαίνονται στο **σχήμα 5.21**.



Σχήμα 5.21 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PVC σε 112 rpm.

Οι θερμοκρασίες αποβλίττου κατά την κοπή του PVC σε ταχύτητα περιστροφής 112 rpm είναι γύρω στους 40-43°C (κίτρινη και πορτοκαλί περιοχή). Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε ήταν 47,4°C. Η μορφή του αποβλίττου φαίνεται να είναι ελικοειδές τύπου ροδέλας (μακρύ).

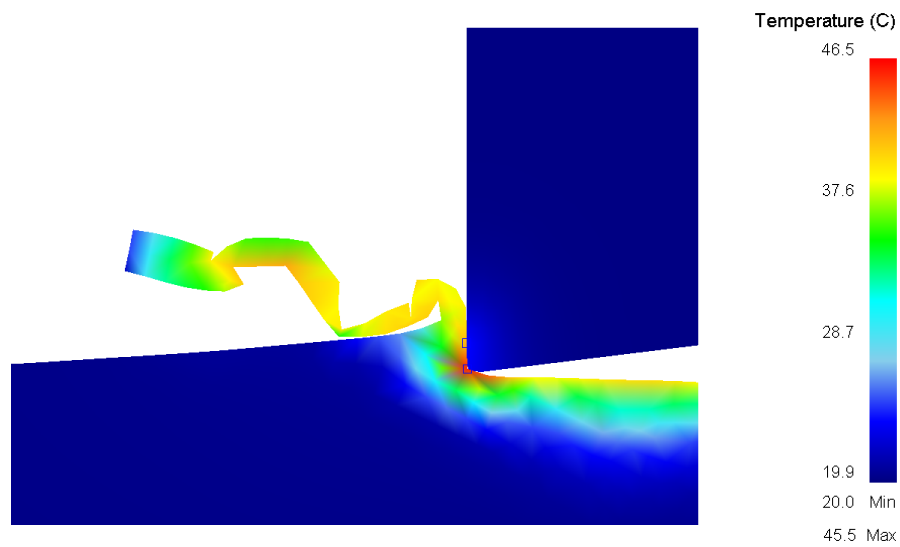
Στο **σχήμα 5.22** φαίνεται η καθαρά ζώνη διάτμησης κατά την κοπή του PVC, η τιμή της στο



Σχήμα 5.22 : Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κοπή του PVC σε 112 rpm.

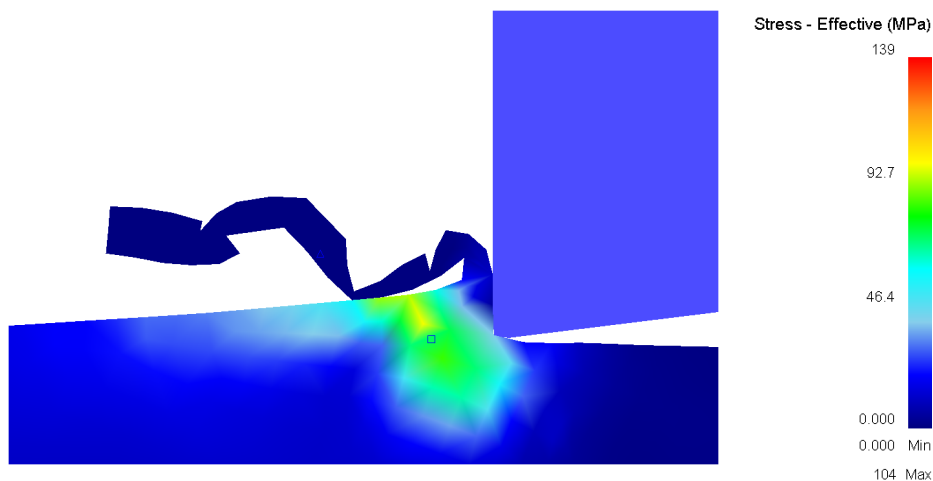
συγκεκριμένο σημείο της προσομοίωσης είναι 85 MPa ενώ η μέγιστη τιμή έφτασε τα 112 MPa. Οι τιμές αυτές είναι φυσιολογικές και ανάμεσα στα όρια διαρροής των διαγραμμάτων τάσης - βαθμού παραμόρφωσης.

Τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και τάσεων της προσομοίωσης κοπής του PVC σε ταχύτητα περιστροφής 530 rpm φαίνονται στο **σχήμα 5.23** και **5.24**.



Σχήμα 5.23 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PVC σε 530 rpm.

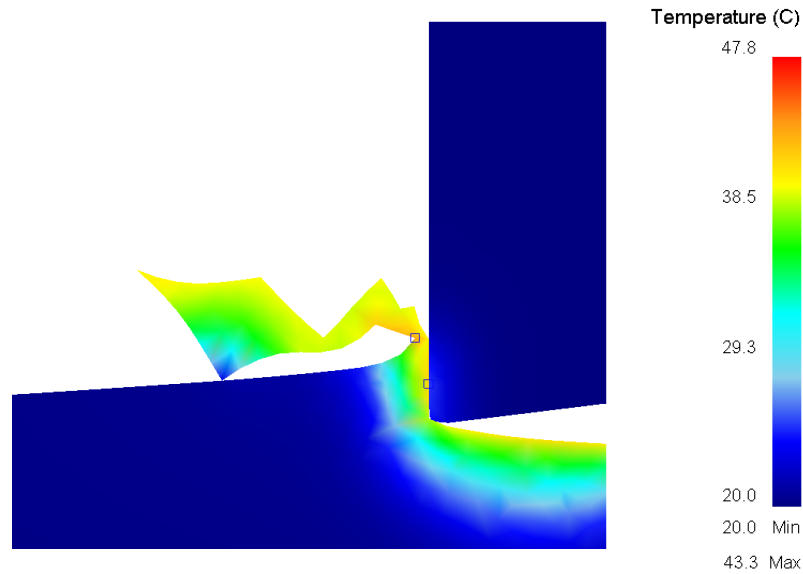
Οι θερμοκρασίες στο απόβλιττο είναι από 42-45°C, λίγο υψηλότερες από τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στις 112 rpm . Το απόβλιττο είναι συνεχές και η μορφή του είναι ταινιοειδές (μακρύ).



Σχήμα 5.24 : Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κοπή του PVC σε 530rpm.

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μεγαλύτερες από ότι στην κατεργασία των 112 rpm, με μέγιστη τιμή τα 139MPa. Η ζώνη διάτμησης στο συγκεκριμένο σημείο δεν φαίνεται ξεκάθαρα, καθώς μια πιο μεγάλη περιοχή δέχεται μεγάλη τάση, λόγω της δυσκολίας που αντιμετωπίζει το κοπτικό εργαλείο στη δημιουργία αποβλίττου.

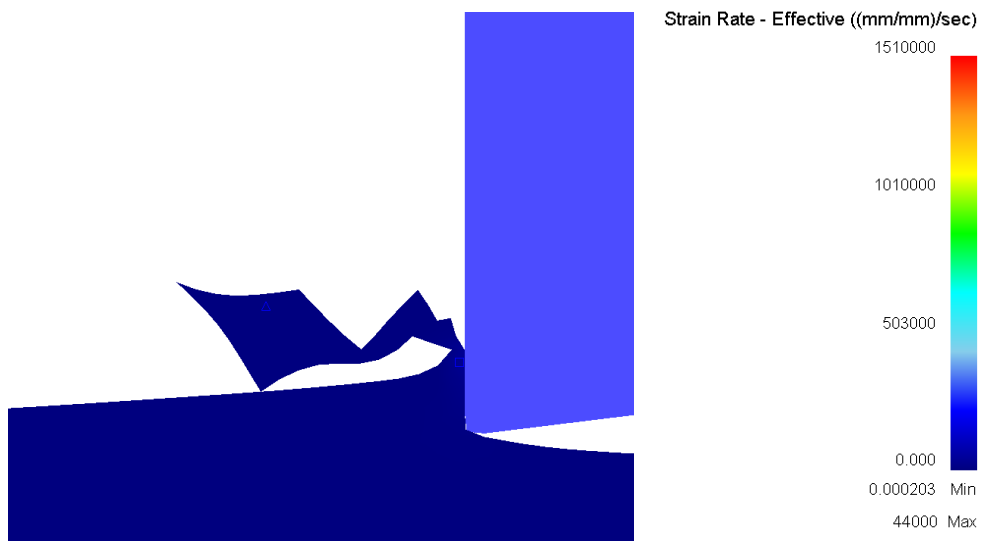
Τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών της προσομοίωσης κοπής του PVC σε ταχύτητα περιστροφής 800 rpm για το PVC φαίνονται στο **σχήμα 5.25**.



Σχήμα 5.25 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PVC σε 800 rpm.

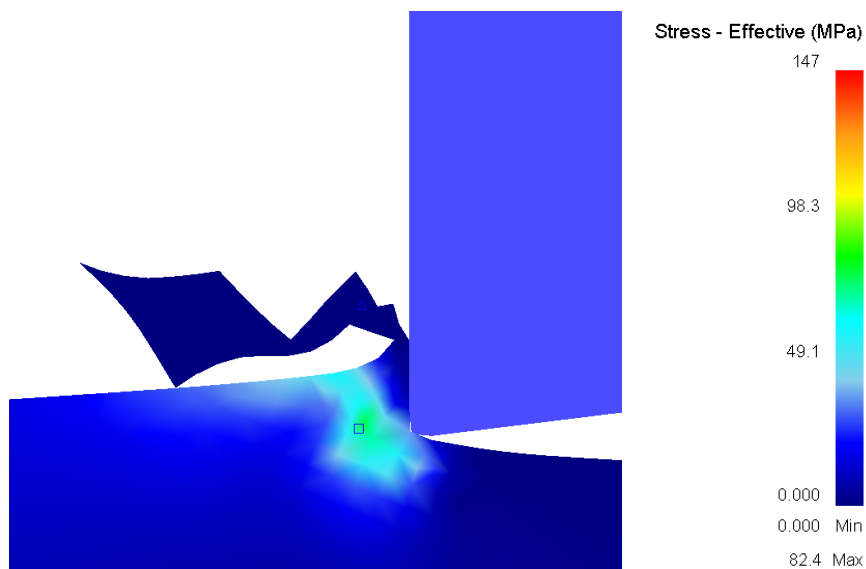
Στη προσομοίωση κοπής του PVC στις 800 rpm οι θερμοκρασίες του αποβλίττου κυμαίνονται από 41 έως 44°C όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Το απόβλιττο κατά την προσομοίωση κοπής του PVC στις 800 rpm είναι συνεχές αλλά η μορφή του δεν γίνεται ξεκάθαρη καθώς η προσομοίωση δεν μπορεί να συνεχίσει. Σύμφωνα με το πείραμα κατά την κοπή του PVC σε ταχύτητα 800 rpm η μορφή του αποβλίττου ήταν ταινιοειδές (μακρύ). Ο λόγος που δεν μπορεί να συνεχίσει η συγκεκριμένη προσομοίωση είναι λόγω της απώλειας διαγραμμιάτων τάσης - βαθμού παραμόρφωσης σε πολύ υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης (strain rates). Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η ταχύτητες παραμόρφωσης είναι πάρα πολύ υψηλές και το λογισμικό δεν μπορεί να κάνει με επιτυχία προεκβολή των διαθέσιμων διαγραμμιάτων.

Στο **σχήμα 5.26** φαίνονται οι πολύ υψηλές τιμές των ταχυτήτων παραμόρφωσης που αναπτύχθηκαν κατά την προσομοίωση κοπής του PVC.



Σχήμα 5.26 : Αναπτυσσόμενες ταχύτητες παραμόρφωσης κατά την κοπή του PVC σε 800 rpm.

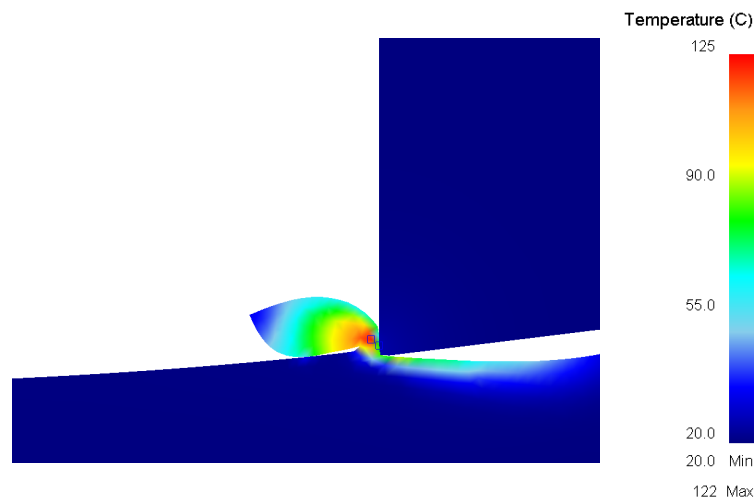
Οι αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κοπή του PVC σε ταχύτητα περιστροφής 800 rpm φαίνονται στο **σχήμα 5.27**. Στο σχήμα φαίνεται ξεκάθαρα η ζώνη διάτμησης. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση είναι 147MPa υψηλότερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις στις προσομοιώσεις κοπής σε 112 και 530 rpm. Όμως δεν μπορούμε να είμαστε ακριβής για την ορθότητα του αποτελέσματος λόγω του υψηλού βαθμού παραμόρφωσης που αναπτύσσεται κατά την προσομοίωση της κοπής.



Σχήμα 5.27 : Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κοπή του PVC σε 800 rpm.

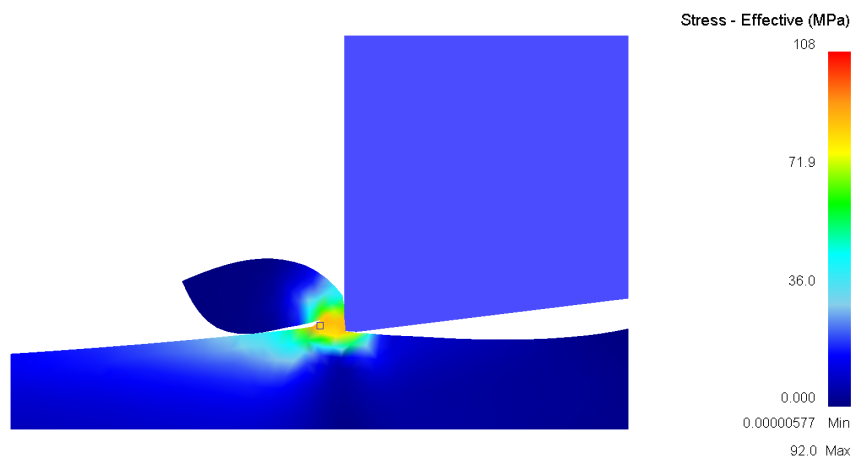
5.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης κοπής του PC

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κοπής του Πολυκαρβονικού (PC) σε ταχύτητα περιστροφής 112 rpm φαίνονται στο **σχήμα 5.28**. Κατά την κίνηση του κοπτικού εργαλείου έναντι του κατεργαζόμενου τεμαχίου, το κατεργαζόμενο τεμάχιο παραμορφώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίττου h_{cu} να μειώνεται. Η μείωση αυτή οδηγεί σε δυσκολία της κίνησης του κοπτικού εργαλείου έναντι του τεμαχίου καθώς το κοπτικό κόβει ολοένα και μικρότερο πάχος τεμαχίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες όπως φαίνεται και από το σχήμα. Η μορφή του αποβλίττου είναι ασυνεχές, σπειροειδές θρυμματισμένο, καθώς εάν η προσομοίωση συνεχίσει το απόβλιττο θα αποκολληθεί. Τα παραπάνω αποτελέσματα, τόσο στη μορφή του αποβλίττου, όσο και στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, δεν είναι σύμφωνα με τα πειραματικά και συνεπώς η συγκεκριμένη προσομοίωση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί αξιόπιστη. Όσον αφορά τις θερμικές ιδιότητες, η λάθος μορφή του αποβλίττου μπορεί να ευθύνεται εν μέρη και στην θερμοχωρητικότητα που για το PC ορίστηκε ως σταθερή.



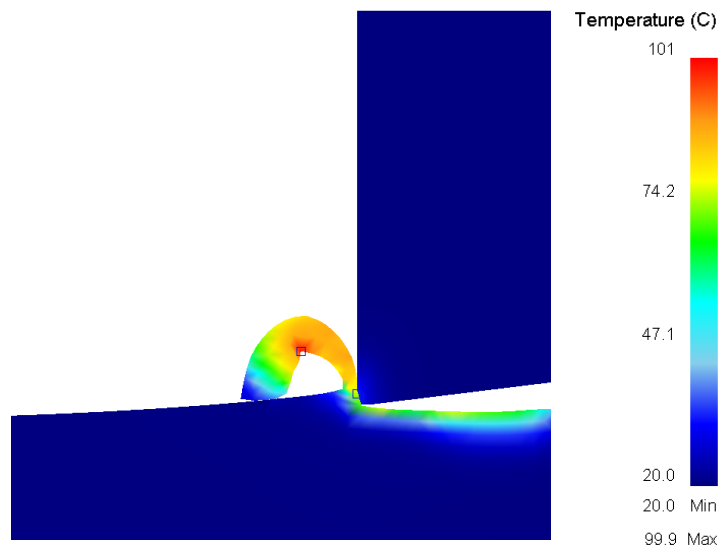
Σχήμα 5.28 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PC σε 112 rpm.

Στο **σχήμα 5.29** φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις του θερμοπλαστικού PC κατά την κοπή. Όπως γίνεται αντιληπτό η ζώνη διάτμησης εμφανίζει μέγιστη τιμή ίση με 108 MPa, η οποία θεωρείται φυσιολογική και εντός των ορίων διαρροής του υλικού, όπως αυτά έχουν παρουσιαστεί στα διαγράμματα του κεφαλαίου 5.1.3.



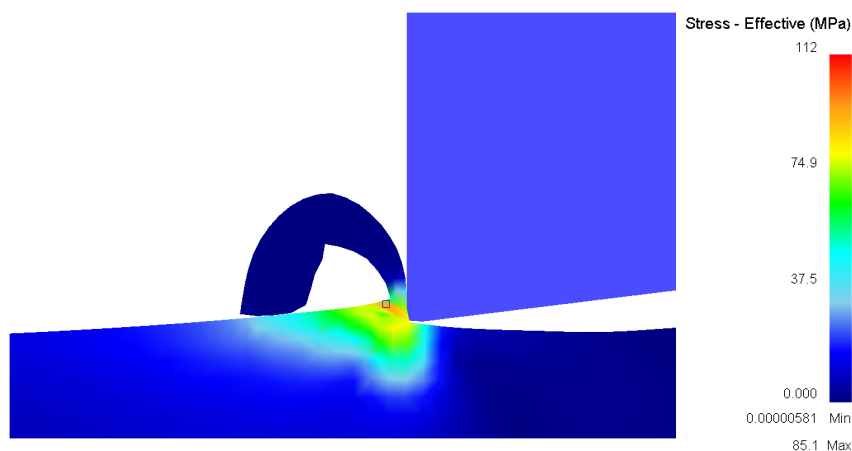
Σχήμα 5.29 : Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κοπή του PC σε 112 rpm.

Τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και τάσεων κατά την προσομοίωση κοπής του PC σε ταχύτητα περιστροφής 530 rpm φαίνονται στα **σχήματα 5.30** και **5.31**.



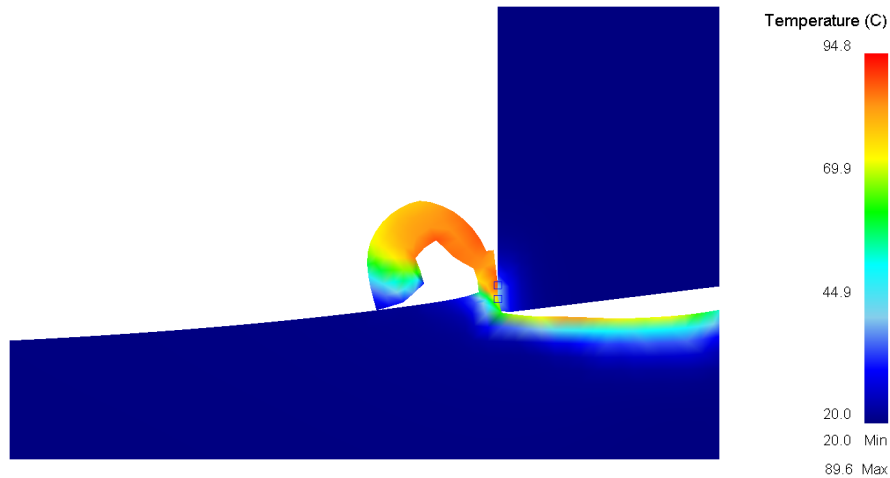
Σχήμα 5.30 : Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PC σε 530 rpm.

Οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο απόβλιττο είναι κοντά στους 95°C ενώ η μορφή του αποβλίττου είναι ελικοειδές τύπου ροδέλας (κοντό) ίδια ακριβώς με του πειράματος. Από τη μορφή του αποβλίττου μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η μέγιστη θερμοκρασία είναι 101°C, όμως αυτή δεν αναπτύσσεται στην επιφάνεια αποβλίττου αλλά στο σημείο όπου διπλώνει το απόβλιττο για να δημιουργηθεί η ελικοειδής μορφή. Η συγκεκριμένη θερμοκρασία δεν μπορεί να ληφθεί ως μέγιστη δυνατή καθώς η πειραματική θερμοκρασία μέτρησης προέρχεται από την επιφάνεια αποβλίττου και όχι από το απόβλιττο. Στο σχήμα 5.31 απεικονίζεται η ζώνη διάτμησης. Η μέγιστη τιμή της τάσης είναι 112 MPa και είναι ανάμεσα στα όρια διαρροής των διαγραμμάτων του κεφαλαίου 5.1.3.



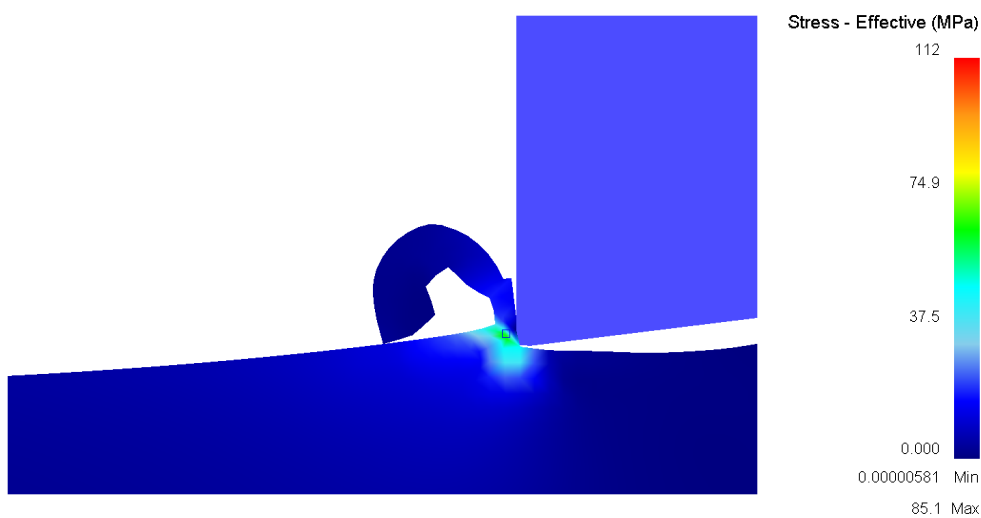
Σχήμα 5.31: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κοπή του PC σε 530 rpm.

Τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών κατά την προσομοίωση κοπής του PC σε ταχύτητα περιστροφής 800 rpm φαίνονται στο **σχήμα 5.32**.



Σχήμα 5.32: Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή του PC σε 530 rpm.

Η θερμοκρασία του αποβλίττου κυμαίνεται από 85-90°C και είναι μικρότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία του αποβλίττου σε ταχύτητα περιστροφής 530 rpm. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας είναι 95°C. Το απόβλιττο έχει μορφή ελικοειδές τύπου ροδέλας (κοντό). Στο **σχήμα 5.33** φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κατεργασία κοπής του PC σε ταχύτητα περιστροφής 800 rpm. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ζώνη διάτμησης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη της ταχύτητας περιστροφής των 530 rpm. Αυτό το αποτέλεσμα είναι απολύτως φυσιολογικό καθώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κοπής, τόσο μικρότερη είναι η περιοχή που καταπονείται. Η μέγιστη τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων είναι ακριβώς η ίδια με αυτή των 530 rpm και ίση με 112 MPa.



Σχήμα 5.33: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την κοπή του PC σε 800 rpm.

5.3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αναλυτικής προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα του πειράματος και της αναλυτικής προσομοίωσης κοπής των θερμοπλαστικών υλικών συνοψίζονται στους πίνακες 5.3 και 5.4 για το PVC και το PC αντίστοιχα.

PVC	Πείραμα	Προσομοίωση
112 rpm	40-42°C	40-43°C
530 rpm	50-55°C	40-45°C
800 rpm	40-45°C	41-44°C

Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα θερμοκρασιών κατεργασίας κοπής του PVC.

Για το PVC στις προσομοιώσεις των 112 και 800 rpm, τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης είναι σχεδόν ίδια. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε ταχύτητα περιστροφής 530 rpm απέχουν από τα πειραματικά από 5 έως 15°C, απόκλιση η οποία δεν θεωρείται μεγάλη. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως οι θερμικές ιδιότητες που εισήχθησαν στο λογισμικό FEM ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

PC	Πείραμα	Προσομοίωση
112 rpm	42-48°C	90-120°C
530 rpm	98-105°C	95-100°C
800 rpm	85-90°C	85-92°C

Πίνακας 5.4 : Αποτελέσματα θερμοκρασιών κατεργασίας κοπής του PC.

Τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα της προσομοίωσης κοπής του PC σε ταχύτητα περιστροφής 112 rpm δεν είναι αξιόπιστα και δεν λαμβάνονται στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τις θερμικές ιδιότητες του Πολυκαρβονικού (PC). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κοπής του PC σε ταχύτητα περιστροφής 530 και 800 rpm είναι σχεδόν ίδια με τα πειραματικά, και συνεπώς η προσομοίωση κοπής σε αυτές τις ταχύτητες ήταν επιτυχής. Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι θερμικές ιδιότητες που εισήχθησαν στο λογισμικό της προσομοίωσης ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Στους πίνακες 5.5 και 5.6 φαίνονται συγκεντρωμένες οι μορφές αποβλίττων του PVC και του PC αντίστοιχως.

PVC	Πείραμα	Προσομοίωση
112 rpm	ελικοειδής τύπου ροδέλας (μακρύ)	ελικοειδής τύπου ροδέλας (μακρύ)
530 rpm	ταινιοειδής (μακρύ)	ταινιοειδής (μακρύ)
800 rpm	ταινιοειδής (μακρύ)	ταινιοειδής (μακρύ)

Πίνακας 5.5 : Μορφή αποβλίττου κατά την κατεργασία κοπής του PVC.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις κοπής του PVC στις 112 και 530 rpm τα απόβλιττα είχαν την ίδια μορφή με τα απόβλιττα που φάνηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Κατά την προσομοίωση κοπής του PVC στις 800 rpm το απόβλιττο που προκύπτει δεν είναι ξεκάθαρο, καθώς η προσομοίωση λόγω απώλειας συγκεκριμένων διαγραμμμάτων τάσης - βαθμού παραμόρφωσης σταματάει. Η εισαγωγή περισσότερων καμπύλων τάσης - βαθμού παραμόρφωσης στο λογισμικό πακέτο μπορεί να γίνει με τη χρήση της πειραματικής διάταξης Split-Hopkinson-Bar. Από την άλλη πλευρά, οι θερμοκρασίες είναι ίδιες με τις πειραματικές και το απόβλιττο είναι συνεχές. Τα παραπάνω μας οδηγούν στην υπόθεση πως το απόβλιττο πιθανόν να έχει την ταινιοειδή μορφή όπως και στο πείραμα, αν και εφόσον εισαχθούν καμπύλες τάσης - βαθμού παραμόρφωσης του υλικού για υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης.

PC	Πείραμα	Προσομοίωση
112 rpm	ελικοειδής τύπου ροδέλας (περιπλεγμένο)	σπειροειδές θρυμματισμένο
530 rpm	ελικοειδής τύπου ροδέλας (κοντό)	ελικοειδής τύπου ροδέλας (κοντό)
800 rpm	ελικοειδής τύπου ροδέλας (κοντό)	ελικοειδής τύπου ροδέλας (κοντό)

Πίνακας 5.6 : Μορφή αποβλίττου κατά την κατεργασία κοπής του PC.

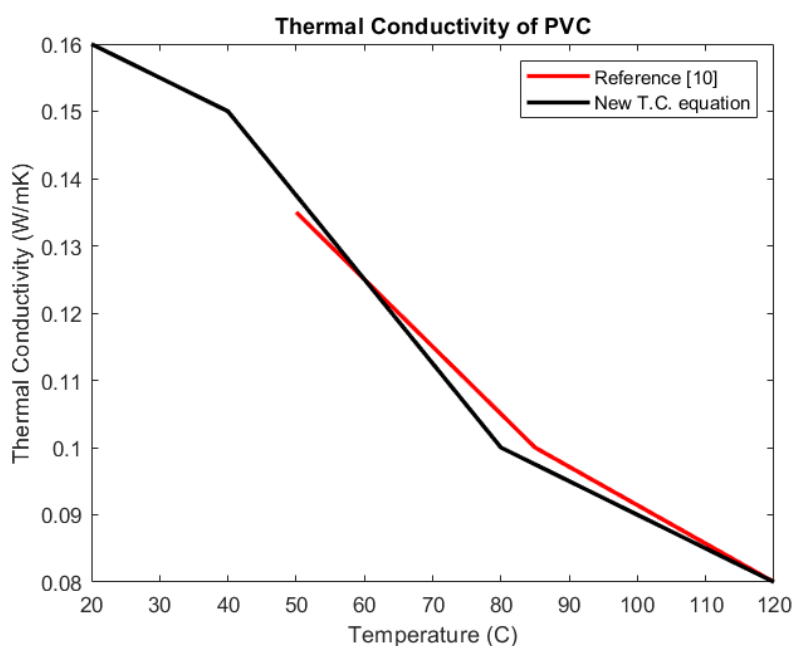
Αντίστοιχα, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον πίνακα 5.6, για το θερμοπλαστικό υλικό PC, στις προσομοιώσεις των 530 και 800 rpm, το απόβλιττο έχει την ίδια μορφή με αυτή του πειράματος. Η προσομοίωση των 112 rpm δεν θεωρείται αξιόπιστη (για τους λόγους που ήδη αναφέρθηκαν παραπάνω) και το δημιουργούμενο απόβλιττο είναι διαφορετικό.

Από την σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει πως η εισαγωγή των θερμικών ιδιοτήτων με τη μορφή καμπύλων συναρτήσεως της θερμοκρασίας, στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, οδήγησε σε θερμοκρασιακά αποτελέσματα με πολύ μικρές ή και μηδενικές αποκλίσεις σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Όπως επίσης και σε ίδιες μορφές αποβλίττων. Η δημιουργία

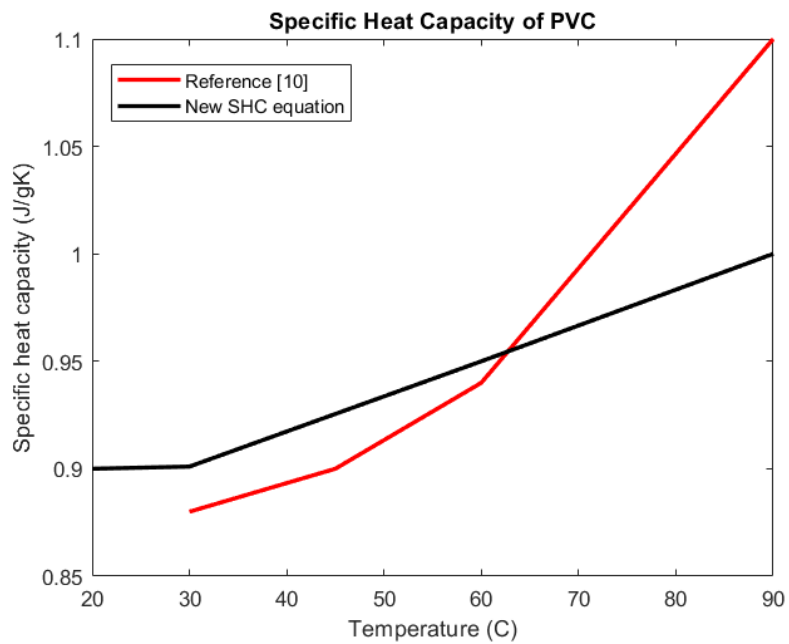
συναρτήσεων οι οποίες να εκφράζουν τη σχέση της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία χαρακτηρίζουν τις δύο θερμικές αυτές ιδιότητες πιο ολοκληρωμένα και πιο επιστημονικώς ορθά. Οι συναρτήσεις των καμπύλων που δημιουργήθηκαν για το σωστότερο προσδιορισμό των δύο θερμικών ιδιοτήτων που μελετάμε συνοψίζονται και στον **πίνακα 5.7**. Στα **σχήματα 5.34, 5.35** και **5.36** φαίνεται η σύγκριση των συναρτήσεων των θερμικών ιδιοτήτων της βιβλιογραφίας και των συναρτήσεων που δημιουργήθηκαν για το σωστότερο προσδιορισμό των θερμικών ιδιοτήτων.

		PVC	PC
Βιβλιογραφία	θερμική αγωγιμότητα	$TC = - 0.0009T + 0.1729$, από 50 έως 120°C	0.21 έως 0.25
	ειδική θερμοχωρητικότητα	$SPH = 5 \cdot 10^{-5}T^2 - 0.0029T + 0.9182$, από 30 έως 90°C	SHC = 1.2 J/gK
Νέα συνάρτηση προσομοίωσης	θερμική αγωγιμότητα	$TC = 5 \cdot 10^{-6} T^2 - 0.0015T + 0.1902$, από 20 έως 120°C	$TC = 0.0004T + 0.2005$, από 20 έως 120°C
	ειδική θερμοχωρητικότητα	$SHC = 7 \cdot 10^{-6} T^2 + 0.0007T + 0.8798$, από 20 έως 90°C	SHC = 1.2 J/gK

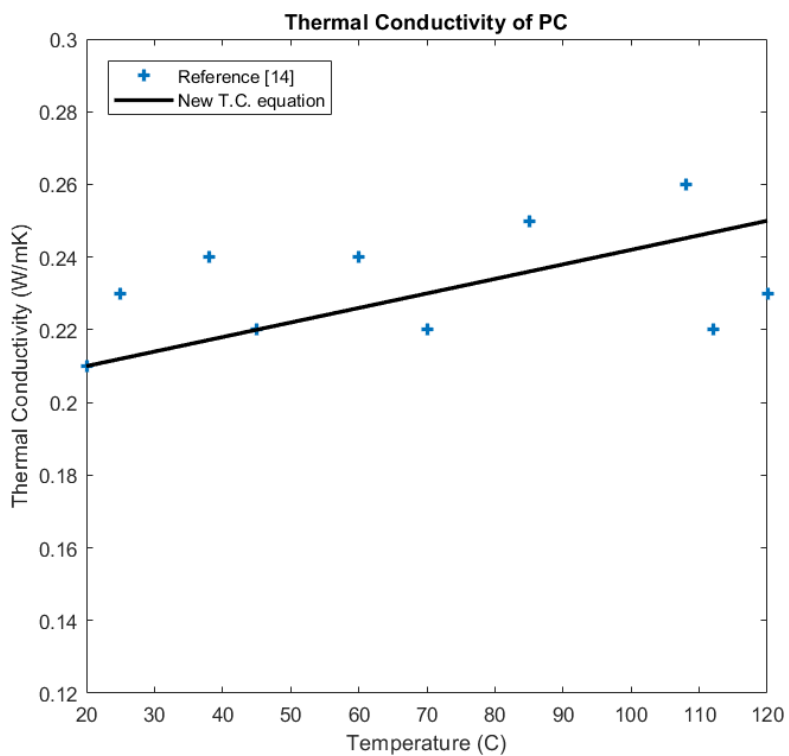
Πίνακας 5.7 : Συναρτήσεις των θερμικών ιδιοτήτων των θερμοπλαστικών υλικών με τη θερμοκρασία



Σχήμα 5.34 : Συναρτήσεις Θερμικής αγωγιμότητας - Θερμοκρασίας για το PVC.



Σχήμα 5.35 : Συναρτήσεις ειδικής Θερμοχωρητικότητας - Θερμοκρασίας για το PVC.



Σχήμα 5.36 : Συναρτήσεις Θερμικής αγωγιμότητας - Θερμοκρασίας για το PC.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι τα εξής:

- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ πειράματος και αναλυτικής προσομοίωσης είναι μια σύγχρονη μέθοδος, η οποία βασίζεται πάνω στην αξιοπιστία του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και η οποία μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να δώσει πιο γρήγορα αποτελέσματα συγκριτικά με άλλες μεθόδους προσδιορισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών.

Πιο συγκεκριμένα για το Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) :

- Κατά την κατεργασία κοπής, το PVC ανέπτυξε θερμοκρασίες από 40 έως 61°C, οι οποίες δεν είναι αρκετά υψηλές και είναι χαμηλότερες από το σημείο τήξης του PVC.
- Οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες αποβλίττου της αναλυτικής προσομοίωσης είναι πολύ κοντά και σε μερικές περιπτώσεις ίδιες με τις πειραματικές, γεγονός που επαληθεύει ότι οι θερμικές ιδιότητες που εισήχθησαν στο λογισμικό είναι πολύ κοντά στις πραγματικές.
- Η θερμική αγωγιμότητα του PVC ίσως θα έπρεπε να αυξηθεί σε ένα μικρό βαθμό, ώστε τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα των αναλυτικών προσομοιώσεων να είναι 2-3°C υψηλότερα και έτσι να μειωθεί η απόκλιση που υπάρχει μεταξύ αναλυτικής προσομοίωσης και πειράματος με ταχύτητα περιστροφής 530 rpm.
- Η μορφή των αποβλίττων είναι ίδια μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης της κατεργασίας κοπής, γεγονός που επαληθεύει ότι οι προσομοιώσεις έγιναν σωστά και ήταν επιτυχημένες.
- Τα όμοια αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης έδειξαν ότι οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στις εξισώσεις της θερμικής αγωγιμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας, έδωσαν δύο νέες συναρτήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των παραπάνω ιδιοτήτων.
- Τα ταυτόσημα θερμοκρασιακά αποτελέσματα προσομοίωσης-πειράματος κατεργασίας κοπής με ταχύτητα περιστροφής 800 rpm μας οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι πιθανότητα με την εισαγωγή των επιπλέον καταλλήλων διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης, για πολύ υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης, η μορφή του αποβλίττου, η οποία δεν είναι ξεκάθαρη, θα είναι ίδια με του πειράματος.

Για το Πολυκαρβονικό (PC) :

- Κατά την κατεργασία κοπής το PC ανέπτυξε θερμοκρασίες από 48 έως 120°C, οι οποίες, αν και υψηλότερες από ότι αυτές που αναπτύχθηκαν κατά την κατεργασία κοπής του PVC, είναι χαμηλότερες από την θερμοκρασία τήξης του PC.

- Οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες αποβλίττου της αναλυτικής προσομοίωσης κοπής σε ταχύτητα περιστροφής 530 rpm και 800 rpm είναι ουσιαστικά ίδιες με τις πειραματικές, γεγονός που επαληθεύει ότι οι θερμικές ιδιότητες που εισήχθησαν στο λογισμικό είναι πολύ κοντά στις πραγματικές.
- Τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα και η μορφή του αποβλίττου κατά την προσομοίωση κατεργασίας κοπής με ταχύτητα περιστροφής 112 rpm είναι τελείως διαφορετικά από τα πειραματικά και δεν λαμβάνονται υπόψιν.
- Η μορφή των αποβλίττων είναι ίδια μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αναλυτικής προσομοίωσης της κατεργασίας κοπής για ταχύτητα περιστροφής 530 και 800 rpm, γεγονός που επαληθεύει ότι οι προσομοιώσεις έγιναν σωστά και ήταν επιτυχημένες.
- Τα όμοια αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης έδειξαν ότι οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στην θερμική αγωγιμότητα, έδωσαν μια νέα συνάρτηση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της.
- Το Πολυκαρβονικό χάνει την ιδιότητα της διαφάνειας κατά την τόννευση.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα Διπλωματική Εργασία προτείνετε:

- Διερεύνηση των θερμικών ιδιοτήτων των θερμοπλαστικών υλικών σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, σε μεγαλύτερο βάθος κοπής και σε υψηλότερη πρόωση κοπής.
- Διερεύνηση των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών μέσω χρήσης ειδικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων τρισδιάστατης προσομοίωσης. Η χρήση λογισμικού που επιτρέπει την τρισδιάστατη προσομοίωση θα δείξει πολύ πιο καθαρά την μορφή των αποβλίττων.
- Σε περίπτωση ύπαρξης ειδικού εξοπλισμού με δυνατότητα προσδιορισμού των θερμικών ιδιοτήτων, να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων.
- Σε περίπτωση που υπάρξει η δυνατότητα κατασκευής της πειραματικής διάταξης SPlit-Hopkison-Bar, να προσδιοριστούν τα διαγράμματα τάσης - βαθμού παραμόρφωσης για υψηλές και πολύ υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης. Η εισαγωγή αυτών των διαγραμμάτων και η εκ νέου αναλυτική προσομοίωση των προβληματικών περιπτώσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα και στη δημιουργία ενός πιο ολοκληρωμένου προφίλ των υλικών.

Βιβλιογραφία

- [1]. George Wypych “Handbook of Polymers 2nd Edition”, pp. 316-322, 618-624
- [2]. Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης “Μηχανουργική Τεχνολογία, Κατεργασίες με Αφαίρεση Υλικού ”
- [3]. Κων/νος Διονύσιος Ε. Μπουζάκης “Μηχανική και Τεχνολογία Μηχανουργικών Μορφοποιήσεων με Αφαίρεση Υλικού ”
- [4]. Angelos P. Markopoulos, J. Paulo Davim “Advanced Machining Processes, Innovative Modeling Techniques”, pp. 28-31.
- [5]. Jamal Y. Sheikh-Ahmad “ Machining of Polymer composites” , pp. 65-72.
- [6]. Michel Biron “ Material Selection for Thermoplastic Parts, Practical and Advanced Information”, pp. 83
- [7]. William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch “Material Science and Engineering, an Introduction”, pp. 550-551, 571-573, 782-795.
- [8]. James E. Mark “Physical Properties of Polymers Handbook Second Edition”, pp 145-163.
- [9]. Michael J. Kendall, Clive R. Siviour "Rate dependence of poly(vinyl chloride), the effects of plasticizer and time– temperature superposition”
- [10]. Mediha KOK , Kadir DEMİRELLI, Yildirim AYDOGDU “Thermophysical Properties Of Blend Of Poly (Vinyl Chloride) With Poly (Isobornyl Acrylate)”
- [11]. Uzair Ahmed Dar, Weihong Zhang, Yingjie Xu, Jun Wang “Thermal and strain rate sensitive compressive behavior of polycarbonate polymer - experimental and constitutive analysis”
- [12]. M. J. Kendall, C. R. Siviour “Experimentally simulating high-rate behaviour: rate and temperature effects in polycarbonate and PMMA”
- [13]. A.D. Mulliken, M.C. Boyce “Mechanics of the rate-dependent elastic–plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates”

- [14]. X. Zhang, W. Hendro, M. Fujii, T. Tomimura, N. Imaishi “Measurements of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Polymer Melts with the Short-Hot-Wire Method”
- [15]. N.K. Myshkina , S.S. Pesetskiia , A.Ya. Grigorieva “Polymer Tribology: Current State and Applications”
- [16]. ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools. Second edition, 1993
- [17]. SOLIDWORKS Corp., User’s manual 2014, Dassault Systemes Solidworks Corporation, MA, USA
- [18]. FSI FLIR SYSTEMS AGEMA 570 Operating Manual
- [19]. Gary G.T. (Rusty) III, “High strain-rate testing of materials: The Split Hopkison Bar”, Methods in Materials Research, John Wiley Press, 1997.
- [20]. Deform2D User’s manual 2006, Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio, USA

Παράρτημα

STEMIDUR PVC-U

Δελτίο δεδομένων προϊόντος

Ημερομηνία αναθεώρησης: 1.2.2017 - Έκδοση: 2.0



STEMPLAST HATZIAVGUSTIS
ENGINEERING PLASTICS

Υλικό:	πολυβινυλοχλωρίδιο σκληρό
DIN EN ISO 1043-1 ¹ Νόρμα:	PVC-U polyvinyl chloride unplasticised
Μορφή προϊόντος:	ημίτοιμα προϊόντα

Χαρακτηριστικά υλικού

Υψηλή επιφανειακή σκληρότητα, εξαιρετικές συγκολλητικές ιδιότητες, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, υψηλή αντίσταση σε οξέα και αλατικά διαλύματα, επιβραδυντικό φλόγας, αυτοσβεννύμενο υλικό.

Εφαρμογές

Σωληνώσεις, δεξαμενές, εξαρτήματα αντλιών, εξαρτήματα χημικών βιομηχανιών.

Γενικές ιδιότητες

Πυκνότητα ρ	1,44 gr/cm ³	DIN EN ISO 1183-1 DIN 53479/ASTM D792 sim.
Απορρόφηση υγρασίας κορεσμός σε αέρα (23°C, 50% RH) κορεσμός σε νερό (23°C)	0,20 % <1,00 %	DIN EN ISO 62 DIN 53495 sim. ASTM D570

Μηχανικές ιδιότητες

Τάση διαρροής επελκυσμού σ _γ	50 MPa	DIN EN ISO 527
Αντοχή σε επελκυσμό σ _τ		DIN 53455 sim.
Επιμήκυνση θραύσης ε _θ	>10 %	ASTM D638
Μέτρο ελαστικότητας E _t	3000 MPa	
Τάση διαρροής κάμψης σ _γ		DIN EN ISO 178
Αντοχή σε κάμψη σ _b	>80 MPa	DIN 53452 sim.
Μέτρο ελαστικότητας E _b	>2000 MPa	ASTM D790
Θλιπτική τάση σε ονομαστική βράχυνση 1/2/5% σ _γ		DIN EN ISO 604 / ASTM D695
Αντοχή σε θλίψη σ _c	>65 MPa	DIN 53454/53457 sim.
Αντοχή κρούσης Charpy χωρίς εγκοπή α _{0J}	nb	DIN EN ISO 179/1eJ (DIN 53453)
Charpy με εγκοπή α _{0J}	4 kJ/m ²	DIN EN ISO 179/1eA ASTM D6110 sim.
Izod με εγκοπή α _{0J}		DIN EN ISO 180/1A ASTM D256 sim.
Τάση για πρόκληση 1% επιμήκυνσης λόγω ερυσμού μετά από 1000 h σ _{ε,1000h}	>15 MPa	DIN EN ISO 899-1 DIN 53444/ASTM D2990 sim.
Σκληρότητα διείσδυση σφαιρας H _{138/20}	120	DIN EN ISO 2039-1 (DIN 53456)
Rockwell		DIN EN ISO 2039-2 ASTM D785
Shore κλίμακα D	80	DIN EN ISO 868 (DIN 53505) ASTM D2240 sim.
Συντελεστής τριβής ολίσθησης μ	0,60	
Ρυθμός φθοράς S (ζήτη λειτουργία σε χάλυβα, P=0,05 MPa, V=0,6 m/s, t=60°C, κοντά στην επιφάνεια τριβής)	56,00 μm/km	DIN ISO 7148-2 sim. Διάταξη Pin on disc

Εργαστήριο: Σίνδος (Βιομηχανική Περιοχή), 570 22 Θεσσαλονίκη - τηλ.: 2310 722 242 - fax: 2310 722 144

1 από 2

Πωλήσεις: Αλών 12 & Παλυδεύκους 6, 185 40 Πειραιάς - τηλ.: 210 42 222 48 - fax: 210 42 222 98

★ <http://www.stemplast.com> - e-mail: info@stemplast.gr

STEMIDUR PVC-U

Δελτίο δεδομένων προϊόντος
Ημερομηνία αναθεώρησης: 1.2.2017 - Έκδοση: 2.0



STEMPLAST HATZIAVGUSTIS
ENGINEERING PLASTICS

Ηλεκτρικές ιδιότητες

Διηλεκτρική σταθερά (σχετική επιτρεπτότητα) ϵ_r		
100 Hz		IEC 60250
1 MHz	3,2	DIN 53483 sim.
Διηλεκτρικός συντελεστής απωλειών $\tan\delta$		VDE 0303-4
100 Hz		ASTM D150
1 MHz	0,02	
Ειδική αντίσταση όγκου ρ	$>10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$	IEC 60093 / VDE 0303-30
Επιφανειακή ειδική αντίσταση σ	$>10^{13} \Omega$	DIN 53482 sim. / ASTM D257
Διηλεκτρική αντοχή E_z	$>30 \text{ kV/mm}$	IEC 60243-1 / VDE 0303-21 DIN 53481 sim. / ASTM D149
Αντίσταση στην εμφάνιση επιφανειακών αγώγιμων ιχνών V	KB 600 / CTI 450	IEC 60112 / VDE 0303-11 DIN 53480 sim. ASTM D3638 / UL 746A

Θερμικές ιδιότητες

Σημείο τήξης T_m (DSC, $10^\circ\text{C}/\text{min}$)	T_g 80°C	ISO 11357-1,-3 ASTM D3418 sim.
Θερμική αγωγιμότητα λ (23°C)	0,16 W/(m·K)	ISO 22007-2 / ISO 8302 sim. DIN 52612-2/ASTM C177 sim.
Ειδική θερμότητα (θερμοχωρητικότητα) c	0,9-1,0 J/(g·K)	ISO 11357-4 ASTM E1269/ASTM C351 sim.
Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής α (μέση τιμή $23-60^\circ\text{C}$)	$80 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$	ISO 11359-2 DIN 53752/ASTM E831 sim.
Θερμοκρασία λειτουργίας συνεχής έκθεση (min / max - 5000 h)	0 / 50°C	
σύντομη έκθεση (χωρίς φορτίο - λίγες ώρες)	70°C	
Θερμοκρασία μαλακώματος Vicat VST A50 - 10N		ISO 306 DIN 53460 sim.
VST B50 - 50N	75°C	ASTM D1525
Θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης HDT A - 1,80 MPa	61°C	DIN EN ISO 75-1,-2
HDT B - 0,45 MPa	69°C	DIN 53461 sim. ASTM D648
Ευφλεκτότητα σύμφωνα με το UL94 (πάχος 3 / 6 mm)	V-0	
δείκτης οξυγόνου	47 %	ISO 4589 -1,-2 ASTM D2863 sim.

Οι παραπάνω αναφερόμενες ηλεκτρικές ιδιότητες προσδιορίζονται από μετρήσεις σε φυσικά υλικά.

Οι υποδεικνυόμενες τιμές προκύπτουν από πολλές μεμονωμένες μετρήσεις υπολογισμού και βασίζονται στην τελευταία ενημέρωσή μας. Δίνονται ως πληροφορία για τα προϊόντα μας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια επιλογής ενός προϊόντος μας. Ωστόσο, η εταιρία μας δεν εγγυάται την αρθρότητα των παρεχόμενων πληροφοριών ή/και την καταλληλότητα ενός επιλεγμένου προϊόντος μας για συγκεκριμένους - νομικό δεσμευτικούς - σκοπούς εφαρμογής. Από τη στιγμή που οι ιδιότητες υλικού εξαρτώνται επίσης από τη διάσταση (μέγεθος) των ημείστων προϊόντων μας καθώς και από το βαθμό κρυστάλλωσης υλικού (π.χ. πυρήνωση λόγω χρωστικών ουσιών), οι πραγματικές τιμές των ιδιοτήτων ενός συγκεκριμένου προϊόντος μπορεί να διαφέρουν από τις υποδεικνυόμενες τιμές.

¹ Η νόρμα DIN 7728-1, έκδοσης Ιανουαρίου 1988, έχει αντικατασταθεί από τις προδιαγραφές της νόρμας EN ISO 1043-1, η οποία είναι πανομοιότυπη με τη νόρμα ISO 1043-1

nb : χωρίς θραύση

Εργαστσία: Σίνδος (Βιομηχανική Περιοχή), 570 22 Θεσσαλονίκη - τηλ.: 2310 722 242 - fax: 2310 722 144

2 από 2

Πωλήσεις: Αλών 12 & Πολυδείου 6, 185 40 Πειραιώς - τηλ.: 210 42 222 48 - fax: 210 42 222 98

★ <http://www.stemplast.com> - e-mail: info@stemplast.gr

STEMANAT PC

Δελτίο δεδομένων προϊόντος
Ημερομηνία αναθεώρησης: 1.2.2017 - Έκδοση: 2.0



STEMPLAST HATZIANVGOSTIS
ENGINEERING PLASTICS

Υλικό:	πολυκαρβονικό
DIN EN ISO 1043-1 ¹ Νόρμα:	PC polycarbonate
Μορφή προϊόντος:	ημιέτοιμα προϊόντα

Χαρακτηριστικά υλικού

Πολύ υψηλή αντοχή σε κρούση ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες, πολύ καλή διαστατική σταθερότητα, πολύ καλή αντίσταση σε ερπυσμό, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, υψηλή επιφανειακή σκληρότητα.

Εφαρμογές

Εξαρτήματα ακριβείας, πηνία, βαλβίδες, πτερωτές, οδοντωτοί τροχοί, εξαρτήματα αυτοκινήτου, ηλεκτρονική.

Γενικές ιδιότητες

Πυκνότητα ρ	1,20 gr/cm ³	DIN EN ISO 1183-1 DIN 53479/ASTM D792 sim.
Απορρόφηση υγρασίας κορεσμός σε αέρα (23 °C, 50% RH)	0,20 %	DIN EN ISO 62 DIN 53495 sim.
κορεσμός σε νερό (23 °C)	0,40 %	ASTM D570

Μηχανικές ιδιότητες

Τάση διαρροής εφελκυσμού σ_y	65 MPa	DIN EN ISO 527
Αντοχή σε εφελκυσμό σ_T		DIN 53455 sim.
Επιμήκυνση θραύσης ϵ_B	80 %	ASTM D638
Μέτρο ελαστικότητας E_t	2300 MPa	
Τάση διαρροής κάμψης σ_y		DIN EN ISO 178
Αντοχή σε κάμψη σ_b	91 MPa	DIN 53452 sim.
Μέτρο ελαστικότητας E_b	2300 MPa	ASTM D790
Θλιπτική τάση σε ονομαστική βράχυνση 1/2/5% σ_y	18/35/72 MPa	DIN EN ISO 604 / ASTM D695
Αντοχή σε θλίψη σ_c	79 MPa	DIN 53454/53457 sim.
Αντοχή κρούσης Charpy χωρίς εγκοπή a_{CH}	nb	DIN EN ISO 179/1eU (DIN 53453)
Charpy με εγκοπή a_{CH}	20 kJ/m ²	DIN EN ISO 179/1eA ASTM D6110 sim.
Izod με εγκοπή a_{Iz}	21 kJ/m ²	DIN EN ISO 180/1A ASTM D256 sim.
Τάση για πρόκληση 1% επιμήκυνσης λόγω ερπυσμού μετά από 1000 h $\sigma_{1/1000}$	17 MPa	DIN EN ISO 899-1 DIN 53444/ASTM D2990 sim.
Σκληρότητα δείαδωση σφαίρας $H_{358/30}$	130	DIN EN ISO 2039-1 (DIN 53456)
Rockwell	M75	DIN EN ISO 2039-2 ASTM D785
Shore κλίμακα D	80	DIN EN ISO 868 (DIN 53505) ASTM D2240 sim.
Συντελεστής τριβής ολίσθησης μ	0,55	
Ρυθμός φθοράς S (ξηρή λειτουργία σε χάλυβα, $P=0,05$ MPa, $V=0,6$ m/s, $t=60$ °C, κοντά στην επιφάνεια τριβής)	22,00 μ m/km	DIN ISO 7148-2 sim. Διάταξη Pin on disc

STEMANAT PC

Δελτίο δεδομένων προϊόντος

Ημερομηνία αναθεώρησης: 1.2.2017 - Έκδοση: 2.0



STEMPLAST HATZIVAGGUSTIS
ENGINEERING PLASTICS

Ηλεκτρικές ιδιότητες

Διηλεκτρική σταθερά (σχετική επιτρεπτότητα) ε _r		
100 Hz	3,0	IEC 60250
1 MHz	3,0	DIN 53483 sim.
Διηλεκτρικός συντελεστής απωλαίων tanδ		VDE 0303-4
100 Hz	0,001	ASTM D150
1 MHz	0,008	
Ειδική αντίσταση όγκου ρ	> 10 ¹⁵ Ω·cm	IEC 60093 / VDE 0303-30
Επιφανειακή ειδική αντίσταση σ	10 ¹⁵ Ω	DIN 53482 sim. / ASTM D257
Διηλεκτρική αντοχή E _d	30 kV/mm	IEC 60243-1 / VDE 0303-21 DIN 53481 sim. / ASTM D149
Αντίσταση στην εμφάνιση επιφανειακών αγώγιμων ιχνών V	CTI 275	IEC 60112 / VDE 0303-11 DIN 53480 sim. ASTM D3638 / UL 746A

Θερμικές ιδιότητες

Σημείο τήξης T _m (DSC, 10 °C/min)	T _g 145 °C	ISO 11357-1,-3 ASTM D3418 sim.
Θερμική αγωγιμότητα λ (23 °C)	0,21 W/(m·K)	ISO 22007-2 / ISO 8302 sim. DIN 52612-2/ASTM C177 sim.
Ειδική θερμότητα (θερμοχωρητικότητα) c	1,2 J/(g·K)	ISO 11357-4 ASTM E1269/ASTM C351 sim.
Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής α (μέση τιμή 23-60 °C)	60-70·10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	ISO 11359-2 DIN 53752/ASTM E831 sim.
Θερμοκρασία λειτουργίας συνεχής έκθεση (min / max - 5000 h)	-40 / 115 °C	
σύντομη έκθεση (χωρίς φορτίο - λίγες ώρες)	140 °C	
Θερμοκρασία μαλακώματος Vicat		ISO 306
VST A50 - 10N	150 °C	DIN 53460 sim.
VST B50 - 50N	141 °C	ASTM D1525
Θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης		DIN EN ISO 75-1,-2
HDT A - 1.80 MPa	125 °C	DIN 53461 sim.
HDT B - 0.45 MPa	136 °C	ASTM D648
Ευφλεκτότητα σύμφωνα με το UL94 (πάχος 3 / 6 mm)	HB / HB	
δείκτης οξυγόνου	25 %	ISO 4589 -1,-2 ASTM D2863 sim.

Οι παραπάνω αναφερόμενες ηλεκτρικές ιδιότητες προσδιορίζονται από μετρήσεις σε φυσικό υλικό. Οι υποδεικνυόμενες τιμές προκύπτουν από πολλές μεμονωμένες μετρήσεις υπολογισμού και βασίζονται στην τελευταία ενημέρωσή μας. Δίνονται ως πληροφωρία για τα προϊόντα μας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια επιλογής ενός προϊόντος μας. Ωστόσο, η εταιρία μας δεν εγγυάται την ορθότητα των παρεχόμενων πληροφοριών ή/και την καταλληλότητα ενός επιλεγμένου προϊόντος μας για συγκεκριμένους - νομικά δεσμευτικούς - σκοπούς εφαρμογής. Από τη στιγμή που οι ιδιότητες υλικού εξαρτώνται επίσης από τη διάσταση (μέγεθος) των ημειωμένων προϊόντων μας καθώς και από το βαθμό κρυστάλλωσης υλικού (π.χ. πυρήνωση λόγω χρωστικών ουσιών), οι πραγματικές τιμές των ιδιοτήτων ενός συγκεκριμένου προϊόντος μπορεί να διαφέρουν από τις υποδεικνυόμενες τιμές.

¹ Η νόρμα DIN 7728-1, έκδοσης Ιανουαρίου 1988, έχει αντικατασταθεί από τις προδιαγραφές της νόρμας EN ISO 1043-1, η οποία είναι πανομοιότυπη με τη νόρμα ISO 1043-1

nb : χωρίς θραύση

Εργοστάσιο: Σίνδος (Βιομηχανική Περιοχή), 570 22 Θεσσαλονίκη - τηλ.: 2310 722 242 - fax: 2310 722 144
Πωλήσεις: Αλών 12 & Πολυδείουκους 6, 185 40 Περαιός - τηλ.: 210 42 222 48 - fax: 210 42 222 98
★ <http://www.stemplast.com> - ✉ info@stemplast.gr

2 από 2