



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ
ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

ΤΟΥΡΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων:

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Δημήτριου Μανωλάκου, στα πλαίσια των ακαδημαϊκών σπουδών μου. Σκοπός της εργασίας αποτελεί η μελέτη και εφαρμογή του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού για να αντληθούν τα απαραίτητα τεχνικά δεδομένα αντικειμένου σύνθετης γεωμετρίας, με απώτερο σκοπό τη σχεδίαση μήτρας σφυρηλάτησης ακριβείας για τη κατασκευή του αντικειμένου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο αλλά και στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Εμμανουήλ Γκιθώνα για την πολύτιμη βοήθεια τους και την αρωγή τους καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας καθώς η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της.

Αθήνα 2016

Τούρου Γεώργιος

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της διαδικασίας του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού μήτρας σφυρηλάτησης ακριβείας για τη διαμόρφωση αντικειμένου σύνθετης γεωμετρίας όπως ορίζει η σύγχρονη μηχανική.

Ο Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (ΑΜΣ) αποτελεί μια ολοκληρωμένη τεχνολογική προσέγγιση, η οποία αποσκοπεί στην αποτύπωση και τη ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση φυσικών αντικειμένων σε υπολογιστικό περιβάλλον. Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται ο ΑΜΣ για να αντληθούν τα απαραίτητα τεχνικά δεδομένα που περιγράφουν το τεμάχιο Cam plate το οποίο αποτελεί τμήμα μηχανής diesel αυτοκινήτων, με απώτερο σκοπό τη σχεδίαση μήτρας σφυρηλάτησης για τη κατασκευή του τεμαχίου.

Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του τεμαχίου Cam plate, η σχεδίαση ενός απλού καλουπιού σφυρηλάτησης δε μπορούσε να ικανοποιήσει τις προϋποθέσεις για την επιτυχή σφυρηλάτηση του τεμαχίου. Έτσι μελετήθηκε ο σχεδιασμός δύο καλουπιών σφυρηλάτησης ακριβείας τα οποία διαμορφώνουν το τεμάχιο με δύο διαφορετικές διαδικασίες σφυρηλάτησης. Το πρώτο καλούπι πραγματοποιεί τη κατεργασία σε ένα στάδιο σφυρηλάτησης και το δεύτερο σε τρία στάδια. Οι δύο διαδικασίες αυτές παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα. Βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης των προσομοιώσεων που έγινε, τα δύο αυτά καλούπια μπορούν να διαμορφώσουν το τεμάχιο Cam plate καλύπτοντας τις ποιοτικές και λειτουργικές απαιτήσεις του.

Στο πρώτο μέρος (Κεφάλαια 1-4) παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος της σφυρηλάτησης. Πιο συγκεκριμένα, η σφυρηλάτηση κατηγοριοποιείται βάσει της θερμοκρασίας κατεργασίας και βάσει της διάταξης των καλουπιών. Επίσης, περιγράφονται οι παράμετροι σχεδίασης των καλουπιών σφυρηλάτησης καθώς και οι προϋποθέσεις για να την επιτυχή εφαρμογή της σφυρηλάτησης ακριβείας κλειστής μήτρας. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία του ΑΜΣ και αναπτύσσονται τα πεδία εφαρμογής, οι φάσεις και το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αυτής. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της διαδικασίας της τρισδιάστατης σάρωσης καθώς επίσης γίνεται και μια αναφορά στις κύριες τεχνικές που υπάρχουν για τη διαδικασία αυτή. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται η χρήση και η λειτουργία του τεμαχίου Cam plate, στο οποίο εφαρμόστηκε ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά τα πακέτα λογισμικού “MeshLab”, “SolidWorks” και “Simufact.forming”, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο μέρος (Κεφάλαια 5-8) της εργασίας γίνεται παρουσίαση της εφαρμογής του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού που πραγματοποιήθηκε για το τεμάχιο Cam plate. Αναλυτικότερα, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που

ακολουθήθηκε για την απόκτηση των γεωμετρικών δεδομένων του τεμαχίου με τη τεχνική της τρισδιάστατης σάρωσης δομημένου φωτός. Στη συνέχεια, έγινε επεξεργασία των δεδομένων αυτών στο λογισμικό MeshLab. Επιπλέον, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη μοντελοποίηση του αντικειμένου και για τη δημιουργία της μήτρας στο Solidworks (λογισμικό CAD). Στο έκτο κεφάλαιο μελετώνται τα δύο καλούπια σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας ακριβείας, τα οποία σχεδιαστήκαν για τη διαμόρφωση του τεμαχίου Cam plate. Το πρώτο καλούπι σχεδιάστηκε έτσι ώστε η κατεργασία να εκτελείται σε ένα στάδιο διαμόρφωσης, ενώ το δεύτερο καλούπι σχεδιάστηκε έτσι ώστε η κατεργασία να πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται προσομοίωση της σφυρηλάτησης του τεμαχίου στο λογισμικό Simufact (CAE) για τις δύο περιπτώσεις καλουπιών που σχεδιάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται οι ρυθμίσεις που έγιναν στο λογισμικό καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη που έγινε στην παρούσα εργασία.

Τέλος, στα παραρτήματα της εργασίας παρατίθενται τα σκαριφήματα των τμημάτων των δύο καλουπιών και του τεμαχίου Cam plate, καθώς και οι ιδιότητες των υλικών του τεμαχίου και των μητρών κατεργασίας. Επίσης, στα παραρτήματα παρατίθεται και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

ABSTRACT

Aim of the present thesis is to study the process of Reverse Engineering of precision forging die for the production of a workpiece with non-conventional geometry as defined by modern engineering practices.

Reverse Engineering (RE) is an integrated technological methodology which aims to extract design information from a physical object in order to reproduce it in digital 3D form within a computing environment. In this thesis the RE is applied in order to extract the necessary technical data describing the Cam plate piece, which is a diesel engine part, with the ultimate aim of designing a precision forging die for its production.

Due to the non-conventional geometry of the Cam plate piece, the design of a simple forging die could not satisfy the conditions for the successful forging of the piece. Hence, the design of two precision forging dies, which form the piece with two different forging processes, was studied. The first die can be used for a single-step forging process, while the second die can be used for three-step forging. The two processes have different advantages and disadvantages. Based on the results of the simulations that were studied, both dies can form the Cam plate piece, satisfying its qualitative and functional requirements.

In the first part (Chapters 1-4) the theoretical background of the present thesis is presented. In the first chapter the process of forging is described. In particular, the forging is categorized based on the process temperature and the configuration of the dies. Furthermore, the design parameters of the forging dies and the conditions for the successful implementation of precision closed-die forging are described. In the second chapter the process of reverse engineering is analyzed and in this context the application fields, the phases and the flow chart of this process are developed. In the third chapter the process of the three-dimensional scanning is described and the main techniques of this process are presented. In the fourth chapter the use and operation of the cam plate piece, on which the inverse mechanical design was applied, are described. Moreover, the software packages "MeshLab", "SolidWorks" and "Simufact.forming", which were used in the present thesis, are presented in detail.

In the second part (Chapters 5-8) of the thesis the application of reverse engineering on the cam plate part is presented. Specifically, in the fifth chapter the experimental procedure applied for the acquisition of geometrical data of the workpiece with the technique of structured light 3D-scanning as well as the subsequent processing of the data in MeshLab software are described. Moreover, in the fifth chapter the steps for the modeling of the workpiece and for the design of the die in Solidworks (CAD program) are presented. In the sixth chapter two cases of a precision forging die are studied. Both dies were designed for the forming of cam plate piece. The first die was designed

in order to complete the forging process in one step, while the second die was designed so that the forging is carried out in three forming steps. In the seventh chapter the simulation of the forging of the workpiece was conducted using the software Simufact (CAE) for both of the dies that were designed. Specifically, the settings that were defined in the program and the results of the simulations are described. In the eighth chapter the main observations and conclusions of the present thesis are presented.

Finally, the material properties the technical drawings for the cam plate piece, for the workpiece and for the parts that constitute the dies are presented in the annexes. The bibliographical references which were used in this thesis are also listed in the annexes.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ	3
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	3
1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
1.2.1 ΨΥΧΡΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....	5
1.2.2 ΗΜΙΘΕΡΜΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....	8
1.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΨΥΧΡΗΣ ΚΑΙ ΗΜΙΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	9
1.2.4 ΙΣΟΘΕΡΜΙΚΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....	9
1.2.5 ΘΕΡΜΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ.....	11
1.2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΣΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	12
1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ.....	13
1.3.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	13
1.3.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	14
1.3.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ.....	15
1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	15
1.5 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	20
1.5.1 ΣΦΥΡΕΣ.....	20
1.5.2 ΠΡΕΣΕΣ.....	23
1.5.3 ΑΛΛΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ.....	25
1.6 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΥΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ-ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	33
2.1 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	34
2.2 ΦΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	35
2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΑΡΩΤΕΣ	39
3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ - ΕΠΑΦΗΣ (CMM).....	40
3.2 ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ- ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	42
3.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ- ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	43
3.3.1 ΧΡΟΝΟΥ ΠΤΗΣΗΣ.....	43
3.3.2 ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ.....	44
3.3.4 ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	47

3.3.4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	47
3.3.4.2 ΜΟΤΙΒΑ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	48
3.3.4.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΑΡΩΤΗ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΜΑΧΙΟ CAM PLATE - ΠΑΚΕΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.....	53
4.1 CAM PLATE - ΤΕΜΑΧΙΟ ΠΡΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΜΣ.....	53
4.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ 3D ΔΕΔΟΝΩΝ MESH LAB.....	55
4.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ CAD -SOLIDWORKS.....	57
4.3.1 CAD.....	57
4.3.2 SOLIDWORKS.....	58
4.4 CAE – SIMUFACT.FORMING.....	59
4.4.1 CAE.....	59
4.4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	59
4.4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	60
4.4.3 ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	61
4.4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	62
4.4.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SIMUFACT.FORMING.....	64
ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΑΡΩΣΗ - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CAM PLATE	69
5.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗ ΣΑΡΩΣΗ.....	69
5.1.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΑΡΩΤΗΣ ISCAN M300.....	69
5.1.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ISCAN3D.....	70
5.1.3 ΠΛΑΚΑ ΣΤΟΧΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.....	70
5.1.4 ΣΠΡΕΙ ΒΑΦΗΣ.....	70
5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ CAM PLATE.....	71
5.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	76
5.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ CAM PLATE.....	78
5.4.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ.....	78
5.4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΕΣ.....	84
5.5 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE	91
6.1 ΚΑΛΟΥΠΙ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	92
6.1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	92
6.1.2 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	94
6.1.3 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	96
6.2 ΚΑΛΟΥΠΙ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	98

6.2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΜΑΤΩΝ	98
6.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	100
6.2.3 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	102
6.2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE	107
7.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIMUFACT.FORMING.....	107
7.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	109
7.2.1 ΑΡΧΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟ – ΜΠΙΓΕΤΑ.....	109
7.2.2 ΥΛΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟΥ.....	111
7.2.3 ΜΗΧΑΝΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	111
7.2.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΠΙΓΕΤΑΣ ...	112
7.2.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΗΤΡΑΣ	113
7.2.6 ΛΙΠΑΝΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	113
7.2.7 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΗΤΡΩΝ	114
7.2.7.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	114
7.2.7.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΗΤΡΑΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	116
7.3 ΨΥΞΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	119
7.3.1 ΔΕΝΤΡΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΨΥΞΗΣ.....	120
7.3.2 ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ.....	121
7.3.3 ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	122
7.4 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	123
7.4.1 ΔΕΝΤΡΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ.....	123
7.4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ	124
7.4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΠΙΕΣΕΩΣ.....	126
7.5 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	127
7.5.1 ΔΕΝΤΡΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ.....	128
7.5.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ.....	129
7.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	131
7.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ	131
7.6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	132
7.6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	135
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	145
8.1 ΣΑΡΩΣΗ – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ.....	145
8.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ	146
8.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ	147
8.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	148

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΕΜΑΧΙΟΥ CAM PLATE.....	153
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	155
Β.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	155
<i>Β.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΛΙΚΟΥ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ - ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΑΣ.....</i>	<i>159</i>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ	161
<i>Γ.1 ΚΑΛΟΥΠΙ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ</i>	<i>161</i>
<i>Γ.2 ΚΑΛΟΥΠΙ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ</i>	<i>169</i>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	177

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ	3
Σχήμα 1.1: Κατεργασίες σφυρηλάτησης: (α) Κατεργασία τύπωσης νομισμάτων, (β) Διαμόρφωση κεφαλής ήλων και κοχλιών, (γ) Διάτρηση, (δ) Διαμόρφωση μορφοδοκού, (ε) Κατεργασία διαπλάτυνσης ή διάνοιξης πλήμνης, (στ) Διαμόρφωση άκρου [3]	4
Σχήμα 1.2: Διάφοροι τύποι τεχνικών ψυχρής σφυρηλάτησης (εξώθησης) (P, έμβολο; C, πλαίσιο-δοχείο συγκράτησης; W, κατεργαζόμενο τεμάχιο; E, αποβολέας) [2]	6
Σχήμα 1.3: Η «συστημική» προσέγγιση της ψυχρής σφυρηλάτησης (1 - μπιγιέτα, 2 - μήτρα, 3 - διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, 4 - ζώνη/έργο παραμόρφωσης, 5 - εξοπλισμός, 6 - τελικό προϊόν, 7 - εργοστασιακό περιβάλλον) [2]	6
Σχήμα 1.4: Μείωση βάρους που εξοικονομήθηκε μέσω της ισοθερμικής σφυρηλάτησης ενός δισκοειδούς τεμαχίου σε σχέση με μία συμβατική σφυρηλάτηση. [6].....	12
Σχήμα 1.5: Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας [3].....	13
Σχήμα 1.6: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) Διαδικασία πλήρωσης του καλουπιού, (β) Σφυρηλάτηση ακριβείας: (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near-net-shape. [3]	14
Σχήμα 1.7: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή [3]	15
Σχήμα 1.8: Χαρακτηριστική ορολογία στην κατασκευή καλουπιού σφυρηλάτησης. (α) Εγκάρσια διατομή τεμαχίου/καλουπιού (β) Τρισδιάστατη μορφή σφυρήλατου τεμαχίου [3].....	16
Σχήμα 1.9: Χαρακτηριστικές γραμμές διαχωρισμού σφυρήλατων αντικειμένων [3].....	17
Σχήμα 1.10: Είδη κωνικότητας [3]	17
Σχήμα 1.11: Κωνικότητα προσαρμογής [3].....	18
Σχήμα 1.12: Είδη νεύρων σε τυπικά σφυρήλατα τεμάχια [3].....	18
Σχήμα 1.13: Διαμόρφωση εμβυθίσεων, νεύρων και κορμού [3].....	19
Σχήμα 1.14: Ενδεδειγμένες διαστάσεις χαρακτηριστικών εμβυθίσεων [3].....	19
Σχήμα 1.15: Συνιστώμενες καμπυλότητες σε χαρακτηριστικές περιοχές σφυρήλατων. [3]	20
Σχήμα 1.16: Σφύρες για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) και (b): Σφύρες πίπτουσας μάζας. [7]	21
Σχήμα 1.17: Σφύρες για σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας [7]	22
Σχήμα 1.18: Σφύρα για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (c)Ατμόσφουρα, (b)Σφύρα “Αντίθετης πρόσκρουσης”. [7].....	23
Σχήμα 1.19: Βασικά μέρη μιας μηχανικής πρέσας σφυρηλάτησης [7]	24
Σχήμα 1.20: Βασικά μέρη μιας υδραυλικής πρέσας σφυρηλάτησης [7]	24
Σχήμα 1.21: Μηχανές σφυρηλάτησης με κυλινδρικά ράουλα. [7].....	25
Σχήμα 1.22: Ανάστροφη κρύα διέλαση. (α) κετεργαζόμενο τεμάχιο, (b) Ελαστική παραμόρφωση της μήτρας (c) Ελαστική παραμόρφωση εμβόλου [12]	28
Σχήμα 1.23: Ενεργός αντιστάθμιση της ελαστικής απόκλισης της μήτρας. (a) διάταξη καλουπιών, (b) διεργασία διαμόρφωσης και (c) διεργασία απόρριψης [14]	29

Σχήμα 1.24: Διάταξη μήτρας με ενεργό έλεγχο τριβής [15]	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	33
Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής ΑΜΣ. CAD-Computer Aided Design, CAE- Computer Aided Engineering, RP/RT- Rapid Prototyping/Rapid Tooling, CAM- Computer-Aided Manufacturing, CNC-Computer Numerical Control. [24]	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΑΡΩΤΕΣ	39
Σχήμα 3.1: Τύποι Διατάξεων CMM μηχανών [27].....	41
Σχήμα 3.2: Παραδείγματα Συστημάτων Ανίχνευσης α) REVO και c) MPP-300Q της Mitutoyo [29], b) TT130 της Heidenhain [30]	41
Σχήμα 3.3: Σχηματική όψη Στερεοσκοπικής μεθόδου [33].....	42
Σχήμα 3.4: Σχηματική όψη Σαρωτή Χρόνου-Πτήσης [33]	44
Σχήμα 3.5: Σχηματική όψη σαρωτή Διαφοράς Φάσης [33]	45
Σχήμα 3.6: Διάταξη Τριγωνοποίηση μιας κάμερας με ακτινοβολία α)λείζερ και β)δομημένου φωτός [33]	46
Σχήμα 3.7: Σχηματική Διάταξη τριγωνοποίησης δύο καμερών, δομημένου φωτός [33]	48
Σχήμα 3.8: Προτεινόμενες διατάξεις μοτίβων [38].....	49
Σχήμα 3.9: Πίνακας βαθμονόμησης από την οπτική γωνία των δύο καμερών σε διάταξη τριγωνοποίησης [40].....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΜΑΧΙΟ CAM PLATE - ΠΑΚΕΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.....	53
Σχήμα 4.1: Τεμάχιο Cam plate	53
Σχήμα 4.2: Αντλία αξονικού εμβόλου διανομής καυσίμου, VE Rombert Bosch GmbH [41].....	53
Σχήμα 4.3: Μέθοδος διανομής καυσίμου αντλίας πετρελαίου αξονικού εμβόλου [42]	54
Σχήμα 4.4: Τμήματα διανομέα ψεκασμού αντλίας [43].....	55
Σχήμα 4.5: Παράδειγμα νέφους σημείων, σε περιβάλλον MeshLab, που λήφθηκε μετά από σάρωση σε πραγματικό χρόνο [45].....	56
Σχήμα 4.6: Παράδειγμα κινητήρα αεροσκάφους σχεδιασμένο σε περιβάλλον SolidWorks [48]	58
Σχήμα 4.7: Διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων [49]	61
Σχήμα 4.8: Τυπική διάταξη διεργασιών προσομοίωσης [47]	63
Σχήμα 4.9: Παράδειγμα προσομοίωσης σφυρηλάτησης σε περιβάλλον Simufact.forming	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΑΡΩΣΗ - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CAM PLATE	69
Σχήμα 5.1: Σαρωτής Iscan M300 του εργαστηρίου.....	69
Σχήμα 5.2: Αυτοσχέδια πλάκα στόχων του εργαστηρίου μαζί με το ψεκασμένο αντικείμενο ..	71
Σχήμα 5.3: Διάταξη σαρωτή-πλάκας στόχων όπου πραγματοποιήθηκε η σάρωση του τεμαχίου.....	72
Σχήμα 5.4: Επιλογή Σαρωτή (IScan3D)	72
Σχήμα 5.5: Βαθμονόμηση σαρωτή (Iscan3D).....	73

Σχήμα 5.6: Διαδικασία σάρωσης (IScan3D)	74
Σχήμα 5.7: Λήψεις από τη σάρωση της άνω πλευρά του αντικειμένου για 0°, 20°, 100°, 200°, 240° και 340°. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μια λήψη, και οι αριθμοί-κώδικες, οι οποίοι διακρίνονται με κίτρινο χρώμα, αντιστοιχούν στα σημεία της πλάκας-στόχων που αναγνωρίστηκαν. (Iscan3D)	74
Σχήμα 5.8: Δημιουργία ενιαίου πλέγματος (IScan3D).....	75
Σχήμα 5.9: Τελικό αποτέλεσμα σάρωσης τη άνω πλευράς του αντικειμένου (IScan3D)	75
Σχήμα 5.10: Εισαγωγή αρχείων STL (MeshLab).....	76
Σχήμα 5.11: Διαγραφή ανεπιθύμητων επιφανειών από τα πλέγματα του τεμαχίου Cam plate (MeshLab)	76
Σχήμα 5.12: Γέμισμα των κενών του πλέγματος (MeshLab).....	77
Σχήμα 5.13: Πλέγμα της άνω πλευρά του αντικειμένου μετά το γέμισμα των κενών (MeshLab)	77
Σχήμα 5.14: Νέφος σημείων του τεμαχίου Cam plate (Solidworks)	78
Σχήμα 5.15: Στάδια (1-4) εντολής “Mesh Prep Wizard” (Solidworks)	79
Σχήμα 5.16: Στάδια (5-8) εντολής “Mesh Prep Wizard” (Solidworks)	80
Σχήμα 5.17: Κοντινό πλάνο στο πλέγμα όπου διακρίνονται οι επιφάνειες του (Solidworks)....	81
Σχήμα 5.18: Στάδια (1-6) της εντολής “Surface Wizard” (Solidworks)	82
Σχήμα 5.19: Στάδια (7-8) της εντολής “Surface Wizard” (Solidworks).....	83
Σχήμα 5.20: α) επιφάνειες που προέκυψαν από την εντολή “Surface Wizard”, και β) σχεδίαση κυλίνδρου που τις περικλείει (Solidworks).....	83
Σχήμα 5.21: Στάδια της εντολής “Cut With Surface” (Solidworks)	84
Σχήμα 5.22: Τα κομμάτια σχεδίασης που απαρτίζουν το αντικείμενο μας ανάλογα με τη συμμετρία τους, α) κυματοειδής άνω πλευρά 1/8, β)κύλινδρος άνω πλευράς 1/4, γ) κάτω πλευρά 1/6 (Solidworks)	85
Σχήμα 5.23: Μοντέλο Cam plate που σχεδιάσαμε, α) άνω και β) κάτω πλευρά. Με κόκκινο χρώμα το επίπεδο συμμετρίας (Solidworks).....	85
Σχήμα 5.24: Πραγματικό τεμάχιο Cam plate στο οποίο έγινε η σάρωση.....	86
Σχήμα 5.25: Μοντέλο τεμαχίου Cam plate όπως σχεδιάστηκε στο SolidWorks.	86
Σχήμα 5.26: Γραμμή διαχωρισμού μήτρας με την εντολή “Parting Line” (Solidworks).....	87
Σχήμα 5.27: Επιφάνεια (κίτρινο) και γραμμή διαχωρισμού (μπλε) της μήτρας με την εντολή “Parting Surface” (Solidworks)	88
Σχήμα 5.28: Καθορισμός μεγέθους/σχήματος της μήτρας (Solidworks).....	88
Σχήμα 5.29: Δημιουργία των τμημάτων της μήτρας με την εντολή “Tooling Split”	89
Σχήμα 5.30: Τμήματα της μήτρας του τεμαχίου Cam plate (Solidworks).....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE	91
Σχήμα 6.1 : Καλούπια σφυρηλάτησης cam plate που σχεδιάστηκαν: α) ενός σταδίου β)τριών σταδίων	91

Σχήμα 6.2: Εγκάρσια τομή καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης	93
Σχήμα 6.3: Βήματα συναρμολόγησης κάτω τμημάτων καλουπιού ενός σταδίου.....	94
Σχήμα 6.4: Βήματα συναρμολόγησης άνω τμημάτων καλουπιού ενός σταδίου	95
Σχήμα 6.5: Τρισδιάστατη όψη καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης.....	96
Σχήμα 6.6: Φάσεις λειτουργίας καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης. α) τοποθέτηση μπιγέτας, β) εφαρμογή άνω εξωτερικής μήτρας, γ) έναρξη κατεργασίας, δ) μέγιστη συμπίεση του ελατηρίου πίεσεως, ε) τέλος διαδρομής της πρέσας- (ολική διαμόρφωση), ζ) έξοδος τεμαχίου- τέλος κατεργασίας.....	97
Σχήμα 6.7: Στάδια διαμόρφωσης τεμαχίου Cam plate	98
Σχήμα 6.8: Στάδια προδιαμόρφωσης. α)μπιγέτα, β) πρώτο στάδιο, γ)δεύτερο στάδιο, δ) τρίτο στάδιο	99
Σχήμα 6.9: Εγκάρσια τομή καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης.....	101
Σχήμα 6.10: Βήματα συναρμολόγησης κάτω τμημάτων καλουπιού τριών σταδίων	102
Σχήμα 6.11: Βήματα συναρμολόγησης άνω τμημάτων καλουπιού τριών σταδίων.....	103
Σχήμα 6.12: Τρισδιάστατη όψη καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης.....	104
Σχήμα 6.13: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση τοποθέτησης μπιγέτας και προδιαμορφωμάτων	105
Σχήμα 6.14: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση εφαρμογής της άνω εξωτερικής μήτρας.....	105
Σχήμα 6.15: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση έναρξης σφυρηλάτησης α)1 ^{ου} σταδίου, β)2 ^{ου} σταδίου, γ)3 ^{ου} σταδίου	106
Σχήμα 6.16: Καλούπι τριών σταδίων. Τέλος διαδρομής της πρέσας- ολική διαμόρφωση	106
Σχήμα 6.17: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση εξόδου τεμαχίου- τέλος κατεργασίας.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE	107
Σχήμα 7.1: Ενότητες του κεντρικού Παραθύρου του προγράμματος SimuFact.forming: 1) Process tree window, 2 Inventory window, 3) Model view window	107
Σχήμα 7.2: Βασικό παράθυρο κατεργασιών που προσφέρει το λογισμικό SimuFact.forming	108
Σχήμα 7.3: Εισαγωγή μπιγέτα στη προσομοίωση της σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης.....	109
Σχήμα 7.4: Εισαγωγή μπιγέτας στη προσομοίωση της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης.....	110
Σχήμα 7.5: Εντολή προθέρμανσης μπιγέτων του λογισμικού	110
Σχήμα 7.6: Γενική περιγραφή του υλικού 42CrMo4 όπως διατίθεται από το SimuFact.material	111
Σχήμα 7.7: Παράθυρο επιλογής πρέσας κατεργασίας και ρύθμισης των χαρακτηριστικών της	112
Σχήμα 7.8: Παράθυρο ρύθμισης θερμοκρασίας και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του τεμαχίου.....	112

Σχήμα 7.9: Παράθυρο ρύθμισης θερμοκρασίας και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της μήτρας	113
Σχήμα 7.10: Παράθυρο ρύθμισης του συντελεστή τριβής του λιπαντικού μέσου	113
Σχήμα 7.11: Κάτω εξωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης	114
Σχήμα 7.12: Κάτω μήτρα- έμβολο καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης	115
Σχήμα 7.13: Κάτω εσωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης	115
Σχήμα 7.14: Άνω εσωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης	115
Σχήμα 7.15: Άνω εξωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης	116
Σχήμα 7.16: Κάτω εξωτερική μήτρα καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	116
Σχήμα 7.17: Κάτω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	116
Σχήμα 7.18: Κάτω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	117
Σχήμα 7.19: Κάτω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	117
Σχήμα 7.20: Άνω εξωτερική μήτρα καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	117
Σχήμα 7.21: Άνω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	118
Σχήμα 7.22: Άνω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	118
Σχήμα 7.23: Άνω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης	118
Σχήμα 7.24: Βασικό παράθυρο διαδικασία ψύξης (Cooling) του δοκιμίου στο λογισμικό προσομοίωσης	119
Σχήμα 7.25: παράθυρο ελέγχου του χρόνου ψύξης	120
Σχήμα 7.26: Δέντρο διάταξης δεδομένων της διαδικασίας ψύξης	120
Σχήμα 7.27: παράθυρο δημιουργίας πλέγματος μπιγέτας διαστάσεων R=19,5mm H=13,4mm	121
Σχήμα 7.28: Παράθυρο δημιουργίας πλέγματος μπιγέτας διαστάσεων R=14mm H= 26mm. 121	
Σχήμα 7.29: Παράθυρο ρύθμισης της αναγέννησης πλέγματος	122
Σχήμα 7.30: Παράθυρο καθορισμού επιπέδων συμμετρίας	122
Σχήμα 7.31: Βασικό παράθυρο προσομοίωσης θερμής σφυρηλάτησης (ενός σταδίου)	123
Σχήμα 7.32: Δέντρο διαδικασίας σφυρηλάτης ενός σταδίου διαμόρφωσης	124
Σχήμα 7.33: Διάταξη σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης όπως ρυθμίστηκε στο λογισμικό SimuFact.forming	125
Σχήμα 7.34: Παράθυρο ρυθμίσεων της διαδικασίας σφυρηλάτησης (Simufact.forming)	125
Σχήμα 7.35: Παράθυρο γενικών ρυθμίσεων ελατηρίου μήτρας	126
Σχήμα 7.36: Παράθυρο ρύθμισης ακαμψίας ελατηρίου	126
Σχήμα 7.37: Βασικό παράθυρο προσομοίωσης θερμής σφυρηλάτησης (τριών σταδίων)	127
Σχήμα 7.38: Δένδρο διαδικασίας σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης	128
Σχήμα 7.39: Διάταξη σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης όπως ρυθμίστηκε στο λογισμικό SimuFact.forming	129

Σχήμα 7.40: Παράθυρο ρυθμίσεων σφυρηλάτησης (ρύθμιση διαδρομής πρέσας για το πρώτο στάδιο).....	130
Σχήμα 7.41: Παράθυρο ρυθμίσεων σφυρηλάτησης (ρύθμιση χρόνου ψύξης μετά τη κατεργασία).....	130
Σχήμα 7.42: Κατανομή της θερμοκρασίας στις μπιγέτες σε διάφορα στάδια της διαδικασίας ψύξης. (α) κυλινδρική μπιγέτα ενός σταδίου σφυρηλάτησης διαστάσεων ακτίνας $R=19,5\text{mm}$ και ύψους $H=13,4\text{mm}$, (β) κυλινδρική μπιγέτα τριών σταδίων σφυρηλάτησης διαστάσεων ακτίνας $R=1$	131
Σχήμα 7.43: Κατανομή της θερμοκρασίας του τεμαχίου κατά την είσοδο (0.00%) και κατά την έξοδο του (100%) από τη μήτρα σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης.	132
Σχήμα 7.44: Απεικόνιση σε δύο όψεις του τεμαχίου της κατανομής των τάσεων στη φάση πλήρους συμπίεσης του τεμαχίου κατά τη σφυρηλάτηση ενός σταδίου διαμόρφωσης.....	132
Σχήμα 7.45: Κατανομή της ενεργούς πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις της σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης	133
Σχήμα 7.46: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου. Κόκκινο: άνω εσωτερική μήτρα, μοβ: μήτρα- έμβολο, πράσινο: κάτω εσωτερική μήτρα.....	134
Σχήμα 7.47: Κατανομή της θερμοκρασίας του τεμαχίου κατά την είσοδο (0.00%) και κατά την έξοδο του (100%) από τις μήτρες σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης.(α-β) πρώτο στάδιο, (γ-δ) δεύτερο στάδιο και (ε-ζ) τρίτο στάδιο.	136
Σχήμα 7.48: Απεικόνιση σε δύο όψεις του τεμαχίου της κατανομής των τάσεων στη φάση πλήρους συμπίεσης του τεμαχίου κατά τη σφυρηλάτηση τριών σταδίων διαμόρφωσης.(α-β) πρώτο στάδιο, (γ-δ) δεύτερο στάδιο και (ε-ζ) τρίτο στάδιο.....	137
Σχήμα 7.49: Κατανομή της ενεργούς πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις του 1 ^{ου} σταδίου της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης	138
Σχήμα 7.50: Κατανομή της ενεργούς πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις του 2 ^{ου} σταδίου της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης	139
Σχήμα 7.51: Κατανομή της ενεργούς πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις του 3 ^{ου} σταδίου της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης	140
Σχήμα 7.52: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας του 1 ^{ου} σταδίου σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου. Κόκκινο: Άνω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου, μοβ: Κάτω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου.....	141
Σχήμα 7.53: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας του 2 ^{ου} σταδίου σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου. Κόκκινο: Άνω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου, μοβ: Κάτω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου.....	142
Σχήμα 7.54: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας του 3 ^{ου} σταδίου σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου. Κόκκινο: Άνω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου, μοβ: Κάτω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου	143

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΑΡΩΣΗ - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

Πίνακας 5.1: Στοιχεία Σαρωτή Iscan M300,V400 [50].....70

ΚΑΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΛΟΥΠΙ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE

Πίνακας 6.1: Αρίθμηση των τμημάτων καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης.....93

Πίνακας 6.2: Αρίθμηση των τμημάτων καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης101

ΚΑΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

Πίνακας 7.1: Γεωμετρικά στοιχεία τελικού τεμαχίου και μπιγέτας109

Πίνακας 7.2: Τμήματα καλουπιών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.....114

Πίνακας 7.3: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης.....124

Πίνακας 7.4: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση σφυρηλάτησης τριών σταδίων.....129

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πίνακας 8.1: Μέγιστες πίεσης και δυνάμεις που ασκούνται στις μήτρες των δυο καλουπιών ...148

ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η σφυρηλάτηση είναι μια από τις σημαντικότερες κατεργασίες του συμπαγούς υλικού [1], και περιλαμβάνει την παραμόρφωση μιας μεταλλικής μπιγέτας ή ενός προδιαμορφωμένου τεμαχίου μεταξύ δύο ή περισσότερων τμημάτων καλουπιών, προκειμένου να ληφθεί το τελικό τεμάχιο [2]. Η πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου επιτυγχάνεται με την άσκηση θλιπτικών φορτίων από το εργαλείο σφυρηλάτησης (μήτρα). Εφαρμόζεται σε μεγάλη ποικιλία μεγέθους και σχήματος τεμαχίων και από ποικιλία υλικών. Τυπικά σφυρηλάτα προϊόντα είναι: εκκεντροφόροι άξονες, διωστήρες, χειροτροχοί, οδοντωτοί τροχοί, ήλοι, εργαλεία χειρός, πτερύγια ελίκων κλπ.. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εφαρμογές σφυρηλάτησης. [3]

Δυνατότητα σφυρηλάτησης (Forgability) ενός μετάλλου είναι η δυνατότητά του να παραμορφώνεται πλαστικά σε ορισμένη θερμοκρασία και ταχύτητα παραμόρφωσης, χωρίς αστοχία [1]. Για τον συνολικό χαρακτηρισμό της κατεργασιμότητας συνεκτιμώνται οι εξής ιδιότητες του προς κατεργασία υλικού: ολκιμότητα, αντοχή, απαιτούμενη θερμοκρασία κατεργασίας, συμπεριφορά έναντι τριβής και ποιότητα του τελικού προϊόντος. Την υψηλότερη κατεργασιμότητα παρουσιάζουν τα κράματα αλουμινίου (Al), μαγνησίου (Mg), χαλκού (Cu) ακολουθούν οι ελαφρά κραματωμένοι ανθρακοχάλυβες, οι ανοξειδωτοί χάλυβες και τα κράματα τιτανίου (Ti) ενώ μικρή κατεργασιμότητα έχουν τα κράματα νικελίου (Ni), βολφασμίου (W) και βηρυλλίου (Be). [3]

1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

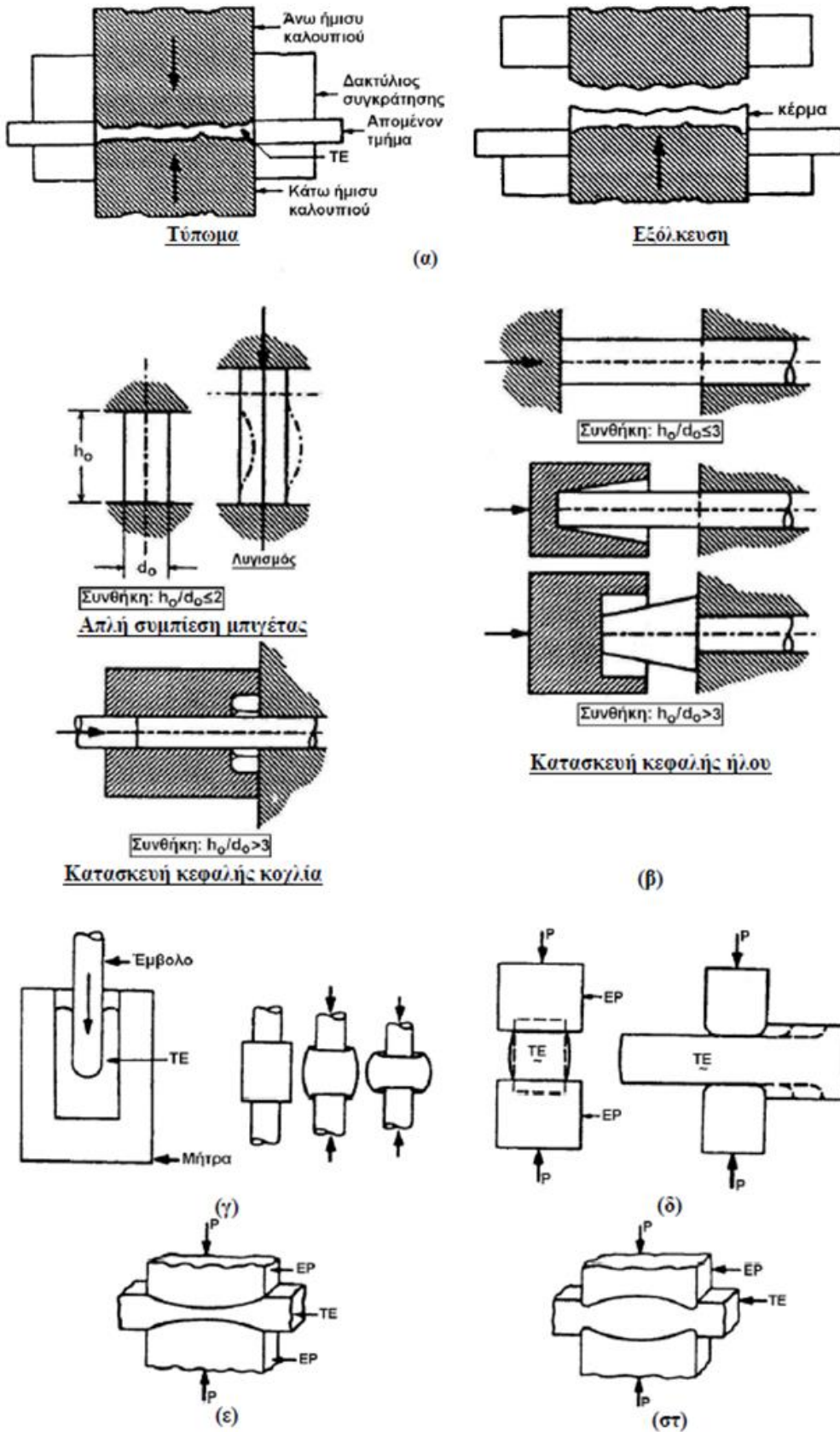
Η σφυρηλάτηση λαμβάνει χώρα εν ψυχρώ και σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Μια χονδρική ταξινόμηση βάσει της θερμοκρασίας κατεργασίας (όπου T_m το σημείο τήξεως του κατεργαζόμενου υλικού) είναι η παρακάτω [3]:

- Ψυχρή σφυρηλάτηση: $T < 0,3T_m$
- Ημίθερμη σφυρηλάτηση: $0,3T_m < T < 0,5T_m$
- Θερμή σφυρηλάτηση: $T > 0,5T_m$

Στις παραπάνω κατηγορίες σφυρηλάτησης μπορεί να προστεθεί και η ισοθερμική σφυρηλάτηση, όπου οι μήτρες θερμαίνονται στην ίδια θερμοκρασία με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. [2]

Οι παραπάνω τύποι κατεργασιών και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους περιγράφονται αναλυτικά στις παρακάτω Υποκαφάλαια (1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, 1.2.4, 1.2.5 και 1.2.6).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ



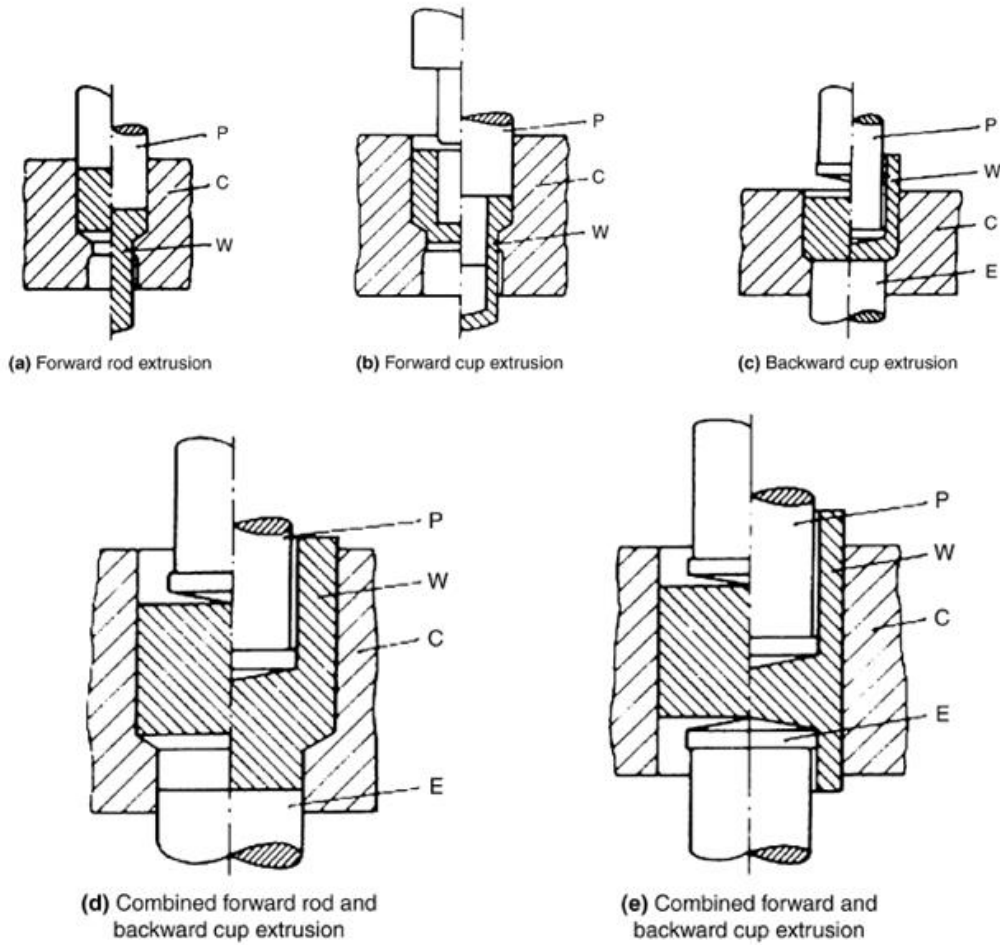
Σχήμα 1.1: Κατεργασίες σφυρηλάτησης: (α) Κατεργασία τύπωσης νομισμάτων, (β) Διαμόρφωση κεφαλής ήλων και κοχλιών, (γ) Διάτρηση, (δ) Διαμόρφωση μορφοδοκού, (ε) Κατεργασία διαπλάτυνσης ή διάνοιξης πλήμνης, (στ) Διαμόρφωση άκρου [3]

1.2.1 ΨΥΧΡΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

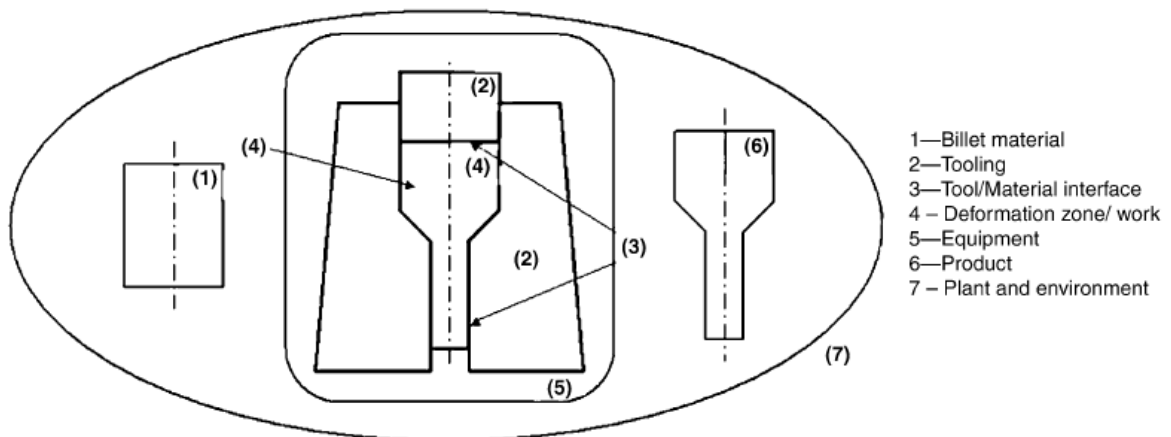
Ως ψυχρή σφυρηλάτηση ορίζεται η διαμόρφωση ενός χυτού υλικού σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς αρχική θέρμανση του ακατέργαστου κομματιού ή χωρίς χρήση θέρμανσης σε ενδιάμεσα στάδια της διαδικασίας. Η ψυχρή εξώθηση είναι ένας ειδικός τύπος σφυρηλάτησης όπου το κρύο μέταλλο ρέει πλαστικά κάτω από θλιπτικές δυνάμεις σε μία ποικιλία σχημάτων. Τα σχήματα αυτά είναι συνήθως αξονοσυμμετρικά με σχετικά μικρά μη αξονοσυμμετρικά χαρακτηριστικά. Επίσης, σε αντίθεση με την «σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή», η κατεργασία αυτή δε δημιουργεί τεμάχιο με προεξοχές. Οι όροι «ψυχρή σφυρηλάτηση» και «ψυχρή εξώθηση» συχνά χρησιμοποιούνται αμοιβαία για να εκφράσουν τις ίδιες διαδικασίες, οι οποίες αφορούν γνωστές διαδικασίες σφυρηλάτησης όπως εξώθηση, συμπίεση και διέλαση με ολκή. Οι διεργασίες αυτές συχνά εκτελούνται σε μηχανικές και υδραυλικές πρέσες. Πολλά στάδια σχηματισμού χρησιμοποιούνται προκειμένου να παραχθεί το τελικό κομμάτι ή μία σχετικά περίπλοκη γεωμετρία, ξεκινώντας από ένα ακατέργαστο κομμάτι ή μία μπιγέτα απλού σχήματος. Ορισμένες βασικές τεχνικές ψυχρής σφυρηλάτησης απεικονίζονται στο Σχήμα 1.2. Μέσω ενός συνδυασμού αυτών των τεχνικών, μπορεί να παραχθεί ένας μεγάλος αριθμός εξαρτημάτων. Μέχρι στιγμής το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής της ψυχρής σφυρηλάτησης είναι η αυτοκινητοβιομηχανία. Ωστόσο, ψυχρά σφυρήλατα αντικείμενα χρησιμοποιούνται επίσης στην κατασκευή ποδηλάτων, μοτοσικλετών και γεωργικών μηχανημάτων. [2]

Ένα σύστημα ψυχρής σφυρηλάτησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, περιλαμβάνει όλες τις μεταβλητές εισόδου, όπως την μπιγέτα ή το κομμάτι προς επεξεργασία (γεωμετρία ή υλικό), το εργαλείο-μήτρα (γεωμετρία και υλικό), το υλικό της διεπιφάνειας μεταξύ του εργαλείου-μήτρας και του κατεργάσιμου τεμαχίου, την μηχανική μελέτη της πλαστικής παραμόρφωσης, τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, και τέλος το εργοστασιακό περιβάλλον όπου διεξάγεται η κατεργασία. Η "συστημική προσέγγιση" στην σφυρηλάτηση επιτρέπει τη μελέτη των σχέσεων εισόδου / εξόδου καθώς και την μελέτη της επίδρασης των μεταβλητών της διεργασίας στην ποιότητα του προϊόντος και στην οικονομική πλευρά της διεργασίας. Το κλειδί για μια επιτυχή διεργασία σχηματισμού μεταλλικού κομματιού, δηλαδή για την απόκτηση του επιθυμητού σχήματος και ιδιοτήτων, είναι η κατανόηση και ο έλεγχος της ροής του μετάλλου. Η κατεύθυνση της ροής του μετάλλου, το μέγεθος της παραμόρφωσης, και οι σχετικές θερμοκρασίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες των σχηματιζόμενων κομματιών. Η ροή του μετάλλου καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες που σχετίζονται τόσο με την τοπική παραμόρφωση, όσο και με το σχηματισμό ελαττωμάτων όπως ρωγμές ή πτυχώσεις πάνω στην επιφάνεια του κομματιού ή κάτω από αυτήν. Η τοπική ροή μετάλλου με τη σειρά της επηρεάζεται από τις μεταβλητές της διεργασίας. [2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ



Σχήμα 1.2: Διάφοροι τύποι τεχνικών ψυχρής σφυρηλάτησης (εξώθησης) (P, έμβολο; C, πλαίσιο-δοχείο συγκράτησης; W, κατεργαζόμενο τεμάχιο; E, αποβολέας) [2]



Σχήμα 1.3: Η «συστημική» προσέγγιση της ψυχρής σφυρηλάτησης (1 - μπιγιέτα, 2 - μήτρα, 3 - διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, 4 - ζώνη/έργο παραμόρφωσης, 5 - εξοπλισμός, 6 - τελικό προϊόν, 7 - εργασιακό περιβάλλον) [2]

Υλικά ψυχρής σφυρηλάτηση

Όλα τα μέταλλα τα οποία παρουσιάζουν ολκιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ψυχρή σφυρηλάτηση. Αυτή η ομάδα μετάλλων αποτελείται κυρίως από χάλυβες και από κράματα αλουμινίου. Ωστόσο, τα κράματα χαλκού, ψευδαργύρου, κασσίτερου, τιτανίου, βηρυλλίου, και νικελίου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην ψυχρή σφυρηλάτηση για ειδικές εφαρμογές. [2]

Ορισμένα παραδείγματα χάλυβων που χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή τεμαχίων ψυχρής εξώθησης είναι τα εξής [2]:

- Επιφανειακά σκληρυμένοι χάλυβες: μη κραματοποιημένοι και κραματοποιημένοι
- Θερμικά κατεργάσιμοι χάλυβες: μη κραματοποιημένοι και κραματοποιημένοι
- Ανοξειδωτοι χάλυβες: περλιτικοί και ωστενιτικοί

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες συνήθως δεν σφυρηλατούνται εύκολα. Ειδικά, η ψυχρή σφυρηλάτηση ωστενιτικών ή ωστενιτικών-φερριτικών χάλυβων απαιτεί υψηλές δυνάμεις και υψηλές πιέσεις από το εργαλείο-μήτρα. Επιπλέον, τα υλικά αυτά είναι δύσκολο να λιπανθούν. Τέλος, η ψυχρή σφυρηλάτηση ανοξειδωτων χάλυβων σε ορισμένες περιπτώσεις περιορίζεται λόγω έλλειψης πληροφόρησης όσον αφορά την συμπεριφορά του υλικού. [2]

Ορισμένα παραδείγματα κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ψυχρή σφυρηλάτηση είναι τα εξής [2]:

- Καθαρά ή σχεδόν καθαρά κράματα αλουμινίου
- Μη σκληρυνόμενα κράματα αλουμινίου
- Σκληρυνόμενα κράματα αλουμινίου

Επίσης, το αλουμίνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση σε σχέση με το χάλυβα για την εξοικονόμηση βάρους.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην ψυχρή σφυρηλάτηση παρέχονται ως χονδροσύρματα καθώς και στη μορφή κομμένων μπιγέτων. Οι διαστάσεις, το βάρος και το φινίρισμα της επιφάνειας της μπιγέτας ή γενικά του ακατέργαστου κομματιού πρέπει να ελέγχονται στενά προκειμένου να διατηρηθούν οι ανοχές διαστάσεων στο ψυχρά σφυρηλατόμενο κομμάτι καθώς και να αποφευχθεί η υπερβολική φόρτωση της πρέσας σφυρηλάτησης και των καλουπιών. [2]

1.2.2 ΗΜΙΘΕΡΜΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

Στη ψυχρή σφυρηλάτηση τεμαχίων με σχετικά πολύπλοκες γεωμετρίες και τα οποία έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και σε κράματα χάλυβα, οι πιέσεις σφυρηλάτησης είναι εξαιρετικά υψηλές ενώ η ολκιμότητα του υλικού είναι χαμηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή διάρκεια ζωής του εργαλείου-μήτρας. Επιπλέον, τα ελαττώματα που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης μειώνουν τη χρήση των διεργασιών ψυχρής σφυρηλάτησης από οικονομική σκοπιά. [2]

Κατά συνέπεια, σε πολλές περιπτώσεις, η ημίθερμη σφυρηλάτηση, δηλαδή, η σφυρηλάτηση μπιγέτας σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, χρησιμοποιείται ευρέως με σκοπό να μειωθεί η τάση ροής και οι πιέσεις κατά τη σφυρηλάτηση [4]. Στην ημίθερμη σφυρηλάτηση, οι χάλυβες συνήθως θερμαίνονται μεταξύ της θερμοκρασίας δωματίου και της συνήθους υψηλής θερμοκρασίας σφυρηλάτησης. Το σύνηθες θερμοκρασιακό πεδίο διακύμανσης θεωρείται ότι είναι από 1110 έως 1650 °F (600 έως 900 °C). Εξαίρεση αποτελεί η ημίθερμη σφυρηλάτηση των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων, οι οποίοι συνήθως σφυρηλατούνται σε ένα εύρος θερμοκρασίας μεταξύ 390 και 570 °F (200 και 300 °C). Μέχρι στιγμής το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής της ημίθερμης σφυρηλάτησης είναι η αυτοκινητοβιομηχανία. [2]

Η ημίθερμη σφυρηλάτηση μπορεί να ερμηνευθεί ευρέως ως μία θερμομηχανική διεργασία σε υψηλή θερμοκρασία ώστε να επιτευχθεί υψηλότερη αντοχή του σφυρηλατούμενου τεμαχίου, υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με την θερμή σφυρηλάτηση και βελτιωμένες ιδιότητες του τελικού τεμαχίου μέσω της εκλέπτυνσης των κόκκων. Επιπλέον, ιδιαίτερα σε χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε κράματα επιτυγχάνεται μείωση της τάσης ροής, με αποτέλεσμα οι τάσεις στη μήτρα και τα φορτία σφυρηλάτησης να μειώνονται. Ακόμη, η μεγαλύτερη ολκιμότητα του σφυρηλατημένου τεμαχίου επιτρέπει την σφυρηλάτηση τεμαχίων με πιο περίπλοκες γεωμετρίες. Τέλος, η μείωση στη σκλήρυνση λόγω παραμόρφωσης μπορεί να μειώσει τον αριθμό διεργασιών σχηματισμού και ανόπτησης. [2]

Η ημίθερμη σφυρηλάτηση απαιτεί τον προσδιορισμό της βέλτιστης θερμοκρασίας σφυρηλάτησης και την επιλογή του κατάλληλου λιπαντικού. Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου λιπαντικού έχει αποδειχτεί εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία. Ο παράγοντας που περιορίζει τη χρήση της ημίθερμης σφυρηλάτησης είναι ότι η τεχνολογία της διεργασίας αυτής εξακολουθεί να βρίσκεται υπό ανάπτυξη, ιδιαίτερα ως προς τους τομείς της επιφανειακής επεξεργασίας, της λίπανσης και των εργαλείων-μήτρης. Τα εργαλεία-μήτρης για την ημίθερμη σφυρηλάτηση είναι παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται στην κρύα σφυρηλάτηση, με κάποιες τροποποιήσεις που αφορούν την μήτρα έτσι ώστε να επιτρέπονται αυξημένες θερμοκρασίες, η ψύξη του εσωτερικού της μήτρας και ο αερισμός μέσω ψυκτικών μέσων. [2]

1.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΨΥΧΡΗΣ ΚΑΙ ΗΜΙΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Η ψυχρή και η ημίθερμη σφυρηλάτηση είναι εξαιρετικά σημαντικές και οικονομικά συμφέρουσες διεργασίες, ειδικά όσον αφορά την παραγωγή στρογγυλών ή σχεδόν στρογγυλών κομματιών σε μεγάλες ποσότητες. Ορισμένα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι διεργασίες αυτές είναι τα εξής [2]:

- υψηλός ρυθμός παραγωγής
- εξαιρετική αντοχή διαστάσεων και φινίρισμα επιφάνειας για τα σφυρηλατά κομμάτια
- σημαντική εξοικονόμηση στο υλικό και στην κατεργασία
- υψηλότερη εφελκυστική αντοχή όσον αφορά το σφυρηλατό κομμάτι σε σχέση με το υλικό αρχικό υλικό
- ευνοϊκή ροή κόκκων για την βελτίωση της αντοχής

1.2.4 ΙΣΟΘΕΡΜΙΚΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

Η ισοθερμική σφυρηλάτηση, η οποία υλοποιείται σε υδραυλική πρέσα, χρησιμοποιείται ευρέως στην κατεργασία τεμαχίων τα οποία βρίσκουν εφαρμογή στην αεροδιαστημική. Αναπτύχθηκε με σκοπό να παρέχει μία καθαρού σχήματος γεωμετρία τεμαχίων, τα οποία είναι δύσκολο να κατεργασθούν, και καλά ελεγχόμενες μικροδομές και ιδιότητες των συστατικών με ακριβείς ελέγχους της θερμοκρασίας κατεργασίας και της ταχύτητας παραμόρφωσης. Οι μήτρες θερμαίνονται στην ίδια θερμοκρασία με το τεμάχιο προς κατεργασία, επιτρέποντας τη διαμόρφωση τεμαχίων ακριβούς γεωμετρίας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση λιγότερων πρώτων υλών και ελάχιστων διεργασιών μετά τη σφυρηλάτηση. Ωστόσο, η διεργασία αυτή απαιτεί μια μεγάλη αρχική επένδυση κεφαλαίου για τον εξοπλισμό. [2]

Μια σε βάθος κατανόηση των πλαστικών ιδιοτήτων των σφυρηλατούμενων υλικών είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τον σχεδιασμό μιας κατεργασίας ισοθερμικής σφυρηλάτησης, δεδομένου ότι βάσει αυτής γίνεται η επιλογή των λοιπών στοιχείων, όπως του εξοπλισμού, του υλικού των καλουπιών και των λιπαντικών. [2]

Τα κράματα αλουμινίου γενικά σφυρηλατούνται ισοθερμικά, καθώς οι μήτρες θερμαίνονται εύκολα στο ίδιο εύρος θερμοκρασιών όπως το κατεργάσιμο υλικό (περίπου 800 °F ή 425 °C). Καθώς η ισοθερμική σφυρηλάτηση κραμάτων αλουμινίου είναι μια ήδη ανεπτυγμένη διεργασία, είναι ορθότερο να επικεντρωθούμε σε κράματα υψηλής θερμοκρασίας όπως τιτανίου και νικελίου. [2]

Στην ισοθερμική σφυρηλάτηση τιτανίου και υπερκραμάτων βάσει νικελίου οι θερμοκρασίες σφυρηλάτησης είναι πολύ υψηλές (1700 έως 2200 °F, ή 925 έως 1205 °C). Τα υπερκράματα με

βάσει το νικέλιο αναπτύχθηκαν για μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και για αυξημένη αντοχή στον ερπυσμό. Συνεπώς, είναι δύσκολο να επεξεργαστούν σε σφυρηλάτη μορφή. Τα χυτά με υψηλή περιεκτικότητα σε κράματα και τα σφυρηλάτα υπερκράματα παρουσιάζουν ένα πολύ στενό περιθώριο επεξεργασίας. Τα νέα υλικά κονομεταλλουργίας (P/M) τα οποία έχουν ακόμη υψηλότερη περιεκτικότητα σε κράματα, παρουσιάζουν ακόμη περισσότερη ευαισθησία στη θερμοκρασία και στην ταχύτητα παραμόρφωσης και απαιτούν υπερελαστικές συνθήκες σφυρηλάτησης με χαμηλή ταχύτητα παραμόρφωσης προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη ανώμαλης δομής κατά τη διάρκεια θερμικών διεργασιών μετά την σφυρηλάτηση. [2]

Η ταχύτητα παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται στην ισοθερμική σφυρηλάτηση είναι συνήθως χαμηλή έτσι ώστε να μειωθεί η αδιαβατική θέρμανση, να διατηρηθεί η υπερελαστική συμπεριφορά του υλικού, και να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις επεξεργασίας των προϊόντων κονομεταλλουργίας (P/M) τα οποία έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε κράματα. Στην ισοθερμική σφυρηλάτηση, παρόλο που η ταχύτητα παραμόρφωσης είναι χαμηλή και ο χρόνος σφυρηλάτησης είναι μεγάλος, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα καλούπια θερμαίνονται στην ίδια και ίση θερμοκρασία με το τεμάχιο επεξεργασίας, δεν συμβαίνει ψύξη των καλουπιών όπως στη συμβατική σφυρηλάτηση. [2]

Όσον αφορά τα υλικά καλουπιών, για την περίπτωση της ισοθερμικής σφυρηλάτησης τα υπερκράματα βάσει σιδήρου και κοβαλτίου θεωρούνται ακατάλληλα ως υλικά καλουπιών λόγω της χαμηλής αντοχής σε ερπυσμό που παρουσιάζουν σε θερμοκρασίες άνω των 1500 °F (815 °C). Αντιθέτως, τα σφυρηλάτα υπερκράματα βάσει νικελίου είναι κατάλληλα για ισοθερμική σφυρηλάτηση κραμάτων τιτανίου σε θερμοκρασία ίση ή χαμηλότερη των 1700 °F (925 °C). Αυτό που κάνει αυτά τα σφυρηλάτα υπερκράματα βάσει νικελίου ελκυστικά ως υλικά για καλούπια είναι η δομική τους ακεραιότητα καθώς και ότι μπορούν να διατηρήσουν τη ελαστικότητα τους σε θερμοκρασιακό εύρος των 1500-1700 °F (815 έως 925 °C). Ωστόσο, στην πράξη, η θερμοκρασία των καλουπιών από υπερκράματα με βάση το νικέλιο διατηρείται περίπου ίση ή χαμηλότερη από 1650 °F (900 °C) έτσι ώστε να παραταθεί η διάρκεια ζωής των καλουπιών στην περίπτωση μεγάλων σειρών παραγωγής. Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση έχουμε μία σχεδόν ισοθερμική σφυρηλάτηση αντί για καθαρά ισοθερμική σφυρηλάτηση. Επίσης, και τα χυτά υπερκράματα με βάση το νικέλιο είναι αποδεχτά ως υλικά για τα καλούπια. Επιπλέον, στην ισοθερμική σφυρηλάτηση τιτανίου και υπερκραμάτων βάσει νικελίου, δεδομένου ότι οι θερμοκρασίες σφυρηλάτησης είναι πολύ υψηλές (1700 έως 2200 °F, ή 925 έως 1205 °C), ως υλικά εργαλείων-μήτρες χρησιμοποιούνται συχνά υπερκράματα και κράματα μολυβδαινίου. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των κραμάτων είναι ότι είναι επιρρεπή σε ταχεία οξειδωση σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ενός περιβάλλοντος κενού ή ενός περιβάλλοντος από αδρανή αέρια, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αρχική επένδυση κεφαλαίου της ισοθερμικής σφυρηλάτησης. [2]

1.2.5 ΘΕΡΜΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ

Στην παραγωγή εξαρτημάτων που βρίσκουν εφαρμογή στην αεροδιαστημική, εκτός από την ισοθερμική σφυρηλάτηση, χρησιμοποιείται ευρέως και η θερμή σφυρηλάτηση σε υδραυλικές πρέσες. Η θερμή σφυρηλάτηση σε σχέση με την ισοθερμική σφυρηλάτηση αναπτύχθηκε για να μειωθεί το αρχικό κόστος επένδυσης. Παράλληλα, όμως, μειώθηκαν οι απαιτήσεις σε θερμοκρασία καλουπιού και σε ικανότητα καθαρής γεωμετρίας σχήματος. [2]

Οι θερμοκρασίες των καλουπιών που χρησιμοποιούνται στη θερμή σφυρηλάτηση είναι συνήθως μερικές εκατοντάδες βαθμούς χαμηλότερες από τη θερμοκρασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ωστόσο, είναι πολύ υψηλότερες από τις θερμοκρασίες των καλουπιών που χρησιμοποιούνται στη συμβατική σφυρηλάτηση. Η μεταφορά θερμότητας από το θερμό υλικό στα ψυχρότερα καλούπια μπορεί να οδηγήσει στην ψύξη του τεμαχίου. Συνεπώς, τα καλούπια συνήθως θερμαίνονται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται περίπου από 400 έως 800 °F (205 έως 425 °C) έτσι ώστε να μειωθεί η μεταφορά θερμότητας. Για να διατηρούνται τα καλούπια σε μια σταθερή υψηλή θερμοκρασία απαιτείται η συνεχής θέρμανση αυτών. Για το σκοπό αυτό, συνήθως χρησιμοποιούνται συστήματα επαγωγής, αντίστασης και ακτινοβολίας. [2]

Τόσο στην ισοθερμική όσο και στην θερμή σφυρηλάτηση, λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών των καλουπιών, η επιλογή των υλικών μήτρας είναι ένα εξαιρετικά κρίσιμο κομμάτι της διαδικασίας σχεδιασμού σφυρηλάτησης. Οι διάφοροι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια της επιλογής των υλικών των καλουπιών είναι η αντοχή στη φθορά και στον ερπυσμό, η σκληρότητα σε υπερθέρμανση και η συνολική δομική ακεραιότητα. [2]

Όταν οι θερμοκρασίες της μήτρας είναι στην περιοχή των θερμοκρασιών που συναντώνται στη συμβατική θερμή σφυρηλάτηση, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία εργαλείων-μήτρης από χάλυβες χαμηλού κράματος. Ωστόσο, τα συμβατικά υλικά καλουπιών δεν επιτρέπουν τη χρήση θερμοκρασιών υψηλότερων από 800 °F (425 °C), καθώς σε θερμοκρασίες πάνω από το όριο αυτό χάνουν τη δύναμη και τη σκληρότητα τους. Συνεπώς, όταν σφυρηλατούνται τεμάχια από τιτάνιο ή από κράματα βάσει νικελίου, όπου οι θερμοκρασίες είναι στην κλίμακα από 1500 έως 2000 °F (815 έως 1095 °C), τότε το εύρος ποικιλίας υλικών για τα καλούπια περιορίζεται και κυμαίνεται από υπερκράματα και πυρίμαχα κράματα μετάλλων έως κεραμικά. [5]

Η ταχύτητα παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι συνήθως μία τάξη μεγέθους υψηλότερη από αυτή που χρησιμοποιείται στην ισοθερμική σφυρηλάτηση, με σκοπό να μειωθεί η ψύξη των καλουπιών. Λόγω της υψηλότερης ταχύτητας παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται στη θερμή σφυρηλάτηση, τα υλικά κονομεταλλουργίας (P/M) τα οποία έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε κράματα δε χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διεργασία. Αντιθέτως, στη θερμή σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται συχνά τα κράματα τιτανίου και τα χυτά και σφυρήλατα υπερκράματα. Γενικά, το

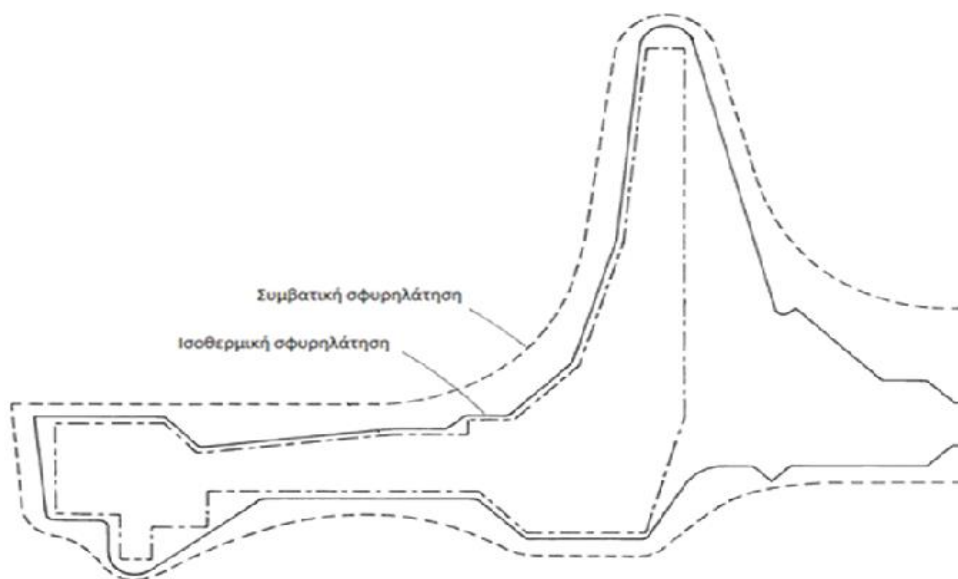
κατεργαζόμενο τεμάχιο μπορεί να επιλέγεται βάσει του υλικού, της μικροδομής, των απαιτούμενων ιδιοτήτων καθώς και βάσει οικονομικών παραγόντων. [2]

Τέλος, καθώς η θερμή σφυρηλάτηση δεν πραγματοποιείται σε κενό / αδρανές περιβάλλον, αμέσως μετά την σφυρηλάτηση μπορεί να εφαρμοστεί μία γρήγορη διεργασία ψύξης όπως απόσβεση με νερό ή με έλαια, η οποία συνήθως δεν είναι δυνατή στην ισοθερμική σφυρηλάτηση. [2]

1.2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΣΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Η ισοθερμική και η θερμή σφυρηλάτηση έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα [2]:

- Καλύτερες ανοχές σε σχέση με την συμβατική σφυρηλάτηση, το οποίο οφείλεται στη μη της ψύξης της μήτρας.
- Μείωση του κόστους κατεργασίας και των υλικών ζημιών. Οι διεργασίες αυτές επιτρέπουν το σχηματισμό μικρότερων γωνίων και ακτίνων και γενικά την κατασκευή μικρότερων αντικειμένων, με αποτελέσματα να πετυχαίνεται εξοικονόμηση υλικού και μείωση του φορτίου σφυρηλάτησης. (Σχήμα 1.4)
- Η απαλοιφή της ψύξης της μήτρας έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη μείωση των βημάτων προδιαμόρφωσης, και συνεπώς μειώνεται έτσι και το κόστος της μήτρας.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργή ταχύτητα παραμόρφωσης (δηλαδή υδραυλική πρέσα). Αυτό μειώνει την ταχύτητα παραμόρφωσης και την τάση ροής του σφυρηλατούμενου υλικού. Εξαιτίας της μείωσης των πιέσεων σφυρηλάτησης, μπορούν να σφυρηλατηθούν μεγαλύτερα τεμάχια χρησιμοποιώντας τον ίδιο εξοπλισμό.



Σχήμα 1.4: Μείωση βάρους που εξοικονομήθηκε μέσω της ισοθερμικής σφυρηλάτησης ενός δισκοειδούς τεμαχίου σε σχέση με μία συμβατική σφυρηλάτηση. [6]

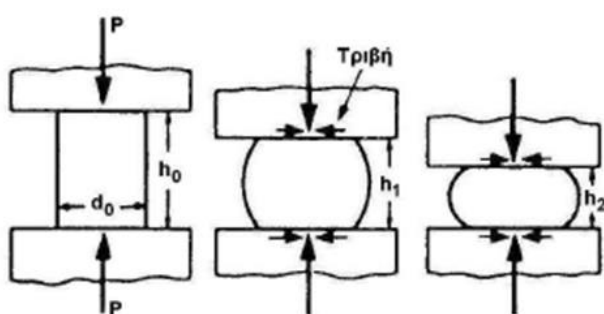
1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Μια ταξινόμηση των κατεργασιών σφυρηλάτησης βάσει της διάταξης των καλουπιών είναι η εξής [3]:

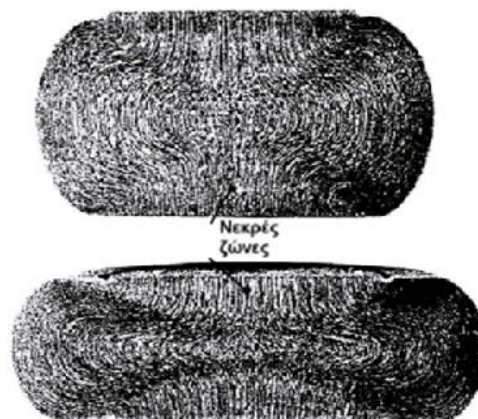
- Σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας (open-die forging)
- Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας (closed-die forging)
- Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή (impression-die forging)

1.3.1 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Στη σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας οι δυνάμεις συμπίεσης παράγονται από εργαλεία χειρός ή μηχανικές σφύρες και ασκούνται τοπικά στο τεμάχιο (Σχήμα 1.5). Ο πλευρικός περιορισμός στη ροή του μετάλλου ελλείπει ή περιορίζεται σε πολύ μικρή έκταση. Το επιθυμητό σχήμα αποδίδεται στο τεμάχιο με απλή μετακίνηση ή στροφή του μεταξύ διαδοχικών κτυπημάτων. Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατεργασίας σφυρηλάτησης είναι ότι έχει απλά και φθηνά εργαλεία, είναι χρήσιμη για μικρή παραγωγή τεμαχίων, εφαρμόζεται σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών τεμαχίων και αποδίδει χαρακτηριστικά καλής αντοχής στο τεμάχιο. Τα μειονεκτήματα της είναι ότι περιορίζεται σε απλές γεωμετρίες, παρουσιάζει δυσκολία επίτευξης διαστασιακής ακρίβειας, είναι απαραίτητη η δευτερογενής κατεργασία των τεμαχίων για την απόκτηση της τελικής τους μορφής, γίνεται σχετικά μικρή εκμετάλλευση του υλικού, έχει αργό ρυθμό παραγωγής και συνεπώς έχει χαμηλή παραγωγικότητα και απαιτεί εμπειρία και τεχνική δεξιότητα σε μεγάλο βαθμό. [3]



Σχηματική παράσταση σφυρηλάτησης ανοιχτής μήτρας

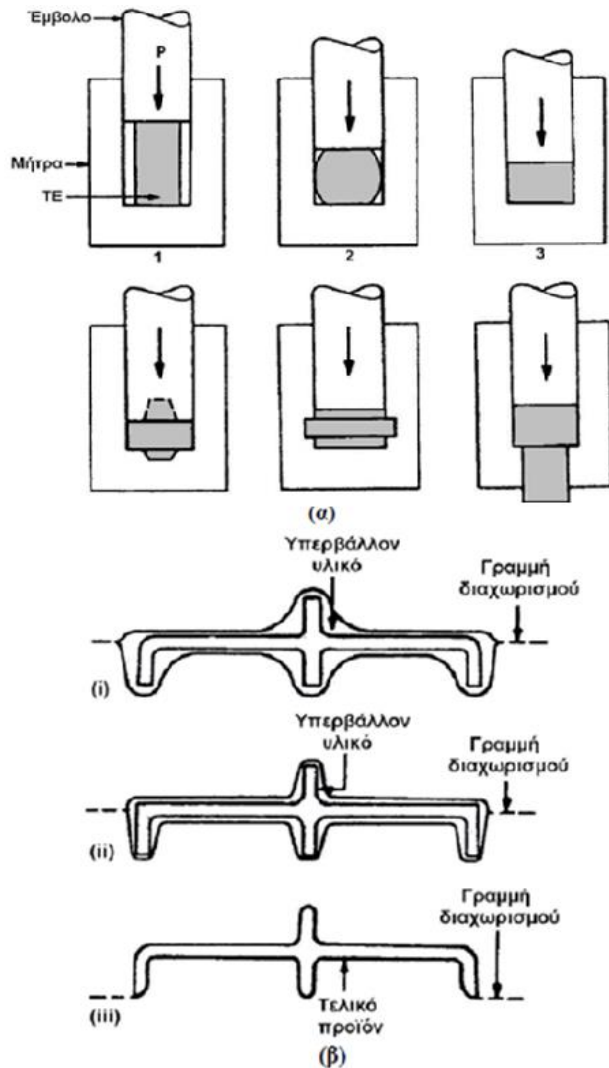


Ροή του υλικού κατά τη σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας

Σχήμα 1.5: Σφυρηλάτηση ανοιχτής μήτρας [3]

1.3.2 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Στη σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας τα θλιπτικά φορτία που παράγονται από σφύρες ή πρέσες ασκούνται σε όλη την επιφάνεια του θερμαινόμενου μετάλλου (Σχήμα 1.6(α)). Το κατεργαζόμενο υλικό παραμορφώνεται πλαστικά μέσα σε ειδικά διαμορφωμένο καλούπι και καταλαμβάνει όλη τη διαθέσιμη κοιλότητα η οποία έχει γεωμετρία και διαστάσεις ανάλογες με αυτές του τελικού τεμαχίου. Ανάλογα με την ακρίβεια των διαστάσεων που αποδίδεται στο τελικό προϊόν, χαρακτηρίζεται και η αντίστοιχη κατεργασία κλειστής μήτρας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.6(β). Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατεργασίας σφυρηλάτησης είναι ότι κάνει καλή εκμετάλλευση του υλικού, το τεμάχιο έχει καλύτερες ιδιότητες από εκείνες της σφυρηλάτησης ανοιχτής μήτρας, επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση των διαστάσεων του τεμαχίου, έχει ταχύ ρυθμό παραγωγής και καλή παραγωγικότητα. Τα μειονεκτήματά της είναι ότι παρουσιάζει υψηλό κόστος εργαλείων για μικρές ποσότητες παραγωγής, ενώ δεν αποκλείεται η δευτερογενής κατεργασία του τεμαχίου. [3]



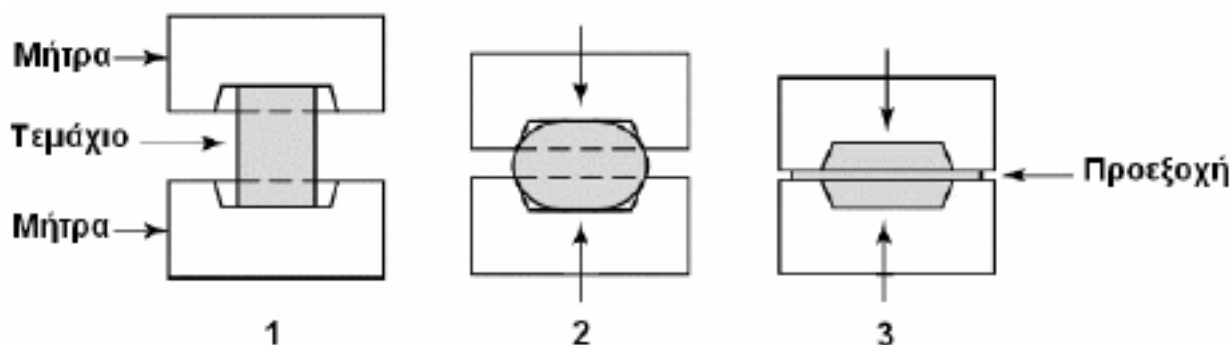
Σχήμα 1.6: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) Διαδικασία πλήρωσης του καλούπιού, (β) Σφυρηλάτηση ακριβείας: (i) Απλής μορφής, (ii) Τυπικής μορφής, (iii) Near-net-shape. [3]

1.3.3 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ

Η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή πρόκειται για παραλλαγή της σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας (Σχήμα 1.7). Το υλικό του τεμαχίου είναι σε ποσότητα μεγαλύτερη από τον διατιθέμενο όγκο της κοιλότητας του καλουπιού, οπότε μέρος του υλικού εξέρχεται σε σχετικά αρχικό στάδιο ως προεξοχή ή προέκταμα (flash) μεταξύ των δύο μερών του καλουπιού έξω από την κοιλότητα αυτού, όπου και παραμορφώνεται. [3]

Στη ψυχρή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου μήκος/πάχος στην περιοχή της προεξοχής, αναπτύσσονται εκεί υψηλές κάθετες τάσεις (πιέσεις) και κατά συνέπεια μεγάλη αντίσταση τριβής στην ροή του υλικού προς τα έξω. Το υπόλοιπο υλικό μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού, αφού παρεμποδίζεται να κινηθεί προς τα έξω αναγκάζεται να κινηθεί προς άλλες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα την ασφαλή πλήρωση της κοιλότητας. [3]

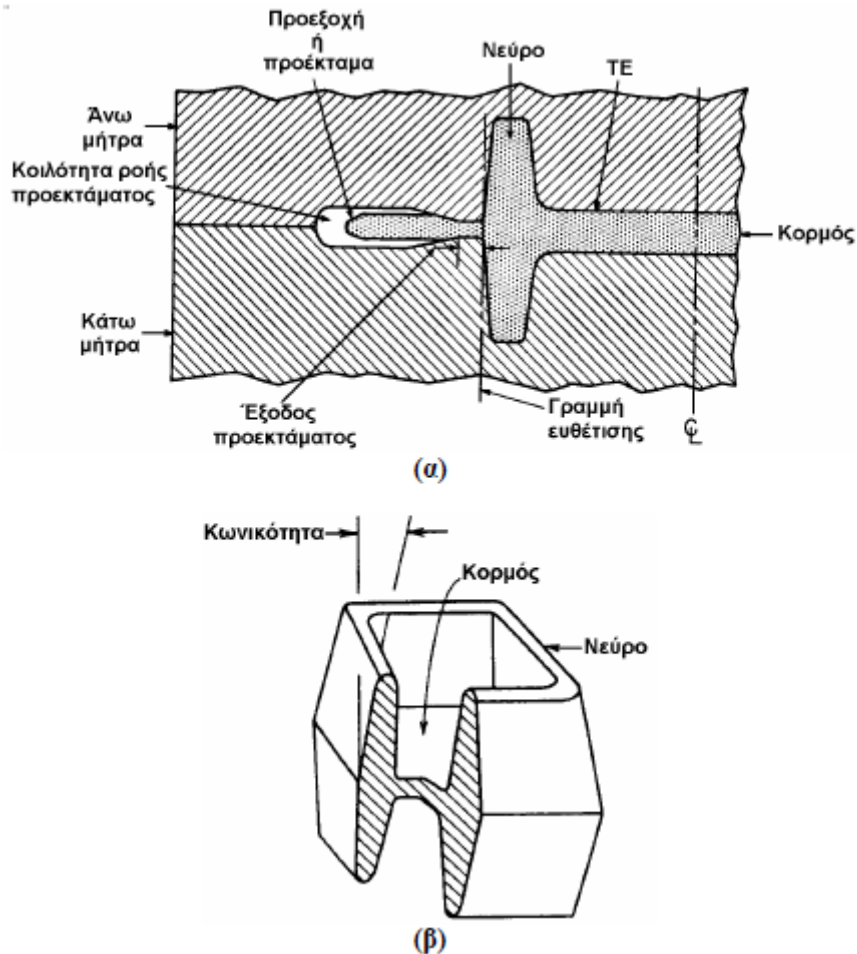
Στη θερμή σφυρηλάτηση, λόγω του μεγάλου λόγου επιφάνεια/πάχος στην περιοχή της προεξοχής, αυτή λειτουργεί ως πτερύγιο, το οποίο σύμφωνα με τις αρχές μετάδοσης θερμότητας αποψύχεται ταχύτερα από το υπόλοιπο υλικό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της αντίστασης του υλικού προς περαιτέρω παραμόρφωση στην περιοχή της προεξοχής και ο εξαναγκασμός της ροής του υπόλοιπου υλικού να κινηθεί μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού. [3]



Σχήμα 1.7: Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας με προεξοχή [3]

1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Τα καλούπια σφυρηλάτησης κατασκευάζονται κατεξοχήν διμερή. Διακρίνουμε λοιπόν το άνω τμήμα και το κάτω τμήμα του καλουπιού. Οι κανόνες κατασκευής του καλουπιού αποβλέπουν αφενός στη διευκόλυνση της ροής του κατεργάσιμου υλικού και αφετέρου στην ευχερή απομάκρυνση του τεμαχίου από το καλούπι. Επομένως, η γεωμετρία του τεμαχίου σε κάθε φάση κατεργασίας (πάσο) παίζει πολύ ιδιαίτερο ρόλο στο σχεδιασμό του καλουπιού. Βάση των κατασκευαστικών στοιχείων που συναντώνται στα περισσότερα σφυρήλατα τεμάχια εισάγεται η ορολογία που περιγράφεται στο Σχήμα 1.8. [3]



Σχήμα 1.8: Χαρακτηριστική ορολογία στην κατασκευή καλουπιού σφυρηλάτησης. (α) Εγκάρσια διατομή τεμαχίου/καλουπιού (β) Τρισδιάστατη μορφή σφυρήλατου τεμαχίου [3]

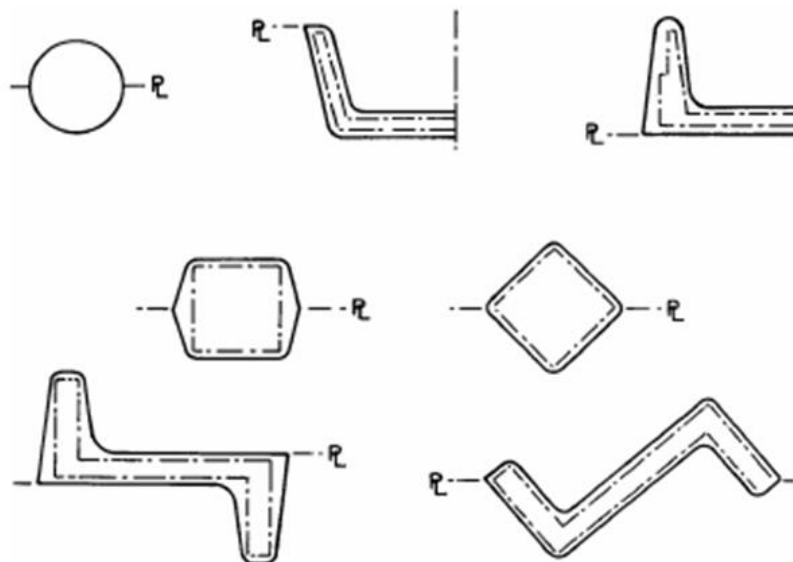
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σημασία διαφόρων παραμέτρων στο σχεδιασμό των καλουπιών.

Γραμμή διαχωρισμού

Η μορφή και η θέση της γραμμής διαχωρισμού είναι το πιο σημαντικό θέμα στο σχεδιασμό σφυρήλατων τεμαχίων. Σ' αυτήν συναντώνται τα δύο μέρη του καλουπιού. Εκτός από την προφανή ανάγκη εύκολης απομάκρυνσης του τεμαχίου από το καλούπι, η επιλογή βέλτιστης θέσης της εξαρτάται από πολλούς τεχνικο-οικονομικούς παράγοντες που συχνά αλληλοσυγκρούονται, όπως είναι:

- Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός κατεργασίας.
- Η μελέτη, η κατασκευή και το κόστος κατασκευής του καλουπιού.
- Η ροή του κατεργάσιμου υλικού.
- Η διαδικασία αποκοπής του προεκτάματος.
- Ο βαθμός χρησιμοποίησης του κατεργάσιμου υλικού.

Μπορεί, λοιπόν, η γραμμή διαχωρισμού να είναι ευθεία (συμμετρικές μορφές σφυρήλατων) ή τεθλασμένη στο χώρο (πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές) (Σχήμα 1.9), επιδιώκεται όμως να κείται σε ένα επίπεδο, να διευκολύνει τη ροή του υλικού, να μην οδηγεί σε ανισοζύγιο δυνάμεων στα τμήματα του καλουπιού και να εξασφαλίζει αποτελεσματικό προέκταμα. [3]



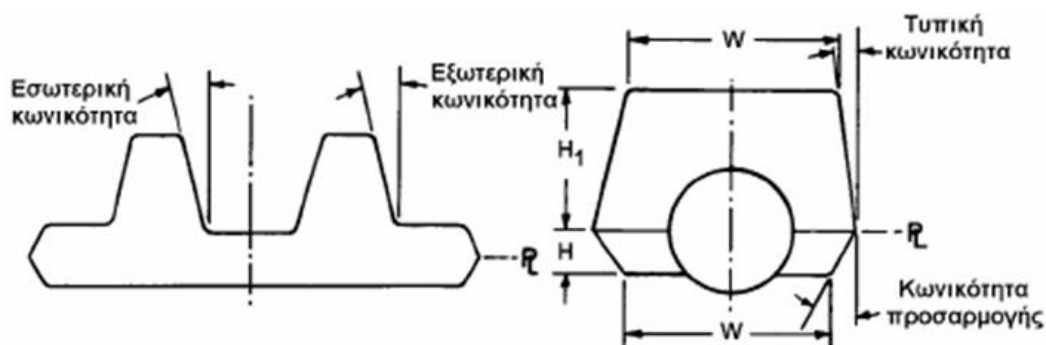
Σχήμα 1.9: Χαρακτηριστικές γραμμές διαχωρισμού σφυρήλατων αντικειμένων [3]

Κωνικότητα

Ο ρόλος της κωνικότητας είναι πρωταρχικά η διευκόλυνση απομάκρυνσης του σφυρήλατου από τη μήτρα και σε ορισμένες περιπτώσεις η επίτευξη της επιθυμητής ροής υλικού. Διάφορα είδη κωνικότητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.10. Διακρίνονται σε:

- Εξωτερική και εσωτερική κωνικότητα.
- Τυπική κωνικότητα και κωνικότητα προσαρμογής.

Συνήθεις τιμές της γωνίας κωνικότητας είναι από 3° έως 10°. Οι γωνίες εσωτερικής κωνικότητας έχουν μεγαλύτερες τιμές και κυμαίνονται από 7°-10°, ενώ οι γωνίες εξωτερικής κωνικότητας κυμαίνονται από 3° έως 5°. [3]



Σχήμα 1.10: Είδη κωνικότητας [3]

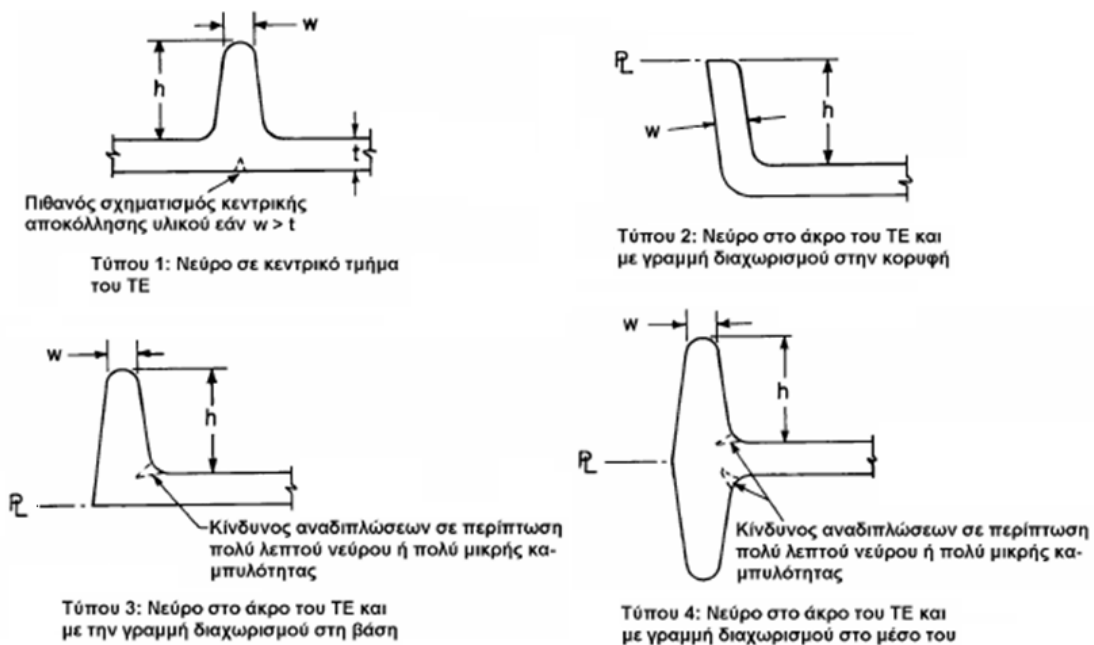
Η καμπυλότητα προσαρμογής υπαγορεύεται όταν ασύμμετρα νεύρα συναντώνται στην γραμμή διαχωρισμού, οπότε υπάρχει ανάγκη απόκλισης από τις τυπικές τιμές προς μεγαλύτερες (Σχήμα 1.11). [3]



Σχήμα 1.11: Κωνικότητα προσαρμογής [3]

Νεύρα

Τα νεύρα είναι τμήματα του σφυρήλατου τεμαχίου που κείνται κάθετα προς το επίπεδο της γραμμής διαχωρισμού. Στην κοινή πρακτική συνιστάται να αποφεύγονται ογκώδη νεύρα διότι οδηγούν σε υπέρβαρα τεμάχια. Υπάρχουν όμως περιορισμοί σ' αυτή την επιδίωξη που υπαγορεύονται από τις συνθήκες κατεργασίας, την γεωμετρία του τεμαχίου, τη θέση και διάταξη της γραμμής διαχωρισμού και την ολκιμότητα του κατεργάσιμου υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, έχουν τυποποιηθεί τέσσερα είδη νεύρων που παρατηρούνται συχνότερα στα συνήθη σφυρήλατα, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.12. [3]

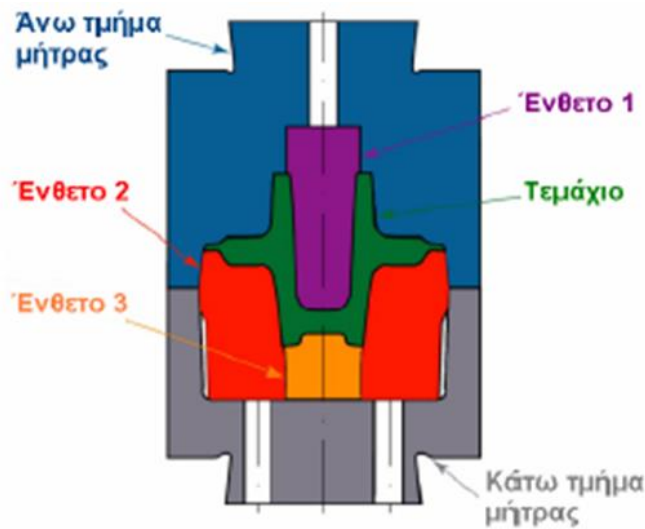


Σχήμα 1.12: Είδη νεύρων σε τυπικά σφυρήλατα τεμάχια [3]

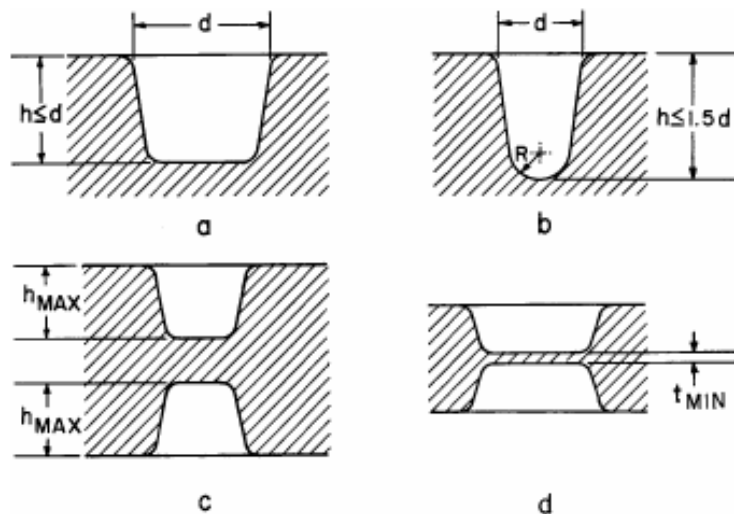
Εμβυθίσεις - κορμοί - καμπυλότητες

Ο σχηματισμός εμβυθίσεων στο κατεργάσιμο υλικό επιδιώκεται στα αρχικά και ενδιάμεσα στάδια κατεργασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πρόσθετα ένθετα στοιχεία μέσα στο καλούπι που δρουν σαν είδος εμβόλου τοπικά (Σχήμα 1.13). Οι εμβυθίσεις αυτές οδηγούν με τη σειρά τους στο σχηματισμό κορμών και νεύρων. Τυπικές μορφές και διαστάσεις των στοιχείων αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.14.

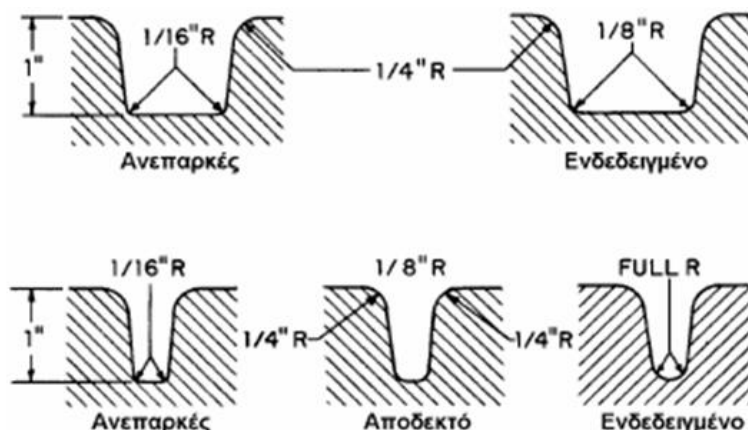
Οι καμπυλότητες στα άκρα των νεύρων και των κορμών πρέπει εξασφαλίζουν την αύξηση της διάρκειας ζωής του καλούπιου, αφενός με διευκόλυνση της ροής του υλικού μέσα στο καλούπι και αφετέρου με εξασφάλιση απρόσκοπτης απομάκρυνσης του τεμαχίου από το καλούπι. Ενδεικτικές τιμές καμπυλοτήτων σε χαρακτηριστικές μορφές σφυρήλατων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.15. [3]



Σχήμα 1.13: Διαμόρφωση εμβυθίσεων, νεύρων και κορμού [3]



Σχήμα 1.14: Ενδεικτικές διαστάσεις χαρακτηριστικών εμβυθίσεων [3]



Σχήμα 1.15: Συνιστώμενες καμπυλότητες σε χαρακτηριστικές περιοχές σφυρηλάτων. [3]

Προέκταμα

Όσον αφορά τις διαστάσεις του προεκτάματος, συνιστώνται:

- Τελικό πάχος προεκτάματος: ~3% του μέγιστου πάχους του σφυρηλάτου τεμαχίου.
- Μήκος εξόδου προεκτάματος: ~5πλάσιο του τελικού πάχους προεκτάματος. [3]

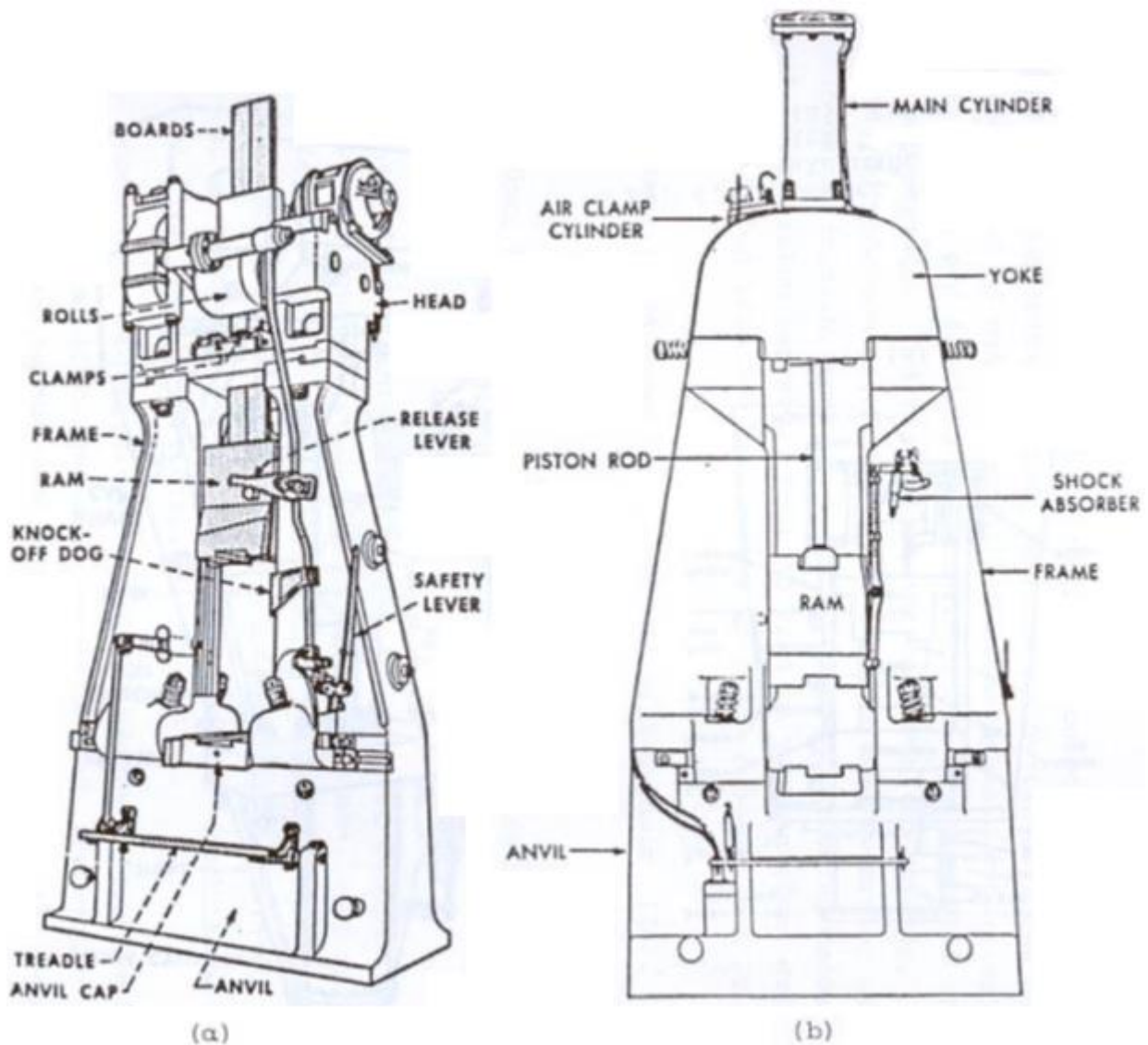
1.5 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Μέχρι περίπου το 1820 η σφυρηλάτηση ήταν κυρίως αντικείμενο του σιδηρουργού. Η χρήση των εργαλείων χειρός (σφύρα και αμόνι) αντικαταστάθηκε σήμερα από μηχανικά μέσα που εκτελούν την κατεργασία σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα είχε ήδη αναπτυχθεί όχι μόνο η κατασκευή των σφυρών, αλλά και η κατασκευή διαφόρων άλλων μηχανών ισχύος για σιδηρουργεία. Σήμερα η σφυρηλάτηση πραγματοποιείται σε σφύρες και πρέσες (μηχανικές και υδραυλικές) οι οποίες ανάλογα με τη διάταξη των εργαλείων χρησιμοποιούνται σε σφυρηλάτηση ανοικτής ή κλειστής μήτρας [1]. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή αυτών των μηχανών.

1.5.1 ΣΦΥΡΕΣ

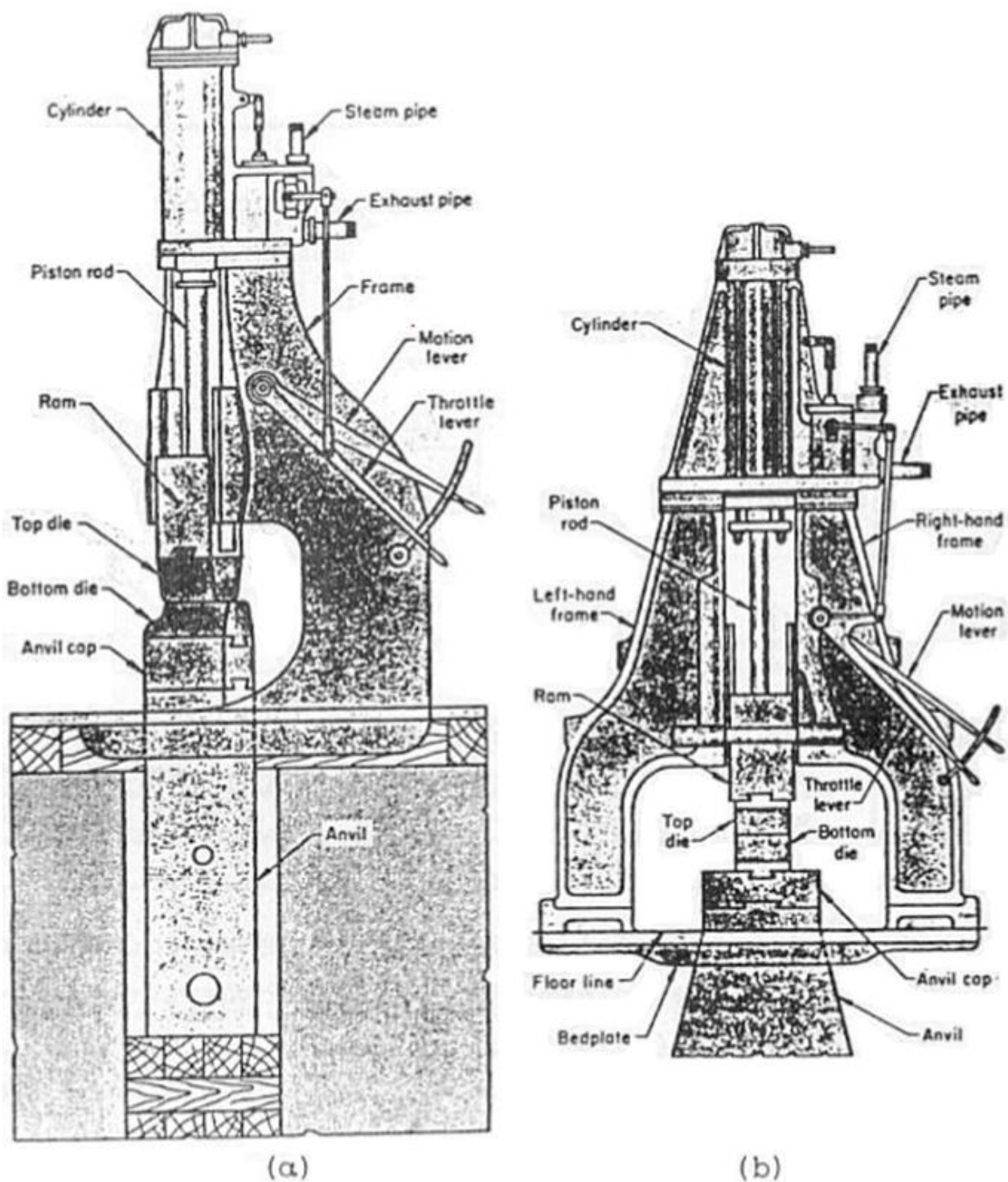
Οι σφύρες είναι μηχανές με κύριο χαρακτηριστικό την παραγόμενη κρουστική ενέργεια (energy bound) που το μεγαλύτερο μέρος της προσδίδεται στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο με τη μορφή πλαστικού έργου. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται μια σφύρα και διάφορες μορφές σφυρών για σφυρηλάτηση ανοικτής και κλειστής μήτρας δίνονται στα Σχήματα 1.16, 1.17 και 1.18. Ανάλογα με τον τρόπο που κινείται η μάζα του εμβόλου για να προσκρούσει στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο οι σφύρες διακρίνονται σε [7]:

- Σφύρες πίπτουσας μάζας (Σχήμα 1.16 (α) και (β)), που η ανύψωση της μάζας στο επιθυμητό ύψος επιτυγχάνεται είτε μηχανικά, είτε πνευματικά με πεπιεσμένο αέρα.
- Αερόσφυρες ή Ατμόσφυρες που η μάζα επιταχύνεται μέσω πεπιεσμένου αέρα, αερίου ή ατμού. (Σχήμα 1.17 (α) και (β) και Σχήμα 1.18 (α)).

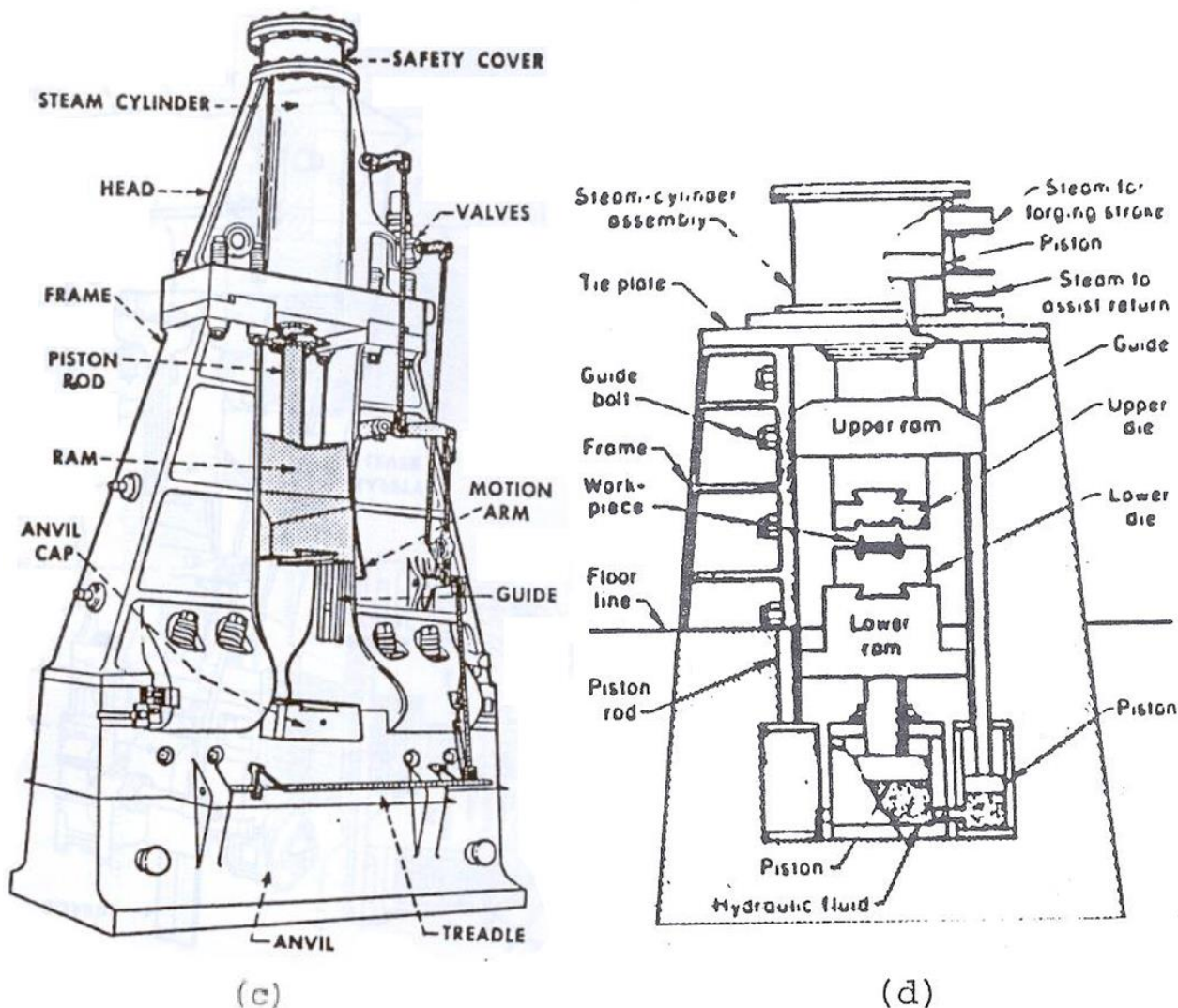


Σχήμα 1.16: Σφύρες για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (α) και (β): Σφύρες πίπτουσας μάζας. [7]

Στις συνήθεις αυτές σφύρες το μεγαλύτερο ποσό της κρουστικής ενέργειας προσδίδεται στο προς σφυρηλάτηση αντικείμενο σαν πλαστικό έργο ενώ το υπόλοιπο ποσό, που είναι απώλεια ενέργειας, μεταβιβάζεται στο εργαλείο σφυρηλάτησης, στη θεμελίωση και στο σώμα της μηχανής. Για την αύξηση της απόδοσης της μηχανής, δηλαδή την πρόσδοση μεγαλύτερου ποσού κρουστικής ενέργειας στο κατεργάσιμο τεμάχιο, χρησιμοποιούνται σφύρες «αντίθετης πρόσκρουσης» (counterblow hammers) όπου το τεμάχιο σφυρηλατείται στην επιθυμητή μορφή μέσω δυο αντίθετα κινουμένων εμβόλων (Σχήμα 1.18 (b)). [7]



Σχήμα 1.17: Σφύρες για σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας [7]



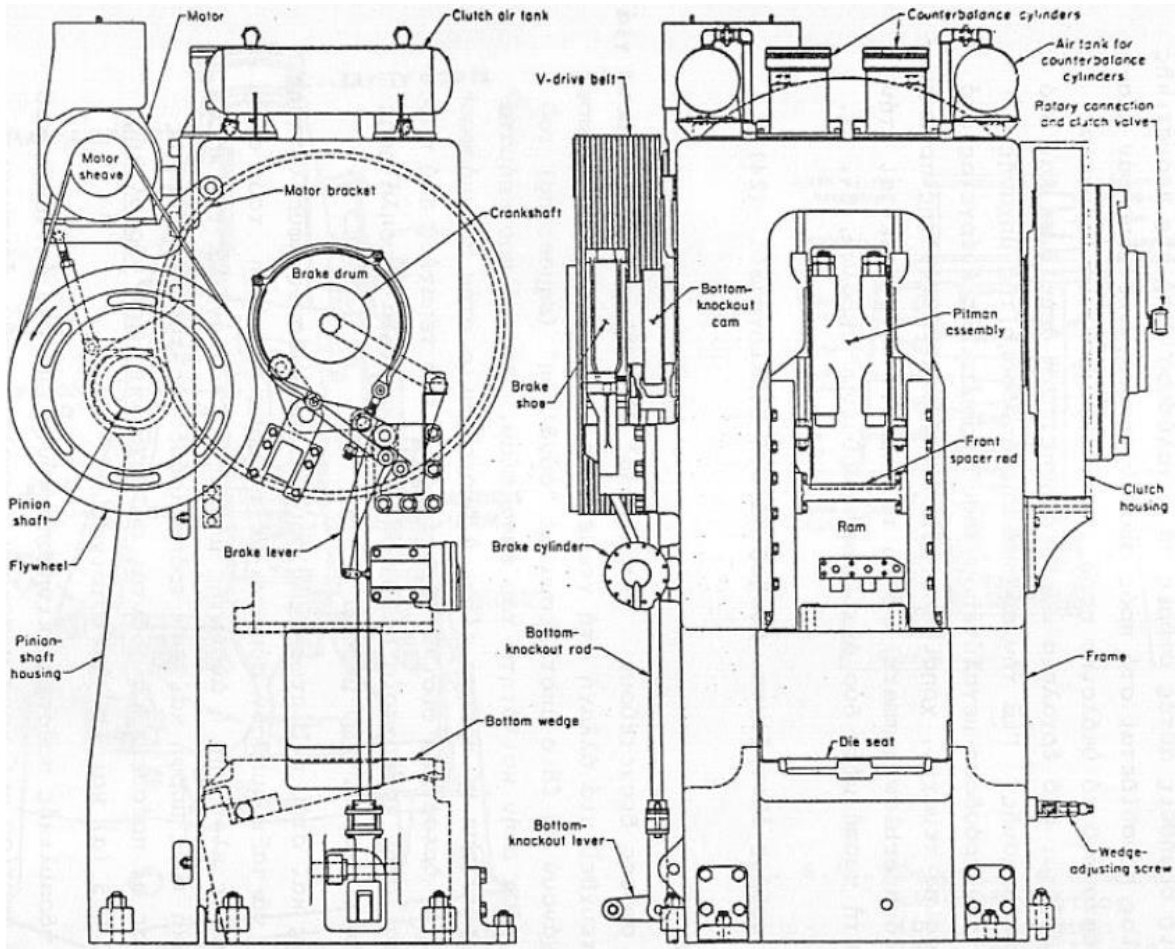
Σχήμα 1.18: Σφύρα για σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας. (c) Ατμόσφουρα, (b) Σφύρα “Αντίθετης πρόσκρουσης”. [7]

1.5.2 ΠΡΕΣΕΣ

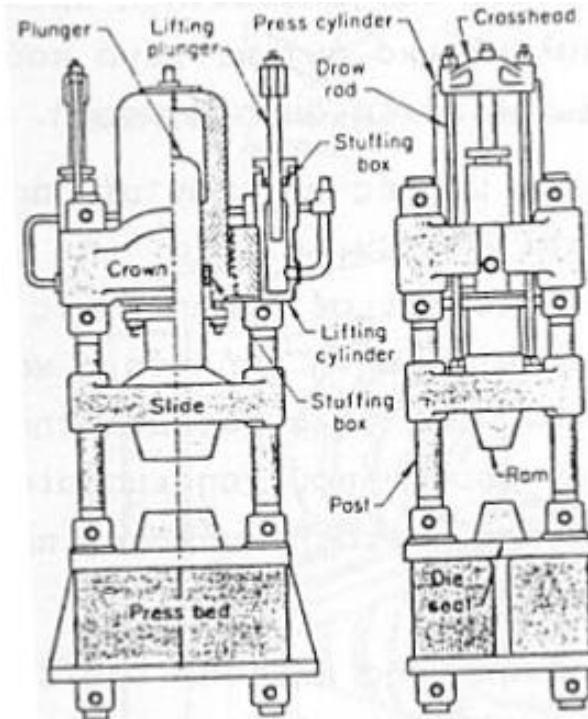
Οι σφύρες διοχετεύουν «χτυπήματα» (blows) στο αντικείμενο για να επιτευχθεί μια αλλαγή στη γεωμετρική μορφή του. Οι πρέσες επιτυγχάνουν το ίδιο αποτέλεσμα με «σύνθλιψη» (squeezing) του υλικού μέσα στην κοιλότητα του εργαλείου. Βασικά προτερήματα στη σφυρηλάτηση με πρέσα είναι η ομοιογένεια στην παραμόρφωση, η αποφυγή ορισμένων φυσικών ελαττωμάτων του τεμαχίου που παρουσιάζονται στην κατεργασία με σφύρα, η δυνατότητα σφυρηλάτησης πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών κλπ. [7]

Όπως και στην περίπτωση των σφυρών, οι πρέσες σφυρηλάτησης μπορεί να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη χρησιμοποίησή τους σε κατεργασίες ανοικτής ή κλειστής μήτρας. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους μορφή και τον τρόπο πρόσδοσης της απαραίτητης ενέργειας οι πρέσες διαιρούνται σε μηχανικές και υδραυλικές, όπως παρουσιάζονται στα Σχήμα 1.19 και Σχήμα 1.20 αντίστοιχα. [7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ



Σχήμα 1.19: Βασικά μέρη μιας μηχανικής πρέσας σφυρηλάτησης [7]



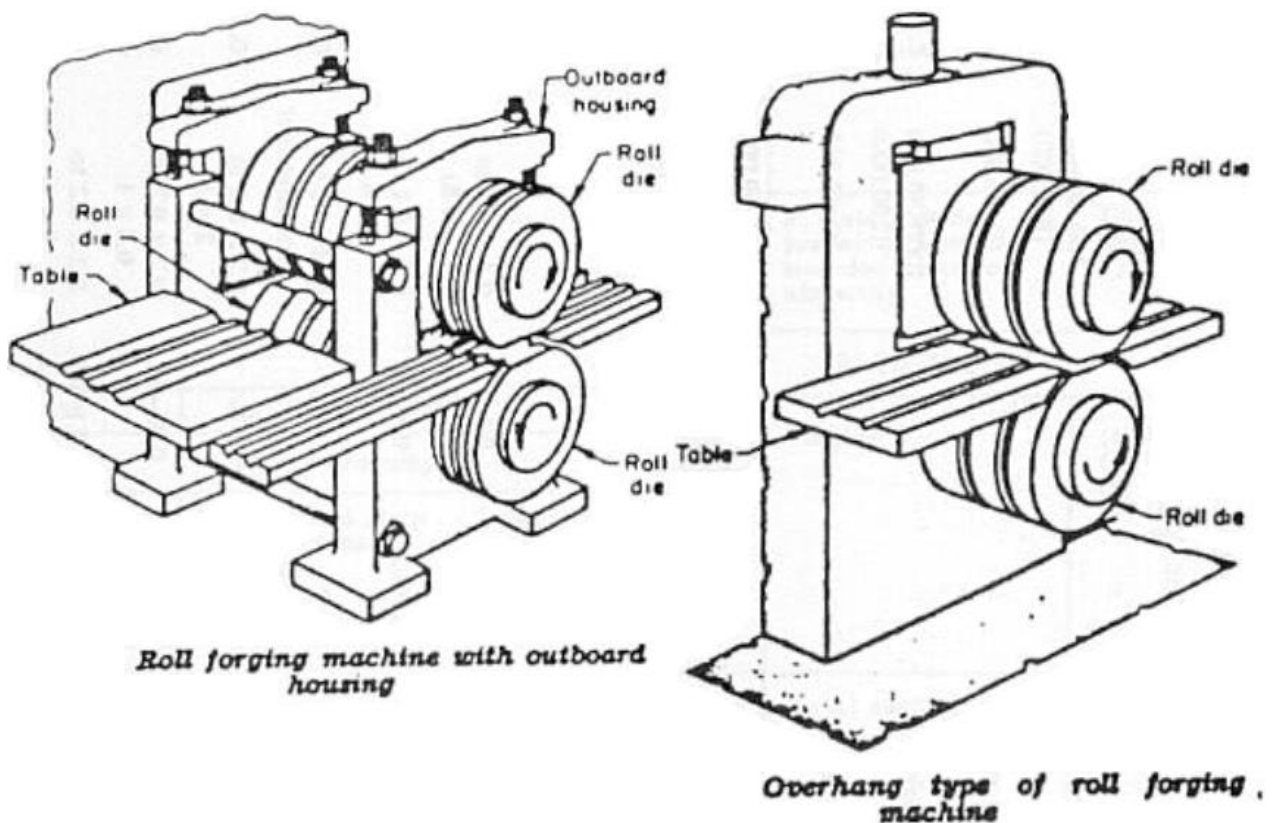
Σχήμα 1.20: Βασικά μέρη μιας υδραυλικής πρέσας σφυρηλάτησης [7]

Οι υδραυλικές πρέσες ακινητοποιούνται με την επίτευξη του οριακού φορτίου και χρησιμοποιούν εργαλεία που έρχονται σε επαφή με το προς παραμόρφωση αντικείμενο στο τέλος της ενεργού διαδρομής. Το σύστημα αυτό καλείται «σύστημα οριακού φορτίου» (load-bound system).

Οι μηχανικές πρέσες (εκτός από τις πρέσες με κοχλία τριβής) έχουν μια προκαθορισμένη διαδρομή και αναπτύσσουν μια άπειρη δύναμη στο τέλος της διαδρομής. Το σύστημα αυτό καλείται «σύστημα οριακής διαδρομής» (stroke-bound system). [7]

1.5.3 ΑΛΛΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Εκτός από τις δύο βασικές κατηγορίες σφυρηλάτησης κλειστής και ανοιχτής μήτρας, στην πράξη χρησιμοποιούνται η οριζόντια σφυρηλάτηση και η σφυρηλάτηση με ράουλα. Αντιπροσωπευτικές μορφές μηχανών με ράουλα για τη σφυρηλάτηση τεμαχίου φαίνονται στο Σχήμα 1.21. Στην οριζόντια σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται σφύρες όπου το έμβολο κινείται οριζόντια και προσδίδει την απαραίτητη κρουστική ενέργεια στο προς σφυρηλάτηση κυλινδρικό αντικείμενο που σε μία διαδοχή φάσεων διαμορφώνεται στην τελική επιθυμητή μορφή. [7]



Σχήμα 1.21: Μηχανές σφυρηλάτησης με κυλινδρικά ράουλα. [7]

1.6 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΥΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ-ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Η μελέτη και ο λεπτομερής σχεδιασμός των παραμέτρων της σφυρηλάτησης ακριβείας-κλειστής μήτρας είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή της διεργασίας αυτής. Οι σημαντικότερες παράμετροι της διεργασίας αυτής σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου, την ακρίβεια της μπιγέτας, τις διεργασίες προδιαμόρφωσης, την ακριβή τοποθέτηση της μπιγέτας, τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της μήτρας, τη φθορά της μήτρας, την ακρίβεια της μηχανής, τη θερμοκρασία σφυρηλάτησης και τη λίπανση. Οι παράμετροι αυτοί περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Ιδιότητες του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου

Η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική σχεδίαση της διαδικασίας σφυρηλάτησης και συνεπώς σε αυτό το πλαίσιο η τάση της ροής του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου αποτελεί σημαντικό κριτήριο που πρέπει να εξετάζεται. Οι διακυμάνσεις στη χημική σταθερότητα, στη μικροδομή, στο μέγεθος των κόκκων του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου προκαλούν μεταβολές στην τάση ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των παραμέτρων της κατεργασίας, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η ελαστική συμπεριφορά του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η ροή του υλικού και η σκλήρυνση. [8]

Ακρίβεια μπιγέτας

Για την ολοκλήρωση της διεργασίας της σφυρηλάτησης ακριβείας, η υψηλή ακρίβεια στο μέγεθος και το σχήμα των μπιγетών αποτελεί παράμετρο ζωτικής σημασίας. Οι αρχικές διαστάσεις της μπιγέτας πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε ο συνολικός όγκος της μπιγέτας να είναι ίδιος με εκείνον του τελικού προϊόντος που πρόκειται να σχηματιστεί. Η μεταβολή του όγκου (μάζας) της μπιγέτας επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια του τελικού σφυρηλατημένου τεμαχίου. Ένας πάρα πολύ μικρός όγκος της μπιγέτας προκαλεί την μη πλήρη συμπλήρωση της κοιλότητας της μήτρας, ενώ ένας υπερβολικά μεγάλος όγκος μπιγέτας οδηγεί στην υπερφόρτωση της μήτρας και στη πρόκληση ζημιών σε αυτήν. Συνήθως η επιτρεπόμενη μεταβολή του όγκου της μπιγέτας βρίσκεται μεταξύ $\pm 0,5$ και $\pm 1\%$ [9]. Επιπλέον, προκειμένου να ληφθούν σφυρηλατά τεμάχια με καλό φινίρισμα επιφάνειας, απαιτούνται καλές επιφάνειες μπιγетών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κοπή ακριβείας ή με το πριόνισμα των μπιγетών. [8]

Διεργασίες προδιαμόρφωσης

Η σφυρηλάτηση ακριβείας κυλινδρικών και αξονοσυμμετρικών τεμαχίων πραγματοποιείται συνήθως σε μία ενιαία διεργασία. Ωστόσο, για πιο πολύπλοκα σχήματα σφυρηλατούμενων τεμαχίων πρέπει να χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες διεργασίες προδιαμόρφωσης. Κατά το σχεδιασμό της κατασκευαστικής διαδικασίας συχνά υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους

μπορεί να γίνει η σφυρηλάτηση. Ο αριθμός των σταδίων προδιαμόρφωσης και ο σχεδιασμός της προδιαμόρφωσης επηρεάζει απευθείας την ακρίβεια, το κόστος του τελικού τεμαχίου και τη διάρκεια ζωής του εργαλείου-μήτρας. Για την σφυρηλάτηση ακριβείας η καλύτερη ακολουθία θα είναι μία στην οποία συμβαίνουν οι ελάχιστες φθορές κατά το φινίρισμα της μήτρας. Επίσης, η κατάλληλη σχεδιασμένη διεργασία προδιαμόρφωσης μπορεί να οδηγήσει στη μείωση των φορτιών σφυρηλάτησης, στην εξάλειψη των σφαλμάτων ροής, στην συμπλήρωση της κοιλότητας της μήτρας και στην εξοικονόμηση του υλικού της μπιγέτας. Υπό αυτή την έννοια μια ολοκληρωμένη προσέγγιση λαμβάνοντας υπόψη το σχεδιασμό της ακολουθίας των βημάτων της διεργασίας της σφυρηλάτησης και το σχεδιασμό των καλουπιών μέσω λογισμικού προσομοίωσης - CAE είναι ζωτικής σημασίας. [8]

Ακριβής τοποθέτηση μπιγέτας

Η ανακριβής τοποθέτηση της μπιγέτας μπορεί να προκαλέσει τη μη ομοιόμορφη πλήρωση της κοιλότητας της μήτρας και κατά συνέπεια μπορεί να προκληθούν υψηλότερη φόρτωση και παραμορφώσεις στη μήτρα. Επίσης, μπορεί να προκληθεί κλίση στο έμβολο και στην άνω μήτρα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η φθορά της μήτρας και η μεταβολή στη διάσταση του ύψους του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ένα ακριβές κεντράρισμα της μπιγέτας είναι ιδιαίτερα απαιτητικό στην περίπτωση της αυτοματοποιημένης τοποθέτησης μπιγέτας στη μήτρα. [8]

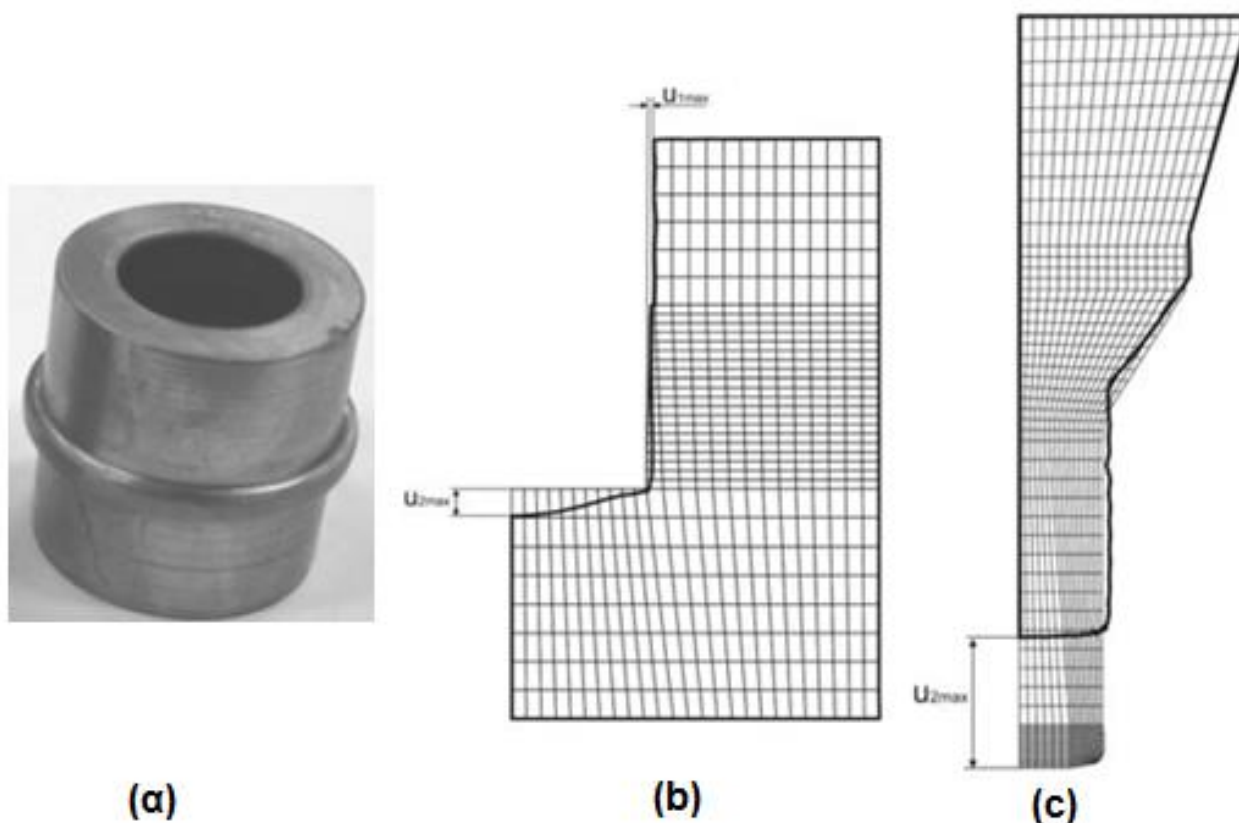
Μήτρα

Η μήτρα αποτελεί όλο και σημαντικότερο παράγοντα για το κόστος και την ποιότητα των σφυρηλατούμενων τεμαχίων, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων σχετικά με τη πολυπλοκότητα του σχήματος και των απαιτήσεων σχετικά με την ακρίβεια των σφυρηλατούμενων τεμαχίων. Τα τμήματα της μήτρας για τη σφυρηλάτηση ακριβείας πρέπει να πληρούν δύο βασικές προϋποθέσεις: να κατασκευάζονται με υψηλή ακρίβεια και να εξασφαλίζουν την ελάχιστη μεταβολή στις διαστάσεις κατά τη διάρκεια της διεργασίας της σφυρηλάτησης [8]. Οποιαδήποτε απόκλιση από τις προβλεπόμενες τιμές που αφορούν τη γεωμετρία της μήτρας μπορεί να προκαλέσει συστηματικά σφάλματα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Για υψηλή απόδοση, η ποιότητα της μήτρας θα πρέπει να είναι 3 έως 5 ποιότητες ISO καλύτερη από την επιθυμητή ακρίβεια των σφυρηλατούμενων τεμαχίων. [10]

Η διεργασία της σφυρηλάτησης ακριβείας απαιτεί ακριβή καθοδήγηση των στοιχείων της μήτρας, καθώς και αξιόπιστο κλείσιμο της μήτρας. Αυτοί οι παράγοντες είναι ζωτικής σημασίας για την εύρυθμη λειτουργία των καλουπιών και την επίτευξη της επιθυμητής ακριβείας της σφυρηλάτησης. Ιδιαίτερα καλή καθοδήγηση των κινητών στοιχείων της μήτρας απαιτείται όταν το σύστημα οδήγησης της μηχανής σφυρηλάτησης είναι ανεπαρκές. Σε αυτή την περίπτωση συνιστάται να χρησιμοποιούνται μήτρες με κυλινδρικούς οδηγούς. Εάν οι μήτρες κλείνουν με πρόσθετα κλειστά στοιχεία, το επίπεδο της πίεσης στα κλειστά στοιχεία πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη

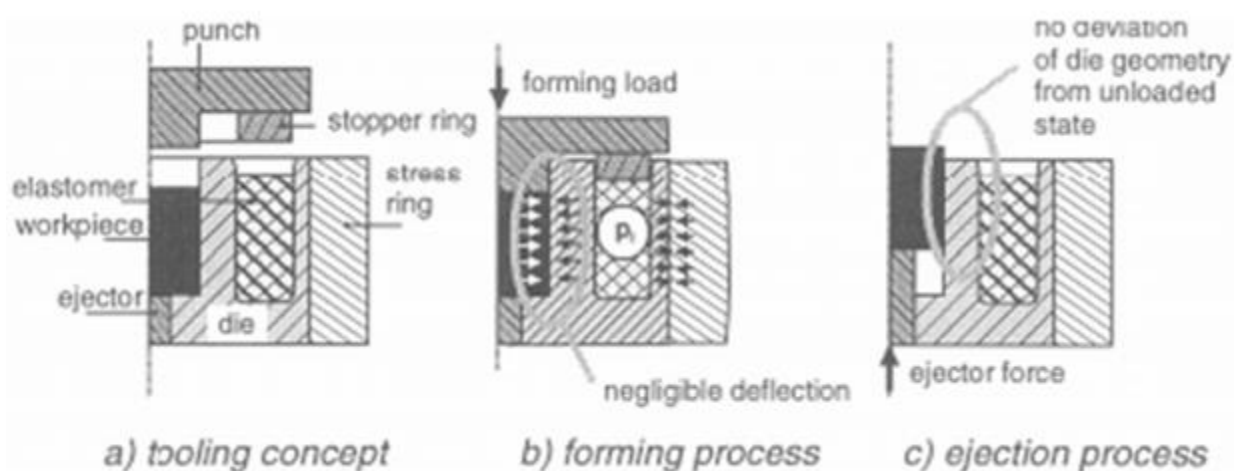
τιμή της κανονικής πίεσης στο εσωτερικό της μήτρας [9]. Για να εφαρμοσθεί η κατάλληλη πίεση στα κλειστά σημεία, συνήθως χρησιμοποιούνται ελατήρια. Επιπλέον, τα ελατήρια αυτά παρέχουν προστασία από μία πιθανή υπερφόρτωση του συστήματος. [8]

Οι υψηλές πιέσεις και οι θερμικές μεταβολές κατά τη διάρκεια της διεργασίας σφυρηλάτησως προκαλούν την ελαστική και πλαστική παραμόρφωση των τμημάτων της μήτρας. Συνεπώς, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις στην μορφή και τις διαστάσεις του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η ποσότητα της ελαστικής παραμόρφωσης της μήτρας σε μία κρύα σφυρηλάτηση κυμαίνεται συνήθως από 50 έως 500 μm , ενώ το μέγεθος της ανοχής της σφυρηλάτησης υψηλής ακρίβειας είναι της τάξης των 10 μm [11]. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της ανάστροφης κρύας διέλασης του τεμαχίου που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.22(α) για μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο $F_{\text{max}} = 660$ kN, η αξονική μετατόπιση του πυθμένα της μήτρας ήταν $U_2 = 0.13$ mm και η ακτινική μετατόπιση της εσωτερικής διαμέτρου της μήτρας ήταν $U_1 = 0.026$ mm (οι αρχικές διαστάσεις της μήτρας ήταν 30 mm εσωτερική διάμετρος και 90 mm εξωτερική διάμετρος) (Σχήμα 1.22(b)). Η μεγαλύτερη ελαστική συστολή του εμβόλου της μήτρας με ένα αρχικό μήκος 65 mm γίνεται στο τέλος της διαδικασίας σχηματισμού και είναι ίση με 0.6 mm (Σχήμα 1.22(c)). [12]



Σχήμα 1.22: Ανάστροφη κρύα διέλαση. (α) κατεργαζόμενο τεμάχιο, (β) Ελαστική παραμόρφωση της μήτρας (c) Ελαστική παραμόρφωση εμβόλου [12]

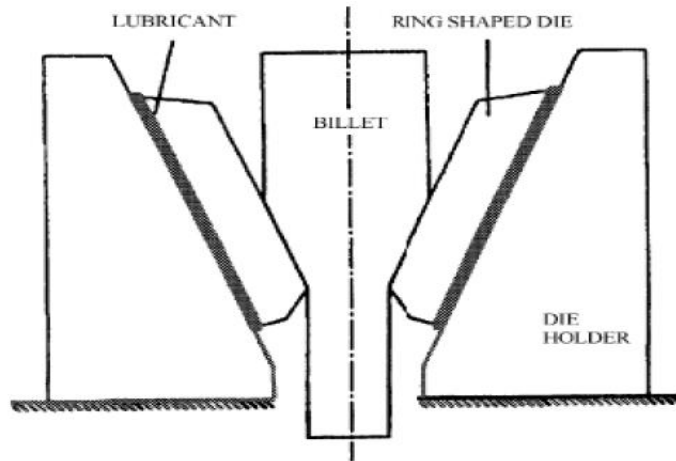
Η ανακρίβεια στην ακτινική κατεύθυνση των σφυρηλατούμενων τεμαχίων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί κάνοντας τη διάσταση της μήτρας μεγάλη σε σχέση με το μέγεθος του τεμαχίου, ή ακόμη καλύτερα με τη χρήση οπλισμένων στοιχείων [13]. Στο Σχήμα 1.23 παρουσιάζεται μια καινοτόμος ιδέα πάνω στο θέμα της μήτρας για τη σφυρηλάτηση ακριβείας η οποία συμβάλλει στην αύξηση της διαστασιακής ποιότητας των τελικών τεμαχίων μέχρι και την κατηγορία IT 6 [14] καθώς και στη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας τους και της αξιοπιστίας της διαδικασίας. Το σημείο κλειδί αυτής της ιδέας η οποία είναι γνωστή ως ενεργός αντιστάθμιση απόκλισης είναι να αντισταθμίσει τα φορτία πίεσης επί των εσωτερικών τοιχωμάτων της μήτρας – τα οποία προκαλούν την ελαστική εκτροπή της μήτρας - με τη βοήθεια ελεγχόμενης πίεσης που παράγεται από ένα ελαστομερές δακτύλιο ενσωματωμένο στην κάτω μήτρα. [8]



Σχήμα 1.23: Ενεργός αντιστάθμιση της ελαστικής απόκλισης της μήτρας. (α) διάταξη καλουπιών, (β) διεργασία διαμόρφωσης και (γ) διεργασία απόρριψης [14]

Ωστόσο, στις διεργασίες σφυρηλάτησης με διακυμάνσεις στο φορτίο πίεσης κατά τη διαμόρφωση του τεμαχίου, η ελαστική παραμόρφωση της μήτρας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας και συνεπώς, τα σφάλματα δεν μπορούν να αντισταθμιστούν πλήρως. Για τη διεργασία αυτή οι Osakada et al. [15] πρότειναν τη δομή της μήτρας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.24. Με ενεργό έλεγχο της τριβής μεταξύ της εσωτερικής μήτρας και της εξωτερικής μήτρας και κρατώντας το συντελεστή τριβής πολύ χαμηλό, είναι δυνατόν να ελεγχθεί η κατακόρυφη θέση της εσωτερικής μήτρας η οποία επιτρέπει την διόρθωση της διαμέτρου του κατεργαζόμενου τεμαχίου και παρέχει τη σταθερότητα του τεμαχίου. [8]

Τέλος κατά τη σφυρηλάτηση ακριβείας ο σχεδιασμός αποβολέα για την απομάκρυνση του κατεργαζόμενου τεμαχίου από τη μήτρα είναι απαραίτητος. Το φορτίο εξαγωγής εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου και από τη λίπανση. Επίσης, μπορεί να γίνει ιδιαίτερα υψηλό σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται μεγάλες διαδρομές εκτίναξης όπως στις διεργασίες της επωθητικής διέλασης ή της ανάστροφης διέλασης. [8]



Σχήμα 1.24: Διάταξη μήτρας με ενεργό έλεγχο τριβής [15]

Φθορά της μήτρας

Στην σφυρηλάτηση ακριβείας είναι πολύ σημαντικό να μειωθεί η φθορά της μήτρας, καθώς πρόκειται για έναν παράγοντα που επηρεάζει όχι μόνο την ακρίβεια των σφυρηλατούμενων τεμαχίων αλλά και το κόστος της διεργασίας της σφυρηλάτησης. Περίπου το 70% των αλλαγών της μήτρας γίνονται λόγω της φθοράς της καθώς δεν μπορεί να κρατήσει τις επιθυμητές ανοχές [16]. Επίσης, αυστηρά όρια ανοχής της σφυρηλάτησης ακριβείας μειώνουν επιπλέον τη διάρκεια ζωής της μήτρας, γεγονός το οποίο μπορεί να αυξήσει δραματικά τις δαπάνες της διεργασίας της σφυρηλάτησης. Συνεπώς, η βελτίωση της διάρκειας ζωής της μήτρας έχει καθοριστική σημασία. Στην περίπτωση της θερμής και της ημίθερμης σφυρηλάτησης ακριβείας η διάρκεια ζωής της μήτρας και η εμφάνιση φθορών εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία σφυρηλάτησης. Γενικότερα, οι χαμηλές θερμοκρασίες σφυρηλάτησης επιδρούν πολύ θετικά στη διάρκεια ζωής της μήτρας. [8]

Μηχανή

Οι έρευνες που έχουν γίνει πάνω στη διαστασιακή ακρίβεια των σφυρηλατούμενων τεμαχίων ακριβείας έδειξαν ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της μηχανής και των αποκλίσεων στις διαστάσεις των τεμαχίων. Οι ανακρίβειες που σχετίζονται με τη μηχανή μπορούν να οριστούν ως τα γεωμετρικά σφάλματα στο σύστημα της μηχανής που προκαλούνται από τη θερμική παραμόρφωση των μελών της και από την ελαστική παραμόρφωση της μηχανής. [11]

Η αύξηση της δυσκαμψίας της πρέσας έχει θετική επίδραση στην ακρίβεια τόσο της πρέσας όσο και του σφυρηλατούμενου τεμαχίου. Υψηλή δυσκαμψία πρέσας συνιστάται ιδιαίτερα για μηχανές με διακύμανση της δύναμης διαμόρφωσης. Το φαινόμενο αυτό συχνά ανιχνεύεται σε μηχανικές πρέσες και προκαλεί ποικιλία στο πάχος της σφυρηλάτησης. Η δυσκαμψία της πρέσας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1000 kN/mm στην περίπτωση σφυρηλάτων τεμαχίων υψηλής ακρίβειας. [17]

Θερμοκρασία

Από όλες τις μεταβλητές της διεργασίας σφυρηλάτησης, η θερμοκρασία σφυρηλάτησης και οι θερμικές μεταβολές κατά τη διάρκεια της διεργασίας είναι οι πιο σύνθετες και οι πιο σημαντικές. Για την επίτευξη βέλτιστων συνθηκών παραγωγής, η αξιόπιστη λειτουργία της μήτρας, η καλή ακρίβεια στις διαστάσεις της μήτρας και οι θερμοκρασίες σφυρηλάτησης αποτελούν καταλυτικούς παράγοντες. Ειδικότερα, για μήτρες με πολύ στενές ανοχές και μικρά κενά μεταξύ των κινούμενων στοιχείων, οποιαδήποτε απόκλιση της θερμοκρασίας της μήτρας μπορεί να προκαλέσει θερμική διαστολή ή συρρίκνωση των στοιχείων της. Επιπλέον, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μεταβολές στις διαστάσεις του σφυρηλάτου τεμαχίου αλλά και στη δυσλειτουργία της ίδιας της μήτρας. Επίσης, η θερμοκρασία σφυρηλάτησης είναι άμεσα υπεύθυνη για την θερμική συρρίκνωση των σφυρηλατούμενων τεμαχίων, τη μικροδομή των τελικών κατασκευαστικών στοιχείων, τη τάσης ροής, τη διαμορφωτική ικανότητα του υλικού κ.λπ., και, κατά συνέπεια, επηρεάζει την ποιότητα και την ακρίβεια των τελικών προϊόντων. Στην ημίθερμη και θερμή σφυρηλάτηση η θερμοκρασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά στην έξοδο της συσκευής θέρμανσης. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες σφυρηλάτησης μειώνουν την σκλήρυνση και την ελαστική παραμόρφωση της μήτρας και των στοιχείων της μηχανής, αλλά προκαλούν αύξηση της φθοράς της μήτρας. Η ομοιόμορφη κλίση της θερμοκρασίας πάνω από το κατεργαζόμενο τεμάχιο προτιμάται καθώς συμβάλλει στην ομοιόμορφη συρρίκνωση των σφυρηλατημένων τεμαχίων κατά την ψύξη. [8]

Αν και η διαδικασία της ψυχρής σφυρηλάτησης συνήθως εκτελείται σε θερμοκρασία δωματίου, η θερμότητα που παράγεται κατά τη διεργασία της σφυρηλάτησης μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του κατεργαζόμενου τεμαχίου και της μήτρας για μερικές εκατοντάδες βαθμούς. Σύμφωνα με την έρευνα του Kuzman, Kar (2001) [17] έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 100 °C μπορεί να αλλάξει τη διάμετρο του εμβόλου της μήτρας κατά 0,02 mm. Συνεπώς, είναι σαφές ότι κατά τον σχεδιασμό της διεργασίας ψυχρής σφυρηλάτησης ακριβείας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι θερμικές επιδράσεις καθώς και οι κατάλληλες διορθώσεις στη γεωμετρία της μήτρας. Επιπλέον, στην ψυχρή σφυρηλάτηση για την αποφυγή των θερμικών αλλαγών πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην λίπανση. [17]

Λίπανση

Κατά τη διάρκεια της σφυρηλάτησης η λίπανση αποτελεί σημαντική παράμετρο, διότι μειώνει την τριβή η οποία μειώνει το φορτίο και τη φθορά στη διεπιφάνεια εργαλείου/τεμαχίου, διευκολύνει τη ροή του υλικού στην κοιλότητα του καλουπιού και ταυτόχρονα επιτρέπει την καλύτερη πλήρωση της κοιλότητας της μήτρας. Επιπλέον, το λιπαντικό αποτελεί θερμικό προστατευτικό στρώμα μεταξύ θερμού τεμαχίου και σχετικά ψυχρού καλουπιού, μειώνοντας έτσι το ρυθμό απόψυξης του τεμαχίου. Ψύχει τις επιφάνειες της μήτρας και διατηρεί τη θερμοκρασία της σταθερή κατά τη

διάρκεια της διεργασίας διαμόρφωσης. Το λιπαντικό, παίζει επίσης το ρόλο διαχωριστικού μέσου που εμποδίζει το τεμάχιο να «κολλήσει» στο καλούπι. Επιπλέον, η λίπανση επιτρέπει τη σταθερότητα της διεργασίας σχηματισμού καθώς και την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας του τεμαχίου. Το σύστημα λίπανσης θα πρέπει να επιλέγονται με τρόπο ώστε να είναι σχετικά ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία και τη πίεση. Επιπλέον, το λιπαντικό θα πρέπει να εφαρμόζεται ομοιόμορφα και σταθερά καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας της σφυρηλάτησης, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη αποτελεσματικότητα του. Χρησιμοποιούμενα λιπαντικά στη θερμή σφυρηλάτηση είναι ο γραφίτης, το διθειώδες μολυβδαίνιο και ο ύαλος (στερεά λιπαντικά). Στη ψυχρή σφυρηλάτηση χρησιμοποιούνται σάπωνες και ορυκτέλαια. [3] [8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Γενικά ως Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (ΑΜΣ) ορίζεται η δημιουργία και καταγραφή του συνόλου των τεχνολογικών προδιαγραφών και δεδομένων που περιγράφουν πλήρως ένα αντικείμενο, προϊόν ή κατασκευή μέσω της ανάλυσης της δομής, της χρήση και της λειτουργίας του όταν τα δεδομένα αυτά είναι ανύπαρκτα, ελλιπή, παρωχημένα ή μη διαθέσιμα. [18] [19]

Η εμφάνιση του ΑΜΣ μπορεί να αναζητηθεί από τους αρχαίους χρόνους, όπου ο άνθρωπος ερεύνησε μεθοδικά διαφόρους τύπους στοιχείων-συστημάτων αναζητώντας τα χαρακτηριστικά τους, τις πάσης φύσεως ιδιότητες τους και τον τρόπο λειτουργίας τους. Η καθοριστικότερη περίοδος για την εξέλιξη του ΑΜΣ ήταν πριν και μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, όπου έπαιξε σημαντικό ρόλο στην βιομηχανική ανάπτυξη ιδίως της Ιαπωνίας. Εκείνη την εποχή, η διαδικασία ανακατασκευής ενός προϊόντος ήταν βασικά χειροποίητη. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, εμφανίστηκαν νέες τεχνολογίες για την υποστήριξη και ανάπτυξη των προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των ψηφιακών σαρωτών και των CAD συστημάτων. Το 1989 αναπτύχθηκε για το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ η πρώτη συσκευή που δημιούργησε ένα τρισδιάστατο αρχείο δεδομένων, από τη σάρωση εξαρτημάτων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων για στρατιωτική χρήση συχνά δεν είναι διαθέσιμα ή είναι απόρρητα από τους κατασκευαστές, το Ναυτικό των ΗΠΑ ήταν οι πρώτοι που ενδιαφέρθηκαν για τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την αντικατάσταση ή επισκευή των εξαρτημάτων από τα ήδη υπάρχοντα. Η αξιοποίηση του ΑΜΣ από το αμερικανικό ναυτικό είχε την πρόθεση να μειώσει την εξάρτησή του από τις πληροφορίες που προέρχονται από τους κατασκευαστές και τους προμηθευτές. [20]

Στη σημερινή εποχή, η ταχεία ανάπτυξη προϊόντων επιβάλλεται στη βιομηχανία ειδικά σε χώρες της μέσης και ανατολικής Ευρώπης. Ο στόχος μιας βιομηχανικής μονάδας είναι να πετυχαίνει το μέγιστο όφελος από μια διαδικασία παραγωγής, για να μπορέσει να επενδύσει σε ένα προϊόν. Πολύ σημαντική παραγωγή είναι η βιομηχανία κατασκευής αυτοκινήτων, όπου το κάθε αυτοκίνητο αποτελείται από χιλιάδες κομμάτια, τα οποία πρέπει να παραχθούν όσο το δυνατόν ταχύτερα και φθηνότερα, με την επίτευξη της προβλεπόμενης ποιότητας. Επίσης, μικρές ή μεγαλύτερες αλλαγές στο μοντέλο ενός αυτοκινήτου συνεπάγονται αλλαγές σε πολλά από τα κομμάτια που το αποτελούν. Η ταχύτητα με την οποία γίνονται οι αλλαγές ολοένα και αυξάνεται και οι απαιτήσεις ωθούν όλη την αλυσίδα παραγωγής να μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο παραγωγής. Στη περίπτωση αυτή οι μέθοδοι του ΑΜΣ είναι πολύ χρήσιμες και επιτυχείς. [21]

2.1 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η εφαρμογή του ΑΜΣ προκύπτει από πραγματικές ανάγκες, οι οποίες και αποτελούν αφετηρία στην έμπνευση και υλοποίηση του. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω μεγάλη εφαρμογή του ΑΜΣ υπάρχει στο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Άλλες περιοχές εφαρμογής είναι στη βιομηχανία χύτευσης (ταχεία εργαλεία, ανάκτηση σπασμένου καλουπιού ή την επικάλυψη ενός καλουπιού), στο τομέα της ιατρικής και στη βιομηχανία παιχνιδιών [19]. Επίσης, ένα άλλο πεδίο εφαρμογής του ΑΜΣ που συναντάται πολύ και στην Ελλάδα αφορά τον τομέα της αρχαιολογίας και την προσπάθεια ανάκτησης πληροφοριών που αφορούν ευρήματα από ολόκληρο το εύρος της αρχαιολογίας, από μικρά νομίσματα μέχρι ολόκληρες πόλεις. [22] [23]

Ανάλογα με τις ανάγκες μπορεί να χωριστούν τα πεδία εφαρμογής του ΑΜΣ σε [18]:

- Μεταφορά και εξέλιξη κατασκευαστικών πληροφοριών από πειραματικά μοντέλα ή ανταγωνιστικά προϊόντα.
- Αναθεώρηση/τροποποίηση/βελτίωση υφιστάμενων κατασκευών λόγω αλλαγών των αρχικών απαιτήσεων/δεδομένων/προδιαγραφών τους.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων/επεμβάσεων που προέκυψαν από λειτουργικές, πειραματικές, κ.α. δοκιμές, από φθορές και βλάβες κανονικής ή αντικανονικής χρήσης.
- Αποτύπωση χειροποίητων πρωτοτύπων μοντέλων.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων/επεμβάσεων που προέκυψαν κατά την παραγωγική διαδικασία π.χ. παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων που προέκυψαν μετά τη διαδικασία της συναρμολόγησης. Εφαρμογή τεχνολογιών CAD/CAM/CAE σε αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος, π.χ. αντίγραφα αρχαίων γλυπτών.
- Βιοϊατρικές εφαρμογές, π.χ. αποτύπωση ανθρώπινης γνάθου, αποτύπωση χαρακτηριστικών προσώπου για επιδιόρθωση παραμορφώσεων.
- Κατασκευή ανταλλακτικών που δεν διατίθενται πλέον από τον αρχικό κατασκευαστή του μηχανήματος.
- Άμεση επείγουσα αντικατάσταση εξαρτήματος που έχει αστοχήσει, π.χ. βιομηχανική παραγωγή, πλοία κ.α. Άρση της αποκλειστικότητας από τον μοναδικό προμηθευτή.
- Ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος με βάση τη μακροπρόθεσμη χρήση του προϊόντος.
- Ανάλυση των καλών και κακών χαρακτηριστικών από προϊόντα ανταγωνιστικών εταιρειών.

2.2 ΦΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΜΗΜΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός στη γενική του εφαρμογή ακολουθεί ορισμένα βήματα για την επίτευξη των στόχων του. Μια διαδικασία ΑΜΣ ανάλογα με το αντικείμενο που θα εξεταστεί, προσαρμόζεται στις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις του κάθε αντικειμένου. Ανάλογα με το πεδίο στο οποίο συγκαταλέγεται (Υποκεφάλαιο 2.1) το προς εξέταση αντικείμενο, και τα δεδομένα που θέλουμε να εξάγουμε από αυτό, δίνεται περισσότερη έμφαση σε διαφορετικά βήματα στην εκάστοτε εφαρμογή του ΑΜΣ. Για το λόγο αυτό, κάθε εφαρμογή μπορεί να περιλαμβάνει ένα αριθμό διαφορετικών τεχνολογιών και διακεκριμένων δραστηριοτήτων όπως ψηφιακή αποτύπωση, μετρήσεις διαστάσεων, διαχείριση και μαθηματική επεξεργασία νέφους σημείων, μοντελοποίηση σε περιβάλλον CAD(Computer-Aided Design), διαπίστωση ιδιοτήτων υλικού και επιφανειακών/ θερμικών κατεργασιών, λειτουργική ανάλυση συναρμολογημένων συνόλων, διαστασιολογική και γεωμετρική ανάλυση των επί μέρους εξαρτημάτων. [18]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά βήματα της διαδικασίας που ακολουθείται στη γενική εφαρμογή του ΑΜΣ [18]:

ΦΑΣΗ 1: Λειτουργική / Οικονομοτεχνική ανάλυση: Περιλαμβάνει τη συλλογή και την αξιολόγηση της διαθέσιμης τεκμηρίωσης και των πληροφοριών σχετικά με την κατασκευή που αποτελεί αντικείμενο του ΑΜΣ, τον καθορισμό των ζητούμενων τεχνικών δεδομένων και των απαιτούμενων δοκιμών, την εκπόνηση χρονοδιαγράμματος και την αρχική εκτίμηση κόστους.

ΦΑΣΗ 2: Διαδικασία αποσυναρμολόγησης: των επιμέρους υποσυνόλων κατά την οποία γίνεται έλεγχος, παρατήρηση, δοκιμές και αρχικές μετρήσεις παραμέτρων που αφορούν στη λειτουργία τους, στην αναγνώριση των εξαρτημάτων που τα αποτελούν και στο καθορισμός των απαιτούμενων τεχνικών δεδομένων.

ΦΑΣΗ 3: Σχέδιο διαχείρισης και καταγραφή: για τον καθορισμό μιας ορθολογικής πορείας των αναγκαίων εργασιών, στην αποφυγή επαναλήψεων, καθυστερήσεων, παραλήψεων, την επανεκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου κ.λπ.

ΦΑΣΗ 4: Ανάλυση εξαρτημάτων: κατά την οποία μέσα από επιμέρους διαδικασίες όπως η διαστασιολογική και γεωμετρική ανάλυση των εξαρτημάτων, η ανάλυση υλικών, η αναγνώριση και ανάλυση ηλεκτρικών ή και ηλεκτρολογικών χαρακτηριστικών κ.α. καθορίζονται τα τεχνικά δεδομένα στα οποία βασίζονται οι επόμενες φάσεις.

ΦΑΣΗ 5: Εκπόνηση κατασκευαστικών σχεδίων: στα οποία με βάση τα τεχνικά δεδομένα που προέκυψαν καθορίζεται το πλήρες σύνολο των παραμέτρων που απαιτούνται για την ανακατασκευή των εξαρτημάτων όπως π.χ. ανοχές και συναρμογές, υλικά, ποιότητα επιφανειών,

επικαλύψεις κι επιφανειακές κατεργασίες, απαιτούμενοι έλεγχοι και δοκιμές κλπ. Στο στάδιο αυτό εντάσσεται ο ανασχεδιασμός και η ενδεχόμενη εισαγωγή βελτιώσεων ή αλλαγών στον αρχικό σχεδιασμό.

ΦΑΣΗ 6: Ποιοτικός έλεγχος: ο οποίος αφορά στην πληρότητα και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα και τις απαιτήσεις των κατασκευαστικών σχεδίων του προηγούμενου σταδίου αλλά και στην κατασκευή πρωτοτύπων και τη διεξαγωγή σχετικών ελέγχων και δοκιμών.

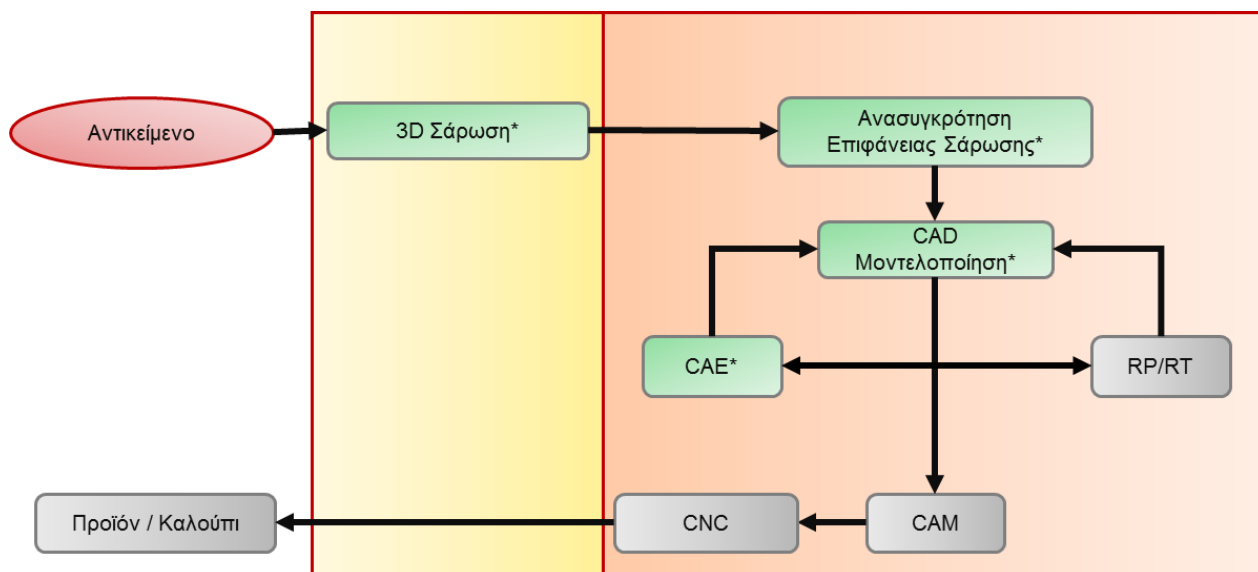
ΦΑΣΗ 7: Επισκόπηση / επανεξέταση της προτιθέμενης παραγωγής: με στόχο την τελική εκτίμηση των οικονομικών μεγεθών και παραμέτρων της δοκιμαστικής παραγωγής, την αξιολόγηση προσφορών από υποψήφιους κατασκευαστές του αντικειμένου, τη λήψη αποφάσεων του τύπου «κατασκευή και προώθηση στην αγορά» κ.λπ.

ΦΑΣΗ 8: Δοκιμαστική παραγωγή: στην οποία συμπεριλαμβάνονται η κατασκευή, ο ποιοτικός έλεγχος των εξαρτημάτων, η συναρμολόγηση, ο έλεγχος και οι δοκιμές λειτουργίας των συναρμολογημένων συνόλων, ο έλεγχος της συμμόρφωσης τους με τις αρχικές απαιτήσεις και προδιαγραφές κ.λπ.

ΦΑΣΗ 9: Οριστικοποίηση του συνόλου τεχνικών δεδομένων: που αποτελεί το τελευταίο στάδιο και την κατάληξη της διαδικασίας του ΑΜΣ με την οριστική αποδοχή των εξαρτημάτων και των συναρμολογημένων συνόλων που προέκυψαν από τη δοκιμαστική παραγωγή.

2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Κάθε μια εφαρμογή του ΑΜΣ πραγματοποιείται βάση ενός διαγράμματος ροής, το οποίο με τη σειρά του ακολουθεί τα διάφορα βήματα, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής που βρίσκεται. Το παρακάτω διάγραμμα είναι αποτύπωση του διαγράμματος ροής ΑΜΣ το οποίο ακολουθείται ευρέως τα τελευταία χρόνια σε διάφορα πεδία, λόγω τις σχεδόν εξολοκλήρου εφαρμογής του σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές [26]. Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν, με βάση αυτό το διάγραμμα ροής, οι πρώτες τέσσερις διεργασίες του ΑΜΣ (διεργασίες με αστερίσκο *).



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής ΑΜΣ. CAD-Computer Aided Design, CAE- Computer Aided Engineering, RP/RT- Rapid Prototyping/Rapid Tooling, CAM- Computer-Aided Manufacturing, CNC-Computer Numerical Control. [24]

Οι επιμέρους τομείς που συνθέτουν το παραπάνω διάγραμμα ροής ΑΜΣ είναι οι εξής:

- **3D Σάρωση:** Ψηφιακή αποτύπωση φυσικού αντικειμένου με στόχο τη συλλογή πληροφοριών, απαραίτητων για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου, σχετικών με το σχήμα και τη γεωμετρική μορφή του.
- **CAD (Computer-Aided Design):** Μοντελοποίηση του αντικειμένου με τη βοήθεια υπολογιστή. Πραγματοποιείται συνήθως σε τυποποιημένα σχεδιαστικά πακέτα (π.χ. SolidWorks, AutoCAD, Catia) αξιοποιώντας τις πληροφορίες που αντλήθηκαν από τη 3D σάρωση.
- **CAE (Computer-Aided Engineering):** Μηχανολογικός σχεδιασμός εξ ολοκλήρου με τη βοήθεια υπολογιστή. Περιλαμβάνει την ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων, την κινηματική ανάλυση, τη θερμική ανάλυση, την υπολογιστική δυναμική των ρευστών, τη βελτιστοποίηση. (Simufact, CFD Computational)
- **RP/RT (Rapid Prototyping/Rapid Tooling):** Ταχεία προτυποποίηση (του προς δημιουργία αντικειμένου/καλουπιού). Αποτελεί την αυτόματη κατασκευή φυσικών τρισδιάστατων αντικειμένων με την τεχνολογία additive manufacturing (διαστρωματική/προσθετική παρασκευή) και υλοποιείται συνηθέστερα σε 3D Printers (τρειςδιάστατους εκτυπωτές).
- **CAM (Computer-Aided Manufacturing):** Έλεγχος των εργαλειομηχανών και του συναφούς εξοπλισμού για την κατασκευή-επεξεργασία τεμαχίων με τη χρήση λογισμικού ηλεκτρονικών υπολογιστών.
- **CNC (Computer Numerical Control):** Έλεγχος-αυτοματοποίηση των κέντρων κατεργασιών με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΑΡΩΤΕΣ

Η τρισδιάστατη Σάρωση μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία ψηφιακής αποτύπωσης, σε τρισδιάστατες συντεταγμένες, του φυσικού αντικειμένου με στόχο τη συλλογή πληροφοριών, σχετικά με το σχήμα και τη γεωμετρική μορφή του.

Οι όροι “ψηφιοποίηση” και “σάρωση” χρησιμοποιούνται συχνά για να περιγράψουν την ίδια διαδικασία. Παραδοσιακά ο όρος “ψηφιοποίηση” αναφέρεται στη διαδικασία της λήψης διακριτών σημείων από την επιφάνεια χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή αφής σκανδάλης. Ωστόσο, με την εισαγωγή των νέων τεχνολογιών στη συλλογή δεδομένων, όπως τα συστήματα λέιζερ, φωτογραφικές μηχανές, οπτικά συστήματα και αναλογικοί αισθητήρες, ο όρος “ψηφιοποίηση” χρησιμοποιείται τώρα ως γενική περιγραφή για τη διαδικασία απόκτησης δεδομένων από απροσδιόριστες επιφάνειες. [21]

Η τρισδιάστατη σάρωση είναι ο πρώτος στόχος της μεθοδολογίας του ΑΜΣ και αφορά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων από μια απροσδιόριστη τριών διαστάσεων επιφάνεια. Κατά τη διαδικασία σάρωσης, δίνεται εντολή σε ένα ανιχνευτή αναλογικής σάρωσης να κινηθεί (με επαφή ή χωρίς επαφή) σε όλη την άγνωστη επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, οι πληροφορίες συλλέγονται σε μορφή αριθμητικών δεδομένων και δημιουργείται μήτρα (νέφος) από ένα σύνολο σημείων (3D-συντεταγμένες). Αυτά τα δεδομένα μπορούν στη συνέχεια α) να χρησιμοποιηθούν για άμεσο έλεγχο από τις εργαλειομηχανές δημιουργώντας ένα πρόγραμμα CNC με σκοπό την κατασκευή είτε ενός αντίγραφου είτε ενός κομματιού με γεωμετρικές παραλλαγές του αρχικού σχήματος, όπου θα μπορούν να προστεθούν ή να γίνουν αλλαγές σε κάποια σχήματα, διαστάσεις ή σε κάποια λειτουργικά θέματα, β) να εξαχθούν σε διάφορες μορφές σε ένα σύστημα CAD / CAM για περαιτέρω επεξεργασία. [21] [25]

Οι τεχνικές σάρωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με πλήθος κριτηρίων όπως είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν για την πραγματοποίηση των μετρήσεών τους, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, τη ταχύτητα λειτουργίας τους ή την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που καταγράφουν. Οι δύο κυριότερες κατηγοριοποιήσεις σχετίζονται με τις μεθόδους λήψης των νεφών σημείων της επιφάνειας του αντικειμένου, που αποτελεί έναν πιο γενικό τρόπο ταξινόμησης των σαρωτών και τις τεχνικές τους προδιαγραφές, κατηγοριοποίηση που ανταποκρίνεται καλύτερα στην αναζήτηση του βέλτιστου σαρωτή για την υλοποίηση της εκάστοτε εφαρμογής. [26]

Έτσι οι 3D Σαρωτές χωρίζονται σε:

- Μηχανικές τεχνικές (Επαφής): που χρησιμοποιούν αισθητήρες φυσικής επαφής.
- Οπτικές τεχνικές (Μη Επαφής): που δεν έχουν επαφή με το αντικείμενο.

Για τις περισσότερες εφαρμογές, τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια και την ποιότητα της επιφάνειας, λαμβάνονται χρησιμοποιώντας αισθητήρες επαφής. Ωστόσο, όπου υπάρχουν μαλακά και εύθραυστα υλικά και μη-ανακλαστικές επιφάνειες που πρόκειται να σαρωθούν, χρησιμοποιούνται συστήματα λέιζερ ή οπτικά συστήματα [22]. Επίσης, οι σαρωτές μη επαφής είναι αναγκαίοι και στις περιπτώσεις που οι προς σάρωση επιφάνειες είναι πολύπλοκες ή αρκετά μεγάλες και η χρήση μηχανικών τεχνικών (επαφής) είναι εξαιρετικά δύσκολη και χρονοβόρα.

3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ - ΕΠΑΦΗΣ (CMM)

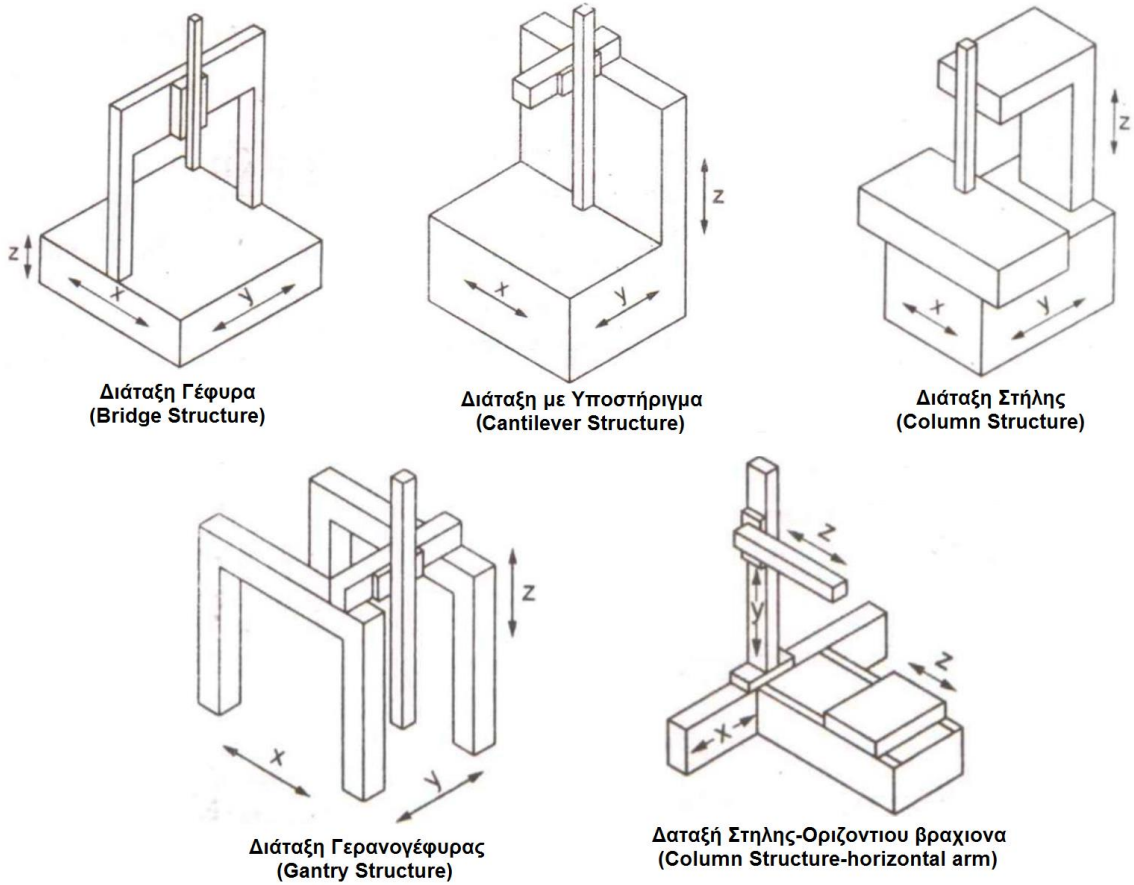
Ος Μηχανικές Τεχνικές Τρισδιάστατης Σάρωσης ορίζονται τα ηλεκτρομηχανικά όργανα μέτρησης όπου το μετρητικό όργανο έρχεται σε επαφή με τη μετρούμενη επιφάνεια. Συνήθως χρησιμοποιείται μια μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM- Coordinate Measuring Machine), ή μια βάση φρέζας CNC εξοπλισμένη με φυσικούς αισθητήρες (Retroskan ή Renscan - Renishaw) [25]. Η μετρούμενη διάσταση δίνεται σε σύστημα συντεταγμένων (καρτεσιανών, πολικών ή σφαιρικών) και αποτυπώνεται στο σύστημα ως σημεία, ευθείες ή επίπεδα.

Οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM) είναι υψηλής ακριβείας (εώς 0.25μm). Είναι εξοπλισμένες με ψηφιακή ανάγνωση ή μπορούν να συνδεθούν με τους υπολογιστές για OnLine επιθεώρηση των αντικειμένων. Αυτά τα μηχανήματα μπορούν να τοποθετηθούν κοντά σε εργαλειομηχανές ώστε να γίνεται αποτελεσματική επιθεώρηση, και αν χρειαστεί διόρθωση των παραμέτρων επεξεργασίας και ταχεία ανατροφοδότηση, πριν από κάθε βήμα της διαδικασίας κατεργασίας. Επίσης είναι πολύ ανθεκτικά για να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε εργοστασιακό περιβάλλον, όπου υπάρχουν επιπτώσεις όπως διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, κραδασμοί και ρύποι. [27]

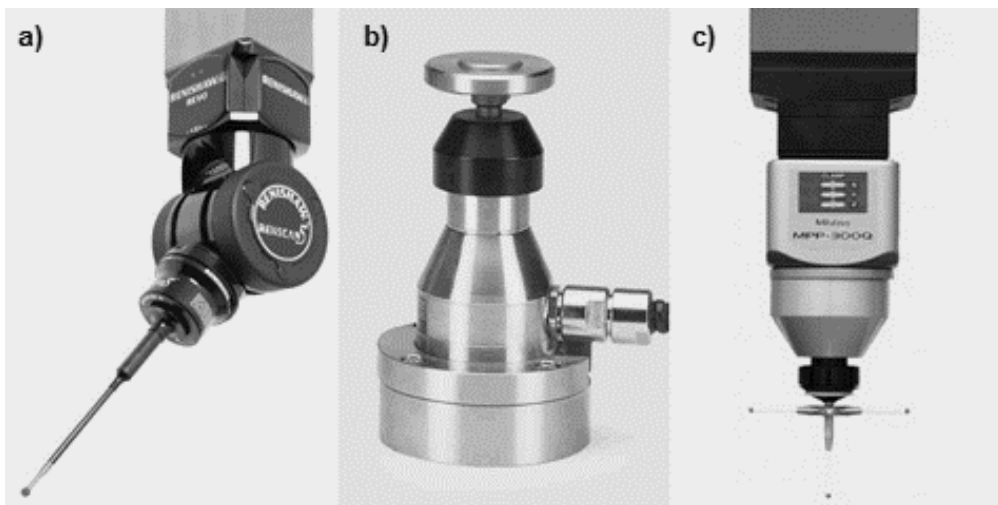
Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν μια συμβατική CMM μηχανή είναι [28]:

- **Κυρίως σώμα μηχανής:** αποτελείται από τη βάση, τη τράπεζα μέτρησης, τη διάταξη στήριξης βραχίονα και τον βραχίονα (Σχήμα 3.1).
- **Σύστημα ανίχνευσης:** το οποίο είναι υπεύθυνο για τη συνολική ακρίβεια της μέτρησης. Τα πιο κοινά συστήματα ανίχνευσης τεμαχίων είναι τα συστήματα αφής (Σχήμα 3.2) και τα οπτικά συστήματα ανίχνευσης.

- **Σύστημα ελέγχου, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων:** ο υπολογιστής και το λογισμικό αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του όλου συστήματος, καθώς είναι τα μέσα με τα οποία γίνεται ο έλεγχος, η συλλογή και η επεξεργασία των μετρήσεων.



Σχήμα 3.1: Τύποι Διατάξεων CMM μηχανών [27]



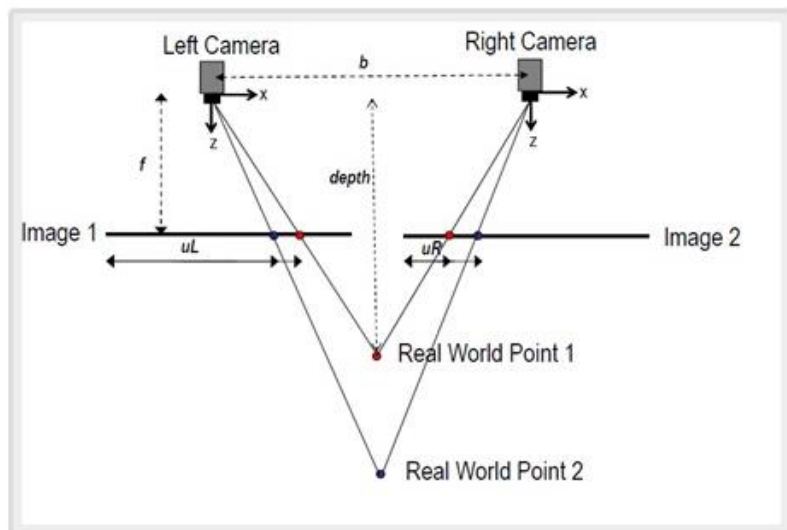
Σχήμα 3.2: Παραδείγματα Συστημάτων Ανίχνευσης a) REVO και c) MPP-300Q της Mitutoyo [29], b) TT130 της Heidenhain [30]

3.2 ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ- ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούν το φως του περιβάλλοντος ή το τεχνητό φως (πχ. λάμπες και σποτ) για να φωτίσουν το χώρο επαρκώς και να κάνουν ορατά τα αντικείμενα. Ουσιαστικά, οι παθητικές τεχνικές βασίζονται σε πολλαπλές λήψεις, οι οποίες λαμβάνονται από διαφορετικές οπτικές γωνίες ή υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, με δύο ή περισσότερες φωτογραφικές μηχανές και βιντεοκάμερες, για να παράγουν πολλαπλές επικαλυπτόμενες εικόνες του χώρου. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρές και μεσαίες αποστάσεις. [31]

Η πιο ευρέως γνωστή παθητική μέθοδος είναι η στερεοσκοπική (στερέωση ή διόφθαλμη όραση) μέθοδος, που είναι κοινώς γνωστή ως η “διαδικασία της οπτικής αντίληψης” η οποία δίνει την αίσθηση του βάθους από δύο ελαφρώς διαφορετικές απόψεις του χώρου. Η μελέτη της αρχής αυτής έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη φωτογραμμετρικών τεχνικών που βασίζονται στην τριγωνοποίηση των αντίστοιχων σημείων στις δύο προβολές. [32]

Η στερεοσκοπική μέθοδος μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι με ένα οπτικό αισθητήρα το οποίο κινείται σε γνωστές σχετικές θέσεις στο χώρο. Ο δεύτερος τρόπος είναι με δύο ή περισσότερους οπτικούς αισθητήρες που προηγουμένως έχουν καθοριστεί σε γνωστές θέσεις. Η επιφάνεια που πρόκειται να μετρηθεί προβάλλεται στο επίπεδο εικόνας του κάθε αισθητήρα σε κάθε εστιακό σημείο. Οι 3D συντεταγμένες του σημείου-αντικειμένου μπορούν να ληφθούν με τριγωνομετρία από τις γνωστές προβολές ενός σημείου-αντικειμένου και από τη σχέση μεταξύ των οπτικών αισθητήρων. Ωστόσο είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε, με ακρίβεια για κάθε σημείο του αντικειμένου τις προβολές στην εικόνα του οπτικού πεδίου των αισθητήρων. Στην πραγματικότητα, προκειμένου να ληφθούν οι 3D συντεταγμένες μια δεδομένη χρονική στιγμή από έναν αριθμό προβολών (μια από κάθε αισθητήρα), αυτές οι προβολές πρέπει να είναι από το ίδιο σημείο του αντικειμένου. Ο περιορισμός αυτός είναι γνωστός ως “το πρόβλημα αντιστοιχίας” το οποίο μπορεί να μειωθεί σημαντικά με μια ενεργή μέθοδο. Οι παθητικές μέθοδοι λόγω τις απλότητας τους είναι πιο οικονομικές από τις ενεργητικές μεθόδους, αλλά και



Σχήμα 3.3: Σχηματική όψη Στερεοσκοπικής μεθόδου [33]

3.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ- ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Πολλές από τις τεχνικές λύσεις που έχουν αναπτυχθεί για την απόκτηση των απαραίτητων μετρήσεων για την εξαγωγή των 3D συντεταγμένων από μια ανακλαστική επιφάνεια είναι ενεργητικές τεχνικές. Οι σαρωτές λέιζερ μετρούν οριζόντιες και κάθετες γωνίες και υπολογίζουν την απόσταση είτε με την μέθοδο χρόνου-πτήσης ή με τη σύγκριση των φάσεων του μεταδιδόμενου και λαμβανόμενου κύματος ενός διαμορφωμένου σήματος [34]. Όργανα τύπου τριγωνισμού μπορούν να αναλύσουν τη θέση μιας ακτίνας λέιζερ (κηλίδας) ή άλλου σχεδίου (δομημένο φως) χρησιμοποιώντας ένα ή δύο κάμερες CCD (Charge Coupled Device). Οι διάφορες τεχνικές οδηγούν σε διαφορετική ακρίβεια μέτρησης της απόστασης. Εκτός από τον παράγοντα ακρίβεια και άλλα χαρακτηριστικά είναι σημαντικά για την επιλογή του πλέον κατάλληλου μέσου για ένα συγκεκριμένο έργο. Μεταξύ αυτών είναι η ταχύτητα σάρωσης και ανάλυσης, το εύρος σάρωσης, η επιρροή της ακτινοβολία, το οπτικό πεδίο, η ένταξη των καμερών απεικόνισης, η ευκολία μεταφοράς, ο τύπος της παροχής ρεύματος, καθώς και η ποιότητα του λογισμικού σάρωσης. [32] [34]

Οι σαρωτές λέιζερ χρόνου-πτήσης έχουν τα πλεονεκτήματα ενός ευρύ φάσματος μετρήσεων και σχετικά υψηλή ακρίβεια σε μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, είναι ακριβά και μεγάλης κατανάλωσης ισχύος. Οι σαρωτές τριγωνισμού λέιζερ έχουν τα πλεονεκτήματα του απλού υλικού, χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και μικρού μεγέθους σε σύγκριση με τους σαρωτές λέιζερ χρόνου-πτήσης. Επιπλέον, οι χρόνου-πτήσης σαρωτές μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο ένα σημείο κάθε φορά, έτσι η διαδικασία σάρωσης είναι χρονοβόρα, ενώ οι σαρωτές τριγωνισμού με λέιζερ μπορούν να σαρώσουν πολλαπλά σημεία ταυτόχρονα με τη χρήση δομημένου φωτός, αυξάνοντας την ταχύτητα σάρωσης. [35]

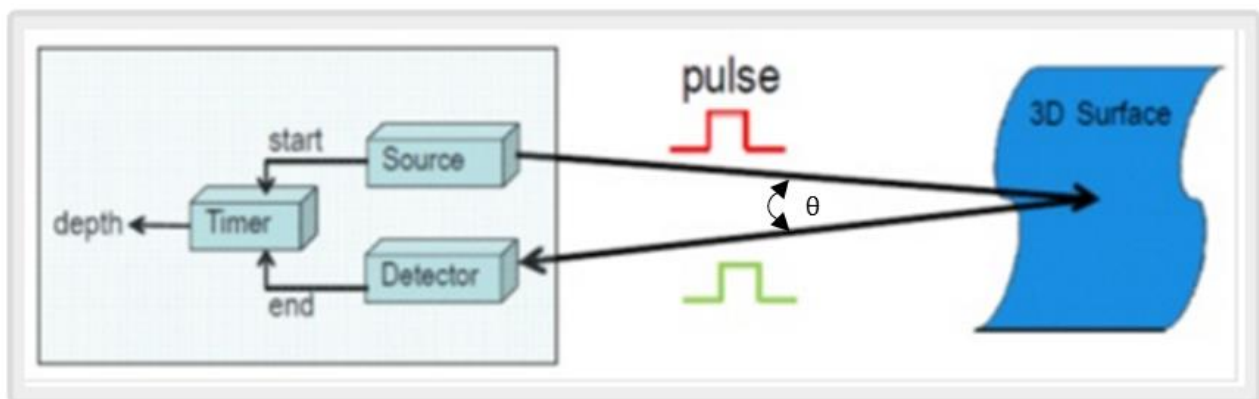
3.3.1 ΧΡΟΝΟΥ ΠΤΗΣΗΣ

Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής χρόνου-πτήσης αφορά ένα πομπό λέιζερ ο οποίος εκπέμπει ένα παλμό προς τον αντικείμενο-στόχο και η απόσταση μεταξύ πομπού και ανακλαστικής επιφάνειας υπολογίζεται από το χρόνο ταξιδιού του παλμού από τη στιγμή μετάδοσης του έως και τη λήψη του από το πομπό.

Ένας σαρωτής εκπέμπει τυπικούς παλμούς λέιζερ Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας (ΗΑ). Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία εστιάζεται σε μια στενή ευθυγραμμισμένη δέσμη και κατευθύνεται προς το αντικείμενο-στόχο. Ένα τμήμα του παλμού του λέιζερ ΗΑ που αντανακλάται στο αντικείμενο-στόχο, επιστρέφει στο σαρωτή πάνω στον οποίο είναι τοποθετημένος φωτο-αισθητήρας (ένας δέκτης φωτοδιόδου). Ένα εσωτερικό ρολόι μετρά το χρόνο που μεσολάβησε μεταξύ της μετάδοσης και λήψης του παλμού, και ένας ενσωματωμένος μικροεπεξεργαστής υπολογίζει, με δεδομένο το

μετρούμενο χρόνο, την απόσταση του αντικειμένου-στόχου σε σχέση με το σαρωτή λέιζερ. Το Σχήμα 3.4 απεικονίζει πώς λειτουργεί ένας σαρωτής λέιζερ χρόνου-πτήσης. Η γωνία θ , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4 είναι πολύ μικρή και η επίδραση της στην ακρίβεια της μέτρησης της απόστασης είναι αμελητέα. [36]

Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής χρόνου-πτήσης είναι γνωστή και από τα ηλεκτρονικά ταχύμετρα. Στην πραγματικότητα, ένα ταχύμετρο μαζί με κινητήριους άξονες μπορούν να προγραμματιστούν και να λειτουργήσουν ως συσκευή σάρωσης. Η υψηλή ταχύτητα του φωτός επιτρέπει στο σαρωτή χρόνο-πτήσης να λάβει εκατοντάδες ή χιλιάδες μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο (οι τιμές των 50.000 δείγματα / sec δεν είναι ασυνήθιστες) [36]. Ωστόσο, λόγω της μάζας του οργάνου, τα στοιχειώδη βήματα της περιστροφής γύρω από τους κινητήριους άξονες δεν μπορούν να γίνουν αρκετά γρήγορα. Επιπλέον, η επεξεργασία του σήματος συνήθως διαρκεί πάρα πολύ, και οι γωνιακές τιμές πρέπει να διαβάζονται από κωδικοποιημένους κύκλους. Οι σαρωτές χρόνου-πτήσης χρησιμοποιούν μικρές περιστροφικές συσκευές για την γωνιακή εκτροπή της δέσμης λέιζερ (τουλάχιστον για μία από τις δύο γωνίες) και χρησιμοποιούν απλούστερους αλγόριθμους για τους υπολογισμούς, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε τιμές χειρότερης ακρίβεια. Συνήθεις τυπικές αποκλίσεις της μέτρησης απόστασης με τους χρόνο-πτήσης σαρωτές είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών. [34]

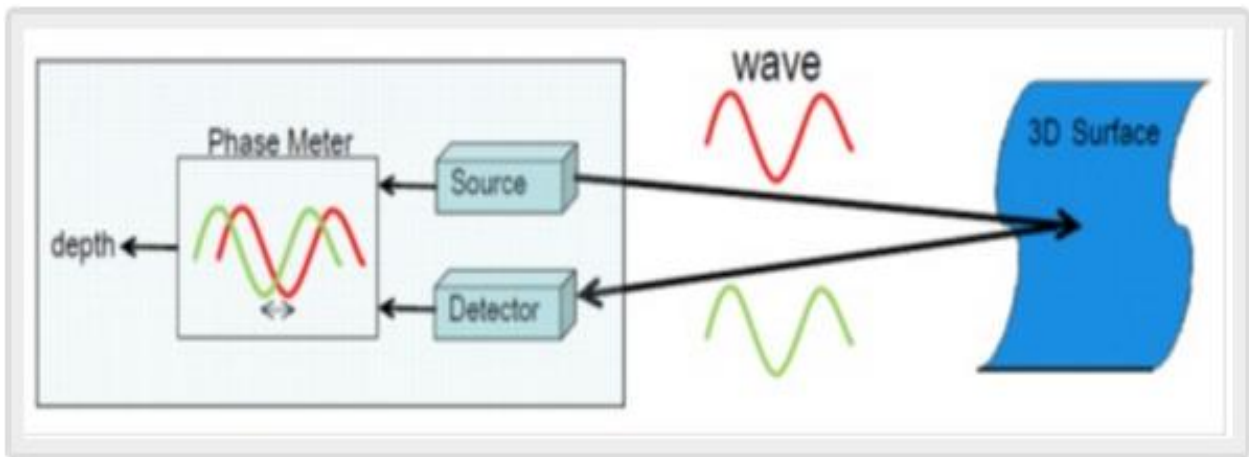


Σχήμα 3.4: Σχηματική όψη Σαρωτή Χρόνου-Πτήσης [33]

3.3.2. ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ

Εκτός από την αρχή του χρόνου-πτήσης, η αρχή της διαφοράς φάσης αντιπροσωπεύει επίσης μια συνηθισμένη τεχνική για μέτρηση μεσαίων αποστάσεων. Το εύρος μέτρησης της τεχνικής αυτής περιορίζεται στα εκατό-μέτρα και η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης μερικών χιλιοστών [26]. Η διαφορά φάσης (ή μετατόπιση φάσης) ουσιαστικά είναι μια παραλλαγή της τεχνικής χρόνου-πτήσης ως προς το τρόπο μέτρησης της απόστασης. Η απόσταση υπολογίζεται συγκρίνοντας την μετατόπιση φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου μήκους κύματος και του λαμβανόμενου φωτός. [36]

Αυτή η μέθοδος είναι επίσης γνωστή από τα ταχύμετρα μέσα. Στην περίπτωση αυτή, η μεταδιδόμενη δέσμη διαμορφώνεται από ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ του μεταδιδόμενου και λαμβανόμενου κύματος. Από τη σκοπιά του χρήστη, η μέθοδος δεν είναι πολύ διαφορετική από τη μέθοδο χρόνου-πτήσης. Λόγω της πιο περίπλοκης ανάλυσης σήματος, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι πιο ακριβή εις βάρος του χρόνου μέτρησης. Δεδομένου ότι απαιτείται καλά καθορισμένο σήμα επιστροφής, η χρησιμοποίηση της μεθόδου διαφοράς φάσης χωρίς την επίτευξη του κατάλληλου σήματος μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο εύρος λήψεων και μπορεί να παραχθούν περισσότερα λανθασμένα ή μειωμένα σημεία. [34]



Σχήμα 3.5: Σχηματική όψη σαρωτή Διαφοράς Φάσης [33]

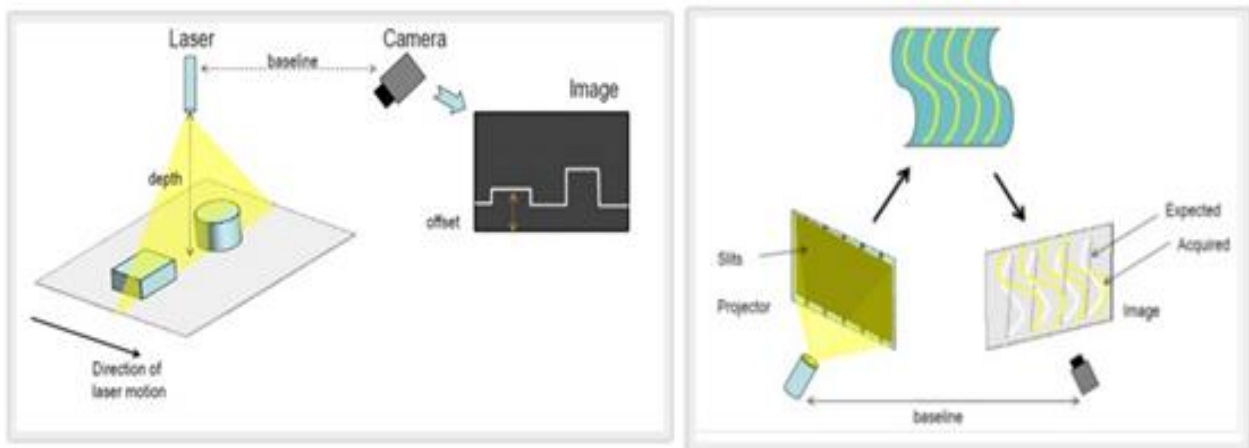
3.3.3 ΤΡΙΓΩΝΟΠΟΙΗΣΗ

Οι σαρωτές τριγωνισμού λέιζερ έχουν τα πλεονεκτήματα του απλού υλικού, του χαμηλού κόστους, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του μικρού όγκου σε σύγκριση με τους σαρωτές λέιζερ χρόνου-πτήσης και μπορούν να σαρώσουν πολλαπλά σημεία ταυτόχρονα με τη χρήση δομημένου φωτός, αυξάνοντας την ταχύτητα σάρωσης [35]. Υπάρχουν αρκετοί σαρωτές λέιζερ που χρησιμοποιούν τη αρχή του τριγωνισμού για εύρος απόστασης από μερικά χιλιοστά έως και λίγα μέτρα. Αυτοί χρησιμοποιούνται περισσότερο σε βιομηχανικές εφαρμογές της αντίστροφης μηχανικής [26]. Η τεχνική του τριγωνισμού εμφανίζεται με δύο παραλλαγές, τη λύση με μια κάμερα και τη λύση με δυο κάμερες CCD. [34]

Λύση μιας κάμερας: Αυτός ο τύπος σάρωσης αποτελείται από μια μηχανική βάση στην οποία στο ένα άκρο είναι τοποθετημένη μια συσκευή μετάδοσης, η οποία στέλνει μια ακτίνα λέιζερ σε μια καθορισμένη σταδιακά αυξανόμενη γωνία πάνω στο αντικείμενο, και στο άλλο άκρο της βάσης είναι τοποθετημένη μία κάμερα CCD, η οποία ανιχνεύει την κηλίδα λέιζερ (ή γραμμή) που προσπίπτει στο αντικείμενο. Η τρισδιάστατη θέση της ανακλώμενης επιφανείας μπορεί να εξαχθεί από το τρίγωνο που προκύπτει (Σχήμα 3.6). Η αρχή αυτή προέρχεται από την μέθοδο

χωρομέτρησης όπου χρησιμοποιούνται αποστασιόμετρα σε σταθερή βάση. Από αυτή την αρχή, είναι επίσης γνωστό ότι η ακρίβεια της απόστασης μεταξύ του μέσου και του αντικειμένου μειώνεται με το τετράγωνο αυτής της απόστασης. Προφανώς, για πρακτικούς λόγους, το μήκος βάσης δεν μπορεί να αυξηθεί κατά βούληση. Παρ' όλα αυτά, η τεχνική μίας κάμερας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για μετρήσεις σε μικρές αποστάσεις μικρών αντικείμενων καθώς είναι πολύ πιο ακριβής στις μετρήσεις από ότι είναι οι σαρωτές λέιζερ (χρόνου πτήσης, διαφορά φάσης). [34]

Λύση δύο καμερών: Μια παραλλαγή της αρχής τριγωνισμού είναι η χρήση δύο καμερών CCD τοποθετημένες στα δύο άκρα της βάσης. Ουσιαστικά είναι στερεοσκοπική διάταξη (όπως η παθητική μέθοδος- Υποκεφάλαιο 3.2) με επιπλέον πηγή ακτινοβολίας. Η κηλίδα ή το μοτίβο που πρόκειται να ανιχνευθεί παράγεται από ένα προβολέα χωριζόμενου φωτός, ο οποίος δεν έχει καμία μετρητική λειτουργία. Η προβολή μπορεί να αποτελείται από ένα κινούμενο φως (κηλίδα ή γραμμή), από λωρίδα κινούμενων μοτίβων ή από ένα στατικό αυθαίρετο μοτίβο. Η γεωμετρική λύση είναι η ίδια όπως και με την αρχή μίας κάμερας, με αποτέλεσμα να έχουμε τα ίδια χαρακτηριστικά ακρίβειας. Δεν προσφέρουν όλες οι συσκευές που χρησιμοποιούν δύο κάμερες υψηλά ποσοστά σημείων και δεν είναι όλες τους συντονισμένες σε πραγματικό χρόνο. Υπάρχουν περιπτώσεις συσκευών οι οποίες παρουσιάζουν τόσο υψηλά ποσοστά σημείων όσο και επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, και οι οποίες αποτελούν μια εναλλακτική λύση για τις συσκευές σάρωσης. Ωστόσο, οι συσκευές αυτές δεν μπορούν σε πρακτικές απαιτήσεις να θεωρηθούν ως 3D σαρωτές. [34]



Σχήμα 3.6: Διάταξη Τριγωνοποίηση μιας κάμερας με ακτινοβολία α)λέιζερ και β)δομημένου φωτός [33]

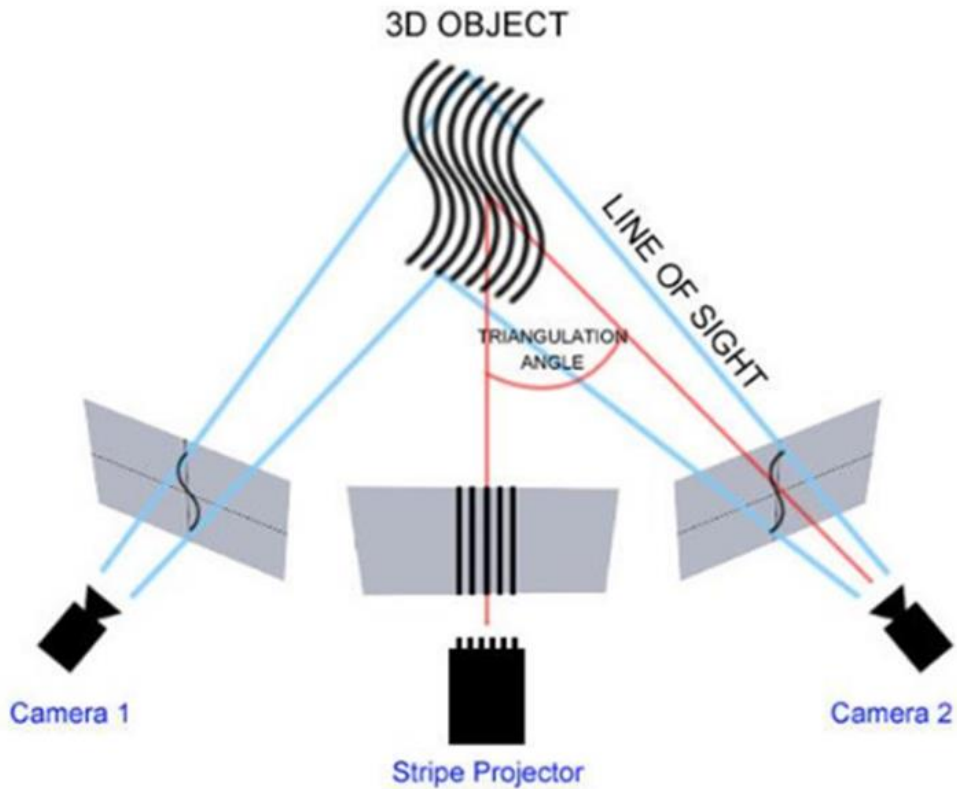
3.3.4 ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ

3.3.4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μια από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες ενεργές μεθόδους στηρίζεται στη προβολή δομημένου φωτός. Λόγω των μεγάλων τεχνολογικών φορτίων σάρωσης και επεξεργασίας που απαιτούνται από τους σαρωτές λέιζερ, πολλές μέθοδοι έχουν επινοηθεί για την προβολή και τη πορεία πρότυπων (μοτίβων) δομημένου φωτός για τη μείωση αυτών των τεχνολογικών φορτίων. Τέτοια μέθοδος είναι αυτή των πολλαπλών λωρίδων και των ημιτονοειδών μοτίβων (sinusoidal fringe patterns), που φωτίζουν ολόκληρη την επιφάνεια του στόχου την ίδια στιγμή [37]. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένας προβολέας που εκπέμπει ένα μοτίβο (δομημένο φως) πάνω στη μετρούμενη επιφάνεια και μια κάμερα για τη σύλληψη της προβολής αυτής. Οι διατάξεις της μεθόδου αυτής ακολουθούν τις τεχνικές τριγωνισμού όπως παρουσιάστηκαν πιο πάνω (Υποκεφάλαιο 3.3.3), δηλαδή διατάξεις με μία ή δύο κάμερες. Οι 3D πληροφορίες εκδηλώνονται στις εμφανείς παραμορφώσεις του μοτίβου που απεικονίζεται σε σχέση με τη πρότυπη μορφή του. Με την ανάλυση αυτών των παραμορφώσεων μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για τη θέση, τον προσανατολισμό και την υφή της επιφάνειας επί της οποίας έχει προβληθεί το μοτίβο. [31]

Η 3D ανάλυση μπορεί να γίνει ακόμα πιο λεπτομερής με τη χρήση Κωδικοποιημένου Δομημένου Φωτός. Αυτή η τεχνική επιτρέπει να γνωρίζουμε για κάθε εικονιζόμενο σημείο την αρχική του θέση στο εκπεμπόμενο επίπεδο προβολής. Έτσι, η αντιστοιχία μπορεί να ληφθεί απευθείας και δεν είναι απαραίτητη η χρήση γεωμετρικών περιορισμών για να πετύχουμε την αντιστοιχία. Η απευθείας αντιστοιχία των σημείων επιτυγχάνεται με τη κωδικοποίηση του μοτίβου που απεικονίζεται, έτσι ώστε κάθε σημείο του φωτός που προβάλλεται να μεταφέρει κάποιες πληροφορίες. [31]

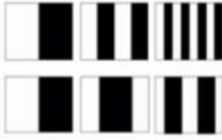




Ένα κωδικοποιημένο δομημένο σύστημα φωτισμού βασίζεται στην προβολή ενός ενιαίου προτύπου ή μιας σειράς μοντέλων (μοτίβων) πάνω στην επιφάνεια μέτρησης, το οποίο στη συνέχεια λαμβάνεται από μία ή ένα σύνολο καμερών. Τα μοτίβα είναι ειδικά σχεδιασμένα έτσι ώστε κωδικοποιημένες λέξεις να προσδιορίζονται από μια ομάδα pixels. Κάθε κωδικοποιημένο pixel έχει δική του κωδικοποιημένη λέξη, ώστε να υπάρχει μια άμεση χαρτογράφηση από τις κωδικοποιημένες λέξεις με τις αντίστοιχες συντεταγμένες του pixel στο μοτίβο. Οι κωδικοποιημένες λέξεις είναι απλοί αριθμοί, οι οποίοι αντιστοιχίζονται στο μοτίβο χρησιμοποιώντας είτε αποχρώσεις του γκρι χρώματος, είτε διάφορα χρώματα ή γεωμετρικές παραστάσεις. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σημείων που πρέπει να κωδικοποιηθεί, τόσο μεγαλύτερες είναι οι κωδικοποιημένες λέξεις. Ως εκ τούτου, η χαρτογράφηση των εν λόγω κωδικοποιημένων λέξεων σε ένα μοτίβο είναι δυσκολότερη. [38]



Σχήμα 3.7: Σχηματική Διάταξη τριγωνοποίησης δύο καμερών, δομημένου φωτός [33]

3.3.4.2 ΜΟΤΙΒΑ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι τεχνικές προβολής μοτίβων που ταξινομήθηκαν βάσει της τεχνικής κωδικοποίησης τους (χρόνου-πολυπλεξίας κωδικοποίηση, χωρική κωδικοποίηση και άμεση κωδικοποίηση). Οι επτά στήλες στα δεξιά του πίνακα αναφέρουν κατά πόσο ή όχι ένα συγκεκριμένο μοτίβο είναι κατάλληλο για τη μέτρηση κινούμενων αντικειμένων, το βάθος χρώματος που χρησιμοποιείται καθώς και αν εμφανίζονται επαναλαμβανόμενες οι κωδικοποιημένες λέξεις (περιοδική κωδικοποίηση) ή όχι (απόλυτη κωδικοποίηση). Οι τεχνικές χρόνου-πολυπλεξίας δημιουργούν τις κωδικοποιημένες λέξεις, προβάλλοντας μια σειρά από σχέδια κατά μήκος του χρόνου, έτσι ώστε η δομή του κάθε μοτίβου μπορεί να είναι πολύ απλή. Επιπλέον, παρά την αύξηση της πολυπλοκότητας των μοτίβων, η χωρική κωδικοποίηση αντιπροσωπεύει τις κωδικοποιημένες λέξεις σε ένα μοναδικό σχέδιο. Τέλος, η τεχνική άμεσης κωδικοποίησης ορίζει μια κωδικοποιημένη λέξη για κάθε pixel, η οποία είναι ίση με μία απόχρωση του γκρι ή με κάποιο χρώμα. [38]

Time-multiplexing	Binary codes 	Posdamer et al. Inokuchi et al. Minou et al. Trobina Valkenburg and Melvor Skocaj and Leonardis Rocchini et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	n-ary codes	Caspi et al. Horn and Kiryati	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
	Gray code + Phase shifting	Bergmann Sansoni et al. Wiora Gühring	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓
	Hybrid methods	Kosuke Sato Hall-Holt and Rusinkiewicz	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
Spatial Neighborhood	Non-formal codification 	Maruyama and Abe Durdle et al. Ito and Ishii Boyer and Kak Chen et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	De Bruijn sequences 	Hügli and Maître Monks et al. Vuylsteke and Oosterlinck Salvi et al. Lavoie et al. Zhang et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	M-arrays 	Morita et al. Petriu et al. Kiyasu et al. Spoelder et al. Griffin and Yee Davies and Nixon Morano et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	Grey levels	Carrhill and Hummel Chazan and Kiryati Hung	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
Direct coding	Colour 	Tajima and Iwakawa Smutny and Pajdla Geng Wust and Capson Tatsuo Sato	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	Scene applicability	<i>Static</i> <i>Moving</i>	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
Pixel depth	<i>Binary</i> <i>Grey levels</i> <i>Colour</i>	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	
Coding strategy	<i>Periodical</i> <i>Absolute</i>	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	

Σχήμα 3.8: Προτεινόμενες διατάξεις μοτίβων [38]

3.3.4.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΑΡΩΤΗ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ

Η φάση αρχικοποίησης αφορά τη βαθμονόμηση της μονάδας σάρωσης σε σχέση με το αντικείμενο που πρέπει να αποκτηθεί, δηλαδή σε σχέση με την απόκτηση ενός δεδομένου όγκου. Πρέπει να εκτελείται μόνο όταν η αντίστοιχη θέση της μονάδας σάρωσης και του αντικείμενου διαφέρουν. Η βαθμονόμηση του συστήματος συνεπάγεται [39]:

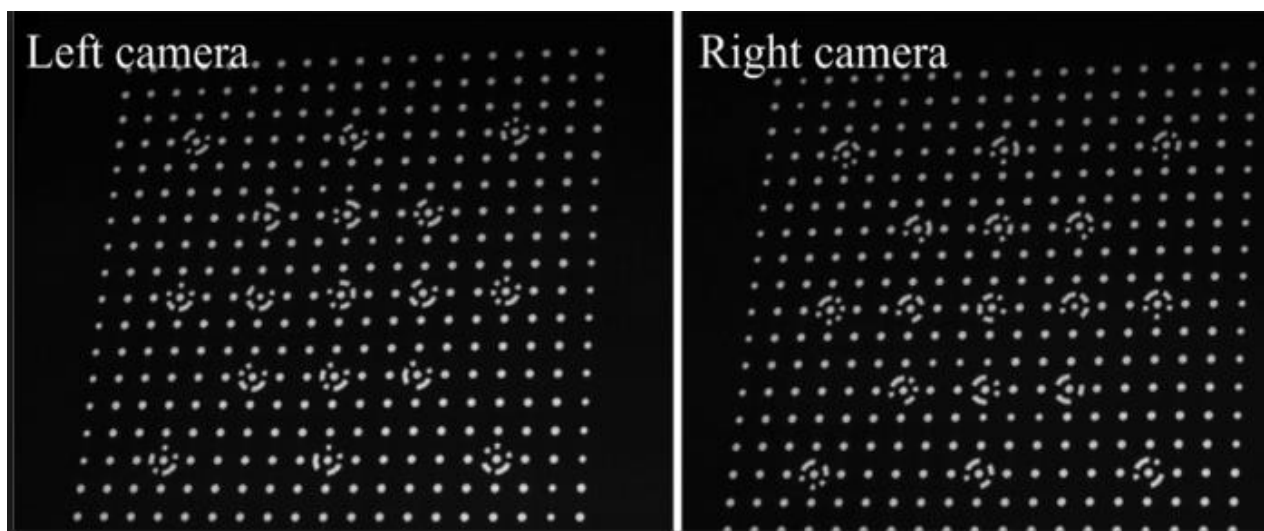
- *Κάμερα εγγενής βαθμονόμησης.* Γίνεται μία φορά, μετά τον καθορισμό της εστίασης, του ζουμ και της έκθεσης (διάγραμμα) της κάμερας. Εντοπίζει τις εγγενείς παραμέτρους της κάμερας που είναι η απόσταση εστίασης, η προοπτική εστίασης και η ακτινική παραμόρφωση.
- *Προβολέας εγγενής βαθμονόμησης.* Γίνεται μία φορά, μετά από τον καθορισμό εστίασης και ζουμ του προβολέα. Εντοπίζει τις 3D παραμέτρους του συνόλου των επιπέδων που παράγεται από κάθε κάθετη γραμμή του προβολέα των pixels.
- *Συνολική βαθμονόμηση του συστήματος.* Είναι ένα παράγωγο των προηγούμενων σταδίων, και έχει ως αποτέλεσμα την αντιστοίχιση των 3D παραμέτρων του προβολέα με την κάμερα.

Η βαθμονόμηση της κάμερας γίνεται με την απόκτηση ενός πίνακα βαθμονόμησης (πλάκα στόχων) ο οποίος τοποθετείται σε γνωστή θέση στο χώρο σάρωσης, έτσι ώστε όλος ο όγκος που επιθυμείται να αποκτηθεί, να σαρώνεται από τον επίπεδο πίνακα βαθμονόμησης. [39]

Ο πίνακας βαθμονόμησης περιέχει ένα σύνολο δεικτών (Σχήμα 3.9) με γνωστές σχετικές θέσεις και φωτίζεται με ένα ομοιόμορφο λευκό φως. Οι δείκτες ανιχνεύονται από την επίκτητη εικόνα ως εξής: η εικόνα εισόδου φιλτράρεται και κβαντοποιείται με ένα προσαρμοστικό τρόπο. Οι δείκτες ανιχνεύονται από την επίκτητη εικόνα ως εξής: η εικόνα εισόδου φιλτράρεται και κβαντοποιείται με ένα προσαρμοστικό τρόπο, οι δείκτες (κύκλος + barcode) ανιχνεύονται, για κάθε δείκτη υπολογίζεται το κέντρο κύκλου και οι κύριοι άξονες του προβαλλόμενου ελλειπτικού σχήματος (με ακρίβεια υπο-pixel), και τέλος, κάθε δείκτης αναπροσαρμόζεται από την αποκωδικοποίηση του συσχετιζόμενου bar code. [39]

Η βαθμονόμηση του προβολέα γίνεται με την απόκτηση (μετά από σάρωση) του ίδιου φωτισμένου πίνακα βαθμονόμησης με τα δομημένα πρότυπα φωτός, που τοποθετούνται σε δύο άγνωστες θέσεις στον χώρο σάρωσης. Πρώτον, η 3D θέση του πίνακα βαθμονόμησης υπολογίζεται αυτόματα με την ανίχνευση της θέσης και της παραμόρφωσης των δεικτών στις αποκτώμενες εικόνες. Δεύτερον, ανιχνεύονται όλες οι λωρίδες του φωτός που προβάλλονται στο πίνακα βαθμονόμησης και οι αντίστοιχες γραμμικές εξισώσεις υπολογίζονται στο χώρο του αντικείμενου. Ο πίνακας βαθμονόμησης στη συνέχεια μετακινείται σε μια άλλη θέση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Για κάθε κάθετη λωρίδα φωτός, ανακατασκευάζεται ο συντελεστής των δύο αντίστοιχων γραμμών ως προς τις δύο θέσεις του πίνακα βαθμονόμησης. Η εξίσωση του επιπέδου

σε 3D χώρο που ορίζει κάθε κάθετη λωρίδα φωτός, μπορεί εύκολα να ανακατασκευαστεί από τον υπολογισμό του συντελεστή του επιπέδου το οποίο περνά μέσα από αυτές τις δύο αντίστοιχες γραμμές και το σημείο εκπομπής. [39]



Σχήμα 3.9: Πίνακας βαθμονόμησης από την οπτική γωνία των δύο καμερών σε διάταξη τριγωνοποίησης [40]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΜΑΧΙΟ CAM PLATE - ΠΑΚΕΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

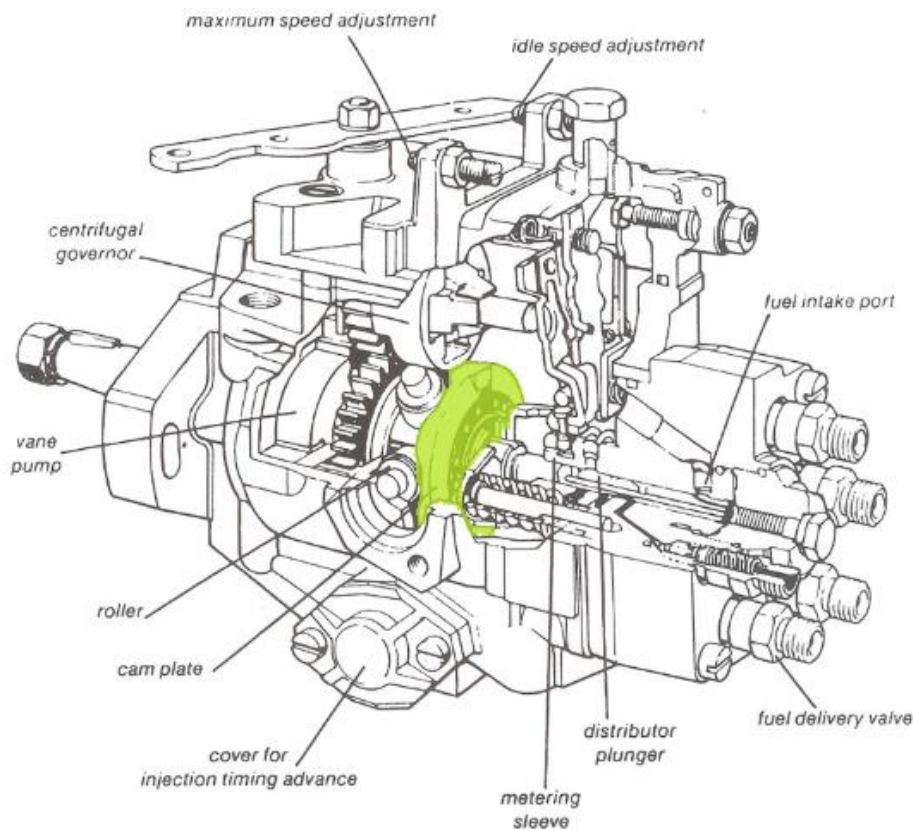
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το τεμάχιο το οποίο μελετάται στην εργασία αυτή καθώς και τα πακέτα λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων σάρωσης, για τον σχεδιασμό και τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν.

4.1 CAM PLATE - ΤΕΜΑΧΙΟ ΠΡΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΜΣ

Το τεμάχιο “**Cam plate**” στο οποίο εφαρμόστηκε ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός αποτελεί τμήμα πετρελαιοκίνητης μηχανής (diesel engine) αυτοκινήτων που κατασκευάζει η εταιρία Bosch και χρησιμοποιείται από μια πληθώρα αυτοκινητοβιομηχανιών που κατασκευάζουν πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα (Toyota, Renault, fiat, κ.α.). Ποιο συγκεκριμένα το τεμάχιο “**cam plate**” αποτελεί τμήμα του συστήματος της αντλίας αξονικού διανομέα ψεκασμού, τετρακύλινδρης diesel μηχανής.



Σχήμα 4.1: Τεμάχιο Cam plate



Σχήμα 4.2: Αντλία αξονικού εμβόλου διανομής καυσίμου, VE Rombert Bosch GmbH [41]

Παρακάτω γίνεται περιγραφή της λειτουργίας του διανομέα ψεκασμού της αντλίας όπου παρουσιάζεται η χρήση του τεμαχίου cam plate.

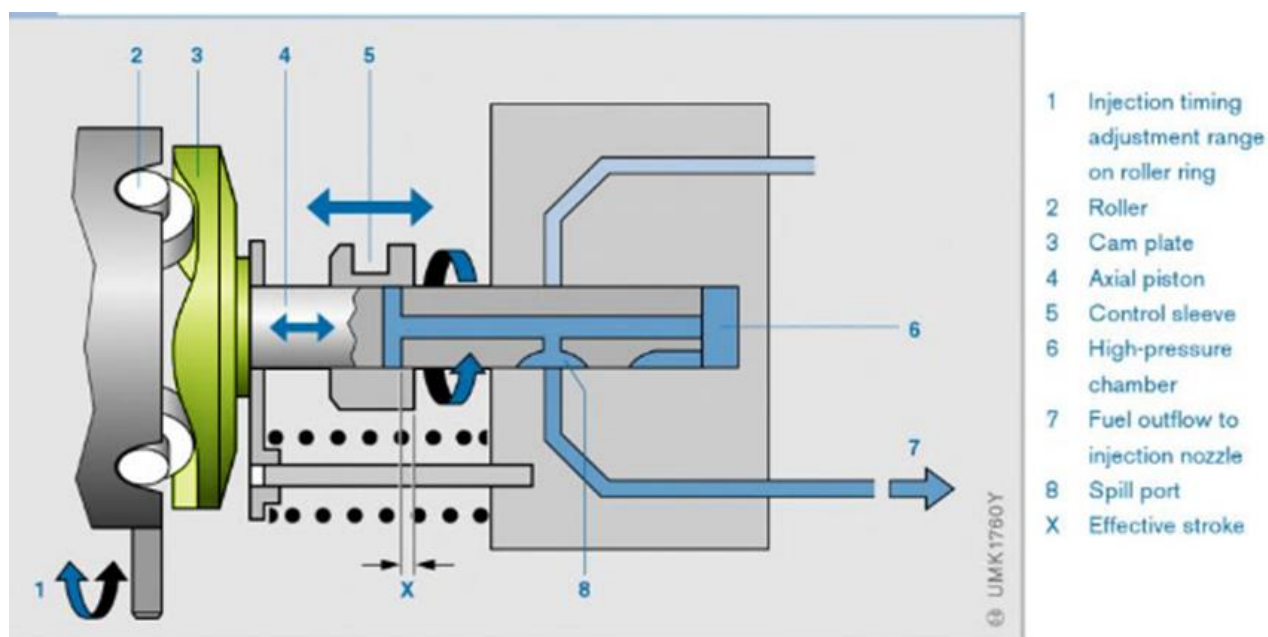
Διανομέας ψεκασμού αντλίας

Ο διανομέας ψεκασμού έχει μόνο μια αντλία η οποία εξυπηρετεί όλους τους κυλίνδρους της μηχανής. Μια πτερυγιοφόρος αντλία σπρώχνει το καύσιμο μέσα στο θάλαμο υψηλής πίεσης (Σχήμα 4.3(6)) και ένα αξονικό έμβολο (Σχήμα 4.3(4)) συμπιέζει το καύσιμο δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο την υψηλή πίεση στο θάλαμο. Ένας περιστρεφόμενος έμβολο-διανομέας ανοιγοκλείνει τις διόδους εισροής και εκροής του καυσίμου, έτσι ώστε να διανέμεται ξεχωριστά στους κινητήριους κυλίνδρους. [41] [42]

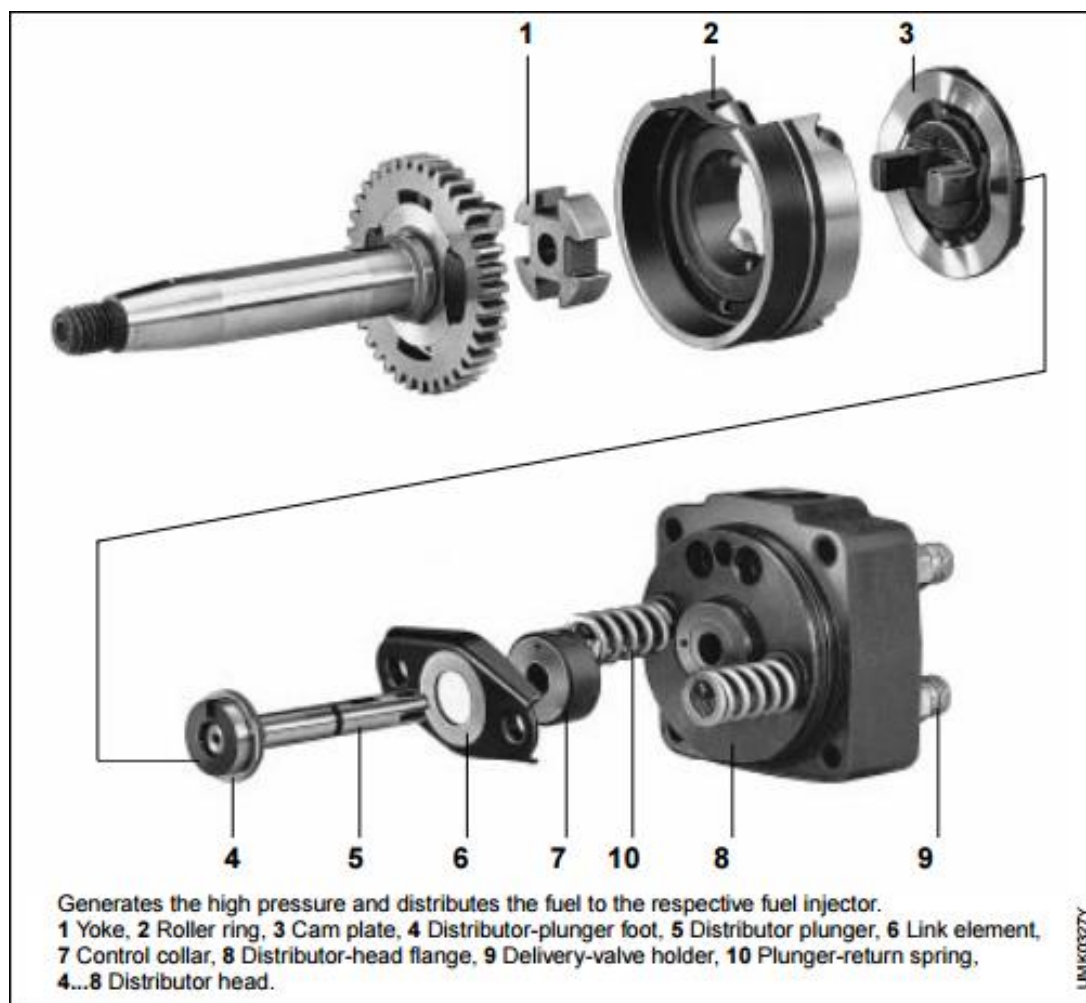
Αξονικός έμβολο-διανομέας

Ένας περιστρεφόμενος δίσκος (Cam plate) (Σχήμα 4.3(3)) περιστρέφεται από τον κινητήρα. Ο αριθμός των κωνικών λοβών του Cam plate είναι ίσος με τον αριθμό των κυλίνδρων της μηχανής. Οι λοβοί ταξιδεύουν σε κυλίνδρους (Σχήμα 4.3(2)) πάνω στο δακτύλιο, έτσι ώστε ο έμβολο-διανομέας, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το Cam plate, περιστρέφεται και ανεβοκατεβαίνει ταυτόχρονα. Σε κάθε στροφή του άξονα, το έμβολο ολοκληρώνει ένα αριθμό διαδρομών ίσο με τον αριθμό των κυλίνδρων που τροφοδοτεί. [42]

Σε έναν αξονικό έμβολο-διανομέα αντλίας ελεγχόμενης διόδου, υπάρχει ένας σωλήνας-ελεγκτής (Σχήμα 4.3(5)) ο οποίος καθορίζει την ωφέλιμη διαδρομή, επομένως καθορίζει και τη διάρκεια ψεκασμού καθώς και τη ποσότητα του καυσίμου που εισέρχεται στο θάλαμο. Ο ελεγκτής αυτός μπορεί να είναι ένας μηχανικός ρυθμιστής ή ένας ηλεκτρικά ελεγχόμενος μηχανισμός. [42]



Σχήμα 4.3: Μέθοδος διανομής καυσίμου αντλίας πετρελαίου αξονικού εμβόλου [42]



Σχήμα 4.4: Τμήματα διανομέα ψεκασμού αντλίας [43]

Το συγκεκριμένο τεμάχιο Cam plate, στο οποίο εφαρμόστηκε ο ΑΜΣ, είναι κράμα χάλυβα και κατασκευάζεται σε πρώτη φάση με τη διαδικασία της χύτευσης, όπου γίνεται σχηματισμός της βασικής μορφής του. Στη συνέχεια, σε δεύτερη φάση, γίνεται επεξεργασία του τεμαχίου σε μηχανή φρέζας όπου διαμορφώνονται οι λείες επιφάνειες και δημιουργούνται οι οπές.

Στην εργασία αυτή γίνεται μελέτη για τη κατασκευή του τεμαχίου με τη διαδικασία της θερμής σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας ακριβείας.

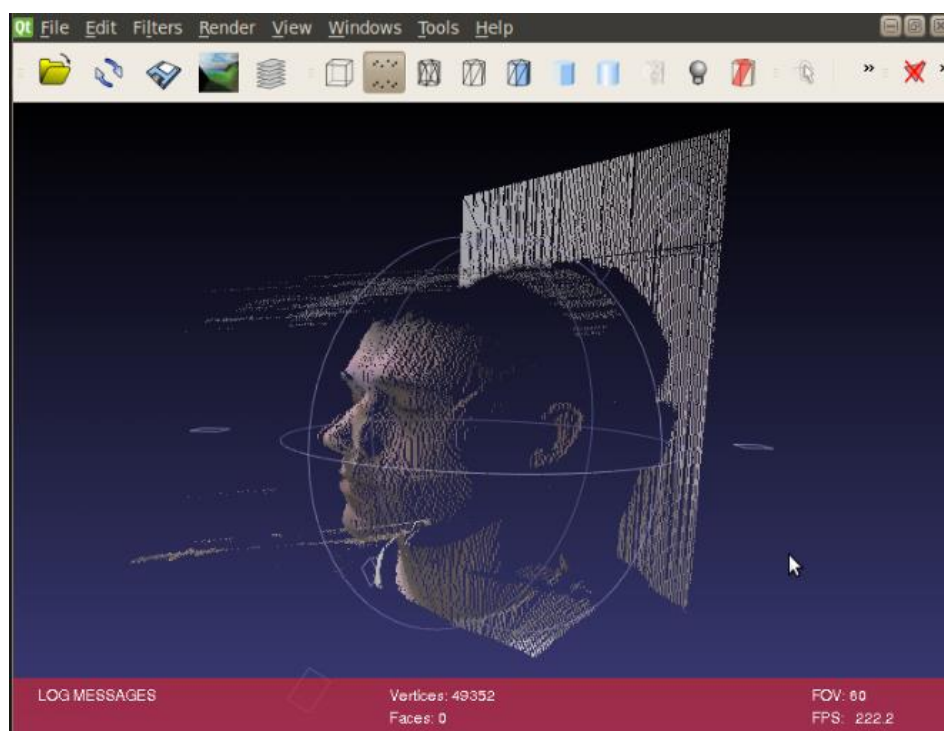
4.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ 3D ΔΕΔΟΝΩΝ MESHLAB

Πρόκειται για ένα λογισμικό επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων και πλεγμάτων τριγώνων ελεύθερα διαθέσιμο στο διαδίκτυο. Σκοπός της ανάπτυξης του λογισμικού αυτού, είναι η επεξεργασία μοντέλων από σχετικά μεγάλο πλήθος τρισδιάστατων σημείων με μία σειρά εργαλείων που παρέχουν δυνατότητες επεξεργασίας, απομάκρυνσης στοιχείων θορύβου, πραγματοποίησης διορθώσεων και απόδοσης υψής. Το λογισμικό αυτό είναι ελεύθερου κώδικα και αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Visual Computing του Ινστιτούτου Επιστήμης και Τεχνολογίας της Πληροφορικής (ISTI), του Εθνικού Οργανισμού Έρευνας της Ιταλίας (CNR). [44]

Το λογισμικό διαθέτει μια πληθώρα εργαλείων που επιτρέπει την πολυεπίπεδη επεξεργασία των νεφών σημείων. Τέτοια εργαλεία επιτρέπουν την επεξεργασία επιλεγμένων τμημάτων του νέφους σημείων, διαγραφή σημείων ή επιφανειών χειροκίνητα ή ανάλογα με τη σχέση τους με τα υπόλοιπα σημεία ή επιφάνειες του νέφους ή άλλες σταθερές. Επίσης υπάρχουν εργαλεία που επιτρέπουν την κατασκευή σχημάτων ή επιφανειών από το χρήστη, ή την παραγωγή πλεγμάτων πολυγώνων, ξεκινώντας από ένα βασικό πλέγμα. Υπάρχουν και εργαλεία χονδρικής σύνδεσης ανεξάρτητων νεφών σε ένα ενιαίο μοντέλο καθώς και τη δυνατότητα πραγματοποίησης σύγκρισης της σύμπτωσης δύο νεφών σημείων. [44]

Παρέχεται πληθώρα αλγορίθμων που αξιοποιούν διαφορετικές μεθοδολογίες συμπλήρωσης κενών, «απλοποίησης» του νέφους διατηρώντας τα βασικά του χαρακτηριστικά, επιμερισμό του νέφους σε τμήματα, αλλά και κατασκευή από αυτό επιφανειών. Υπάρχουν φίλτρα εξομάλυνσης του μοντέλου σε σχέση με τα χαρακτηριστικά των σημείων και των τριγώνων αυτού, καθώς και επιβολής γεωμετρικών μετασχηματισμών με τη μορφή εξίσωσης. [44]

Υπάρχουν εργαλεία για την εξαγωγή ποιοτικών χαρακτηριστικών του μοντέλου, εξαγωγή ιστογραμμάτων και στατιστικών στοιχείων και την επιβολή συναρτησιακών σχέσεων μεταξύ των σημείων του νέφους ή των τριγώνων. Άλλα εργαλεία που υπάρχουν είναι υπολογισμού των στοιχείων καμπυλότητας, προσδιορισμού και επεξεργασίας των διανυσμάτων προσανατολισμού των σημείων του νέφους του μοντέλου. [44]



Σχήμα 4.5: Παράδειγμα νέφους σημείων, σε περιβάλλον MeshLab, που λήφθηκε μετά από σάρωση σε πραγματικό χρόνο [45]

4.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ CAD -SOLIDWORKS

4.3.1 CAD

Ως CAD (Computer-Aided Design) μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε από τις δραστηριότητες σχεδιασμού κάνει χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είτε για την ανάπτυξη, ή την ανάλυση ή τη τροποποιήσει ενός μηχανολογικού σχεδιασμού [46]. Τα υπολογιστικά συστήματα CAD απαρτίζονται από το υλικό (hardware) και το λογισμικό (software). Το υλικό περιλαμβάνει τον υπολογιστή, μια ή περισσότερες τερματικές οθόνες γραφικών, πληκτρολόγια και άλλες ειδικές συσκευές. Το λογισμικό απαρτίζεται από τα προγράμματα γραφικών του υπολογιστή και τα προγράμματα εφαρμογών, που διευκολύνουν τον χρήστη στην εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων, όπως τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς συστημάτων, τους υπολογισμούς σε φαινόμενα μεταφοράς, τον αριθμητικό έλεγχο κ.α. Τα προγράμματα εφαρμογών ποικίλλουν από χρήστη σε χρήστη, ανάλογα με τις ανάγκες τους. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα διάφορα συστήματα CAD να μη μοιάζουν εντελώς μεταξύ τους, διαφοροποιούμενα πολλές φορές και ως προς τη σύνθεση των περιφερειακών συσκευών. Γενικά, ανάλογα με τον εξοπλισμό που διαθέτει ο κάθε χρήστης μπορεί να σχεδιάσει, να αναλύσει και να εφαρμόσει τεχνικές αριστοποίησης για την κατηγορία συστημάτων του ενδιαφέροντος του.

Οι λόγοι χρησιμοποίησης CAD είναι πολλοί και μεταξύ τους οι εξής [47]:

- Αύξηση της παραγωγικότητας του σχεδιαστή, με τη δυνατότητα που του δίνεται να μειώσει το χρόνο για ανάλυση, σύνθεση και τεκμηρίωση, κατά τη σχεδίαση.
- Βελτίωση της ποιότητας σχεδίασης.
- Βελτίωση της τεκμηρίωσης κατά τη σχεδίαση, με ακριβή και εμπειριστατωμένα σχέδια.
- Δημιουργία βιομηχανικής βάσης δεδομένων με πλήρη στοιχεία για τις προδιαγραφές των προϊόντων.

Η σχεδίαση είναι μια βηματική διαδικασία, στην οποία διακρίνουμε έξι στάδια [47]:

1. Αναγνώριση της ανάγκης (Recognition of need).
2. Διατύπωση του προβλήματος (Definition of the problem).
3. Σύνθεση (Synthesis).
4. Ανάλυση και αριστοποίηση (Analysis and optimization).
5. Αποτίμηση-Αξιολόγηση (Evaluation).
6. Παρουσίαση (Presentation).

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το CAD πρόγραμμα SolidWorks για τη μοντελοποίηση του τεμαχίου αξιοποιώντας τις πληροφορίες που αντλήθηκαν από τη 3D Σάρωση.

4.3.2 SOLIDWORKS

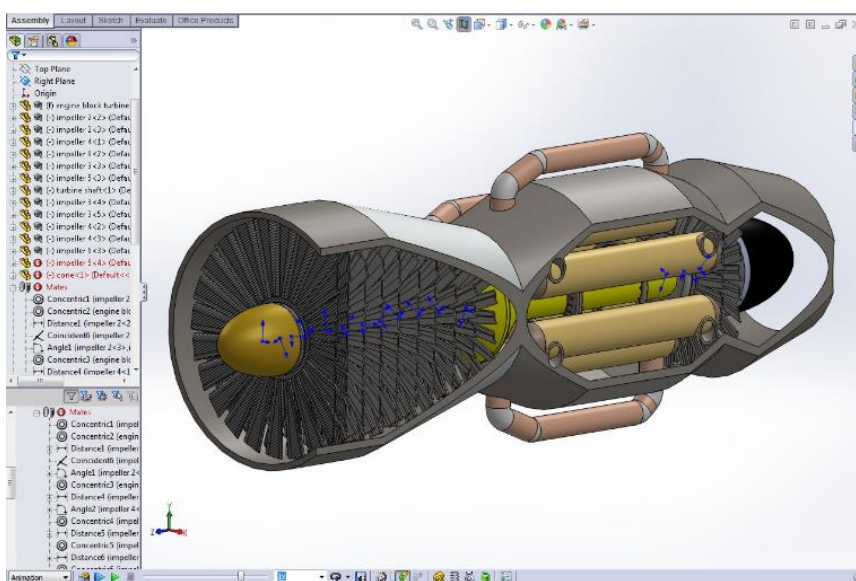
Το SolidWorks είναι ολοκληρωμένο σχεδιαστικό πακέτο το οποίο βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη σύγχρονη βιομηχανία. Το πακέτο λογισμικού SolidWorks περιέχει προγράμματα CAD και CAE με δυνατότητες CAM. Το SolidWorks όμως είναι προσανατολισμένο κυρίως στο τομέα του ολοκληρωμένου σχεδιασμού μηχανημάτων και εξαρτημάτων CAD τόσο για δισδιάστατα (2D) όσο και για τρισδιάστατα (3D) σχέδια παρέχοντας την δυνατότητα μετατροπής από το ένα στο άλλο. Επίσης έχει ενσωματωμένα εργαλεία τυποποιημένων μηχανολογικών εξαρτημάτων (ρουλεμάν, τροχοί, κοχλίες κτλ.), συγκολλήσεων και μεταλλικών κατασκευών, σχεδίασης μεταλλικών φύλλων (Sheet Metal) και σχεδίασης καλουπιών.

Επιπλέον πλατφόρμες που ενσωματώνει το SolidWorks:

SW Simulation: αποτελεί ένα εργαλείο για την επικύρωση του μηχανολογικού σχεδιασμού. Το εργαλείο αυτό αναδεικνύει τη συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικείμενου στο φυσικό περιβάλλον για το οποίο προορίζεται. Συνεπώς με την πλατφόρμα του SolidWorks Simulation μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά του σχεδιασμένου αντικείμενου υπό την επίδραση δυναμικών και θερμικών φορτίων, να ευρεθεί θ ιδιοσυχνότητα του κ.α.

SW Motion: αποτελεί ένα εικονικό εργαλείο προτυποποίησης, το οποίο παρέχει δυνατότητες προσομοίωσης της κίνησης ενός μηχανισμού, ελέγχονται με τον τρόπο αυτόν την ομαλή και επιδιωκόμενη λειτουργία του.

SW Flow Simulation: αποτελεί ένα πλήρες εικονικό εργαλείο προσομοίωσης της ροής ρευστού και της μεταφοράς θερμότητας, προσφέροντας τη δυνατότητα διεξαγωγής δοκιμών σε εικονικά πρωτότυπα.



Σχήμα 4.6: Παράδειγμα κινητήρα αεροσκάφους σχεδιασμένο σε περιβάλλον SolidWorks [48]

4.4 CAE – SIMUFACT.FORMING

4.4.1 CAE

CAE (Computer-Aided Engineering) είναι ο Μηχανολογικός σχεδιασμός εξ ολοκλήρου με τη βοήθεια υπολογιστή. Περιλαμβάνει την ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων, την κινηματική ανάλυση, τη θερμική ανάλυση, την υπολογιστική δυναμική των ρευστών (Simufact, CFD Computational) και τη βελτιστοποίηση. Είναι ένα εργαλείο που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. [47]

Για να επιτευχθεί η προσομοίωση θα πρέπει ο υπολογιστής να χρησιμοποιήσει πληροφορίες για την κατάσταση στο εσωτερικό του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους μια από τις οποίες είναι και η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

4.4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας σε πρώτη φάση επιχειρείται να προβλεφθεί η παραμόρφωση ή η κάμψη που θα υποστεί το μοντέλο μετά την επιβολή δυνάμεων ή τάσεων. Με αυτή την μέθοδο χωρίζουμε την κατασκευή σε ένα πλέγμα που συγκροτείται από στοιχεία, (μικρά κομμάτια) που ενώνονται μεταξύ τους. Τα σημεία στα οποία τα στοιχεία ενώνονται ονομάζονται “nodes” κόμβοι. Η τοπολογία κάθε στοιχείου ορίζεται από τους κόμβους αυτούς οι οποίοι έχουν κάποιο αριθμό για να διαχωρίζονται, (π.χ. Node 56). Υπάρχει λοιπόν μια ορίζουσα η οποία αντιπροσωπεύει το κάθε σημείο και με το συνδυασμό τελικά όλων αυτών των σημείων βγαίνει η τελική μορφή του μοντέλου. [47]

Όταν συντελείται καταπόνηση αυτή προκαλεί την αλλαγή της θέσης του κάθε κόμβου, οπότε αλλάζει και η ορίζουσα που τον αντιπροσωπεύει και κατ' επέκταση και η μορφή του μοντέλου. Είναι κατανοητό ότι ο κάθε κόμβος μπορεί να μεταφερθεί προς όλες τις διαστάσεις (x,y,z), καθώς και να περιστραφεί γύρω από αυτές. Για κάθε μία από αυτές τις κινήσεις υπάρχει και η αντίστοιχη εξίσωση η οποία βέβαια είναι και αυτή γραμμένη σε μορφή ορίζουσας. Αυτό γίνεται για να μπορούν να περαστούν στον αλγόριθμο του προγράμματος. [47]

Η παρακάτω σχέση συνδέει τη δύναμη με την παραμόρφωση:

$$\{F\} = [K] * \{d\}$$

όπου F = FORCE (Δύναμη) K = εξίσωση τοπολογίας κόμβου d = displacement (μετατόπιση)

4.4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για να γίνει όλη αυτή η διαδικασία, πρέπει να γίνει η αντικατάσταση του μοντέλου με ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, Finite Element Model (FEM). Στην ουσία χρησιμοποιείται η εικόνα του μοντέλου και όχι το ίδιο το μοντέλο. [47]

Ένα FEM πολύ συχνά κατασκευάζεται με περισσότερα από ένα είδη στοιχείων. Αυτό όπως καταλαβαίνουμε είναι απαραίτητο ειδικά όταν πρόκειται για πολύπλοκες κατασκευές. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Στην ουσία με τη μέθοδο αυτή από το σύνολο των στοιχειωδών δοκιμών μονάδων που αποτελούν το μοντέλο, επιλέγουμε κάποια που θεωρούμε αντιπροσωπευτικά κερδίζοντας έτσι, ένα μεγάλο αριθμό πράξεων, αφού στην ουσία ο αριθμός των μορίων ενός μοντέλου θα έτεινε στο άπειρο. [47]

Σκοπός της δημιουργίας του FEM είναι η καλύτερη απόδοση της παραμόρφωσης. Είναι αδιάφορο αν το FEM είναι το ακριβές αντίγραφο του μοντέλου οπτικά. Μας ενδιαφέρει δηλαδή ο τρόπος της ανάλυσης που θα γίνει να δώσει με την περισσότερη πιστότητα την αλλοίωση που θα υποστεί το μοντέλο μετά την επιβολή συνιστωσών καταπόνησης. Έτσι κατά την ανάλυση της κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθούν επιμέρους στοιχεία κελύφους, και τα στοιχεία δοκών. [47]

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων κατά την τελική επίλυση του δοκιμίου βέβαια εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως:

- Το πόσο καλά θα κατασκευαστεί το μοντέλο στη σχεδίαση
- Τις τιμές των φορτίων και γενικά των εξωτερικών καταπονήσεων
- Την ακρίβεια των στοιχείων που επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο πρόβλημα

Είναι ευνόητο ότι σε όσο μικρότερα στοιχεία, άρα και περισσότερα χωρίσουμε το μοντέλο, τόσο πιο ακριβή θα είναι τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ο πιο σίγουρος τρόπος να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι να την επαναλάβουμε με μικρότερα στοιχεία ώστε να γίνει πολύ πιο πυκνό το meshing και στη συνέχεια να διασταυρώσουμε τα αποτελέσματα από τις διαδοχικές αναλύσεις ώστε να διαπιστώσουμε αν αυτά συγκλίνουν ή στην αντίθετη περίπτωση έχουμε σημαντικές αποκλίσεις. Φυσικά στην περίπτωση που θα συμβεί το δεύτερο είναι φανερό ότι η ανάλυση θα πρέπει να γίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. [47]

Προβλήματα παρουσιάζονται συχνά από τον λάθος χειρισμό των παραγόντων καταπόνησης. Είναι σημαντικό αυτές να ορίζονται σωστά ανάλογα με τη μορφή του μοντέλου. Για παράδειγμα μπορεί να ασκούμε μια δύναμη με συγκεκριμένη μέτρο-τιμή αλλάζοντας όμως το σημείο εφαρμογής της και την κατεύθυνση της (διεύθυνση και φορά) να καταλήγουμε σε τελείως διαφορετική παραμόρφωση. Είναι καλόν λοιπόν να έχουμε μελετήσει πριν την ευαισθησία του μοντέλου μας ώστε να ξέρουμε τον καλύτερο τρόπο εφαρμογής των καταπονήσεων. [47]

4.4.3 ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η επιλογή του τύπου των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για να γίνει η ανάλυση είναι μεγάλης σημασίας γιατί ο τύπος των στοιχείων θα καθορίσει τα αποτελέσματα που θα πάρουμε. Τα περισσότερα προγράμματα που χρησιμοποιούν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων διαθέτουν βιβλιοθήκες που περιέχουν τους διάφορους τύπους στοιχείων, χωρισμένους κατά οικογένειες, σειρά και τοπολογία. [47]

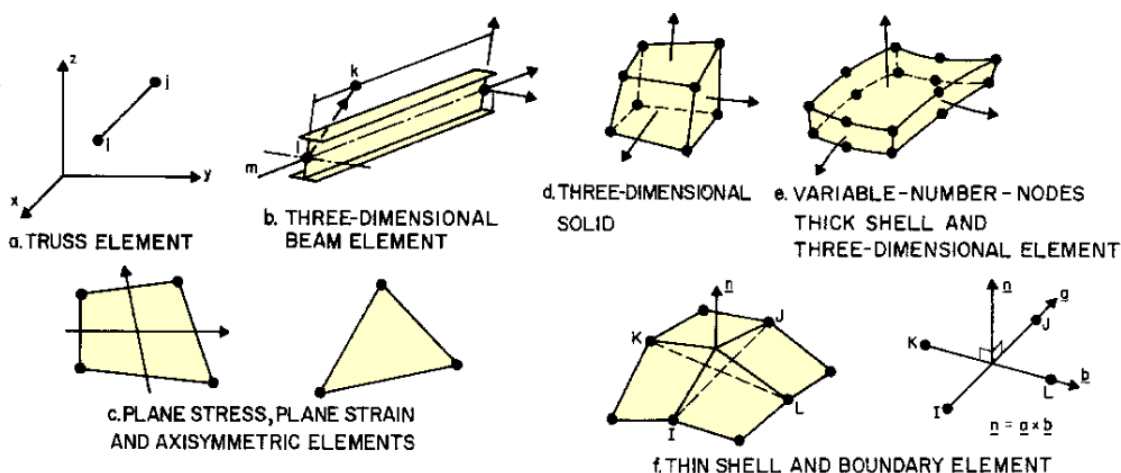
Η οικογένεια των στοιχείων αναφέρεται στα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας και πως αυτή παριστάνει τις παραμορφώσεις. Ο αναλυτής πρέπει πάντα να επιλέγει την απλούστερη μορφή στοιχείου που θα του δώσει απαντήσεις στο πρόβλημα. Εξίσου σημαντικό είναι να ξέρουμε ποια ακριβώς δεδομένα θα χρειαστούμε. [47]

Οι συνήθεις τύποι οικογενειακών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές είναι:

- Beam, δοκών,
- Planestress, επιπέδων έντασης,
- AxsymmetricSolid, συμμετρικά στερεά,
- Thin Shell, κελύφους και
- Solid, στερεά.

Με τη χρήση στοιχείων τύπου δοκού – beam παίρνουμε πολύ καλά αποτελέσματα όσον αφορά τη γενική παραμόρφωση και τα σημεία κάμψης, αλλά δε μπορεί να μας δώσει αποτελέσματα σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή στο σημείο εφαρμογής των φορτίων ή στους κόμβους. [47]

Με την ανάλυση με στοιχεία κελύφους παίρνουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα για αντικείμενα με σχετικά λεπτά τοιχώματα όπως τα πλαστικά από καλούπια – moldedplastic, ή τα μεταλλικά που κατασκευάζονται με φύλλα μετάλλου – sheetmetalparts. [47]



Σχήμα 4.7: Διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων [49]

Τα μεγαλύτερης ακρίβειας και πιο πλήρη στοιχεία είναι του στερεού τύπου. Όταν όμως κάνουμε ανάλυση με αυτού του τύπου τα στοιχεία, χρειαζόμαστε μεγαλύτερο αριθμό από αυτά, πράγμα που σημαίνει πιο χρονοβόρα διαδικασία. Αν για παράδειγμα θέλουμε να δούμε τα αποτελέσματα μιας κάμψης σε κάποιο σημείο, μπορούμε με τη χρήση στοιχείων κελύφους να έχουμε σε σύντομο χρόνο το ίδιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα ο παρακάτω αντισταθμικός σύνδεσμος που φαίνεται στο σχέδιο, θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί με στέρα στοιχεία, με στοιχεία κελύφους (δύο τρόποι), ή με στοιχεία δοκών ανάλογα με τα επιθυμητά αποτελέσματα. [47]

Η τάξη ενός στοιχείου αναφέρεται στον αριθμό των εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν για να αποδώσουν την καταπόνηση των κόμβων – nodes – στο εσωτερικό των στοιχείων.

Έτσι έχουμε τις παρακάτω τάξεις στοιχείων:

- Γραμμικά, linear,
- Παραβολικά, parabolic
- Κυβικά, cubic.

Τα γραμμικά στοιχεία χρησιμοποιούν δύο κόμβους για κάθε ακμή, τα παραβολικά τρεις και τα κυβικά τέσσερις.

Η τοπολογία των στοιχείων αναφέρεται στη γενική εικόνα του στοιχείου αν δηλαδή αυτό θα είναι τριγωνικό, τετραγωνικό κ.λπ.

Για κάθε οικογένεια στοιχείων όπως καταλαβαίνουμε θα υπάρχουν διαφορετικές τοπολογίες (σχηματισμοί). Γενικά είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούμε τετραγωνικά παρά τριγωνικά στοιχεία γιατί τα τετραγωνικά έχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και μπορούν να αποδώσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές καταπονήσεις που συντελούνται. [47]

Τα στοιχεία μπορεί να έχουν διαφορετικό βαθμό ελευθερίας για κάθε κόμβο. Γενικά ο μέγιστος βαθμός ελευθερίας για κάθε node – κόμβο είναι έξι, τρεις μεταφοράς (x,y,z) και τρεις περιστροφής γύρω από τους άξονες (x,y,z). Όμως τα στοιχεία συνήθως δε χρησιμοποιούν και τους έξι. [47]

4.4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο σύνολο των λογισμικών προσομοίωσης υπάρχουν διάφορες διεργασίες στην εφαρμογή της προσομοίωσης που καλύπτουν τα τρία βήματα της προεπεξεργασίας του μοντέλου, της επίλυσης και της επίδειξης των αποτελεσμάτων. Μια βασική κατηγοριοποίηση των διεργασιών που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα τρία βήματα είναι:

Simulation Tasks**(Διεργασίες προσομοίωσης)**

Pre-processing (Προ-επεξεργασία)

Master Modeler (Αρχικός μοντελοποιητής)

Meshing (Πλεγματοποίηση)

Boundary Conditions (Περιοριστικές Συνθήκες)

Solution (Επίλυση)

Model Solution (Επίλυση μοντέλου)

Post Processing (Επίδειξη αποτελεσμάτων)

Post Processing (Επίδειξη αποτελεσμάτων)

Σχήμα 4.8: Τυπική διάταξη διεργασιών προσομοίωσης [47]

Παρόλο που οι κόμβοι και τα στοιχεία είναι δυνατόν να δημιουργηθούν χειροκίνητα κατά τη διεργασία της πλεγματοποίησης (meshing), στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (FEM), είναι ευκολότερο να δημιουργηθούν αυτόματα, είτε με την εφαρμογή προσομοίωσης είτε κατά την εφαρμογή σχεδίασης. [47]

Η διεργασία πλεγματοποίησης (Meshing Task), χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κόμβων και στοιχείων, για τον έλεγχο του μοντέλου και για τον ορισμό φυσικών και υλικών ιδιοτήτων. Η διεργασία περιοριστικών συνθηκών (Boundary Condition Task), χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των περιοριστικών συνθηκών στην γεωμετρία του μοντέλου, στους κόμβους του ή στα στοιχεία του. Πιο από τα δύο βήματα, της πλεγματοποίησης ή του καθορισμού των περιοριστικών συνθηκών, το τι θα γίνει πρώτο, εξαρτάται από τον τύπο των περιοριστικών συνθηκών. [47]

Όταν το μοντέλο ολοκληρωθεί τότε επιλύεται στην διεργασία επίλυσης (Model Solution Task), και τα αποτελέσματα της επίλυσης προβάλλονται στη διεργασία απεικόνισης αποτελεσμάτων (Post Processing Task). [47]

Το μεγαλύτερο πλήθος των εντολών και των όρων που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση είναι ίδιοι στα περισσότερα λογισμικά προσομοίωσης καταπονήσεων. Οι κόμβοι (nodes), είναι σημεία στον τρισδιάστατο χώρο όπου τα στοιχεία (elements) μπορούν να συνδεθούν, φορτία (loads) μπορούν να εφαρμοστούν, περιοριστικές συνθήκες (boundary conditions) μπορούν να επιβληθούν και πληροφορίες μετατόπισης (displacement information) μπορούν να υπολογιστούν. Σε άλλα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων μερικές φορές οι κόμβοι αναφέρονται ως σημεία πλέγματος (grid points). [47]

Κάθε κόμβος έχει πάνω από έξι βαθμούς ελευθερίας εξαρτώμενους από τον τύπο του υλικού που έχει καθοριστεί σε αυτόν. Πρόκειται για γεωμετρική οντότητα η οποία μπορεί να προβληθεί ή όχι, ελεγχόμενη από το πλαίσιο φίλτρου προβολών (Display filter). Ετικέτες επίσης που προβάλλουν τον αριθμό του κόμβου μπορούν να προβάλλονται ή όχι. [47]

Μία ανάλυση είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνο όταν δημιουργηθεί το αρχείο παραμέτρων επίλυσης (solutionnet), το οποίο περιλαμβάνει τις περιοριστικές συνθήκες (boundaryconditions) που καθορίζονται από τους περιορισμούς (restrains) και τα φορτία (loads). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποθηκεύονται στο αρχείο μοντέλου ως “analysisdatasets”. Κάθε σύνολο δεδομένων ανάλυσης περιλαμβάνει ένα σύνολο από μετατοπίσεις ή πιέσεις οι οποίες μπορούν να προβληθούν. Οι πιέσεις είναι αποθηκευμένες μέσα στο σύνολο δεδομένων ως ένα γενικό άνυσμα πίεσης έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά της κάθε πίεσης να μπορούν να υπολογιστούν και να προβληθούν στην διεργασία απεικόνισης αποτελεσμάτων (PostProcessingTask).[47]

4.4.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SIMUFACT.FORMING

Το Simufact.forming είναι ένα λογισμικό για τη πραγματική χρήση της τεχνολογίας διαμόρφωσης. Ο χρήστης δεν χρειάζεται να ασχοληθεί με τη μαθηματική θεωρία της διαμόρφωσης αλλά να διαχειριστεί συγκεκριμένες πληροφορίες. Είναι ένα εύκολα διαχειριστικό λογισμικό έτσι ώστε οι χρήστες να επικεντρώνονται στις λεπτομέρειες της διαδικασίας διαμόρφωσης και όχι στο τρόπο χρήσης του λογισμικού. Το Simufact.forming είναι ένα λογισμικό διάταξης όπου επιλέγονται εργαλεία και προγραμματικές διαδικασίες απλοποιώντας την εργασία του χρήστη. Με λίγα απλά βήματα όλες οι πρότυπες διαδικασίες διάταξης μπορούν να κατασκευαστούν και να αξιολογηθούν. Καλύπτει όλο το εύρος της τεχνολογίας διαμόρφωσης και εγγυάται ρεαλιστική παρουσίαση των διαδικασιών. Μεταξύ άλλων προσφέρει: (Το Υποκεφάλαιο 4.4.5 έχει συνταχθεί βάσει των οδηγιών χρήσεις και λειτουργίας που προσφέρει το λογισμικό)

- τρισδιάστατη λειτουργικότητα και αναπαράσταση των εργαλείων και αντικειμένων
- πραγματική κινηματική της μηχανής ανεξάρτητα από τη πολυπλοκότητα της
- τη συμπεριφορά του μετάλλου (ελαστική και πλαστική παραμόρφωση, στην επιρροή των θερμοκρασιακών αλλαγών και δυνάμεων, κλπ.)
- τη τριβή και την επαφή μεταξύ εργαλείων και κομματιών.
- θερμοδυναμική της διαδικασίας: αρχικές συνθήκες θέρμανσης, μεταφορά θερμότητας σε εργαλεία και περιβάλλον, αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της ενέργειας διαμόρφωσης και της τριβής.

Η διάταξη σε ενότητες των προϊόντων Simufact βοηθά στη επιλογή της κατάλληλης διεργασίας που ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες του χρήστη. Αυτή η προσέγγιση είναι οικονομικά αποδοτική και προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις.

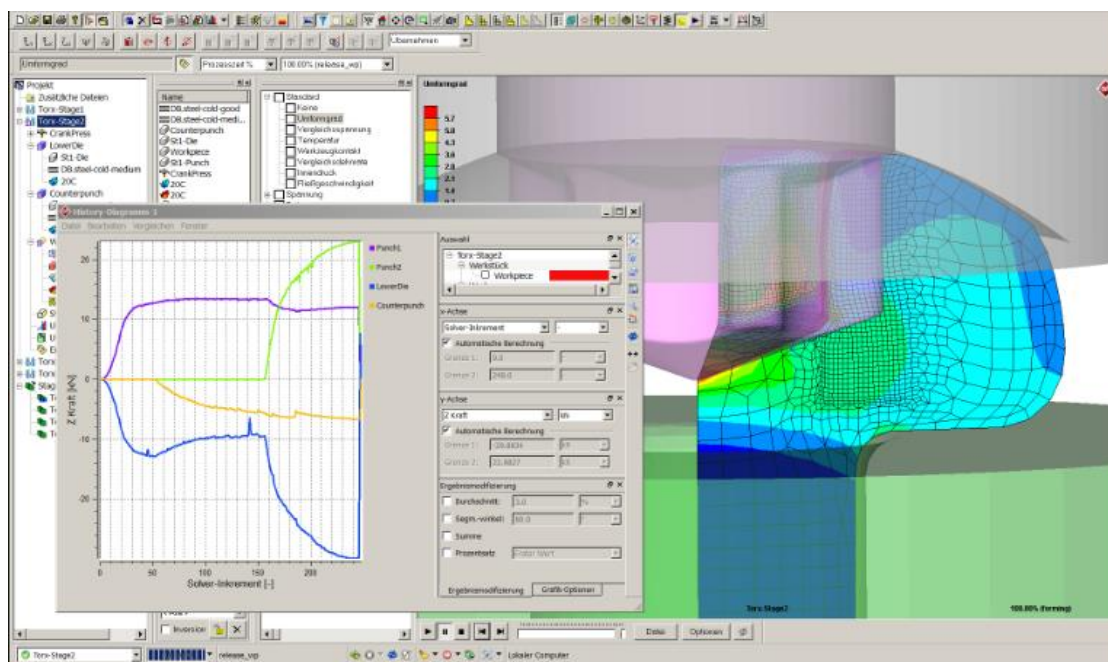
Το Simufact.forming προσφέρει μια εργαλειοθήκη που επιτρέπει τον εικονικό σχεδιασμό και την ανάπτυξη των διαδικασιών παραγωγής. Οι λειτουργίες των μονάδων της εφαρμογής επιτρέπουν

την προσομοίωση των επιμέρους βημάτων της διαδικασίας και μπορούν επίσης να συνδυαστούν για να πραγματοποιηθούν ολόκληρες αλυσίδες διαδικασίας κατασκευής.

Η ενότητα του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία είναι η **Simufact.forming Hot Forging** (θερμή σφυρηλάτηση). Η ενότητα αυτή χρησιμεύει για την προσομοίωση των διεργασιών σχηματισμού μετάλλου πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του υλικού. Η δυνατότητα προσέγγισης της δημιουργίας πλέγματος με δύο τρόπους (FEsolver και FVsolver) βοηθά στη πιο ρεαλιστική πρόβλεψη των τυπικών βλαβών ροής του μετάλλου, όπως πχ αναδίπλωση, προβλήματα υπό-πλήρωσης και ελαττώματα ροής. Ο πιο ευέλικτος κινηματικός ορισμός, τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων και τα διάφορα είδη ελατηρίων επιτρέπουν ρεαλιστική περιγραφή και εξέταση όλων των επιπτώσεων που σχετίζονται με τον εξοπλισμό, όπως π.χ. ελαστικότητα και κλίση πίεσης.

Άλλες ενότητες του προγράμματος είναι:

- *Simufact.forming Cold Forming* (ψυχρή σφυρηλάτηση)
- *Simufact.forming Sheet Metal Forming* (κοίλανση)
- *Simufact.forming Rolling* (έλαση)
- *Simufact.forming Ring Rolling* (έλαση δακτυλιοειδών)
- *Simufact.forming Open Die Forging* (Σφυρηλασία)
- *Simufact.forming Heat Treatment*
- *SimuFact.forming Mechanical Joining*



Σχήμα 4.9: Παράδειγμα προσομοίωσης σφυρηλάτησης σε περιβάλλον Simufact.forming

ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗ ΣΑΡΩΣΗ

Η σάρωση του τεμαχίου cam plate πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το παρακάτω εξοπλισμό:

- IScan M300
- Λογισμικό IScan3D
- Πλάκα Στόχων
- Σπρέι Φάβης

5.1.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΑΡΩΤΗΣ ISCAN M300

Για τη σάρωση του τεμαχίου χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής δομημένου φωτός M300, έκδοσης V400, που αποτελεί την πέμπτη γενιά (2006) σαρωτών της εταιρείας Imetric και μπορεί να σαρώσει κομμάτια με μέγεθος από 50mm έως 10m [50]. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου, αντίστροφης μηχανικής, ψηφιακών αναπαραστάσεων και ταχείας προτυποποίησης. Ο σαρωτής αποτελείται από το προβολέα δομημένου φωτός και δύο κάμερες CCD (charge-coupled device) ενώ είναι τοποθετημένος σε ένα τρίποδα σε ύψος ενός μέτρου από το έδαφος. Ο τρίποδας αυτός επιτρέπει τη στροφή οριζόντια (360° μοίρες) και κάθετα (περίπου 180° μοίρες) για ρύθμιση της γωνίας προβολής του φωτός και της λήψης των εικόνων. Ο σαρωτής βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Στο Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία του σαρωτή όπως δίνονται από την κατασκευαστική εταιρία.



Σχήμα 5.1: Σαρωτής Iscan M300 του εργαστηρίου

Πίνακας 5.1: Στοιχεία Σαρωτή Iscan M300, V400 [50]

Στοιχεία Σαρωτή Iscan M300, V400	
Μέγεθος	340 x 200 x 130 mm
Τροφοδοτικό	95 – 260 V, 50/60 Hz
Ανάλυσης κάμερας	1,3 M
Βάρος	2.4 Kg
Χρόνος σάρωσης ⁽¹⁾	2 - 8 λεπτά
Κατανάλωση ρεύματος	54 W
Διάρκεια ζωής προβολέα	30 χιλιάδες ώρες
Θερμοκρασία λειτουργίας ⁽²⁾	10 - 35 κελσίου
Όγκος Σάρωσης	400 x 340 mm
Απόσταση σημείων ⁽³⁾	0.30 mm
Ήχος ⁽³⁾	0.015 mm
Ακρίβεια ⁽³⁾	0.043 mm
Απόσταση σάρωσης (μέγιστη) ⁽³⁾	750 mm

⁽¹⁾ Εξαρτάται από την απόδοση του υπολογιστή και των δεδομένων ποιότητας

⁽²⁾ Μία μεταβολή της θερμοκρασίας 5 ° C απαιτεί μια νέα βαθμονόμηση

⁽³⁾ Εξαρτάται από την επιφάνεια του αντικειμένου που θα σαρωθεί

5.1.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ISCAN3D

Το λογισμικό IScan3D βασίζεται στην πλατφόρμα των Windows, και επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από τον σαρωτή με τελικό αποτέλεσμα ένα νέφος σημείων σε τυποποιημένη μορφή STL. Μέσω το λογισμικού γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις πριν τη σάρωση, πχ της δομής του εκπεμπόμενου φωτός, της αναγνώρισης των καμερών και της απόστασης τους, καθώς και της βαθμονόμησης. Επίσης το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα μετά τη σάρωση να ενωθούν οι εικόνες λήψης, από το χρήστη ή αυτόματα, και επιτρέπει την επεξεργασία του νέφους με αφαίρεση ανεπιθύμητων επιφανειών, το γέμισμα κενών κλπ.

5.1.3 ΠΛΑΚΑ ΣΤΟΧΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

Για τη διαδικασία σάρωσης χρησιμοποιήθηκε η αυτοσχέδια πλάκα στόχων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2, που βρίσκεται στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Υποκεφάλαιο 3.3.4.3, η πλάκα στόχων είναι βασικό εργαλείο για τον υπολογισμό της απόστασης, και συνεπώς των διαστάσεων του αντικειμένου, καθώς και για την αυτόματη ένωση των εικόνων που λαμβάνονται.

5.1.4 ΣΠΡΕΙ ΒΑΦΗΣ

Λόγω της επίδρασης του χρώματος στην ακρίβεια των μετρήσεων, το αντικείμενο προς σάρωση είναι αναγκαίο να χρωματιστεί με λευκό χρώμα [51], για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το σπρέι βαφής που διαθέτει το εργαστήριο του τομέα.



Σχήμα 5.2: Αυτοσχέδια πλάκα στόχων του εργαστηρίου μαζί με το ψεκασμένο αντικείμενο

5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ CAM PLATE

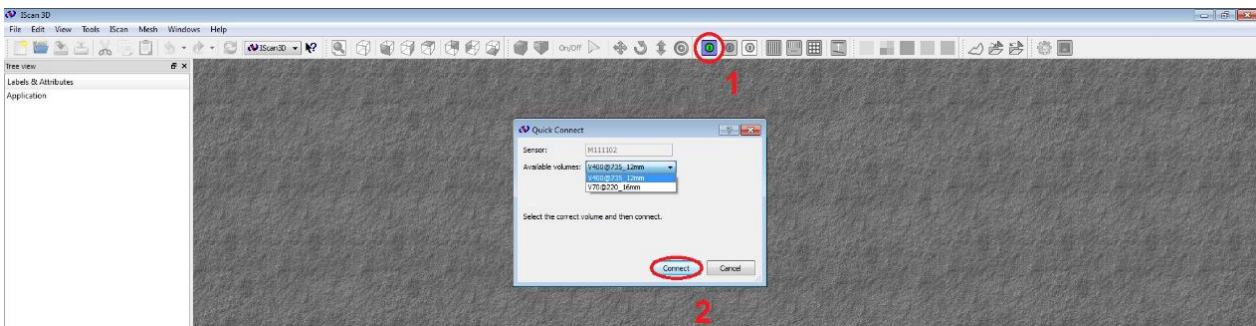
Στα παρακάτω βήματα παρουσιάζεται η διαδικασία σάρωσης που ακολουθήθηκε για την απόκτηση του νέφους σημείων του τεμαχίου Cam plate. Σημειώνεται ότι η διάταξη της σάρωσης (σαρωτής και πλάκα στόχων) ρυθμίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η γωνία σάρωσης να είναι περίπου 45° (Σχήμα 5.3). Δεν υπάρχει κάποια ιδανική τιμή της γωνίας σάρωσης καθώς βάσει των επιφανειών, των κοιλοτήτων, των οπών κλπ. του τεμαχίου που θα σαρωθεί μπορεί να υπολογιστεί μια γωνία που θα παρέχει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Η παρούσα εργασία δεν συμπεριλαμβάνει μελέτη της γωνίας σάρωσης. Η επιλογή γωνίας 45° μοιρών έγινε λόγω του ότι η σάρωση του αντικειμένου έγινε σε δύο φάσεις (άνω όψη και κάτω όψη). Η σάρωση θα μπορούσε να επιτευχθεί και με μία φάση αν γινόταν διαφορετική τοποθέτηση του αντικειμένου στο οπτικό πεδίο του σαρωτή. Προκειμένου να βρεθεί η καλύτερη τοποθέτηση του αντικειμένου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και τελικά επιλέχτηκε η σάρωση δύο όψεων για την λήψη καλύτερων αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, η ύπαρξη της κυματοειδούς επιφάνειας στο τεμάχιο, η οποία μας ενδιαφέρει περισσότερο, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα στην επιλογή της σάρωσης των δύο όψεων, καθώς είναι η μοναδική που δεν μπορεί να μετρηθεί με συμβατικά μέσα.



Σχήμα 5.3: Διάταξη σαρωτή-πλάκας στόχων όπου πραγματοποιήθηκε η σάρωση του τεμαχίου

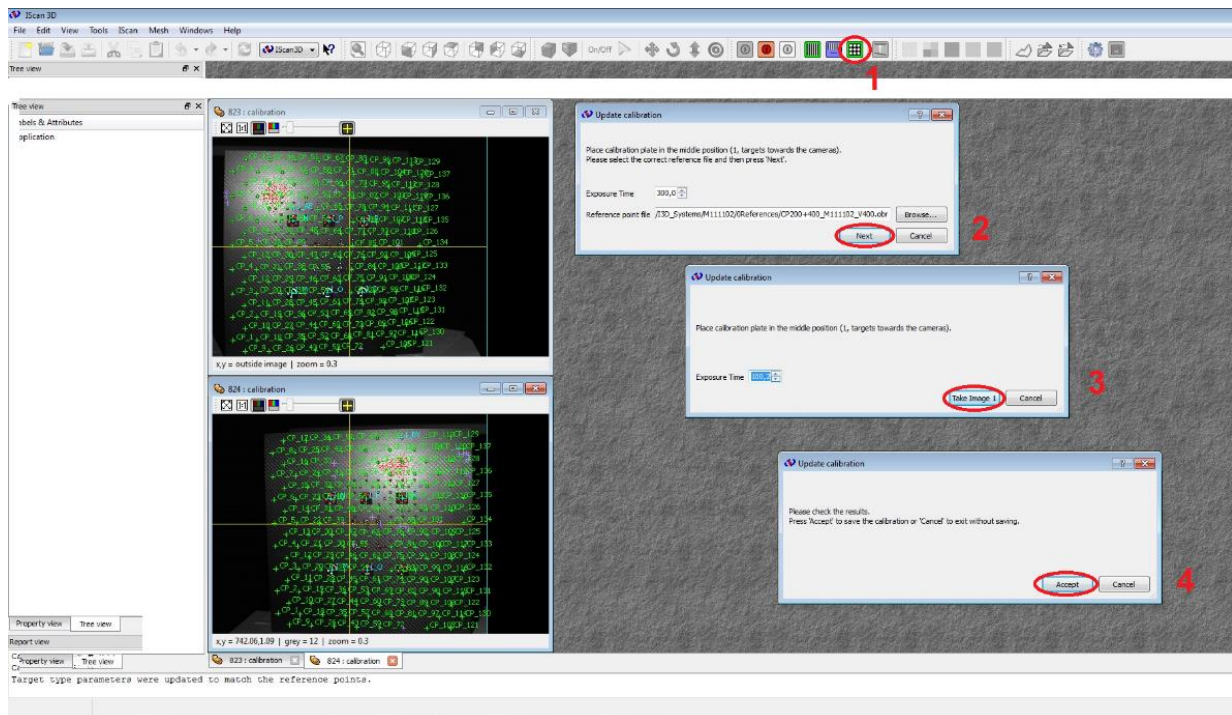
Αφού πρώτα τέθηκε σε λειτουργία ο σαρωτής IScan M300 και το λογισμικό IScan3D ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα.

ΒΗΜΑ 1^ο : Από τη γραμμή εργασίας του λογισμικού, γίνεται η επιλογή του σαρωτή που θα χρησιμοποιηθεί (Σχήμα 5.4). Ουσιαστικά γίνεται σύνδεση του λογισμικού με το σαρωτή.



Σχήμα 5.4: Επιλογή Σαρωτή (IScan3D)

ΒΗΜΑ 2^ο: Γίνεται η βαθμονόμηση του σαρωτή. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε η πλάκα στόχων της εταιρίας IMETRIC (συμπεριλαμβάνεται στον εξοπλισμό του σαρωτή) που διαθέτει το εργαστήριο. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται τα διάφορα στάδια και οι επιλογές που πρέπει να γίνουν στο κάθε στάδιο για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης. Το στάδιο 3 (Σχήμα 5.5) επαναλαμβάνεται τρεις φορές, δηλαδή γίνονται τρεις σάρωσης της πλάκας μετακινώντας την κάθε φορά σε γνωστές θέσεις στο χώρο σάρωσης.

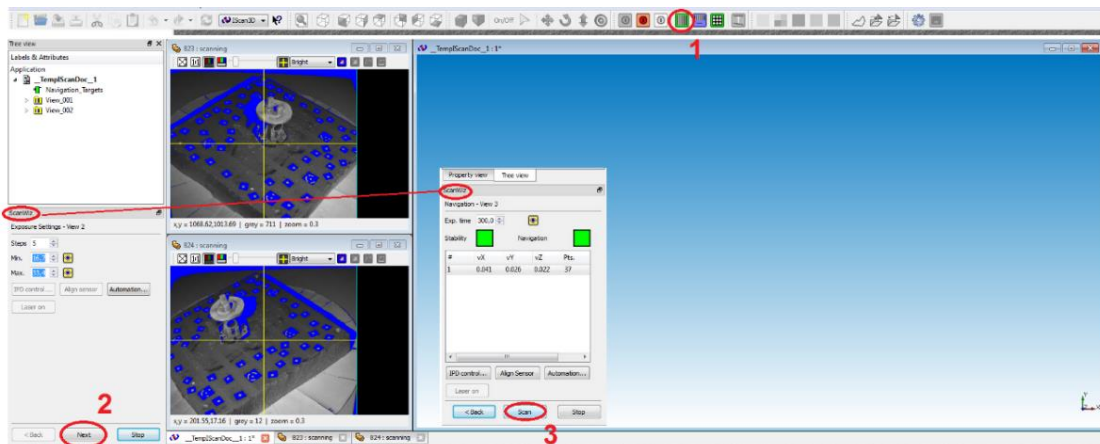


Σχήμα 5.5: Βαθμονόμηση σαρωτή (Iscan3D)

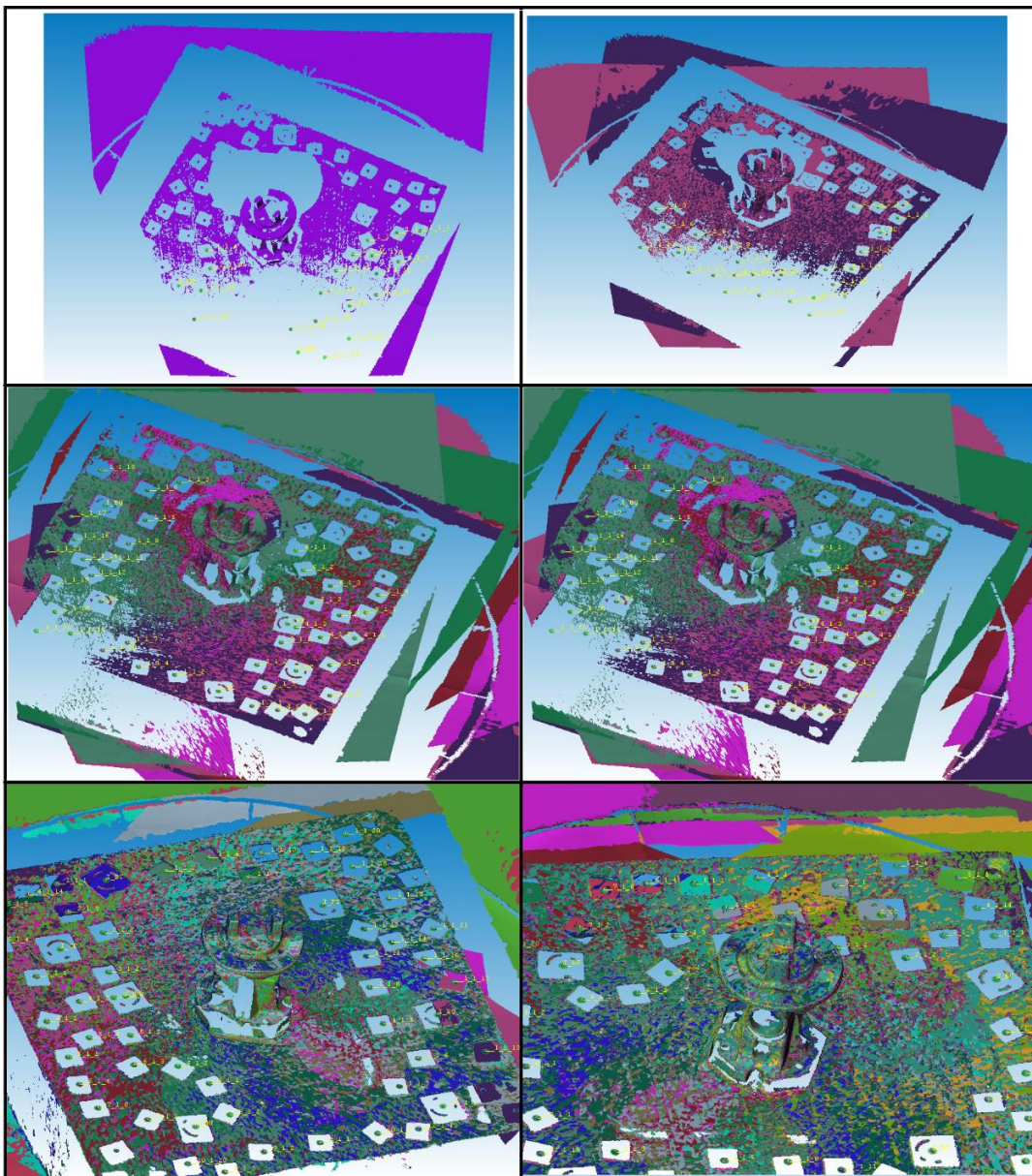
ΒΗΜΑ 3^ο: Τοποθετήθηκε η αυτοσχέδια πλάκα στόχων στο οπτικό πεδίο του σαρωτή (Σχήμα 5.3) και στο κέντρο της πλάκας τοποθετήθηκε το τεμάχιο Cam plate. Λόγω του μικρού ύψους του τεμαχίου, χρησιμοποιήθηκε ένα αντικείμενο, ως στήριγμα για να μεγαλώσει την απόσταση του τεμαχίου από τη πλάκα στόχων ώστε να είναι πιο ξεκάθαρα τα αποτελέσματα της σάρωσης.

ΒΗΜΑ 4^ο: Σάρωση του αντικειμένου. Με την εντολή “Start Scanning Wizard” ανοίγει το παράθυρο “Scan Wiz” στην επιφάνεια εργασίας όπου εκεί μπορούμε να ρυθμίσουμε τα MIN, MAX που αφορούν τον ελάχιστο και μέγιστο χρόνο σάρωσης ώστε να μην υπάρχουν σκιές στο τεμάχιο. Είναι επιθυμητό το λευκό χρώμα να είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο μελετώμενο αντικείμενο, ενώ αποφεύγονται τα χρώματα. Επίσης στο παράθυρο αυτό γίνεται και έλεγχος του αριθμού των στόχων της πλάκας που αναγνωρίζονται από τις κάμερες. Η αναγνώριση 20 σημείων-στόχων θεωρείται ικανοποιητική. Στο Σχήμα 5.6 φαίνονται τα στάδια της εντολής. Τα στάδια 2 και 3 επαναλαμβάνονται ανάλογα με τον αριθμό των σαρώσεων που θα γίνουν. Κατά τη σάρωση στην εργασία αυτή έγιναν 18 λήψεις στη κάθε πλευρά του τεμαχίου, καθώς η πλάκα στόχων στρεφόταν κατά 20°. Λήψεις που λήφθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 5.7.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΑΡΩΣΗ - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CAM PLATE

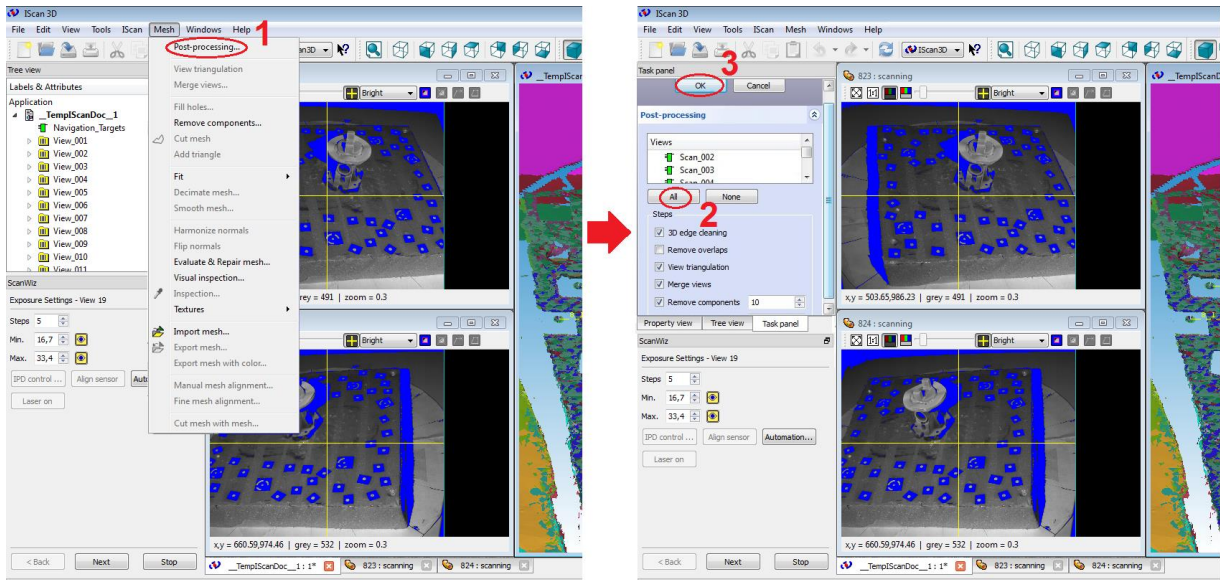


Σχήμα 5.6: Διαδικασία σάρωσης (IScan3D)

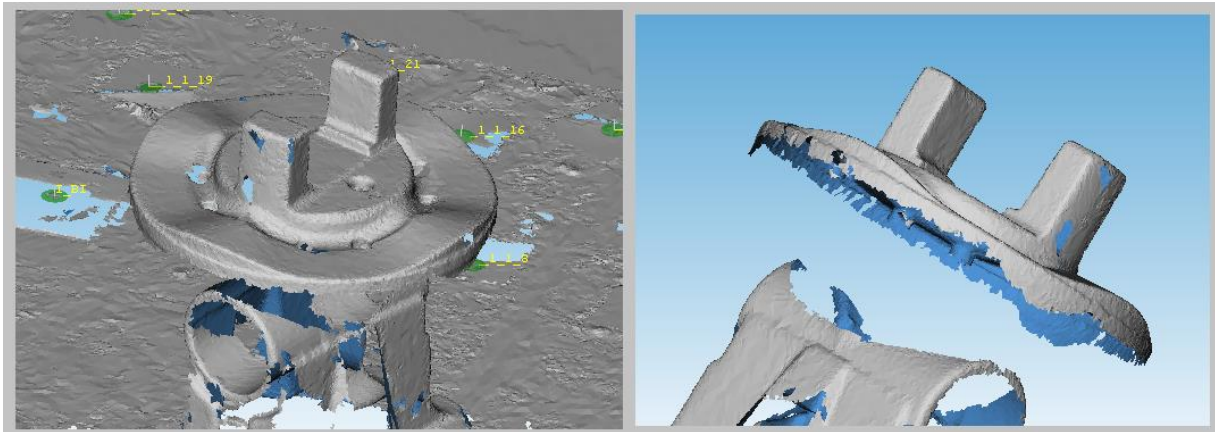


Σχήμα 5.7: Λήψεις από τη σάρωση της άνω πλευρά του αντικειμένου για 0° , 20° , 100° , 200° , 240° και 340° . Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μια λήψη, και οι αριθμοί-κώδικες, οι οποίοι διακρίνονται με κίτρινο χρώμα, αντιστοιχούν στα σημεία της πλάκας-στόχων που αναγνωρίστηκαν. (Iscan3D)

ΒΗΜΑ 5^ο: Δημιουργία συνολικής εικόνας-πλέγματος. Με την εντολή “Post Processing” (Σχήμα 5.8) γίνεται η εννοποίηση των εικόνων σε ένα πλέγμα. Επίσης, μετά την εννοποίηση των εικόνων, στο παράθυρο της επιφάνεια “Task Panel” υπάρχουν και κάποιες επιπλέον εντολές (πχ γέμισμα οπών, απαλοιφή επικαλύψεων) με τις οποίες μπορεί να γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στην εργασία ωστόσο δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια από τις εντολές αυτές. Η ενωμένη συνολική εικόνα που αποκτήθηκε στη διαδικασία μας φαίνεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.8: Δημιουργία ενιαίου πλέγματος (IScan3D)

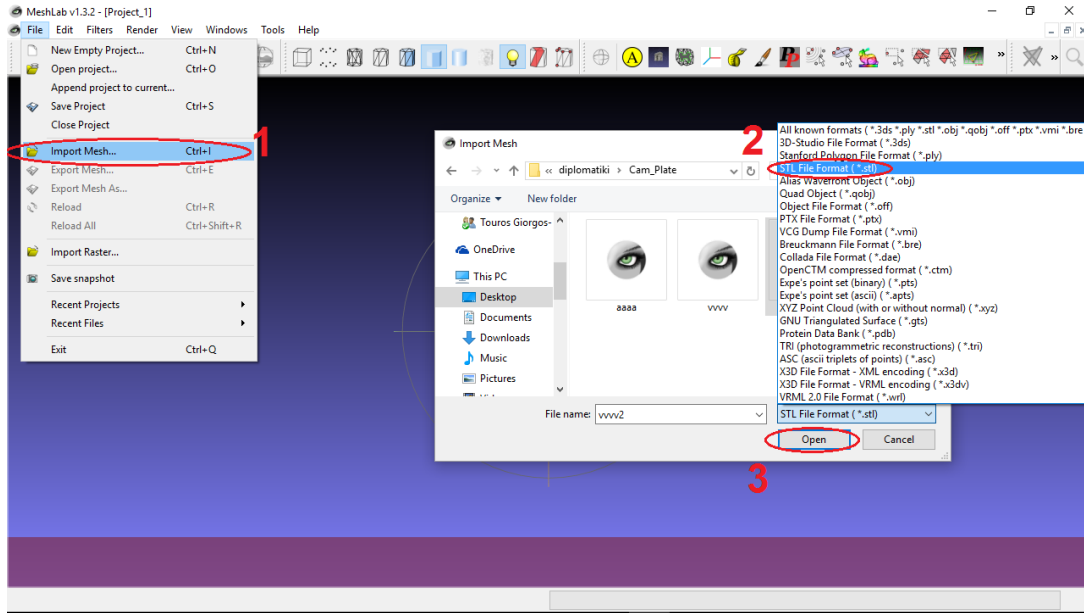


Σχήμα 5.9: Τελικό αποτέλεσμα σάρωσης τη άνω πλευράς του αντικειμένου (IScan3D)

Η πιο πάνω διαδικασία (βήματα 3-5) επαναλήφθηκε και για την κάτω πλευρά του αντικειμένου ώστε να αποκτήσουμε όλες τις επιφάνειες του τεμαχίου. Επίσης, περαιτέρω επεξεργασία των πλεγμάτων έγινε στο λογισμικό Meshlab. Παρόλο που η δυνατότητα αυτή παρέχεται και από το λογισμικό IScan3D, επιλέχθηκε το λογισμικό Meshlab καθώς αποδείχθηκε πιο εύχρηστο και ταχύτερο στη επεξεργασία.

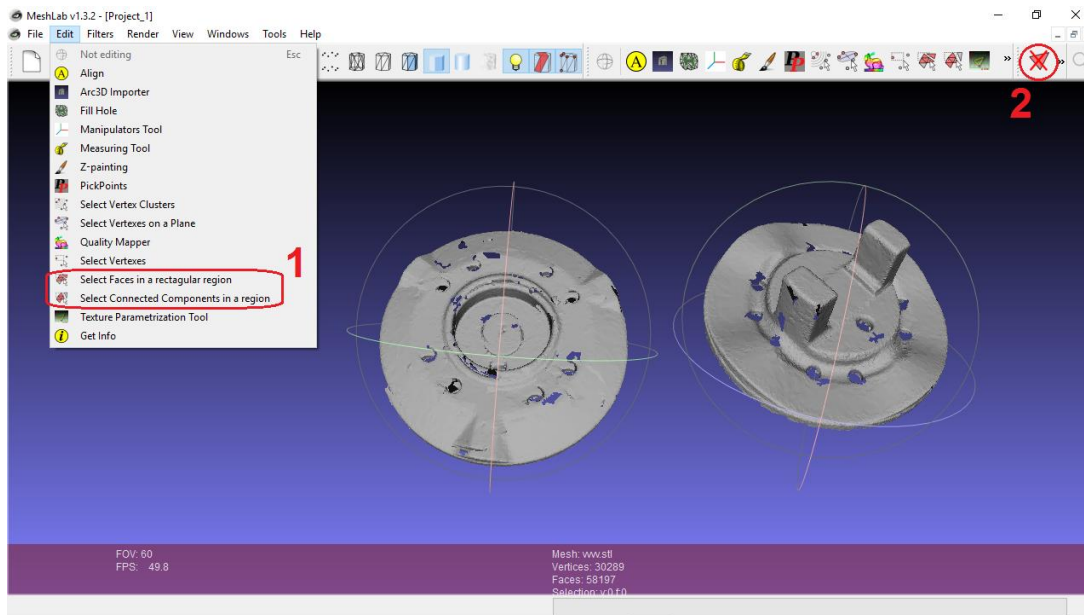
5.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ

Στο λογισμικό MeshLab έγινε η περαιτέρω επεξεργασία του νέφους σημείων που αποκτήθηκε στο λογισμικό IScan3D και αποθηκεύτηκε σε μορφή στερεολιθογραφίας (STL), από τη διαδικασία της σάρωσης. Έτσι με την εντολή “*Import Mesh*” και την επιλογή της κατάλληλης μορφής του αρχείου, έγινε η εισαγωγή του πλέγματος στο λογισμικό MeshLab (Σχήμα 5.10).



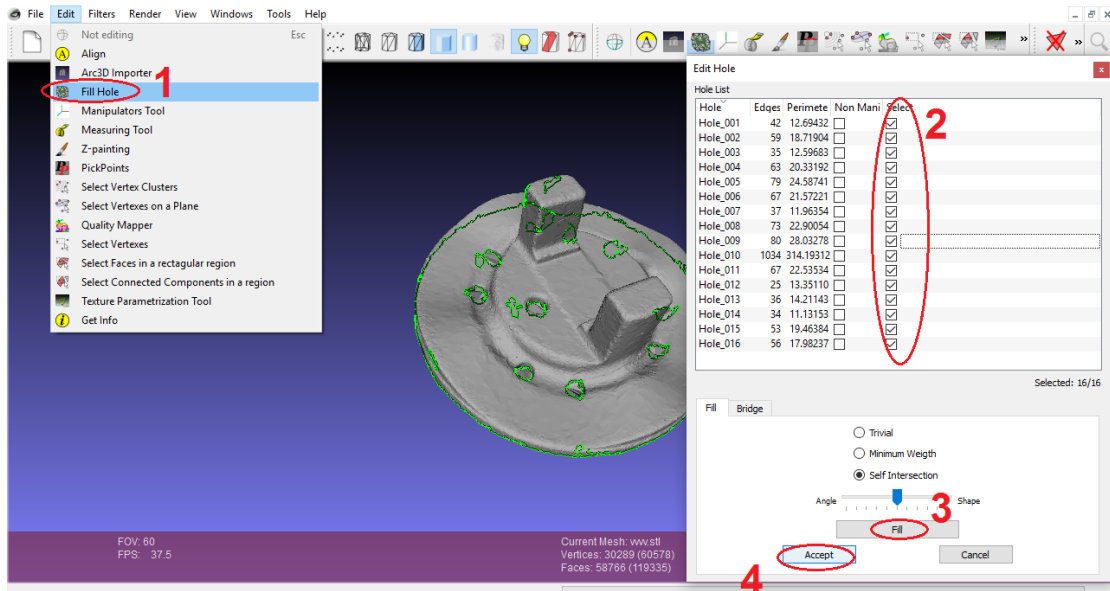
Σχήμα 5.10: Εισαγωγή αρχείων STL (MeshLab)

Με τις εντολές “*Select Faces in a Rectagular region*” και “*Select Connected Components in a Region*” (Σχήμα 5.11) έγινε απαλοιφή των επιφανειών που δεν ανήκουν στο αντικείμενο. Οι επιφάνειες διακρίνονται στο Σχήμα 5.9.

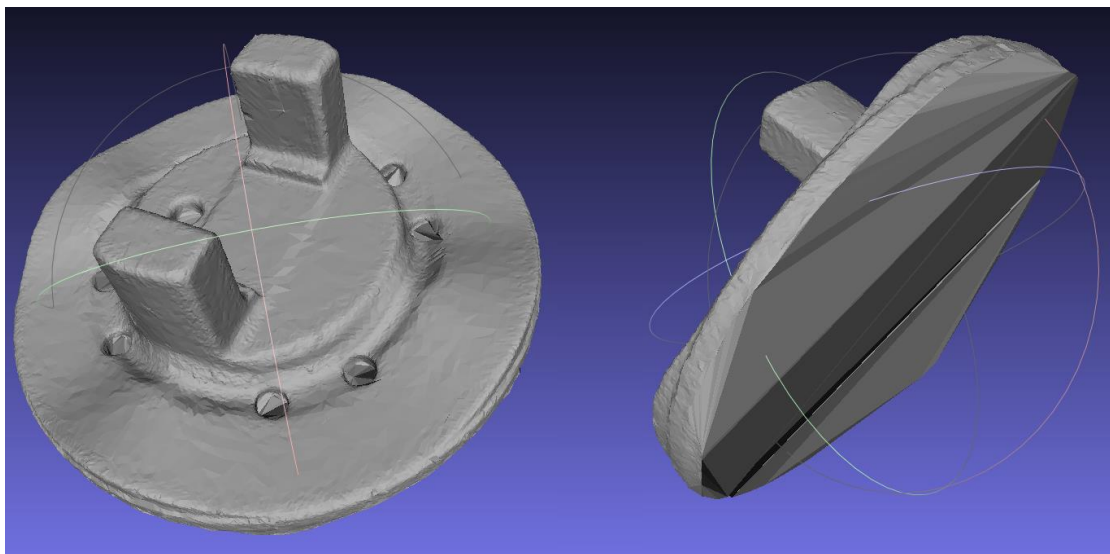


Σχήμα 5.11: Διαγραφή ανεπιθύμητων επιφανειών από τα πλέγματα του τεμαχίου Cam plate (MeshLab)

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.11, στο πλέγμα, όπως ήταν αναμενόμενο, εμφανίζονται κενά τα οποία οφείλονται κυρίως στις οπές του τεμαχίου αλλά και σε κάποια σφάλματα που προέκυψαν είτε κατά τη σάρωση είτε κατά την ενοποίηση των εικόνων. Με την εντολή “Fill Hole” εντοπίζονται αυτά τα κενά και υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των κενών που θέλουμε να γεμίσουμε (Σχήμα 5.12). Για τα πλέγματα της εργασίας επιλέχτηκε το γέμισμα όλων των κενών που εντοπίστηκαν ακόμα και στα σημεία που δεν υπάρχουν πραγματικές επιφάνειες στο τεμάχιο, όπως στις οπές και στη “κάτω” πλευρά των πλεγμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Αυτό έγινε για να δημιουργηθούν δύο κλειστά πλέγματα και να αξιοποιηθούν ξεχωριστά. Λόγω της μορφής του τεμαχίου, η ακριβής ενοποίηση των δύο πλεγμάτων (άνω και κάτω πλευράς) ώστε να δημιουργηθεί ένα ενιαίο πλέγμα ήταν εξαιρετικά δύσκολη καθώς δεν ήταν εύκολο να αναγνωρισθούν κοινά σημεία.



Σχήμα 5.12: Γέμισμα των κενών του πλέγματος (MeshLab)



Σχήμα 5.13: Πλέγμα της άνω πλευρά του αντικειμένου μετά το γέμισμα των κενών (MeshLab)

5.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ CAM PLATE

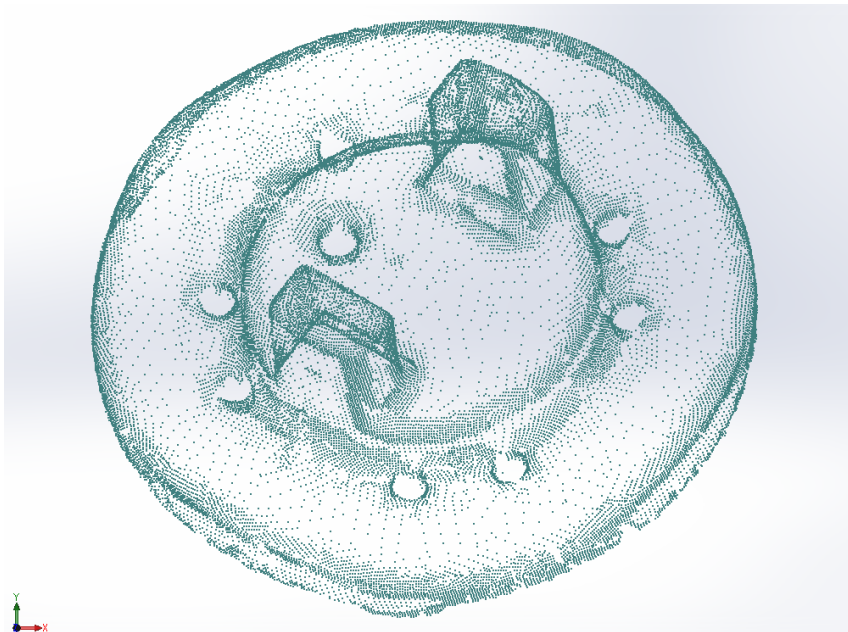
Για το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση του τεμαχίου Cam plate χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SolidWorks . Η σχεδίαση του έγινε με τη βοήθεια των νεφών σημείων που αποκτήθηκαν από τη διαδικασία σάρωσης και την επεξεργασία τους στο MeshLab. Τα πλέγματα που πρόεκυψαν μετά την επεξεργασία αποθηκεύτηκαν σε αρχεία XYZ, καθώς τα αρχεία στερεολιθογραφίας (STL) λόγω των πολλών επιφανειών που τα αποτελούν δεν μπορούσαν να ανοίξουν στο SolidWorks.

5.4.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

Για την δημιουργία μιας επιφάνειας ή ενός στερεού μοντέλου από ένα νέφος σημείων προσφέρονται διάφοροι τρόποι από το λογισμικό SolidWorks. Για το τεμάχιο, στη διαδικασία που ακολουθήθηκε, δόθηκε περισσότερο βάρος στη δημιουργία της κυματοειδούς επιφάνειας η οποία είναι η πιο σύνθετη. Μετά από δοκιμές διάφορων τεχνικών, τα καλύτερα αποτέλεσμα προκύπτουν με τα παρακάτω βήματα που παρουσιάζονται αναλυτικά:

ΒΗΜΑ 1^ο: Για την επεξεργασία νέφους σημείων πρέπει να είναι ενεργοποιημένο το Add-ins, ScanTo3D από τη γραμμή εργασίας του προγράμματος.

ΒΗΜΑ 2^ο : Εισαγωγή του νέφους σημείων της άνω πλευράς του τεμαχίου όπως αποθηκεύτηκε από το λογισμικό MeshLab (Σχήμα 5.14).

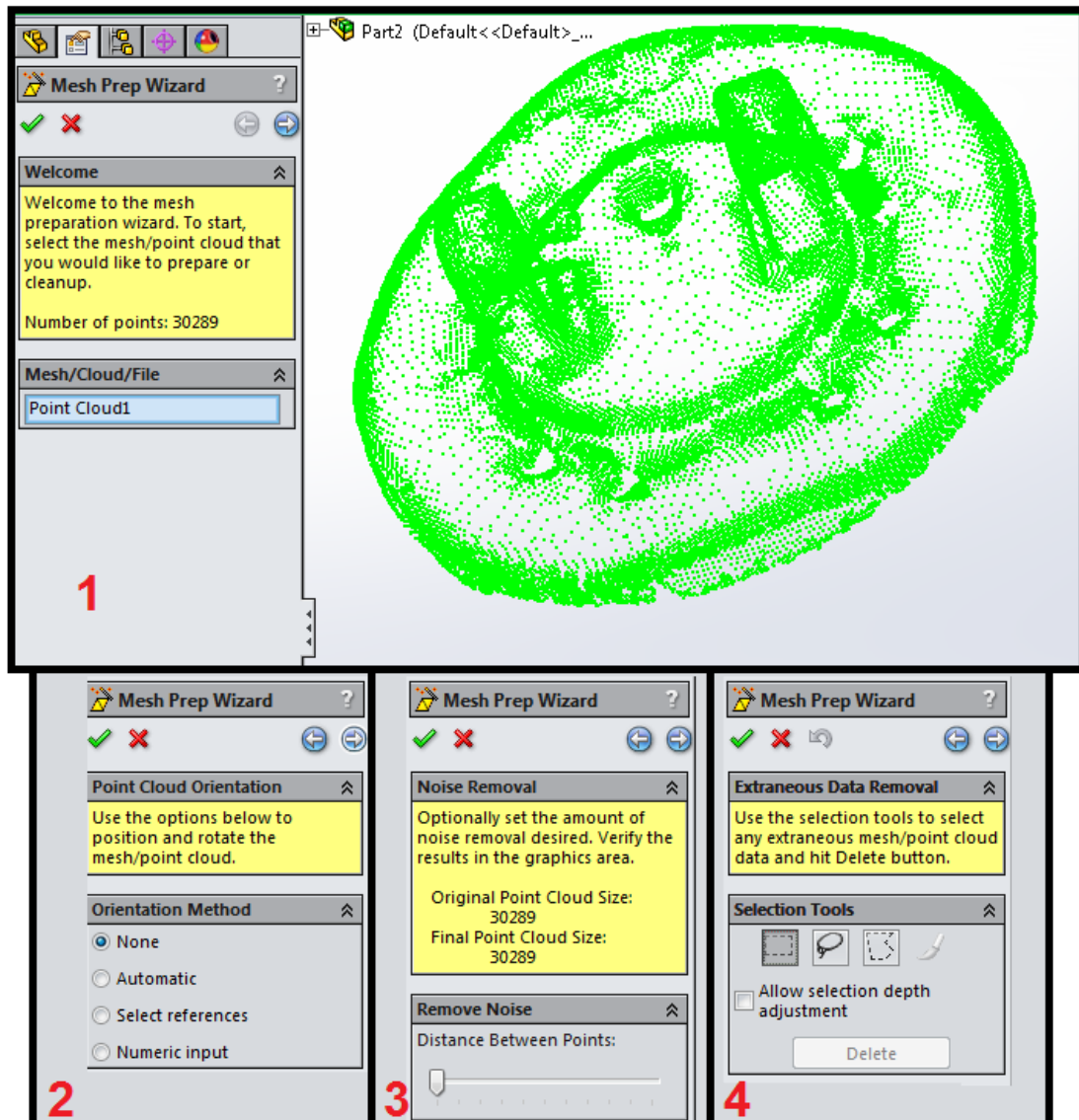


Σχήμα 5.14: Νέφος σημείων του τεμαχίου Cam plate (Solidworks)

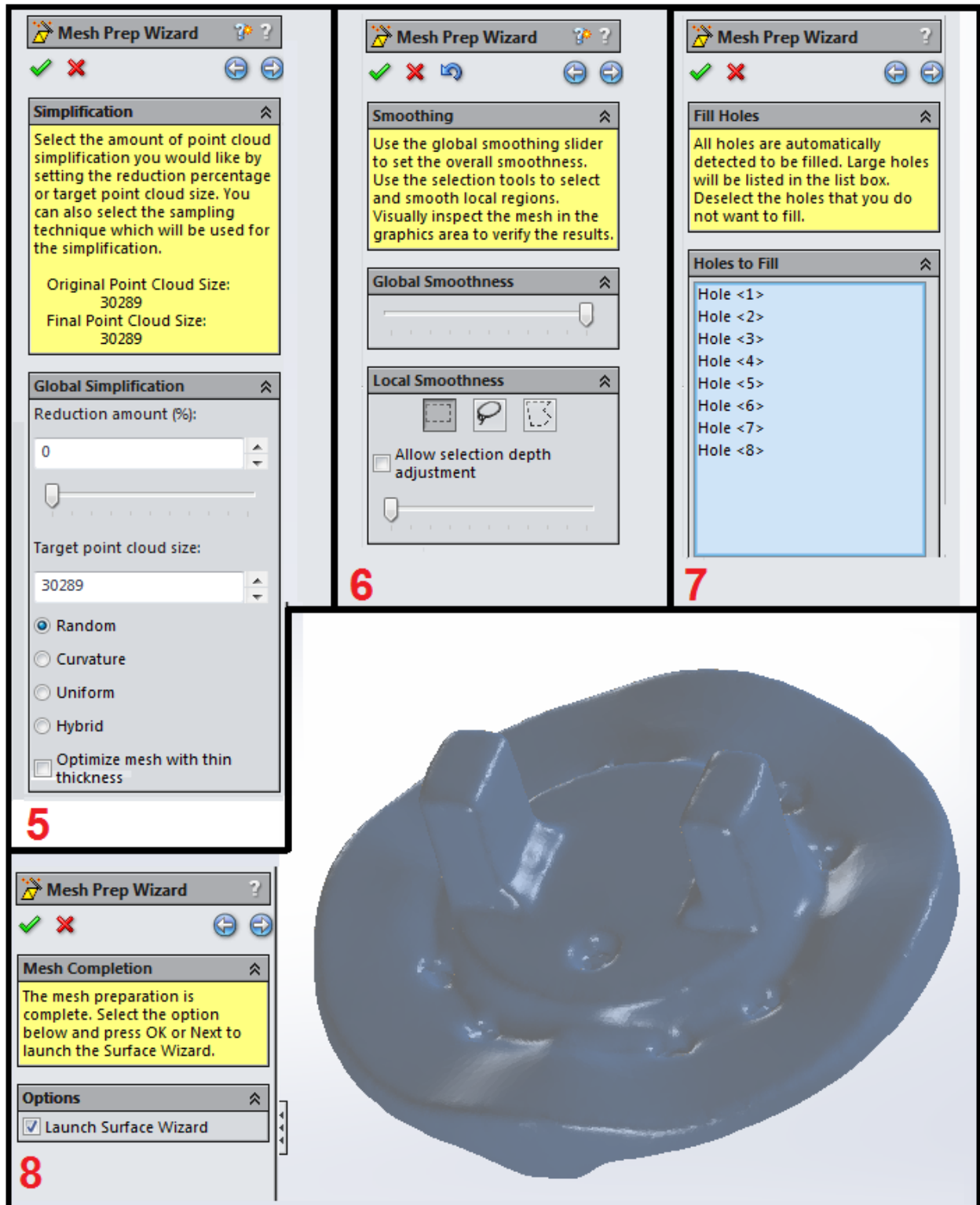
ΒΗΜΑ 3^ο: Γίνεται η δημιουργία ενός πλέγματος από τα σημεία που εισάχθηκαν με την εντολή “Mesh Prep Wizard” (Tools→ ScanTo3D→Mesh Prep Wizard). Υπάρχουν διάφορα στάδια πριν την ολοκλήρωση της εντολής τα οποία είναι τα εξής:

1. Επιλογή του νέφους σημείων.
2. Προσανατολισμός του νέφους στο σύστημα συντεταγμένων.
3. Απαλοιφή θορυβωδών σημείων ρυθμίζοντας την αποδεκτή απόσταση μεταξύ των σημείων.
4. Απαλοιφή ανεπιθύμητων σημείων χειροκίνητα.
5. Απαλοιφή σημείων ποσοστιαία, με βάση την απλοποίηση του νέφους.
6. Αφού δημιουργήθηκε το πλέγμα, γίνεται εξομάλυνση των επιφανειών του πλέγματος, σε ολόκληρο ή σε ορισμένες περιοχές του.
7. Επιλογή των κενών που θέλουμε να γεμίσουν. Τα κενά αναγνωρίζονται αυτόματα.
8. Ολοκλήρωση της εντολής.

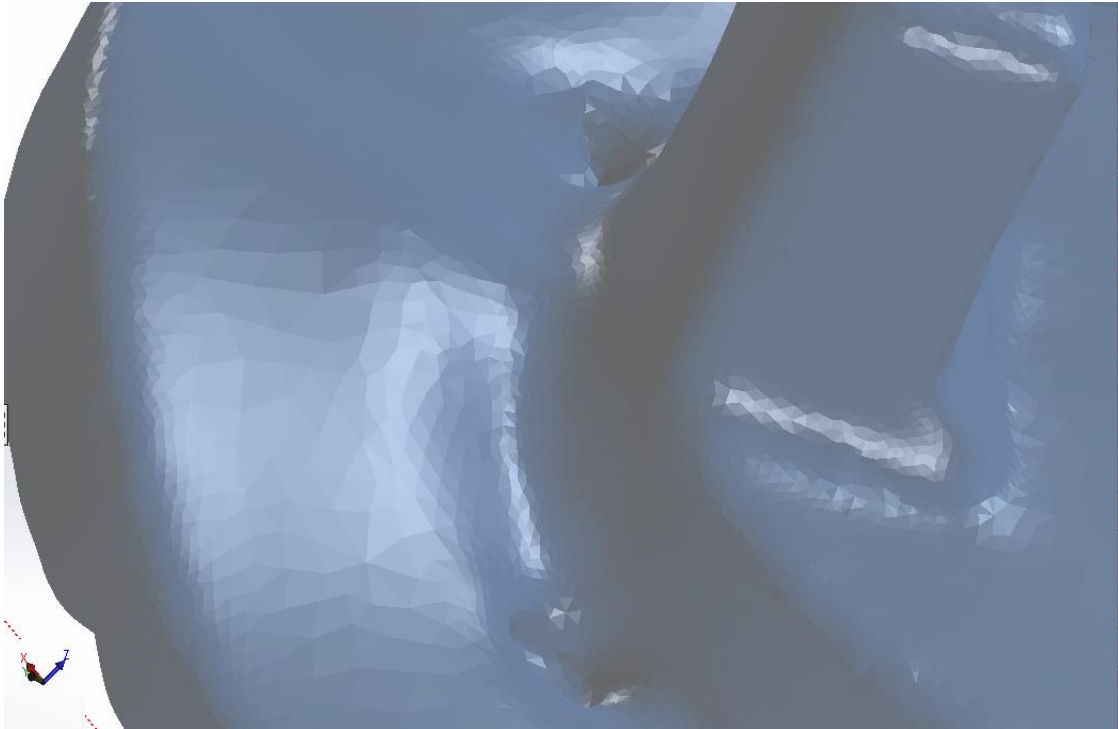
Στα Σχήματα 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται οι επιλογές που έγιναν σε κάθε στάδιο του 3^{ου} βήματος.



Σχήμα 5.15: Στάδια (1-4) εντολής “Mesh Prep Wizard” (Solidworks)



Σχήμα 5.16: Στάδια (5-8) εντολής “Mesh Prep Wizard” (Solidworks)

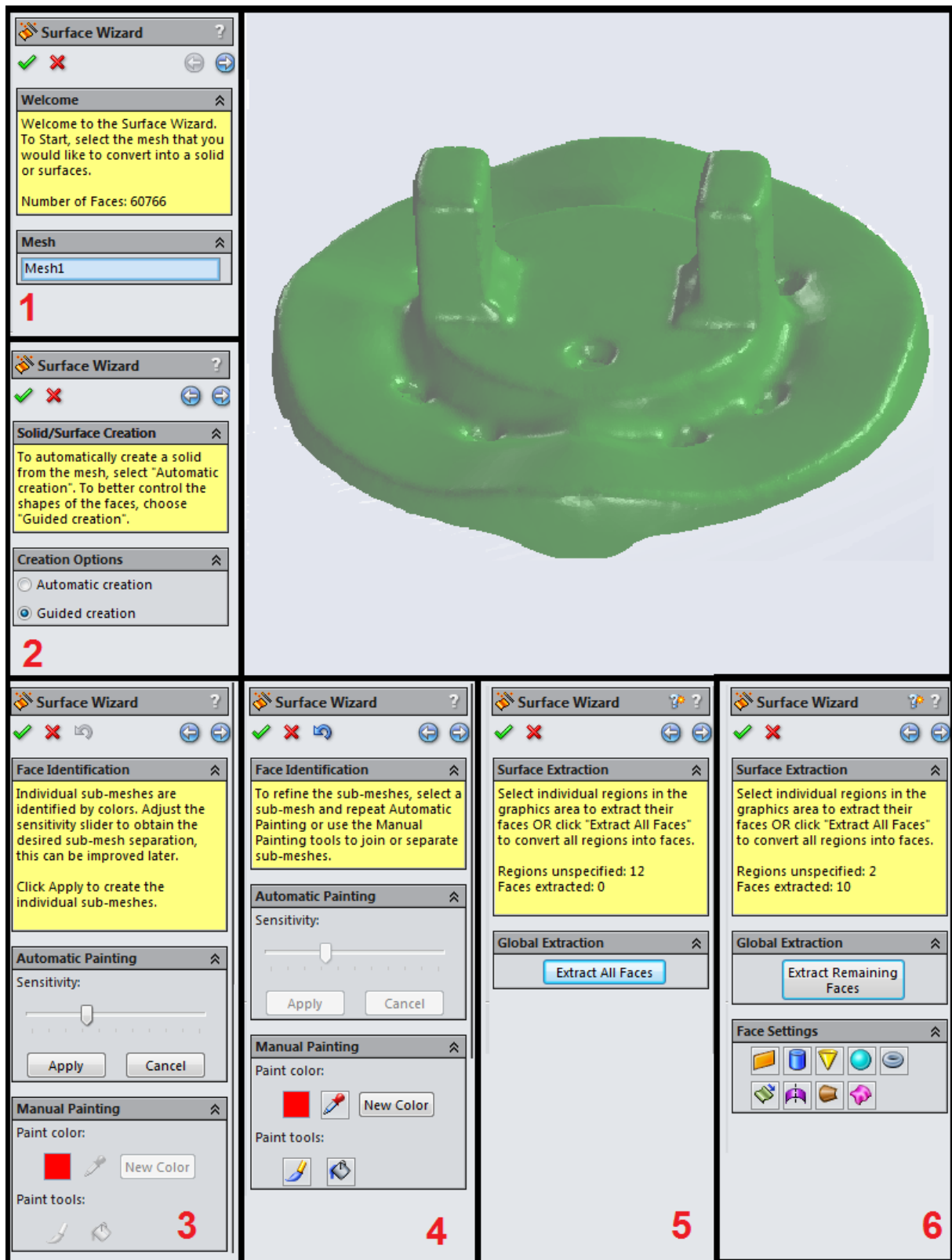


Σχήμα 5.17: Κοντινό πλάνο στο πλέγμα όπου διακρίνονται οι επιφάνειες του (Solidworks)

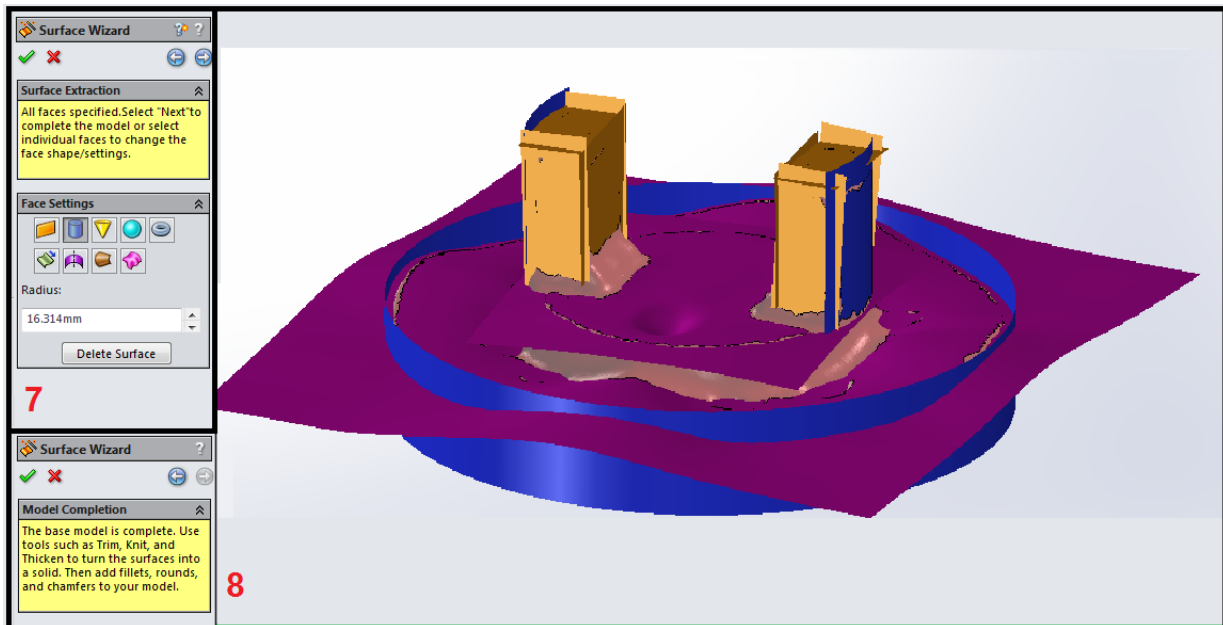
ΒΗΜΑ 4^ο: Δημιουργία ενιαίας επιφάνειας. Επειδή το πλέγμα που δημιουργήθηκε αποτελείται ουσιαστικά από πολλές μικρές επιφάνειες (Σχήμα 5.17), δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις του σχεδιασμού μας. Για το λόγο αυτό, χρειάστηκε να δημιουργηθεί μια ενιαία επιφάνεια με βάση αυτό το πλέγμα. Αυτό έγινε με την εντολή “*Surface Wizard*” (Tools→ ScanTo3D→ Surface Wizard) και τα στάδια της εντολής είναι τα εξής:

1. Επιλογή του πλέγματος.
2. Επιλογή για καθοδηγούμενη δημιουργία των επιφανειών (υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργία μοντέλου από το πλέγμα αυτόματα).
3. Γίνεται επιλογή με βάση την ομαλότητα, σε πόσες και πιες επιφάνειες θα χωριστεί το πλέγμα. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί και σε μια επιφάνεια.
4. Γίνεται χειροκίνητη επεξεργασία των επιφανειών-χρωμάτων που έγιναν στο στάδιο 3, καθώς υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργίας νέων χρωμάτων.
5. Δημιουργία των επιφανειών με βάση τα χρώματα.
6. Εξαγωγή των επιφανειών για περαιτέρω επεξεργασία.
7. Επεξεργασία των επιφανειών, πχ αλλαγή από κωνική που αναγνώρισε το πρόγραμμα σε κυλινδρική που θέλουμε εμείς.
8. Ολοκλήρωση εντολής, εξαγοντας τις τελικές επιφάνειες.

Στα Σχήματα 5.18 και 5.19 παρουσιάζονται οι επιλογές που έγιναν στο κάθε στάδιο του 4^{ου} βήματος.

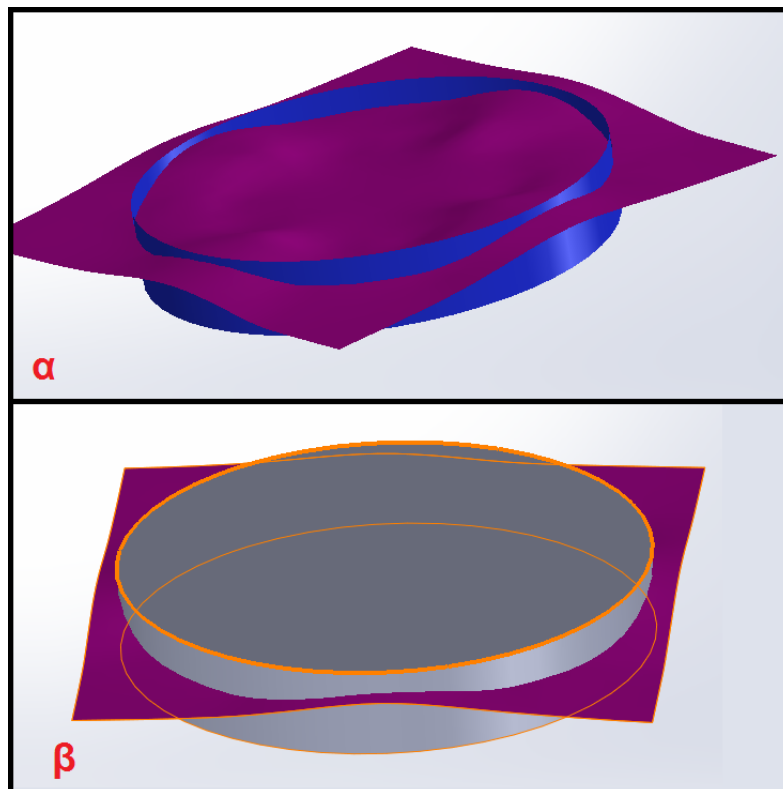


Σχήμα 5.18: Στάδια (1-6) της εντολής "Surface Wizard" (Solidworks)



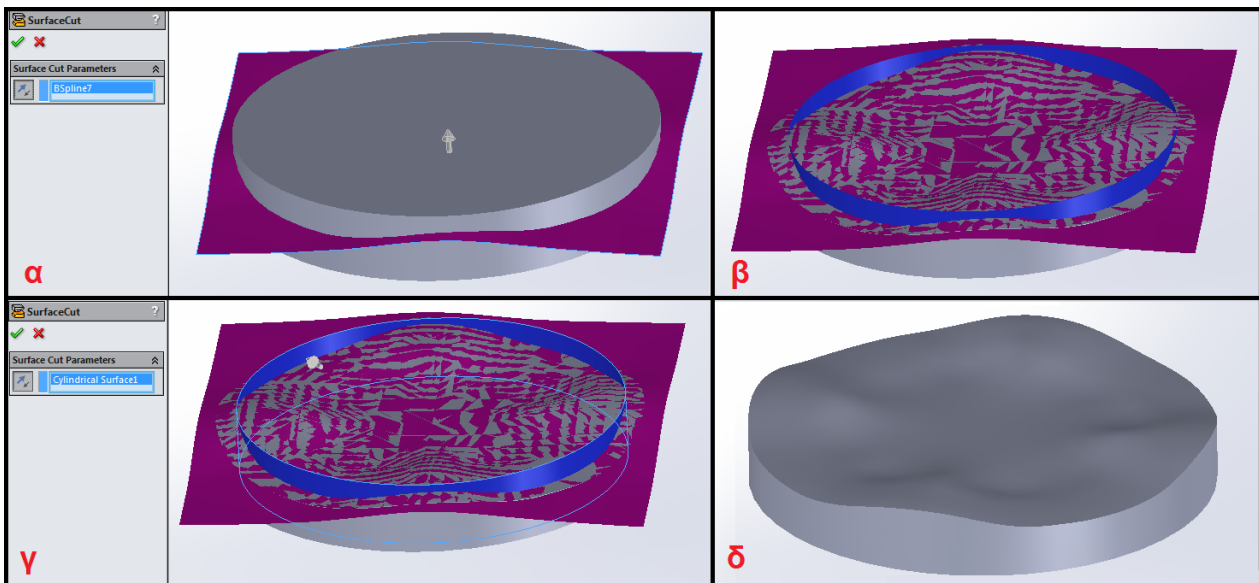
Σχήμα 5.19: Στάδια (7-8) της εντολής “Surface Wizard” (Solidworks)

ΒΗΜΑ 5^ο: Γίνεται επιλογή της κυματοειδούς και κυλινδρικής επιφάνειας, που προέκυψαν από το τέταρτο βήμα, και οι οποίες περικλείουν τη κυματοειδής επιφάνεια του αντικειμένου μας (Σχήμα 5.20.α). Στη συνέχεια σχεδιάζεται ένας στερεός κύλινδρος ομόκεντρος με την κυλινδρική επιφάνεια αλλά μεγαλύτερης ακτίνας (Σχήμα 5.20.β).



Σχήμα 5.20: α) επιφάνειες που προέκυψαν από την εντολή “Surface Wizard”, και β) σχεδίαση κυλίνδρου που τις περικλείει (Solidworks)

ΒΗΜΑ 6^ο: Γίνεται αποκοπή του κυλίνδρου με βάση τις επιφάνειες με την εντολή “Cut With Surface” (Insert→ Cut→ With Surface). Η αποκοπή επιτυγχάνεται επιλέγοντας την επιφάνεια και τη κατεύθυνση που θέλουμε να γίνει (Σχήμα 5.21).



Σχήμα 5.21: Στάδια της εντολής “Cut With Surface” (Solidworks)

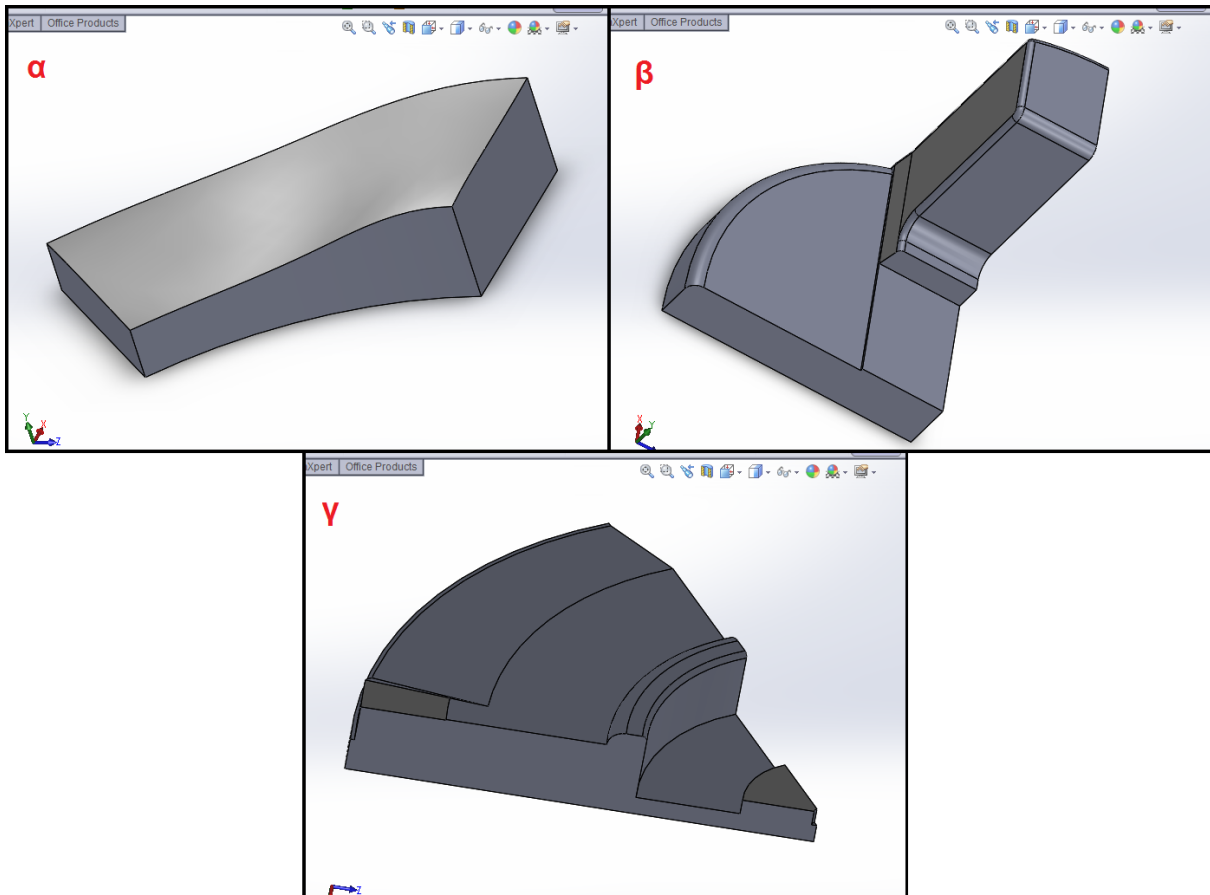
5.4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΕΣ

Ουσιαστικά το τεμάχιο Cam plate είναι συμμετρικό κατά 1/2. Κατά τη σχεδίαση του όμως χωρίστηκε περαιτέρω στις επιφάνειες όπου παρατηρείται διαφορετική συμμετρία. Συγκεκριμένα στην πάνω πλευρά η κυματοειδής επιφάνεια είναι συμμετρική κατά 1/8, και ο κεντρικός κύλινδρος κατά 1/4, ενώ η κάτω πλευρά είναι συμμετρική κατά 1/6.

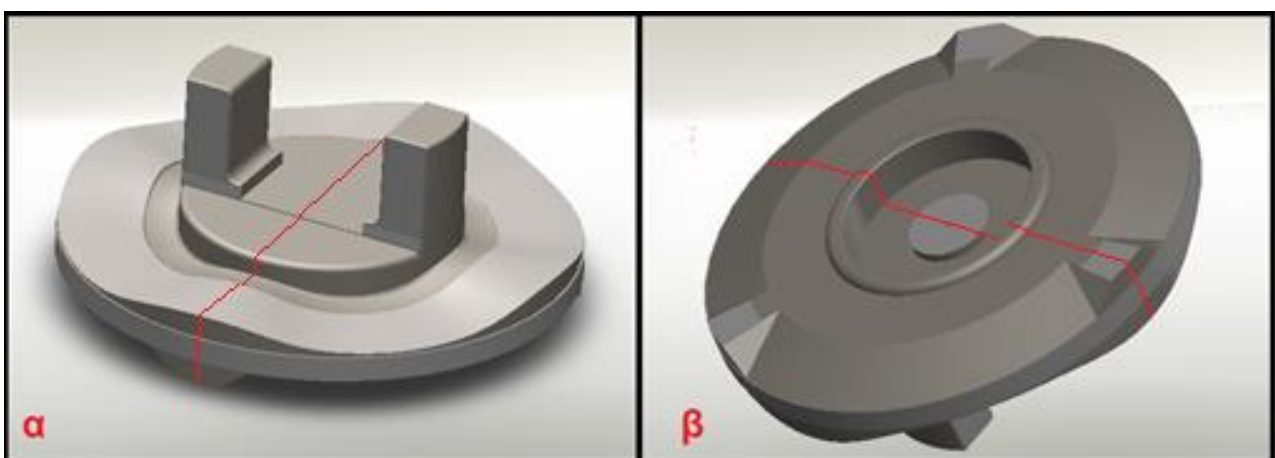
Τα πιο πάνω βήματα όπως παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 5.4.1 οδηγούν στη σχεδίαση του κυματοειδούς μέρους του τεμαχίου (Σχήμα 5.22.α). Με το πέμπτο βήματα να επαναλαμβάνεται επιλέγοντας διαφορετικές επιφάνειες, σχεδιάζεται και το άνω κυλινδρικό μέρος του αντικειμένου (Σχήμα 5.22.β). Για τη σχεδίαση της κάτω πλευράς του τεμαχίου (Σχήμα.5.22.γ) ακολουθήθηκαν τα βήματα από την αρχή, εισάγοντας το αρχείο XYZ της κάτω πλευράς. Το τελικό μοντέλο φαίνεται στα Σχήματα 5.23 και 5.25. Η πλήρης γεωμετρική περιγραφή του τεμαχίου παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

Πέραν των δεδομένων που προέκυψαν από τη σάρωση του τεμαχίου, λήφθηκαν και μετρήσεις επιφανειών από συμβατικό όργανο μέτρησης (παχύμετρο), οι οποίες ήταν δυνατό να μετρηθούν. Ουσιαστικά με το παχύμετρο έγινε επιβεβαίωση των μετρήσεων της σάρωσης καθώς η απόκλιση δεν ξεπέρασε τα 0,4 mm.

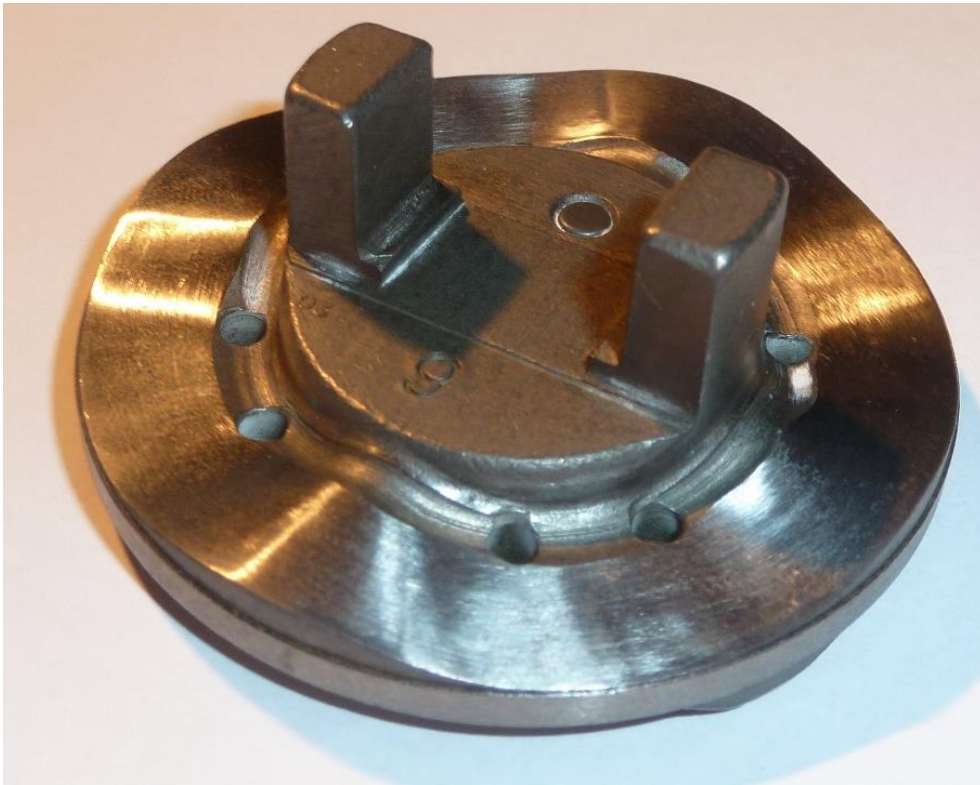
Σημειώνεται ότι κατά τη σφυρηλάτηση οι σπές αγνοήθηκαν, καθώς, λόγω του μεγέθους τους, η κατασκευή τους με τη διαδικασία της σφυρηλάτησης είναι εξαιρετικά δύσκολη έως αδύνατη.



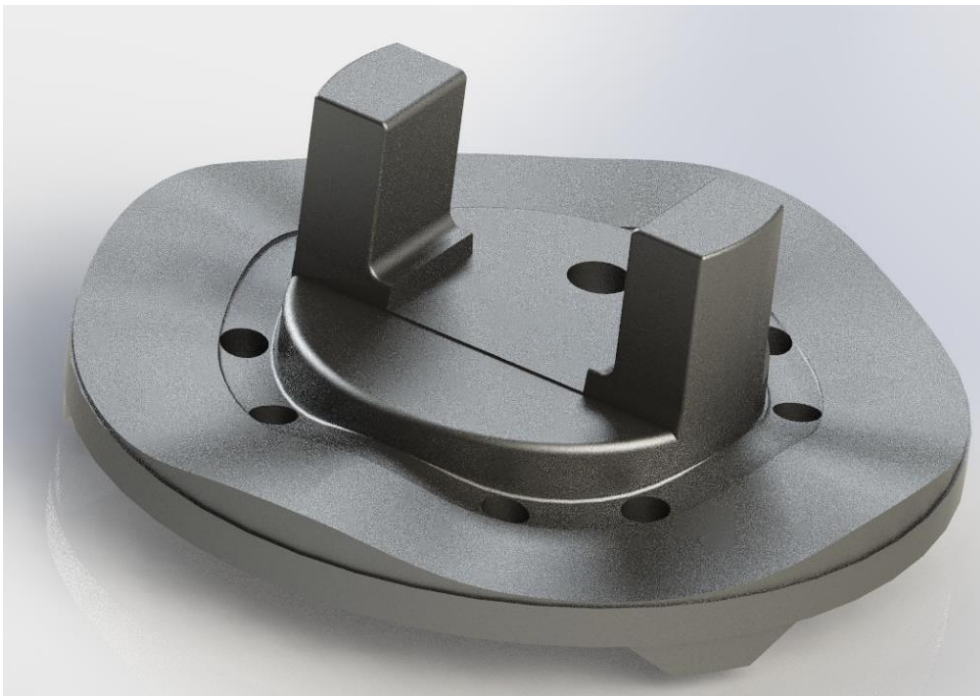
Σχήμα 5.22: Τα κομμάτια σχεδίασης που απαρτίζουν το αντικείμενο μας ανάλογα με τη συμμετρία τους, α) κυματοειδής άνω πλευρά 1/8, β) κύλινδρος άνω πλευράς 1/4, γ) κάτω πλευρά 1/6 (Solidworks)



Σχήμα 5.23: Μοντέλο Cam plate που σχεδιάσαμε, α) άνω και β) κάτω πλευρά. Με κόκκινο χρώμα το επίπεδο συμμετρίας (Solidworks)



Σχήμα 5.24: Πραγματικό τεμάχιο Cam plate στο οποίο έγινε η σάρωση.

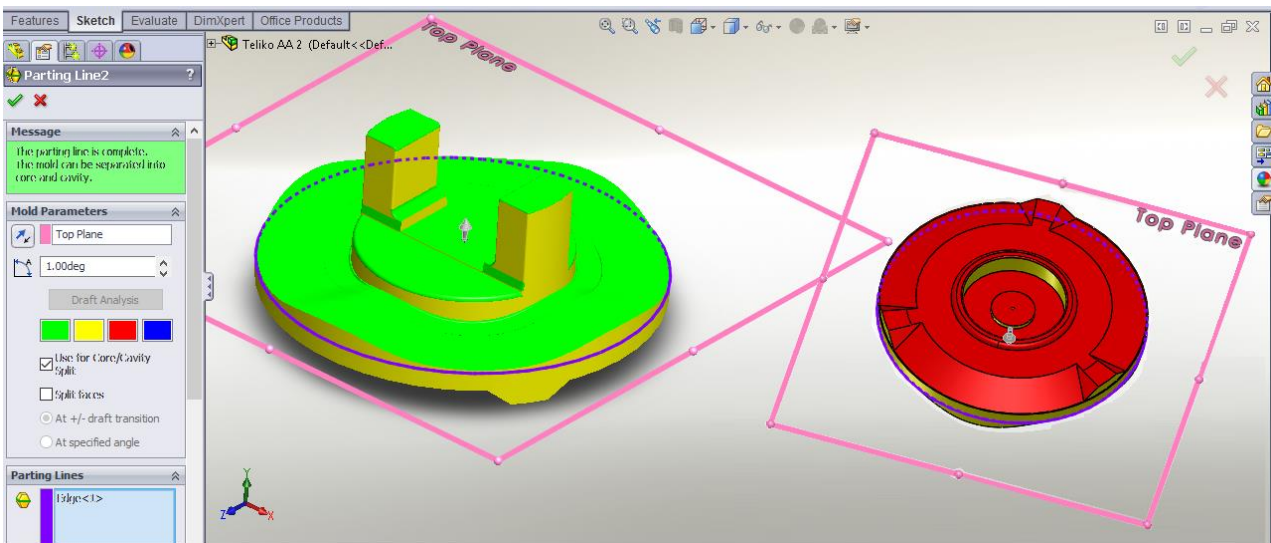


Σχήμα 5.25: Μοντέλο τεμαχίου Cam plate όπως σχεδιάστηκε στο SolidWorks.

5.5 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

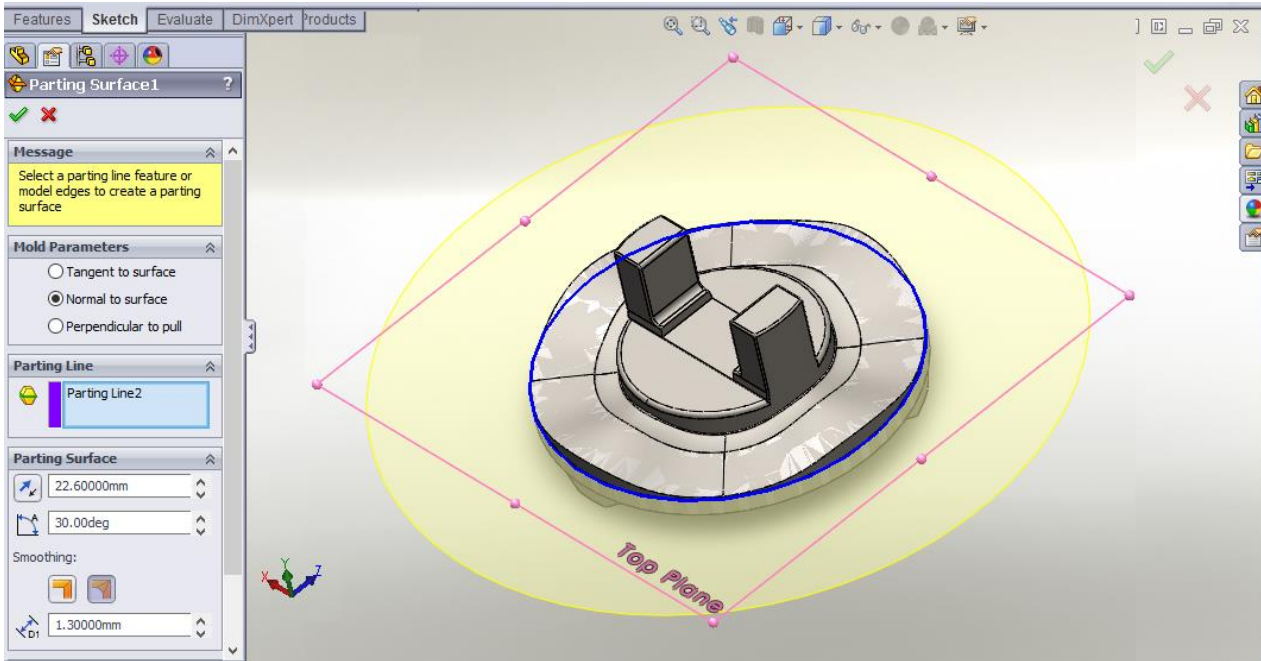
Μετά την μοντελοποίηση του τεμαχίου, υπάρχουν εντολές στο λογισμικό SolidWorks που βοηθούν στην εύκολη κατασκευή των τμημάτων της μήτρας. Όπως έχει προαναφερθεί οι οπές του τεμαχίου, που διακρίνονται στο Σχήμα 5.24, είναι εξαιρετικά δύσκολο να δημιουργηθούν με τη κατεργασία σφυρηλάτησης, έτσι η μήτρα σχεδιάστηκε μη λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη των οπών στο τεμάχιο. Στα παρακάτω βήματα παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη σχεδίαση των τμημάτων της μήτρας.

ΒΗΜΑ 1^ο: Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή της γραμμής διαχωρισμού της μήτρας. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή “Parting Line” (insert→ modls→ Parting line). Η επιλογή της γραμμής διαχωρισμού μπορεί να γίνει είτε με βάση κάποιου υπάρχοντος σημείου ή επιφάνειας του μοντέλου, είτε με την επιλογή κάποιου εξωτερικού επιπέδου. Στο Σχήμα 5.26 φαίνεται το επίπεδο (ροζ χρώμα) και η γραμμή διαχωρισμού (μοβ κύκλος πάνω στο αντικείμενο) που επιλέχθηκε. Το πράσινο χρώμα δείχνει τις επιφάνειες της άνω μήτρας, το κόκκινο της κάτω, ενώ το κίτρινο τις κάθετες ουδέτερες επιφάνειες.



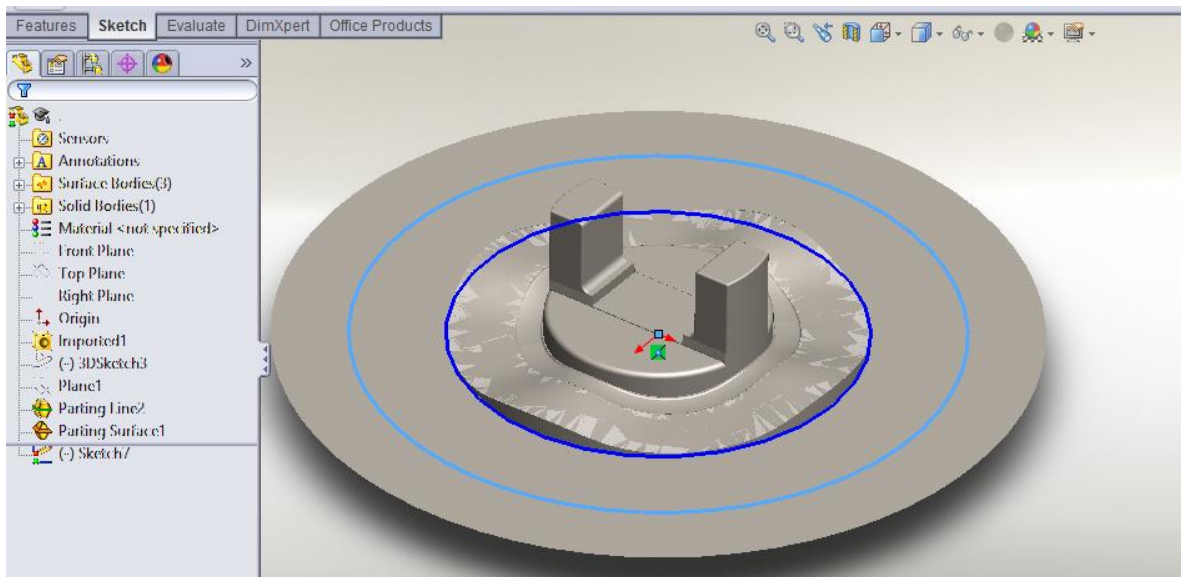
Σχήμα 5.26: Γραμμή διαχωρισμού μήτρας με την εντολή “Parting Line” (Solidworks)

ΒΗΜΑ 2^ο: Δημιουργία επιφάνειας με βάση τη γραμμή διαχωρισμού ώστε να μπορέσει να χωριστεί η μήτρα. Αυτό γίνεται με την εντολή “Parting Surface”. Στο Σχήμα 5.27 φαίνεται με κίτρινο χρώμα η επιφάνεια που δημιουργείται με βάση τη γραμμή διαχωρισμού (μπλε κύκλος στο αντικείμενο). Η ακτίνα της πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα της μήτρας ώστε να μπορέσουν να χωριστούν.

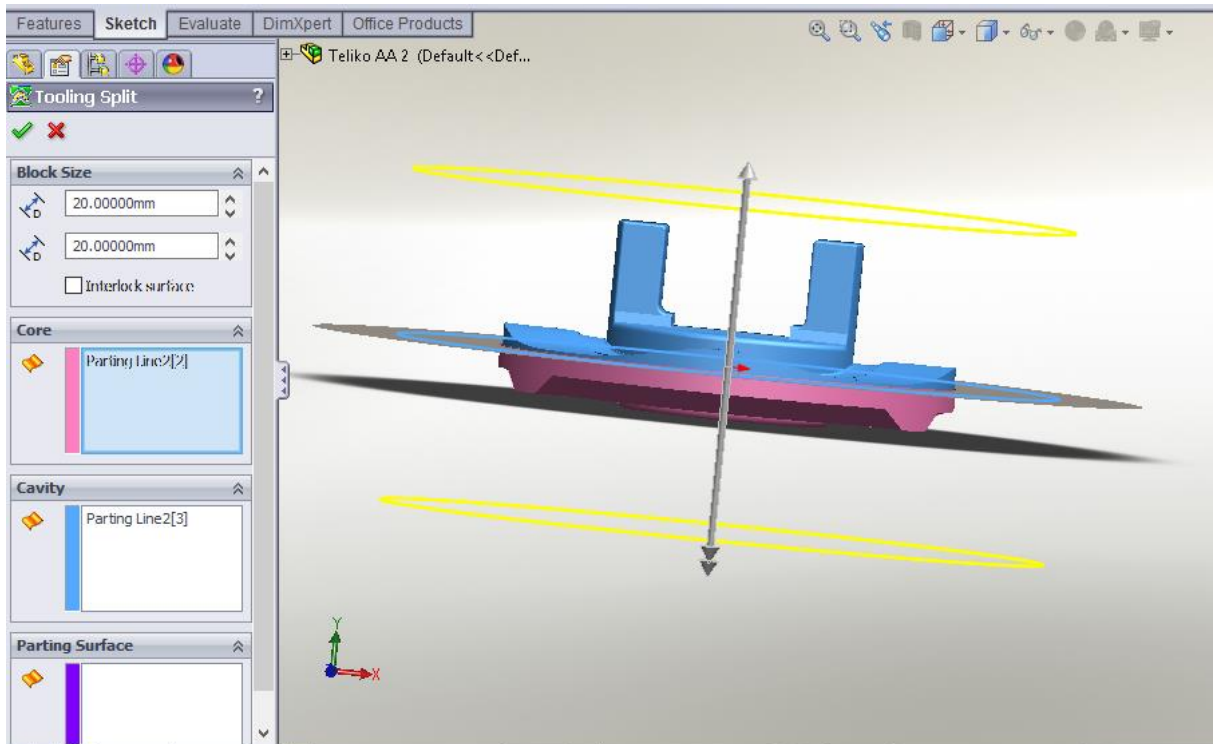


Σχήμα 5.27: Επιφάνεια (κίτρινο) και γραμμή διαχωρισμού (μπλε) της μήτρας με την εντολή “Parting Surface” (Solidworks)

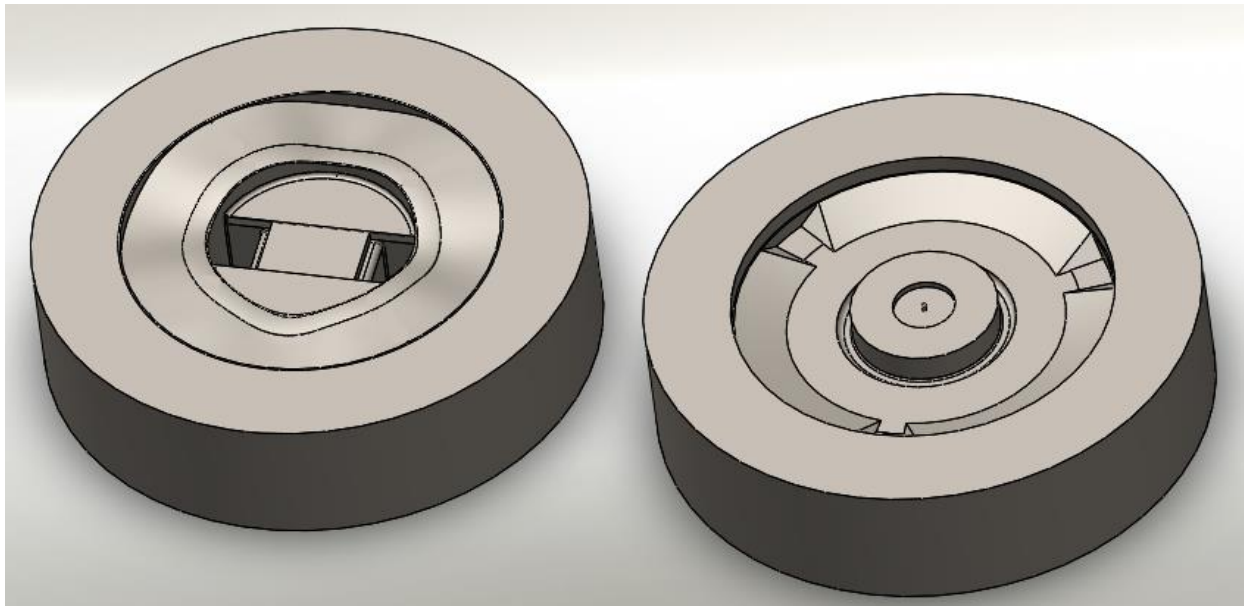
ΒΗΜΑ 3^ο: Δημιουργία μήτρας. Αφού πρώτα σχεδιάστηκε πάνω στην επιφάνεια διαχωρισμού ένας κύκλος ακτίνας 40mm, που είναι το επιθυμητό μέγεθος/σχήμα της μήτρας (Σχήμα 5.28), επιλέχθηκε η εντολή “Tolling Split” (insert→ Molds→ Tolling split). Με την εντολή αυτή δημιουργούνται δύο τεμάχια στις δύο πλευρές της επιφάνειας διαχωρισμού, με βάση την επιφάνεια αυτή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.29 μπορεί να καθοριστεί το ύψους του κάθε τμήματος της μήτρας. Επίσης στο Σχήμα 5.29 διακρίνονται με μπλε χρώμα οι επιφάνειες που θα απαρτίζουν η άνω μήτρα και με ροζ τη κάτω μήτρα.



Σχήμα 5.28: Καθορισμός μεγέθους/σχήματος της μήτρας (Solidworks)



Σχήμα 5.29: Δημιουργία των τμημάτων της μήτρας με την εντολή “Tooling Split”



Σχήμα 5.30: Τμήματα της μήτρας του τεμαχίου Cam plate (Solidworks)

Στις μήτρες που δημιουργήθηκαν (Σχήμα 5.30) έγιναν μετατροπές, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, για τη δημιουργία του συνολικού καλουπιού (Κεφάλαιο 6). Ωστόσο, το βασικό μέρος που είναι το εσωτερικό που διαμορφώνει το σχήμα του αντικείμενου δε τροποποιήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE

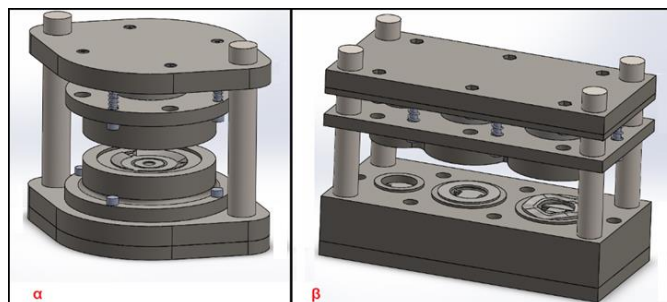
Το τεμάχιο Cam plate όπως έχει προ αναφερθεί (Υποκεφάλαιο 4.1) κατασκευάζεται με τη διαδικασία της χύτευσης. Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται μελέτη για τη κατασκευή του τεμαχίου με τη διαδικασία της σφυρηλάτησης ακριβείας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται σχεδιασμός δύο καλούπιών για τη κατασκευή του τεμαχίου με δύο διαδικασίες σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας ακριβείας, οι οποίες έχουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Οι δύο διαδικασίες είναι:

- Η κατασκευή να γίνει σε ένα στάδιο, δηλαδή με ένα πάτημα του καλούπιού στη πρέσα.
- Η κατεργασία να γίνει σε τρία στάδια (τρία πατήματα).

Γενικά σε μια κατεργασία θερμής σφυρηλάτησης ακριβείας είναι προτιμότερη η επιλογή της αποτύπωση του αντικειμένου με ένα πάτημα της πρέσας για λόγους όπως ότι χρησιμοποιείται ένα καλούπι για τη σφυρηλάτηση, ο χρόνος παραγωγής είναι μικρότερος και το αρχικό κομμάτι που προθερμάθηκε έχει καλύτερες ιδιότητες αφού δεν χάνει θερμοκρασία κατά τη μεταφορά του από το ένα καλούπι στο άλλο. Από την άλλη μεριά η σφυρηλάτηση σε περισσότερα στάδια προσφέρει ομαλότερη ροή του υλικού, μικρότερες φθορές και πλαστικές παραμορφώσεις της μήτρας και αποφεύγονται οι μεγάλες θερμικές καταπονήσεις και η δημιουργία ρωγμών. Η διαμόρφωση σε περισσότερα στάδια συνήθως χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το τεμάχιο έχει πολύπλοκο σχήμα και υπάρχουν μεγάλες αλλαγές στη γεωμετρία του αρχικού τεμαχίου (μπιγέτας) με του τεμάχιο που πρέπει να διαμορφωθεί.

Τα τμήματα της εσωτερικής μήτρας των καλούπια όπως παρουσιάζονται στις επόμενες δύο παραγράφους προέκυψαν μετά από προσομοιώσεις και επανασχεδιασμό της μήτρας. Επίσης η επιλογή των διαστάσεων της μπιγέτας προέκυψε μετά από προσομοιώσεις και είναι διαφορετική στις δύο περιπτώσεις.

Το υλικό των εσωτερικών μητρών που διαμορφώνουν το τεμάχιο θα είναι εργαλειοχάλυβας και η επιλογή του μπορεί να γίνει από τις προσφερόμενες λίστες της αγοράς. Ένα υλικό που καλύπτει τις ανάγκες της κατεργασίας θερμής σφυρηλάτησης χάλυβα είναι το DIN: X32CrMoCoV3-3-3 (AISI: H10A). Αναλυτικές πληροφορίες για το υλικό παραθέτετε στο Παράρτημα Β.2 της εργασίας.



Σχήμα 6.1 : Καλούπια σφυρηλάτησης cam plate που σχεδιάστηκαν: α) ενός σταδίου β)τριών σταδίων

6.1 ΚΑΛΟΥΠΙ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στο Υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το καλούπι ενός σταδίου διαμόρφωσης που σχεδιάστηκε. Πιο συγκεκριμένα γίνεται περιγραφή: των τμημάτων του καλουπιού, της διαδικασίας συναρμολόγησης του και του τρόπου λειτουργίας του.

6.1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

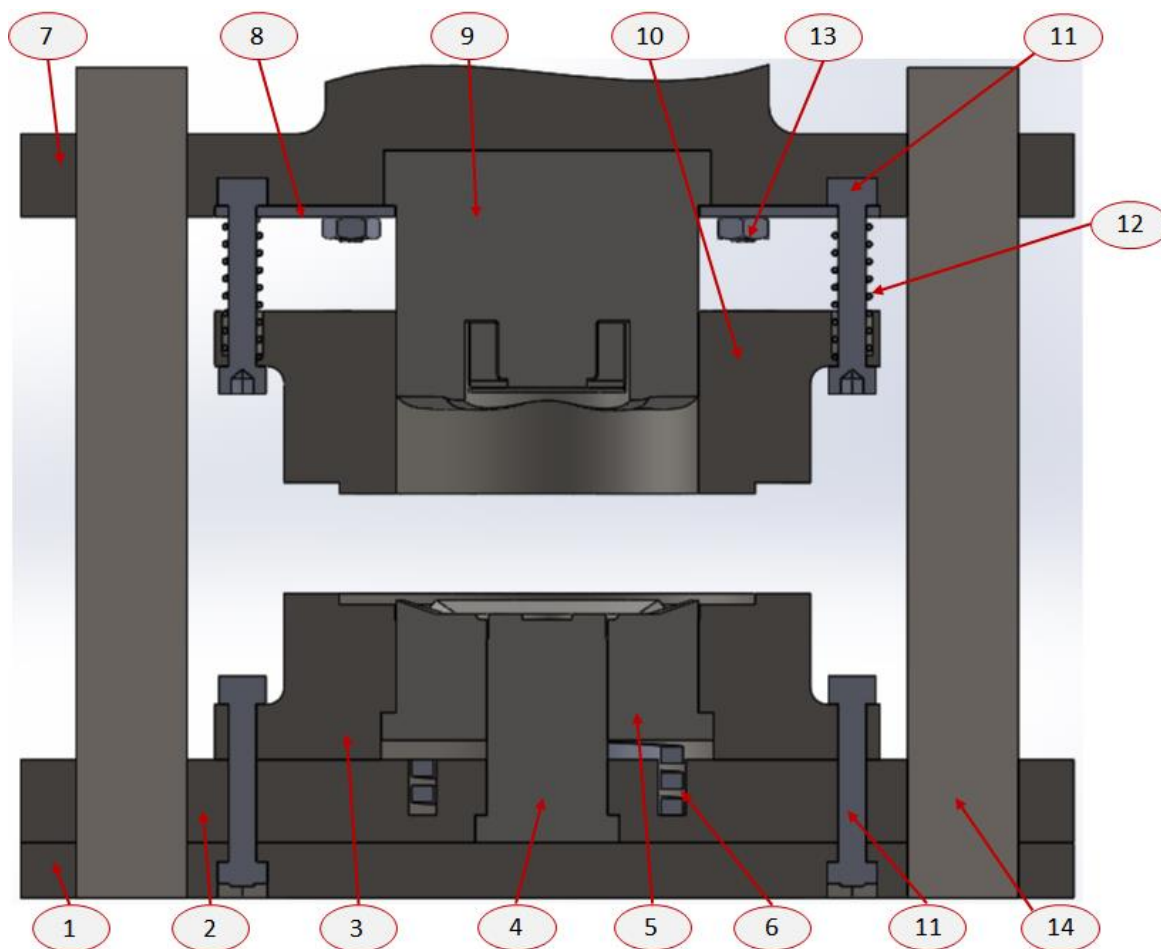
Το πρώτο καλούπι σχεδιάστηκε ώστε να διαμορφώνει το τεμαχίου (cam plate) με ένα πάτημα της μηχανής πρέσας. Το συνολικό καλούπι χωρίζεται στα κάτω τμήματα και άνω τμήματα. Τα κάτω τμήματα εφαρμόζονται στο τραπέζι της μηχανής πρέσας και τα άνω τμήματα στο έμβολο της πρέσας. (Οι παρακάτω αριθμοί στις παρενθέσεις είναι οι αντίστοιχοι του Σχήματος 6.2 και του Πίνακα 6.1)

Τα βασικά τμήματα διαμόρφωσης του τεμαχίου είναι το “κάτω έμβολο” (4), η “κάτω εσωτερική μήτρα” (5) και η “άνω εσωτερική μήτρα” (9). Ο διαχωρισμός της κάτω μήτρας σε δύο τμήματα κρίθηκε αναγκαία για να υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής της μπιγέτας στο κάτω τμήμα από τα πρώτα στάδια της κατεργασίας. Αυτό βοηθά στη καλύτερη τοποθέτηση της μπιγέτας και αποφεύγεται η εμφάνιση μεγάλων πιέσεων στον εσωτερικό κάτω κύλινδρο (κάτω έμβολο) της μήτρας διαμόρφωσης. Με τη χρήση ενός “ελατηρίου πίεσεως” (6) και μιας ειδικής διαμόρφωσης στη “κάτω εξωτερική μήτρα” (3) γίνεται η ρύθμιση της κίνησης της “κάτω εσωτερικής μήτρας” (5).

Τα τμήματα “κάτω εξωτερική μήτρα” (3) και “άνω εξωτερική μήτρα” (10) επίσης είναι βασικά τμήματα διαμόρφωσης καθώς αυτά δημιουργούν τη κλειστή μήτρα ακρίβειας. Με τη επαφή (ένωση) των δύο αυτών τμημάτων περιορίζεται η ροή του υλικού στο οριζόντιο επίπεδο και διαμορφώνεται ο εξωτερικό κύλινδρο του τεμαχίου. Ο διαχωρισμός σε δύο τμήματα της εξωτερικής μήτρα είναι αναγκαίος για την αποφυγή εγκλωβισμού του τεμαχίου στη μήτρα και την αποφυγή των πολύ μικρού πάχους επιφανειών της μήτρας. Με τη βοήθεια των “κοχλιών συγκράτησης” (11) και των “ελατηρίων ρύθμισης” (12), η “άνω εξωτερική μήτρα” (10) έρχεται σε επαφή με την κάτω εξωτερική μήτρα πριν ξεκινήσει ουσιαστικά η κατεργασία της μπιγέτας για να εξασφαλιστεί η δημιουργία της κλειστής μήτρας.

Τα υπόλοιπα τμήματα χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση των μητρών και τη σωστή τοποθέτηση τους. Η “κάτω εξωτερική πλάκα” (1) είναι το τμήμα που εφαρμόζεται στη τράπεζα της πρέσας και λειτουργεί ως βάση του “έμβολου μήτρας” (4). Η “κάτω εσωτερική πλάκα” (2) λειτουργεί ως βάση της κάτω εσωτερικής και εξωτερικής μήτρας (3, 5) καθώς και του “ελατηρίου πίεσεως” (6) όπου υπάρχει χώρος για τη συμπίεση του ελατηρίου. Η “άνω εξωτερική πλάκα” (7) είναι το τμήμα που εφαρμόζεται στο έμβολο της πρέσας και λειτουργεί ως βάση της “άνω εσωτερικής μήτρας” (9). Η “άνω πλάκα συγκράτησης” (8) συγκρατεί τη πάνω εσωτερική μήτρα καθώς και τους κοχλίες συγκράτησης της εξωτερικής μήτρας (10). Οι υπόλοιποι κοχλίες (11,13) χρησιμοποιούνται για τη

σύνδεση των τμημάτων με τη βοήθεια περικοχλίων. Τέλος οι “ράβδοι οδηγό” (15) χρησιμεύουν στη ρύθμιση των θέσεων των άνω και κάτω τμημάτων έτσι ώστε οι θέσεις αυτών να είναι στο ίδιο κάθετο επίπεδο και να μην υπάρχουν αποκλίσεις κατά τη σφυρηλάτηση.



Σχήμα 6.2: Εγκάρσια τομή καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης

Πίνακας 6.1: Αρίθμηση των τμημάτων καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης

A/A	Περιγραφή	τεμάχια
1	Κάτω εξωτερική πλάκα	1
2	Κάτω εσωτερική πλάκα	1
3	Κάτω εξωτερική μήτρα	1
4	Κάτω μήτρα- έμβολο	1
5	Κάτω εσωτερική μήτρα	1
6	Ελατήριο πίεσεως	1
7	Άνω εξωτερική πλάκα	1
8	Άνω πλάκα συγκράτησης	1
9	Άνω εσωτερική μήτρα	1
10	Άνω εξωτερική μήτρα	1
11	Κοχλίας συγκράτησης M5 μεγάλος	8
12	Ελατήριο ρύθμισης	4
13	Κοχλίας συγκράτησης M5 μικρός	4
14	Ράβδος-οδηγός	2

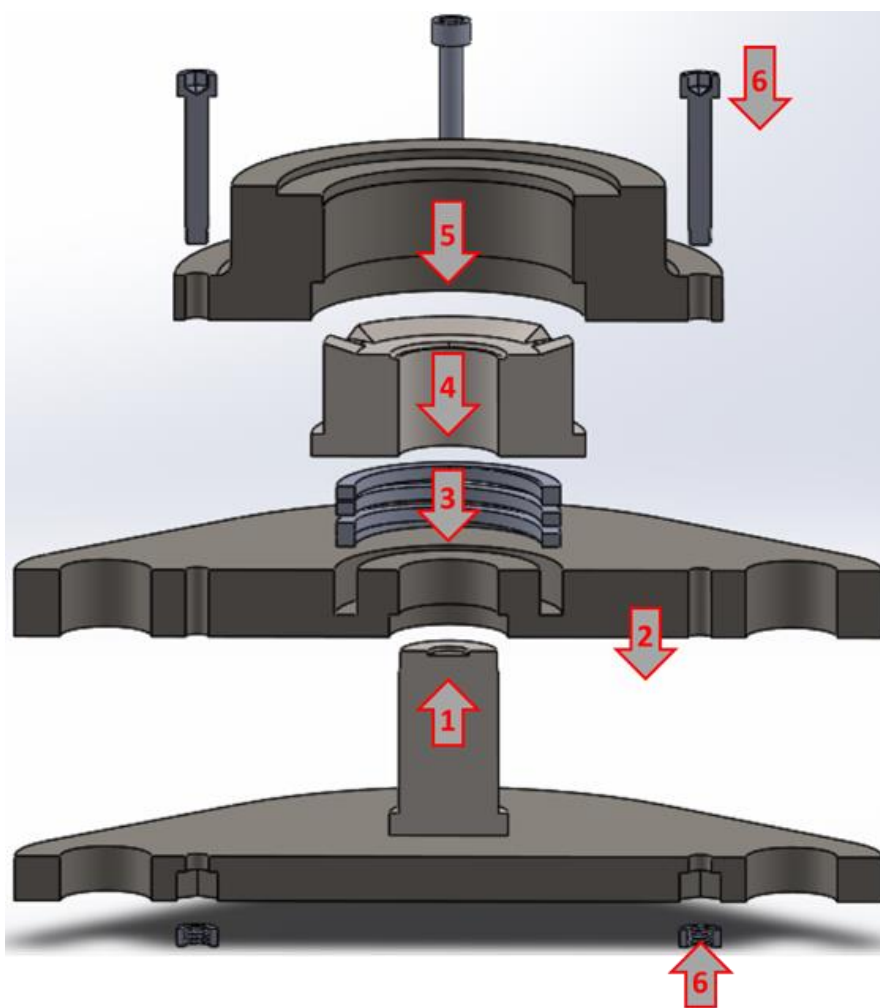
Η γεωμετρία των στοιχείων του καλουπιού παραθέτετε αναλυτικά στο Παράρτημα Γ.1.

6.1.2 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Το καλούπι είναι χωρισμένο στα άνω τμήματα (που δένουν στο έμβολο στη πρέσα) και στα κάτω τμήματα (που δένουν στο τραπέζι της πρέσας) τα οποία συναρμολογούνται ξεχωριστά και στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους με τους “ράβδους οδηγούς”.

Συναρμολόγηση κάτω τμημάτων

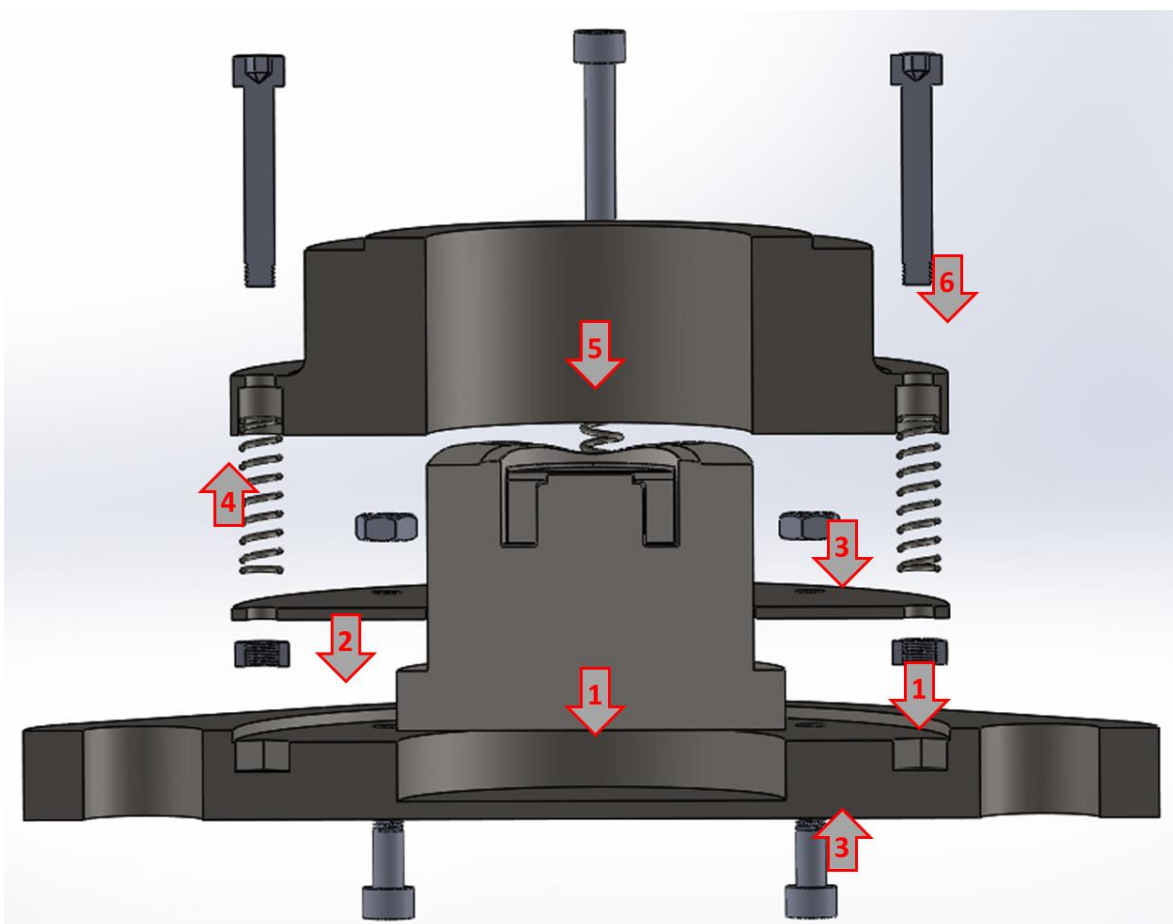
Πρώτο βήμα είναι η τοποθέτηση της “μήτρας-έμβολο” στο κέντρο της “εσωτερικής πλάκας”. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η “εσωτερική πλάκα” πάνω στην “εξωτερική πλάκα” (όπου γίνεται εγκλωβισμός της “μήτρας-έμβολο”). Τρίτο βήμα είναι η τοποθέτηση του ελατηρίου πίεσεως στο διαμορφωμένο χώρο ελατηρίου της εσωτερικής πλάκας. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της μήτρας εμβόλου εφαρμόζεται η “εσωτερική μήτρα” στο κέντρο της διάταξης και έρχεται σε επαφή με το “ελατήριο πίεσεως”. Πέμπτο βήμα είναι η τοποθέτηση της “εξωτερικής μήτρα” η οποία περνά εξωτερικά από την “εσωτερική μήτρα” και έρχεται σε επαφή με την “εσωτερική πλάκα”. Τέλος τοποθετούνται οι τέσσερις κοχλίες και τα περικόχλια για τη συγκράτηση όλων των κάτω τμημάτων του καλούπιού.



Σχήμα 6.3: Βήματα συναρμολόγησης κάτω τμημάτων καλούπιού ενός σταδίου

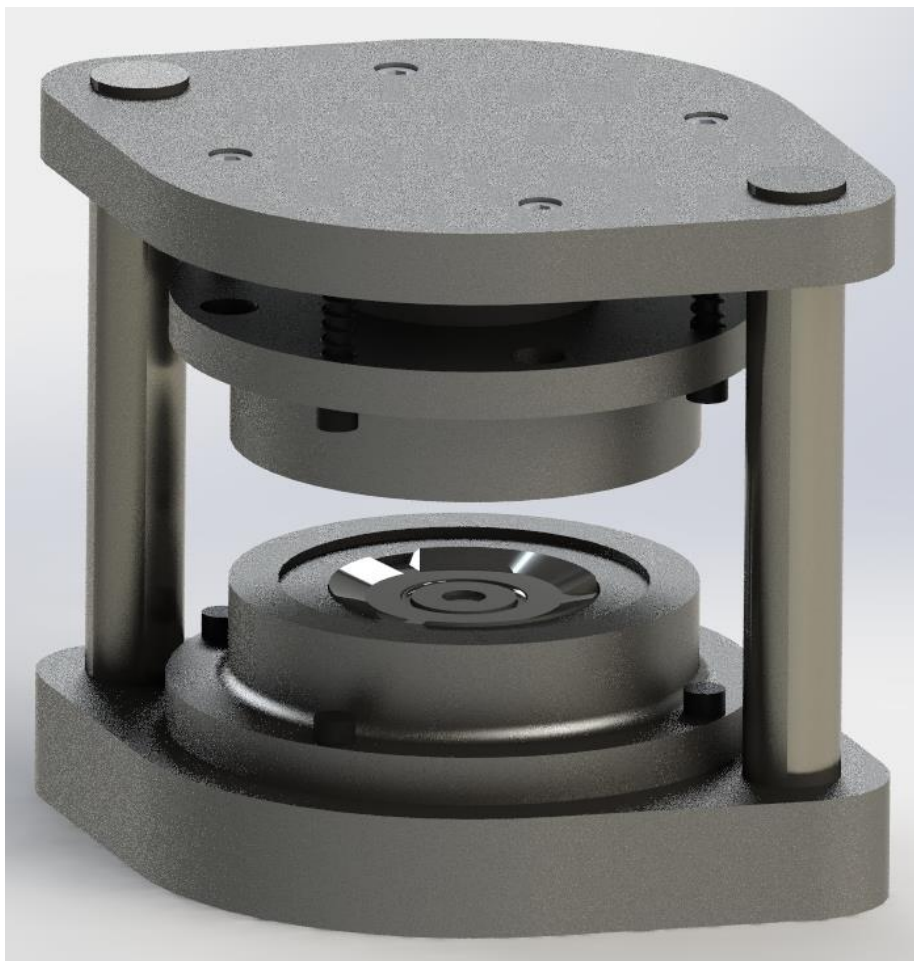
Συναρμολόγηση άνω τμημάτων

Πρώτο βήμα είναι η τοποθέτηση της “εσωτερικής μήτρας” στο κέντρο της “εξωτερικής πλάκας” και των τεσσάρων περικοχλίων (στα οποία θα βιδωθούν οι μεγάλοι κοχλίες στο τελευταίο βήμα) . Στη συνέχεια (δεύτερο βήμα) εφαρμόζεται η “πλάκα συγκράτησης” πάνω στην “εξωτερική πλάκα”. Τρίτο βήμα είναι η τοποθέτηση των τεσσάρων μικρών κοχλίων και των περικοχλίων για τη συγκράτηση των τμημάτων του πρώτου και δεύτερου βήματος. Τέταρτο βήμα είναι η τοποθέτηση των τεσσάρων “ελατηρίων ρύθμισης” στους διαμορφωμένους χώρους της “εξωτερικής μήτρας” και στη συνέχεια (πέμπτο βήμα) με τη βοήθεια της “εσωτερικής μήτρας” εφαρμόζεται η “εξωτερική μήτρα” στο κέντρο της διάταξης έτσι ώστε τα “ελατήρια ρύθμισης” να έρχονται σε επαφή με τη “πλάκα συγκράτησης”. Τέλος έκτο βήμα είναι η τοποθέτηση των τεσσάρων μεγάλων κοχλίων οι οποίοι περνούν μέσα από τα ελατήρια ρύθμιση και συγκρατούν την “εξωτερική μήτρα” .



Σχήμα 6.4: Βήματα συναρμολόγησης άνω τμημάτων καλουπιού ενός σταδίου

Σημειώνεται ότι για τη σωστή τοποθέτηση και το περιορισμό της περιστροφής της “κάτω μήτρας-έμβολο”, της “κάτω εσωτερικής μήτρας” και της “άνω εσωτερική μήτρα” κατά το οριζόντιο επίπεδο, υπάρχει ιδική διαμόρφωση στη θέση συναρμογής τους με την “κάτω εσωτερική πλάκα”, την “κάτω εξωτερική μήτρα” και την “άνω εξωτερική πλάκα” αντίστοιχα.



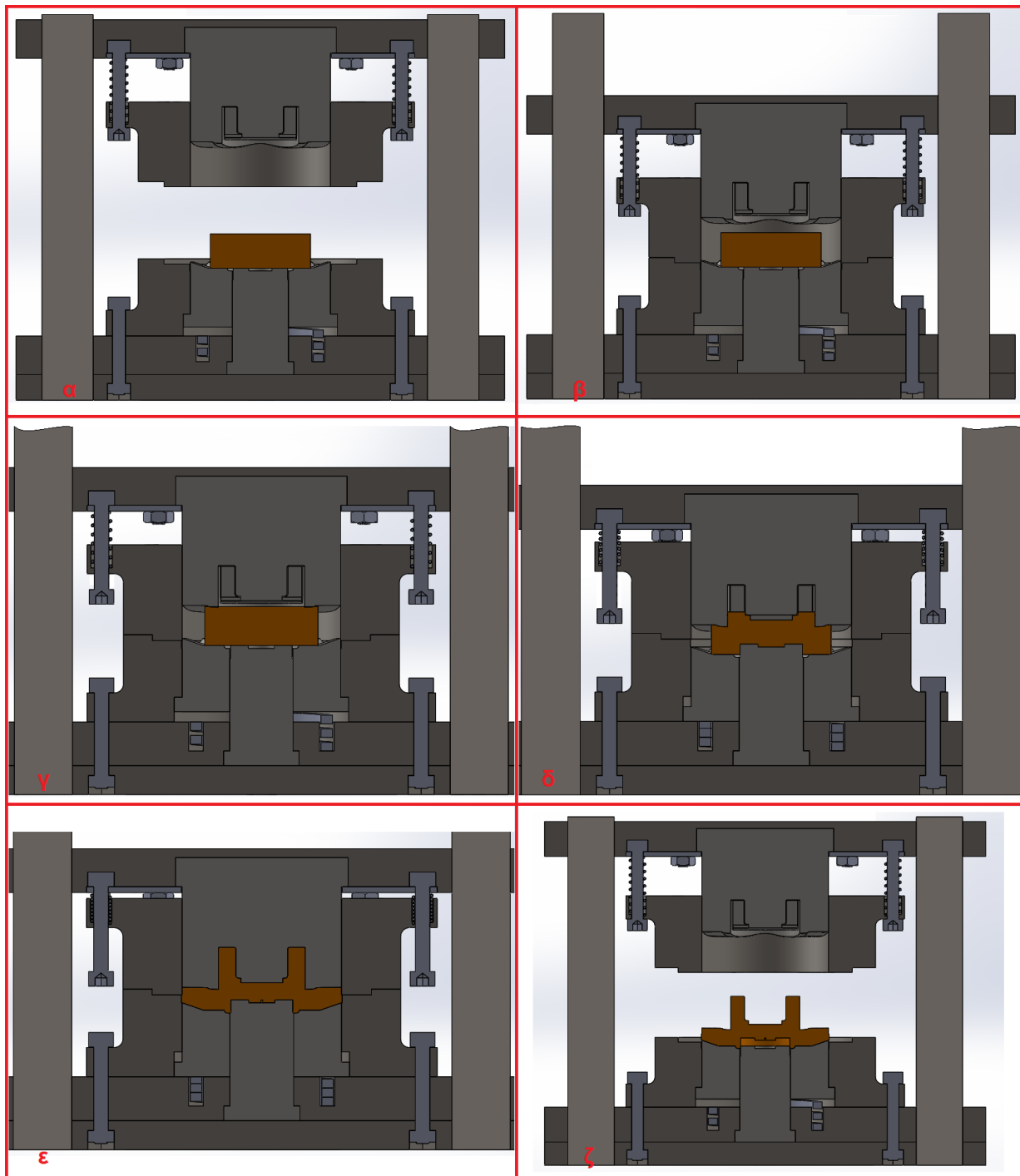
Σχήμα 6.5: Τρισδιάστατη όψη καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης

6.1.3 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στη ενότητα αυτή γίνεται περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του καλουπιού για τη καλύτερη κατανόηση της λογικής σχεδίασης του. Η λειτουργία του καλουπιού μπορεί να χωριστεί σε φάσεις όπου καθορίζονται από τις θέσεις που βρίσκονται τα κινούμενα τμήμα του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Η 1^η φάση είναι όταν τα άνω τμήματα του καλουπιού βρίσκονται σε μια ικανοποιητική απόσταση ώστε να μπορεί να γίνει η τοποθέτηση της μπιγέτας στο κέντρο της κάτω μήτρας (Σχήμα 6.6.α). Αφού τεθεί σε λειτουργία η πρέσα, η 2^η φάση είναι η επαφή της “άνω εξωτερικής μήτρας” με τη “κάτω εξωτερική μήτρα” (Σχήμα 6.6.β). Η 3^η σημαντική φάση είναι όταν η “άνω εσωτερική μήτρα” έρχεται σε επαφή με τη μπιγέτα και ξεκινά η κατεργασία (Σχήμα 6.6.γ). Στη συνέχεια αφού εμφανιστούν δυνάμεις στη “κάτω μήτρα”, τέτοιες ώστε να συμπιέσουν το “ελατήριο πίεσεως”, η “κάτω εσωτερική μήτρα” μετατοπίζεται και έρχεται σε επαφή με τη “κάτω εσωτερική πλάκα” (4^η φάση, Σχήμα 6.6.δ). Η 5^η φάση είναι η μέγιστη μετατόπιση της “άνω εσωτερικής μήτρας” όπου γίνεται η τελική διαμόρφωση (Σχήμα 6.6.ε). Τέλος, 6^η φάση είναι η επαναφορά των άνω τμημάτων στην αρχική τους θέση όπου επιτρέπεται η εξαγωγή του τεμαχίου από τη μήτρα (Σχήμα 6.6.ζ).

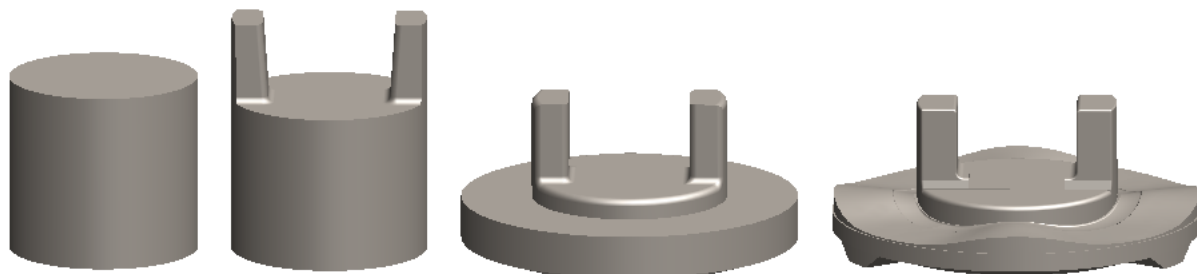
Το “ελατήριου πίεσεως” που θα χρησιμοποιηθεί είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τη επίτευξη της επιθυμητής διαμόρφωσης που θα πραγματοποιηθεί μεταξύ της θέσης 3 και 4. Η επιλογή του μπορεί να γίνει μέσα από μια πληθώρα ελατηρίων που υπάρχουν στην αγορά (πχ. Die spring ISO 10243). Κατά τη προσομοίωση, η επιλογή του ελατηρίου έγινε με βάση τις επιλογές που παρέχει το λογισμικό Simufact.forming (Υποκεφάλαιο 7.4.3).



Σχήμα 6.6: Φάσεις λειτουργίας καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης. α) τοποθέτηση μπιγέτας, β) εφαρμογή άνω εξωτερικής μήτρας, γ) έναρξη κατεργασίας, δ) μέγιστη συμπίεση του ελατηρίου πίεσεως, ε) τέλος διαδρομής της πρέσας- (ολική διαμόρφωση), ζ) έξοδος τεμαχίου- τέλος κατεργασίας.

6.2 ΚΑΛΟΥΠΙ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στο Υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το καλούπι τριών σταδίων διαμόρφωσης που σχεδιάστηκε. Πιο συγκεκριμένα γίνεται περιγραφή: της σχεδίασης των προδιαμορφωμάτων, των τμημάτων του καλουπιού, της διαδικασίας συναρμολόγησης του και του τρόπου λειτουργίας του.



Σχήμα 6.7: Στάδια διαμόρφωσης τεμαχίου Cam plate

6.2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΟΔΙΑΜΟΡΦΩΜΑΤΩΝ

Το δεύτερο καλούπι σχεδιάστηκε ώστε η διαμόρφωση του τεμαχίου να επιτυγχάνεται μετά από τρία στάδια διαμόρφωσης. Για το σκοπό αυτό έγινε η σχεδίαση τις επιθυμητής μορφής των προδιαμορφωμάτων των ενδιάμεσων σταδίων, τα οποία θα πραγματοποιούνται πριν τη τελική κατεργασία. Τα προδιαμορφώματα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.8. Τα προδιαμορφώματα που σχεδιάστηκαν είναι ελαφρός μεγαλύτερου όγκου (συνεπώς και ο όγκος κατεργασίας των μητρών που προκύπτουν από αυτά) από τον όγκο της μπιγέτας. Αυτό έγινε για να αποφευχθούν οι υψηλές πίεσης λόγω πλήρωσης των μητρών και να επιτραπεί η πιο ελεύθερη ροή του υλικού μέσα σε αυτές.

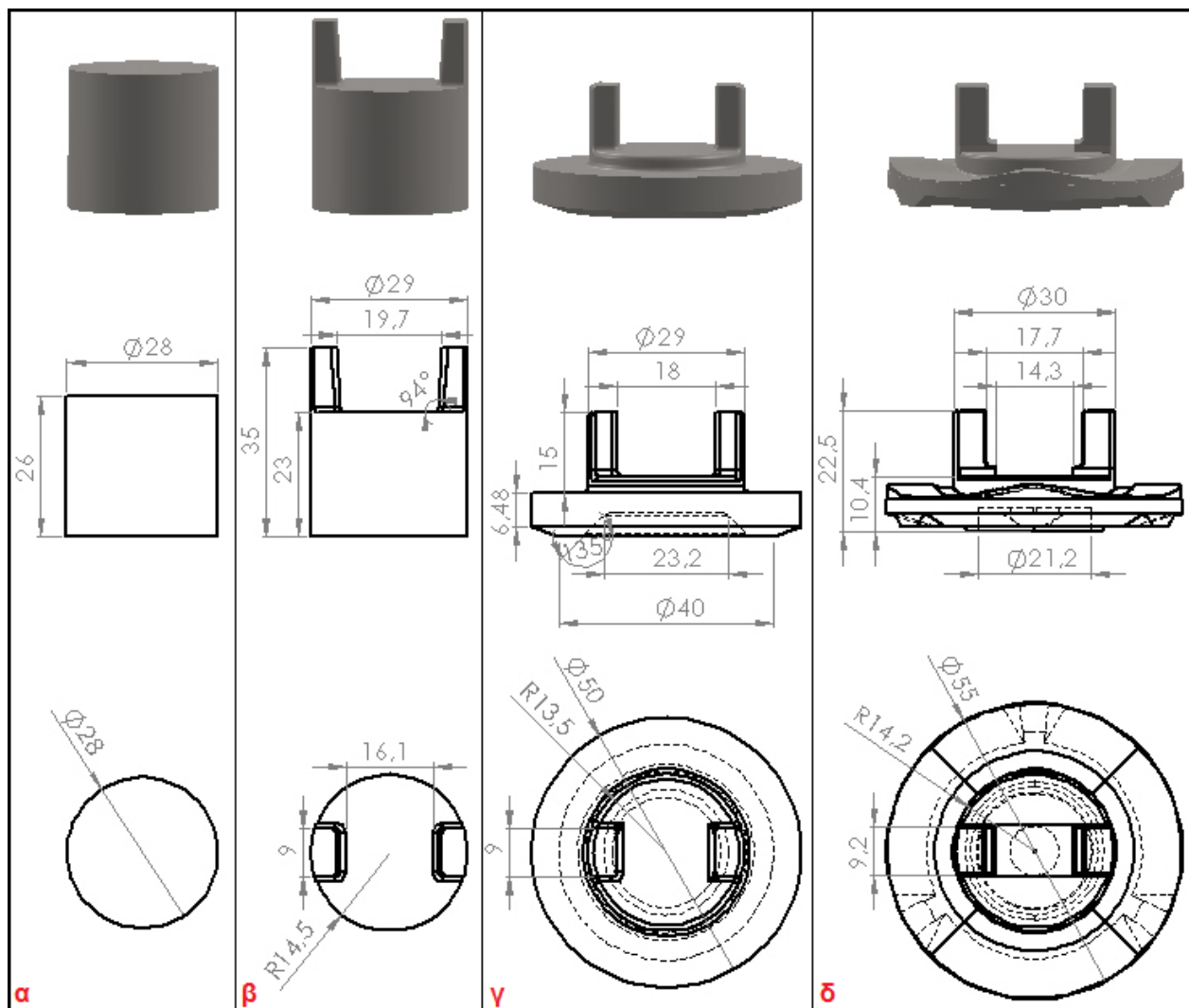
Για τη διαμόρφωση σε τρία στάδια έγινε επιλογή κυλινδρικής μπιγέτας με διαστάσεις R:14 mm h:26 mm (Σχήμα 6.8.α). Η ακτίνα ορίστηκε στα 14 mm έτσι ώστε να είναι ελαφρώς μικρότερη της εξωτερικής ακτίνας των νεύρων. Η ακτίνα των νεύρων του τεμαχίου είναι 15 mm (Σχήμα 6.8.δ), ενώ στο πρώτο και δεύτερο στάδιο προδιαμόρφωσης επιλέχτηκε στα 14,5 mm (Σχήματα 6.8.β και 6.8.γ).

Στο πρώτο στάδιο γίνεται βασική διαμόρφωση των νεύρων (Σχήμα 6.8.β). Λόγο της δυσαναλογίας πάχους-ύψους τα νεύρα σχεδιάστηκαν με εσωτερική κλίση 4° μοιρών έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη ροή του υλικού. Επίσης όλες οι διαστάσεις των νεύρων (πλάτος ύψος, εξωτερική ακτίνα) είναι ελαφρώς μικρότερες από τις διαστάσεις των νεύρων του τελικού τεμαχίου, για να αποφευχθούν προβλήματα τοποθέτησης του προδιαμορφώματος στα απόμεινα στάδια.

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται βασική διαμόρφωση της κάτω κοιλότητα και του εξωτερικού κυλίνδρου (Σχήμα.6.8.γ). Στο στάδιο αυτό, η κάτω κοιλότητα διαμορφώνεται κωνικά (και όχι κυλινδρικά) για καλύτερη ροή του υλικού. Οι διαστάσεις του εξωτερικού κυλίνδρου (ακτίνας/ύψους) ορίστηκαν με

τρόπο ώστε κατά το τρίτο (τελευταίο στάδιο) της διαμόρφωσης το άνω τμήμα της μήτρας να έρχεται πρώτα σε επαφή με τα λιγότερα σημαντικά (ως προς τις απαιτήσεις της ποιότητας επιφάνειας) μέρη, όπως είναι η επιφάνεια μεταξύ των δύο νεύρων και το αυλάκι λίπανσης.

Στο τρίτο στάδιο (τελικό) γίνεται η διαμόρφωση της κυματοειδούς επιφάνειας καθώς και ο σχηματισμός όλων των λεπτομερειών του τεμαχίου.



Σχήμα 6.8: Στάδια προδιαμόρφωσης. α)μπιγέτα, β) πρώτο στάδιο, γ)δεύτερο στάδιο, δ) τρίτο στάδιο

Μετά τη σχεδίαση των προδιαμορφωμάτων, η οποία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Solidworks, ακολουθήθηκαν τα βήματα του Υποκεφάλαιο 5.5 για κάθε προδιαμόρφωμα, με σκοπό τη δημιουργία των μητρών του πρώτου και δεύτερου σταδίου του καλουπιού σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης. Τα τμήματα αυτά των μητρών φαίνονται στο Σχήμα 6.9 (αριθμοί 3, 4, 9 και 10) και οι γεωμετρίες τους παρουσιάζονται στο παράρτημα Β.2 (σκαριφήματα 3,4,9,10).

6.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

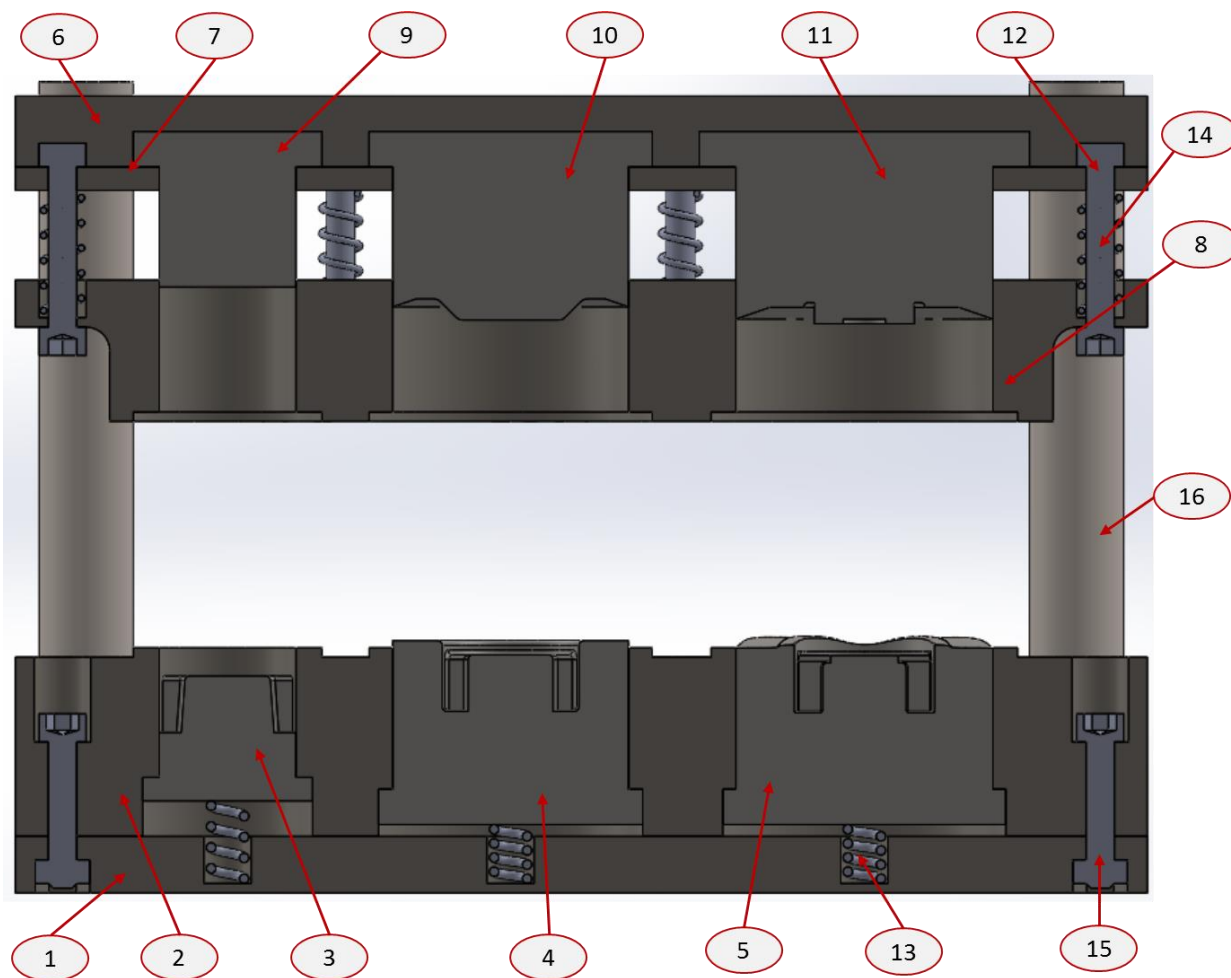
Στο καλούπι τριών σταδίων διαμόρφωσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9, πέραν της μήτρας της τελικής διαμόρφωσης όπως αυτή σχεδιάστηκε στο Υποκεφάλαιο 5.5, χρησιμοποιήθηκαν και οι μήτρες των προδιαμορφωμάτων όπως αυτά σχεδιάστηκαν στη προηγούμενη ενότητα (Υποκεφάλαιο 6.2.1). Όπως και στο προηγούμενο καλούπι, το συνολικό καλούπι χωρίζεται στα κάτω τμήματα και άνω τμήματα. Τα κάτω τμήματα εφαρμόζονται στο τραπέζι της μηχανής πρέσας και τα άνω τμήματα στο έμβολο της πρέσας. (Οι παρακάτω αριθμοί στις παρενθέσεις είναι οι αντίστοιχοι του Σχήματος 6.9 και του Πίνακα 6.2)

Τα βασικά τμήματα διαμόρφωσης του τεμαχίου είναι οι “Κάτω μήτρες” (3,4,5) και “Άνω μήτρες” (9,10,11) των τριών σταδίων διαμόρφωσης. Για πρακτικούς λόγους, δηλαδή για καλύτερη τοποθέτηση της μπιγέτας από το ένα στάδιο στο άλλο, οι μήτρες που διαμορφώνουν τα νεύρα τοποθετήθηκαν στα κάτω τμήματα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τρία “ελατήρια επαναφοράς” (13) τα οποία επαναφέρουν τις “κάτω μήτρες” (3,4,5) στην αρχική τους θέση, έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η απομάκρυνση του τεμαχίου από αυτές.

Τα τμήματα “κάτω εξωτερική μήτρα” (2) και “άνω εξωτερική μήτρα” (8) επίσης είναι βασικά τμήματα διαμόρφωσης καθώς αυτά δημιουργούν τη κλειστή μήτρα ακρίβειας και στα τρία στάδια διαμόρφωσης. Με τη επαφή (ένωση) των δύο αυτών τμημάτων περιορίζεται η ροή του υλικού στο οριζόντιο επίπεδο και διαμορφώνεται ο εξωτερικό κύλινδρο του τεμαχίου. Ο διαχωρισμός σε δύο τμήματα της εξωτερικής μήτρα είναι αναγκαίος για την αποφυγή εγκλωβισμού του τεμαχίου στη μήτρα και την αποφυγή των πολύ μικρού πάχους επιφανειών της μήτρας κατά το τρίτο στάδιο διαμόρφωσης. Με τη βοήθεια των “κοχλιών συγκράτησης” (12) και των “ελατηρίων ρύθμισης” (14), η “άνω εξωτερική μήτρα” (10) έρχεται σε επαφή με τη “κάτω εξωτερική μήτρα” πριν ξεκινήσει ουσιαστικά η κατεργασία της μπιγέτας και των προδιαμορφωμάτων σε όλα τα στάδια κατεργασίας.

Τα υπόλοιπα τμήματα χρησιμοποιούνται για την συγκράτηση των μητρών και τη σωστή τοποθέτηση τους. Η “κάτω εξωτερική πλάκα” (1) είναι το τμήμα που εφαρμόζεται στη τράπεζα της πρέσας και λειτουργεί ως βάση των κάτω μητρών (2,3,4,5) καθώς και των “ελατηρίων επαναφοράς” (13) όπου υπάρχει χώρος για τη συμπίεση των ελατηρίων. Η “άνω εξωτερική πλάκα” (6) είναι το τμήμα που εφαρμόζεται στο έμβολο της πρέσας και λειτουργεί ως βάση των άνω μητρών (9,10,11). Η “άνω πλάκα συγκράτησης” (7) συγκρατεί τις “άνω μήτρες” (9,10,11) καθώς και τους κοχλίες συγκράτησης της “άνω εξωτερικής μήτρας” (8). Οι υπόλοιποι κοχλίες (15) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των τμημάτων με τη βοήθεια περικοχλίων. Τέλος οι “ράβδοι οδηγό” (16) χρησιμεύουν στη ρύθμιση των θέσεων των άνω και κάτω τμημάτων έτσι ώστε οι θέσεις αυτών να είναι στο ίδιο κάθετο επίπεδο και να μην υπάρχουν αποκλίσεις κατά τη σφυρηλάτηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE



Σχήμα 6.9: Εγκάρσια τομή καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης

Πίνακας 6.2: Αρίθμηση των τμημάτων καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης

A/A	Περιγραφή	τεμάχια
1	Κάτω εξωτερική πλάκα	1
2	Κάτω εξωτερική μήτρα	1
3	Κάτω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου	1
4	Κάτω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου	1
5	Κάτω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου	1
6	Άνω εξωτερική πλάκα	1
7	Άνω πλάκα συγκράτησης	1
8	Άνω εξωτερική μήτρα	1
9	Άνω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου	1
10	Άνω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου	4
11	Άνω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου	4
12	Κοχλίας συγκράτησης M6 μεγάλος	6
13	Ελατήριο επαναφοράς	3
14	Ελατήριο ρύθμισης	6
15	Κοχλίας συγκράτησης M6 μικρός	12
16	Οδηγός - ράβδος	4

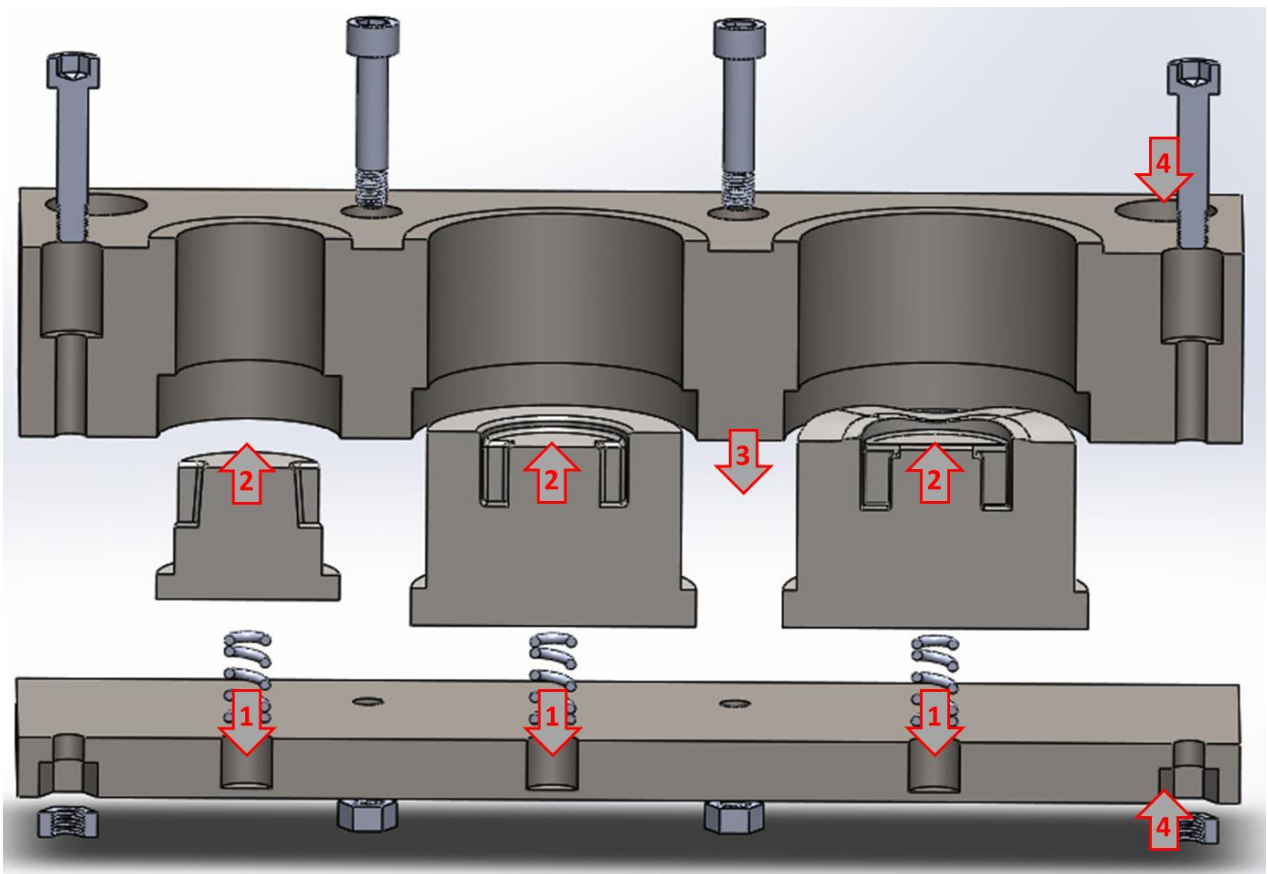
Η γεωμετρία των στοιχείων του καλουπιού παραθέτετε αναλυτικά στο Παράρτημα Γ.2.

6.2.3 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Το καλούπι είναι χωρισμένο στα άνω τμήματα (που δένουν στο έμβολο στη πρέσα) και στα κάτω τμήματα (που δένουν στο τραπέζι της πρέσας) και τα οποία συναρμολογούνται ξεχωριστά και στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους με τους “ράβδους οδηγούς”.

Συναρμολόγηση κάτω τμημάτων

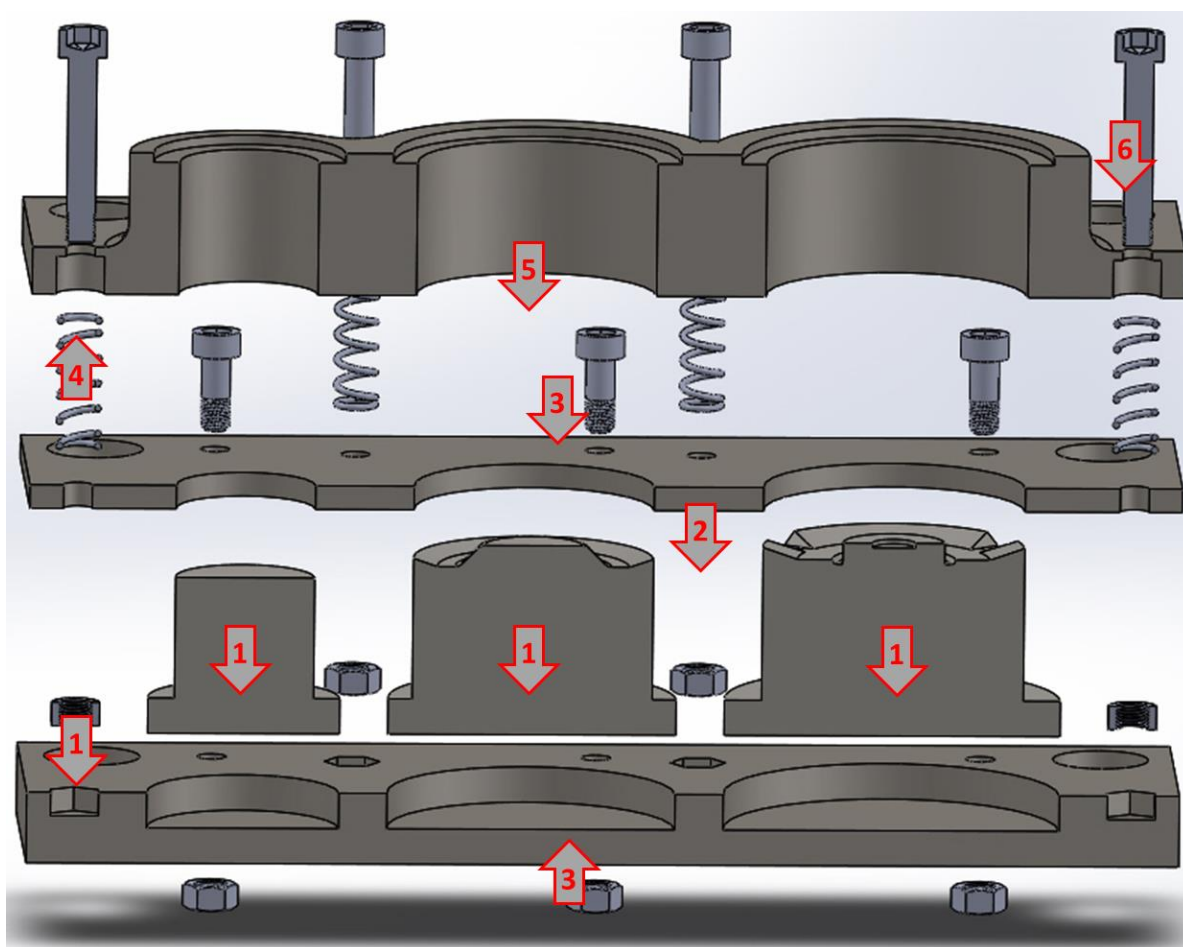
Πρώτο βήμα είναι η τοποθέτηση των τριών “ελατήριων επαναφοράς” στους διαμορφωμένους χώρους που υπάρχουν στη “κάτω εξωτερική πλάκα”. Δεύτερο βήμα είναι η τοποθέτηση των τριών “Κάτω μητρών” στη “κάτω εξωτερική μήτρα” και στη συνέχεια (τρίτο βήμα) εφαρμόζεται η “εξωτερική μήτρα” πάνω στην “εξωτερική πλάκα”. Τέταρτο βήμα είναι η τοποθέτηση των έξι “κοχλίας συγκράτησης” και των περικοχλίων για τη συγκράτηση όλων των τμημάτων.



Σχήμα 6.10: Βήματα συναρμολόγησης κάτω τμημάτων καλουπιού τριών σταδίων

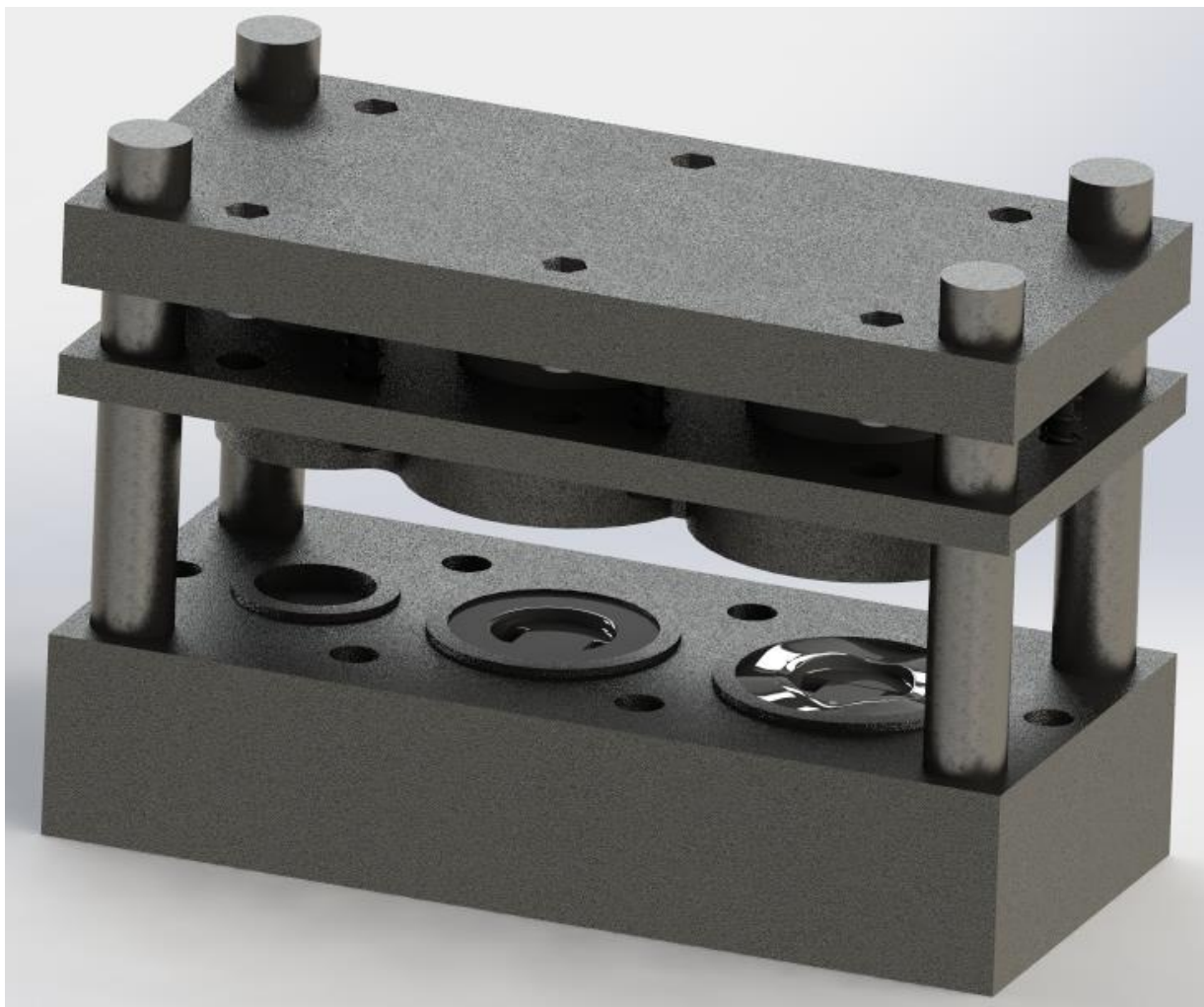
Συναρμολόγηση άνω τμημάτων

Πρώτο βήμα είναι η τοποθέτηση των τριών “άνω μητρών” του κάθε σταδίου στην “άνω εξωτερική πλάκα” και των έξι περικοχλίων (στα οποία θα βιδωθούν οι μεγάλοι κοχλίες στο έκτο βήμα). Δεύτερο βήμα είναι η εφαρμογή της “άνω πλάκας συγκράτησης” πάνω στην “εξωτερική πλάκα”. Τρίτο βήμα είναι η τοποθέτηση των έξι “μικρών κοχλιών” και των περικοχλίων για τη συγκράτηση των τμημάτων του πρώτου και δεύτερου βήματος. Τέταρτο βήμα είναι η τοποθέτηση των έξι “ελατηρίων ρύθμισης” στους διαμορφωμένους χώρους της “άνω εξωτερικής μήτρας” και στη συνέχεια (πέμπτο βήμα) εφαρμόζεται η “εξωτερική μήτρα”, με οδηγούς τις “άνω μήτρες”. Τέλος έκτο βήμα είναι η τοποθέτηση των έξι “μεγάλων κοχλιών” οι οποίοι περνούν μέσα από τα “ελατήρια ρύθμισης” και συγκρατούν την “άνω εξωτερική μήτρα”.



Σχήμα 6.11: Βήματα συναρμολόγησης άνω τμημάτων καλουπιού τριών σταδίων

Σημειώνεται ότι για τη σωστή τοποθέτηση και το περιορισμό της περιστροφής των “κάτω μητρών”, και των “άνω μητρών” των τριών σταδίων κατά το οριζόντιο επίπεδο, υπάρχει ιδική διαμόρφωση στη θέση συναρμογής τους με τη “κάτω εσωτερική πλάκα” και την “άνω εξωτερική πλάκα” αντίστοιχα.



Σχήμα 6.12: Τρισδιάστατη όψη καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης

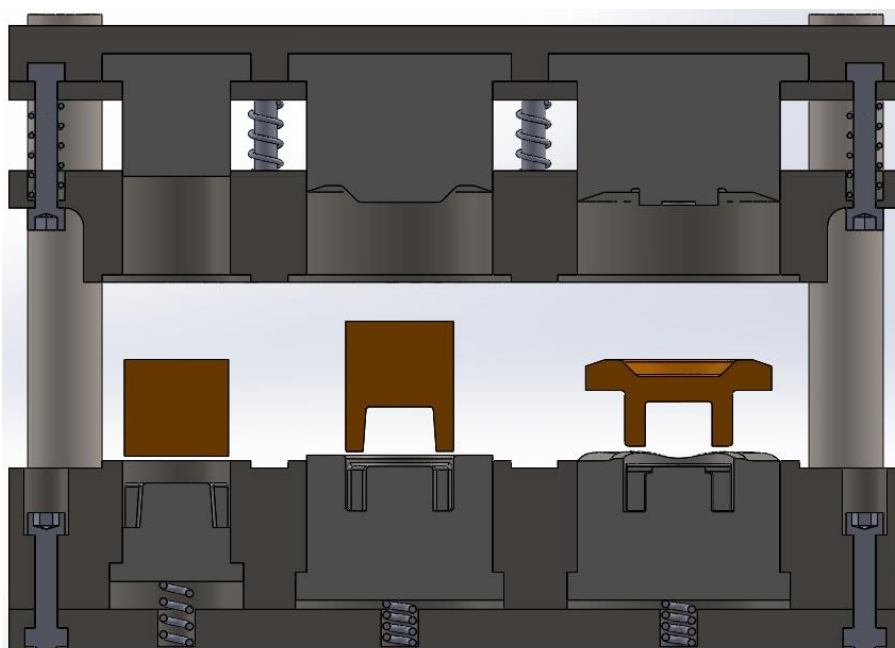
6.2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στη παράγραφο αυτή γίνεται περιγραφή της λειτουργία του καλουπιού για τη καλύτερη κατανόηση της λογικής σχεδίασης του. Η λειτουργία του καλουπιού μπορεί να χωριστεί στις φάσεις που βρίσκονται τα κινούμενα τμήμα του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

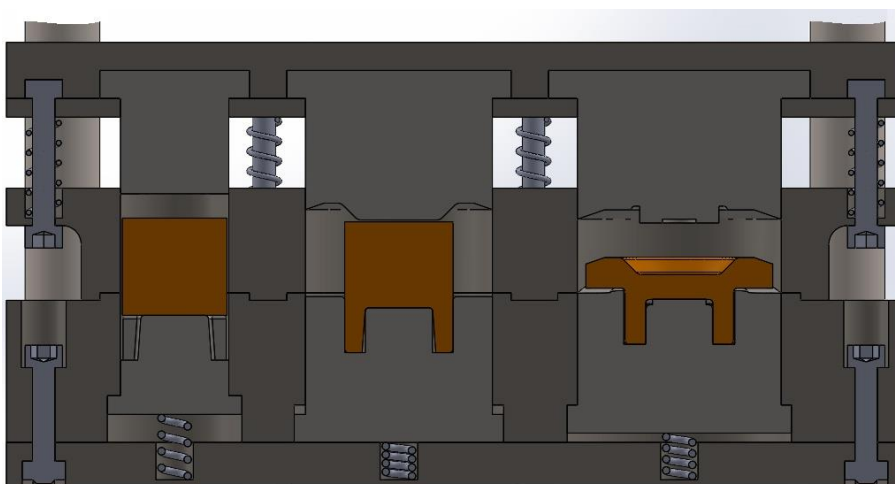
Η πρώτη φάση είναι όταν τα “*άνω τμήματα*” του καλουπιού βρίσκονται σε μια ικανοποιητική απόσταση έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η τοποθέτηση της μπιγέτας στο κέντρο της κάτω μήτρας του πρώτου σταδίου, αλλά και η μεταφορά της από το ένα στάδιο στο άλλο (Σχήμα 6.13). Οι θέσεις των μητρών των τριών σταδίων τοποθετήθηκαν στη σειρά έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος μεταφοράς του κατεργαζόμενου τεμαχίου από το ένα στάδιο στο άλλο. Αφού τεθεί σε λειτουργία η πρέσα, η δεύτερη φάση είναι η επαφή της “*άνω εξωτερικής μήτρας*” με τη “*κάτω εξωτερική μήτρα*” (Σχήμα 6.14). Η Τρίτη σημαντική φάση είναι όταν οι άνω μήτρες έρχονται σε επαφή με τη μπιγέτα και ξεκινά η σφυρηλάτηση. Όπως είναι λογικό η φάση έναρξης κατεργασίας είναι διαφορετική (διαφορετικό ύψος) σε κάθε στάδιο (Σχήμα 6.15). Τέταρτη φάση είναι η μέγιστη μετατόπιση της “*άνω μήτρας*” όπου γίνεται η τελική διαμόρφωση. Για πρακτικούς λόγους η θέση των μητρών σε

αυτή τη φάση ρυθμίστηκε να είναι στο ίδιο επίπεδο σε όλα τα στάδια ώστε η πρέσα να ακολουθεί την ίδια διαδρομή και στα τρία στάδια κατεργασίας(Σχήμα 6.16). Τέλος η επαναφορά των άνω τμημάτων στην αρχική τους θέση και η εξαγωγή του τεμαχίου από τις μήτρες (Σχήμα 6.17).

Τα “ελατήρια επαναφοράς” που χρησιμοποιήθηκαν είναι για να επαναφέρουν τις κάτω μήτρες σε ένα ικανοποιητικό ύψος ώστε να γίνεται η εύκολη απομάκρυνση του κατεργαζόμενου τεμαχίου από τις μήτρες. Σε αντίθεση με το ελατήριο πίεσεως που χρησιμοποιήθηκε στο καλούπι ενός σταδίου διαμόρφωσης, η επίδραση των ελατηρίων επαναφοράς κατά τη διαμόρφωση θεωρήθηκε αμελητέα. Επίσης το ύψος επαναφοράς τις κάθε μήτρα ρυθμίστηκε ώστε να αποφεύγεται η σύγκρουση της πάνω μήτρας με τη κάτω μήτρα στη περίπτωση που δεν υπάρχει τεμάχιο προς κατεργασία στις μήτρες.

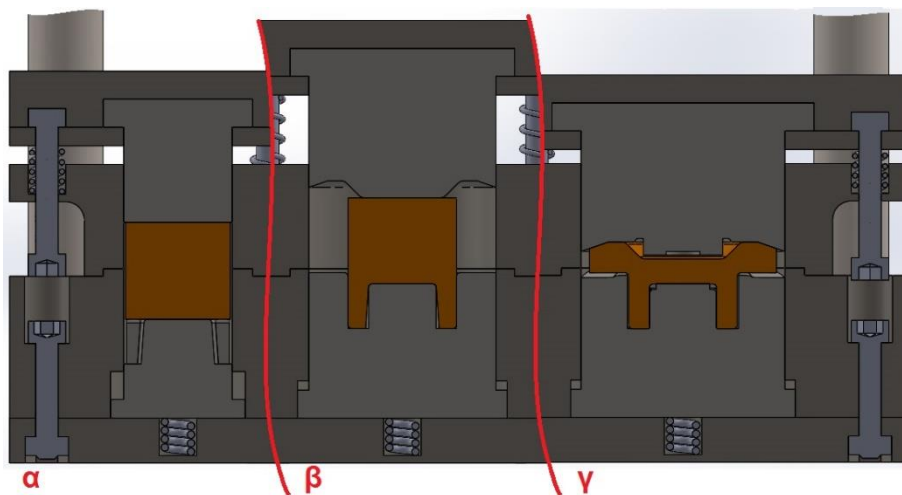


Σχήμα 6.13: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση τοποθέτησης μπιγέτας και προδιαμορφωμάτων

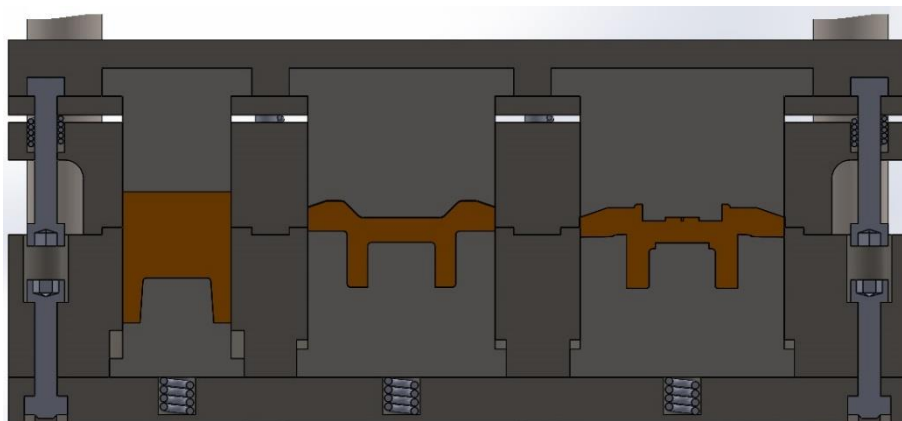


Σχήμα 6.14: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση εφαρμογής της άνω εξωτερικής μήτρας

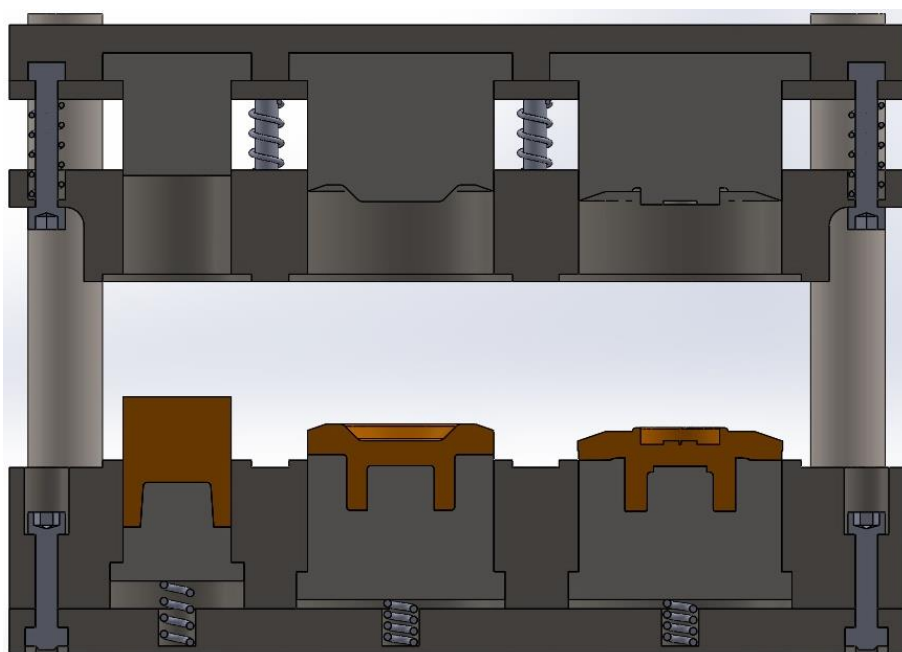
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE



Σχήμα 6.15: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση έναρξης σφυρηλάτησης α) 1^{ου} σταδίου, β) 2^{ου} σταδίου, γ) 3^{ου} σταδίου



Σχήμα 6.16: Καλούπι τριών σταδίων. Τέλος διαδρομής της πρέσας- ολική διαμόρφωση



Σχήμα 6.17: Καλούπι τριών σταδίων. Φάση εξόδου τεμαχίου- τέλος κατεργασίας

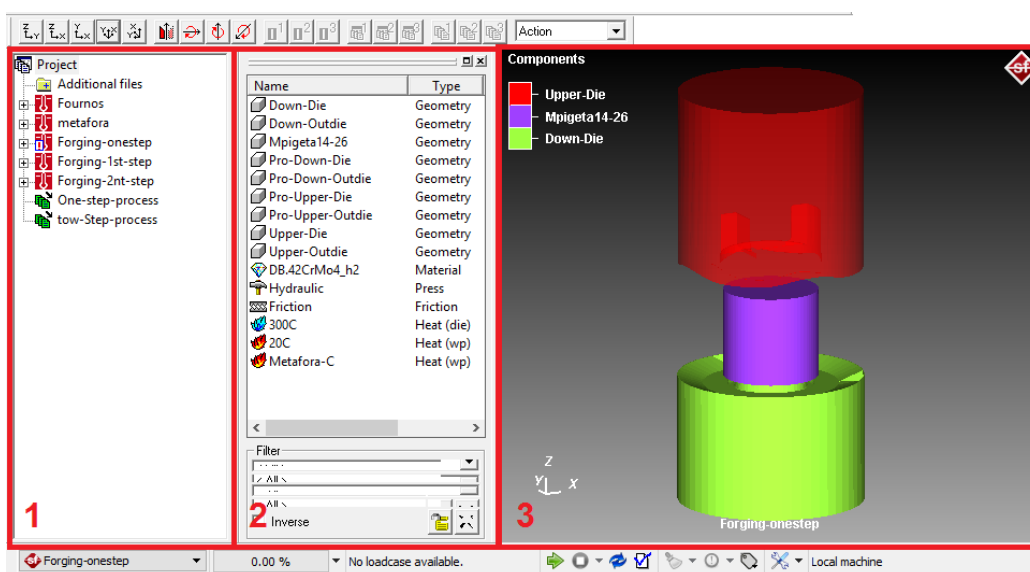
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE

7.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIMUFACT.FORMING

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μελέτη (προσομοίωση) της κατασκευής του τεμαχίου Cam plate με τους δύο τρόπους σφυρηλάτησης ακριβείας όπως αυτοί αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 6. Η προσομοίωση είναι μέρος της διαδικασίας του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού και αποσκοπεί στην εξαγωγή αποτελεσμάτων (δυνάμεις, παραμορφώσεις, τάσεις, θερμοκρασίες κλπ.) για τη συμπεριφορά του κατεργαζόμενου τεμαχίου και των καλουπιών κατά τη κατεργασία. Στην εργασία αυτή ο βασικός στόχος των προσομοιώσεων είναι να μελετηθεί κατά πόσο τα καλούπια που σχεδιάστηκαν είναι λειτουργικά και μπορούν να διαμορφώσουν το τεμάχιο. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SimuFact.forming (Υποκεφάλαιο 4.3.5).

Το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού χωρίζεται σε τρεις ενότητες:

- **“Process tree window”**: όπου παρουσιάζονται οι κατεργασίες που θα γίνουν, έχοντας τη δυνατότητα να τις τοποθετήσουμε με την σειρά που θα γίνουν, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου της κατεργασίας. Επίσης, γίνεται και ρύθμιση της θέσης των καλουπιών, του τεμαχίου καθώς και της μηχανής κατεργασίας στο χώρο.
- **“Inventory window”**: όπου τοποθετούνται τα δεδομένα (γεωμετρία τεμαχίου-καλουπιών, θερμοκρασίες, υλικό, είδος μηχανής κλπ.) της κατεργασίας τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.
- **“Model view window”**: όπου οπτικοποιείται η διαδικασία συναρμολόγησης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (δυνάμεις, θερμοκρασίες, τάσεις κλπ.) της προσομοιωμένα.



Σχήμα 7.1: Ενότητες του κεντρικού Παραθύρου του προγράμματος SimuFact.forming: 1) Process tree window, 2) Inventory window, 3) Model view window

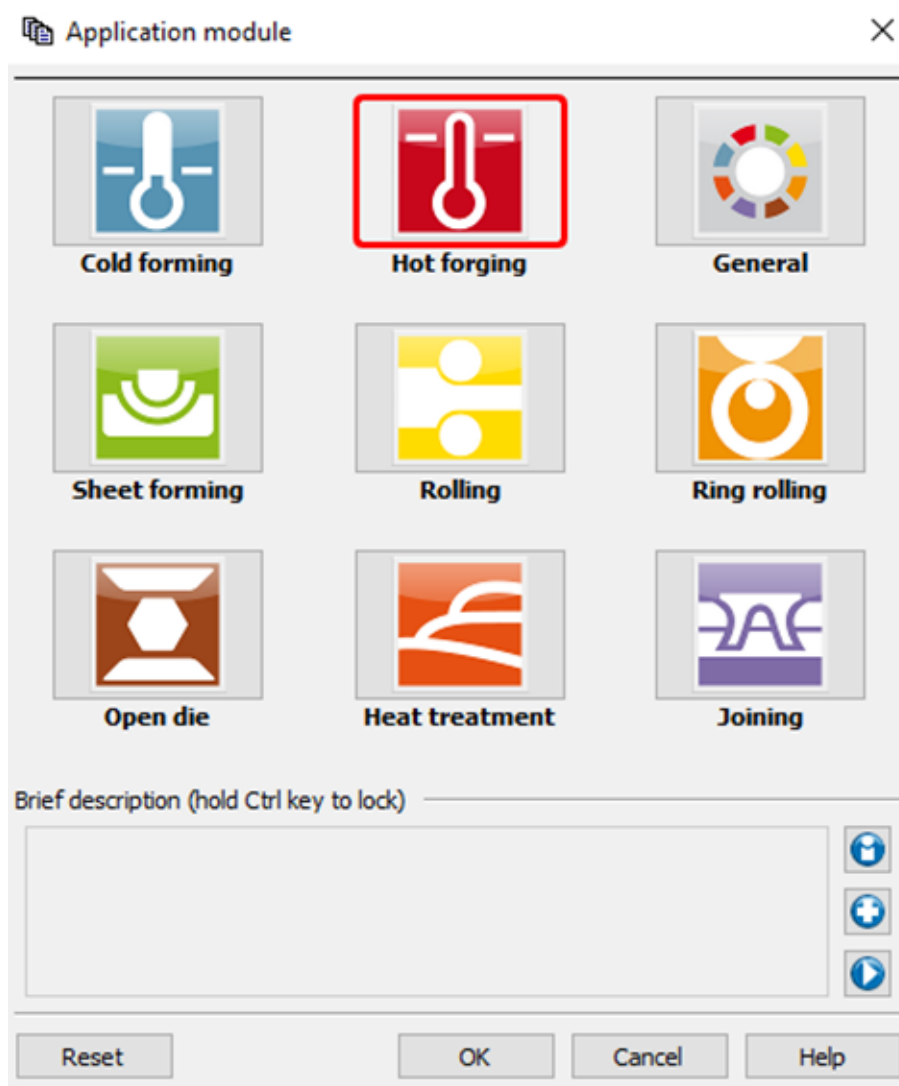
Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης στο λογισμικό Simufact.forming πρέπει πρώτα να γίνει επιλογή της κατεργασίας μέσα από το “Process tree window” (Σχήμα 7.1.(1)), και των δεδομένων της κατεργασίας (γεωμετρίες, θερμοκρασίες, υλικά κλπ) μέσα από το “Inventory window” (Σχήμα 7.1.(2)).

Κατεργασίες:

Οι τύποι διεργασιών που έγιναν κατά τη προσομοίωση είναι:

- Ψύξη της μπιγέτας κατά τη μεταφορά στις μήτρες (cooling)
- Σφυρηλάτηση για τη διαμόρφωση (forging)

Οι διεργασίες που έγιναν για τη διαμόρφωση του τεμαχίου με τους δυο τρόπους σφυρηλάτησης περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους 7.4 και 7.5.



Σχήμα 7.2: Βασικό παράθυρο κατεργασιών που προσφέρει το λογισμικό SimuFact.forming

7.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εισαγωγή των παραμέτρων της κατεργασίας γίνεται μέσα από το “Inventory window”.

7.2.1 ΑΡΧΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟ – ΜΠΙΓΕΤΑ

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων η μπιγέτα επιλέχθηκε να είναι κύλινδρος καθώς και το προς κατασκευή αντικείμενο είναι κυλινδρικής μορφής. Λόγω των διαφορετικών φάσεων που υπάρχουν στους δύο τρόπους σφυρηλάτησης (Κεφάλαιο 6), έγινε διαφορετική επιλογή μπιγέτας στον κάθε τρόπο, για την καλύτερη δυνατή ροή του υλικού στις μήτρες. Στη πρώτη περίπτωση καλουπιού η επιλογή των διαστάσεων της μπιγέτας επιλέχθηκε με βάση τις βασικές διαστάσεις του τελικού τεμαχίου, ενώ για τη κατεργασία σε τρία στάδια η επιλογή της μπιγέτας επιλέχθηκε με βάση της γεωμετρίας της διαμόρφωσης του πρώτου σταδίου (Υποκεφάλαιο 6.2.1)

- Μπιγέτα ενός σταδίου σφυρηλάτησης: κύλινδρος ακτίνας $R=19,5\text{ mm}$ και ύψους $H=13,4\text{ mm}$.

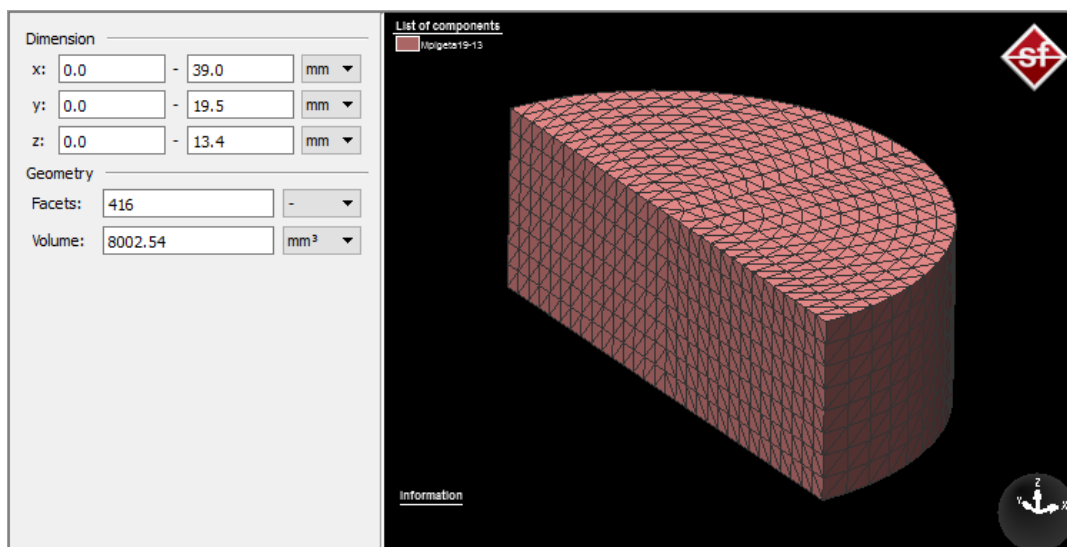
- Μπιγέτα τριών σταδίων σφυρηλάτησης: κύλινδρος ακτίνας $R=14\text{ mm}$ και ύψους $H=26\text{ mm}$.

Το τεμάχιο είναι συμμετρικό κατά $\frac{1}{2}$ έτσι η προσομοίωση έγινε με το $\frac{1}{2}$ των μπιγετών.

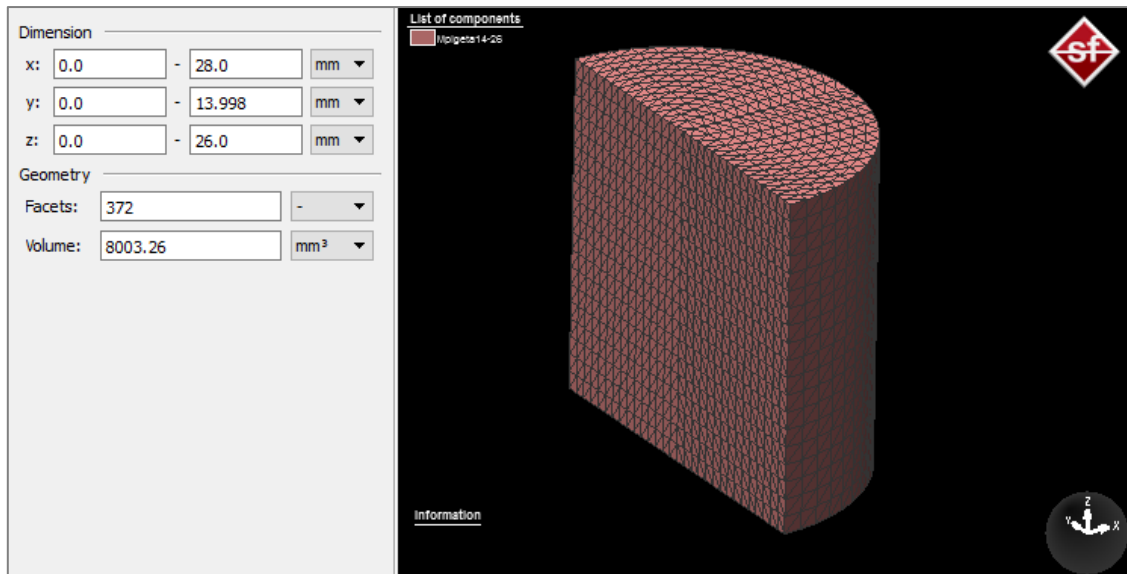
Πίνακας 7.1: Γεωμετρικά στοιχεία τελικού τεμαχίου και μπιγέτας

	Διάμετρος(mm)	Ύψος (mm)	Όγκος (mm ³)	Όγκος $\frac{1}{2}$ (mm ³)
Τεμάχιο Cam plate	55 (μέγιστη)	22,47 (μέγιστο)	16 013	8006,5
Μπιγέτα 1^{ος} σταδίου	39	13,4	16 007	8003,5
Μπιγέτα 3^{ων} σταδίων	28	26	16010	8005,0

Η εισαγωγή της γεωμετρίας των μπιγετών έγινε μέσα από τα σχήματα που προσφέρει το λογισμικό (Geometry→ Autoshape→ cylinder (180 °))



Σχήμα 7.3: Εισαγωγή μπιγέτα στη προσομοίωση της σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης

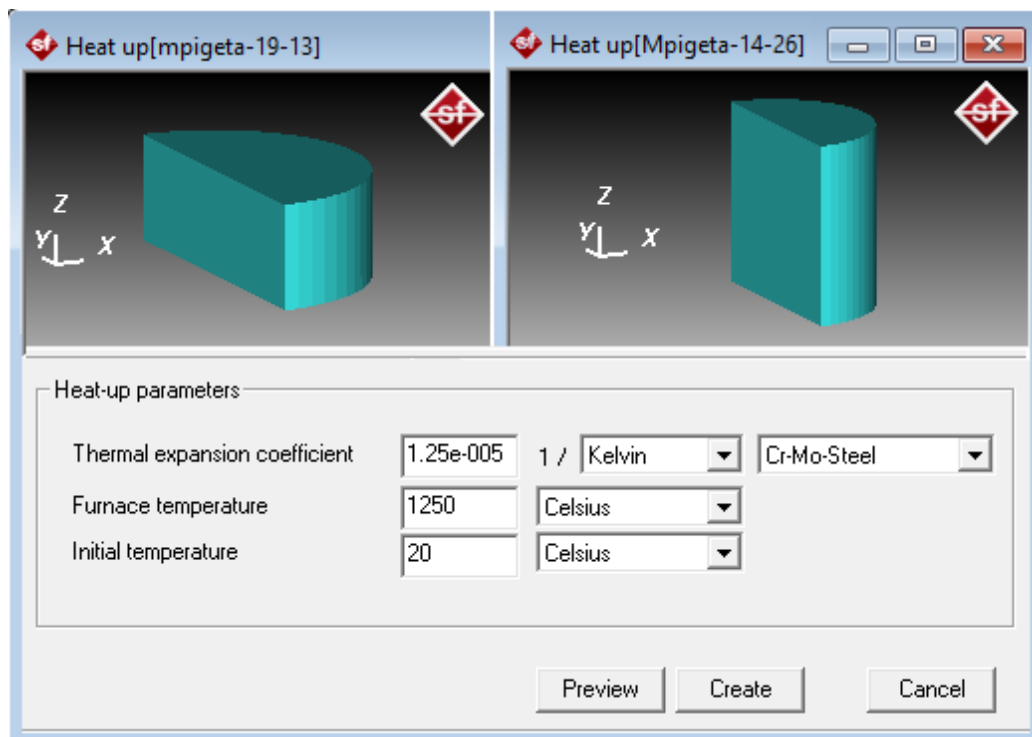


Σχήμα 7.4: Εισαγωγή μπιγέτας στη προσομοίωση της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης

Επειδή η κατεργασία που πραγματοποιήθηκε είναι θερμής σφυρηλάτησης, θεωρήθηκε ότι οι μπιγέτες προθερμάνθηκαν ομοιόμορφα σε φούρνο από τους 20 °C στους 1250 °C. Η προθέρμανση των μπιγетών έγινε ως εξής:

δεξί κλικ πάνω στο αρχείο των μπιγетών → Head up

Με την εντολή αυτή δημιουργούνται νέα αρχεία των μπιγетών (διογκωμένες μπιγέτες λόγω θέρμανσης) και είναι αυτά που χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση.

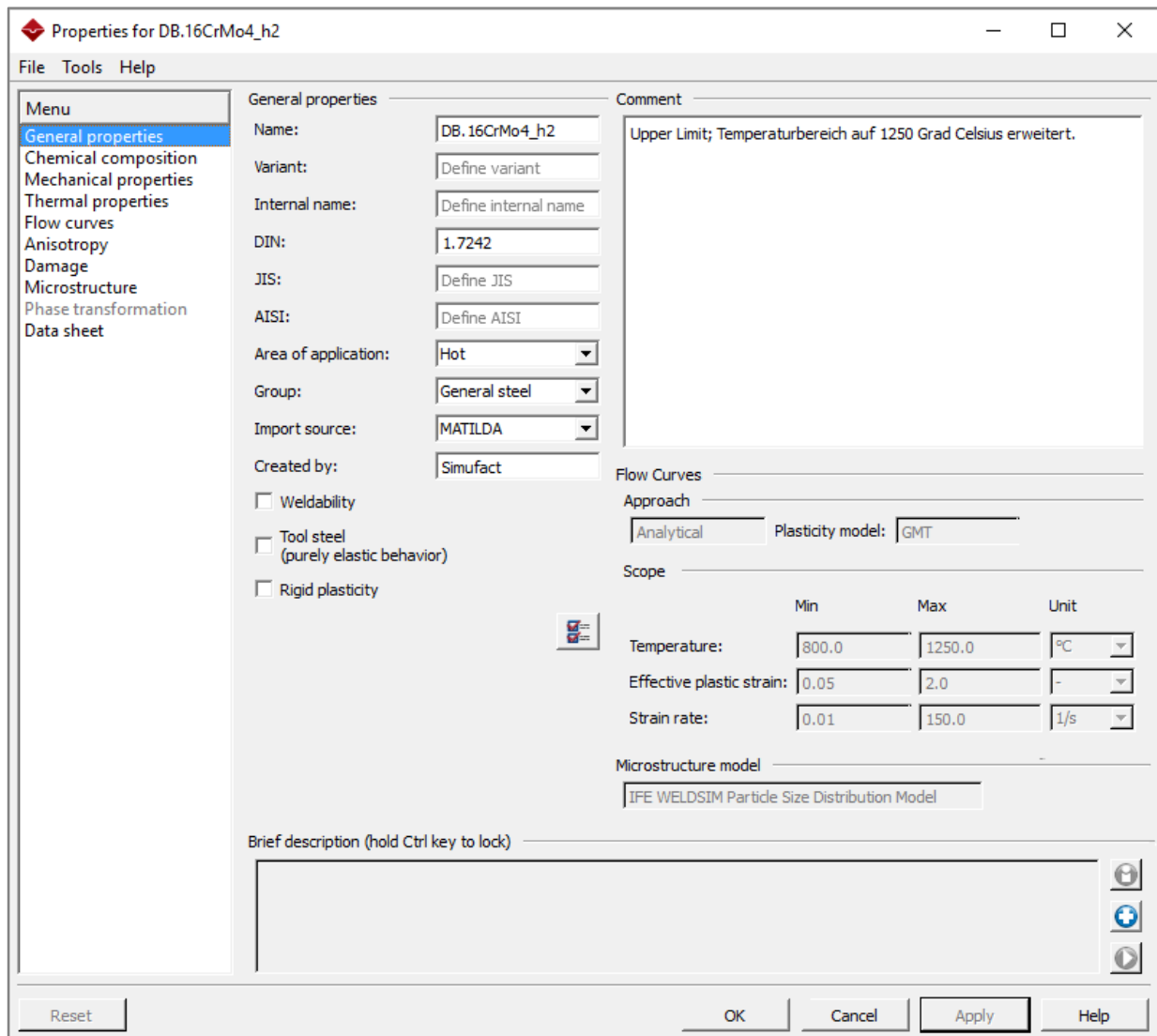


Σχήμα 7.5: Εντολή προθέρμανσης μπιγетών του λογισμικού

7.2.2 ΥΛΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

Το υλικό που επιλέξαμε είναι από τη λίστα των υλικών που προσφέρει το λογισμικό και είναι κράμα χάλυβα που χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συγκεκριμένα, το υλικό είναι 42CrMo4 (DIN1.7225) και η πλήρης περιγραφή του παρατίθεται στο Παράρτημα Β.1. Η εισαγωγή έγινε με:

Δεξί κλικ → Material → Library → General steel → 42CrMo4-h2

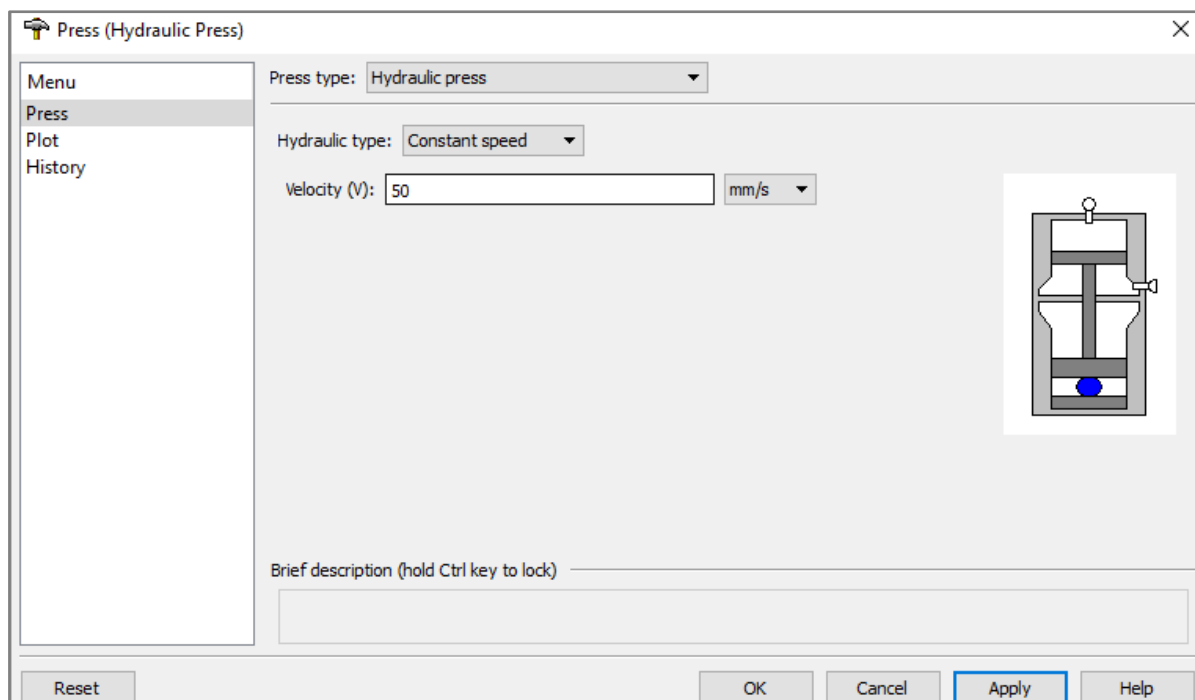


Σχήμα 7.6: Γενική περιγραφή του υλικού 42CrMo4 όπως διατίθεται από το SimuFact.material

7.2.3 ΜΗΧΑΝΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Η επιλογή της μηχανής κατεργασίας είναι υδραυλική πρέσα. Η ταχύτητα της υδραυλικής πρέσας για κατεργασία σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας κυμαίνεται από 2 έως 50 mm/s [52]. Για τη προσομοίωση επιλέχθηκε σταθερή ταχύτητα κατεργασίας 50 mm/s (Σχήμα 7.7).

Δεξί κλικ → Press → Manual

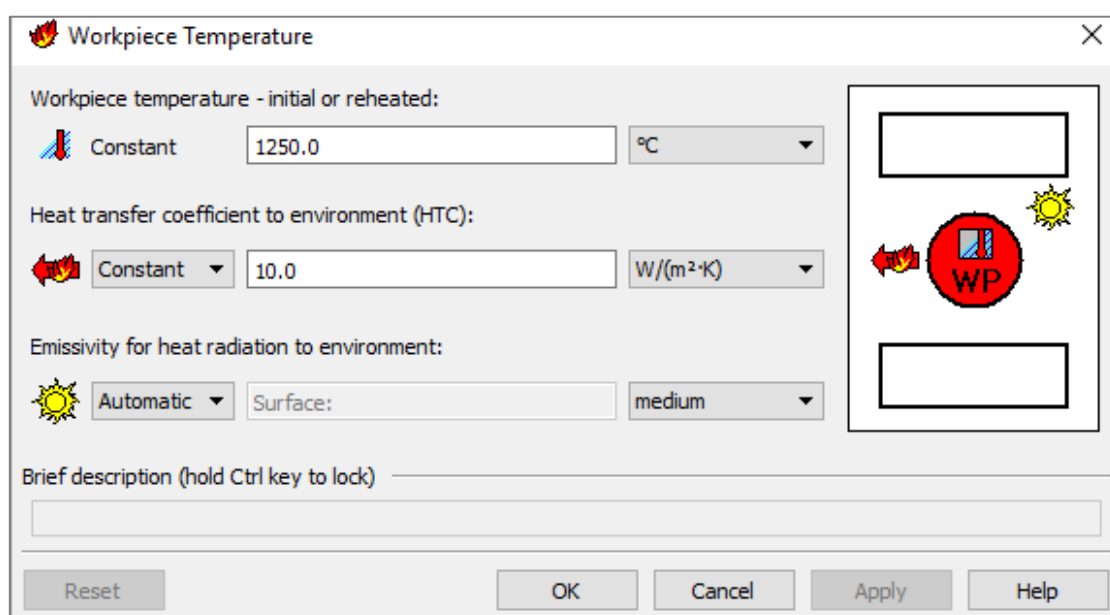


Σχήμα 7.7: Παράθυρο επιλογής πρέσας κατεργασίας και ρύθμισης των χαρακτηριστικών της

7.2.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΠΙΓΕΤΑΣ

Για την πραγματοποίηση των διεργασιών είναι απαραίτητο να καθοριστεί η αρχική θερμοκρασία και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των μπιγетών. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του τεμαχίου προς το περιβάλλον (αέρας) ορίστηκε προσεγγιστικά $10 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Δεξί κλικ → Heat → Workpiece → Manual

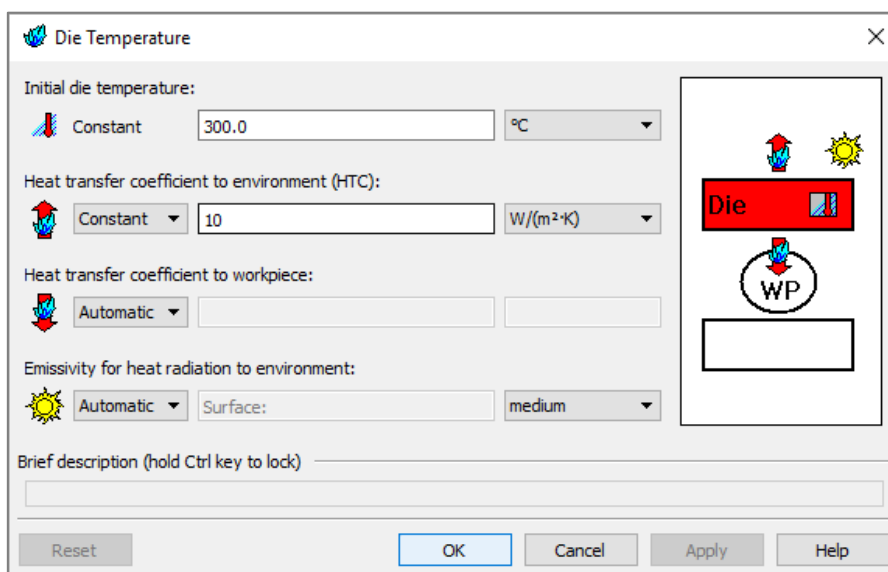


Σχήμα 7.8: Παράθυρο ρύθμισης θερμοκρασίας και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του τεμαχίου

7.2.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΗΤΡΑΣ

Οι μήτρα και στους δύο τρόπους σφυρηλάτησης θεωρήθηκε ότι προθερμάνθηκαν στους 300 °C για την αποφυγή της γρήγορης ψύξης του τεμαχίου. Επίσης, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τη μήτρα στο περιβάλλον θεωρήθηκε ίσος με 10 W/m²K (Σχήμα 7.9). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μήτρας και κατεργαζόμενου τεμαχίου καθορίζεται αυτόματα από το λογισμικό βάσει των χαρακτηριστικών του τεμαχίου (υλικό και γεωμετρία) και της πίεσης που δέχεται.

Δεξί κλικ → Heat → Die → Manual

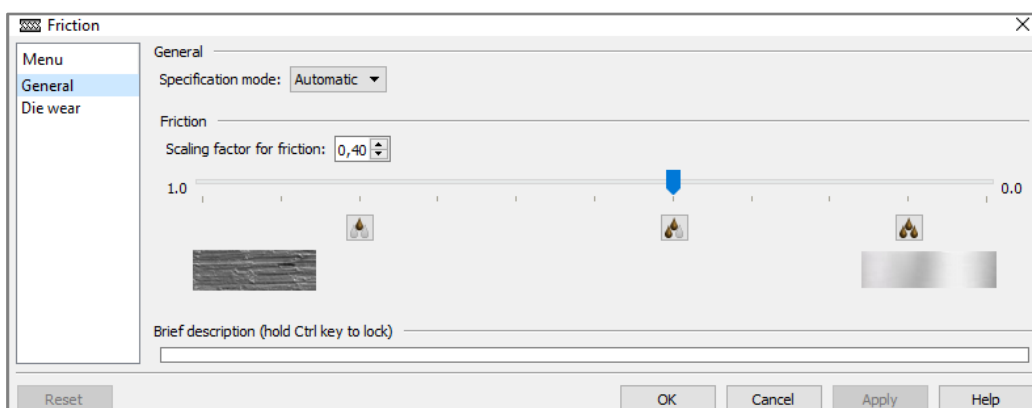


Σχήμα 7.9: Παράθυρο ρύθμισης θερμοκρασίας και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της μήτρας

7.2.6 ΛΙΠΑΝΣΗ ΜΗΤΡΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για τη λίπανση της μήτρας ορίστηκε λιπαντικό μέσο με συντελεστή τριβής 0,4 που είναι μια συνήθης τιμή στη λίπανση καλουπιών θερμής σφυρηλάτησης [53]. Η εισαγωγή έγινε ως εξής:

Δεξί κλικ → Friction → Manual



Σχήμα 7.10: Παράθυρο ρύθμισης του συντελεστή τριβής του λιπαντικού μέσου

7.2.7 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΗΤΡΩΝ

Για τη προσομοίωση της σφυρηλάτησης χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρίες των τμημάτων της μήτρας των δύο καλουπιών όπως σχεδιάστηκαν στο λογισμικό SolidWorks και αποθηκευτήκαν σε αρχείο μορφής STL. Τα τμήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι αυτά που έρχονται σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και παρουσιάζονται στο Πίνακα 7.2 και στα Σχήματα 7.11 - 7.23 . Η εισαγωγή των γεωμετριών έγινε ως εξής:

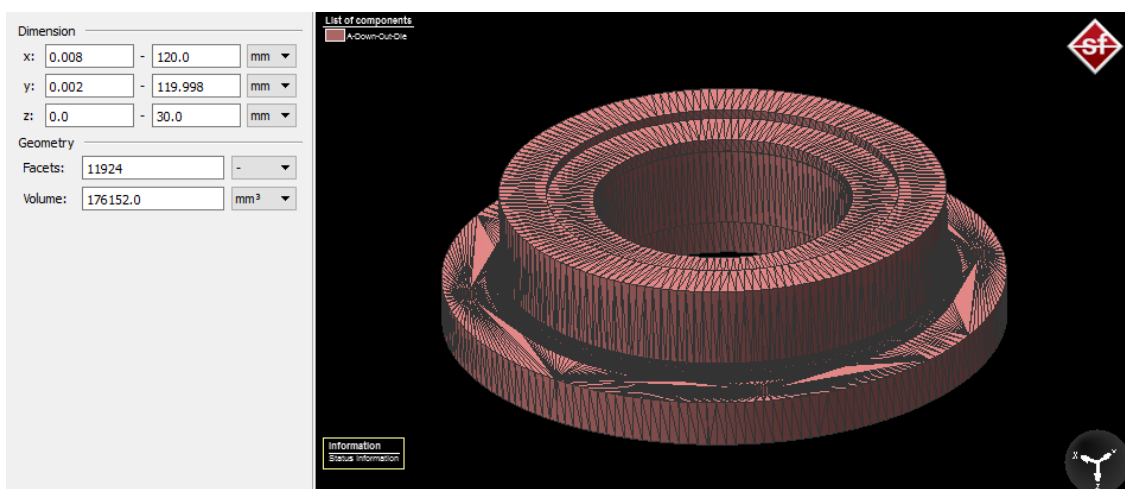
Δεξί κλικ → Geometry → From file

Πίνακας 7.2: Τμήματα καλουπιών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις

	α/α	Περιγραφή	Αρχείο στο λογισμικό
Σφυρηλάτηση Ενός Σταδίου	1	Κάτω εξωτερική μήτρα	A-Down-Out-Die
	2	Κάτω μήτρα- έμβολο	A-Down-Punch
	3	Κάτω εσωτερική μήτρα	A-Down-In-Die
	4	Άνω εσωτερική μήτρα	A-Upper-In-Die
	5	Άνω εξωτερική μήτρα	A-Upper-Out-Die
Σφυρηλάτηση Τριών Σταδίων	6	Κάτω εξωτερική μήτρα	B-Down-Out-Die
	7	Κάτω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου	B-Down-1-Die
	8	Κάτω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου	B-Down-2-Die
	9	Κάτω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου	B-Down-3-Die
	10	Άνω εξωτερική μήτρα	B-Upper-Out-Die
	11	Άνω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου	B-Upper-1-Die
	12	Άνω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου	B-Upper-2-Die
	13	Άνω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου	B-Upper-3-Die

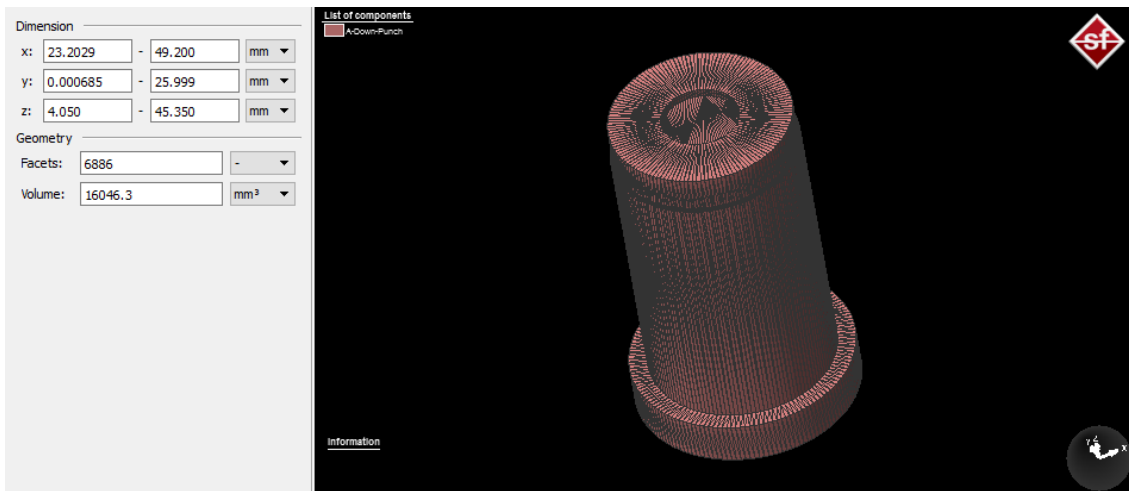
7.2.7.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΗΤΡΑΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στα επόμενα πέντε σχήματα παρουσιάζονται οι γεωμετρίες των τμημάτων της μήτρας του καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης, όπως έγινε η εισαγωγή τους στο λογισμικό.

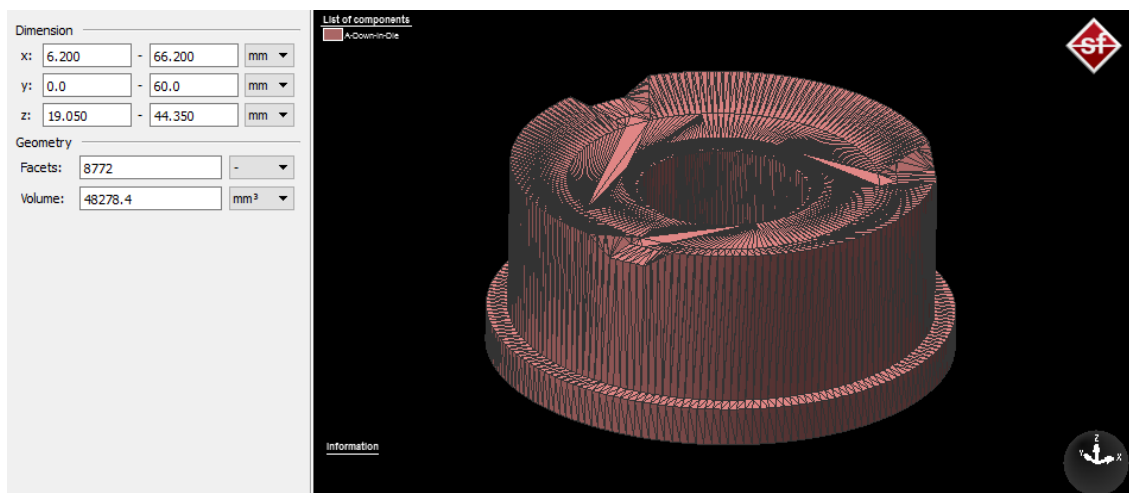


Σχήμα 7.11: Κάτω εξωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης

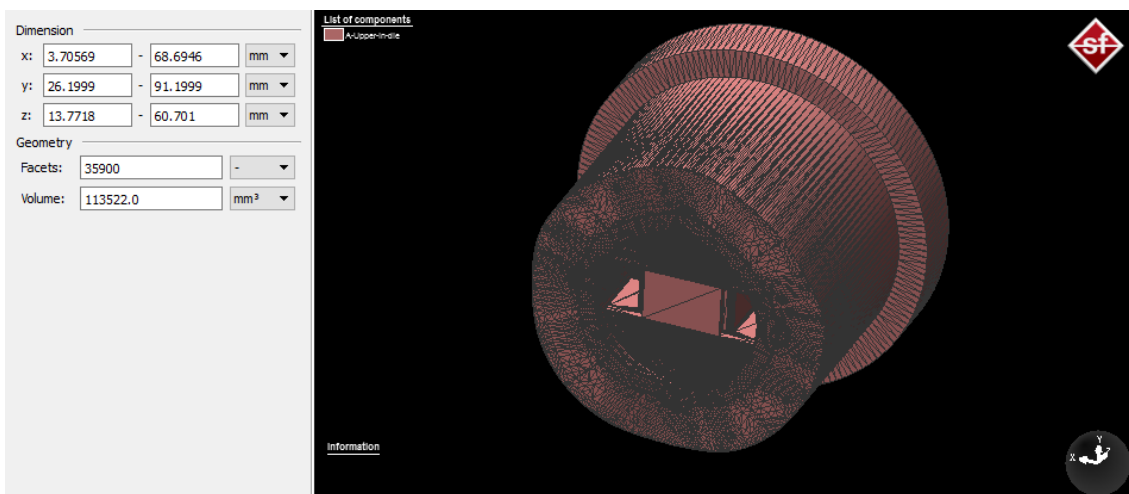
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE



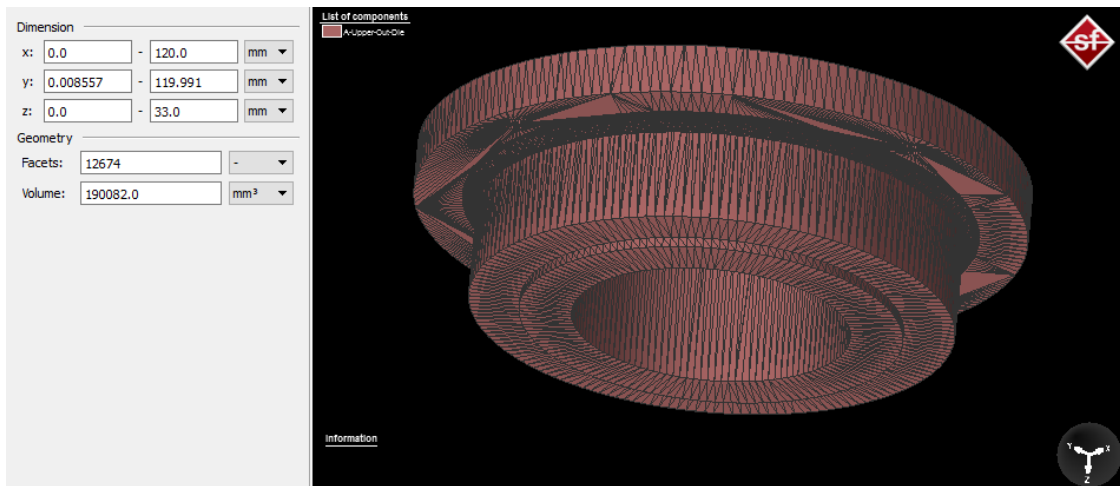
Σχήμα 7.12: Κάτω μήτρα- έμβολο καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης



Σχήμα 7.13: Κάτω εσωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης



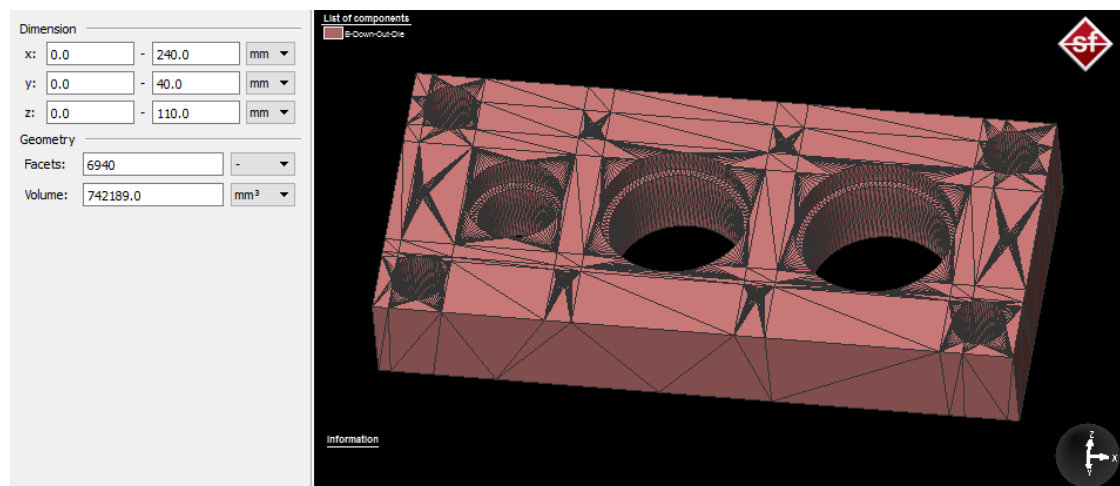
Σχήμα 7.14: Άνω εσωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης



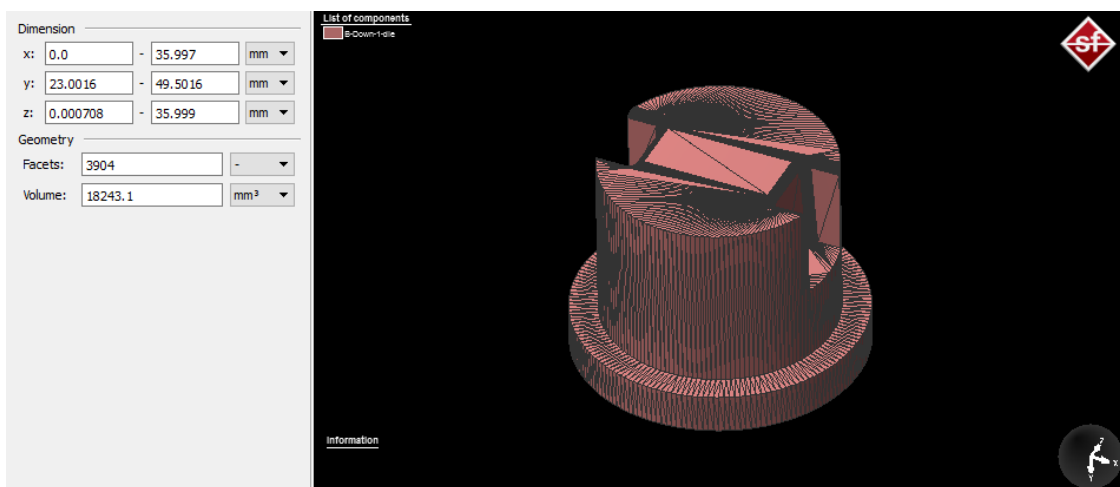
Σχήμα 7.15: Άνω εξωτερική μήτρα καλουπιού ενός σταδίου σφυρηλάτησης

7.2.7.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΗΤΡΑΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στα επόμενα οκτώ σχήματα παρουσιάζονται οι γεωμετρίες των τμημάτων της μήτρας του καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης, όπως έγινε η εισαγωγή τους στο λογισμικό.

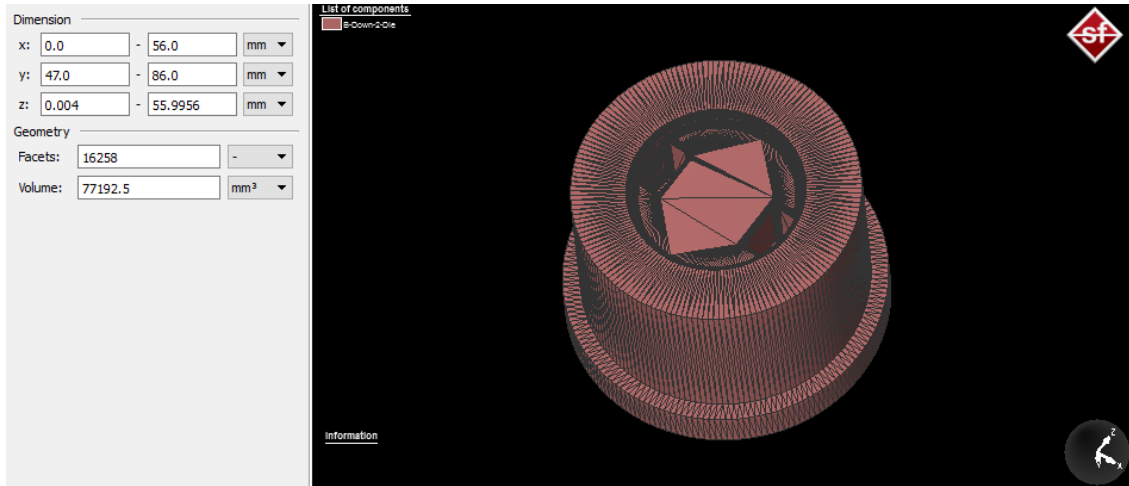


Σχήμα 7.16: Κάτω εξωτερική μήτρα καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης

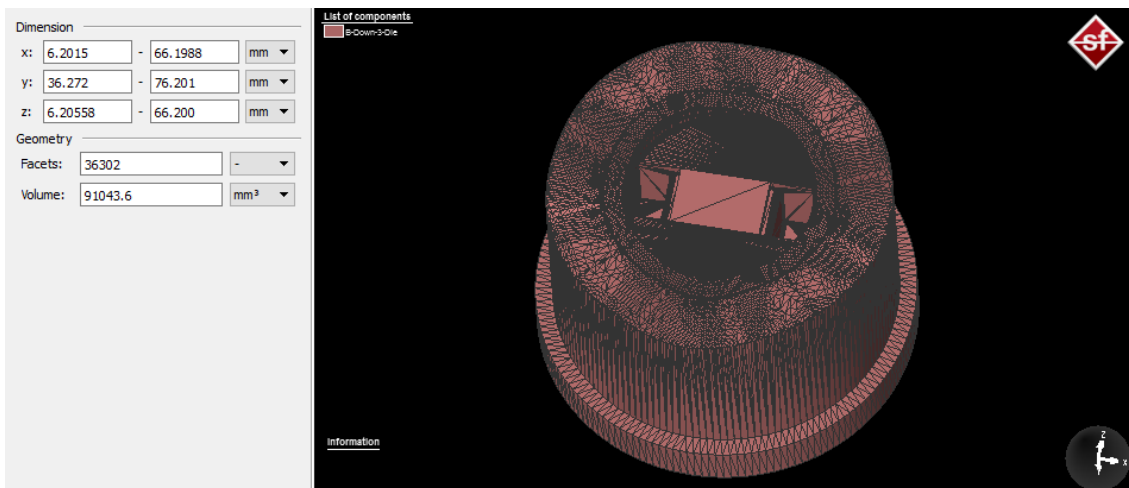


Σχήμα 7.17: Κάτω μήτρα 1^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης

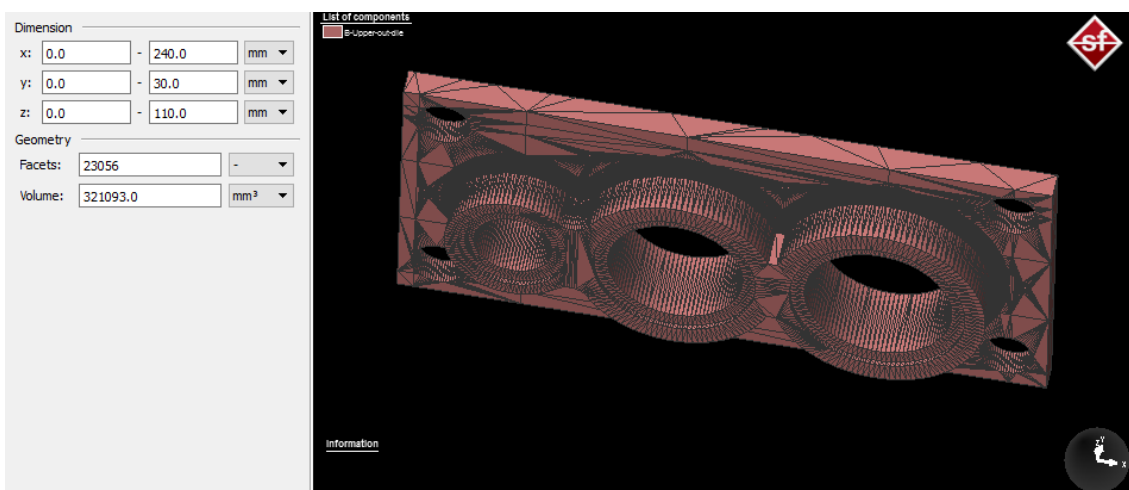
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE



Σχήμα 7.18: Κάτω μήτρα 2^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης

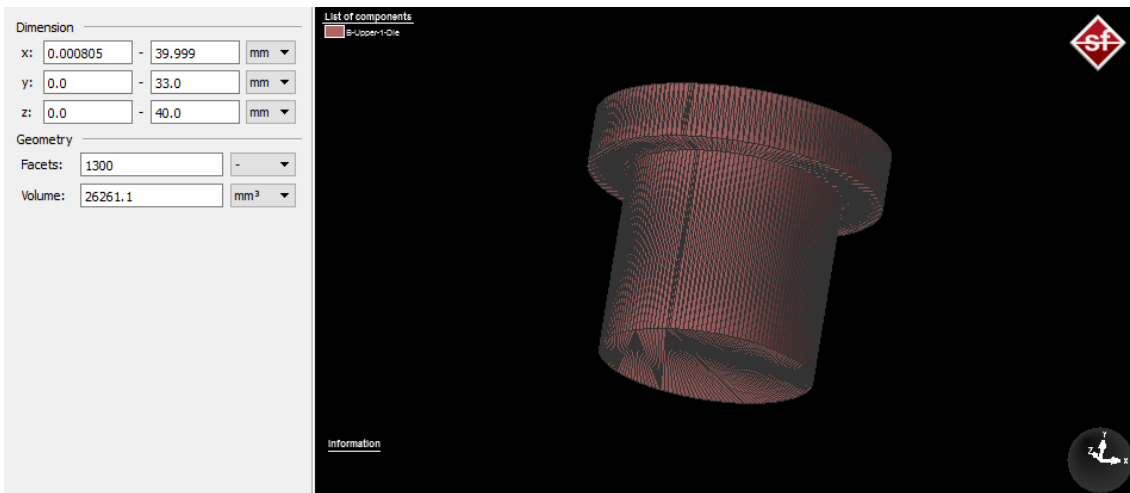


Σχήμα 7.19: Κάτω μήτρα 3^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης

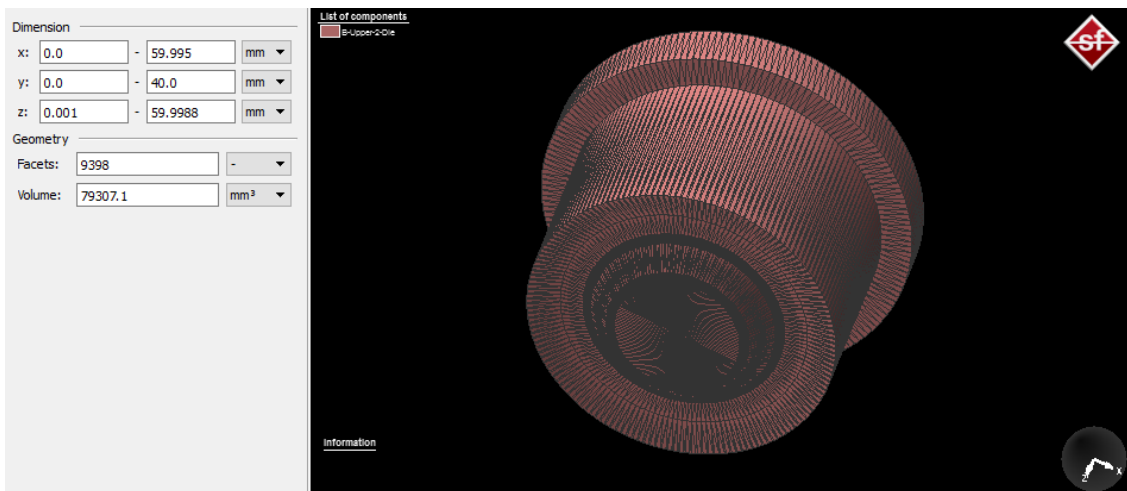


Σχήμα 7.20: Ανω εξωτερική μήτρα καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης

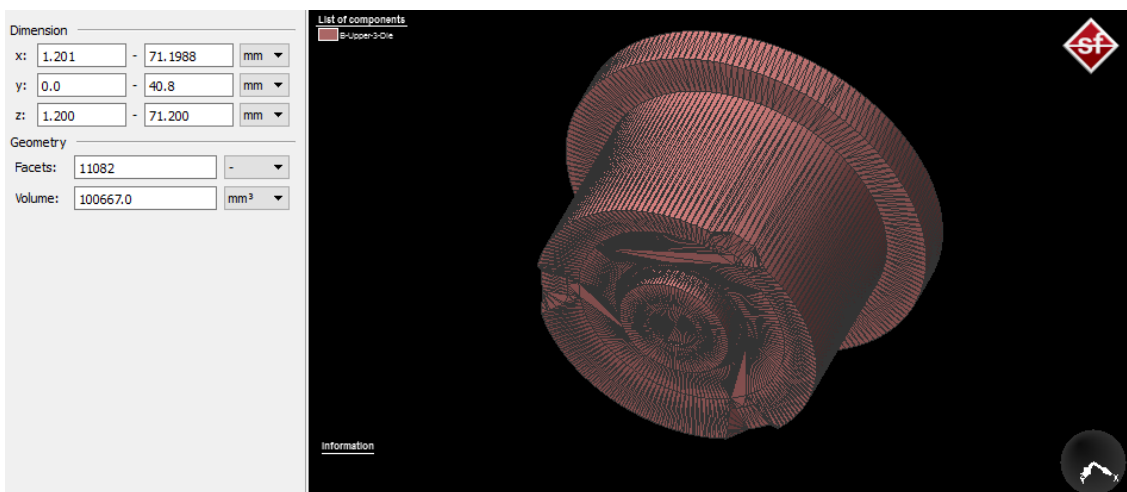
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE



Σχήμα 7.21: Άνω μήτρα 1^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης



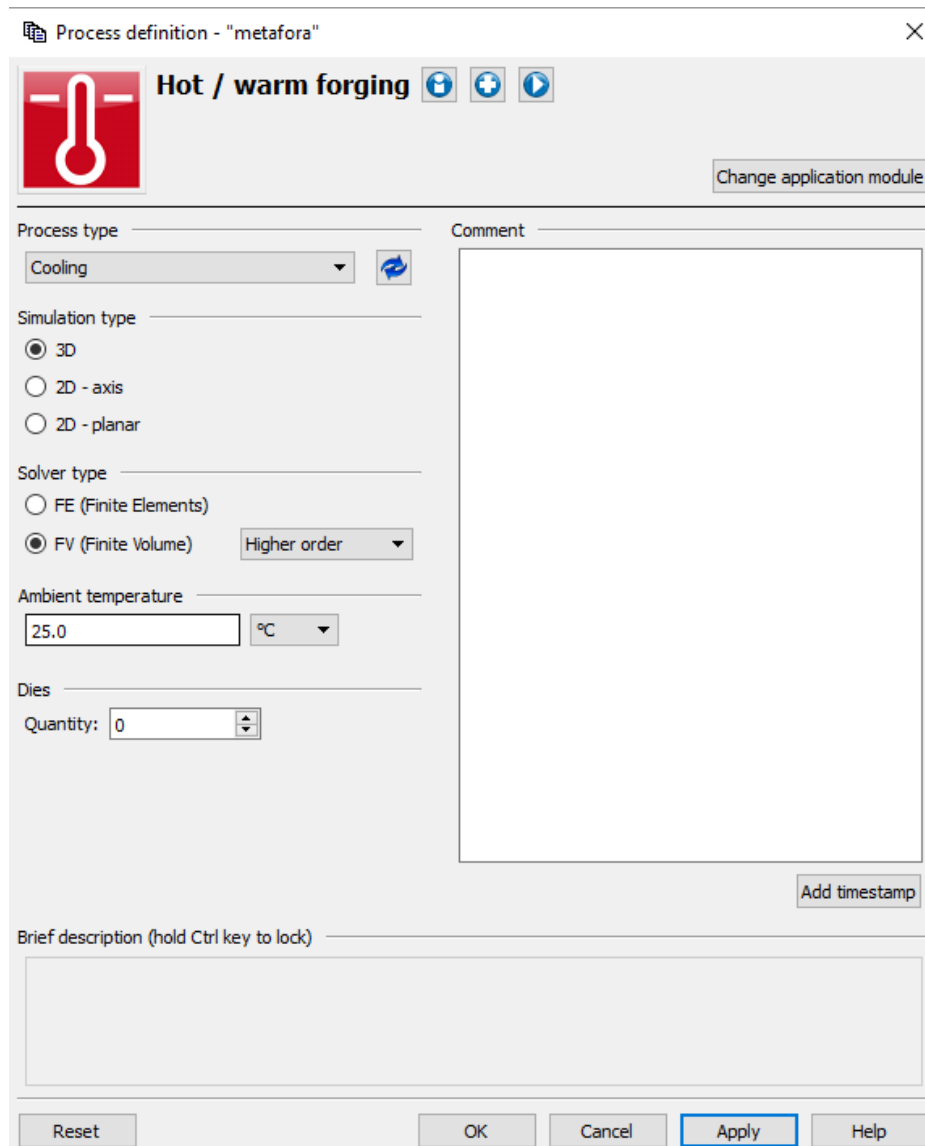
Σχήμα 7.22: Άνω μήτρα 2^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης



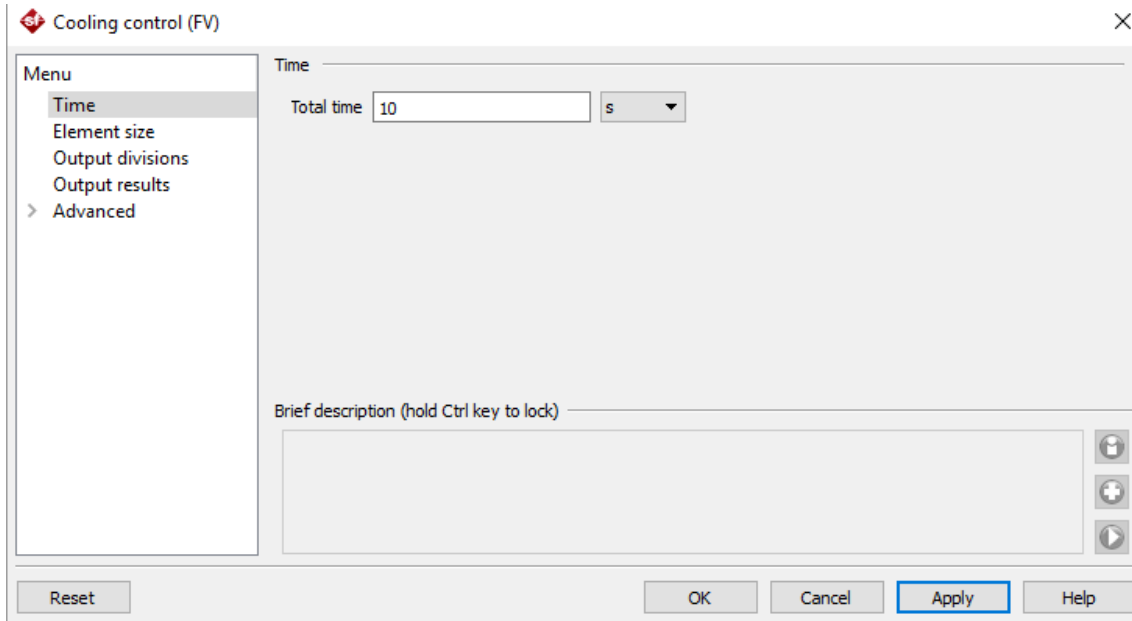
Σχήμα 7.23: Άνω μήτρα 3^{ου} σταδίου καλουπιού τριών σταδίων σφυρηλάτησης

7.3 ΨΥΞΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Πριν την έναρξη της διαδικασίας σφυρηλάτησης, έγινε η προσομοίωση της απώλειας θερμότητας του τεμαχίου κατά τη μεταφορά του από το φούρνο θέρμανσης στη μήτρα σφυρηλάτησης. Αυτό έγινε για να πάρουμε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για τη πραγματοποίηση της διαδικασίας ψύξης γίνεται η επιλογή της διεργασίας “Cooling” από το “Process tree window”. Η θερμοκρασία του περιβάλλον ορίστηκε στους 25 °C (Σχήμα 7.24). Επίσης, ο χρόνος μεταφοράς των αρχικών τεμαχίων από το φούρνο στις μήτρες ορίστηκε ίσος με 10 sec (Σχήμα 7.25).



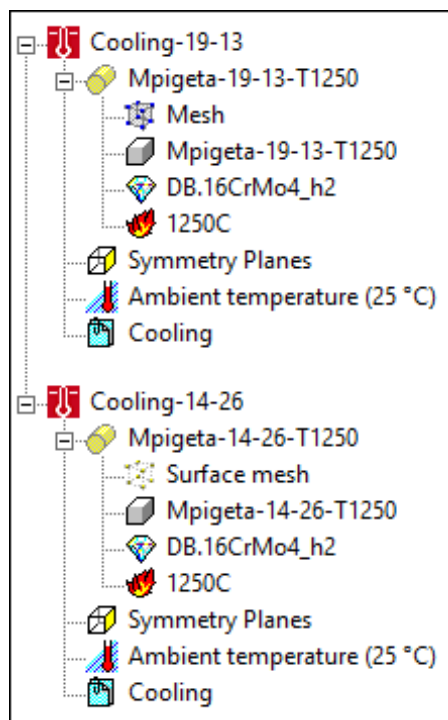
Σχήμα 7.24: Βασικό παράθυρο διαδικασία ψύξης (Cooling) του δοκιμίου στο λογισμικό προσομοίωσης



Σχήμα 7.25: παράθυρο ελέγχου του χρόνου ψύξης

7.3.1 ΔΕΝΤΡΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΨΥΞΗΣ

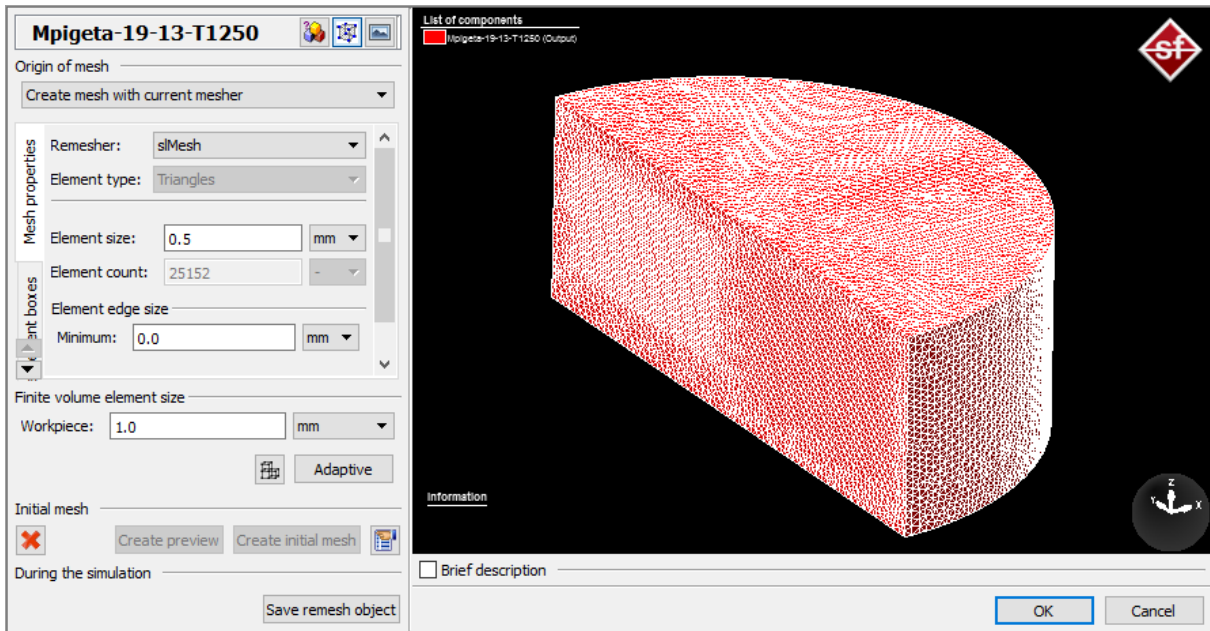
Στο Σχήμα 7.26 παρουσιάζεται το “δέντρο” της διαδικασίας ψύξης των δύο μπιγетών (Colling-19-13 , Colling-14-26). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη ψύξη είναι οι μπιγέτες, το υλικό τεμαχίου και η θερμοκρασία τεμαχίου όπως αυτά αναπτύχθηκαν στο Υποκεφάλαιο 7.2.



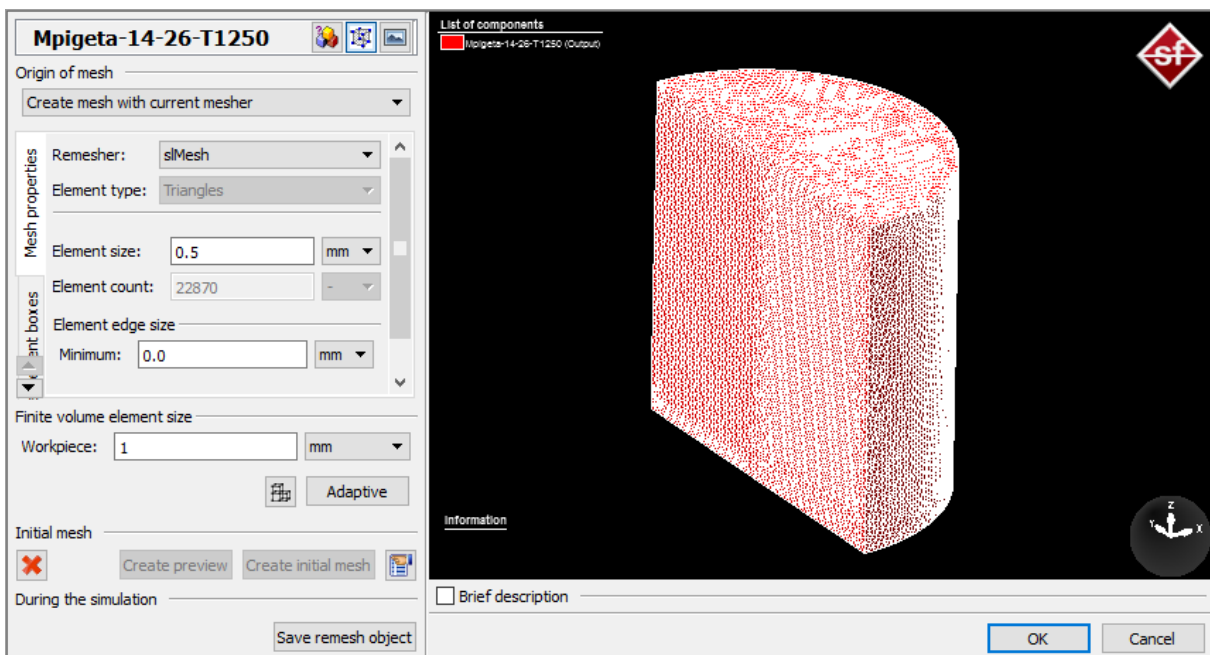
Σχήμα 7.26: Δέντρο διάταξης δεδομένων της διαδικασίας ψύξης

7.3.2 ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

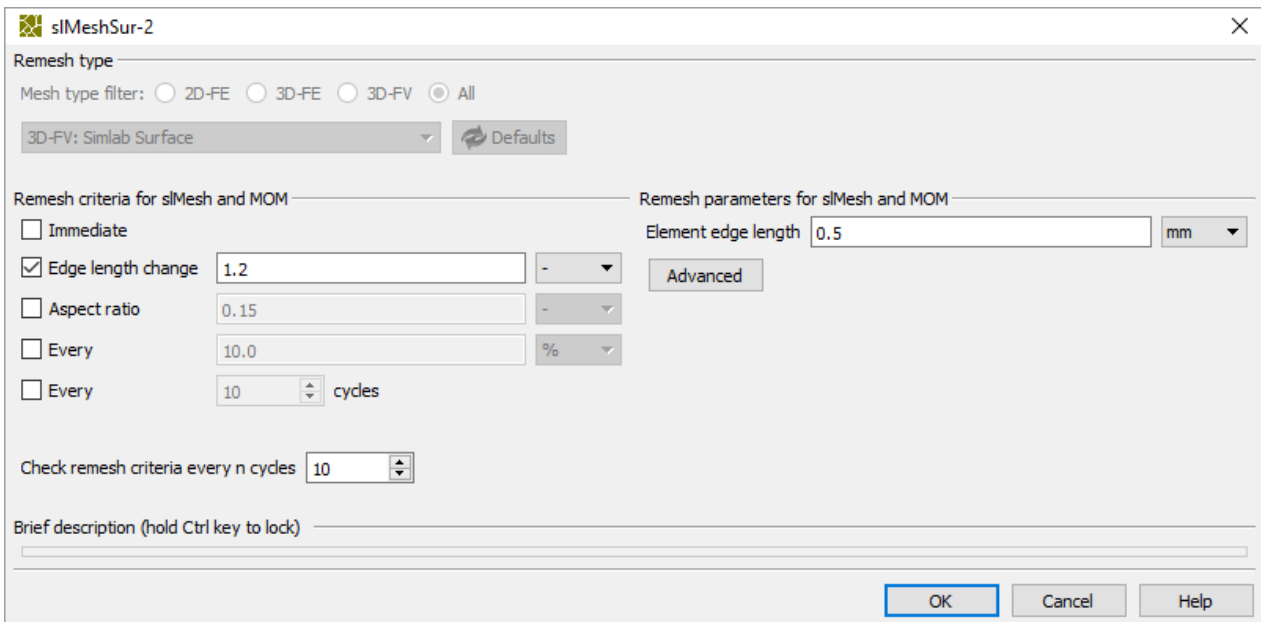
Για να μπορέσει να εκτελεστεί η διεργασία γίνεται πλεγματοποίηση των μπιγέτων. Για τη δημιουργία του πλέγματος επιλέχτηκαν τριγωνικά στοιχεία όγκου με μέγεθος γωνιακών στοιχείων 0,5mm τα οποία είναι αρκετά μικρά στοιχεία ώστε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Στα Σχήματα 7.27 και 7.28 παρουσιάζονται τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν στις δύο μπιγέτες καθώς και ο αριθμός των στοιχείων που δημιουργήθηκαν. Για την αναγέννηση του πλέγματος επιλέχτηκε η μέθοδος siMesh και οι ρυθμίσεις που έγιναν φαίνονται στο Σχήμα 7.29.



Σχήμα 7.27: παράθυρο δημιουργίας πλέγματος μπιγέτας διαστάσεων $R=19,5mm$ $H=13,4mm$



Σχήμα 7.28: Παράθυρο δημιουργίας πλέγματος μπιγέτας διαστάσεων $R=14mm$ $H=26mm$

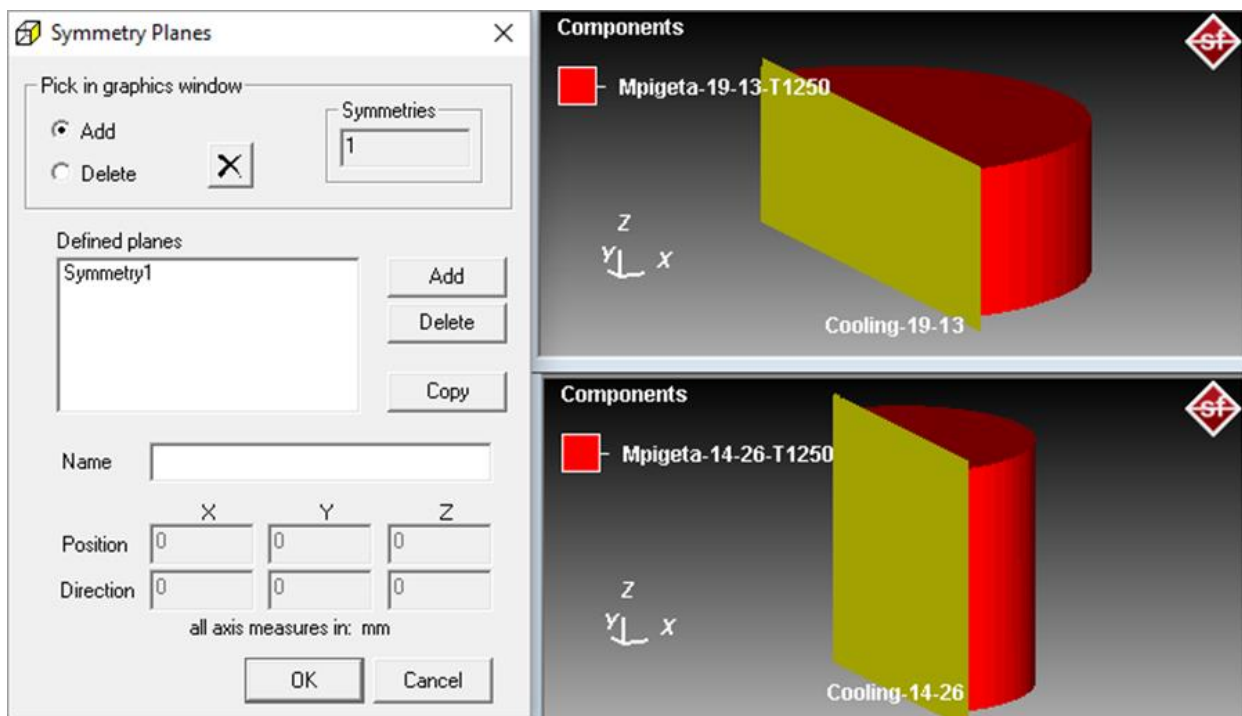


Σχήμα 7.29: Παράθυρο ρύθμισης της αναγέννησης πλέγματος

7.3.3 ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί το τεμάχιο είναι συμμετρικό κατά 1/2 και για το λόγο αυτό η προσομοίωση έγινε στο 1/2 του τεμαχίου. Ο καθορισμός του επιπέδου συμμετρίας έγινε ως εξής:

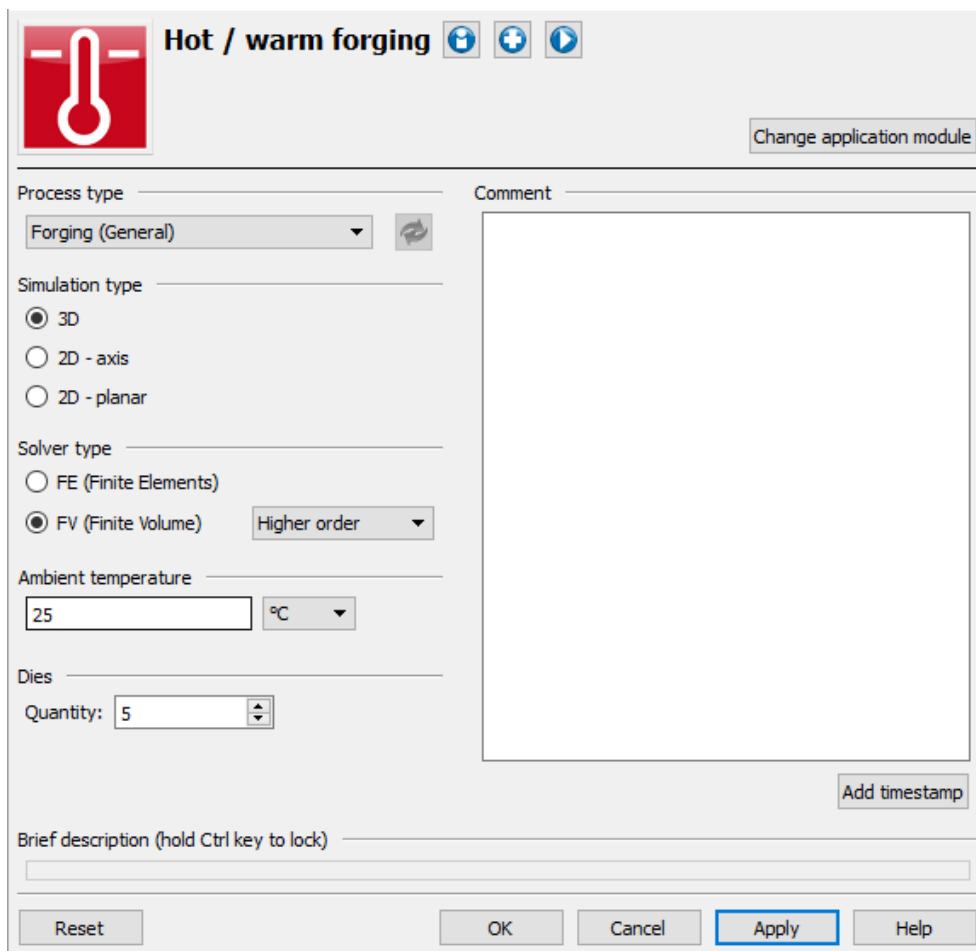
Δεξί κλικ πάνω στο εικονίδιο της διεργασίας (πχ Cooling-19-13) → insert → symmetry plane



Σχήμα 7.30: Παράθυρο καθορισμού επιπέδων συμμετρίας

7.4 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η βασική διαδικασία για τη μορφοποίηση του τελικού μας αντικειμένου είναι η κατεργασία θερμής σφυρηλάτησης. Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση στο λογισμικό Simufact.forming γίνεται η επιλογή της διαδικασίας Forging(general), όπου αρχικά καθορίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο αριθμός των τμημάτων της μήτρας (Σχήμα 7.31).

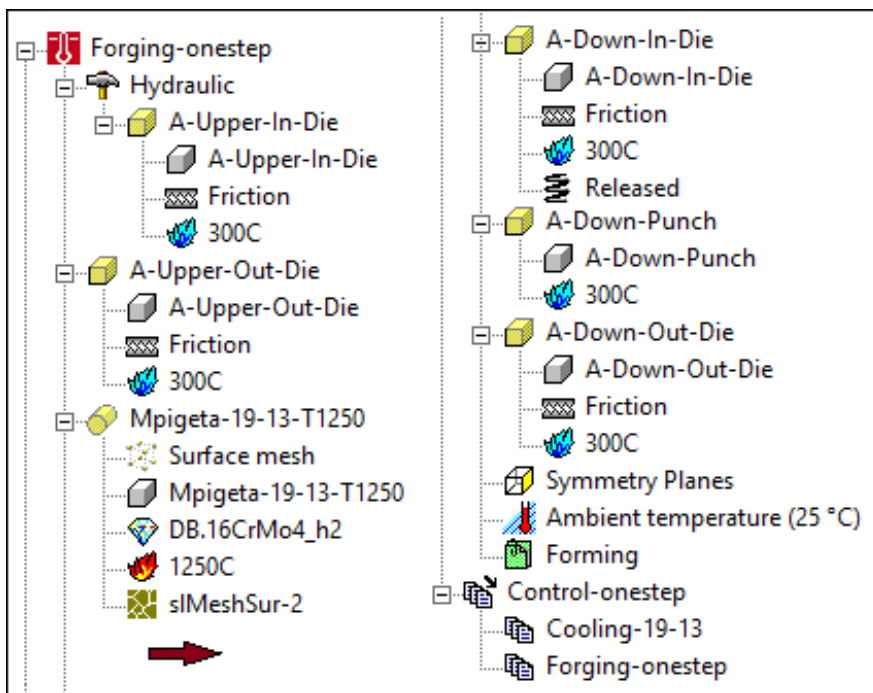


Σχήμα 7.31: Βασικό παράθυρο προσομοίωσης θερμής σφυρηλάτησης (ενός σταδίου)

7.4.1 ΔΕΝΤΡΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ

Στο Σχήμα 7.32 παρουσιάζεται το “δένδρο” της διαδικασίας σφυρηλάτησης (Forging-onestep) όπου τοποθετούνται τα δεδομένα της μπιγέτας και των τμημάτων της μήτρας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Πίνακα 7.3. Αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων έγινε στο Υποκεφάλαιο 7.2.

Για να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές και η πλεγματοποίηση που έγιναν στο κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά τη διαδικασία ψύξης, δημιουργήθηκε ένα στάδιο ελέγχου διαδικασιών (control-onestep) όπου τοποθετήθηκαν οι διεργασίες με τη σειρά που πραγματοποιήθηκαν. Η δημιουργία του σταδίου ελέγχου γίνεται μέσα από το Process tree window →insert stage control.



Σχήμα 7.32: Δέντρο διαδικασίας σφυρηλάτης ενός σταδίου διαμόρφωσης

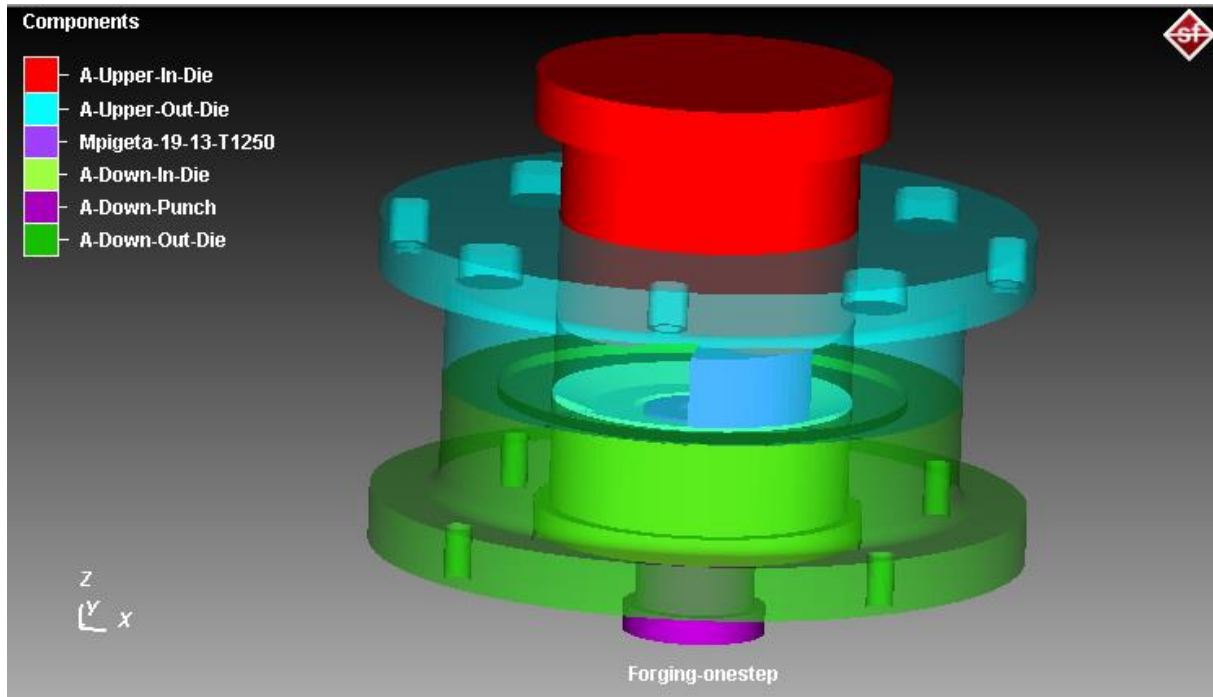
Πίνακας 7.3: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης

α/α	Αρχείο	Περιγραφή
1	A-Down-Out-Die	Κάτω εξωτερική μήτρα
2	A-Down-Punch	Κάτω μήτρα- έμβολο
3	A-Down-In-Die	Κάτω εσωτερική μήτρα
4	A-Upper-In-Die	Άνω εσωτερική μήτρα
5	A-Upper-Out-Die	Άνω εξωτερική μήτρα
6	Mpigeta-19-13	Μπιγέτα R:19,5mm H:13,4mm
7	Hydraulic	Υδραυλική πρέσα
8	Friction	Λίπανση καλουπιών
9	300C	Θερμοκρασία και συντ. μεταφοράς θερμότητας μήτρας
10	DB.42CrMo4_h2	Υλικό του τεμαχίου (κράμα χάλυβα)
11	1250C	Θερμοκρασία - και συντ μεταφορά θερμότητας τεμαχίου
12	Released	Ελατήριο πίεσεως (ρυθμίζει τη κάτω εσωτερική μήτρα)

7.4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ

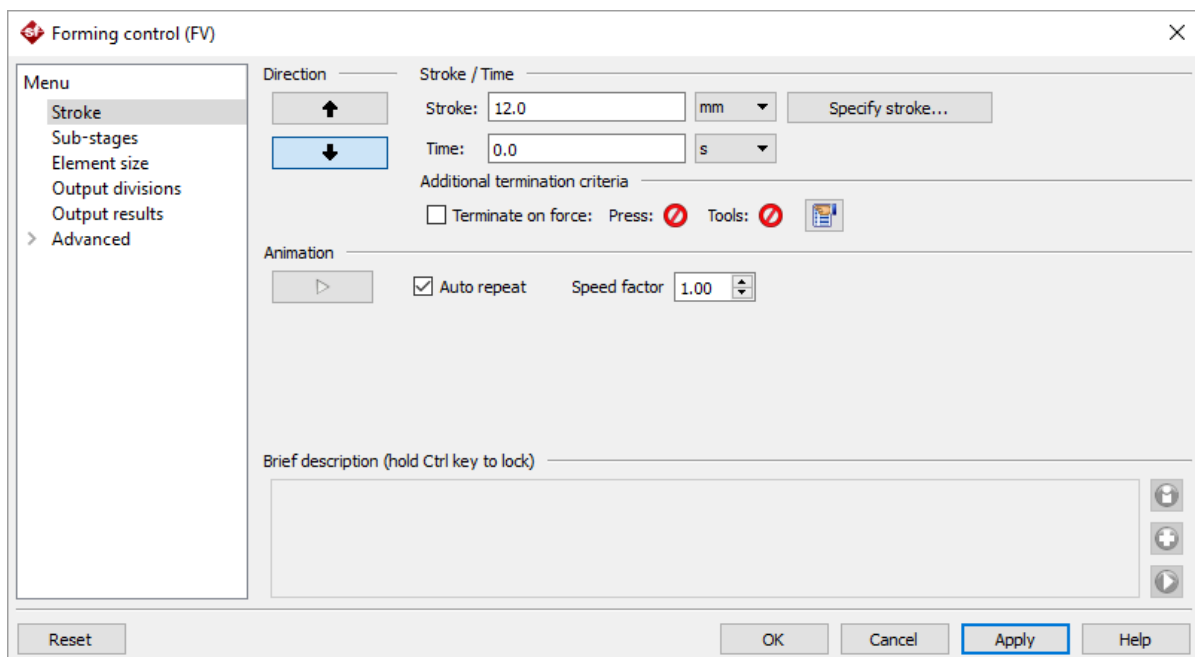
Στο Σχήμα 7.33 απεικονίζεται η διάταξη των τμημάτων της μήτρας όπως ρυθμίστηκε για τη προσομοίωση. Η πλήρης περιγραφή της διάταξης των τμημάτων και οι γεωμετρίες αυτών παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 6.1. και 7.2.7.1 αντίστοιχα.

Για την προσομοίωση, η άνω εσωτερική μήτρα τοποθετήθηκε σε απόσταση περίπου ίση με 2 mm από την άνω επιφάνεια της μπιγέτας . Η άνω εξωτερική μήτρα τη στιγμή αυτή, σύμφωνα με το σχεδιασμό του συνολικού καλουπιού βρίσκεται σε επαφή με την κάτω εξωτερική μήτρα. Επομένως μόνο η άνω εσωτερική μήτρα θεωρήθηκε κινούμενο από τη πρέσα τμήμα.



Σχήμα 7.33: Διάταξη σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης όπως ρυθμίστηκε στο λογισμικό *SimuFact.forming*

Από τη θέση της άνω μήτρας ουσιαστικά καθορίζεται και η απόσταση που πρέπει να διανύσει το έμβολο της πρέσας για την πλήρη διαμόρφωση του τεμαχίου. Αυτή η απόσταση είναι ίση με 12mm. Στο Σχήμα 7.34 παρουσιάζεται το παράθυρο ελέγχου της σφυρηλάτησης όπου γίνεται ρύθμιση της διαδρομής και της κατεύθυνσης του εμβόλου της πρέσας. Ο χρόνος σφυρηλάτησης καθορίζεται αυτόματα από την ταχύτητα της πρέσας και από την απόσταση διαδρομής της.



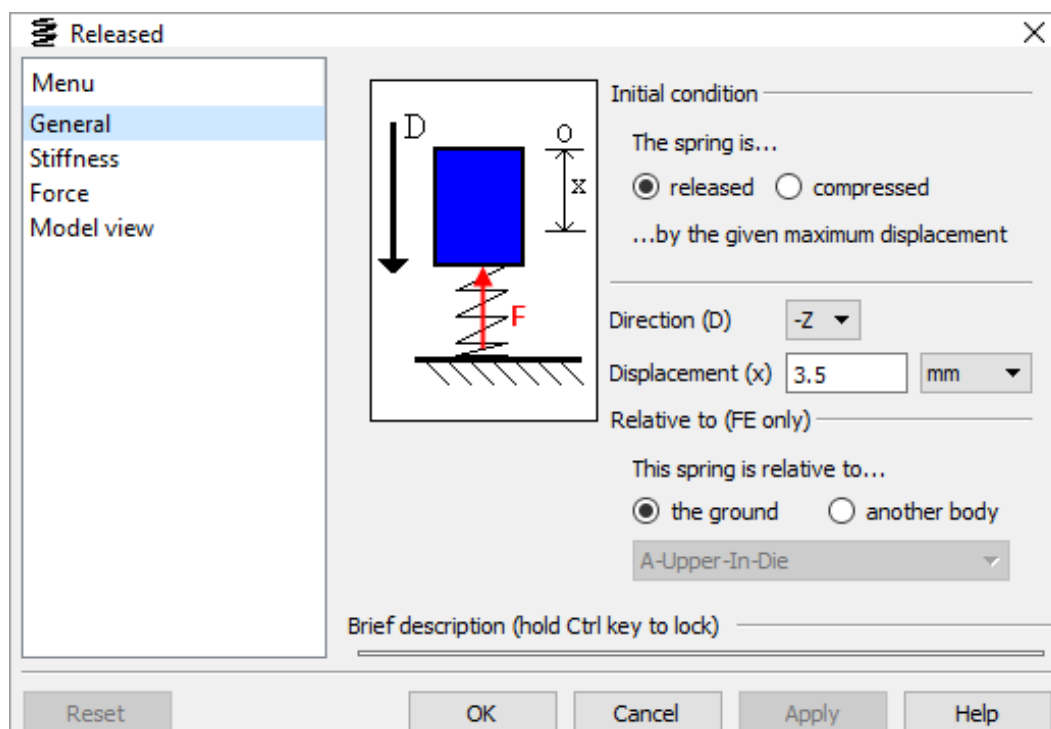
Σχήμα 7.34: Παράθυρο ρυθμίσεων της διαδικασίας σφυρηλάτησης (*Simufact.forming*)

7.4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΠΙΕΣΕΩΣ

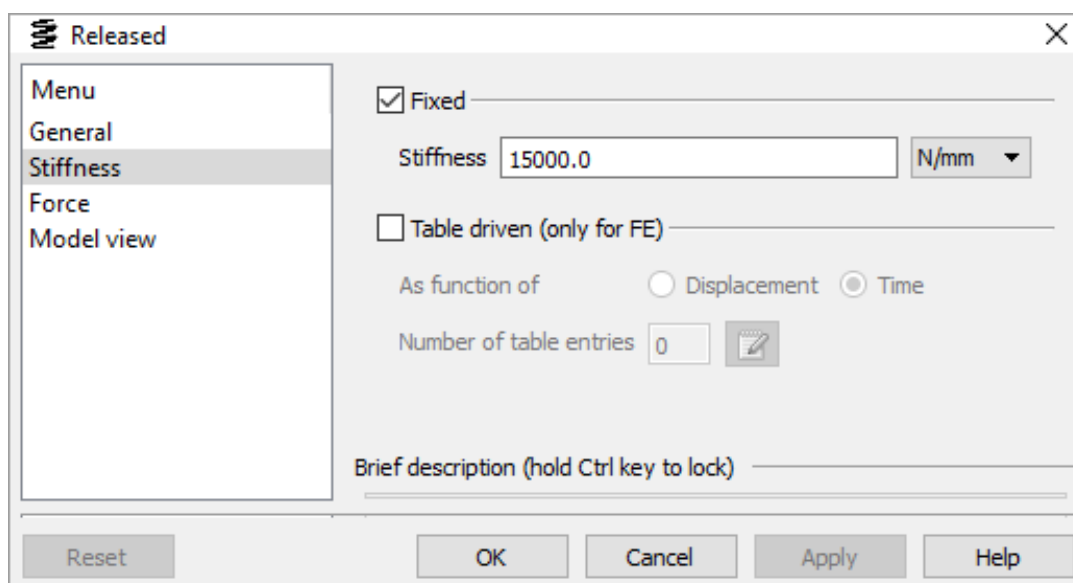
Η εισαγωγή του ελατηρίου πίεσεως, που σχεδιάστηκε για τη ρύθμιση της “κάτω εσωτερικής μήτρας” για την επίτευξη καλύτερης ροής, έγινε ως εξής:

Δεξί κλικ (Inventory window) → Die type → Die spring → Manual

Η μέγιστη συμπίεση του ελατηρίου καθορίστηκε με βάση το σχεδιασμό του συνολικού καλουπιού και η ακαμψία καθορίστηκε στα 15 kN/mm (Σχήμα 7.36) έπειτα από κάποιες δοκιμές που έγιναν.



Σχήμα 7.35: Παράθυρο γενικών ρυθμίσεων ελατηρίου μήτρας



Σχήμα 7.36: Παράθυρο ρύθμισης ακαμψίας ελατηρίου

7.5 ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Αρχικά γίνεται η επιλογή της διαδικασίας Forging(general), όπου καθορίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C) και ο αριθμός των τμημάτων της μήτρας που θα χρησιμοποιηθούν για τη προσομοίωση (Σχήμα 7.37).

The image shows a software dialog box titled "Process definition - new process for project 'aaaa'". The main heading is "Hot / warm forging". The dialog is divided into several sections:

- Process type:** A dropdown menu is set to "Forging (General)".
- Simulation type:** Three radio buttons are present: "3D" (selected), "2D - axis", and "2D - planar".
- Solver type:** Two radio buttons are present: "FE (Finite Elements)" and "FV (Finite Volume)" (selected). A dropdown menu next to "FV" is set to "Higher order".
- Ambient temperature:** A text input field contains "25" and a dropdown menu is set to "°C".
- Dies:** A "Quantity:" label is followed by a spinner box set to "4".
- Comment:** A large empty text area on the right side.
- Brief description (hold Ctrl key to lock):** An empty text area at the bottom.

Buttons at the bottom include "Reset", "OK", "Cancel", "Apply" (highlighted with a blue border), and "Help". A "Change application module" button is located in the top right, and an "Add timestamp" button is in the bottom right of the comment area.

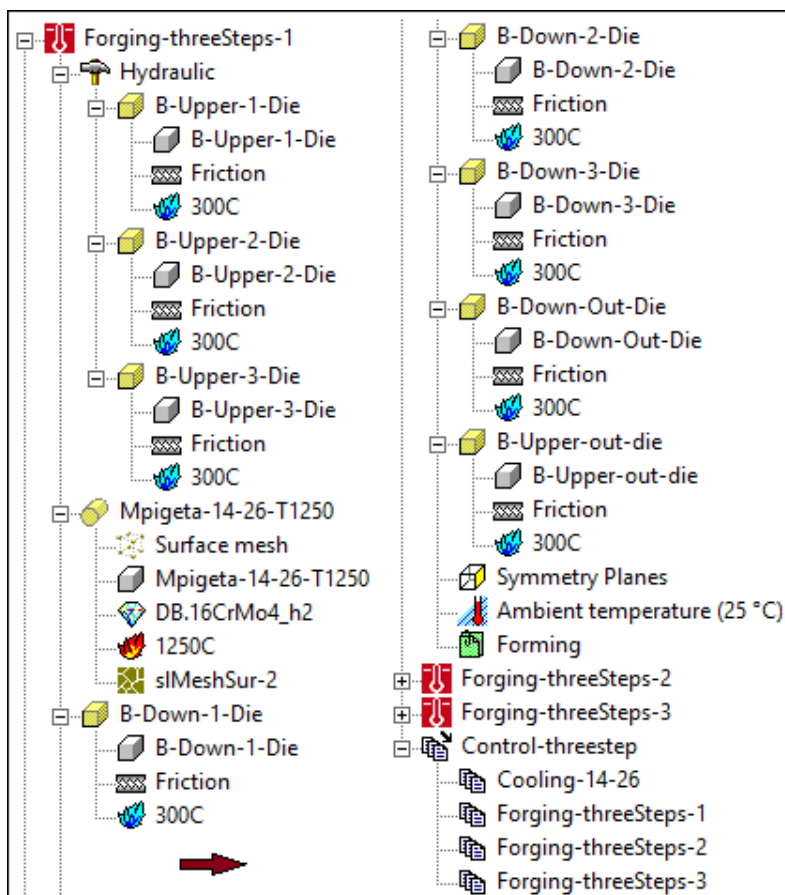
Σχήμα 7.37: Βασικό παράθυρο προσομοίωσης θερμής σφυρηλάτησης (τριών σταδίων)

7.5.1 ΔΕΝΤΡΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ

Στο Σχήμα 7.38 παρουσιάζεται το “δένδρο” της διαδικασίας σφυρηλάτησης (forging-threesteps) όπου τοποθετούνται τα δεδομένα της μπιγέτας και των τμημάτων της μήτρας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Πίνακα 7.4. Αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων έγινε στο Υποκεφάλαιο 7.2.

Για να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές και η πλεγματοποίηση που έγιναν στο κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά τη διαδικασία ψύξης, καθώς και οι μεταβολές από το ένα στάδιο στο άλλο, δημιουργήθηκε ένα στάδιο ελέγχου διαδικασιών (control-threestep) όπου τοποθετήθηκαν οι διεργασίες με τη σειρά που πραγματοποιήθηκαν. Η δημιουργία του σταδίου ελέγχου γίνεται μέσα από το Process tree window → insert stage control.

Η διαδικασία “Forging-threeSteps-1”, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 7.38, αντιστοιχεί στη σφυρηλάτηση του πρώτου σταδίου, και οι διαδικασίες “Forging-threeSteps-2”, “Forging-threeSteps-3” στο δεύτερο και τρίτο στάδιο αντίστοιχα. Η διάταξη των δεδομένων είναι ίδια και στις τρεις διαδικασίες. Οι ρυθμίσεις που διαφέρουν αφορούν τη θέση της μπιγέτας και τη διαδρομή της πρέσας, ανάλογα με το στάδιο κατεργασίας.



Σχήμα 7.38: Δένδρο διαδικασίας σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης

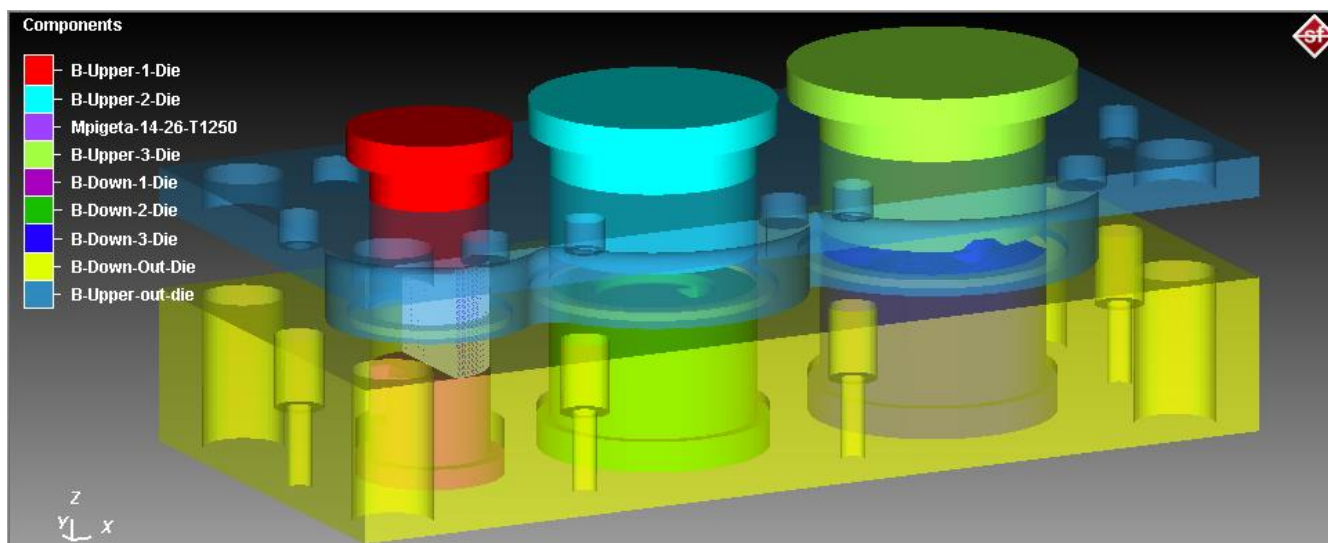
Πίνακας 7.4: Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση σφυρηλάτησης τριών σταδίων

α/α	Αρχείο	Περιγραφή
1	B-Down-Out-Die	Κάτω εξωτερική μήτρα
2	B-Down-1-Die	Κάτω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου
3	B-Down-2-Die	Κάτω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου
4	B-Down-3-Die	Κάτω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου
5	B-Upper-Out-Die	Άνω εξωτερική μήτρα
6	B-Upper-1-Die	Άνω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου
7	B-Upper-2-Die	Άνω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου
8	B-Upper-3-Die	Άνω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου
9	Mpigeta-14-13	Μπιγέτα ακτίνας R=14 mmκαι ύψους H:26mm
10	Hydraulic	Υδραυλική πρέσα
11	Friction	Λίπανση καλουπιών
12	300C	Θερμοκρασία και συντ. μεταφοράς θερμότητα μήτρας
13	DB.42CrMo4_h2	Υλικό του τεμαχίου (κράμα χάλυβα)
14	1250C	Θερμοκρασία και συντ μεταφορά θερμότητας τεμαχίου

7.5.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ

Στο σχήμα 7.39 απεικονίζεται η διάταξη των τμημάτων της μήτρας όπως ρυθμίστηκε για τη προσομοίωση. Η πλήρης περιγραφή της διάταξης των τμημάτων και οι γεωμετρίες αυτών παρουσιάστηκαν στα Υποκεφάλαια 6.2. και 7.2.7.2.

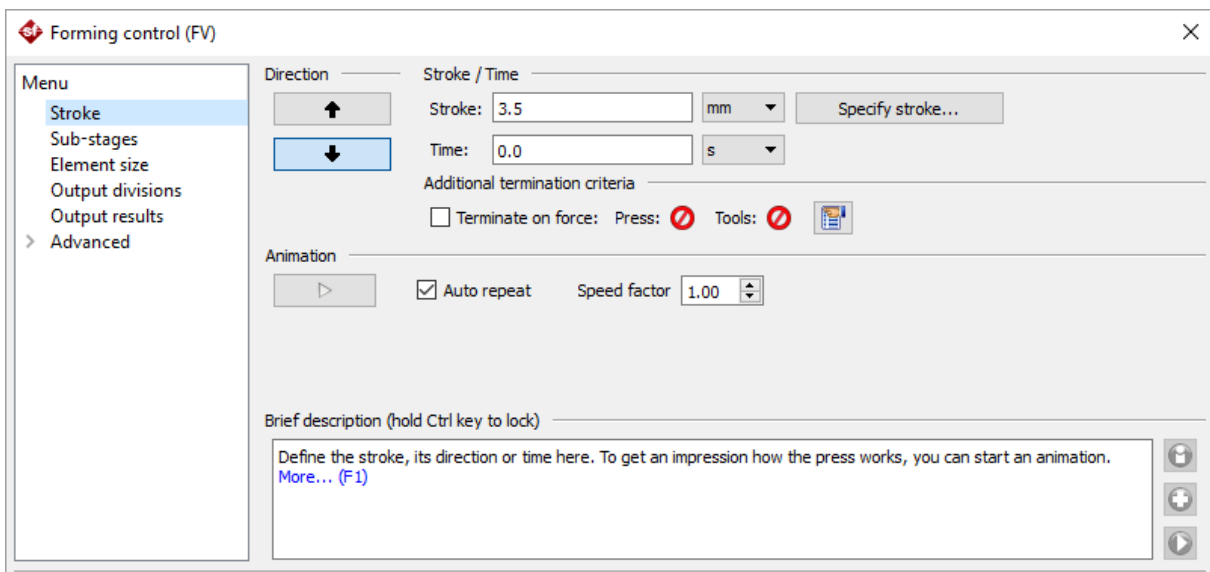
Για λόγους μείωσης του χρόνου ανάλυσης κατά τη προσομοίωση, οι άνω μήτρες των τριών σταδίων τοποθετήθηκαν σε απόσταση περίπου 1mm από την άνω επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου στην εκάστοτε περίπτωση. Επίσης, η άνω εξωτερική μήτρα θεωρήθηκε σταθερό τμήμα και ρυθμίστηκε στη φάση εφαρμογής της στη κάτω εξωτερική μήτρα (Υποκεφάλαιο 6.2.3). Επομένως, μόνο η άνω μήτρες των σταδίων θεωρήθηκαν κινούμενα από τη πρέσα τμήματα.



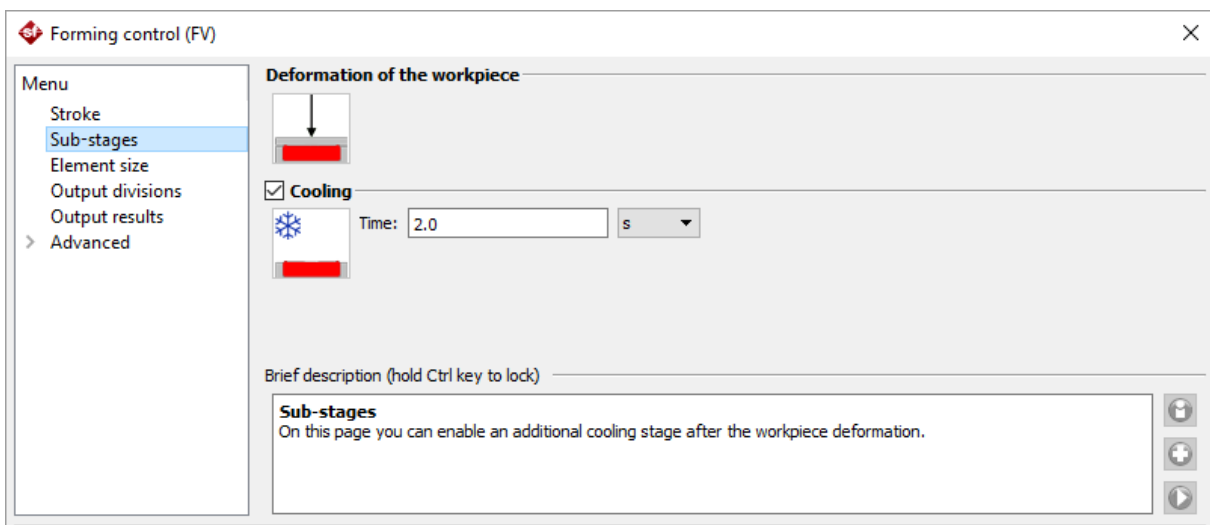
Σχήμα 7.39: Διάταξη σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης όπως ρυθμίστηκε στο λογισμικό SimuFact.forming

Από τη θέση της άνω μήτρας του κάθε σταδίου ουσιαστικά καθορίζεται και η απόσταση που πρέπει να διανύσει το έμβολο της πρέσας στη κάθε περίπτωση για τη πλήρη διαμόρφωση του τεμαχίου. Για το πρώτο στάδιο η απόσταση αυτή είναι ίση με 3,5 mm, για το δεύτερο στάδιο είναι 19mm και για το τρίτο 4mm. Στο Σχήμα 7.40 παρουσιάζεται το παράθυρο ελέγχου της σφυρηλάτησης όπου γίνεται ρύθμιση της διαδρομής και της κατεύθυνσης του εμβόλου της πρέσας. Ο χρόνος σφυρηλάτησης καθορίζεται αυτόματα από την ταχύτητας της πρέσας όπως ορίστηκε στα 50mm/s και από την απόσταση διαδρομής της.

Επίσης, για ρεαλιστικότερες συνθήκες της προσομοίωσης της σφυρηλάτησης ορίστηκε και ο χρόνος μεταφοράς του κατεργαζόμενου τεμαχίου από το ένα στάδιο στο άλλο, όπου σε αυτό το διάστημα το τεμάχιο έχει απώλειες θερμότητας. Ο χρόνος ορίστηκε στα 2 sec (Σχήμα 7.41).



Σχήμα 7.40: Παράθυρο ρυθμίσεων σφυρηλάτησης (ρύθμιση διαδρομής πρέσας για το πρώτο στάδιο)



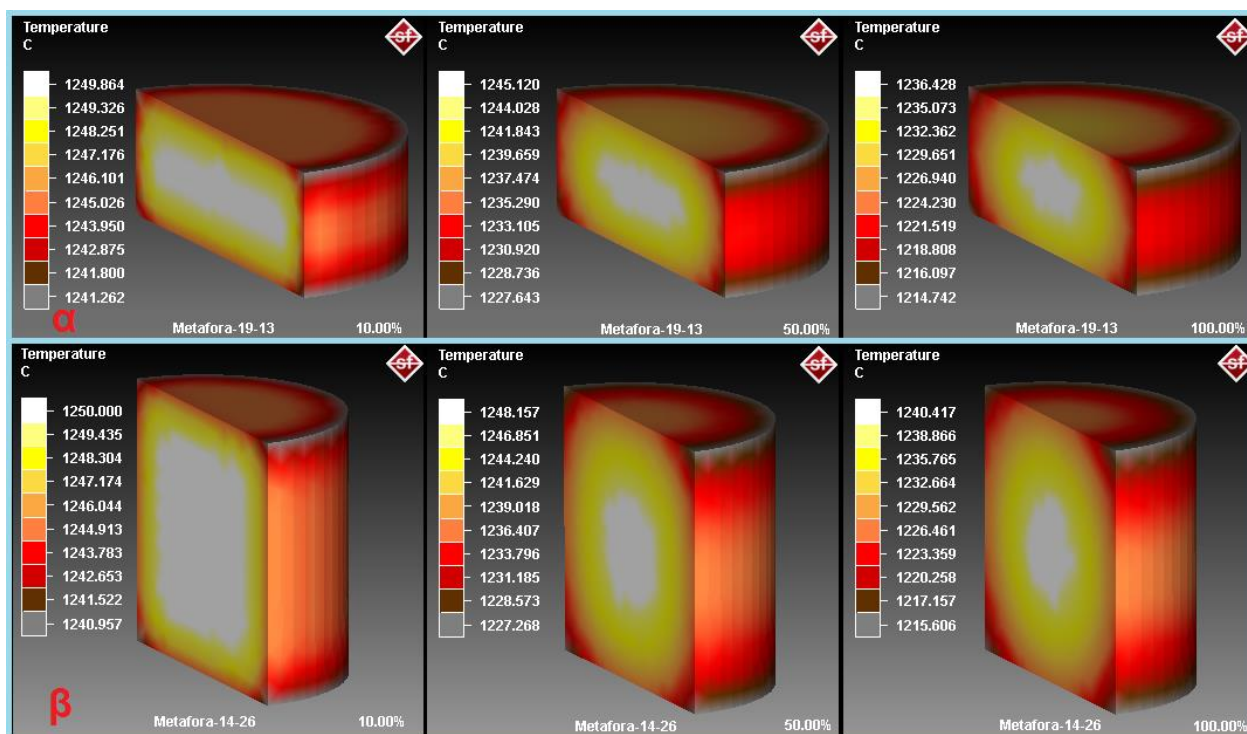
Σχήμα 7.41: Παράθυρο ρυθμίσεων σφυρηλάτησης (ρύθμιση χρόνου ψύξης μετά τη κατεργασία)

7.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στο Υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Για τη διαδικασία της ψύξης των τεμαχίων παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε διάφορες φάσεις κατά τη μεταφορά τους από το φούρνο στα καλούπια. Για τις δύο διαδικασίες σφυρηλάτησης παρουσιάζονται σε τρισδιάστατη απεικόνιση η κατανομή της θερμοκρασίας, των τάσεων και των ενεργών πλαστικών παραμορφώσεων στο τεμάχιο. Επίσης, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της κάθετης δύναμης που ασκήθηκε στις εσωτερικές μήτρες συναρτήσει του χρόνου καθώς και οι πίνακες με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές της πίεσης, των δυνάμεων, των θερμοκρασιών και των τάσεων που εμφανίστηκαν στις μήτρες αυτές.

7.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ

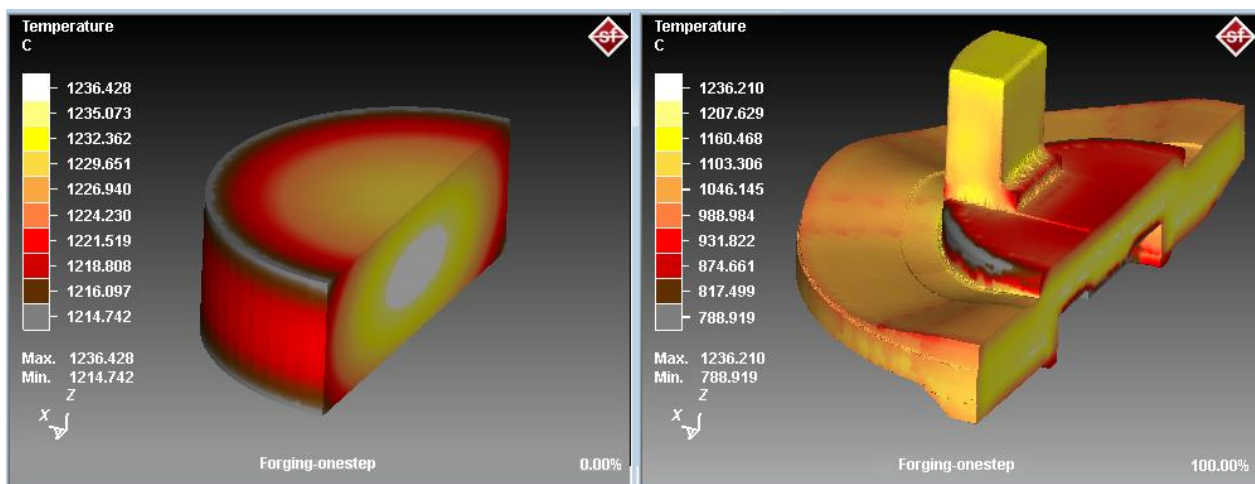
Στο σχήμα 7.42 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στο 10%, 50% και 100% της προσομοίωσης της διαδικασίας ψύξης. Υπενθυμίζεται ότι, θεωρήθηκε ότι τα αρχικά τεμάχια προθερμάνθηκαν ομοιόμορφα σε φούρνο από τους 20 °C στους 1250 °C (Υποκεφάλαιο 7.2.1). Στο τεμάχιο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη σφυρηλάτηση ενός σταδίου διαμόρφωσης (Σχήμα 7.42.α), παρατηρείται ελάχιστη πτώση της θερμοκρασίας περίπου 14 °C και μέγιστη πτώση περίπου 33 °C. Στο τεμάχιο που θα χρησιμοποιηθεί στη σφυρηλάτηση τριών σταδίων διαμόρφωσης (Σχήμα 7.42.β) η ελάχιστη πτώση είναι περίπου 10° C και η μέγιστη περίπου 14° C.



Σχήμα 7.42: Κατανομή της θερμοκρασίας στις μπιγιέτες σε διάφορα στάδια της διαδικασίας ψύξης. (α) κυλινδρική μπιγιέτα ενός σταδίου σφυρηλάτησης διαστάσεων ακτίνας $R=19,5mm$ και ύψους $H=13,4mm$, (β) κυλινδρική μπιγιέτα τριών σταδίων σφυρηλάτησης διαστάσεων ακτίνας $R=1$

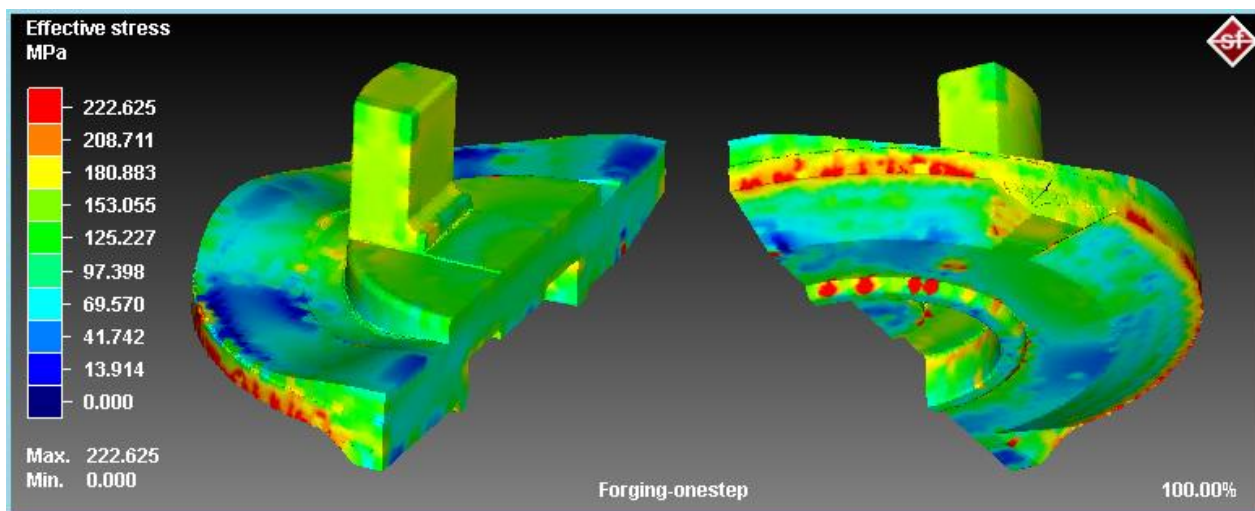
7.6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στο Σχήμα 7.43 απεικονίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του τεμαχίου πριν τη σφυρηλάτηση του (0.00% της προσομοίωσης) και μετά τη ολοκλήρωση της σφυρηλάτησης του (100% της προσομοίωσης). Η μεγαλύτερη πτώση της θερμοκρασίας παρατηρείται στα σημεία του τεμαχίου τα οποία διαμορφώνονται στα πρώτα βήματα της κατεργασίας, ενώ στο εσωτερικό του τεμαχίου και στα σημεία που διαμορφώθηκαν στις τελευταίες φάσεις της κατεργασίας (πχ νεύρα) η θερμοκρασία παρέμεινε σε ψηλές τιμές.



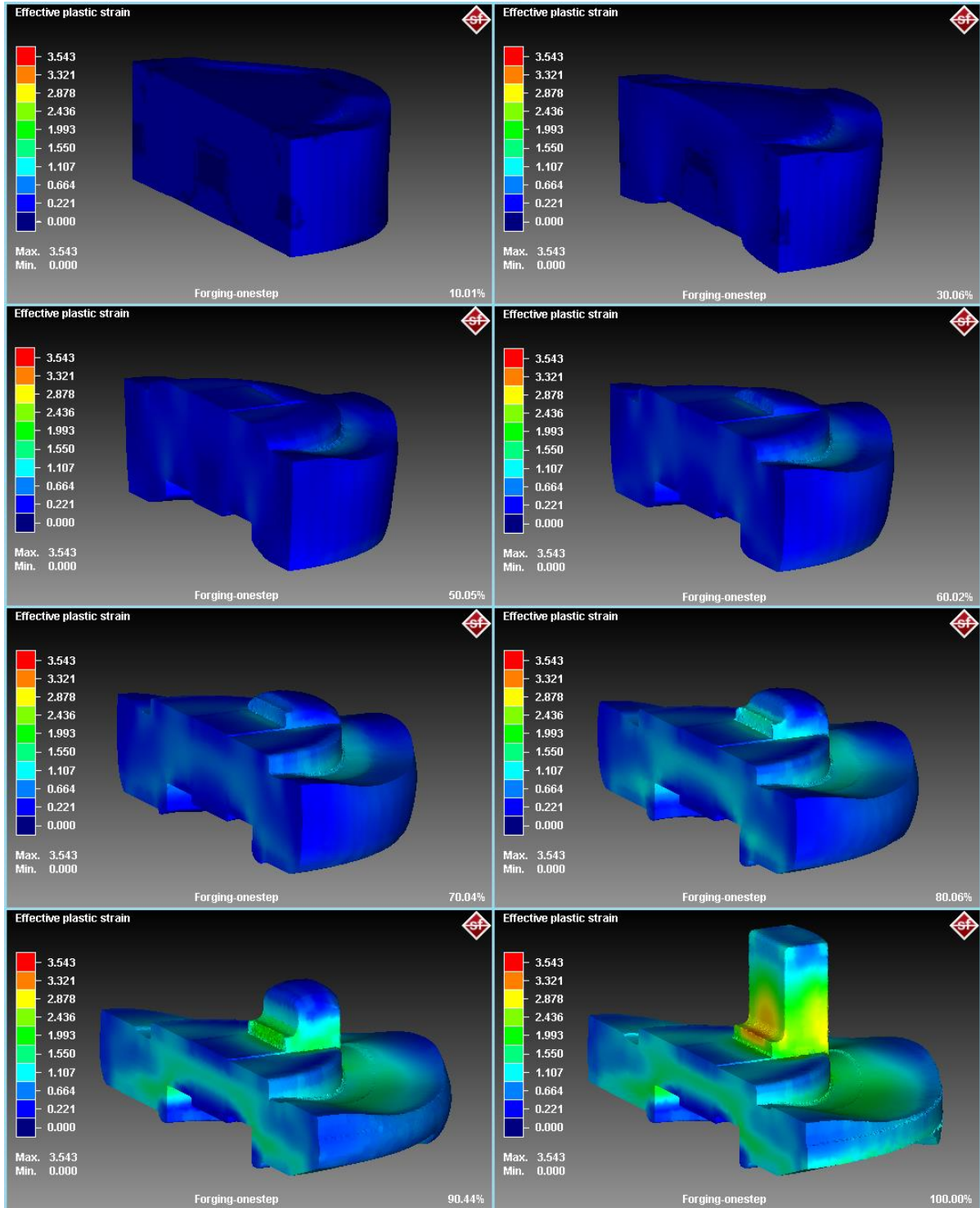
Σχήμα 7.43: Κατανομή της θερμοκρασίας του τεμαχίου κατά την είσοδο (0.00%) και κατά την έξοδο του (100%) από τη μήτρα σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης.

Στο Σχήμα 7.44 παρουσιάζεται του τεμαχίου η κατανομή των τάσεων που εμφανίστηκαν στο τεμάχιο κατά τη τελευταία φάση της κατεργασίας όπου οι τάσεις μεγιστοποιούνται όπως ήταν αναμενόμενο. Οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται κατά το σχηματισμό του εξωτερικού κυλίνδρου και γενικά μεγάλες τάσεις παρατηρούνται στα σημεία όπου υπάρχουν κάθετες γωνίες στο τεμάχιο.



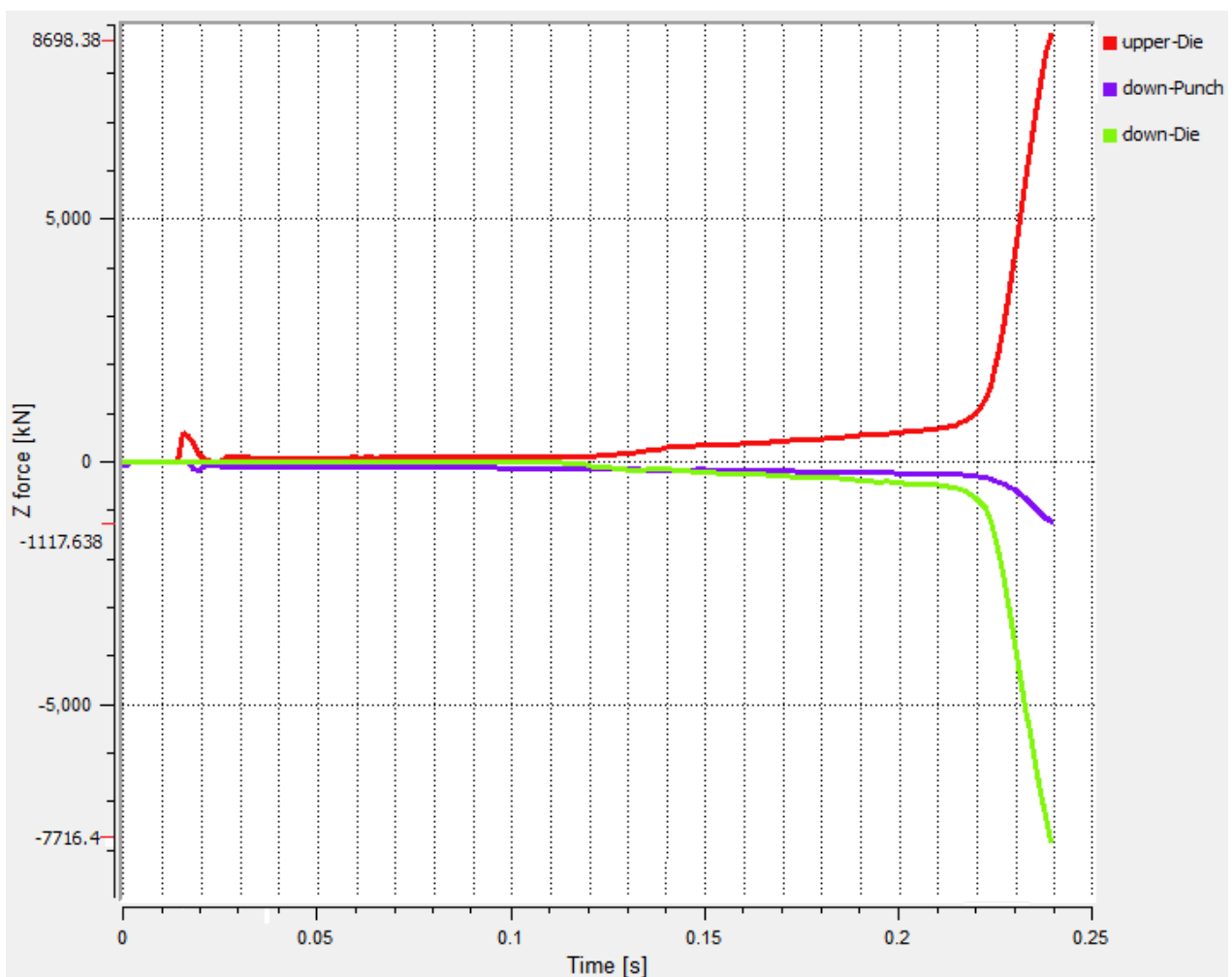
Σχήμα 7.44: Απεικόνιση σε δύο όψεις του τεμαχίου της κατανομής των τάσεων στη φάση πλήρους συμπίεσης του τεμαχίου κατά τη σφυρηλάτηση ενός σταδίου διαμόρφωσης

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ενεργός πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις της κατεργασίας όπου μπορεί να παρατηρηθεί η ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η μέγιστη πλαστική παραμόρφωση παρατηρείται κατά τη δημιουργία των νεύρων τα οποία διαμορφώνονται στα τελευταία βήματα της κατεργασίας



Σχήμα 7.45: Κατανομή της ενεργού πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις της σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης

Στο διάγραμμα του Σχήματος 7.46 παρουσιάζεται η μεταβολή των δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης, συναρτήσει του χρόνου. Στο διάγραμμα παρατηρείται απότομη αύξηση των δυνάμεων προς το τέλος της κατεργασίας, το οποίο οφείλεται στο ότι το υλικό καλύπτει όλη την επιφάνεια της μήτρας και αναπτύσσονται μεγάλες πιέσεις στη μήτρα. Επίσης, στα πρώτα βήματα της κατεργασίας, παρατηρείται μια μικρή ανωμαλία (αυξομείωση της δύναμης) στην καμπύλη δύναμης-χρόνου του άνω τμήματος της μήτρας. Η ανωμαλία αυτή εμφανίζεται κατά τη στιγμή στην οποία το άνω τμήμα της μήτρας έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο. Υπενθυμίζεται ότι το άνω τμήμα της μήτρας τοποθετήθηκε σε απόσταση 2mm πάνω από το τεμάχιο κατά τη προσομοίωση. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται μηδενικές δυνάμεις στην αρχή των καμπύλων του διαγράμματος.



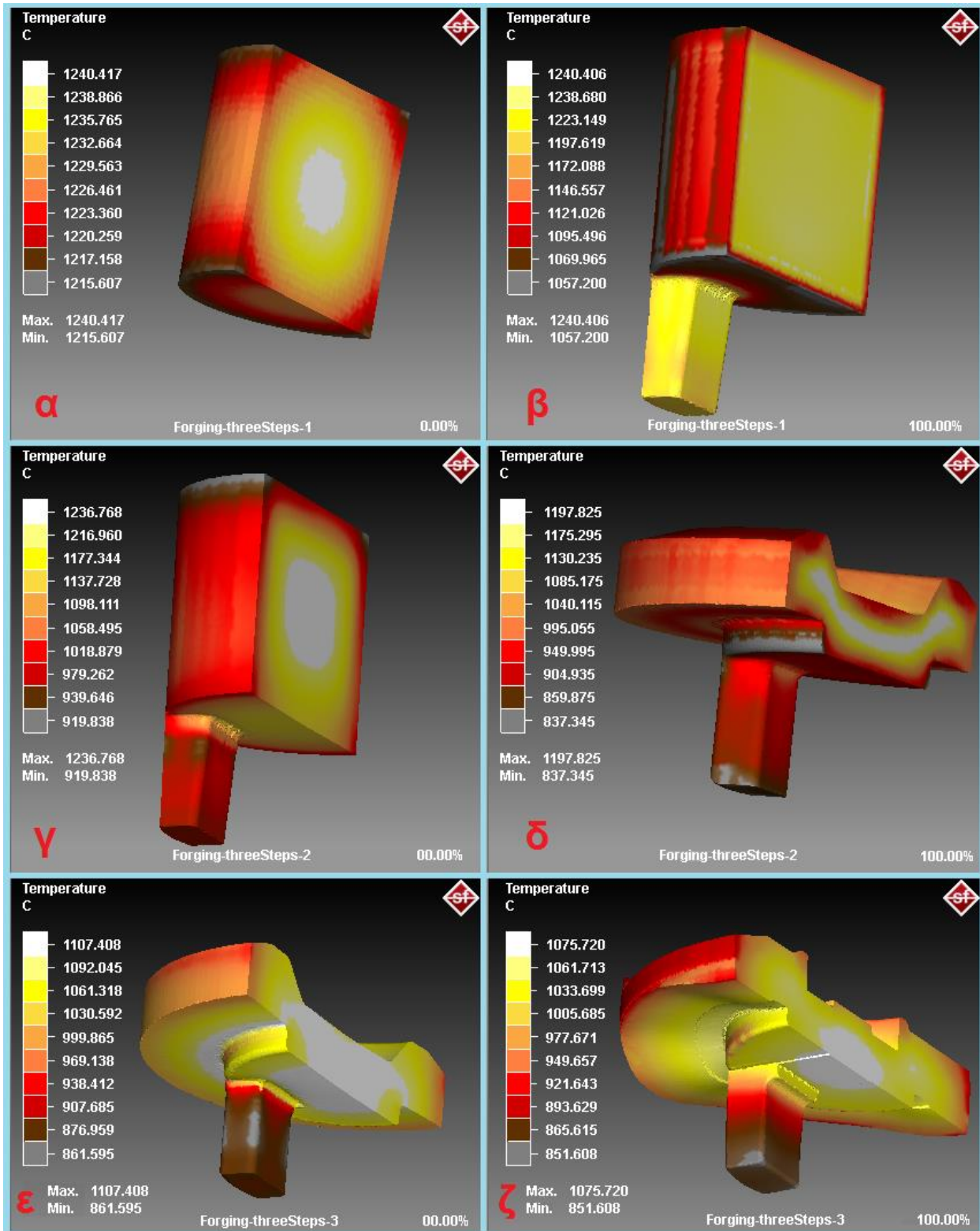
Σχήμα 7.46: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου. Κόκκινο: άνω εσωτερική μήτρα, μοβ: μήτρα- έμβολο, πράσινο: κάτω εσωτερική μήτρα.

7.6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΣΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στο Σχήμα 7.47 απεικονίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας του τεμαχίου πριν τη σφυρηλάτηση του (0.00% της προσομοίωσης) και μετά τη ολοκλήρωση της σφυρηλάτησης του (100% της προσομοίωσης) σε κάθε ένα από τα τρία στάδια της κατεργασίας.

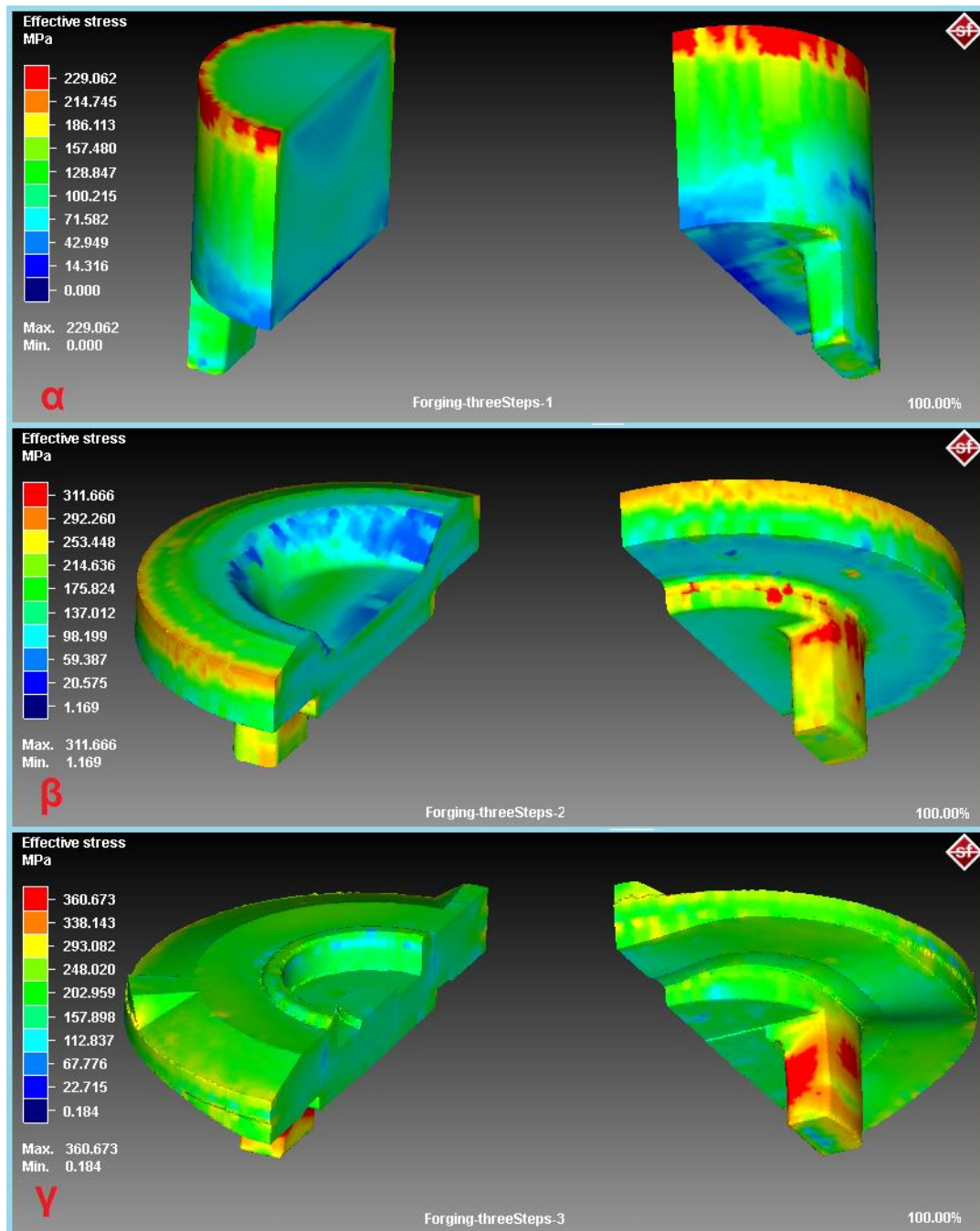
Υπενθυμίζεται ότι, κατά τη σφυρηλάτηση τριών σταδίων διαμόρφωσης θεωρήθηκε ότι το τεμάχιο έχει απώλειες θερμότητας κατά τη μεταφορά του από το ένα στάδιο στο άλλο, έτσι κατά τη προσομοίωση ορίστηκε χρόνος ψύξης του τεμαχίου κατά τις φάσεις αλλαγής του σταδίου σφυρηλάτησης. Επίσης, θεωρήθηκε ότι το τεμάχιο κατά τις φάσεις αυτές έχει απώλειες θερμότητας μόνο προς το περιβάλλον, άρα ο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι μικρότερος από ότι είναι ο συντελεστής μεταξύ τεμαχίου και μήτρας. Γι' αυτό κατά τις φάσεις αλλαγής του σταδίου σφυρηλάτησης (Σχήματα 7.47β-γ, και 7.47δ-ε), ενώ παρουσιάζεται πτώση της συνολικής θερμοκρασίας του τεμαχίου, παρατηρείται αύξηση σε κάποιες επιφάνειες του τεμαχίου που οφείλεται στο ότι μεταφέρεται θερμότητα από το εσωτερικό του τεμαχίου προς το εξωτερικό του. Αυτές οι επιφάνειες είναι κυρίως οι επιφάνειες που ήρθαν πρώτες σε επαφή με τις μήτρες.

Επίσης, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, οι ελάχιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται στα νεύρα του τεμαχίου κατά το τρίτο και τελευταίο στάδιο της κατεργασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί τα νεύρα δημιουργούνται στο πρώτο στάδιο της κατεργασίας και στη συνέχεια (δεύτερο και τρίτο στάδια) είναι σχεδόν σε πλήρη επαφή με τα τοιχώματα της μήτρας. Ελάχιστες αλλαγές γίνονται στα νεύρα στο τρίτο στάδιο κατεργασίας. Περισσότερη λεπτομέρεια για τη ροή του υλικού παρατηρείται στα Σχήματα 7.49-7.51.



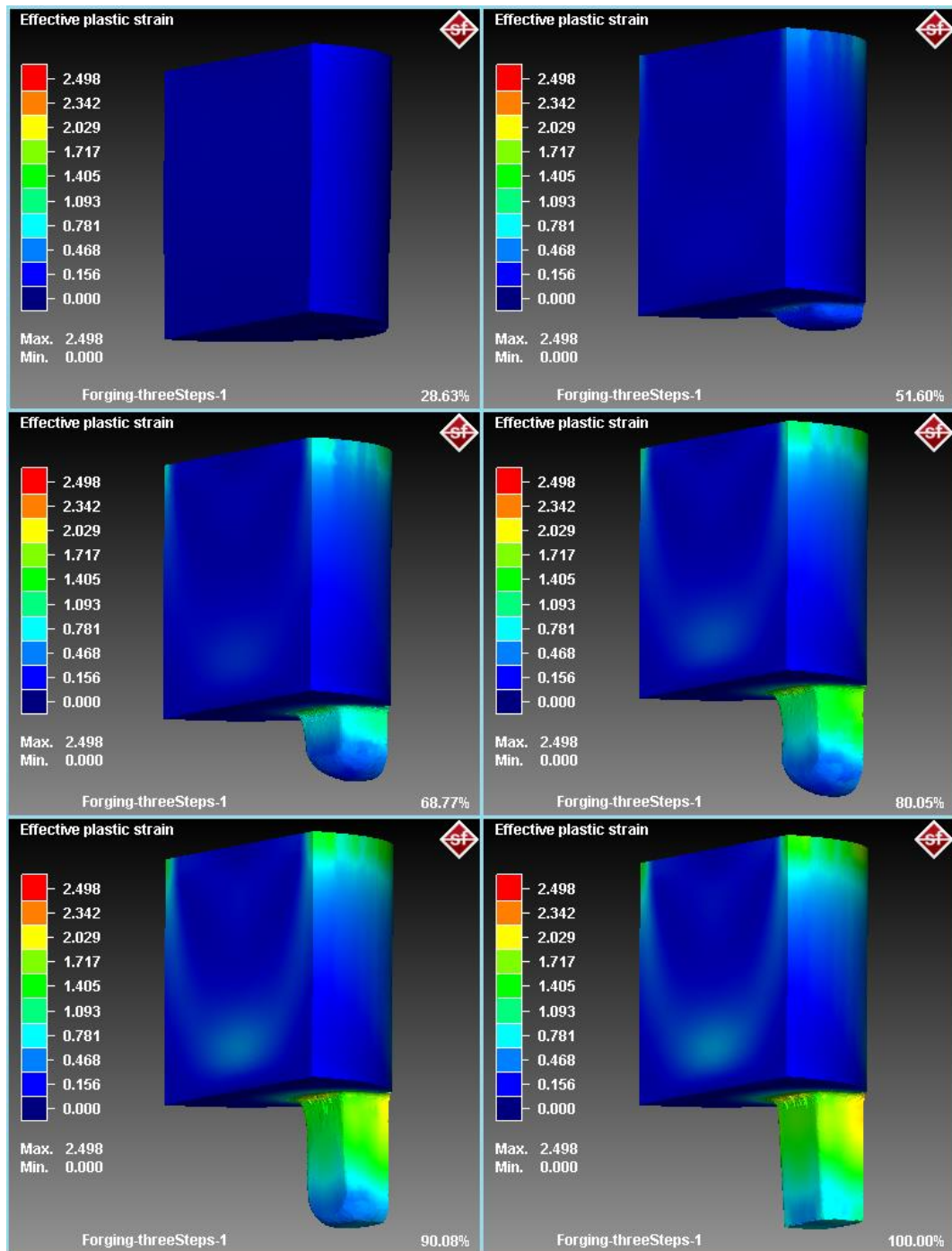
Σχήμα 7.47: Κατανομή της θερμοκρασίας του τεμαχίου κατά την είσοδο (0.00%) και κατά την έξοδο του (100%) από τις μήτρες σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης. (α-β) πρώτο στάδιο, (γ-δ) δεύτερο στάδιο και (ε-ζ) τρίτο στάδιο.

Στο Σχήμα 7.44 παρουσιάζεται σε δύο όψεις του τεμαχίου η κατανομή των τάσεων που εμφανίστηκαν στο τεμάχιο κατά τη τελευταία φάση του καθενός από τα τρία στάδια κατεργασίας όπου οι τάσεις μεγιστοποιούνται όπως ήταν αναμενόμενο. Στο πρώτο στάδιο διαμόρφωσης (Σχήμα 7.44.α) οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται στην άνω εξωτερική πλευρά του κυλινδρικού του τεμαχίου, ενώ στα επόμενα δύο στάδια (Σχήμα 7.44.β και γ) οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην περιοχή των νεύρων.

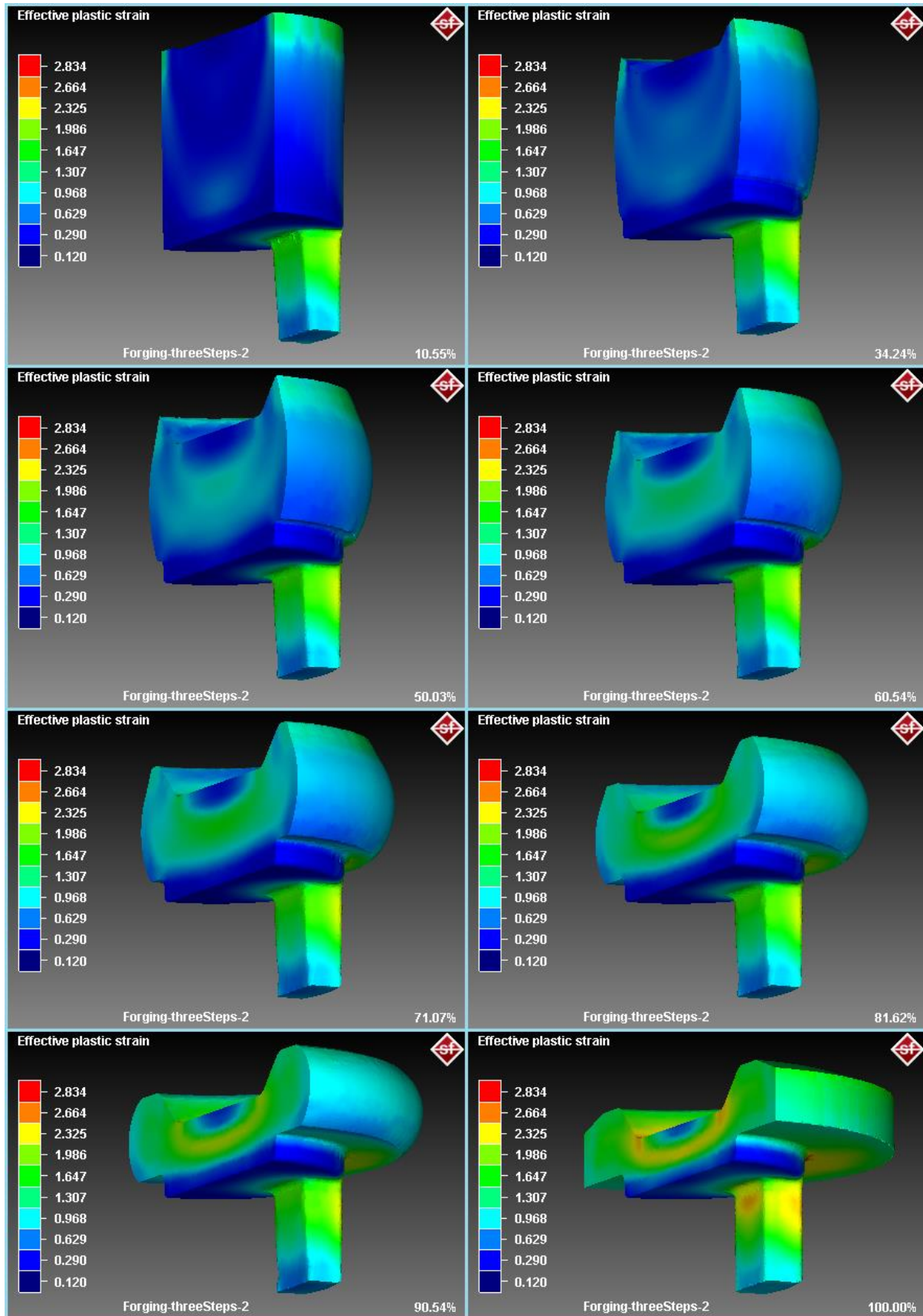


Σχήμα 7.48: Απεικόνιση σε δύο όψεις του τεμαχίου της κατανομής των τάσεων στη φάση πλήρους συμπίεσης του τεμαχίου κατά τη σφυρηλάτηση τριών σταδίων διαμόρφωσης. (α-β) πρώτο στάδιο, (γ-δ) δεύτερο στάδιο και (ε-ζ) τρίτο στάδιο.

Στο επόμενο τρία Σχήματα (7.49-7.51) παρουσιάζεται αντίστοιχα για κάθε ένα από τα τρία στάδια η ενεργός πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης όπου μπορεί να παρατηρηθεί η ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Η μέγιστη πλαστική παραμόρφωση παρατηρείται στη βάση των νεύρων και οφείλεται στο ότι το υλικό εισέρχεται στις κοιλότητες της μήτρας, οι οποίες σχηματίζουν τα νεύρα, με μεγάλη ταχύτητα.

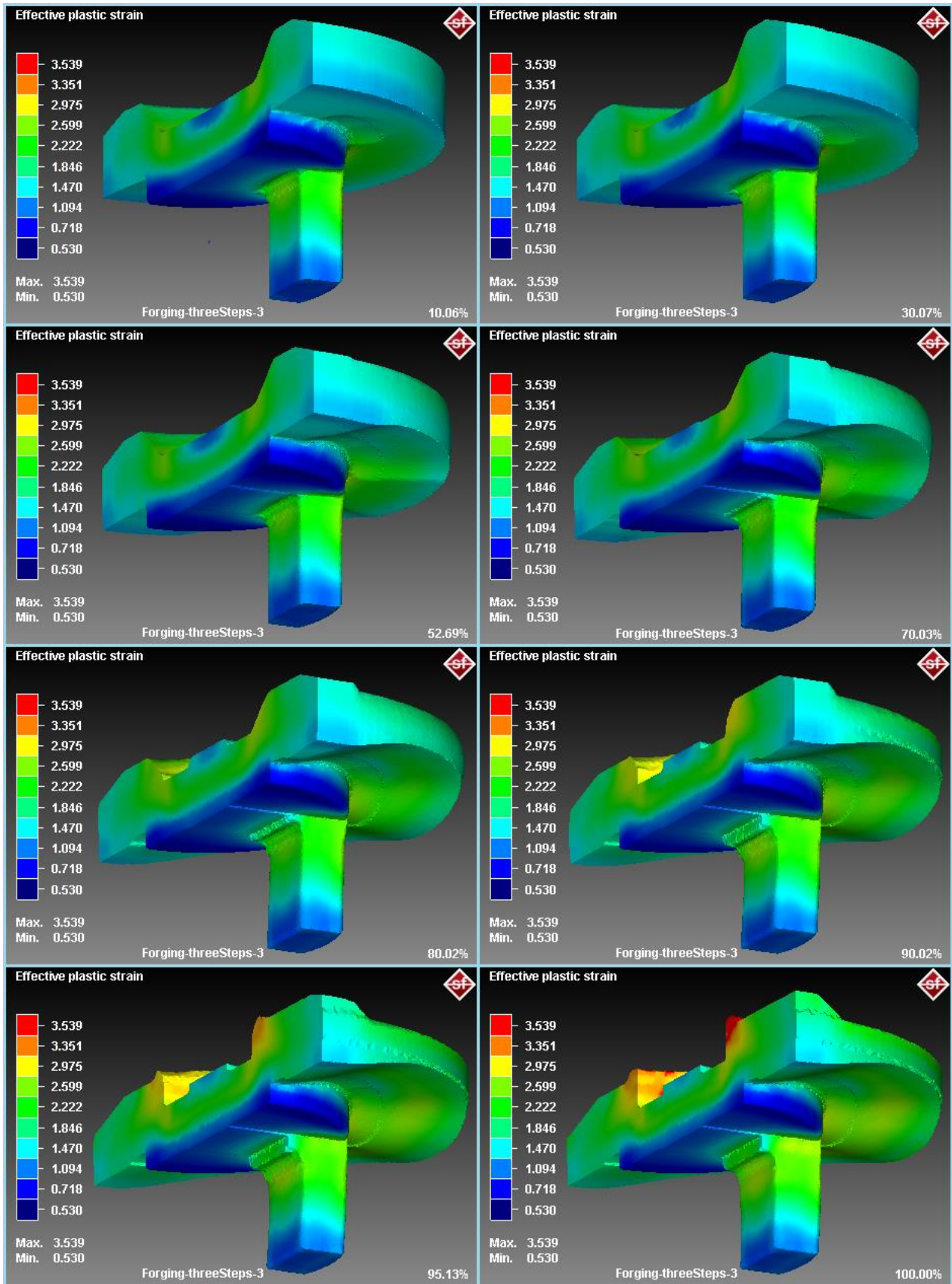


Σχήμα 7.49: Κατανομή της ενεργού πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις του 1^{ου} σταδίου της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης



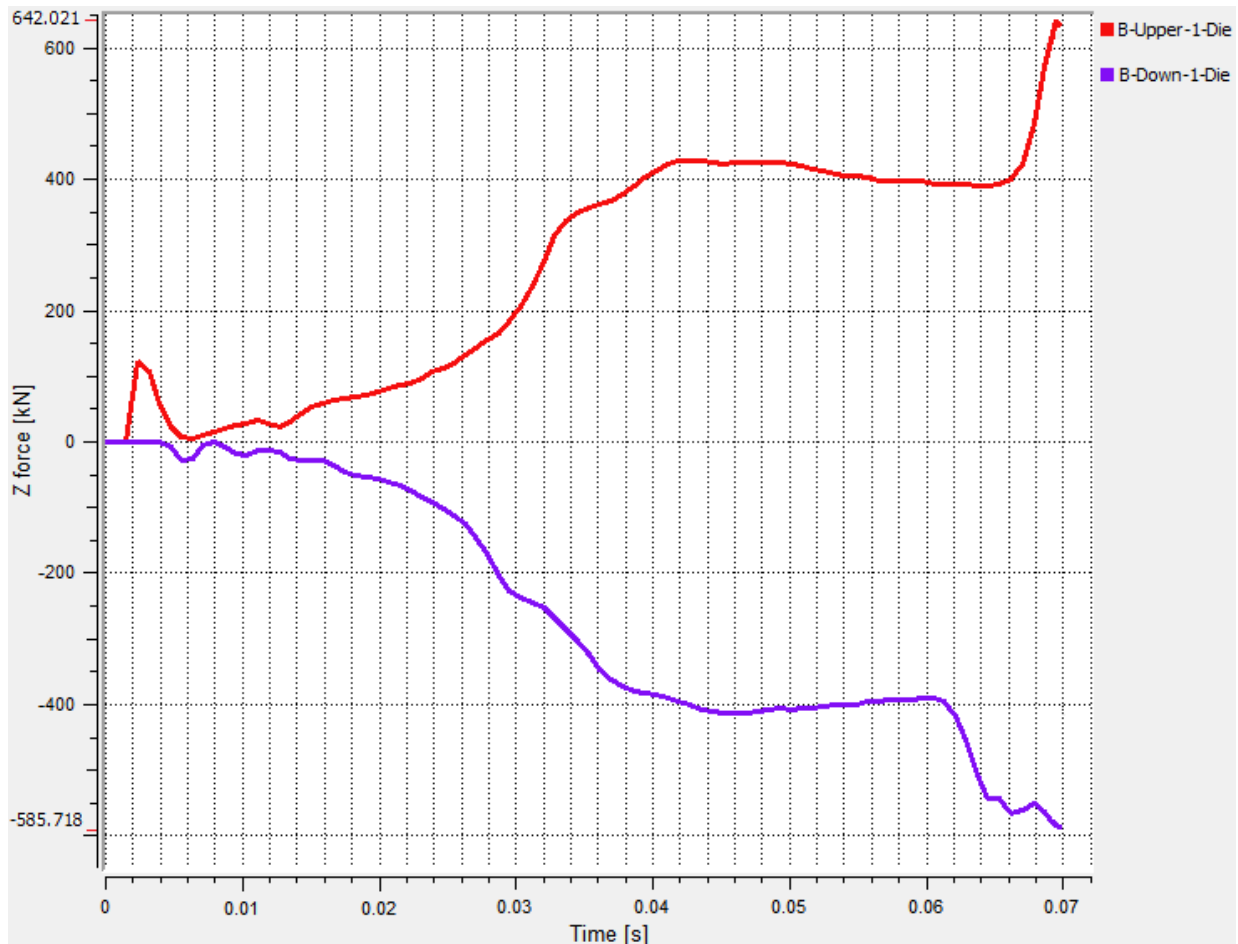
Σχήμα 7.50: Κατανομή της ενεργού πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις του 2^{ου} σταδίου της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE



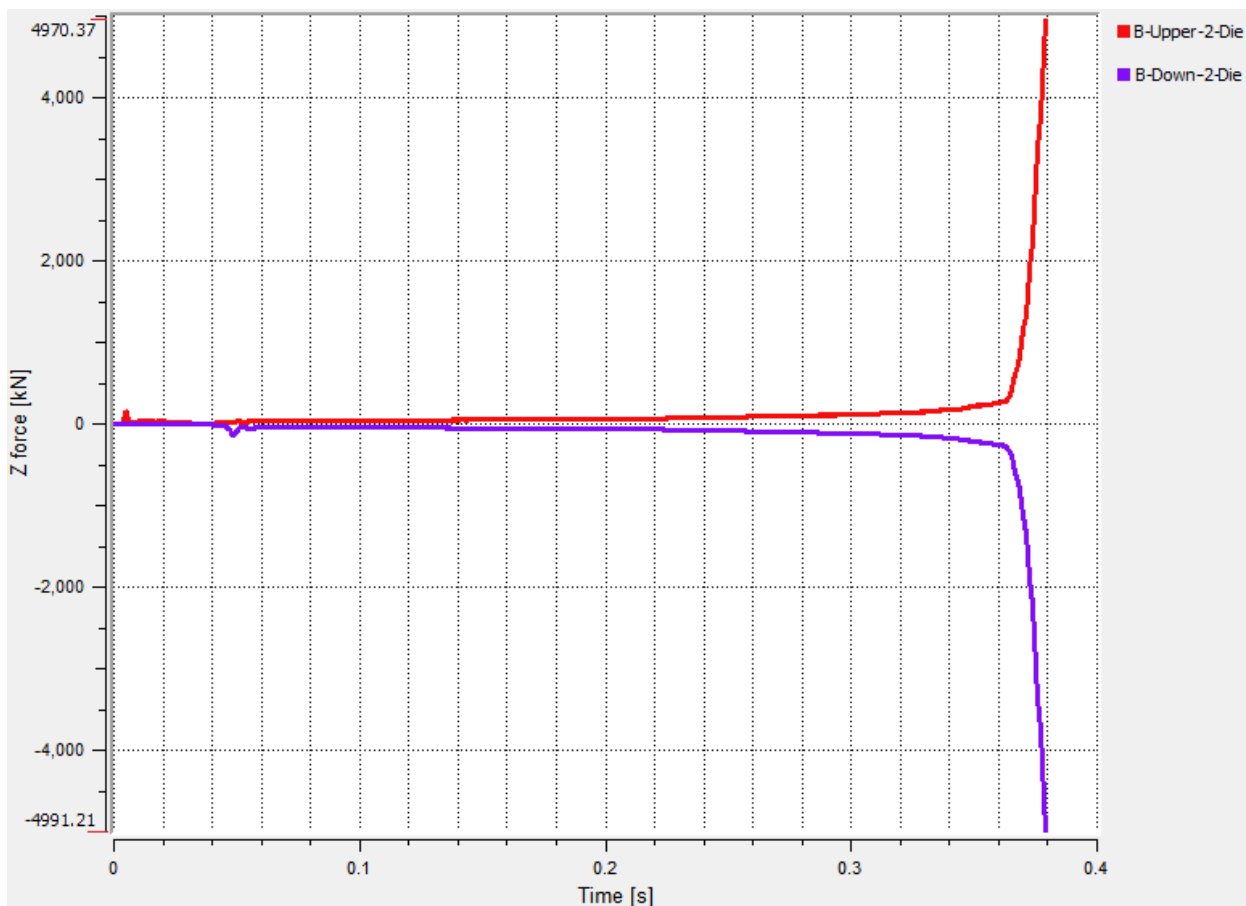
Σχήμα 7.51: Κατανομή της ενεργού πλαστικής παραμόρφωσης του τεμαχίου σε διάφορες φάσεις του 3^{ου} σταδίου της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 7.52, 7.53 και 7.54 παρουσιάζεται η μεταβολή των κάθετων δυνάμεων που ασκήθηκαν στα εσωτερικά τμήματα των μητρών της σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης, συναρτήσεως του χρόνου. Υπενθυμίζεται ότι τα άνω τμήματα των μητρών τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1mm πάνω από το τεμάχιο κατά τη προσομοίωση. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται μηδενικές δυνάμεις στην αρχή των καμπυλών των διαγραμμάτων.



Σχήμα 7.52: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας του 1^{ου} σταδίου σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης συναρτήσεως του χρόνου. Κόκκινο: Άνω μήτρα 1^{ου} σταδίου, μοβ: Κάτω μήτρα 1^{ου} σταδίου

Στο διάγραμμα δύναμης-χρόνου των τμημάτων της μήτρας του πρώτου σταδίου (Σχήμα 7.52) παρατηρείται ότι οι δυνάμεις αναπτύσσονται από τα πρώτα βήματα της κατεργασίας καθώς σχηματίζονται τα νεύρα, ενώ οι μέγιστες δυνάμεις εμφανίζονται στο τέλος της κατεργασίας όπου γίνεται πλήρωση της μήτρας και αναπτύσσονται μεγάλες πιέσεις σε αυτήν. Επίσης, προς το τέλος της κατεργασίας πριν την πλήρωση της μήτρας, παρατηρείται μια μικρή μείωση των δυνάμεων κάτι που πιθανόν να οφείλεται στο ότι οι δυνάμεις τριβής μειώνονται καθώς η ροή του υλικού μέσα στο χώρο των νεύρων μειώνεται. Επιπλέον, στην αρχή της κατεργασίας παρατηρείται μια μικρή αυξομείωση της δύναμης που ασκείται στο άνω τμήμα της μήτρας, και εμφανίζεται κατά τη στιγμή που το άνω τμήμα έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο.

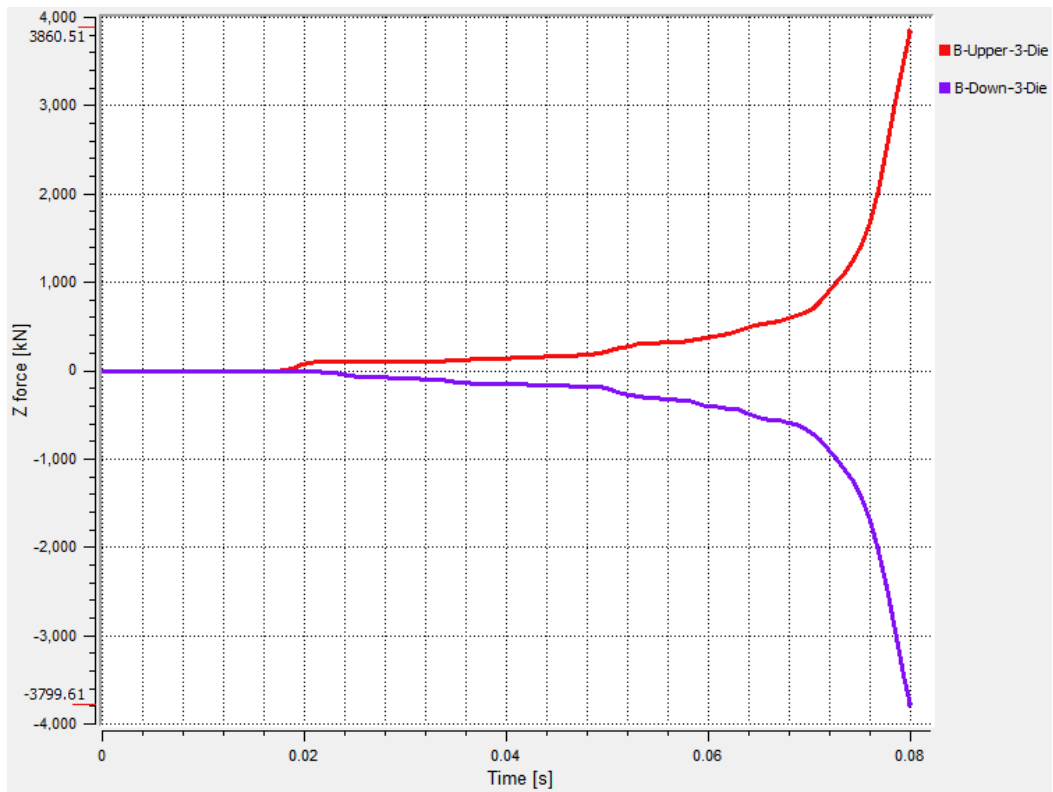


Σχήμα 7.53: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας του 2^{ου} σταδίου σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης συναρτήσεϊ του χρόνου. Κόκκινο: Άνω μήτρα 2^{ου} σταδίου, μοβ: Κάτω μήτρα 2^{ου} σταδίου

Στο Σχήμα 7.53 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου των τμημάτων της μήτρας του δεύτερου σταδίου σφυρηλάτησης. Στο δεύτερο στάδιο της κατεργασίας πραγματοποιούνται οι μεγαλύτερες αλλαγές στη μορφή του τεμαχίου, δηλαδή μειώνεται το ύψος του τεμαχίου και αυξάνεται η διάμετρος του. Κατά τη διάρκεια των αλλαγών αυτών η ροή του υλικού είναι αρκετά ελεύθερη μέσα στη μήτρα, γι' αυτό και οι δυνάμεις παραμένουν σε χαμηλές τιμές. Στο τέλος της κατεργασίας παρατηρείται απότομη αύξηση των δυνάμεων που οφείλεται στη πλήρωση της μήτρας.

Στο Σχήμα 7.54 παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-χρόνου των τμημάτων της μήτρας του τρίτου σταδίου σφυρηλάτησης. Στο στάδιο αυτό γίνεται η διαμόρφωση των λεπτομερειών του τελικού τεμαχίου. Κατά τη διαμόρφωση αυτών των λεπτομερειών όπως είναι αναμενόμενο το υλικό καλύπτει σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια της μήτρας και οι δυνάμεις μεγιστοποιούνται στο τελευταίο βήμα της κατεργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΩΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ CAM PLATE



Σχήμα 7.54: Διάγραμμα δυνάμεων που ασκούνται στα εσωτερικά τμήματα της μήτρας του 3^{ου} σταδίου σφυρηλάτησης τριών σταδίων διαμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου. Κόκκινο: Άνω μήτρα 3^{ου} σταδίου, μοβ: Κάτω μήτρα 3^{ου} σταδίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο σχεδιασμός καλουπιού σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας ακριβείας για την κατασκευή τεμαχίου σύνθετης γεωμετρίας με τη χρήση του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού (ΑΜΣ). Όπως έχει αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 2, ο ΑΜΣ είναι μια απαραίτητη διαδικασία στο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας που βρίσκει ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή σε διάφορα πεδία όπως στην αρχαιολογία και στη βιοϊατρική.

Στην εργασία αυτή έγιναν οι διεργασίες του ΑΜΣ από το αρχικό στάδιο που είναι η απόκτηση τεμαχίου άγνωστης γεωμετρίας ως τη σχεδίαση του καλουπιού για τη κατασκευή του. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκαν τα στάδια: 1) της τρισδιάστατης σάρωσης του τεμαχίου, 2) της μοντελοποίησης του τεμαχίου, 3) της σχεδίασης του καλουπιού και 4) της προσομοίωσης της κατεργασίας. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι μία διάταξη τρισδιάστατου σαρωτή δομημένου φωτός και τα πακέτα λογισμικού “ISCAN3D”, “MESHLAB”, “SolidWorks” και “Simufact.forming”.

Κατά την εφαρμογή του ΑΜΣ διαπιστώθηκαν η σημασία της απόκτησης των ακριβέστερων αποτελεσμάτων στο κάθε στάδιο, οι άμεσες επιδράσεις που έχουν πάνω στα επόμενα στάδια, καθώς και η σημασία της καλής γνώσης του αντικειμένου στο κάθε στάδιο. Η σωστή και καλή γνώση του αντικειμένου σε κάθε στάδιο οδηγεί στα καλύτερα αποτελέσματα σε μικρότερο χρόνο εργασίας.

8.1 ΣΑΡΩΣΗ – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

Τρισδιάστατη σάρωση: Στο πρώτο στάδιο της εργασίας έγινε τρισδιάστατη σάρωση του τεμαχίου cam plate με τη βοήθεια του εξοπλισμού που υπάρχει στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα της σάρωσης που παρουσιάστηκαν στην εργασία προέκυψαν μετά από τρεις δοκιμές σάρωσης, όπου έγιναν διάφορες αλλαγές στη διάταξη (θέση τεμαχίου, γωνιά σάρωσης κλπ.), για την επίτευξη των καλύτερων αποτελεσμάτων. Όπως έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες τεχνικές σάρωσης. Παρόλο που τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αρκετά ικανοποιητικά, η σάρωση και με μια δεύτερη τεχνική, θα προσέφερε τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων με σκοπό τη χρησιμοποίηση των ακριβέστερων.

Μοντελοποίηση τεμαχίου: Το δεύτερο στάδιο της εργασίας ήταν η μοντελοποίηση του τεμαχίου που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Solidworks. Η ακρίβεια των δεδομένων που προκύπτουν από τη σάρωση και η δυνατότητα του λογισμικού να επεξεργάζεται τα δεδομένα αυτά, είναι οι παράγοντες για την επιτυχή μοντελοποίηση του τεμαχίου. Τα δεδομένα της σάρωσης αφού

επεξεργάστηκαν στο λογισμικό MeshLab αποθηκεύτηκαν σε αρχείο “XYZ”. Το λογισμικό Solidworks δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας αρχείων “XYZ” με πολλούς τρόπους για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

8.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετοί παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός καλουπιού. Ο βασικός στόχος είναι η σχεδίαση ενός καλουπιού το οποίο να είναι χαμηλού κόστους και να πραγματοποιεί τη κατεργασία στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Εδώ είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι το τεμάχιο έχει διαμπερείς οπές. Συνεπώς, η σχεδίαση ενός καλουπιού που θα πραγματοποιούσε τη κατασκευή του τεμαχίου με τις οπές θα οδηγούσε σε ένα πολυσύνθετο καλούπι, το οποίο θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό, οι οπές θεωρήθηκε ότι μπορούν να δημιουργηθούν μετά τη σφυρηλάτηση του τεμαχίου σε μια μηχανή CNC και το στάδιο αυτό θα αποτελούσε το τελικό βήμα της κατεργασίας του τεμαχίου.

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν δύο σχέδια καλουπιών τα οποία κατασκευάζουν το τεμάχιο με δυο διαφορετικούς τρόπους και τα οποία έχουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Καλούπι ενός σταδίου διαμόρφωσης: Αρχικά το καλούπι που σχεδιάστηκε ήταν ένα απλό καλούπι που αποτελούταν από μήτρα δύο τμημάτων (άνω και κάτω) και η κατεργασία γινόταν σε ένα στάδιο. Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του τεμαχίου, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για τη κατασκευή του τεμαχίου με βάση αυτό το καλούπι, παρατηρήθηκαν μεγάλες δυνάμεις στη μήτρα καθώς και διαρροή του υλικού. Μετά από αρκετές αλλαγές που έγιναν στη διάμετρο της μπιγέτας, η κατασκευή του τεμαχίου θεωρήθηκε αδύνατη να επιτευχθεί με το συγκεκριμένο καλούπι. Συνεπώς, καταλήξαμε στο τελικό καλούπι ενός σταδίου διαμόρφωσης, όπως παρουσιάστηκε, το οποίο σχεδιάστηκε με ορισμένες αλλαγές σε σχέση με το αρχικό καλούπι ώστε αυτές οι αλλαγές να καθιστούν το καλούπι λειτουργικό. Οι αλλαγές που έγιναν ήταν ο χωρισμός της κάτω μήτρας σε δύο μέρη και η χρήση ενός ελατηρίου πίεσεως. Ουσιαστικά με αυτές τις αλλαγές το καλούπι διαμορφώνει το τεμάχιο σε δύο φάσεις (η πρώτη είναι κατά τη διάρκεια τη συμπίεσης του ελατηρίου και η δεύτερη μετά τη πλήρη συμπίεση του). Με αυτό το σχεδιασμό του καλουπιού επιτεύχθηκε ο στόχος της σφυρηλάτησης σε ένα στάδιο κατεργασίας. Η χρήση όμως ελατηρίου πίεσεως, που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση τεμαχίου χάλυβα με κατεργασία σφυρηλάτησης, όπου αναπτύσσονται μεγάλες πιέσεις, έχει ιδιαίτερες σχεδιαστικές απαιτήσεις και δεν συναντάται στη μηχανουργεία. Το ελατήριο πίεσεως μπορεί να αντικατασταθεί από ένα υδραυλικό σύστημα (αντλία) το οποίο όμως έχει μεγαλύτερο κόστος και για το λόγο αυτό αποφεύγεται στα καλούπια σφυρηλάτησης.

Καλούπι τριών σταδίων διαμόρφωσης: Το καλούπι αυτό σχεδιάστηκε ώστε η διαμόρφωση του τεμαχίου να γίνεται σε τρία στάδια. Η διαμόρφωση σε περισσότερα από ένα στάδια είναι μια συνηθισμένη διαδικασία σε μαζική παραγωγή τεμαχίων, ειδικά σε σκληρά υλικά όπως είναι ο χάλυβας. Αυτό προσφέρει ομαλότερη ροή του υλικού μέσα στις μήτρες. Επίσης, οι δυνάμεις και οι πιέσεις που ασκούνται στις μήτρες των διάφορων σταδίων είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στο καλούπι ενός σταδίου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν. Βασικά στα δύο πρώτα στάδια της κατεργασίας γίνεται μια προδιαμόρφωση της μπιγέτας, ώστε στο τελευταίο στάδιο, που είναι και το πιο σημαντικό, να υπάρχουν όσο το δυνατόν οι καλύτερες συνθήκες για την διαμόρφωση του τεμαχίου. Αυτό έχει ως φυσικό επακόλουθο η μήτρα του τρίτου σταδίου να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τη μήτρα του καλουπιού ενός σταδίου. Το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι απαιτείται ένας χειριστής ή ένα αυτοματοποιημένο σύστημα για τη μεταφορά της μπιγέτας από το ένα στάδιο στο άλλο. Επίσης ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία ενός τεμαχίου είναι μεγαλύτερος σε σχέση με το χρόνο που απαιτείται στο καλούπι σφυρηλάτησης ενός σταδίου διαμόρφωσης.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι εκτός της μήτρας των καλουπιών, της οποίας οι διαστάσεις υπολογίστηκαν με βάση το τεμάχιο, οι διαστάσεις των υπολοίπων τμημάτων των καλουπιών ορίστηκαν υποθετικά με βάση μελέτες καλουπιών που διαμορφώνουν παρόμοιου μεγέθους τεμάχια καθώς και βάσει καλουπιών που συναντώνται στη βιομηχανία. Η μελέτη της αντοχής των καλουπιών θα μπορούσε να καθορίσει τις διαστάσεις αυτές.

8.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ

Είναι σημαντικό εδώ να αναφερθεί ότι ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο σχεδιασμός καλουπιού σφυρηλάτησης κλειστής μήτρας ακριβείας για τη κατασκευή του τεμαχίου cam plate. Οι προσομοιώσεις της κατεργασίας έγιναν για να διαπιστωθεί αν τα καλούπια που σχεδιάστηκαν είναι λειτουργικά, δηλαδή ότι μπορούν να διαμορφώσουν το τεμάχιο χωρίς να εμφανίζονται ασυνήθιστες τιμές δυνάμεων, θερμοκρασιών, τάσεων κλπ., τόσο στις μήτρες όσο και στο τεμάχιο. Όπως προαναφέρθηκε, το αρχικό σχέδιο για το καλούπι ενός σταδίου έπειτα από τη προσομοίωση του χρειάστηκε επανασχεδιασμό για να μπορέσει να θεωρηθεί λειτουργικό. Επίσης οι προσομοιώσεις βοήθησαν στη τελική μορφή των τμημάτων προδιαμόρφωσης (μήτρες 1^ο και 2^ο στάδιο) του καλουπιού τριών σταδίων διαμόρφωσης.

Οι τιμές των “επιτρεπτών” αποτελεσμάτων (δυνάμεων, πιέσεων, θερμοκρασιών κλπ.) καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για τις προσομοιώσεις (θερμοκρασίες καλουπιών, ταχύτητα εμβόλου πρέσας, συντελεστή τριβής κλπ.), βασίστηκαν σε επιστημονικά άρθρα στα οποία είχαν πραγματοποιηθεί παρόμοιες μελέτες κατεργασιών διαμόρφωσης.

Όπως παρατηρείται στο Πίνακα 8.1, στο πρώτο καλούπι η μέγιστη δύναμη (8698,38 kN) εμφανίζονται στη άνω μήτρα, ενώ στο δεύτερο καλούπι η μέγιστη δύναμη (4991,21kN) εμφανίζονται στα τμήματα της μήτρας του δεύτερου σταδίου διαμόρφωσης. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα τμήματα της μήτρας του καλουπιού τριών σταδίων έχουν μικρότερες πλαστικές παραμορφώσεις (άρα ποιοτικότερη κατεργασία) καθώς και λιγότερες πιθανότητες εμφάνισης φθορών σε σχέση με τα τμήματα της μήτρας του καλουπιού ενός σταδίου διαμόρφωσης.

Πίνακας 8.1: Μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται στις μήτρες των δυο καλουπιών

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΑΣΚΟΥΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΜΗΤΡΕΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ		
		Μέγιστη Δύναμη κατά z (kN)
Καλούπι ενός σταδίου διαμόρφωσης	Άνω μήτρα	8698,38
	Μήτρα έμβολο	1117,64
	Κάτω μήτρα	7716,40
Καλούπι τριών σταδίων διαμόρφωσης	Άνω μήτρα 1 ^{ου}	642,02
	Κάτω μήτρα 1 ^{ου}	585,718
	Άνω μήτρα 2 ^{ου}	4970,37
	Κάτω μήτρα 2 ^{ου}	4991,21
	Άνω μήτρα 3 ^{ου}	3860,51
	Κάτω μήτρα 3 ^{ου}	3799,61

8.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στην εργασία αυτή ακολουθήθηκε η διαδικασία του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού (ΑΜΣ) από το αρχικό στάδιο που είναι η απόκτηση τεμαχίου άγνωστης γεωμετρίας ως τη σχεδίαση του καλουπιού για τη κατασκευή του. Για να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η διαδικασία του ΑΜΣ θα πρέπει να γίνει η κατασκευή του καλουπιού καθώς και να πραγματοποιηθεί η κατεργασία σφυρηλάτησης έτσι ώστε να δημιουργηθεί το προϊόν. Στη συνέχεια το προϊόν σφυρηλάτησης, αφού σαρωθεί, συγκρίνεται με το αρχικό τεμάχιο. Στη περίπτωση που θεωρηθεί ακατάλληλο το προϊόν, επαναλαμβάνεται εκ νέου η διαδικασία του ΑΜΣ και γίνονται αλλαγές όπου κρίνεται αναγκαίο (πχ σχεδιασμός καλουπιών, παράμετροι σφυρηλάτησης κλπ.)

Συνεπώς, μελλοντικές μελέτες που μπορούν να γίνουν είναι η εκτενέστερη μελέτη της σφυρηλάτησης του τεμαχίου, με βάση τα καλούπια που σχεδιάστηκαν, όπου θα γίνονται προσομοιώσεις με διάφορες αλλαγές στις παραμέτρους (διάφορες ταχύτητες εμβόλου πρέσας, προθέρμανσης μπιγέτας κλπ.). Επίσης, ξεχωριστή μελέτη μπορεί να γίνει για την εύρεση των κατάλληλων διαστάσεων και του σχήματος του αρχικού δοκιμίου, ώστε η κατεργασία να πετυχαίνει το καλύτερο αποτέλεσμα.

Μια άλλη σημαντική μελέτη που μπορεί να γίνει είναι η μελέτη της αντοχής των καλουπιών που σχεδιάστηκαν. Μια τέτοια μελέτη όπου θα παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιέσεις, οι δυνάμεις, οι πλαστικές παραμορφώσεις κλπ., θα βοηθήσει ώστε να καθοριστούν τα κατάλληλα υλικά των τμημάτων του καλουπιού, καθώς και οι επιτρεπτές διαστάσεις των τμημάτων αυτών (όπως έχει προ αναφερθεί οι διαστάσεις των τμημάτων βασίστηκαν σε μελέτες καλουπιών σφυρηλάτησης, παρόμοιου μεγέθους τεμαχίου).

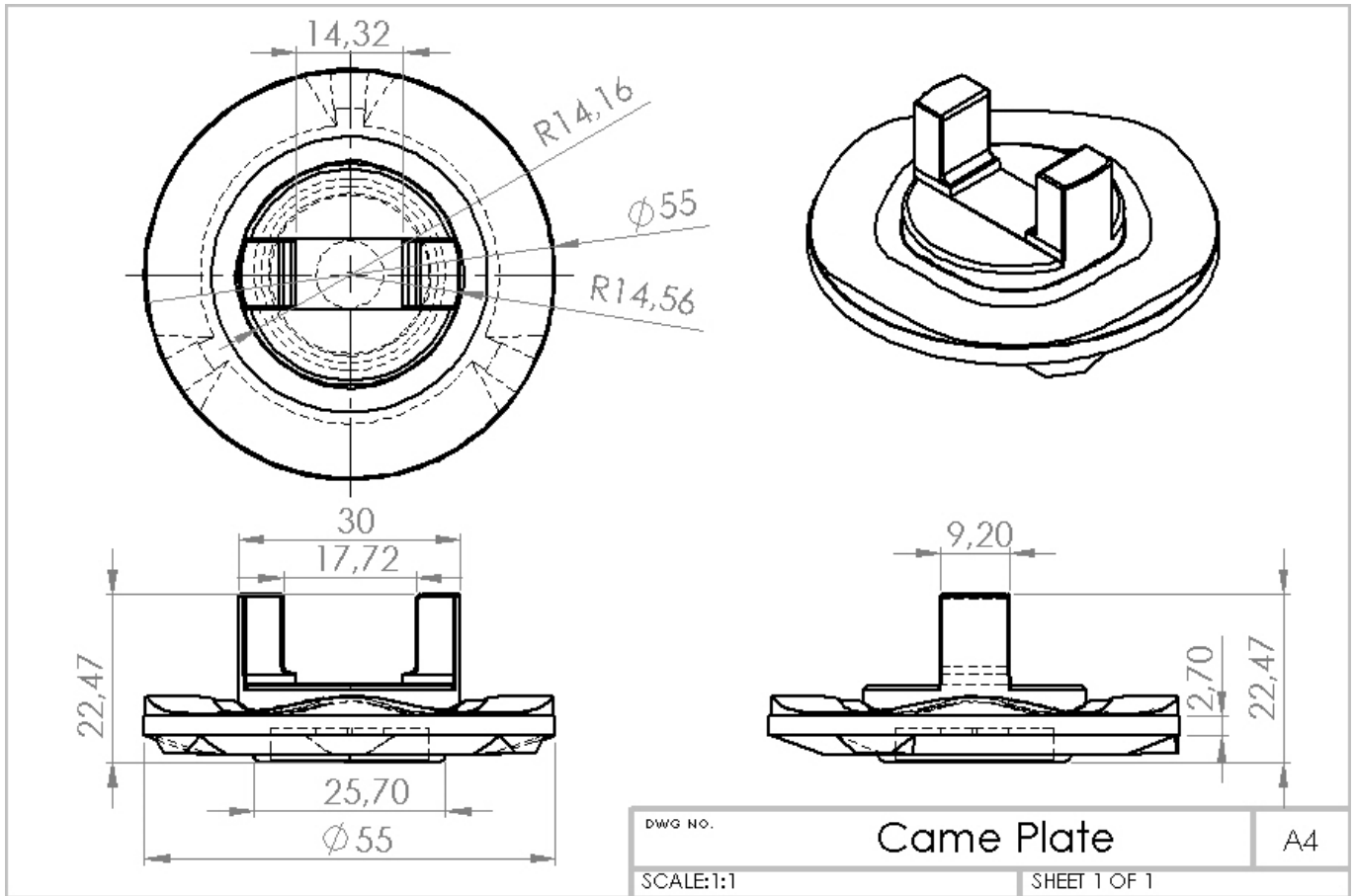
Αφού πραγματοποιηθούν οι πιο πάνω μελέτες, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας του ΑΜΣ, πρέπει να γίνει και μελέτη για τη κατασκευή των καλουπιών. Δεδομένου ότι θα είναι γνωστά τα υλικά των τμημάτων του καλουπιού, στη μελέτη αυτή θα γίνεται επιλογή των κατάλληλων εργαλείων και μηχανημάτων για τη κατασκευή του, καθώς και ο προγραμματισμός της κατεργασίας.

Μια άλλη μελέτη που μπορεί να γίνει είναι για τη δημιουργία των οπών του τεμαχίου, οι οποίες δεν μπορούσαν να συμπεριληφθούν στην κατεργασία σφυρηλάτησης. Μια τέτοια μελέτη μπορεί να είναι είτε ο σχεδιασμός ενός καλουπιού που θα διαμορφώνει τις οπές (αν και θεωρητικά είναι εξαιρετικά δύσκολο να πετύχει μια τέτοια κατεργασία στο συγκεκριμένο τεμάχιο) είτε ο προγραμματισμός ενός κέντρου κατεργασίας CNC όπου θα πραγματοποιεί αποβολή υλικού για τη δημιουργία των οπών.

Τέλος, αφού πραγματοποιηθούν όλες οι πιο πάνω μελέτες, μπορεί να γίνει μια μελέτη η οποία θα παρουσιάζει τις οικονομικές πτυχές της κατασκευής και λειτουργίας του κάθε καλουπιού. Σε μια τέτοια μελέτη θα λαμβάνονται υπόψη το κόστος των υλικών των καλουπιών, το κόστος κατασκευής τους καθώς και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας των καλουπιών. Επίσης, θα λαμβάνονται υπόψη και οι ανάγκες της αγοράς καθώς και η δυνατότητα παραγωγής του κάθε καλουπιού. Η μελέτη αυτή θα μπορεί να παρουσιάσει συμπεράσματα που θα κρίνουν ποιο καλούπι είναι οικονομικά συμφέρον και αν είναι δυνατή η προώθηση του στη βιομηχανία για μαζική παραγωγή του προϊόντος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΕΜΑΧΙΟΥ CAM PLATE



Override Mass Properties... Recalculate

Include hidden bodies/components
 Create Center of Mass feature
 Show weld bead mass

Report coordinate values relative to: -- default --

Mass properties of Teliko AA 2
 Configuration: Default
 Coordinate system: -- default --

Density = 0.00100 grams per cubic millimeter

Mass = 16.01323 grams

Volume = 16013.23251 cubic millimeters

Surface area = 6912.53693 square millimeters

Center of mass: (millimeters)
 X = 0.00006
 Y = -4.16536
 Z = -0.00002

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

B.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ

42CrMo4 (1.7225)

Grade :	42CrMo4
Number:	1.7225
Classification:	Alloy special steel
Standard:	EN 10083-3: 2006 Steels for quenching and tempering. Technical delivery conditions for alloy steels EN 10132-3: 2000 Cold rolled narrow steel strip for heat treatment. Technical delivery conditions. Steels for quenching and tempering EN 10305-1: 2010 Steel tubes for precision applications. Seamless cold drawn tubes. Technical delivery conditions EN 10269: 1999 Steels and nickel alloys for fasteners with specified elevated and/or low temperature properties EN 10263-4: 2001 Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion. Technical delivery conditions for steels for quenching and tempering EN 10250-3: 2000 Open steel die forgings for general engineering purposes. Alloy special steels EN 10297-1: 2003 Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes. Non-alloy and alloy steel tubes. Technical delivery conditions
Equivalent grades:	Go here

Chemical composition % of grade 42CrMo4 (1.7225): EN 10083-3-2006

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.38 - 0.45	max 0.4	0.6 - 0.9	max 0.025	max 0.035	0.9 - 1.2	0.15 - 0.3

Mechanical properties of grade 42CrMo4 (1.7225)

Nominal diameter (mm):	to 16	16 - 40	40 - 100	100 - 160	160 - 250	250 - 330	330 - 660
Rm - Tensile strength (MPa) (+QT)	1100-1300	1000-1200	900-1100	800-950	750-900	700	600
Nominal thickness (mm):	0.3 - 3						
Rm - Tensile strength (MPa) (+A)	620						
Rm - Tensile strength (MPa) (+AC)	630						
Nominal thickness (mm):	to 8	8 - 20	20 - 50	50 - 80			
Rm - Tensile strength (MPa) (+QT)	1100	1000	900	800			
Rm - Tensile strength (MPa) (+C)	720						
Rm - Tensile strength (MPa) (+LC)	670						

Nominal diameter(mm): or for flat products thickness: to 8; 8-20; 20-60; 60-100; 100-160;	to 16	16 - 40	40 - 100	100 - 160	160 - 330	330 - 660
Re - Upper yield strength or R _{p0.2} - 0.2% proof strength (MPa) (+QT)	900	750	650	500-550	460-500	390
Nominal thickness(mm):	0.3 - 3					
R _{p0.2} 0.2% proof strength (MPa) (+A)	480					

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

KV - Impact energy (J) longitud., (+QT)	+20° 30-35
KV - Impact energy (J) transverse, (+QT)	+20° 22

Nominal thickness (mm):	0.3 - 3
A - Min. elongation $L_0 = 80$ mm (%) (+A)	15
A - Min. elongation at fracture (%) transverse, (+QT)	10-14
A - Min. elongation at fracture (%) (+C)	4
A - Min. elongation at fracture (%) (+LC)	6

Nominal thickness (mm):	to 16	16 - 40	40 - 100	100 - 160	160 - 250
A - Min. elongation $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ (%) (+QT), round products	10	11	12	13	14

Nominal diameter (mm): or for flat products thickness: to 8; 8-20; 20-60; 60-100; 100-160;	to 16	16 - 40	40 - 100	100 - 160	160 - 250
Z - Reduction in cross section on fracture (%) (+QT)	40	45	50	50	55
Z - Reduction in cross section on fracture (%) (+AC)	57				

Brinell hardness (HBW): (+S)	255
Brinell hardness (HBW): (+A)	241
Vickers hardness (HV): (+A)	195
Vickers hardness (HV): (+QT)	340 - 490

Properties of grade 42CrMo4 (1.7225)

Weldability: Bad weldability due to the high crack danger. Hardenability: Medium-good hardenability, suitable for hot purposes till a temperature of 500 C. It can be hardened in oil.

Equivalent grades of grade 42CrMo4 (1.7225)

Warning! Only for reference

USA -	Germany DIN, WNr	Japan JIS	France AFNOR	England BS	Italy UNI	Spain UNE	China GB	Sweden SS	Finland SFS	Russia GOST	Inter ISO
4140 4142	42CrMo4	SCM440H	42CD4	708M40 CFS11	42CrMo4	40CrMo4 F1252	42CrMo	2244	42CrMo4	35KHM 38KHM	42CrMo4

Mechanical properties

- R_{eH}** Minimum yield strength / Mindestwert der oberen Streckgrenze / Limite d elasticite minimale
- R_m** Tensile strength / Zugfestigkeit / Resistance a la traction
- A** Minimum elongation / Mindestwert der Bruchdehnung / Allongement minimal
- J** Notch impact test / Kerbschlagbiegeversuch / Essai de flexion par choc

Heat treatment conditions

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> +A Soft annealed +AC Annealed to achieve spheroidization of the carbides +AR As rolled +AT Solution annealed +C Cold drawn / hard +CR Cold rolled +FP Treated to ferrite-pearlite structure and hardness range +I Isothermal annealing +LC Cold drawn / soft +M Thermo mechanical rolling +N Normalized +NT Normalized and tempered | <ul style="list-style-type: none"> +P Precipitation hardened +PE Peeled +QA Air quenched and tempered +QL Liquid quenched and tempered +QT Quenched and tempered +S Treated to improve shearability +SH As rolled and turned +SR Cold drawn and stress relieved +T Tempered +TH Treated to hardness range +WW Warm worked +U Untreated |
|--|--|

Στοιχεία του υλικού όπως προσφέρονται στο λογισμικό *Simufact.forming*

File Tools Help

Menu
 General properties
 Chemical composition
 Mechanical properties
 Thermal properties
 Flow curves
 Anisotropy
 Damage
 Microstructure
 Phase transformation
 Data sheet

General properties

Name: DB.42CrMo4_h2
 Variant: Define variant
 Internal name: Define internal name
 DIN: 1.7225
 JIS: SCM440H
 AISI: 4140
 Area of application: Hot
 Group: General steel
 Import source: MATILDA
 Created by: Simufact

Comment
 Upper limit Temperaturbereich auf 1250 Grad Celsius erweitert.

Flow Curves

Approach
 Analytical Plasticity model: GMT

Scope

	Min	Max	Unit
Temperature:	800.0	1250.0	°C
Effective plastic strain:	0.05	2.0	-
Strain rate:	0.01	150.0	1/s

Microstructure model
 IFE WELDSIM Particle Size Distribution Model

Weldability
 Weldability
 Tool steel (purely elastic behavior)
 Rigid plasticity

Brief description (hold Ctrl key to lock)

File Tools Help

Menu
 General properties
 Chemical composition
 Mechanical properties
 Thermal properties
 Flow curves
 Anisotropy
 Damage
 Microstructure
 Phase transformation
 Data sheet

Mechanical properties

Parameter	Type	Constant values	Tables
Young's modulus:	Table	Constant value not used.	Show table
Poisson's ratio:	Constant	0.283	Create table
Density:	Constant	7.847e-09	Mg/mm³ Create table
Only for information / Not used for simulation:			
Yield strength:	Constant	128.392	N/mm² Create table
Tensile strength:	None	Constant value not used.	Create table
Ultimate strain:	None	Constant value not used.	Create table

Brief description (hold Ctrl key to lock)

Mechanical properties
 All mechanical properties are displayed. [More... \(F1\)](#)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

File Tools Help

Menu

- General properties
- Chemical composition
- Mechanical properties
- Thermal properties
- Flow curves
- Anisotropy
- Damage
- Microstructure
- Phase transformation
- Data sheet

Flow curve approach

Analytical Plasticity model: GMT Scaling factor / Rp0.2 adjustment Scaling factor: 1.00 + -

GMT

Formula

$$\sigma_F = C_1 \cdot e^{(c_2 \cdot T)} \cdot \varphi^{(n_1 \cdot T + n_2)} \cdot e^{\left(\frac{l_1 \cdot T + l_2}{\varphi}\right)} \cdot \dot{\varphi}^{(m_1 \cdot T + m_2)}$$

Edit parameters:

Constants

Constant	Abbr.	Value	Unit
Temperature min	T	800.0	°C
Temperature max	T	1250.0	°C
Strain min	φ	0.05	-
Strain max	φ	2.0	-

x-axis dimension: Strain

Specific curve (only for info)

Temperature: 1025.0 °C

Strain rate: 75.005 1/s

Brief description (hold Ctrl key to lock)

Data sheet
All essential information about the material is displayed. [More... \(F1\)](#)

File Tools Help

Menu

- General properties
- Chemical composition
- Mechanical properties
- Thermal properties
- Flow curves
- Anisotropy
- Damage
- Microstructure
- Phase transformation
- Data sheet

Anisotropy

Definition

Anisotropy model: Hill (48) + - Show applied data

Comparison of the models

Experimental data

Data	Value	Unit
r0°	0.0	-
r45°	0.0	-
r90°	0.0	-
rm	0.0	-
y0°	0.0	N/mm
y45°	0.0	N/mm
y90°	0.0	N/mm

Use rm (2D only)

Brief description (hold Ctrl key to lock)

B.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΛΙΚΟΥ ΜΗΤΡΑΣ ΣΦΥΡΗΛΑΤΗΣΗΣ - ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΑΣ**Εργαλειοχάλυβας DIN X32CrMoCoV3-3-3 (AISI H10A)****Designation by Standards**

Brand Name	Ravne No.	Mat. No.	DIN	EN	AISI
UTOPCO2	861	1.2885	X32CrMoCoV3-3-3	-	H10A

Chemical Composition (in weight %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Others
0.32	0.25	0.30	2.95	2.80	-	0.55	-	2.75 % Co

Description

This alloy is one of the hot work, cobalt containing tool steel.

Applications

Hot pressing tools exposed to severe stresses in contact with the die insert - mandrels, stamps, punching tools, dies, etc.

Physical properties (average values) at ambient temperature

Modulus of elasticity [$10^3 \times \text{N/mm}^2$]: 210

Density [g/cm^3]: 7.88

Coefficient of Linear Thermal Expansion $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

20-100 $^\circ\text{C}$	20-200 $^\circ\text{C}$	20-300 $^\circ\text{C}$	20-400 $^\circ\text{C}$	20-500 $^\circ\text{C}$	20-600 $^\circ\text{C}$	20-700 $^\circ\text{C}$
12.1	12.1	12.4	12.9	13.5	14.0	14.1

Soft Annealing

Heat to 800-840 $^\circ\text{C}$, cool slowly in furnace. This will produce a maximum Brinell hardness of 250.

Stress Relieving

Stress relieving to remove machining stresses should be carried out by heating to 650 $^\circ\text{C}$, holding for one hour at heat, followed by air cooling. This operation is performed to reduce distortion during heat treatment.

Hardening

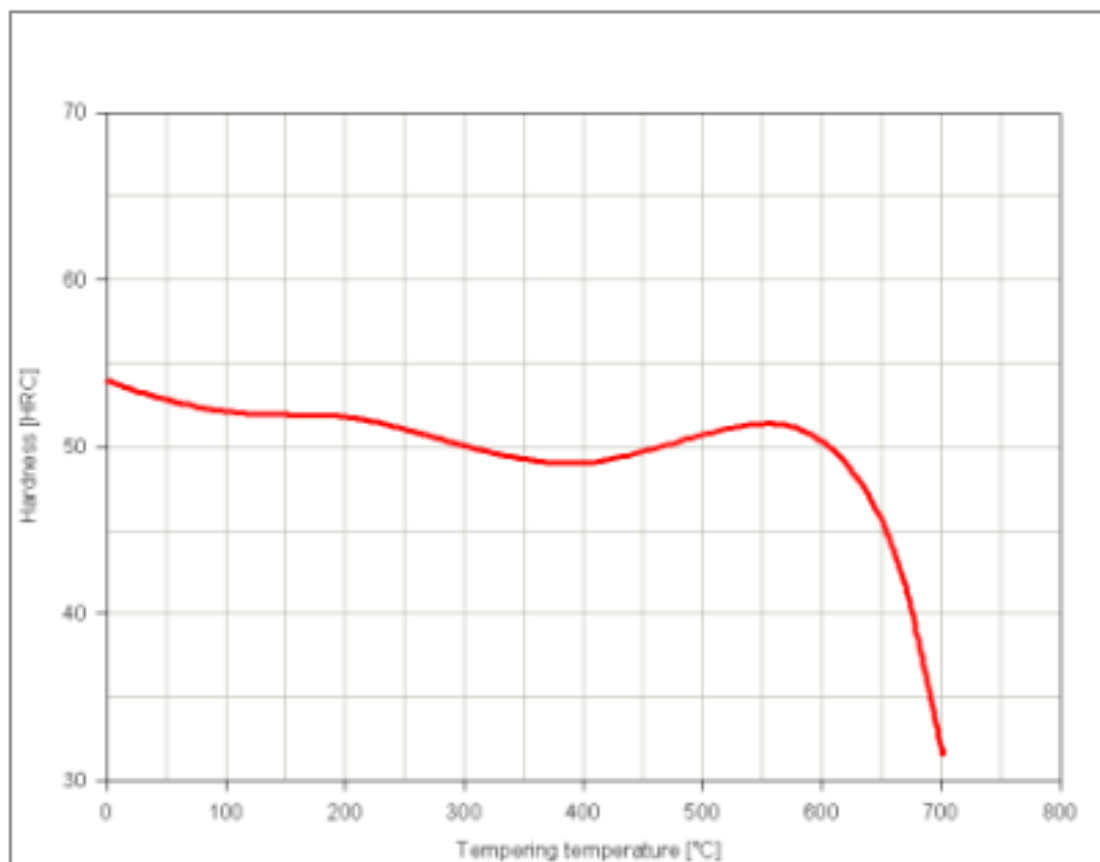
Harden from a temperature of 1020-1060 $^\circ\text{C}$ followed by oil, air or warm bath quenching. Hardness after quenching is 49-53 HRC.

Tempering

Tempering temperature: See the table and diagram below.

Tempering Temperature (°C) vs. Hardness (HRC)

400°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C
49	50	51	50	44	37

Tempering Diagram

Click the image to enlarge the diagram.

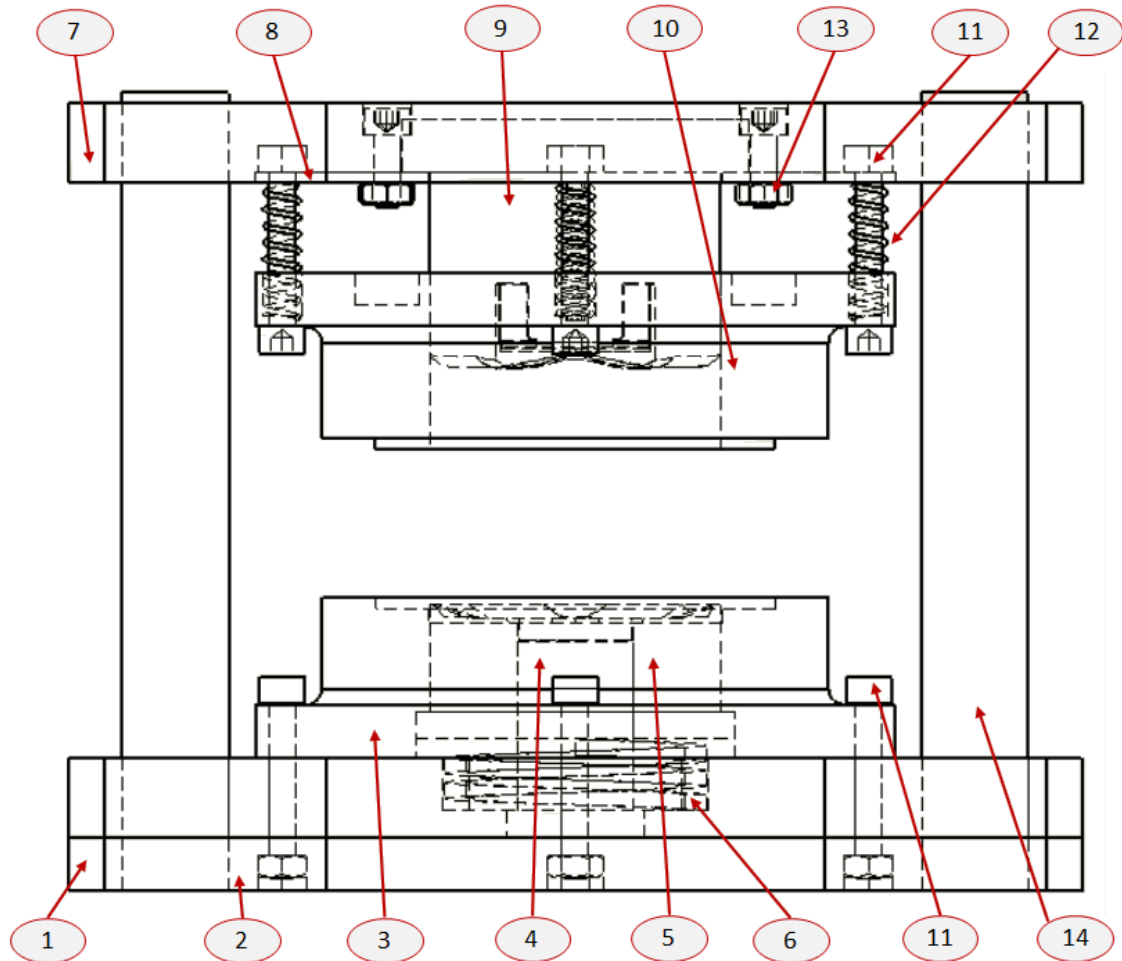
Forging

Hot forming temperature: 1100-990°C.

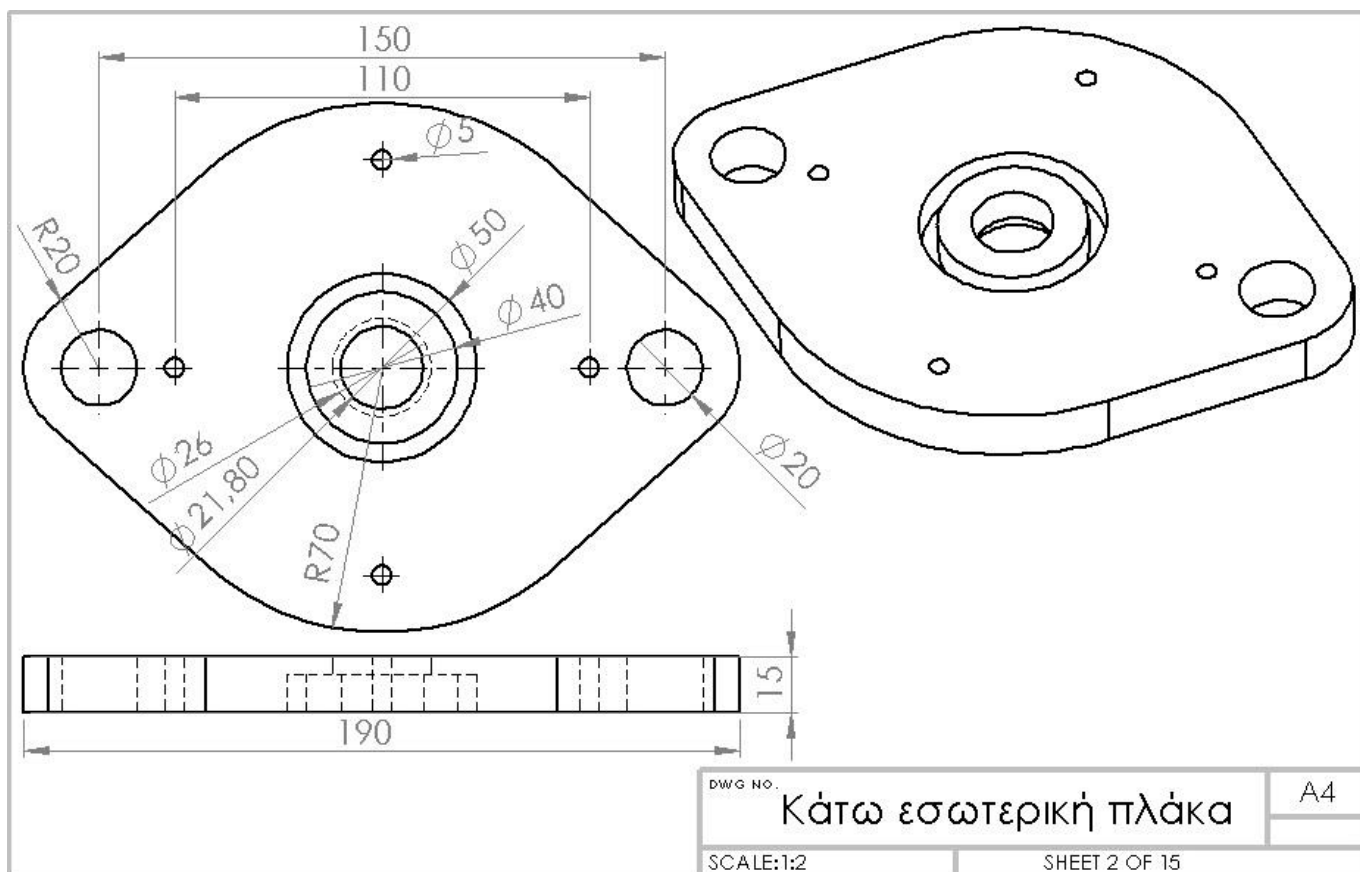
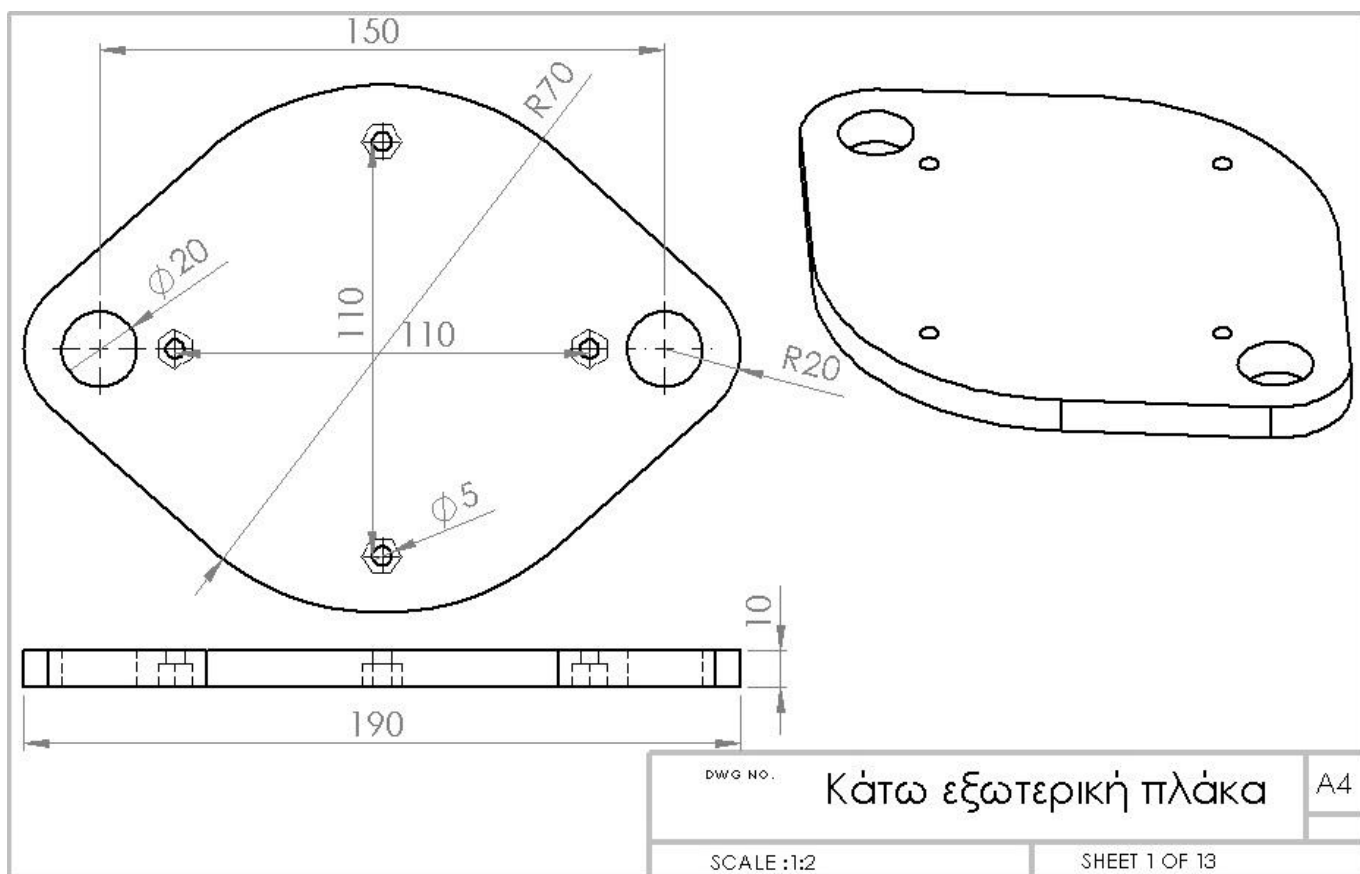
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

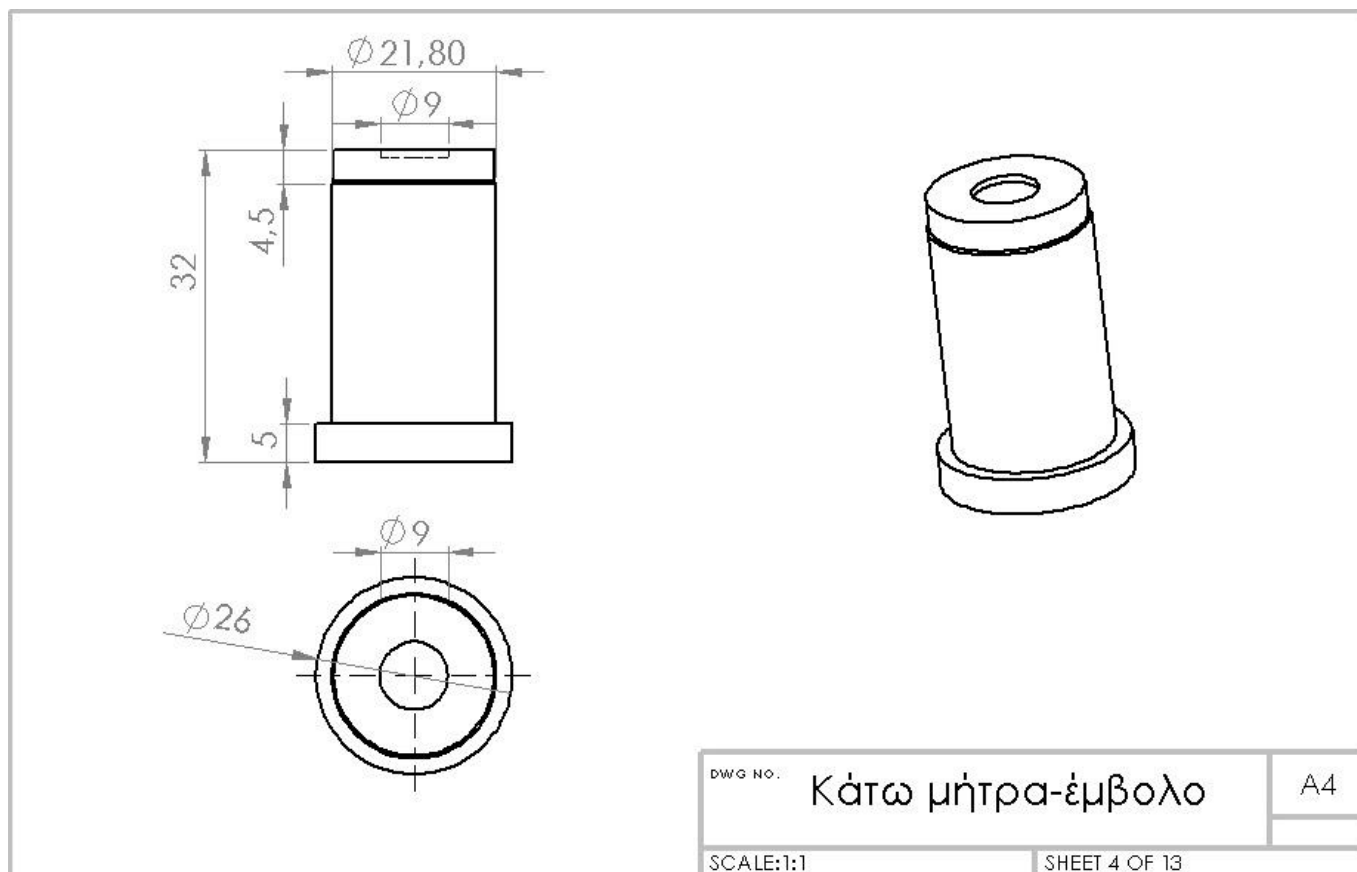
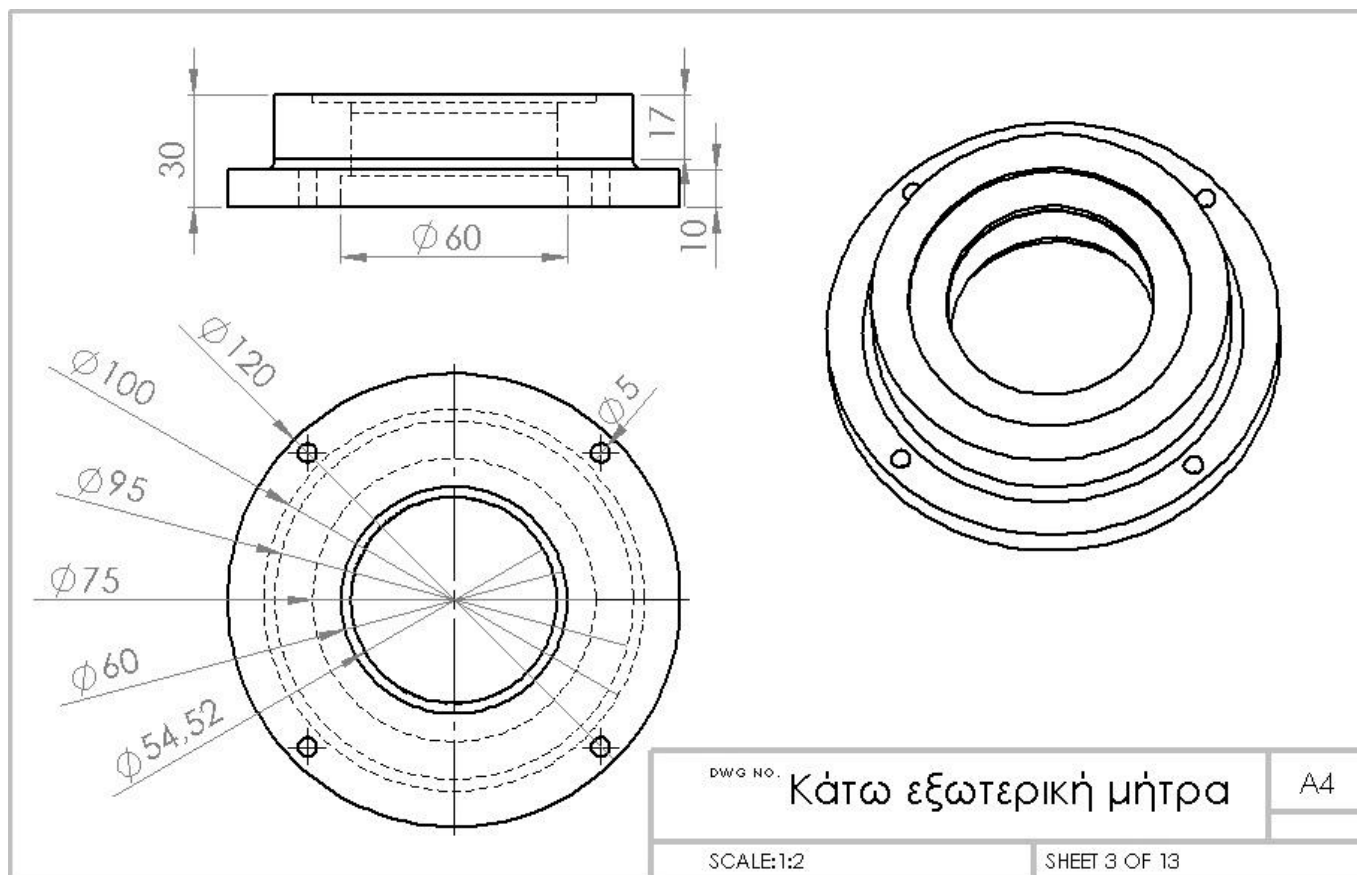
Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα σκαριφήματα των τμημάτων των δύο καλουπιών.

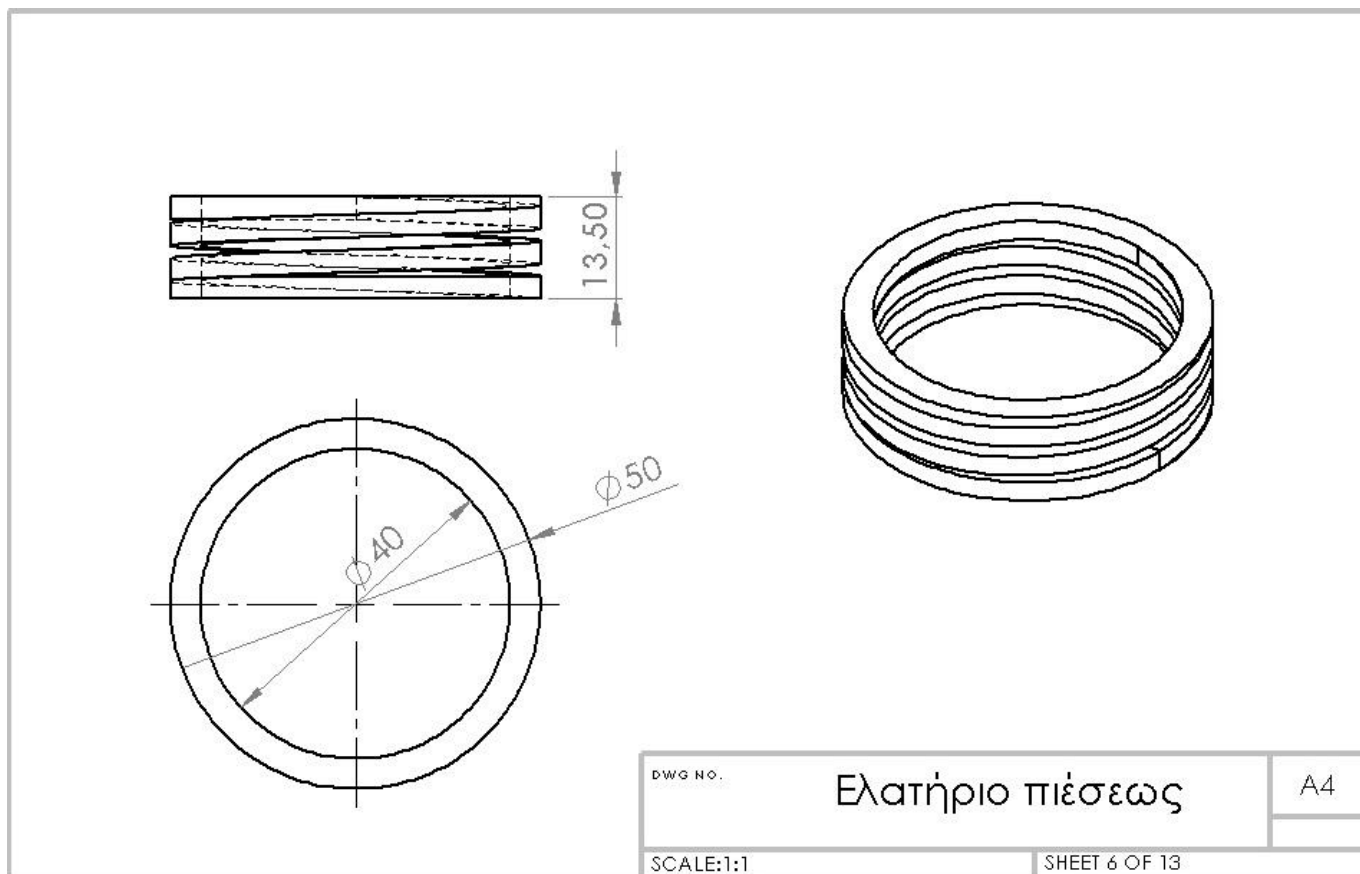
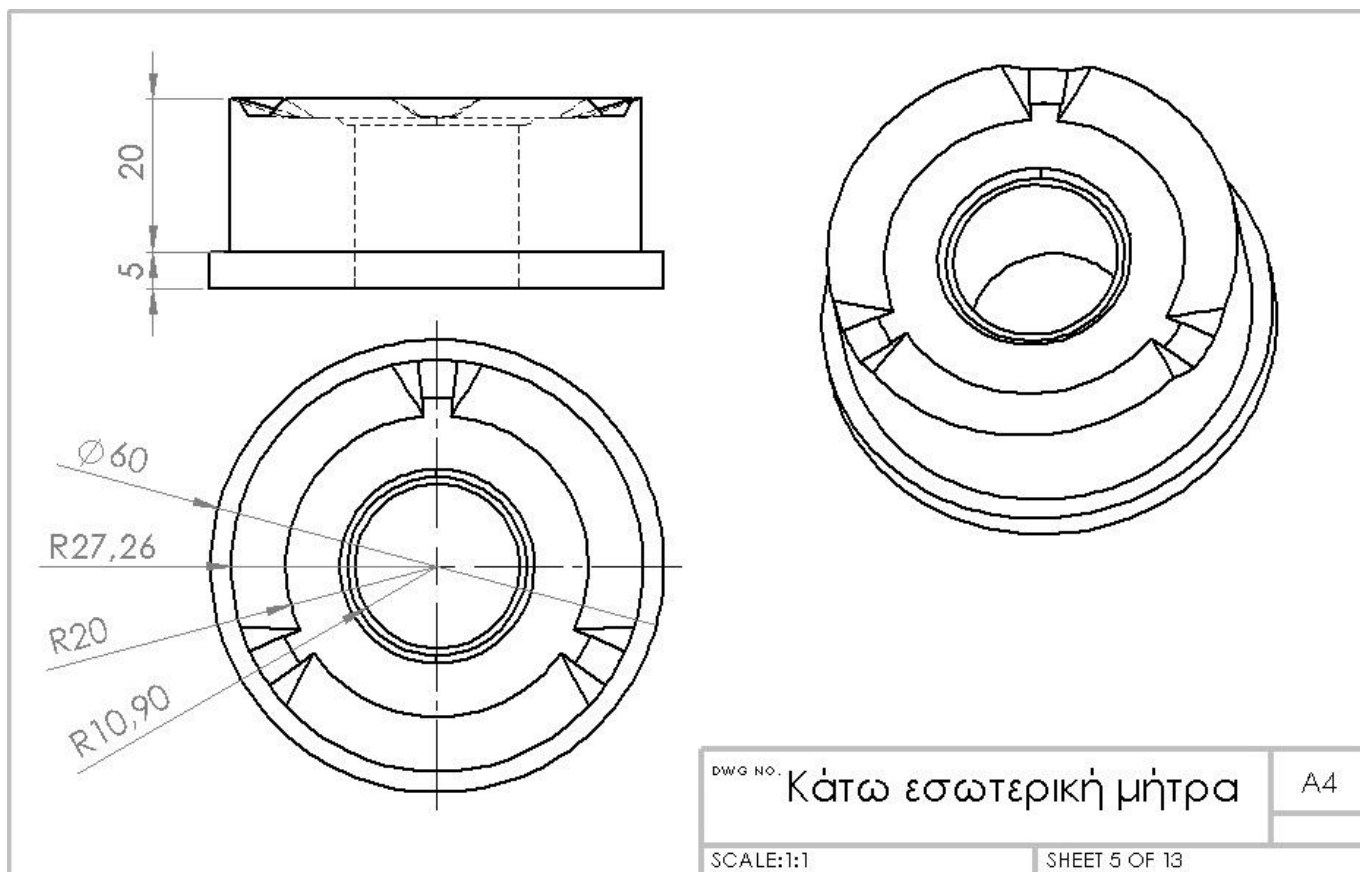
Γ.1 ΚΑΛΟΥΠΙ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

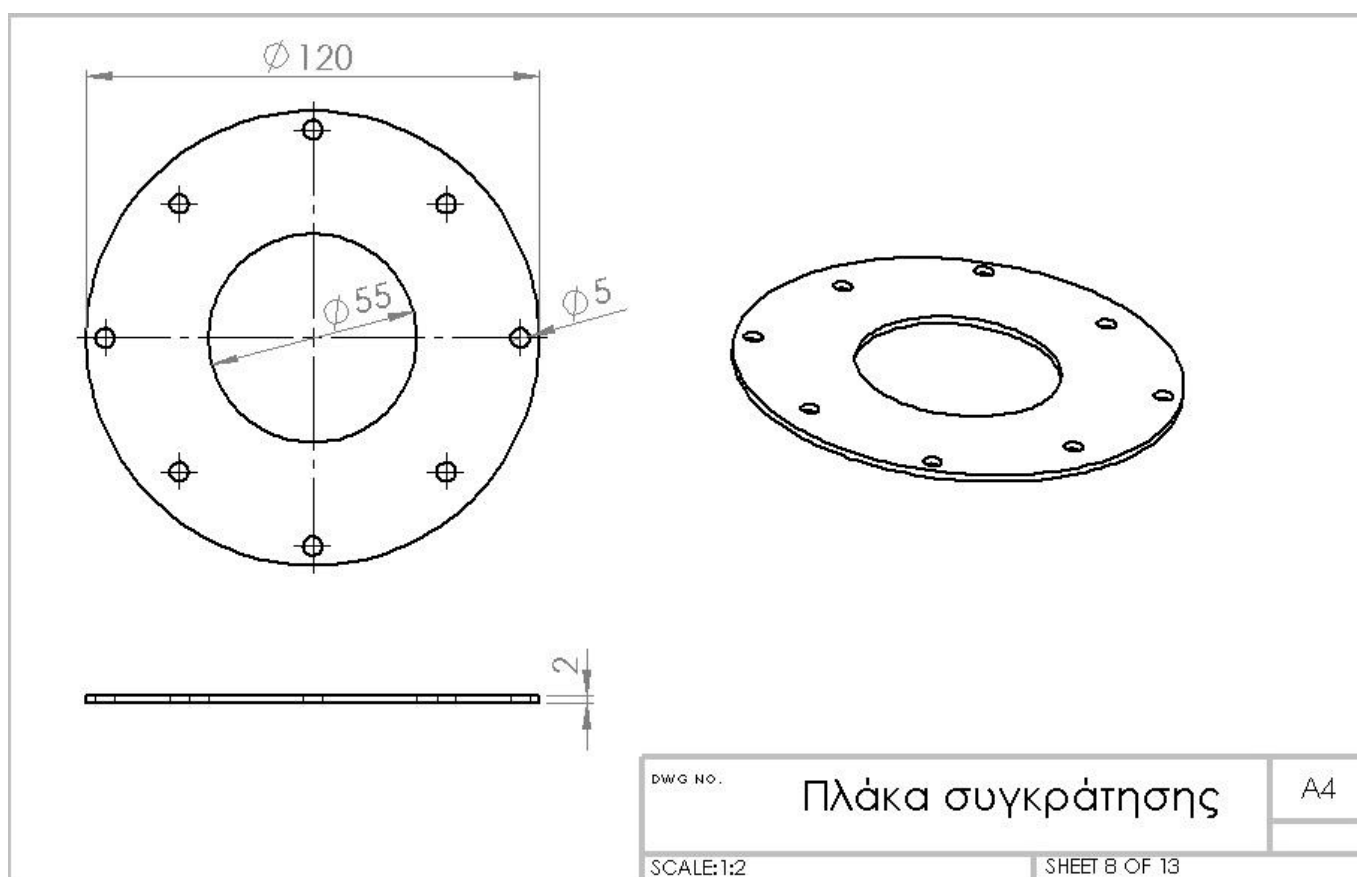
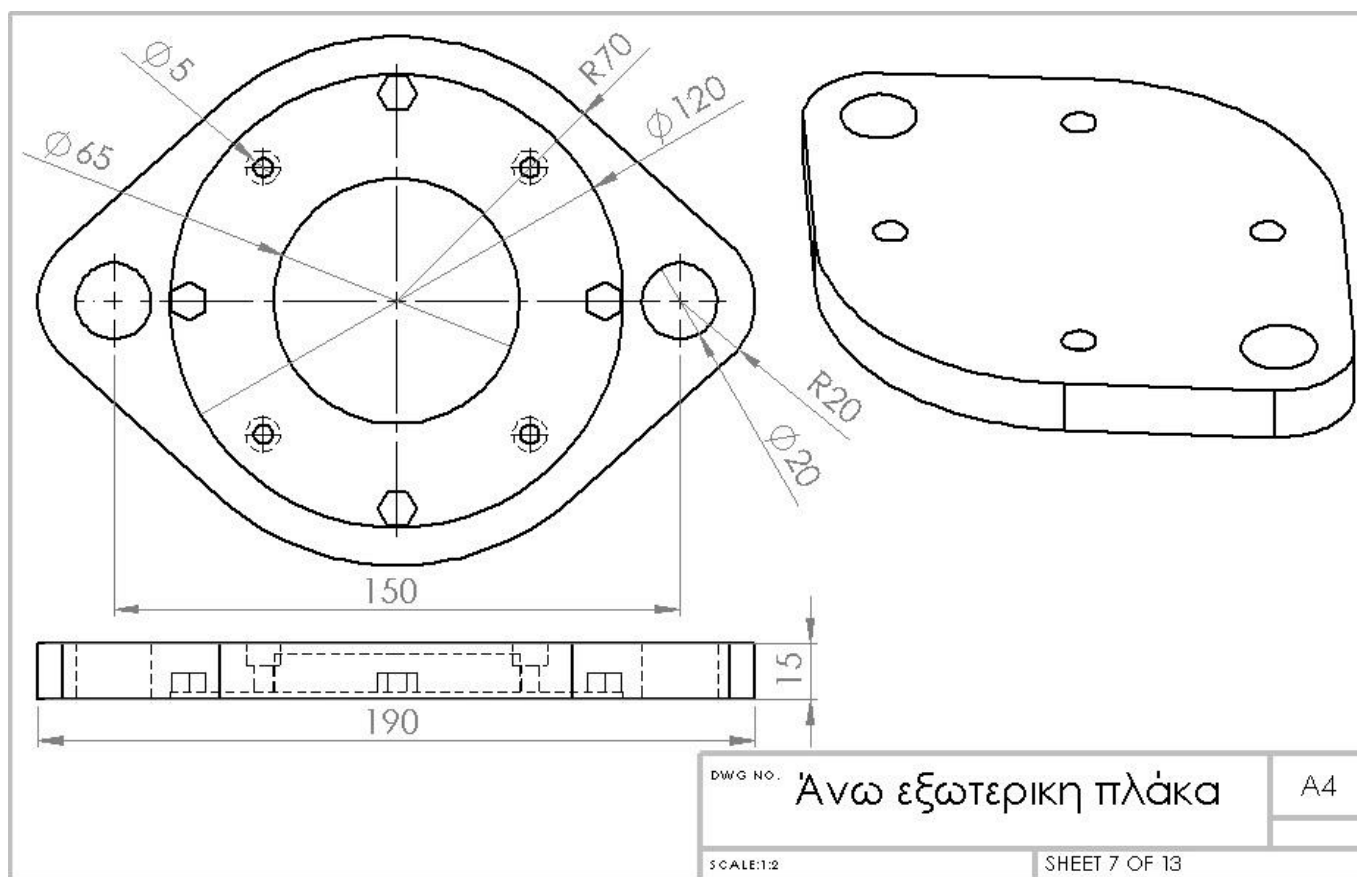


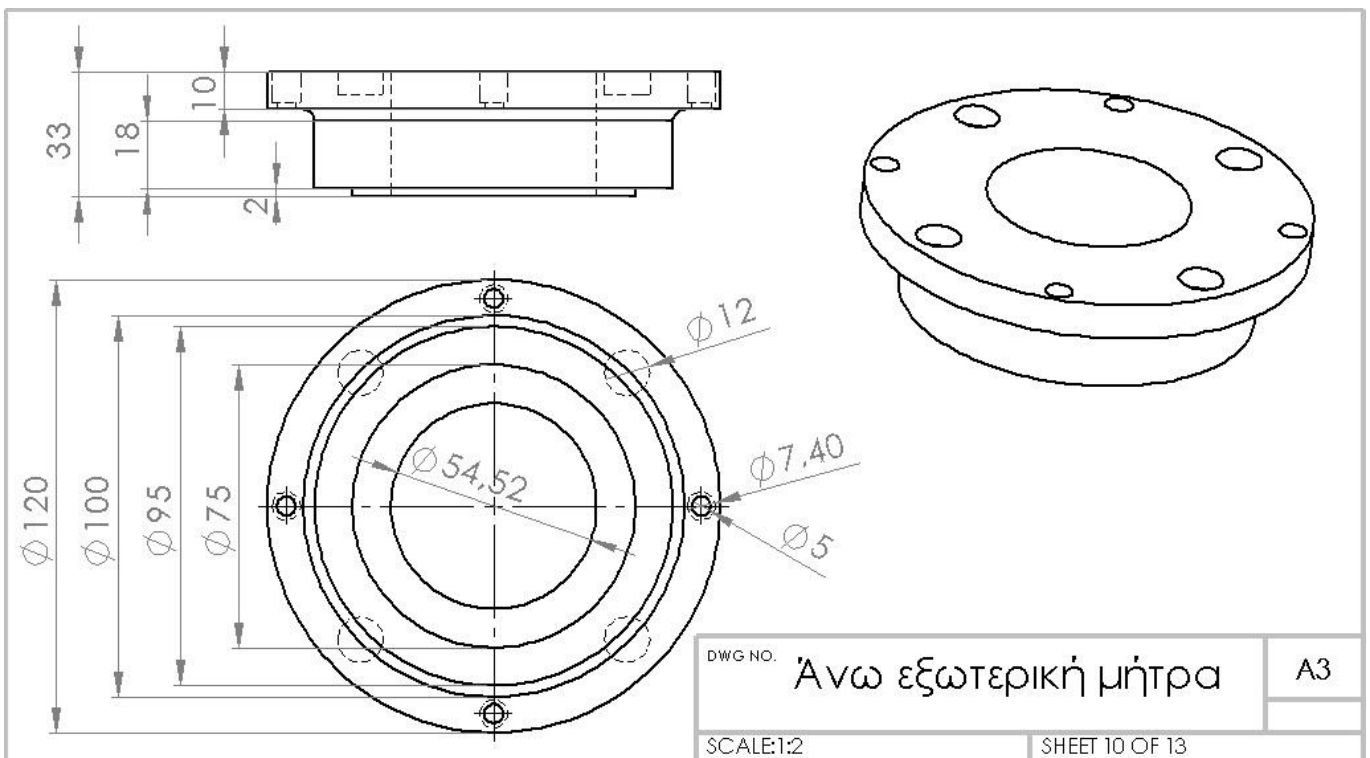
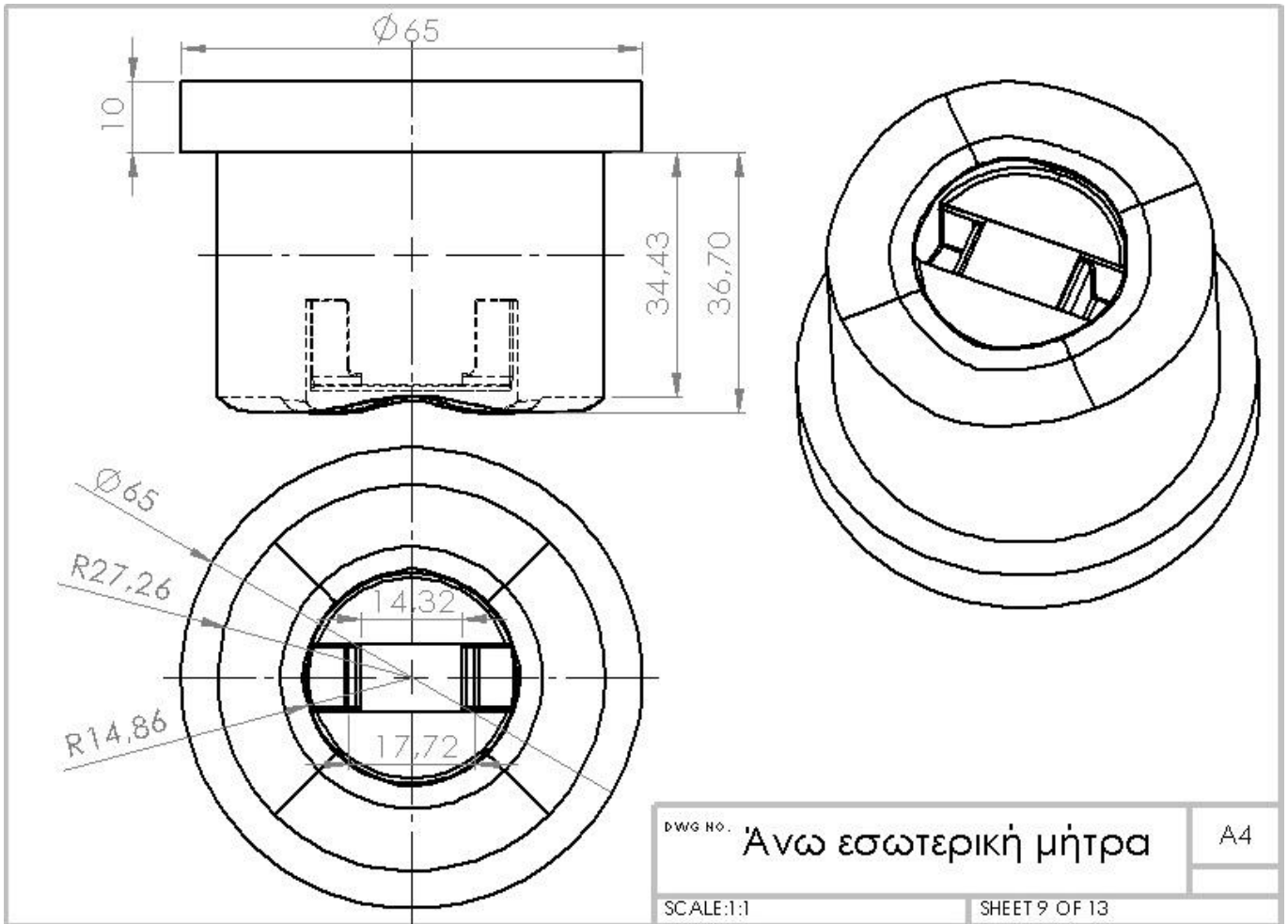
A/A	Περιγραφή	Σκαρίφημα	τεμάχια
1	Κάτω εξωτερική πλάκα	1	1
2	Κάτω εσωτερική πλάκα	2	1
3	Κάτω εξωτερική μήτρα	3	1
4	Κάτω μήτρα- έμβολο	4	1
5	Κάτω εσωτερική μήτρα	5	1
6	Ελατήριο πίεσεως	6	1
7	Άνω εξωτερική πλάκα	7	1
8	Άνω πλάκα συγκράτησης	8	1
9	Άνω εσωτερική μήτρα	9	1
10	Άνω εξωτερική μήτρα	10	1
11	Κοχλίας συγκράτησης μεγάλος M5	11	8
12	Ελατήριο ρύθμισης	12	4
13	Κοχλίας συγκράτησης μικρός M5	11	4
14	Ράβδος-οδηγός	13	2

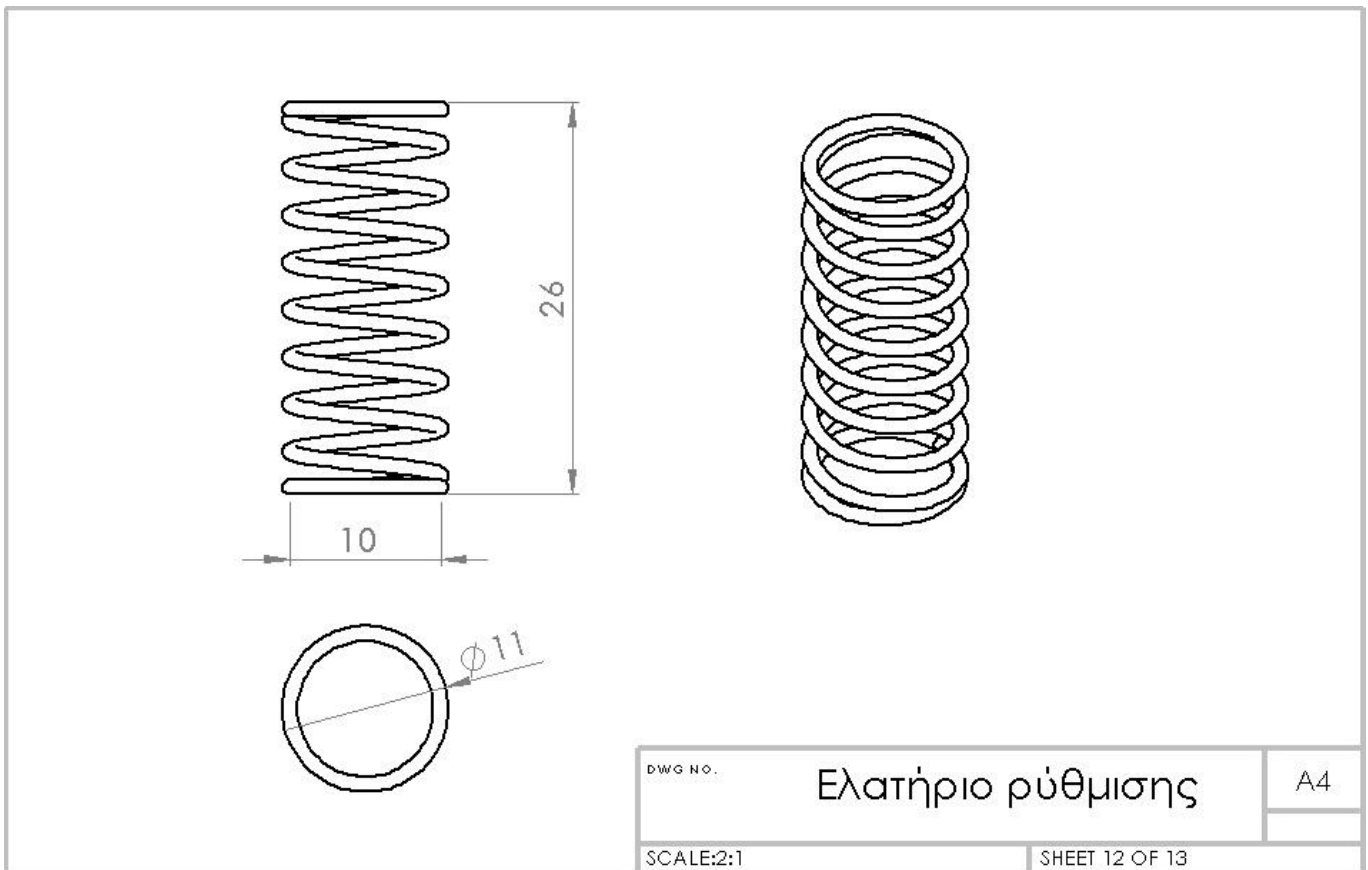
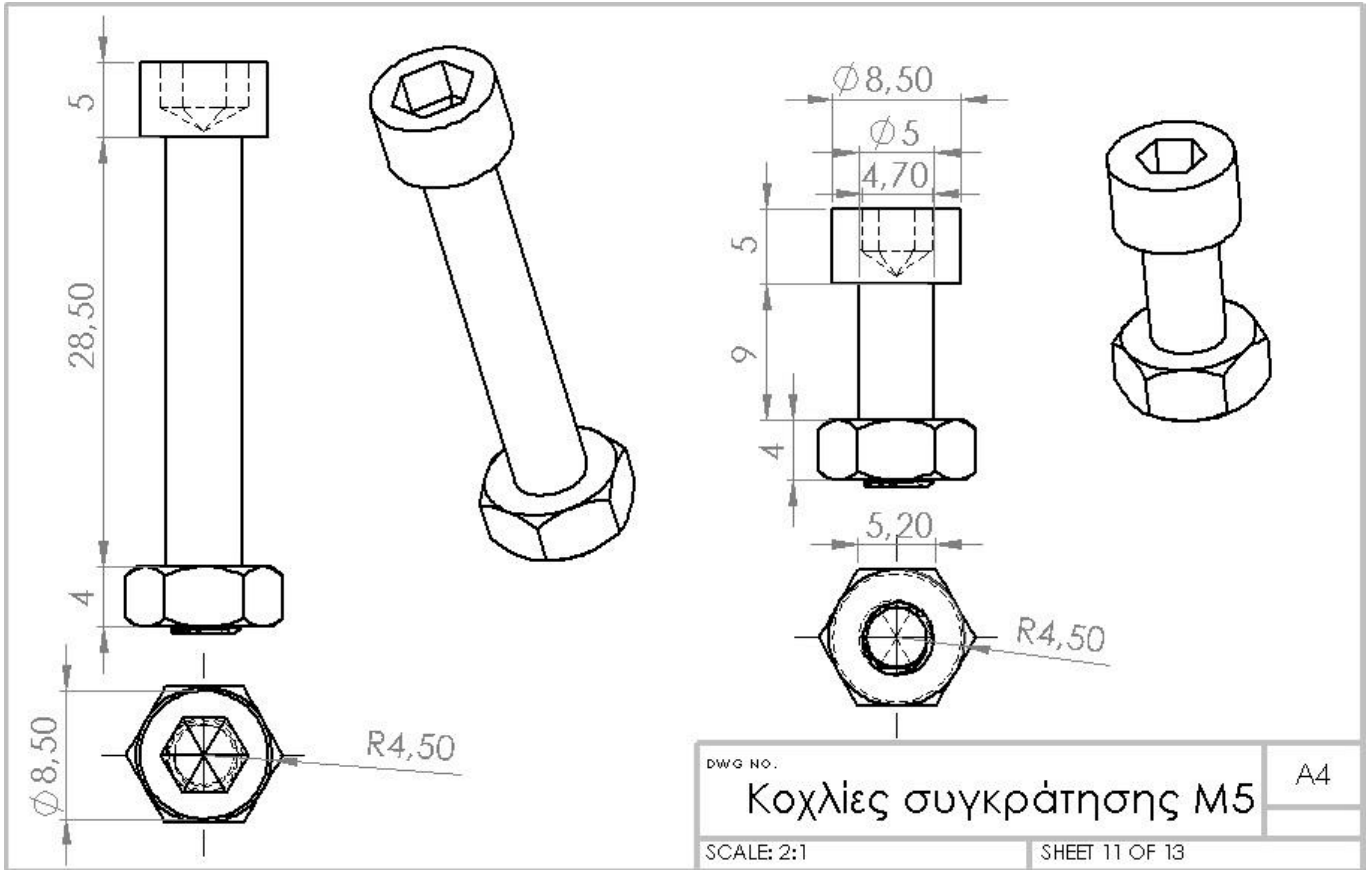


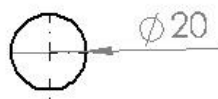
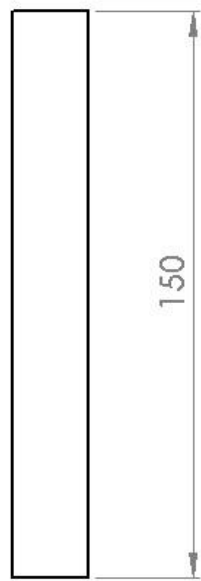






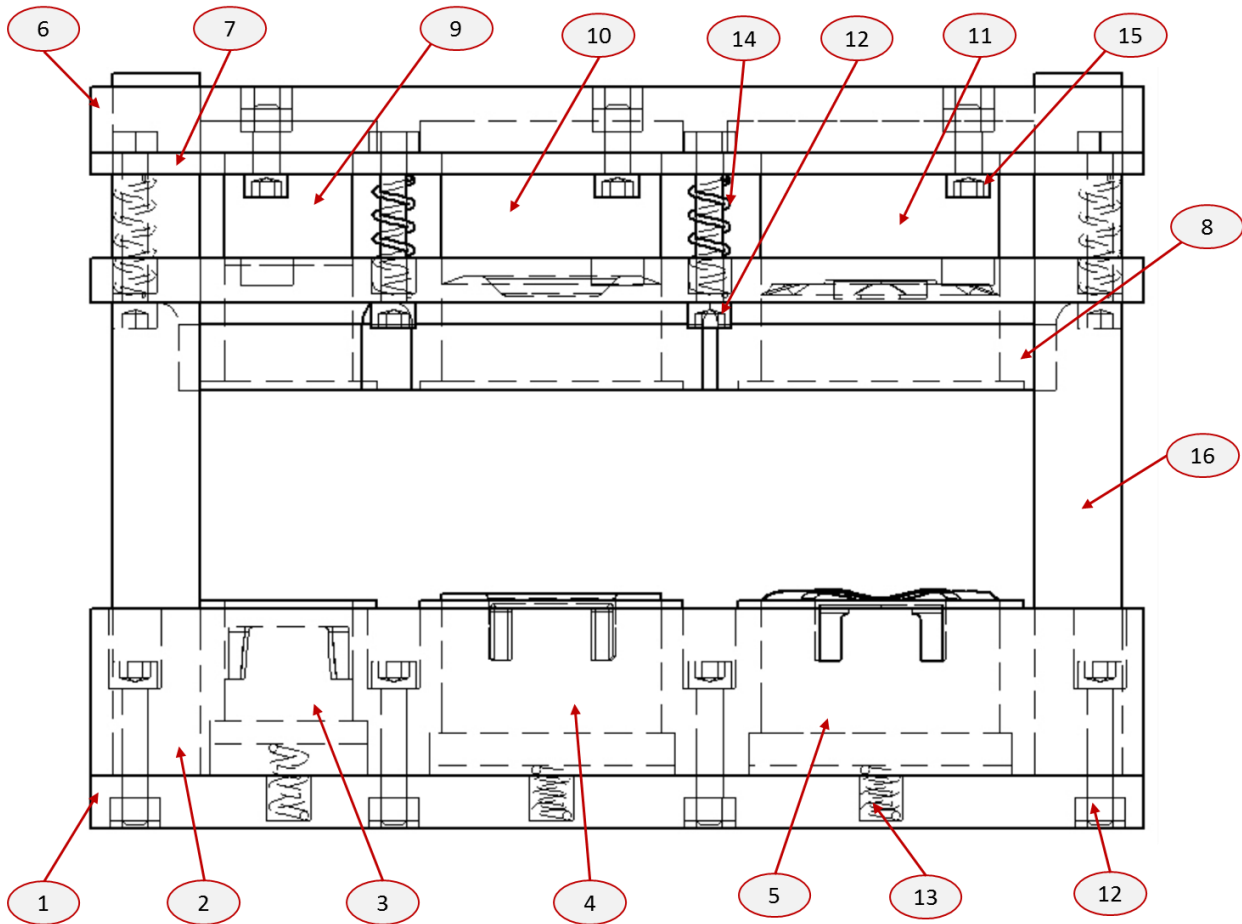






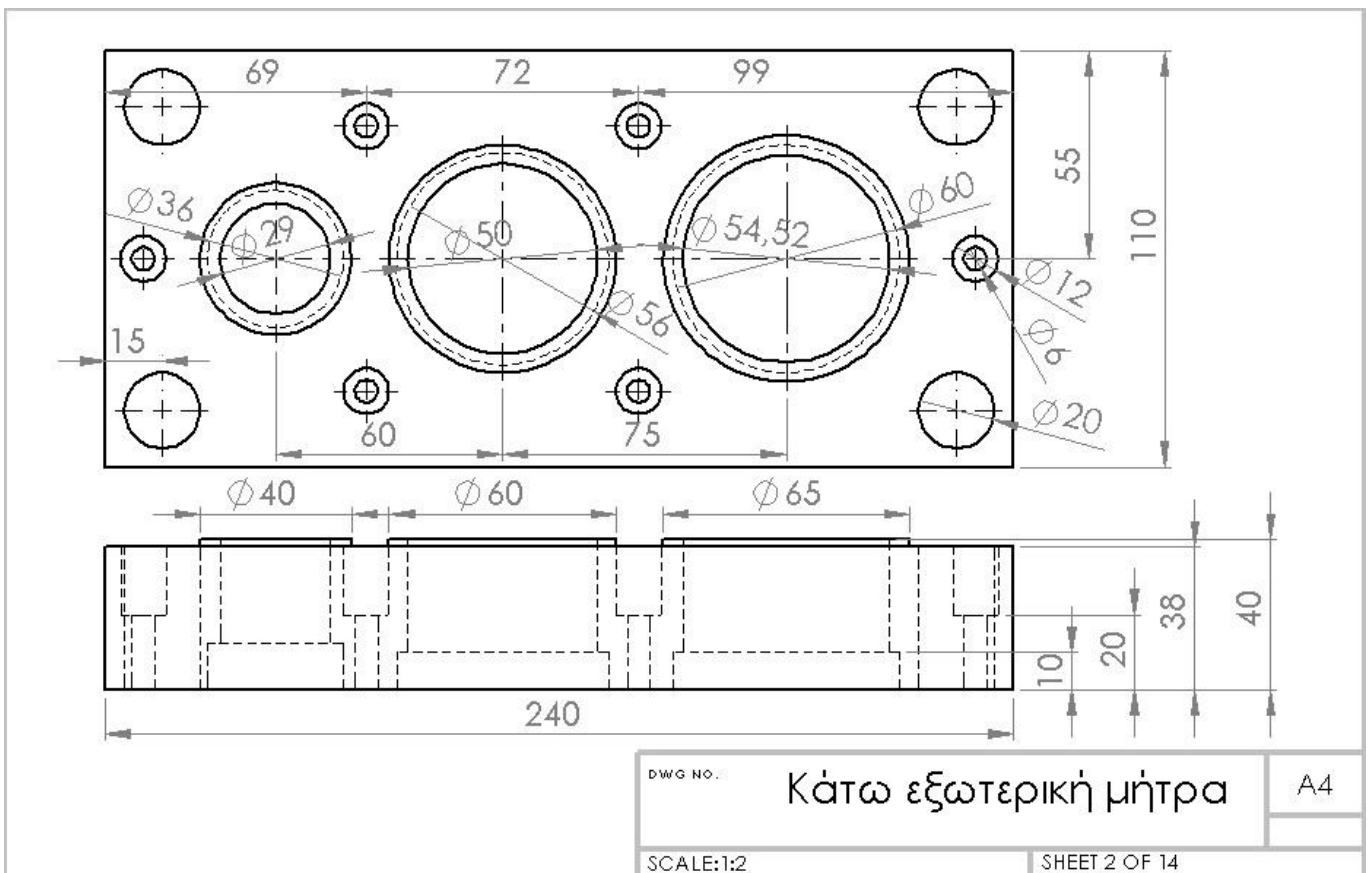
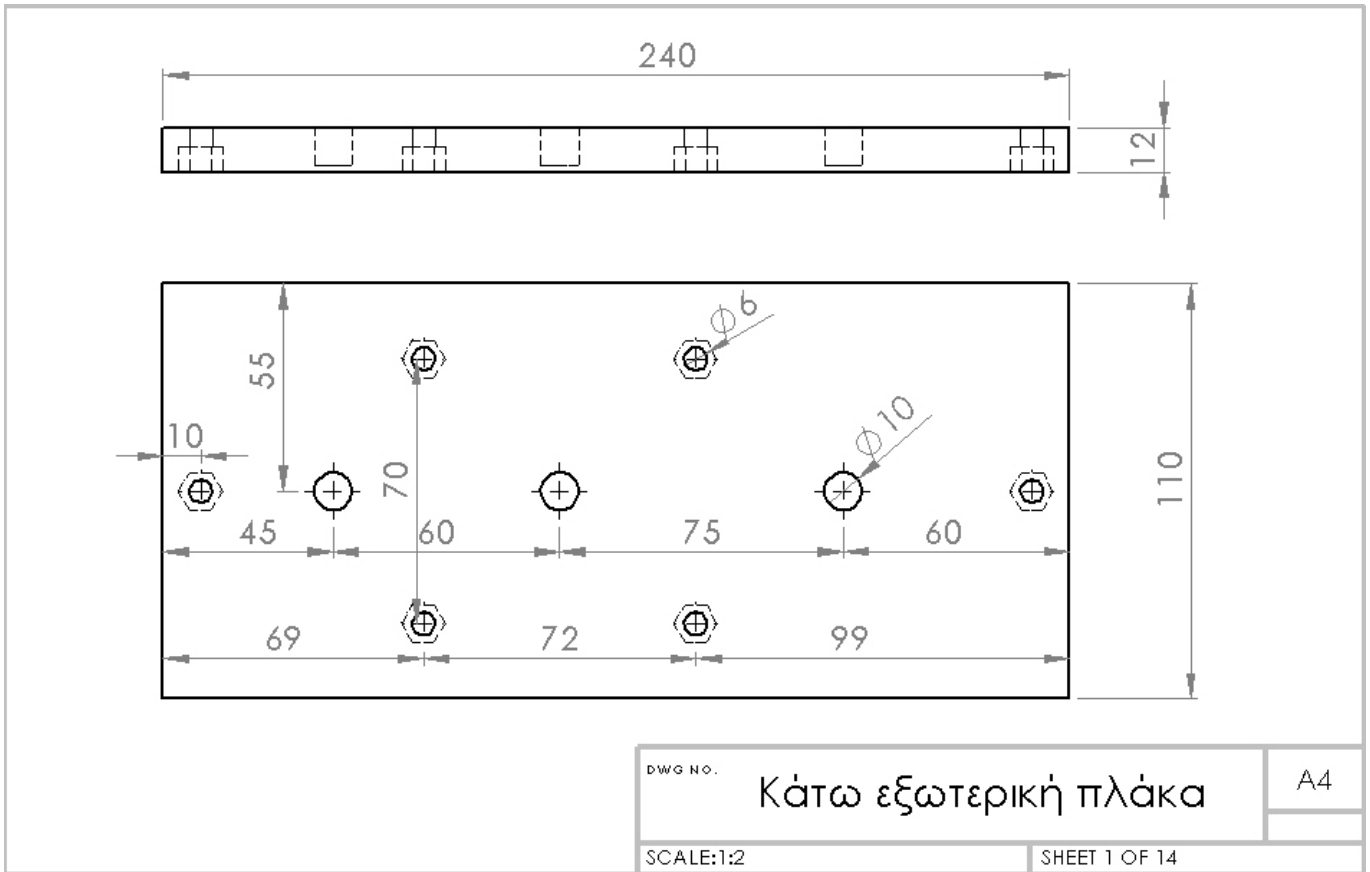
DWG NO.:	Ράβδος-οδηγός	A4
SCALE:1:2	SHEET 13 OF 13	

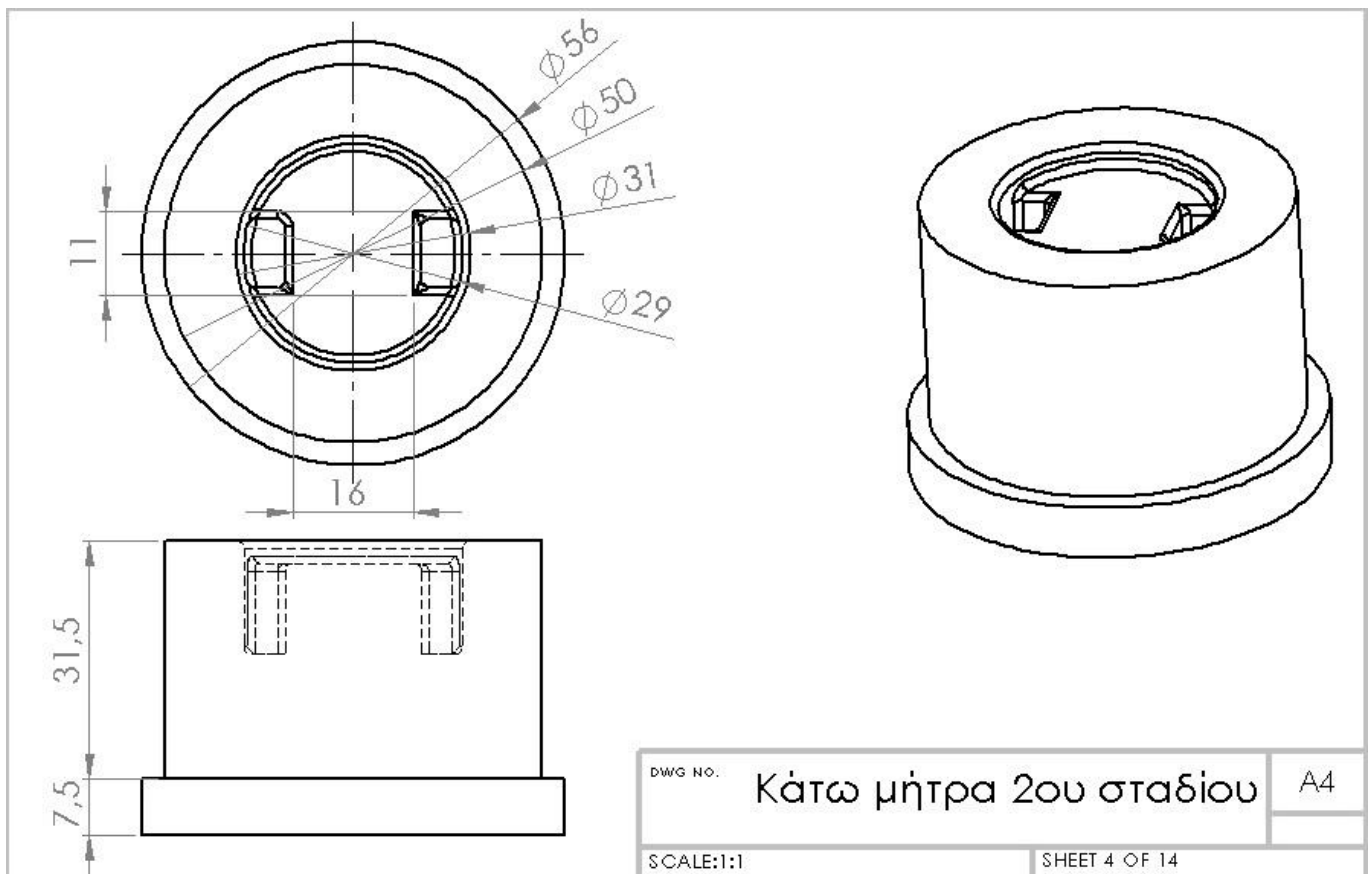
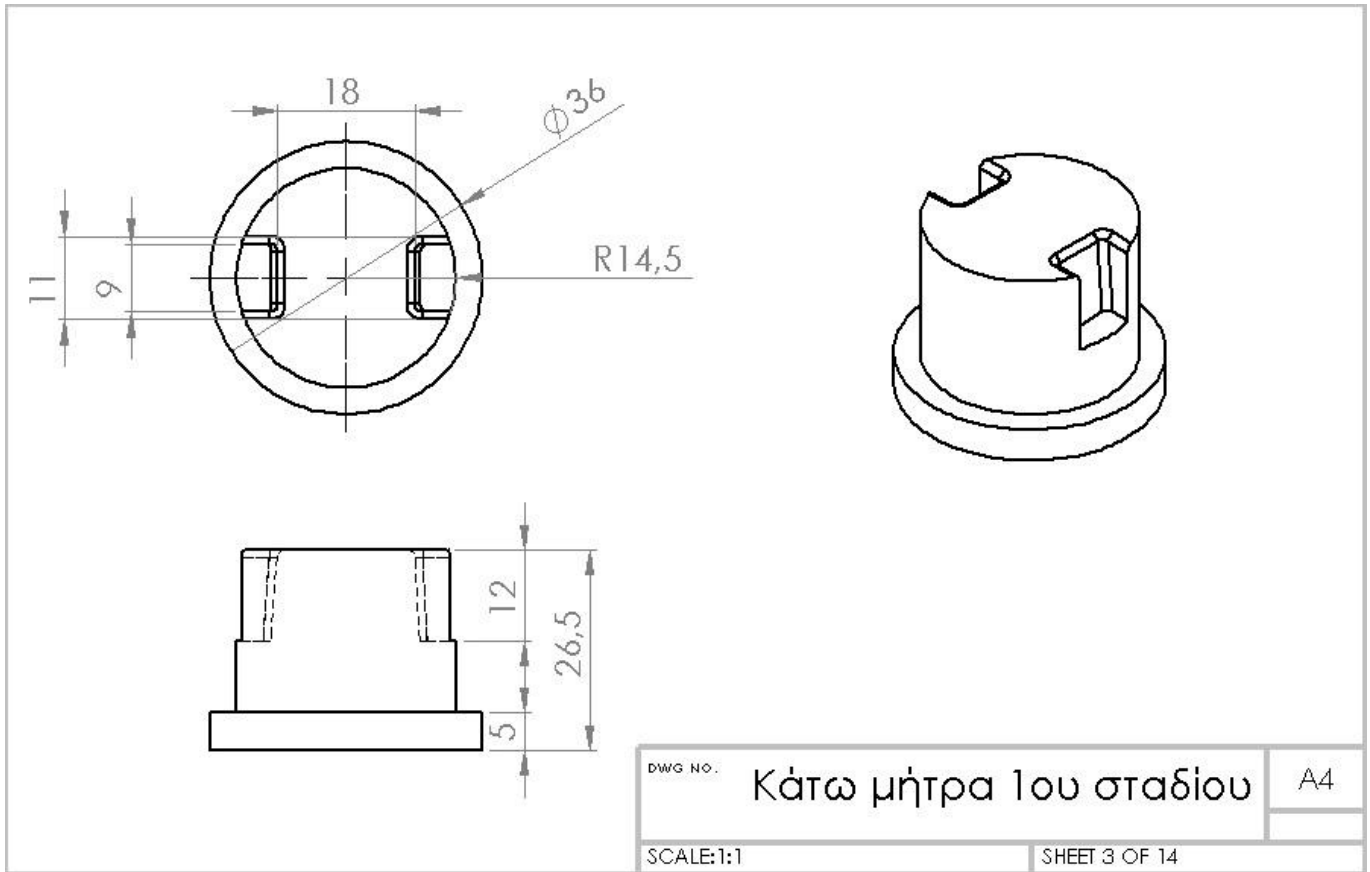
Γ.2 ΚΑΛΟΥΠΙ ΤΡΙΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ



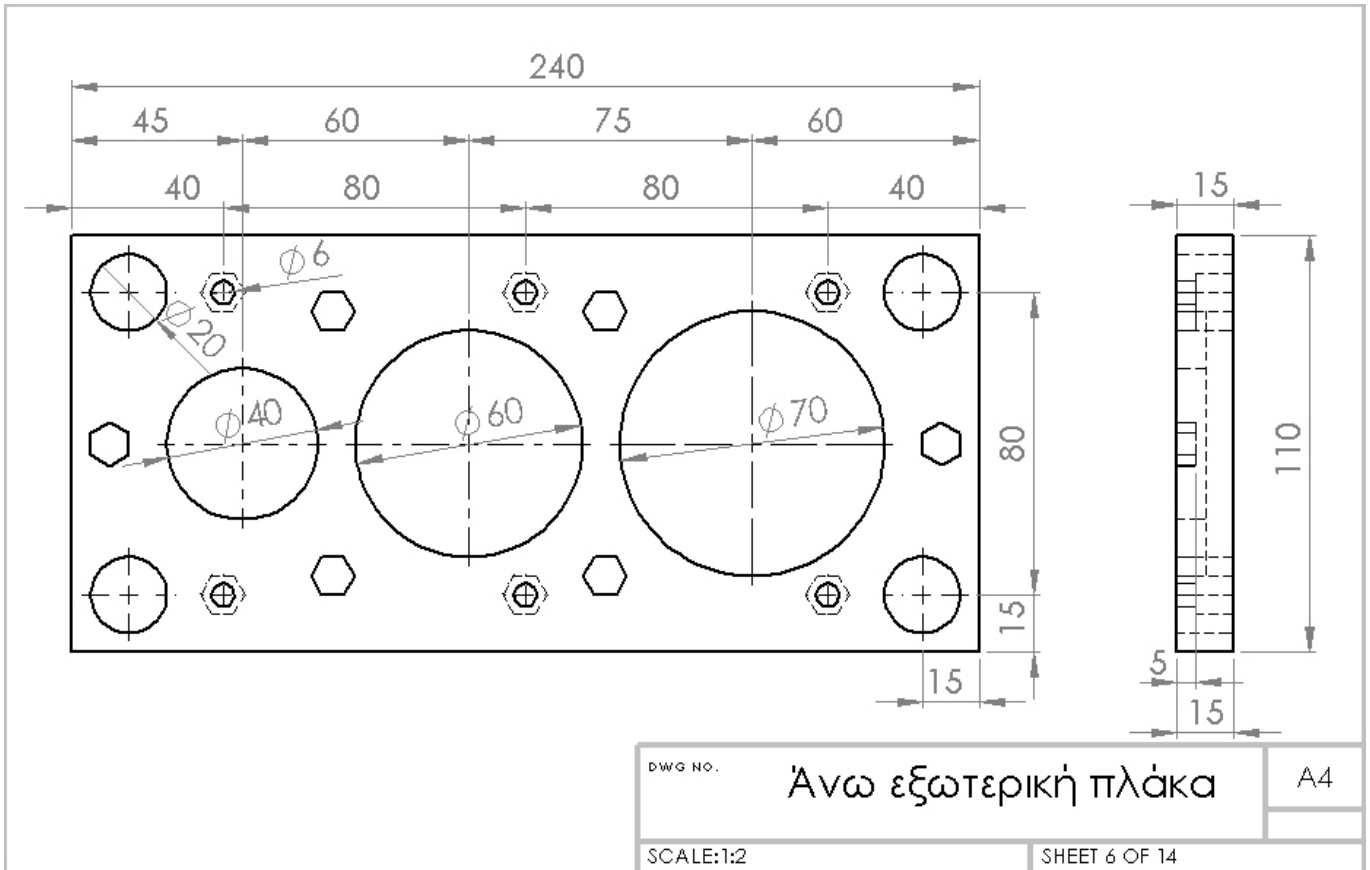
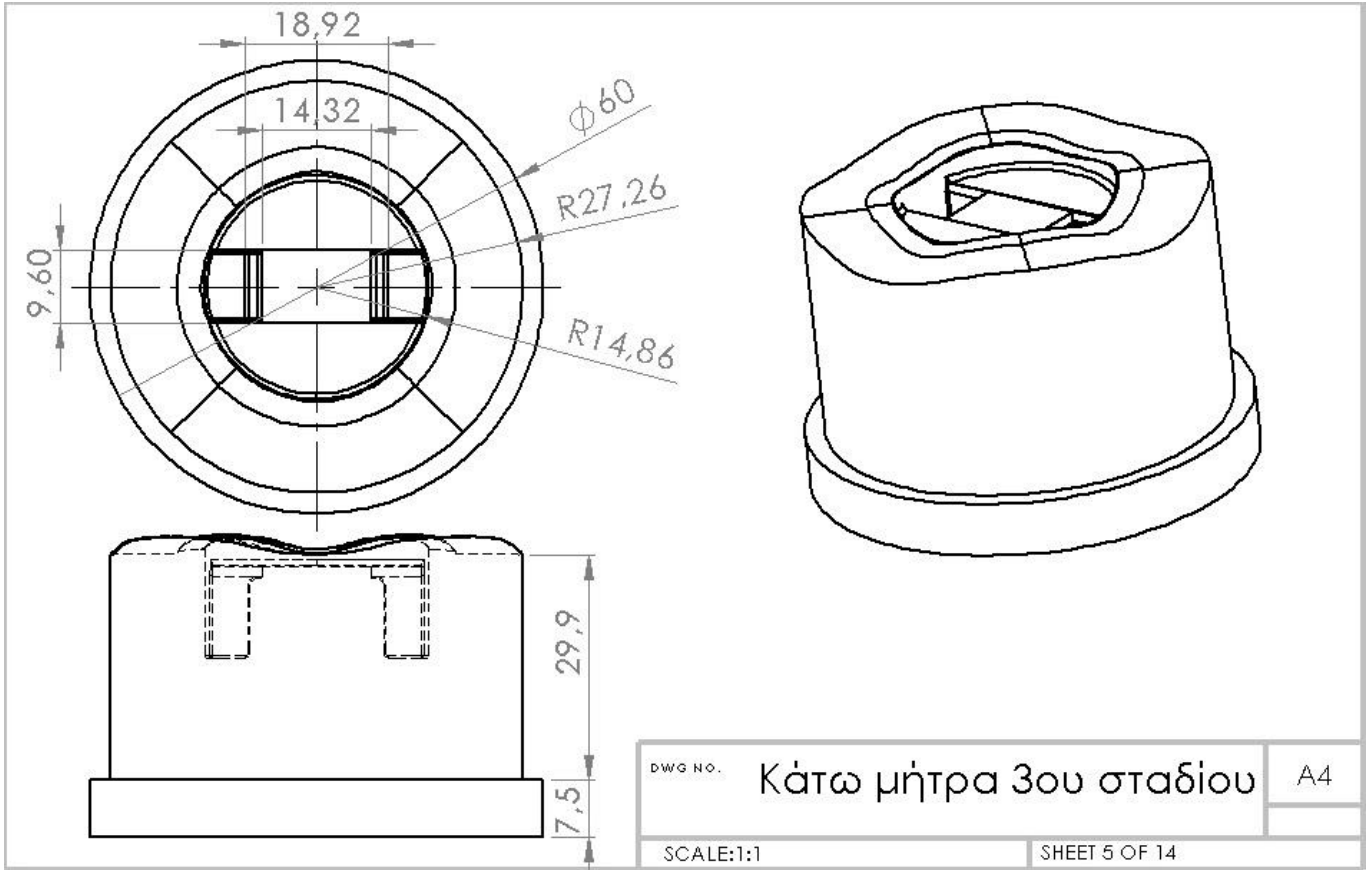
A/A	Περιγραφή	τεμάχια
1	Κάτω εξωτερική πλάκα	1
2	Κάτω εξωτερική μήτρα	1
3	Κάτω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου	1
4	Κάτω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου	1
5	Κάτω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου	1
6	Άνω εξωτερική πλάκα	1
7	Άνω πλάκα συγκράτησης	1
8	Άνω εξωτερική μήτρα	1
9	Άνω μήτρα 1 ^{ου} σταδίου	1
10	Άνω μήτρα 2 ^{ου} σταδίου	4
11	Άνω μήτρα 3 ^{ου} σταδίου	4
12	Κοχλίας ρύθμισης M6 μεγάλος	6
13	Ελατήριο επαναφοράς	3
14	Ελατήριο ρύθμισης	6
15	Κοχλίας συγκράτησης M6 μικρός	12
16	Οδηγός - ράβδος	4

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

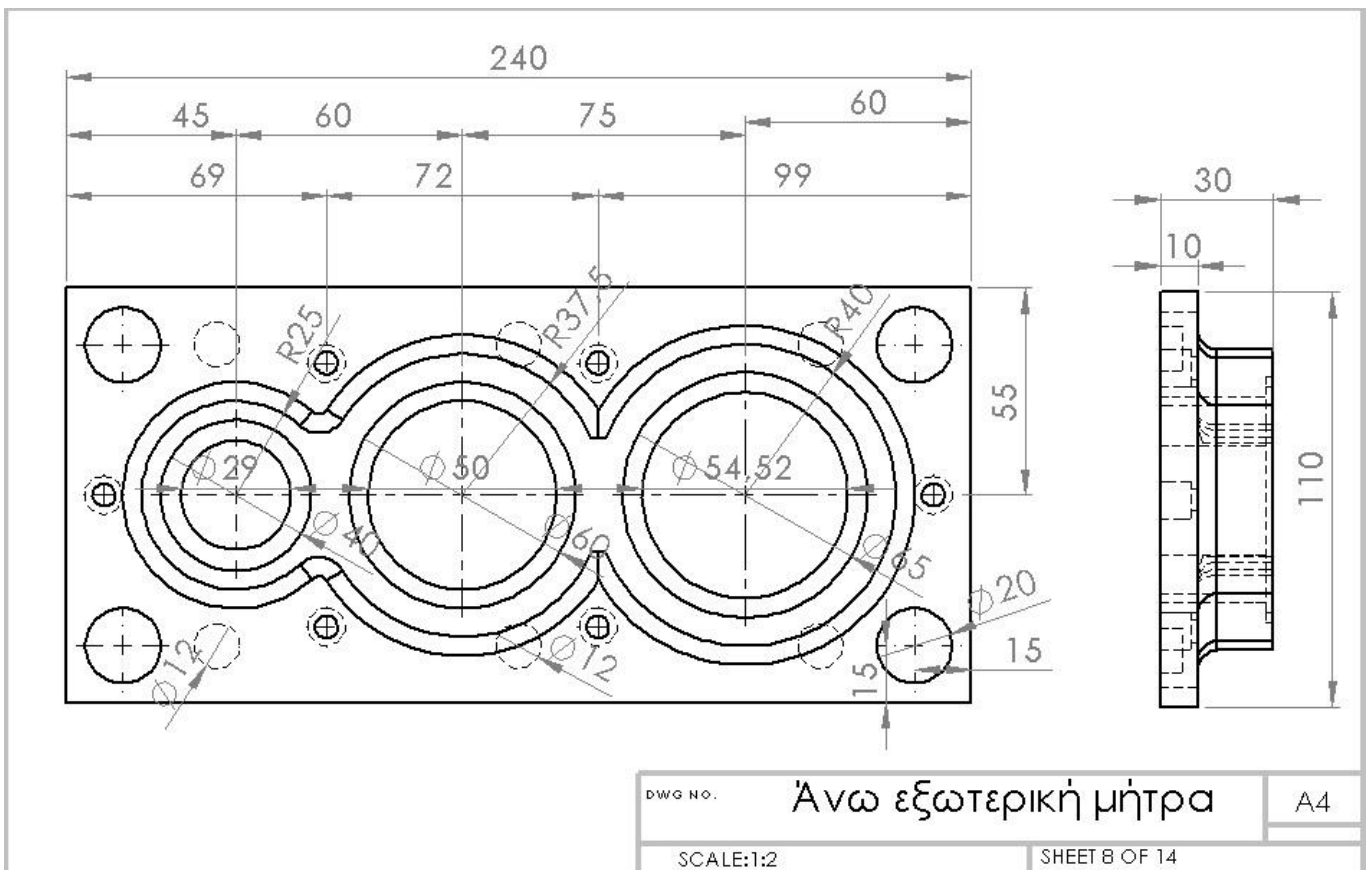
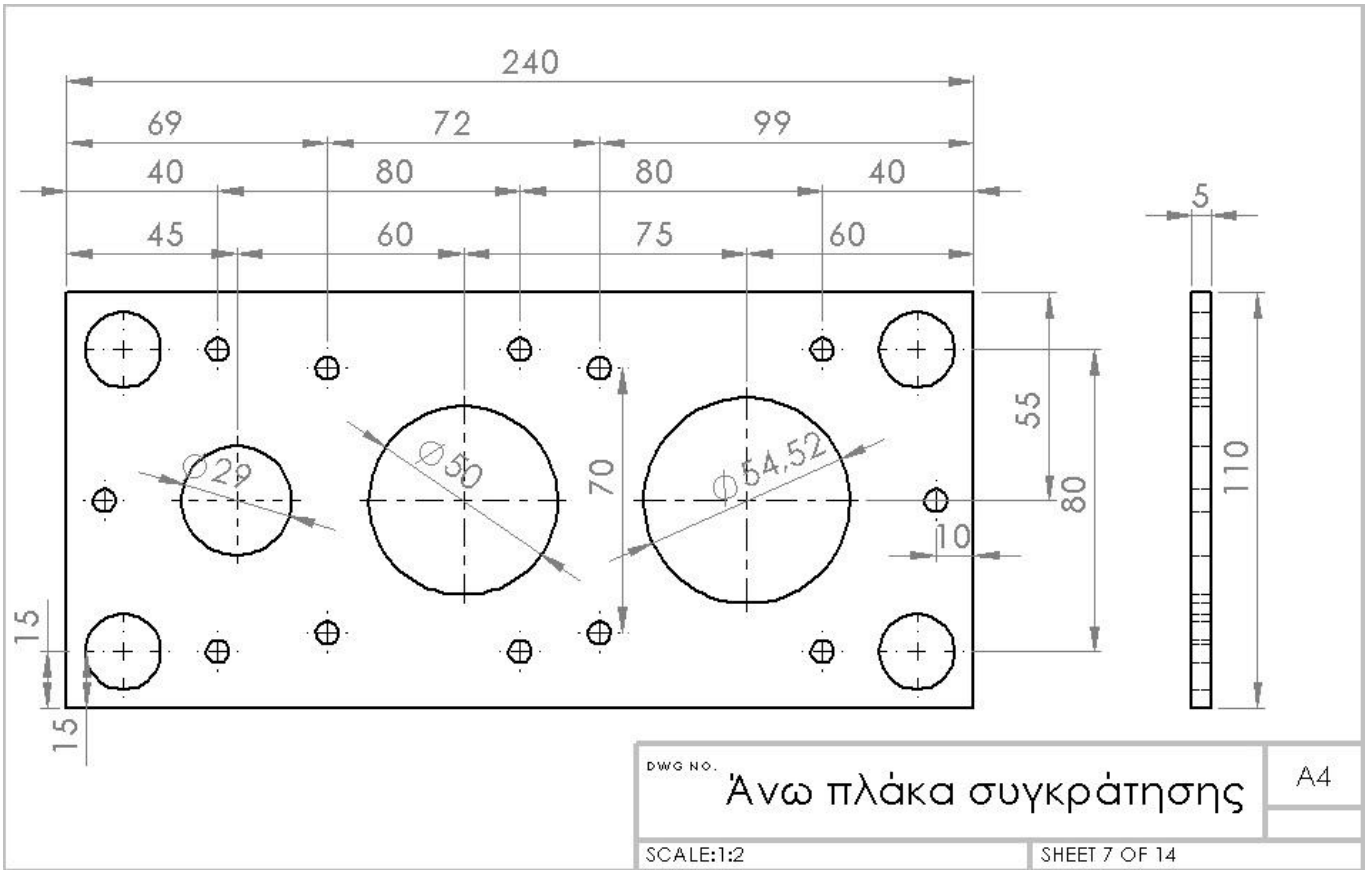


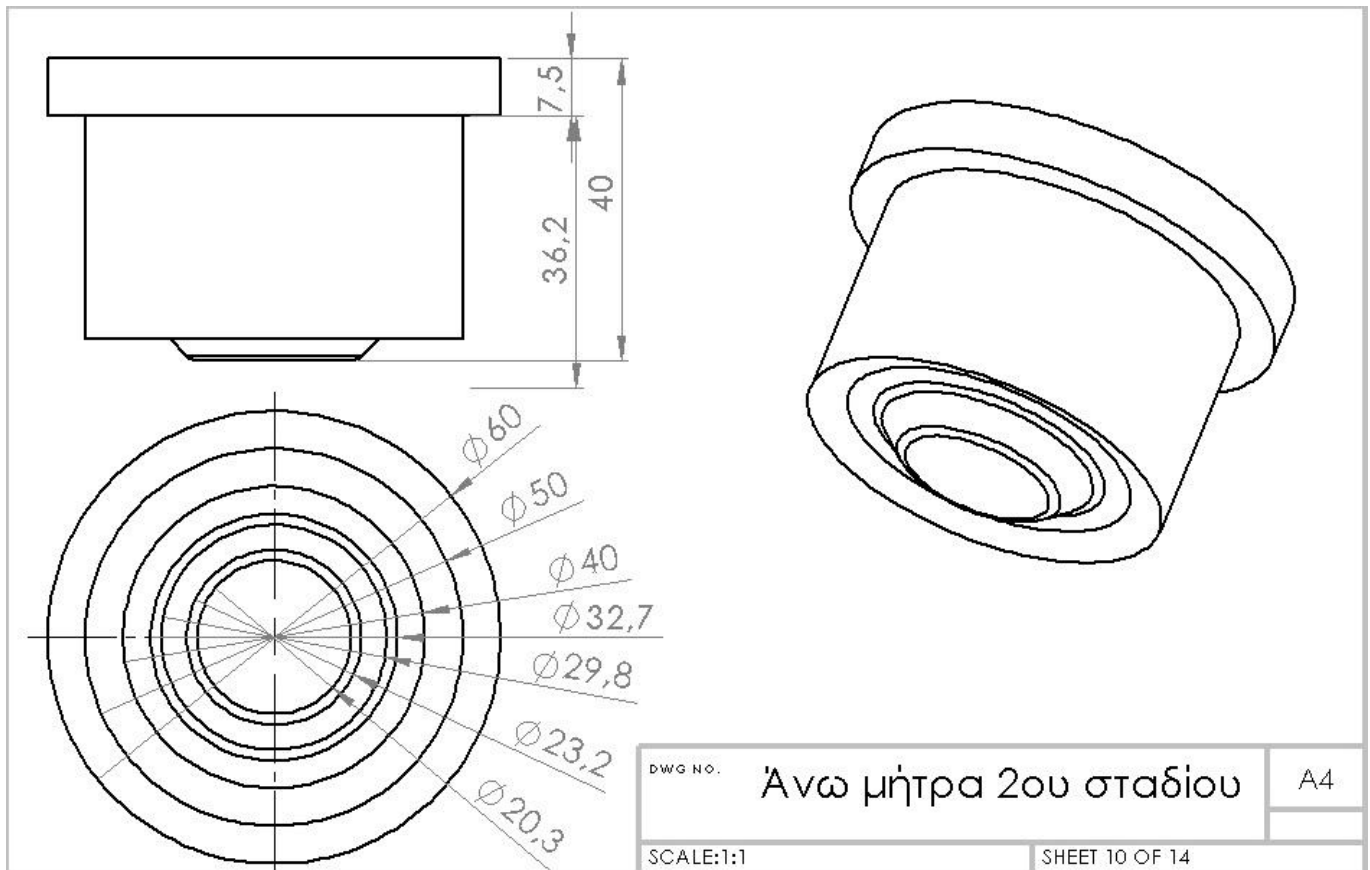
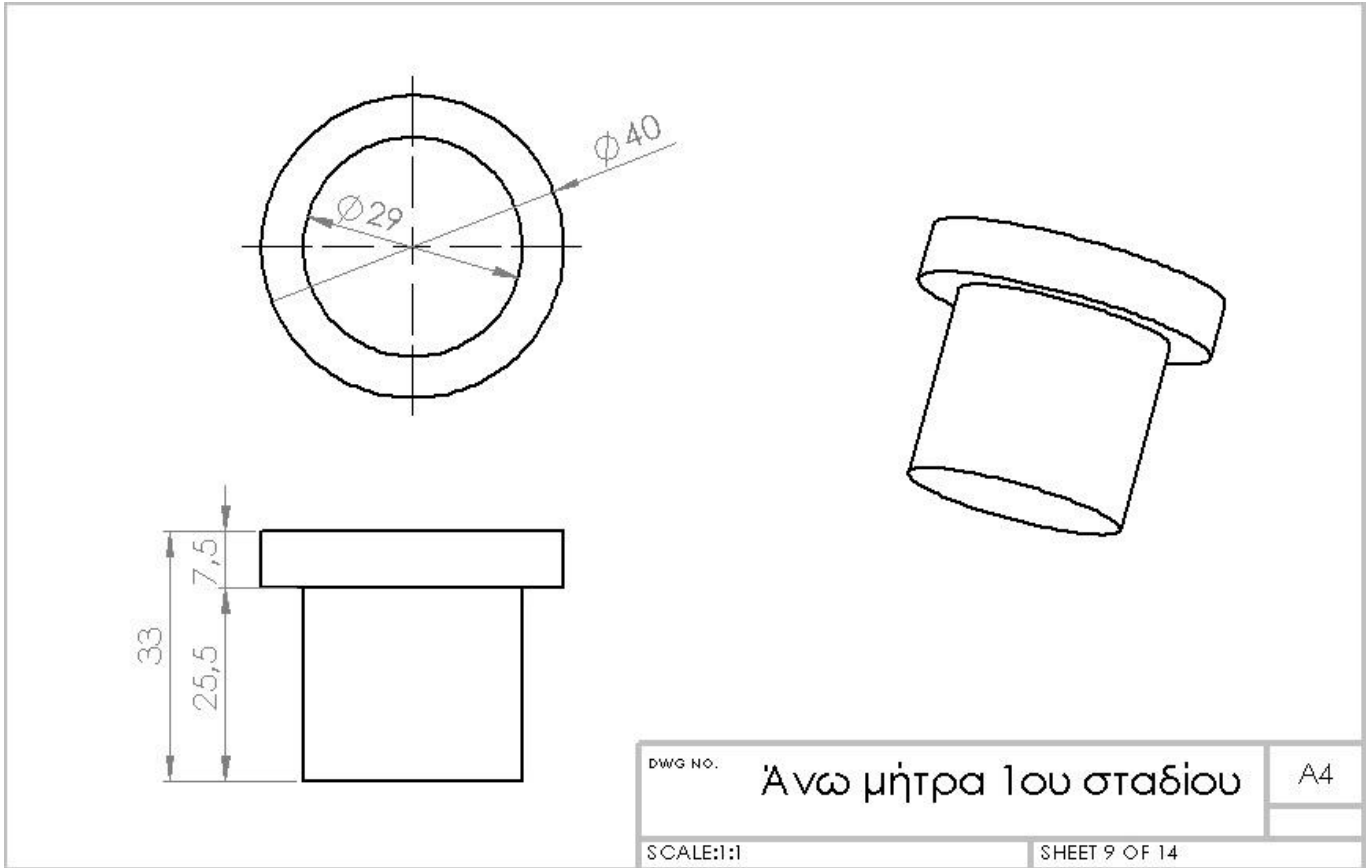


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

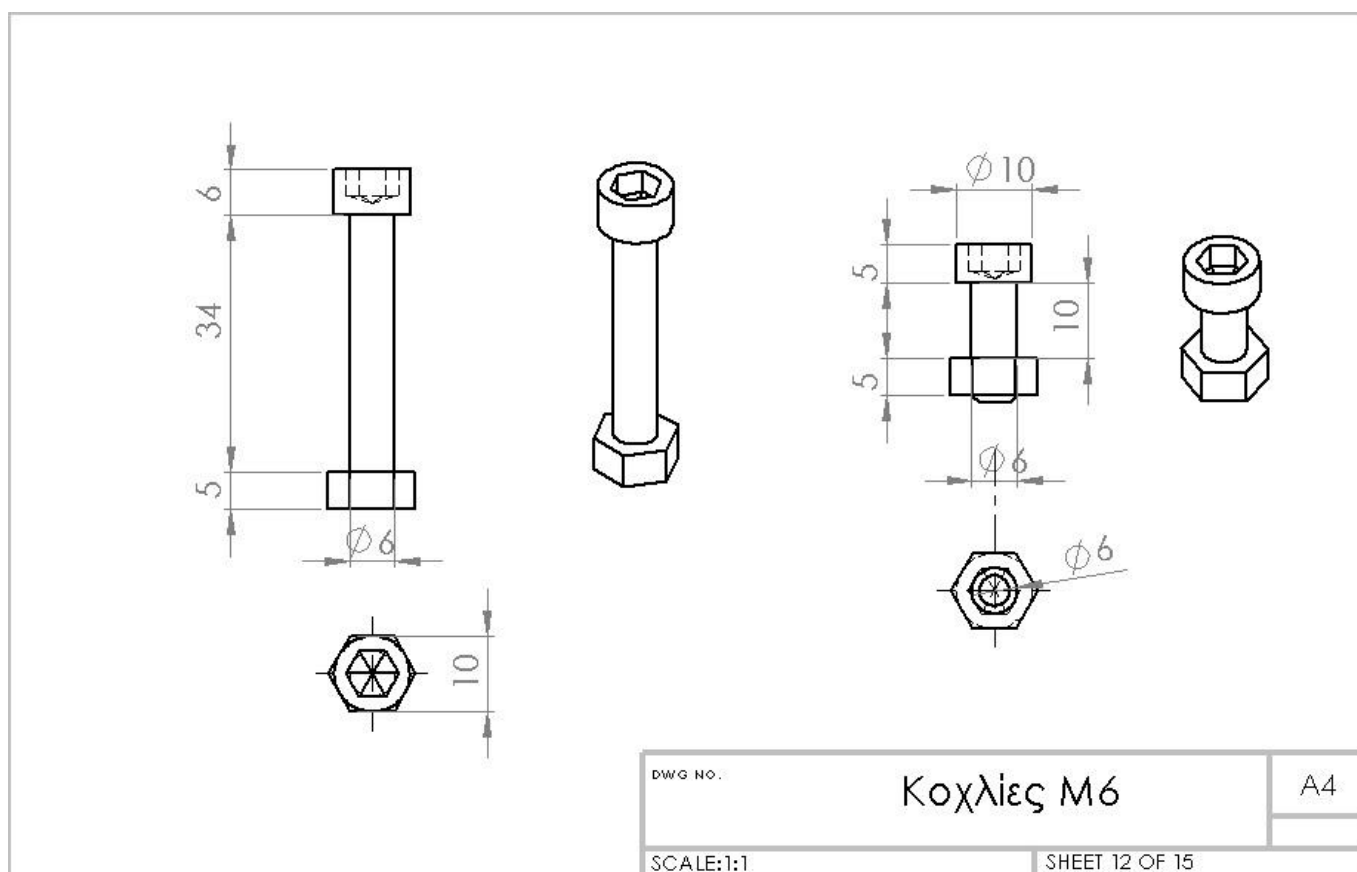
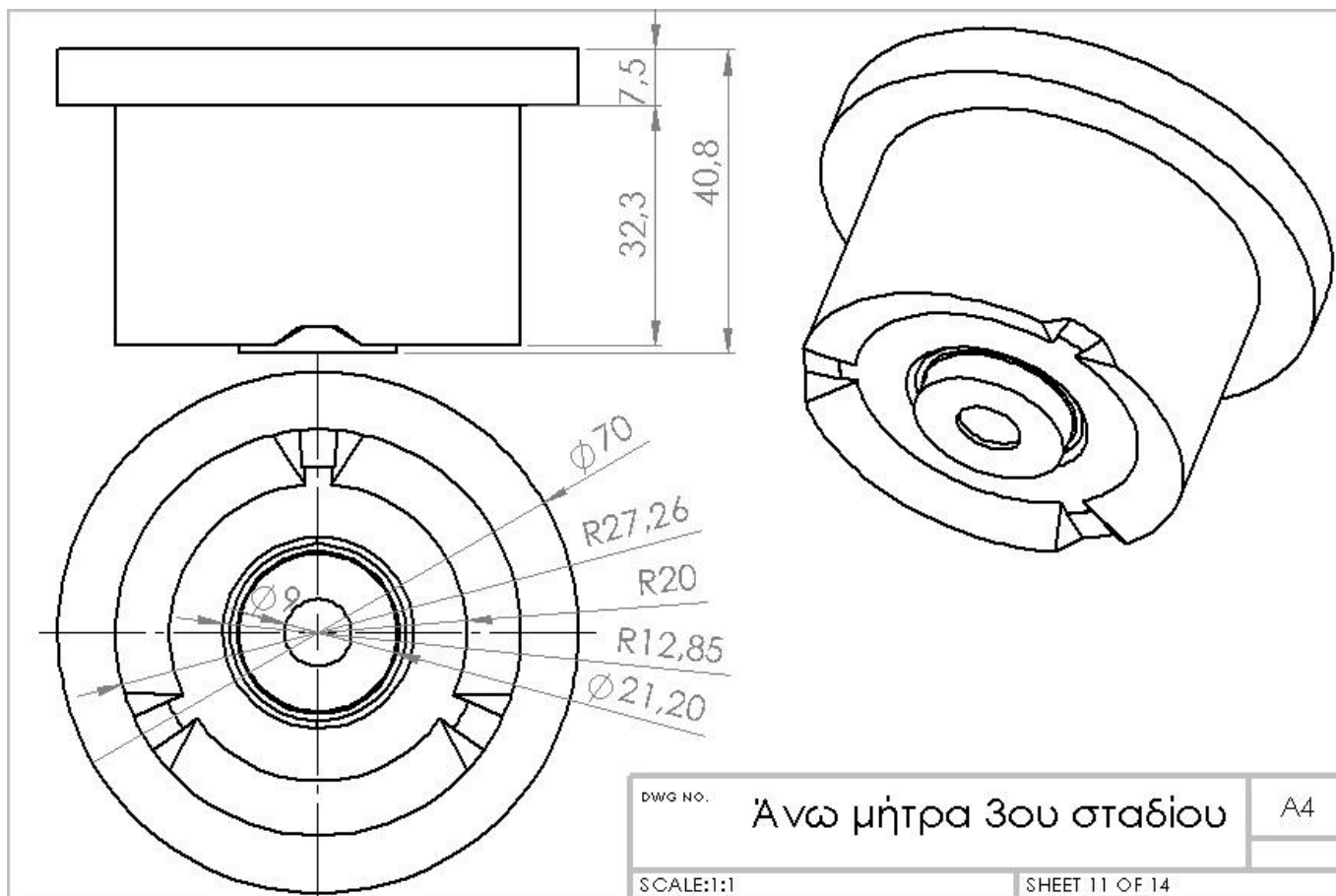


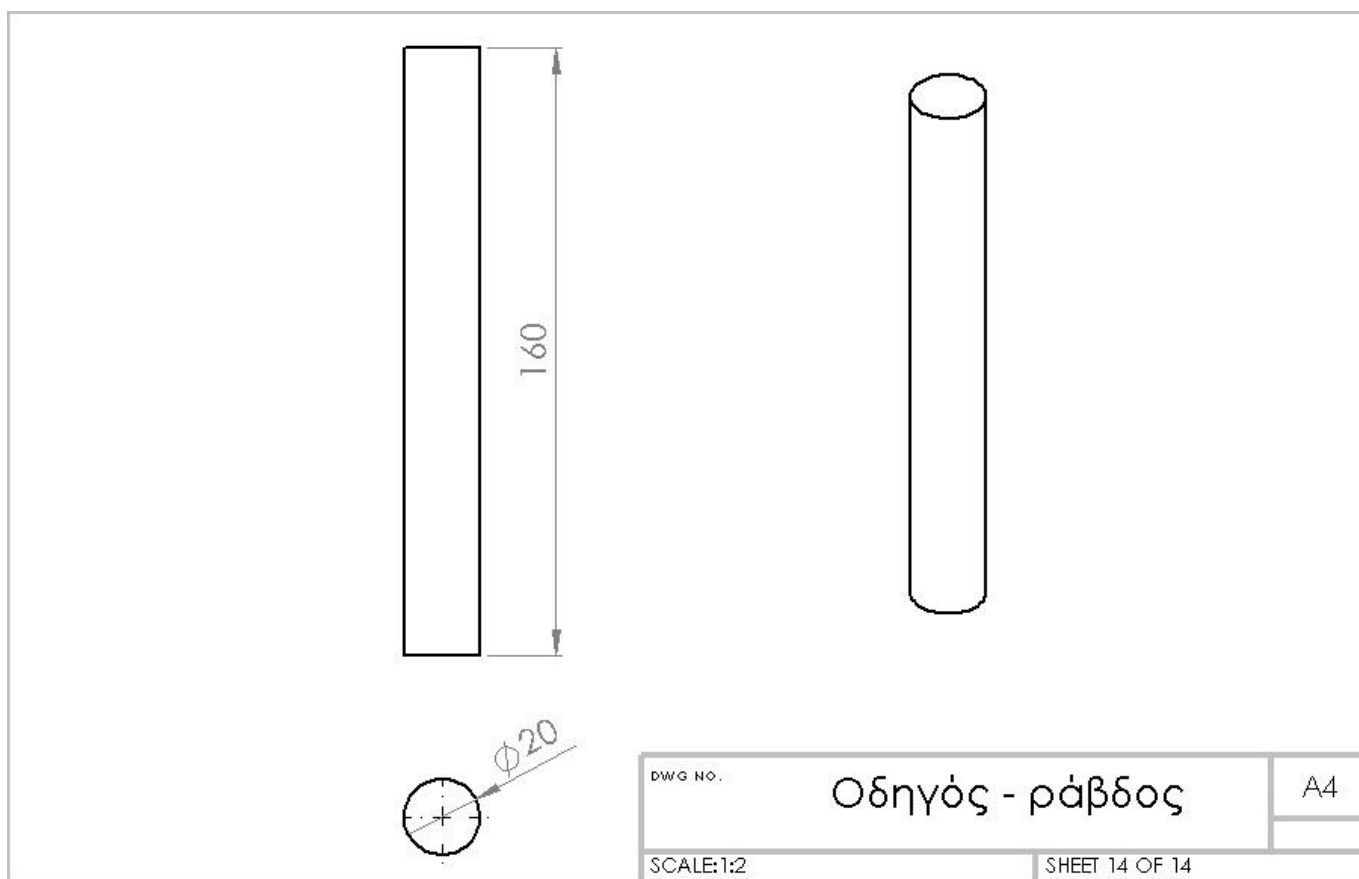
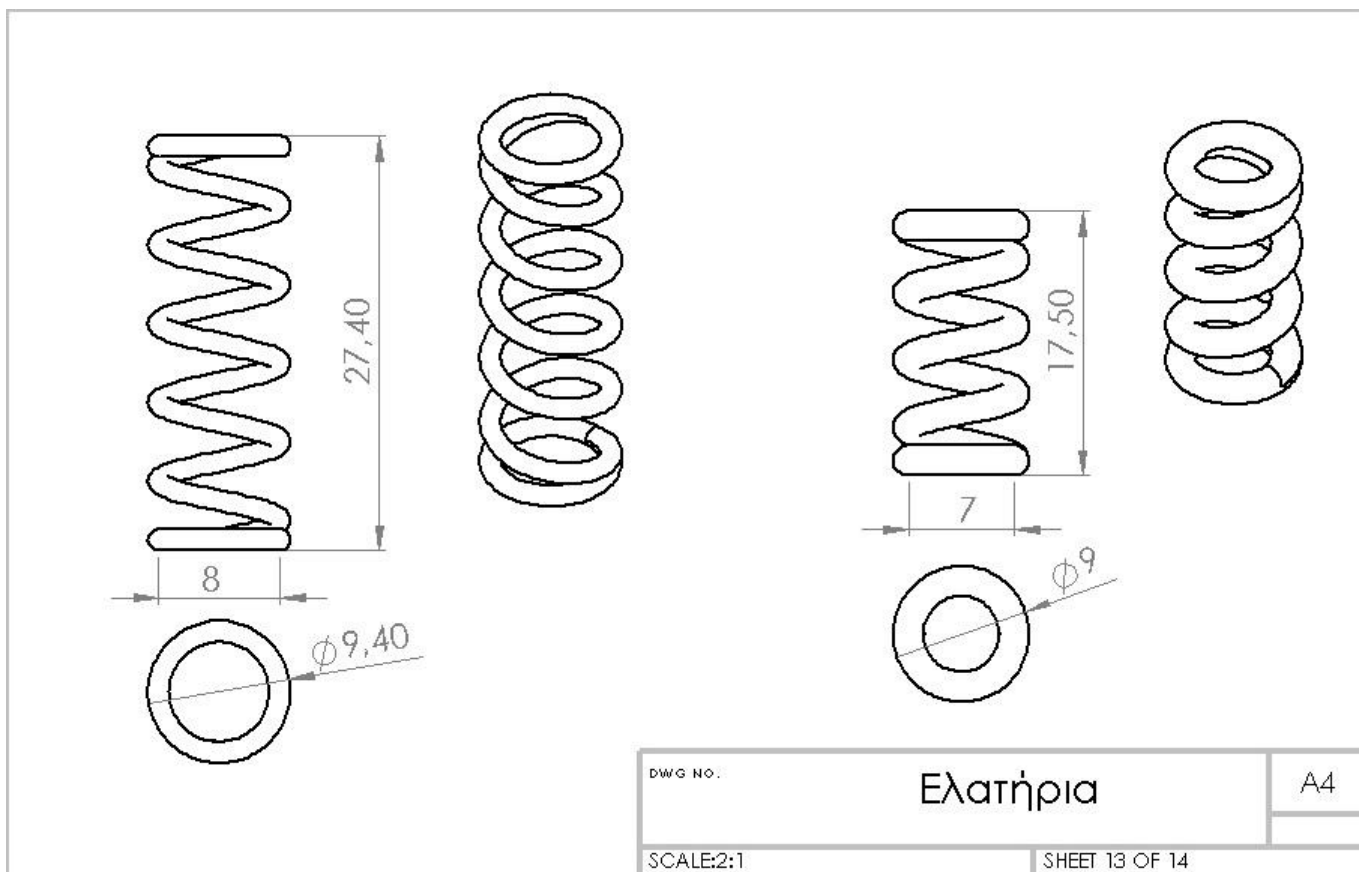
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ





ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ





ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Γ. Μάμαλης, "Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μη Συμβατικές Κατεργασίες", Εκδόσεις Άνωση, Αθήνα, 2000..
- [2] Altan, Taylan, Gracious Ngaile, and Gangshu Shen, eds. Cold and hot forging: fundamentals and applications. Vol. 1. ASM international, 2005..
- [3] Δ. Μανωλάκος, , "Σφυρηλάτηση (forging)", Σημειώσεις μαθήματος Κατεργασίες Ι.
- [4] Altan, Taylan, Soo-Ik Oh, and G. Gegel. "Metal forming fundamentals and applications." American Society for Metals, 1983, (1983): 353..
- [5] Semiatin, S. L., and Taylan Altan. Isothermal and Hot-Die Forging of High-Temperature Alloys. No. MCIC-83-47. METALS AND CERAMICS INFORMATION CENTER COLUMBUS OH, 1983.
- [6] Shah, Sanjay. "Isothermal and hot-die forging." ASM Handbook. 14 (1988): 150-157.
- [7] Μάμαλης, Αθανάσιος Γ. "Κατεργασίες Των Υλικών Ι." Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα (1998).
- [8] Milutinović, Mladomir, Dragiša Vilotić, and Dejan Movrin. "Precision forging—tool concepts and process design." Journal for technology of plasticity 33.1-2 (2008): 73-88.
- [9] Doege, E., and R. Bohnsack. "Closed die technologies for hot forging." Journal of Materials Processing Technology 98.2 (2000): 165-170.
- [10] Wagoner, Robert H., and Jean-Loup Chenot. Fundamentals of metal forming. John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [11] Ou, H. "Prediction of dimensional errors in 3D complex shapes due to press elasticity." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 31.1-2 (2006): 61-70.
- [12] Vilotić, D., et al. "Application of net shape and near-net shape forming technologies in manufacture of roller bearing components and cardan shafts." Journal for Technology of Plasticity 32.1-2 (2007): 87-104.
- [13] Groenbaek, Jens, and Torben Birker. "Innovations in cold forging die design." Journal of Materials Processing Technology 98.2 (2000): 155-161.
- [14] Doege, E., J. Baumgarten, and T. Neumaier. "An active deflection compensation for calibrating and cold forging dies." 10 th International Cold Forging Congress 2000. 2000.
- [15] Osakada, K., and T. Nakamura. "Research and development of precision forging in Japan." Proceeding of 8th ITCP, Verona 9 (2005).
- [16] Douglas, Richard, and David Kuhlmann. "Guidelines for precision hot forging with applications." Journal of Materials Processing Technology 98.2 (2000): 182-188.

- [17] Kuzman, Karl. "Problems of accuracy control in cold forming." *Journal of Materials Processing Technology* 113.1 (2001): 10-15.
- [18] Καϊσαρλής, Γεώργιος. "Συμβολή στην ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού." Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ (2006).
- [19] Herbertson, T. "Reverse engineering." In *Fourth International Conference on Industrial Tools ICIT*, pp. 419-422. 2003.
- [20] Kazhdan, Michael, Matthew Bolitho, and Hugues Hoppe. "Poisson surface reconstruction." In *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, vol. 7. (2006).
- [21] Sokovic, Mirko, and J. Kopac. "RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development." *Journal of Materials Processing Technology* 175, no. 1 (2006): 398-403.
- [22] Bruno, Fabio, Stefano Bruno, Giovanna De Sensi, Maria-Laura Luchi, Stefania Mancuso, and Maurizio Muzzupappa. "From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition." *Journal of Cultural Heritage* 11, no. 1.
- [23] «Andrés, M Amparo Núñez, and Felipe Buill Pozuelo. "Evolution of the architectural and heritage representation." *Landscape and Urban Planning* 91, no. 2 (2009): 105-112».
- [24] "Reverse engineering", *Engineering Production Plans*, Accessed 20 May, 2016, <http://www.epplans.com/external/menu36/menu1.html>.
- [25] Ferreira, J. C., J. S. Mateus Artur, M. F. Alves Nuno, and M. C. Custódio Pedro. "Integrated product and tooling development via reverse engineering methodologies and rapid prototyping techniques." In *3o Congresso Brasileiro de Gestao de Desenvolvimento d*.
- [26] Fröhlich, Christofer, and Markus Mettenleiter. "Terrestrial laser scanning—new perspectives in 3D surveying." *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* 36, no. Part 8 (2004): W2.
- [27] "Coordinate Measuring Machine (CMM)", *Metrology and instrumentation Lecture Notes*, Accessed 28 May, 2016, <http://www.ignou.ac.in/upload/Unit-8-62.pdf>.
- [28] Γ. Καϊσαρλής, Σ. Διπλάρης, Μ. Σφαντζόπουλος "Συμβολή των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων στη μετρολογία Διαστάσεων: Σημερινή Πραγματικότητα και Προοπτικές." 1ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας Νοεμβρίου 2005.
- [29] Mitutoyo UK Website, Accessed on 25 June, 2016, <http://www.mitutoyo.co.uk>.
- [30] "T 130 Tool Touch Probe fastening with fixing clamps or mounting base", *A Tech Authority*, Accessed on 10 June, 2016, <http://www.atechauthority.com/products.asp?id=342>.
- [31] Batlle, Joan, E. Mouaddib, and Joaquim Salvi. "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey." *Pattern recognition* 31, no. 7 (1998): 963-982.

- [32] Bruno, F., Gianfranco Bianco, Maurizio Muzzupappa, Sandro Barone, and A. V. Razionale. "Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, no. 4 (2011): 508-518.
- [33] "Science Behind 3D Vision" Centre for Sports Engineering Research - Sheffield Hallam University, Accessed on 1 July,2016, <http://www.depthbiomechanics.co.uk/?p=102>.
- [34] Boehler, Wolfgang, Guido Heinz, and Andreas Marbs. "The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording." *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences* 34, no. 5/C7 (2002): 430.
- [35] Fu, Guoqiang, Arianna Menciassi, and Paolo Dario. "Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots." *Robotics and Autonomous Systems* 60, no. 10 (2012): 1317-1326.
- [36] Angelopoulou, Elli, and John R. Wright Jr. "Laser scanner technology." Technical Report (CIS), University of Pennsylvania (1999).
- [37] Guan, C., L. Hassebrook, and D. Lau. "Composite structured light pattern for three-dimensional video." *Optics Express* 11, no. 5 (2003): 406-417.
- [38] Salvi, Joaquim, Jordi Pages, and Joan Batlle. "Pattern codification strategies in structured light systems." *Pattern recognition* 37, no. 4 (2004): 827-849.
- [39] Rocchini, C. M. P. P. C., Paulo Cignoni, Claudio Montani, Paolo Pingi, and Roberto Scopigno. "A low cost 3 D scanner based on structured light." In *Computer Graphics Forum*, vol. 20, no. 3, pp. 299-308. 2001.
- [40] Xiao, Zhenzhong, Oichoo Chee, and Anand Asundi. "An accurate 3D inspection system using heterodyne multiple frequency phase-shifting algorithm." *Physics Procedia* 19 (2011): 115-121.
- [41] Mollenhauer, Klaus, and Helmut Tschöke, eds. *Handbook of diesel engines*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [42] Reif, Konrad, ed. *Diesel engine management*. Springer Vieweg, 2014.
- [43] Tschöke Helmut, "Diesel distributor fuel-injection pumps", Robert Bosch GmbH, 1999.
- [44] "Meshlab", Accessed on 11 September, 2016, <http://meshlab.sourceforge.net/>.
- [45] "MakerScanner Post Processing", MakerScanner, Accessed on 11 September, 2016, <http://makerbot.wikidot.com/makerscanner-post-processing>.
- [46] Sarcar, M. M. M., K. Mallikarjuna Rao, and K. Lalit Narayan. "Computer aided design and manufacturing." PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.
- [47] Παπαβασιλείου Κ. Αθανάσιος. "Τεχνολογίες CAT.RTP.CAE. " Β.Γκιούρδας Εκδοτική (2003).
- [48] "SolidWorks", RC Aircraft Blog Blog, Accessed on 11 September, 2016, <http://lenmetkowski.blogspot.gr/p/solidworks.html>.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [49] «W. Robert J. Funnell, "Finite-element method" ,Dept. BioMedical Engineering, McGill University, Accessed on 11 September, 2016, <http://audilab.bmed.mcgill.ca/AudiLab/teach/fem/fem.html>».
- [50] "PRÉCISION HAUTE QUALITÉ DES DONNÉES FIABILITÉ FACILITÉ D'UTILISATION", Scanner 3D, ISCAN M300 , Delta technologie, Accessed on 11 September,2016, http://www.hellopro.fr/documentation/pdf_soc/0/8/2/133280_ff4a69733f207b53621e518a0c5b32b8.pdf".
- [51] Voisin, Sophie, David L. Page, Sebti Foufou, Frédéric Truchetet, and Mongi A. Abidi. "Color influence on accuracy of 3D scanners based on structured light." In Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics, (2006):607009-607009.
- [52] "Forging Presses", Farinia Group, Accessed on 11 September,2016, <http://www.farinia.com/forge/presses>.
- [53] Barrau, Oa, et al. "Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging." *Wear* 255.7 (2003): 1444-1454.

