



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
*Σχεδίαση και Παραγωγή Προϊόντων*

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

**ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**  
**ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΧΥΤΕΥΣΗΣ**

**Μαρίνα Α. Ζήκα**  
**A.M 2020019013**

**Κρήτη 2023**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Σταυρουλάκης Γεώργιος (καθηγητής)

**ΜΕΛΟΣ:** Αντωνιάδης Αριστομένης (καθηγητής)

**ΜΕΛΟΣ:** Αλευράς Παναγιώτης (επίκουρος καθηγητής)

Copyright © Ζήκα Μαρίνα, Κρήτη 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα, που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό, πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα, που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι, αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ' βαθέως τον κ. Σταυρουλάκη και τους λοιπούς καθηγητές, του συγκεκριμένου ΜΠΣ του Πολυτεχνείου Κρήτης για την καθοδήγηση και συνολική υποστήριξη τους, από τους οποίους διδάχθηκα πολύ ενδιαφέροντα επιστημονικά πεδία με τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο, διευρύνοντας τους πνευματικούς μου ορίζοντες, ώστε να μπορώ να αναπτυχθώ τόσο σε προσωπικό, όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο.

Εν συνεχεία, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον ιδιοκτήτη της εταιρείας CONVEX S.A *(όπου είχα την ευκαιρία να εργαστώ ως υπεύθυνη τμήματος QA/QC)* κ. Π. Πανταζέλο και τον υπεύθυνο τμήματος μηχανουργείου κ. Μ. Καλούδη, για τη συγκατάθεση αναφορικά με τη συλλογή και διάθεση στοιχείων, χρήσιμων για την ανάπτυξη της εν λόγω μεταπτυχιακής διατριβής, που ως κύριο άξονα έχει τη μελέτη περίπτωσης επί πραγματικού αντικειμένου, το οποίο παράγεται από χύτευση εν θερμώ, καθώς επίσης και την αδειοδότηση περί χρήσης φωτογραφικού υλικού από τη παραγωγική διαδικασία της χύτευσης, αναφορικά με τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη, το καλούπι, τη μηχανή και το χυτό αντικείμενο.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τα αγαπημένα μου πρόσωπα, για την κατανόηση και συμβολή τους, σε όλους τους τομείς της ζωής μου.



## **Αφιέρωση**

*Στο σύντροφό μου Νίκο για την υποστήριξη, καλοσύνη και αγάπη του*

## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	7
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	8
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ</b> .....	13
1.1 Η χύτευση ως μέθοδος μορφοποίησης μετάλλων .....	14
1.2 Παρουσίαση της χύτευσης εν θερμώ ( <i>hot die casting</i> ) .....	18
1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χύτευσης εν θερμώ .....	19
1.4 Η διαδικασία τήξης και έγχυσης των μετάλλων .....	25
1.5 Η διαδικασία στερεοποίησης των μετάλλων .....	28
1.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά και φυσικοχημικές ιδιότητες των κραμάτων ψευδαργύρου ( <i>zinc alloys</i> ) .....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΕΝ ΘΕΡΜΩ</b> .....	33
2.1 Σημαντικά στοιχεία για το σχεδιασμό καλουπιού χύτευσης εν θερμώ .....	35
2.2 Η επιλογή υλικού κατασκευής .....	37
2.3 Οι συνθήκες λειτουργίας του καλουπιού χύτευσης εν θερμώ .....	39
2.4 Το σύστημα εξαερισμού του καλουπιού ως μέρος του σχεδιασμού .....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΟΥ ΧΥΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΕΝ ΘΕΡΜΩ</b> .....	46
3.1 Σύντομη παρουσίαση του χυτού αντικειμένου μαζικής παραγωγής ως τελικό προϊόν .....	47
3.2 Τα βασικά τεχνικά μέρη της μηχανής χύτευσης εν θερμώ .....	48

3.3 Παράμετροι χύτευσης για την έναρξη και παρακολούθηση της παραγωγής .....	51
3.4 Επιλογή υλικού zamak5 για τη χύτευση του αντικειμένου .....	52
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSYS ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ</b> .....	53
4.1 Περιγραφή μοντέλου θερμικής ανάλυσης του επιλεγόμενου καλουπιού χύτευσης εν θερμώ .....	55
4.2 Σταδιακή ανάπτυξη της θερμικής ανάλυσης μέσω του ANSYS Workbench .....	58
4.2.1 Εισαγωγή γεωμετρίας καλουπιού και πλεγματοποίηση ( <i>Geometry &amp; Mesh</i> ) .	77
4.2.2 Συσχέτιση υλικού κατασκευής καλουπιού και παραμέτρων χύτευσης για τη θερμική ανάλυση ( <i>Transient Thermal</i> ) .....	81
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συσχέτιση με ποιοτικά προβλήματα επί του παραγόμενου αντικειμένου ( <i>solution for temperature fluctuation</i> ) .....	95
4.4 Βελτιστοποίηση καλουπιού ( <i>Structural Optimization</i> ) .....	97
4.5 Μελέτη ροής υγρού κράματος μετάλλου εντός του κινητού μέρους ( <i>Fluid Flow</i> ) .....	111
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΠΙΛΟΓΟΣ</b> .....	120
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	122
<b>Παράρτημα</b> .....	125
<b>Παράρτημα Επίλυσης Fluid Flow</b> .....	134

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο κλάδος της βιομηχανίας, έχει αλλάξει με την πάροδο των ετών και την ταυτόχρονη εξέλιξη της τεχνολογίας, καθώς και τη συνεχιζόμενη υιοθέτηση τεχνικών μεθόδων υψηλής απόδοσης για κάθε γραμμή παραγωγής.

Ο απώτερος στόχος, είναι η ανάπτυξη προϊόντων που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις των πελατών, από πλευράς ποιότητας ενώ ταυτόχρονα θα αξιοποιείται ορθολογικά ο μηχανικός – τεχνικός εξοπλισμός, κάθε εταιρείας παραγωγής ώστε να επιτυγχάνεται η μείωση του παραγωγικού κόστους, σε βιώσιμα επίπεδα.

Προς αυτή την κατεύθυνση, πολλές βιομηχανικές μονάδες οι οποίες κατασκευάζουν μαζικά προϊόντα, κατόπιν καθετοποιημένης παραγωγής μέσω ποικίλων φάσεων και μηχανουργικών κατεργασιών, έχουν αρχίσει να προσανατολίζονται στην υιοθέτηση τεχνολογιών προσομοίωσης, με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων.

Τα εν λόγω προγράμματα, θεωρούνται πλέον ως βασικό εργαλείο στα χέρια των μηχανικών διαφόρων ειδικοτήτων, όπου ασχολούνται με το σχεδιασμό, την έρευνα και ανάπτυξη προϊόντων, τον ποιοτικό έλεγχο και γενικά τη μηχανική διεργασιών (*process engineering*).

Είναι ευρέως γνωστό, πως παρέχουν βοήθεια ως προς την κατανόηση αναφορικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τις φυσικές ιδιότητες, τις μηχανικές αντοχές, για τις συνθήκες χρήσης και λειτουργίας, των αντικειμένων που δημιουργούνται κατόπιν 3D σχεδιασμού και πρόκειται να βιομηχανοποιηθούν, σε διάφορα κέντρα εργασίας και με ποικίλες παραγωγικές φάσεις, κατά την μηχανουργική κατεργασία ή μη των πρώτων υλών (ανάλογα με τη μορφολογία, το είδος και τη χρήση του τελικού προϊόντος).

Συνεπώς, η παρούσα εργασία δείχνει τον τρόπο χρήσης ενός προγράμματος προσομοίωσης μηχανικής και θερμικής απόκρισης, καθώς και βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών στην περιοχή της χύτευσης, όπου δημιουργεί προστιθέμενη αξία ως προς το σχεδιασμό και παραγωγή των προϊόντων, στο σύνολο των δραστηριοτήτων της εκάστοτε εταιρείας, η οποία προσβλέπει στην τεχνολογική ανάπτυξη και αειφορία.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό από τον κλάδο της χημείας, η έννοια της θερμικής ανάλυσης αφορά κυρίως τη μελέτη για τη μεταβολή θερμοκρασίας, στη μονάδα του χρόνου, όταν έχουμε θέρμανση ή/και ψύξη ενός στοιχείου (*στη συγκεκριμένη περίπτωση, ως μελετώμενο αντικείμενο είναι καλούπι χύτευσης εν θερμώ*).

Βασικό σημείο δε αποτελεί, η εφαρμογή της θερμικής ανάλυσης στα κράματα μετάλλων, όπως για παράδειγμα το zamak, που ως υλικό είναι ένα κράμα αποτελούμενο από ψευδάργυρο (*Zn*) – αλουμίνιο (*Al*) – μαγνήσιο (*Mg*) και χαλκό (*Cu*), σε ποικίλη χημική ποσοστιαία σύσταση, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται.

Τα ως άνω δεδομένα, σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή και δε με συγκεκριμένη διαδικασία που είναι η χύτευση.

Για το λόγο αυτό, αξίζει να γίνει αναφορά σε έννοιες όπως η παραγωγή που στην ουσία μιλάμε για την κατασκευή προϊόντων προς χρήση και μεταπώληση, μέσω φάσεων κατεργασιών, κατά τις οποίες γίνεται χρήση σημαντικών πόρων της εκάστοτε εταιρείας, για παράδειγμα το ανθρώπινο δυναμικό, ο μηχανολογικός – τεχνικός εξοπλισμός, οι χημικές επεξεργασίες, οι ποιοτικοί έλεγχοι και οι τελικές συναρμολογήσεις.

Ως παραγωγική διαδικασία, νοούνται όλα τα στάδια από τα οποία θα περάσει μια πρώτη ύλη (*για παράδειγμα ingots zamak, ράβδοι ορείχαλκου, λάμες αλουμινίου ή/και inox κτλ.*), ώστε να είναι εφικτή η παραγωγή (*άρα και βιομηχανοποίηση*) του τελικού προϊόντος, που θα διατεθεί στην αγορά.

Συνεπώς, κάθε παραγωγική διαδικασία έχει ως σημείο έναρξης το σχεδιασμό του εκάστοτε προϊόντος (*product design*), το σχεδιασμό παραγωγικών διεργασιών (*product process design*) και τον καθορισμό τεχνικών προδιαγραφών (*product technical specification*), των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών, βοηθητικών υλικών – εξαρτημάτων, υλικών συσκευασίας κτλ.

Η παραγωγή δε κάθε προϊόντος, απαραίτητως πρέπει να περιλαμβάνει τις κατάλληλες οδηγίες με σημείο αναφορά τον έλεγχο ποιότητας, τις ενδιαμέσες φάσεις κατεργασίας, καθώς επίσης της συναρμολόγησης, συσκευασίας και σήμανσης του τελικού προϊόντος.

Τα πιο ευρέως διαδεδομένα συστήματα παραγωγής, όπου έχουν υιοθετηθεί από επιχειρήσεις του βιομηχανικού κλάδου (*ανεξαρτήτως πεδίου εφαρμογής*), σε παγκόσμιο επίπεδο είναι οι ακόλουθες:

- i.job shop manufacturing (*παραγωγή στο εργαστήριο*)
- ii.repetitive manufacturing (*επαναλαμβανόμενη παραγωγή*)
- iii.discrete manufacturing (*διακριτή παραγωγή*)
- iv.batch process manufacturing (*παραγωγή κατά παρτίδες*)
- v.continuous process manufacturing (*παραγωγή συνεχούς διεργασίας*)
- vi.3D printing (*τρισεδιάστατη εκτύπωση*)

Οι αποφάσεις, που καλείται η ανώτατη διοίκηση της εκάστοτε εταιρείας να λάβει ως προς την ανάπτυξη, βελτιστοποίηση ή ακόμα και την αναβάθμιση των παραγωγικών διαδικασιών, περιλαμβάνουν αρκετούς παράγοντες οι οποίοι δυνητικά μπορούν να αυξήσουν το κόστος, με τα πλεονεκτήματα να είναι τις περισσότερες φορές δύσκολο να εντοπιστούν και αξιολογηθούν, εξ αρχής.

Ως είθισται, η διαδικασία λήψης αποφάσεων από πολλές διοικήσεις ελληνικών επιχειρήσεων λαμβάνονται διαισθητικά και βάσει της εμπειρίας, με την υποστήριξη συμβατικών εργαλείων, τα οποία δεν παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης κινδύνων ή/και μείωσης αστοχιών που συνδέονται, με την παραγωγική διαδικασία, με αποτέλεσμα η διαδικασία λήψης αποφάσεων, να μη στοιχειοθετείται επαρκώς και να μην αποδίδει τα μέγιστα, για τη βιωσιμότητα μιας επιχείρησης.

Απώτερος στόχος λοιπόν, της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη της σημαντικότητας χρήσης ενός λογισμικού προσομοίωσης (*όπως το ANSYS*), που ως αντικείμενο μελέτης έχει το καλούπι παραγωγής χυτού προϊόντος και συγκεκριμένα χειρολαβής από τον προϊόντικό κατάλογο της εταιρείας CONVEX S.A, ως εργαλείο εμφάνισης.

Το εν λόγω προϊόν, έχει συγκεκριμένο φασεολόγιο κατασκευής και επεξεργασίας, με πρώτο στάδιο βιομηχανοποίησης τη χύτευση εν θερμώ, υπό συγκεκριμένες παραμέτρους ως ρυθμίσεις της αντίστοιχης μηχανής (*die casting machine, ως αυτόνομο κέντρο εργασίας, βάσει διάταξης παραγωγής*), όπου στην πράξη θα γίνει θερμική ανάλυση κατά τον κύκλο λειτουργίας του καλουπιού, συναρτήσει των τεχνικών χαρακτηριστικών και δεδομένων (*για παράδειγμα σχεδιασμός καλουπιού, υλικό κατασκευής, πρώτη ύλη, σχεδιασμός παραγόμενου προϊόντος κτλ.*), που αλληλοεπιδρούν με την παραγωγική διαδικασία και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η συγκεκριμένη επιλογή θέματος, έχει ως βάση την ικανότητα της τεχνικής προσομοίωσης στην ανάλυση ενός συστήματος παραγωγής και την ταυτόχρονη αξιολόγηση των επιπτώσεων που μπορεί να έχει η όποια αλλαγή, για να είναι εφικτή η λήψη αντικειμενικά τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Και αυτό γιατί, παραγωγικές διαδικασίες που βασίζονται σε μεθόδους όπως lean manufacturing, JIT, mass vertical manufacturing κτλ., επιδέχονται μοντελοποίηση και προσομοίωση με τη χρήση, σχετικών λογισμικών όπως το προαναφερθέν, δίνοντας την ευκαιρία στα αρμόδια στελέχη, για μια αποτελεσματική ανάλυση κατά τη φάση ανάπτυξης νέου προϊόντος ή/και βελτίωση ήδη υπάρχοντος, μέσα από πειραματισμούς που μειώνουν σε γενικές γραμμές το πλήθος, άρα και κόστος αντίστοιχων δοκιμών.

## ABSTRACT

As is known from the field of chemistry, the concept of thermal analysis concerns the study of temperature change, in the unit of time, when we have heating and / or cooling of an element (*in this case, the object studied is a hot casting mold*).

A key point is the application of thermal analysis to metal alloys, such as zamak, which as a material is an alloy consisting of zinc (*Zn*) – aluminum (*Al*) – magnesium (*Mg*) and copper (*Cu*), in varying chemical percentage composition, depending on the intended use.

The above data are related to production and not to a specific process, which is hot die casting.

For this reason, it is worth mentioning concepts such as production, where the manufacture of products for use and resale, through processing phases, during which each company uses significant resources, like employees, mechanical – technical equipment, chemical substances, plan of quality control and final assemblies.

The production process means all the stages through which a raw material (*for example ingots zamak, brass rods, aluminum and/or inox blades, etc.*) is able to produce (*and therefore industrialize*) the final product, which will be placed on the market.

Therefore, each production process has as its starting point the design of each product, the production processes, the definition of technical specifications, the used raw materials, auxiliary materials – components, packaging materials, etc.

The production of each product must necessarily include appropriate instructions with reference to quality control, intermediate processing phases, as well as assembly, packaging in order to finalize the product.

The most widespread production systems, which they have been adopted by companies in the industrial sector (*regardless of scope*), worldwide are the following:

- i. job shop manufacturing
- ii. repetitive manufacturing
- iii. discrete manufacturing
- iv. batch process manufacturing
- v. continuous process manufacturing
- vi. 3D printing

The decisions that the top management of each company is called upon to make regarding the development, optimization or even upgrading of production processes,



include several factors that can potentially increase costs, with the advantages being most often difficult to identify and evaluate, from the beginning.

As usual, the decision-making process by many managements of Greek companies follows the instinct and is based on experience, with the support of conventional tools, which do not provide the ability to predict risks and / or reduce failures associated with the production process, resulting in insufficient unsupported decisions which do not yield the optimal results that would guarantee the viability of the company.

Therefore, the goal of this thesis is to highlight the importance of using simulation software (*such as ANSYS*), which has as a subject of study the cast mold of manufacture a relevant product and specifically a handle from CONVEX S.A catalog, as a model application.

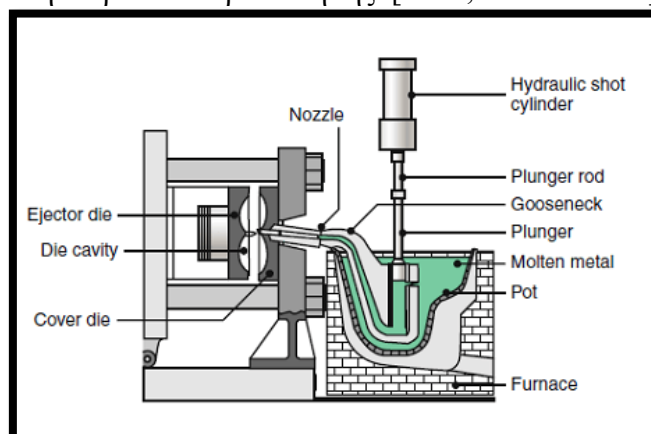
This product has a specific flow of manufacturing, with the first stage of industrialization being hot casting, under specific parameters as setup of the respective machine (*die casting machine, as an autonomous work center, based on production layout*), where in practice thermal analysis will be performed during the operation cycle of the mold, depending on the technical characteristics and data (*for example mold design, material, raw material, product design etc.*) which interacts with the production process and the quality of the final product.

This choice of topic is based on the ability of technical simulation in the analysis of a production system, the simultaneous evaluation of the impact that any change may have, that make the designer able to make objectively documented and justified decisions.

In fact, production processes based on methods such as lean manufacturing, JIT, mass vertical manufacturing, etc., can be modeled and simulated using relevant software such as the abovementioned, giving at the same time the opportunity to competent executives for an effective analysis during the development phase of a new product and / or improvement of an existing one, through experiments that generally reduce the number, hence the cost of corresponding tests.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η χύτευση είναι, μια μηχανουργική κατεργασία κατά την οποία κράμα μετάλλου από στερεά μορφή (ως προμηθευόμενη πρώτη ύλη, σε σχήμα πλίνθου *ingot*), τοποθετείται μέσα στο φούρνο της χυτόπρεσσας, όπου στην κατάλληλη θερμοκρασία  $\sim 420^{\circ}\text{C}$  τήκεται, ώστε το ρευστό υλικό μέσω των εξαρτημάτων της μηχανής με κύριο το ακροφύσιο θα εισέλθει στις κοιλότητες του καλουπιού, ώστε να μορφοποιηθεί το χυτό αντικείμενο, κατά τη διάρκεια στερεοποίησης. [2016, Parth Lakum]



Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση των βασικών μερών μιας χυτόπρεσσας που επενεργούν στη διαδικασία της χύτευσης **πηγή:** [PRESSURE DIE CASTING - Sunrise Metal \(sunrise-casting.com\)](http://sunrise-casting.com)

Γίνεται εύκολα κατανοητό πως, η συγκεκριμένη διαδικασία παραγωγής δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς, να σχεδιάζουν καλούπια διαφορετικών μορφών, για τα οποία μπορούν να βελτιώσουν τη μηχανική τους αντοχή (κατόπιν συγκεκριμένων ενεργειών και με την προϋπόθεση επιλογής, του κατάλληλου υλικού για την κατασκευή τους), να ελέγχουν τις παραμέτρους χύτευσης άρα και τις συνθήκες λειτουργίας του εκάστοτε καλουπιού όπου συνδέονται άμεσα και με τη διάρκεια ζωής του, με αποτέλεσμα την παραγωγή ποιοτικών επιφανειών.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, η χύτευση ως παραγωγική διαδικασία διέπεται από αντίστοιχη τεχνική ορολογία, η οποία αφορά κυρίως:

- ❖ τον σκελετό στον οποίο τοποθετείται το καλούπι
- ❖ τη φόρμα του καλουπιού με την/τις κοιλότητα/ες χύτευσης (εξαρτάται από το παραγόμενο προϊόν)
- ❖ το ακροφύσιο έγχυσης
- ❖ το σύστημα τροφοδοσίας
- ❖ τα κανάλια τροφοδοσίας
- ❖ τα κανάλια εξαερισμού

### 1.1 Η χύτευση ως μέθοδος μορφοποίησης μετάλλων

Στις μέρες μας, η χύτευση αποτελεί μια διαδικασία παραγωγής η οποία έχει ενταχθεί στη βιομηχανία και δη στον κλάδο της μεταποίησης, ως μέθοδος κατασκευής πολύπλοκων μορφολογικά και ποικίλων διαστασιολογικά εξαρτημάτων, ευρείας χρήσης, αν και χρονολογικά αναφέρεται από την περίοδο της αρχαιότητας.

Αυτό πρακτικά συμβαίνει γιατί, η ανάγκη σε μαζική παραγωγή οδήγησε στην επιλογή μεταλλικών κραμάτων, τα οποία θα μορφοποιηθούν μέσω της χύτευσης, για να παράξουν αυτοματοποιημένα (*υπολογιζόμενος χρόνος, ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας του καλουπιού*), πολλά τεμάχια με το μικρότερο κόστος.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, ως προς τη χύτευση μετάλλων έχουν αναπτυχθεί δυο μέθοδοι, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και με υποκατηγορίες, όπως:

1. χύτευση αναλώσιμου καλουπιού
  - ❖ sand casting (*χύτευση σε άμμο*)
  - ❖ χύτευση με γύψο
  - ❖ shell casting (*χύτευση σε κέλυφος*)
  - ❖ investment casting (*χύτευση επενδύσεων*)
2. χύτευση με μόνιμο καλούπι
  - ❖ gravity casting (*χύτευση μέσω βαρύτητας*)
  - ❖ **die casting** (*χύτευση σε καλούπι*)

Στην πραγματικότητα, η χύτευση ως διαδικασία αφορά κατά κύριο λόγο τη στερεοποίηση του κράματος μετάλλου, όπου από την υγρή κατάσταση του υλικού που εισέρχεται εντός της/των κοιλότητας/ων του καλουπιού, θα παραμείνει μέχρι να σχηματιστεί η τελική μορφή, του προϊόντος για το οποίο αρκετά από τα δομικά χαρακτηριστικά που συσχετίζονται άμεσα με τις ιδιότητες του, διαμορφώνονται στο στάδιο της στερεοποίησης. [2021, B. Gangadevi]

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, η μετάβαση από την υγρή στη στερεά κατάσταση του μετάλλου, είναι πολύ σημαντική διότι μπορούν να εμφανιστούν αστοχίες οι οποίες θα παραμείνουν στη δομή του αντικειμένου, με σημαντικότερες τον εγκλωβισμό αέρα και τη συστολή. Αναφορικά με, τη στερεοποίηση μπορούμε να πούμε ότι, λαμβάνει χώρα σε δυο φάσεις που ονομάζονται, πυρηνοποίηση και ανάπτυξη.

Η *πυρηνοποίηση*, αρχίζει να εμφανίζεται όταν ένα μικρό στερεό δημιουργείται μέσα στο υγρό μέταλλο, όπου θα πρέπει να έχει μια ελάχιστη κρίσιμη διάσταση και η ανάπτυξη του οποίου συμβαίνει γιατί, τα άτομα από το υγρό μέταλλο προσκολλώνται στη στερεά περιοχή, έως ότου ολοκληρωθεί η στερεοποίηση.

Επίσης, από πλευράς θερμοκρασιών η στερεοποίηση συμβαίνει όταν το υγρό μέταλλο θα ψυχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη από αυτή της τήξης, όπου η αντίστοιχη ενέργεια στην κρυσταλλική δομή είναι μικρότερη, από αυτή στο υγρό μέταλλο.

Με την πτώση της θερμοκρασίας, το στερεό σταθεροποιείται όλο και πιο πολύ με την ενεργειακή διαφορά να αυξάνει και να υπολογίζεται από τον ακόλουθο γενικό τύπο.

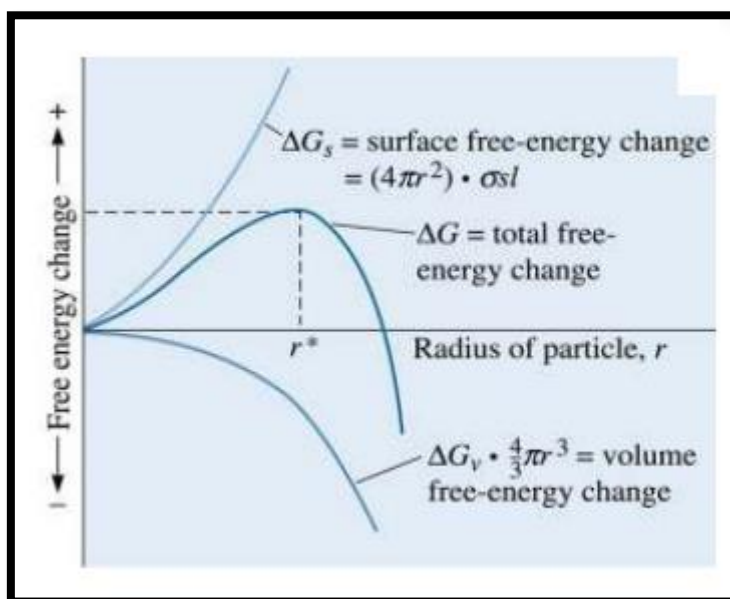
$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma$$

Εικόνα 2. Σχηματική απεικόνιση του τύπου υπολογισμού ελεύθερης ενέργειας  $\Delta G$  όπου:

$\Delta G_v$ : η ελεύθερη ενέργεια όγκου

$\sigma$ : ελεύθερη επιφανειακή ενέργεια

$r$ : κρίσιμη ακτίνα



Εικόνα 2. Διάγραμμα μεταβολής ελεύθερης ενέργειας κατά το στάδιο στερεοποίησης

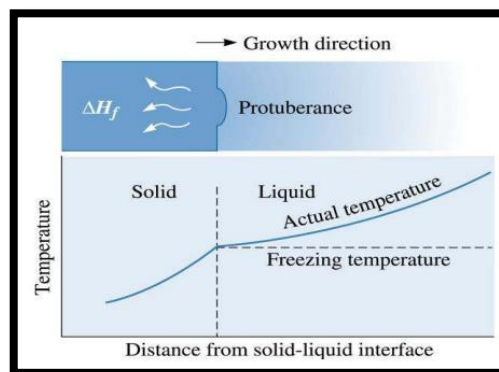
πηγή: [L3-5.pdf \(cam.ac.uk\)](https://www.cam.ac.uk/content/images/aj01232/aj01232.pdf)

Η *ανάπτυξη*, λαμβάνει χώρα με το που σχηματίζεται ο πυρήνας και εξελίσσεται με την προσκόλληση ατόμων μετάλλου, στην επιφάνεια του στερεού όπου σε καθαρά μέταλλα ή/και τυποποιημένα κράματα, η εν λόγω ανάπτυξη κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης έχει άμεση σχέση με, την απαγωγή θερμότητας από το σύστημα.

Αξίζει δε να σημειωθεί ότι, δυο τύποι θερμότητας πρέπει να απαχθούν οι οποίοι είναι η ειδική θερμότητα του υγρού μετάλλου και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, όπου όταν αναφερόμαστε σε ειδική θερμότητα, ουσιαστικά εννοούμε την απαιτούμενη

θερμότητα με σκοπό να αλλάξει, η θερμοκρασία μιας μονάδας βάρους του υγρού μετάλλου, κατά ένα βαθμό. [2014, Doru M.]

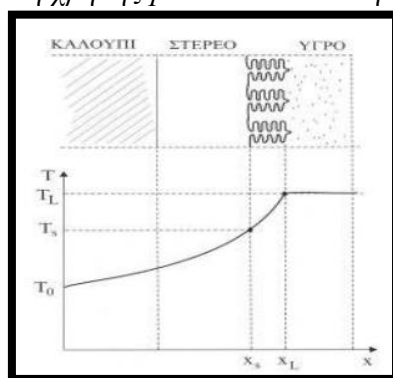
Για το λόγο αυτό, θα πρέπει αρχικά να απαχθεί η ειδική θερμότητα, είτε μέσω ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, είτε μέσω του καλουπιού χύτευσης, έως ότου η θερμοκρασία φτάσει το σημείο τήξης. Ενώ στη συνέχεια, η λανθάνουσα θερμότητα απάγεται από τη διεπιφάνεια υγρού – στερεού, μέχρι τη στιγμή ολοκλήρωσης της στερεοποίησης.



Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση της απόστασης από τη διεπιφάνεια υγρού – στερεού συναρτήσει της θερμοκρασίας **πηγή:** [Phase Diagrams and Solidification \(all content\) \(doitpoms.ac.uk\)](http://Phase%20Diagrams%20and%20Solidification%20(all%20content)%20(doitpoms.ac.uk))

Επίσης, κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου εντός της/των κοιλότητας/ων του καλουπιού η θερμότητα ρέει από το υγρό μέταλλο, προς το στερεό, το καλούπι και μετά προς το περιβάλλον, με την ταχύτητα στερεοποίησης να εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος, από το μέγεθος θερμοροής, όπου έχουμε την παρακάτω διάκριση:

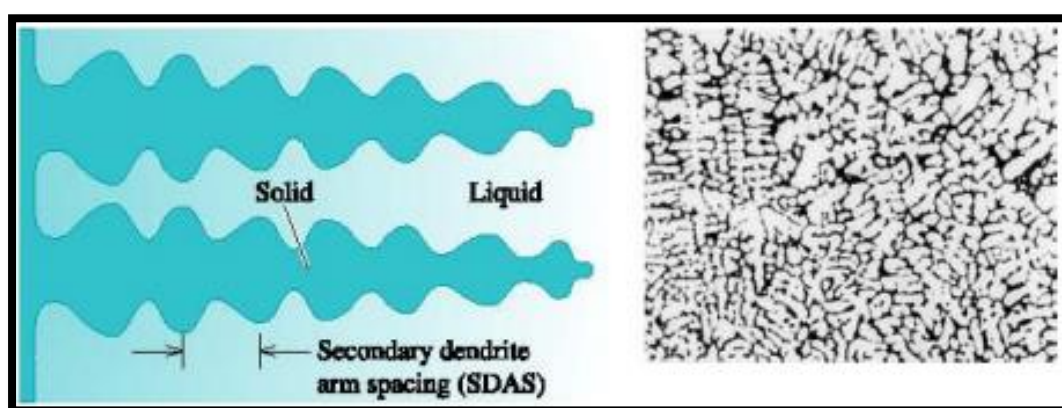
- ❖ περιορισμός της θερμοροής, από τη θερμική αντίσταση του καλουπιού (*περίπτωση sand casting*)
- ❖ περιορισμός της θερμοροής, από την αντίσταση διεπιφάνειας του καλουπιού και του στερεού μετάλλου (*περίπτωση χρήσης permanent mold ή die casting*)



Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση, της στερεοποίησης των κραμάτων μετάλλου με την επενέργεια του καλουπιού, στις αντίστοιχες θερμοκρασιακές μεταβολές **πηγή:** [3a\\_solidification.pdf \(uoi.gr\)](http://3a_solidification.pdf(uoi.gr))

Βασικοί παράγοντες, είναι η κατεύθυνση, ο ρυθμός και το είδος της ανάπτυξης και οι οποίοι μπορούν να ελεγχθούν μέσω του τρόπου, που γίνεται η απαγωγή της θερμότητας. [2022, Utkarsh Chadha]

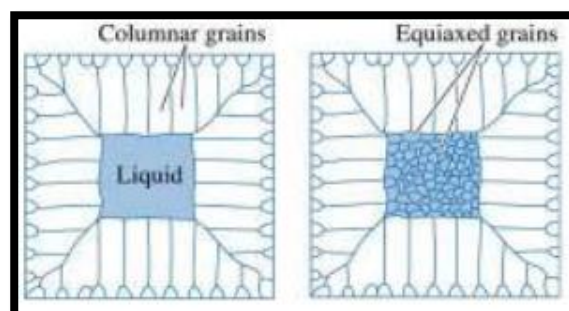
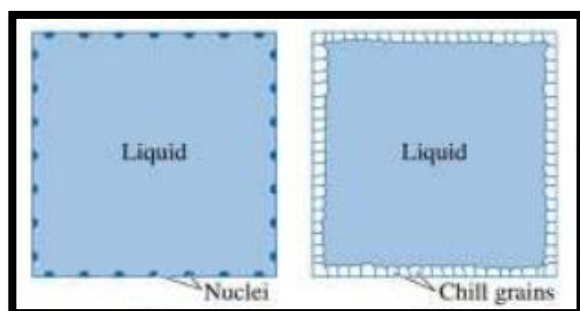
Για την επίτευξη, μιας ποιοτικής επιφάνειας χυτού σημαντικό ρόλο παίζει η κατευθυντική στερεοποίηση, κατά την οποία το υγρό μέταλλο ρέει εντός του καλουπιού προς την αντίστοιχα υγρή πλευρά της διεπιφάνειας, προλαμβάνοντας με αυτό τον τρόπο το φαινόμενο της συστολής, που συμβαίνει κατά την αλλαγή κατάστασης του υλικού. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, ο αυξημένος ρυθμός ψύξης θα επιφέρει, μικρού μεγέθους κόκκους στην κρυσταλλική δομή του χυτού προϊόντος, κάτι το οποίο θα προσδώσει πολύ καλές μηχανικές αντοχές.



Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση της κρυσταλλικής δομής του χυτού κατά τη στερεοποίηση, από υγρή σε στερεά κατάσταση **πηγή:** [3a\\_solidification.pdf \(uoi.gr\)](#)

Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη της δομής ενός χυτού εξαρτήματος κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, περιλαμβάνει τα ακόλουθα τέσσερα στάδια, ως:

- αρχή της πυρηνοποίησης
- σχηματισμός ζώνης γρήγορης ψύξης
- ανάπτυξη επιμηκών κόκκων
- ανάπτυξη κόκκων μορφολογίας κυττάρου



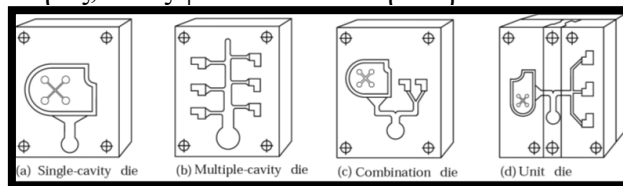
Εικόνα 6. Σχηματική απεικόνιση των σταδίων ανάπτυξης **πηγή:** [3a\\_solidification.pdf \(uoi.gr\)](#)

### 1.2 Παρουσίαση της χύτευσης εν θερμώ (*hot die casting*)

Η χύτευση υπό πίεση, θεωρείται ως μια ευρέως διαδεδομένη παραγωγική διαδικασία που ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται κράματα μετάλλων για κατάλληλα καλούπια, στα οποία το υγρό μέταλλο εισέρχεται υπό πιέσεις που κυμαίνονται από 0,7 έως 700 MPa, μέχρι τη στερεοποίηση, άρα και μορφοποίηση του αντικειμένου.

Είναι γνωστό πως, μη σιδηρούχα μέταλλα για παράδειγμα το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το μαγνήσιο, ο μόλυβδος, ο κασσίτερος και κράματα αυτών, χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή συμπαγών, ποικίλης μορφολογίας και υψηλής ποιότητας, προϊόντων. [2023, Sang Chol Om]

Ανάλογα με την πολυπλοκότητα, τον όγκο, το μέγεθος και την πρώτη ύλη, το παραγόμενο αντικείμενο δύναται να αποτελείται, από μονά ή/και πολλαπλά εκμαγεία. Για το λόγο αυτό, οι μήτρες των καλουπιών που χρησιμοποιούνται στη χύτευση εν θερμώ, μπορούν να έχουν μία κοιλότητα, πολλαπλές κοιλότητες ή/και πολλές διαφορετικές κοιλότητες, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση για τα είδη καλουπιών die casting [πηγή: 2 Plates Mold,3 Plates Mold And Hot Runner Mold -Topworks Plastic Molding \(plasticmoulds.net\)](#)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, ως παραγωγική διαδικασία εμφανίστηκε για πρώτη φορά από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα, με σκοπό την κατασκευή βιομηχανικών προϊόντων. Μέχρι σήμερα, έχει αποδειχθεί σα μία ιδιαίτερα κρίσιμη διαδικασία μαζικής παραγωγής, η οποία περιλαμβάνει τεχνολογικές εξελίξεις, όπως τις μεθόδους κρυσταλλογραφικού δομικού ελέγχου, για τη βελτίωση τόσο των παραμέτρων παραγωγής, όσο και της ποιότητας επιφανειών.

Η βασική αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης χύτευσης είναι, το κλείσιμο των μητρών του καλουπιού με το έμβολο (*plunger*) να αποσύρεται, ώστε να η θύρα του θαλάμου (*chamber's gate*), η οποία θα επιτρέψει στο ρευστό μέταλλο (*molten metal*), να εισέλθει μέσα στο θάλαμο. [2023, Jian Yang]

Εν συνεχεία, το έμβολο σφραγίζει τη θύρα πιέζοντας το ρευστό μέταλλο στην κοιλότητα της μήτρας, μέσω του λαιμού (*gooseneck*) και του ακροφυσίου (*nozzle*). Μετά την είσοδο στην κοιλότητα της μήτρας (*die cavity*), το ρευστό μέταλλο διατηρείται υπό πίεση, μέχρι να στερεοποιηθεί μέσα στη μήτρα.

1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χύτευσης εν θερμώ

Στους παρακάτω συγκεντρωτικούς πίνακες, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τόσο της χύτευσης με μόνιμο καλούπι (*die casting*), όσο και της χύτευσης εν θερμώ (*hot die casting*). [2023, Junhao Sun]

### **ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ Die Casting**

#### **Υψηλή απόδοση και ακρίβεια**

*Η χύτευση υπό πίεση, είναι μια πολύ αποτελεσματική και ακριβής διαδικασία παραγωγής, επιτρέποντας την κατασκευή ποικίλων μορφολογιών αντικειμένων υπό αυστηρές ανοχές. Αυτό πρακτικά συμβαίνει γιατί, η τεχνολογία στον τομέα του σχεδιασμού μέσω των λογισμικών CAD / CAM, βοήθησε στη βελτίωση της χύτευσης, σε σημαντικό βαθμό.*

#### **Αύξηση ρυθμού παραγωγής**

*Ως παραγωγική διαδικασία, είναι αρκετά γρήγορη διότι, σε μικρό χρονικό διάστημα μπορούν να παραχθούν, μεγάλες ποσότητες χυτών κάτι που την καθιστά κατάλληλη για γραμμές μαζικής παραγωγής.*

#### **Μείωση παραγωγικού κόστους**

*Από οικονομικής πλευράς, η χύτευση ως διαδικασία μπορεί να μειώσει το παραγωγικό κόστος, διότι μπορεί μεν το κόστος εργαλείων και αναλωσίμων αρχικά να είναι υψηλό, αντισταθμίζεται όμως με την αντίστοιχη αύξηση του όγκου παραγωγής. Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο, είναι η μείωση δευτερογενών φάσεων κατεργασιών, πράγμα το οποίο εξίσου μειώνει το συνολικό παραγωγικό κόστος.*



### ***Αντοχή***

Όπως είναι γνωστό, τα αντικείμενα που παράγονται κατόπιν χύτευσης, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα, έχοντας αντοχή σε υψηλά θερμικά και δυναμικά φορτία. Επιπροσθέτως, δύνανται να έχουν αντοχή στη διάβρωση (ανάλογα το κράμα πρώτης ύλης ή/και το μέταλλο), με αντίστοιχα μεγάλη διάρκεια ζωής.

### ***Παραγωγική ευελιξία***

Η διαδικασία της χύτευσης, προσφέρει ευελιξία στην εκάστοτε γραμμή παραγωγής διότι μπορεί να υιοθετηθεί από πληθώρα εργοστασιακών μονάδων, από αυτοκινητοβιομηχανίες έως και βιομηχανίες καταναλωτικών προϊόντων.

### ***MEIONEKTHMATA Die Casting***

#### ***Υψηλό κόστος εργαλείων και αναλωσίμων***

Λόγω του ότι, το κόστος αγοράς εργαλείων και λοιπών αναλωσίμων είναι αρκετά υψηλό, αυτομάτως αυξάνεται και το παραγωγικό κόστος της χύτευσης ως διαδικασίας, κάτι το οποίο αποτελεί βασικό εμπόδιο για κάποια μικρομεσαία βιομηχανία να την εντάξει στη γραμμή παραγωγής.

#### ***Περιορισμένο εύρος εφαρμογών***

Λόγω του ότι, η διαδικασία της χύτευσης προϋποθέτει τη χρήση συγκεκριμένων μεταλλικών κραμάτων με κύρια στοιχεία το αλουμίνιο, το ψευδάργυρο και μαγνήσιο, ως αποτέλεσμα περιορίζεται το εύρος των παραγωγικών εφαρμογών, άρα και χρησιμοποιούμενων υλών.

### ***Επιφανειακές αστοχίες***

*Όπως είναι γνωστό, τα χυτά αντικείμενα δύναται να εμφανίσουν επιφανειακές αστοχίες και ατέλειες δομής, οι οποίες οφείλονται σε παράγοντες που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, όπως καθαρότητα πρώτης ύλης, παράμετροι χύτευσης, δυνατότητες μηχανής και σωστός σχεδιασμός καλουπιού. Οι εν λόγω αστοχίες, έχουν σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση ποιότητας επιφανείας των προϊόντων, εν γένει.*

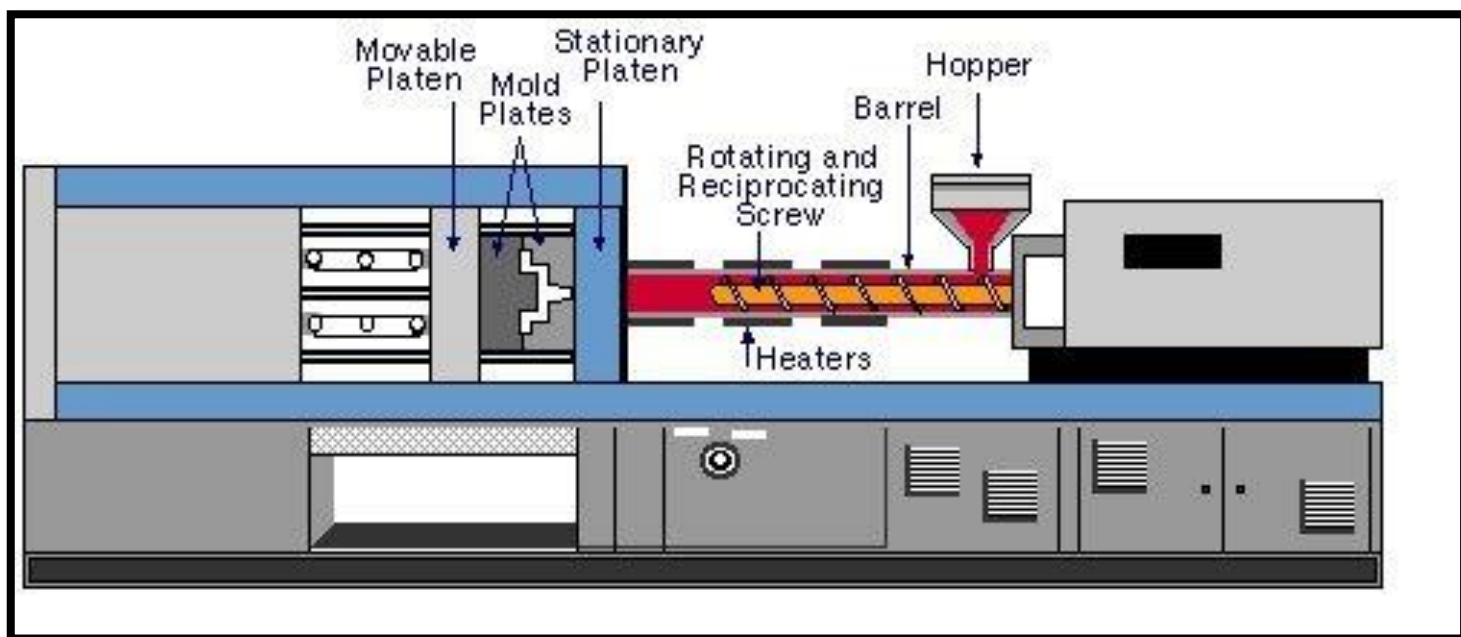
### ***Επιπτώσεις στο περιβάλλον***

*Η συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία, έχει επιπτώσεις που υποβαθμίζουν το περιβάλλον, εξαιτίας της χρήσης ενέργειας και δημιουργίας αποβλήτων, κατά τη λειτουργία των χυτοπρεσσών, για την παραγωγή αντικειμένων.*

### ***Σχεδιαστικοί περιορισμοί***

*Αποδεικνύεται ότι, η χύτευση ως παραγωγική διαδικασία θέτει όρια στον τομέα του σχεδιασμού, ειδικότερα στην περίπτωση αντικειμένων με πολύπλοκη μορφολογία και ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά. Αυτό πρακτικά συμβαίνει, διότι η σχεδίαση ενός πολύπλοκου καλουπιού προϋποθέτει, την τήρηση συγκεκριμένων κατασκευαστικών ανοχών, καθώς και τη χρήση κατάλληλων εργαλείων, με την αντίστοιχη απασχόληση εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού.*

Πίνακας 1. Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τη χύτευση ως παραγωγική διαδικασία



Εικόνα 8. Σχηματική απεικόνιση βασικών στοιχείων μιας μηχανής χύτευσης που επενεργούν στην παραγωγική διαδικασία πηγή: [Product Spotlight: Die Casting Machine Slide Guide Bushings - National Bronze Manufacturing](#)

### ***ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ Hot Die Casting***

#### ***Χρήση εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας***

*Το συγκεκριμένο είδος χύτευσης, δύναται να παράγει αντικείμενα με απαιτήσεις ειδικών επιφανειακών φινιρισμάτων, όπου μειώνονται σημαντικά οι επεξεργασίες με πρόσθετες φάσεις. Κάτι τέτοιο συμβαίνει επειδή, το υγρό μέταλλο ρέει μέσα στη μήτρα του καλουπιού με υψηλή πίεση, πράγμα που εξασφαλίζει την ομοιομορφία του αντικειμένου που θα σχηματιστεί. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι, η παραγωγή επιφανειών με ικανοποιητική επιφάνεια, υπό ακριβείς διαστάσεις.*

### **Πολύπλευρη παραγωγική διαδικασία**

Η εν λόγω χύτευση, σε γενικές γραμμές είναι μια ευέλικτη παραγωγική διαδικασία, που επιτρέπει την κατασκευή μιας ευρείας γκάμας αντικειμένων, μέσω της χρήση μεταλλικών κραμάτων, που διατίθενται στην αγορά και έχουν στοιχεία όπως ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο, το αλουμίνιο κτλ. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων με απαιτητική γεωμετρία.

### **MEIONEKTHMATA Hot Die Casting**

#### **Περιορισμοί μεγέθους αντικειμένων**

Ένα βασικό μειονέκτημα, της χύτευσης εν θερμώ έγκειται στον περιορισμό μεγέθους των αντικειμένων (δηλαδή ως προς τον όγκο) και την πολυπλοκότητα τους, κάτι το οποίο οφείλεται από τον αντίστοιχο κατασκευαστικό περιορισμό, της μήτρας του καλουπιού γιατί, μια πολύπλοκη μήτρα έχει αυξημένο συντελεστή δυσκολίας να κατασκευαστεί, συν του ότι είναι αρκετά δαπανηρή η ανάλογη εργασία.

#### **Υψηλό κόστος επένδυσης**

Είναι γνωστό πως, ως παραγωγική διαδικασία η χύτευση εν θερμώ είναι αρκετά οικονομική εν τούτοις, απαιτεί μεγάλο αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο, γιατί προϋποθέτει την αγορά ειδικού τεχνικού εξοπλισμού, εργαλείων, πρώτης ύλης, αναλωσίμων, εξοπλισμού ποιοτικού ελέγχου κτλ. Ενώ, κρίνεται πολύ σημαντική η απασχόληση έμπειρου εργαζόμενου για να μπορεί, όχι μόνο να θέτει σε λειτουργία και να χειρίζεται τη μηχανή, αλλά παράλληλα να ελέγχει την πορεία της διαδικασίας και το εκάστοτε παραγόμενο αντικείμενο.

### ***Επιλογή συγκεκριμένων ά υλών***

*Για το συγκεκριμένο είδος χύτευσης, υπάρχει περιορισμός αναφορικά με τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη, γιατί η βασική απαίτηση είναι ά ύλες οι οποίες μπορούν να λιώσουν σε υψηλή θερμοκρασία, χωρίς να προκαλέσουν βλάβη στις χυτόπρεσες. Συνήθως, γίνεται χρήση μεταλλικών κραμάτων με χαμηλό σημείο τήξης.*

Πίνακας 2. Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τη χύτευση εν θερμώ ως παραγωγική διαδικασία

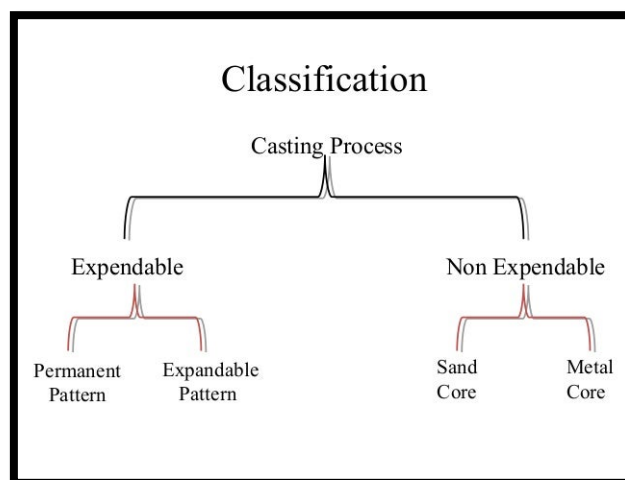
#### 1.4 Η διαδικασία τήξης και έγχυσης των μετάλλων

Όπως έχει προαναφερθεί, η χύτευση ουσιαστικά είναι μια διαδικασία στερεοποίησης των μετάλλων ή/και κραμάτων, μέσω επαναλαμβανόμενων ενεργειών που λαμβάνει χώρα σε ένα αντίστοιχο καλούπι, με σκοπό την παραγωγή του τελικού επιθυμητού αντικειμένου. Η συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την κατασκευή αντικειμένων ποικίλης μορφολογίας, όπου άλλες μέθοδοι κατεργασίας θα ήταν οικονομικά ασύμφορες. [2017, Vaibhav Ingle]

Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια παρατίθενται τα βήματα που ακολουθούνται, στο σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας, με πρώτο στάδιο την τήξη και τελευταίο τη χύτευση, συμπεριλαμβανομένης και της έγχυσης.

#### ΤΗΞΗ

Το αρχικό στάδιο της χύτευσης, είναι η θέρμανση κράματος μετάλλου μέσα στο φούρνο της χυτόπρεσσας, μέχρι να φτάσει στην υγρή μορφή του, κάτι που πραγματοποιείται σε μια θερμοκρασία, μεγαλύτερη του σημείου τήξης και συνδέεται άμεσα από τον τύπο του μετάλλου ή/και κράματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι, ένα κράμα που περιέχει ψευδάργυρο έχει σημείο τήξης περίπου στους 900°F (δηλαδή 482,22°C), ενώ τα καθαρά μέταλλα έχουν το σημείο τήξης, στην ίδια σταθερή θερμοκρασία, ενώ στην περίπτωση κραμάτων, όπως είναι κατανοητό η μετάβαση τους στην υγρή κατάσταση θα πραγματοποιηθεί εντός εύρους θερμοκρασιών, βάσει της σύστασής. Επίσης, στη ρευστή κατάσταση ένα μέταλλο ή/και κράμα διαθέτει μεγάλα ποσοστά ενέργειας, καθώς η θέρμανση γίνεται πάνω από το σημείο της τήξης, ώστε να είναι εφικτός ο αρκετός χρόνος, για να μειωθεί η θερμοκρασία κατά την έγχυση.



Εικόνα 9. Σχηματική απεικόνιση κατηγοριοποίησης της διαδικασίας χύτευσης **πηγή:** [Metal Casting processes including pattern making and mold making, Patterns, Casting Defects | PPT \(slideshare.net\)](#)

## ΑΠΑΕΡΩΣΗ

Εφόσον, κάνουμε χρήση κραμάτων ψευδαργύρου ή αλουμινίου για τη χύτευση αντικειμένων, ένα βασικό στάδιο είναι η απαέρωση (*degassing*) που λαμβάνει χώρα πριν την έγχυση.

Αρκετά δε είναι τα κράματα μετάλλων, που απαιτούν κάποια τροποποίηση πριν την έγχυση, με σκοπό την αύξηση της ρευστότητας, βελτιώνοντας παράλληλα την κρυσταλλική δομή των κόκκων, διευκολύνουν την απομάκρυνση των ρύπων κτλ. με τα πιο κατάλληλα στοιχεία να είναι το τιτάνιο (*Ti*) – βόριο (*B*), χαλκός (*Cu*) – φώσφορος (*P*), μαγγάνιο (*Mn*).

## ΕΓΧΥΣΗ

Στη συνέχεια και εφόσον, έχει ολοκληρωθεί το στάδιο απαέρωσης ή/και τροποποίησης, η θερμοκρασία του μετάλλου ή μεταλλικού κράματος, ελέγχεται με μετρητικά όργανα τα οποία, εμβαπτίζονται εντός του φούρνου της χυτόπρεσσας, για να διασφαλιστεί ότι έχει φτάσει περίπου τους 50°F (*δηλαδή 10°C*), πάνω από την επιθυμητή θερμοκρασία έκχυσης, όπου το υγρό μέταλλο θα εισέλθει στις κοιλότητες του καλουπιού, για να μορφοποιηθεί. Το σημαντικότερο στοιχείο, σε αυτό το στάδιο είναι το σύστημα κώνος – ακροφύσιο, διότι μειώνει την ταχύτητα εισόδου του ρευστού κατά την είσοδο.

## ΨΥΞΗ

Κατά την είσοδο το υγρό μέταλλο ή/και κράμα μετάλλου στις κοιλότητες του καλουπιού, ψύχεται αρκετά γρήγορα και αυτό γιατί η θερμοκρασία, ως βασικός παράγοντας στην όλη διαδικασία, μεταβάλλεται σε βαθμό κάτω από το σημείο τήξης, δίνοντας με αυτό τον τρόπο χώρο για, το στάδιο της στερεοποίησης, με χρονική διάρκεια μόλις λίγα λεπτά. [2023, Kai-tian Zhang]

## ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

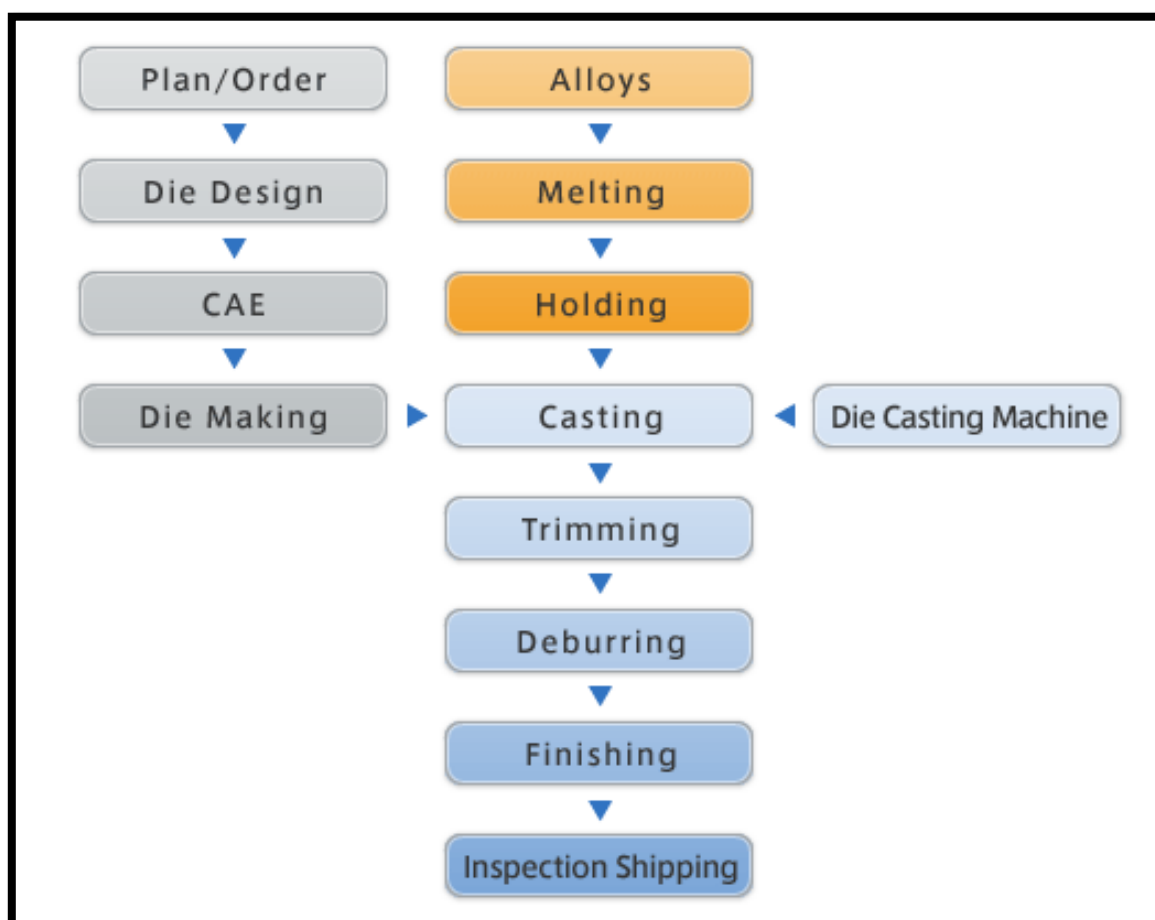
Με τη συνεχή κάθοδο της θερμοκρασίας, το υγρό μέταλλο αρχίζει να χάνει αντίστοιχα και το ποσό ενέργειας με αποτέλεσμα, να σχηματίζονται οι πρώτοι κρύσταλλοι δομής με τη διαδικασία να ξεκινά από την επιφάνεια τοιχωμάτων του καλουπιού, στο οποίο και μειώνεται η θερμοκρασία. Οι συγκεκριμένοι κρύσταλλοι, θα σχηματοποιηθούν σε κόκκους της δομής του τελικού χυτού αντικειμένου, με την ταχύτητα να παίζει σημαντικό ρόλο ως προς το μέγεθός τους.

Συνεπώς, οι σχηματιζόμενοι κρύσταλλοι συνεχίζουν τη σκλήρυνση μέχρι τη συνολική στερεοποίηση του τήγματος, όπου το μέταλλο στην ουσία συρρικνώνεται, κάτι το οποίο εάν δεν γίνει ομαλά, θα επιφέρει επιφανειακές αστοχίες.

## ΧΥΤΕΥΣΗ

Μετά τη σκλήρυνση, το χυτό αντικείμενο απομακρύνεται από το καλούπι (δηλαδή η *μπουκαδούρα με τα τεμάχια*), με τη βοήθεια της πλάκας εξωλκέων, εφόσον έχει ολοκληρωθεί η φάση της στερεοποίησης, άρα και η χύτευση έχει πραγματοποιηθεί σε ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας, με συγκεκριμένο χρόνο ανάλογα τη μορφολογία του αντικειμένου, τις παραμέτρους της χυτόπρεσσας και την παραγωγική ικανότητα του καλουπιού. Στη συνέχεια, τα τεμάχια διαχωρίζονται από τη μπουκαδούρα ούτως ώστε να είναι δυνατή, η διεκπεραίωση και άλλων παραγωγικών φάσεων για εξομάλυνση της επιφάνειας, ανάλογα με το είδος και χρήση, του εκάστοτε χυτού αντικειμένου. Επίσης, επειδή η χύτευση ως διαδικασία είναι αρκετά απαιτητική και πολύ-παραγοντική, θα πρέπει να την παρακολουθεί έμπειρος χειριστής, ώστε να διασφαλίζεται η μη εμφάνιση ποιοτικών αστοχιών, επί των παραγομένων τεμαχίων.

[2023, Genick Bar–Meir]



Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση της ροής εργασιών κατά την παραγωγική διαδικασία της χύτευσης **πηγή:** [The Most Comprehensive Casting Process Summary – Precise Cast \(precise-cast.com\)](https://www.precise-cast.com/)



### 1.5 Η διαδικασία στερεοποίησης των μετάλλων

Όπως είναι ευρέως γνωστό, ένα βασικό φαινόμενο στη διαδικασία στερεοποίησης του μετάλλου ή/και κράματος είναι, η μεταφορά θερμότητας μέσω της ακτινοβολίας, με άμεση επαφή με το καλούπι, όπου σημαντικό ρόλο παίζει και ο αέρας, που θα μεταφέρει τη θερμότητα, μεταξύ καλουπιού και πλινθώματος (*ingot*). Οι μέθοδοι χύτευσης, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το εάν υπάρχουν ή/και όχι σημαντικές θερμικές μεταβολές στο στερεοποιημένο μέταλλο. [2008, Frank E Goodwin]

Επίσης σημαντικό είναι ότι, η μεταφορά θερμότητας σε μια διεπαφή, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$q = h\Delta T$$

Όπου,  $q$  είναι η ροή θερμότητας,  $h$  είναι η θερμική αγωγιμότητα της διεπαφής και  $\Delta T$  τη διαφορά θερμοκρασίας, μεταξύ του φούρνου και της παροχέτευσης. Αναφορικά με, τις τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, δύναται να ποικίλλουν πολύ:  $10 \rightarrow 10^2$  για φυγοκεντρική χύτευση,  $10^3 \rightarrow 10^4$  για αντικείμενα που χυτεύονται υπό βαρύτητα και  $10^5 \rightarrow 10^6$  για χύτευση υπό πίεση.

Το προφίλ θερμοκρασίας που προκύπτει εξαρτάται από τη σύγκριση της θερμικής αγωγιμότητας του διασύνδεση με αυτό ολόκληρου του casting.

Η θερμική αγωγιμότητα, για ένα πλήρη κύκλο χύτευσης αποδίδεται ως  $K/L$  όπου,  $K$  είναι η θερμική αγωγιμότητα σε μήκος  $L$ , προς την κατεύθυνση που έχει η ροή της θερμότητας. Η αναλογία της θερμικής αγωγιμότητας διεπαφής  $h$  με εκείνη της χύτευσης, που ορίζεται από τον αριθμό Biot και τον ακόλουθο τύπο:

$$Bi = \frac{h}{K/L} = \frac{hL}{K}$$

Όταν, έχουμε μικρό  $Bi$  αυτό σημαίνει ότι, η θερμική αντίσταση της διεπαφής κυριαρχεί έναντι αυτού της χύτευσης, με τη θερμοκρασία να παραμένει σταθερή, το φαινόμενο αυτό δε ονομάζεται «νευτώνεια ψύξη» και ευνοείται από μέταλλα που εμφανίζουν υψηλή αγωγιμότητα, όπως για παράδειγμα το αλουμίνιο ( $Al$ ) και ο χαλκός ( $Cu$ ) και συγκεκριμένα για τη χύτευση, μικρών αντικειμένων από πλευράς μεγέθους.

Αναφορικά με, τη χύτευση με μόνιμο καλούπι (*die casting*) όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ως διαδικασία περιλαμβάνει την έγχυση, ενός κράματος με χαμηλό σημείο τήξης, μέσα σε ένα καλούπι από χάλυβα.

Για παράδειγμα, ένα κράμα  $\text{Zn} - 4\text{Al}$  σύσταση κατά βάρος, αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό με ευ τηκτική σύνθεση (*ρευστή κατάσταση στους  $419^\circ\text{C}$* ), όπου εφαρμόζεται συνήθως αντικείμενα μικρού όγκου μιας και λόγω του ψευδαργύρου, υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας εσωτερικών πόρων, μη έχοντας πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. [2008, Frank E Goodwin]

## 1.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά και φυσικοχημικές ιδιότητες των κραμάτων ψευδαργύρου (*zinc alloys*)

Βάσει της βιβλιογραφίας, τα κράματα ανάλογα με το πλήθος των στοιχείων που περιέχουν κατηγοριοποιούνται σε:

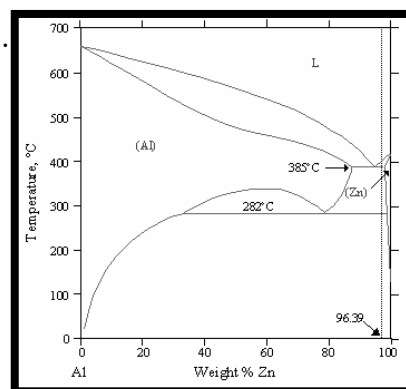
- ❖ διμερή (με δύο στοιχεία)
- ❖ τριμερή (με τρία στοιχεία)
- ❖ πολυμερή (με περισσότερα στοιχεία)

Πιο συγκεκριμένα, στην κατηγορία των διμερών κραμάτων έχουμε την διάκριση σε αυτά μετάλλου – μέταλλου, μέταλλου – μεταλλοειδούς και μετάλλου – αμετάλλου.

Μια άλλη κατηγορία, είναι τα ευ τηκτικά (για τα οποία η αναλογία των μετάλλων που τα συνθέτουν, έχουν το χαμηλότερο δυνατό σημείο τήξης), όπως επίσης και τα πολύ ελαφρά κράματα για παράδειγμα μαγνησίου με αργίλιο, ψευδάργυρο και άλλα μέταλλα.

Όπως είναι γνωστό, τα διάφορα κράματα των μετάλλων δημιουργούνται με σκοπό να είναι εφικτός ο συνδυασμός, των βασικών συστατικών σε ένα καινούργιο υλικό, με κλασικό παράδειγμα το χάλυβα που στην ουσία είναι ένα κράμα σιδήρου (*Fe*) με άνθρακα (*C*), με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες – αντοχές από το πρώτο στοιχείο. Άρα, ο κυριότερος λόγος της παραγωγής κραμάτων είναι, στην ουσία η βελτίωση χαρακτηριστικών όπως η σκληρότητα, αντοχή, βάρος, αντίστασης στη διάβρωση, έναντι των πρωτογενών μετάλλων. [2023, P. Capela]

Επιπροσθέτως, άλλο κύριο χαρακτηριστικό των κραμάτων, συγκριτικά με τα πρωτογενή μέταλλα, είναι η μη ύπαρξη καθορισμένου σημείου τήξης, στην πραγματικότητα συγκεκριμένης θερμοκρασίας όπου αυτά θα μεταβούν στην υγρή κατάσταση, ενώ εξίσου υπάρχει θερμοκρασιακό εύρος, στο οποίο τα κράματα βρίσκονται ανάμεσα σε στερεή και υγρή κατάσταση.



Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ισορροπίας φάσεων Al – Zn

**πηγή:** [Heat Treatment and Friction Stir Processing Effects on Mechanical Properties and Microstructural Evolution of Sc Inoculated Al-Zn-Mg Alloys \(sciepub.com\)](#)

Κάποια, από τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα στη βιομηχανία κράματα, είναι:

- ❖ ο χάλυβας, όπου είναι κράμα σιδήρου (*Fe*) – άνθρακα (*C*)
- ❖ ο μπρούντζος, όπου είναι κράμα χαλκού (*Cu*) – κασσίτερου (*Sn*)
- ❖ ο ορείχαλκος, όπου είναι κράμα χαλκού (*Cu*) – ψευδαργύρου (*Zn*)

Άλλο ένα κράμα, με ευρεία χρήση όπως προαναφέρθηκε είναι και ο ορείχαλκος στο οποίο το βασικό στοιχείο του χαλκού (*Cu*), αναμιγνύεται με τον ψευδάργυρο (*Zn*) σε ποσοστό 3% προς 45%, ανάλογα με το είδος ώστε να είναι πιο όλκιμος και με αυξημένη της αντιδιαβρωτική ικανότητα. [2009, Dr. Frank E. Goodwin]

Για τον κλάδο της βιομηχανίας και δη της μεταποίησης, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κράματα ψευδαργύρου – αλουμινίου, που είναι ευρέως γνωστά με την ονομασία zamak, τα οποία παρουσιάζουν καλή ρευστότητα και για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη, κατά την παραγωγική διαδικασία της χύτευσης.

Μηχανικές ιδιότητες κράματος Zn	
Όριο διαρροής	108GPa
Λόγος Poisson	0.25
Shear Modulus (GPa)	43
Σκληρότητα (HV)	75

Φυσικές ιδιότητες κράματος Zn	
Πυκνότητα ( $g/cm^3$ )	7.14
Σημείο τήξης	419.53
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (S)	59
Συντελεστής θερμική διαστολής (25°C) ( $\mu m/mK$ )	30.2

Πίνακες 3 & 4. Χρήσιμα στοιχεία για τα κράματα ψευδαργύρου

Βάσει της χημικής σύστασης, τα εν λόγω κράματα περιέχουν ~ 5% αλουμίνιο τα οποία είναι συνήθη για παραγωγές χυτών προϊόντων, καθώς επίσης είναι και αυτά που περιλαμβάνουν σε πολύ μικρό ποσοστό και χαλκό, κάτι το οποίο προσδίδει στη σκληρότητα, ως μηχανική ιδιότητα.

Η παραπάνω προσθήκη αλουμινίου, στην πραγματικότητα δίνει ένα κράμα με θερμοκρασία τήξης ~ 420°C και θερμοκρασία ζέσεως 550°C, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει σημαντικά τη συνολική μηχανική αντοχή.

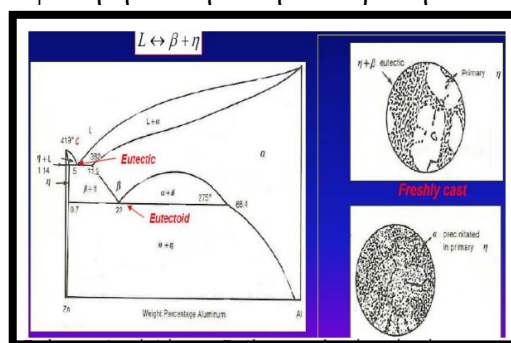
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, τα συγκεκριμένα κράματα με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο από 8 έως 27%, χαρακτηρίζονται υπέρ – ευτηκτοειδή, έχοντας υψηλό επίπεδο μηχανικών αντοχών και σκληρότητα, που αυξάνονται ανάλογα με το ποσοστό του κραματοποιητικού στοιχείου. Για παράδειγμα, τα κράματα ZA<sub>27</sub> έχουν αντοχή έως και 440MPa, τιμή μεγαλύτερη από αντίστοιχα κράματα αλουμινίου (Al) και μαγνησίου (Mn) ακόμα και εάν έχουν υποστεί θερμικές κατεργασίες, όπως βαφή, ανόπτηση κτλ. [2020, Frank E Goodwin]

Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι, το φαινόμενο που επηρεάζει τη χύτευση τέτοιου είδους κραμάτων, είναι ο μικρό και μακρό διαχωρισμός διότι συνδέεται με τη φάση της στερεοποίησης και μπορεί να επιφέρει, ποικίλα προβλήματα.

Δεδομένου ότι, τα συγκεκριμένα κράματα ZA<sub>27</sub> αρχίζουν να ομογενοποιούνται με αλουμίνιο σε υγρή μορφή με ποσοστό από 27% έως 5%, όπου αυτή η μεγάλη ποσοστιαία διαφοροποίηση, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δενδριτικής δομής.

Ένα ακόμα, πρόβλημα των κραμάτων ψευδαργύρου είναι η μικρή αντοχή σε ερπυσμό κάτι που συμβαίνει σε θερμοκρασιακό εύρος 100°C ~ 150°C.

Τέλος, με γνώμονα το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων φαίνεται πως το αλουμίνιο, δημιουργεί στερεό διάλυμα με τον ψευδάργυρο, σε πολύ μικρό ποσοστό (με μέγιστο 1.14%) σε θερμοκρασία 382 °C, όπου είναι εφικτή η ευ τηκτική αντίδραση στο 5% κατά βάρος αλουμίνιου.



Εικόνα 12. Σχηματική απεικόνιση της κρυσταλλικής δομής διμερούς κράματος Zn – Al βάσει διαγράμματος ισορροπίας πηγή: (1) (PDF) Characterization of Influences of Steel-Aluminum Dissimilar Joints with Intermediate Zinc Layer (researchgate.net)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΕΝ ΘΕΡΜΩ

Όπως έχει προαναφερθεί, η χύτευση είναι μια άκρως διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής, αντικειμένων από μέταλλα ή/και κράματα μετάλλων, σε μεγάλη ποσότητα, με αντίστοιχα υψηλό επίπεδο ποιότητας και ακρίβειας. Ένα είδος, με το οποίο θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία είναι, η χύτευση εν θερμώ ή θερμού θαλάμου (*hot die casting*) λόγω του ότι, χρησιμοποιείται σε αρκετούς βιομηχανικούς κλάδους εξαιτίας της οικονομικής απόδοσης της συν του ότι, ήταν εφικτή η συλλογή πολύτιμων δεδομένων που θα λειτουργήσουν ως case study, για το κεφάλαιο της προσομοίωσης και αξιολόγησης των σχετικών αποτελεσμάτων. [2023, Genick Bar-Meir]

Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία της χύτευσης ξεκινά έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας, όταν το υγρό μέταλλο ή/και κράμα εγχέεται στις κοιλότητες του καλουπιού, κάτω από υψηλή πίεση, με την επενέργεια κατάλληλου εμβόλου. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, ο σχεδιασμός του καλουπιού είναι ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας στη διαδικασία χύτευσης, γιατί επί της ουσίας θα καθορίσει την ποιότητα και συνοχή των παραγόμενων αντικειμένων.

Βασικά μέρη ενός καλουπιού, είναι το χιτώνιο (*κυλινδρικός θάλαμος, από τον οποίο διέρχεται το υγρό μέταλλο ή/και κράμα, ώστε να προχωρήσει προς τις κοιλότητες*) και το σύστημα ψεκασμού (*το κανάλι, που βοηθά το ακροφύσιο να διαχέει το υγρό με συγκεκριμένη ταχύτητα ροής εντός των κοιλοτήτων*). Επίσης, σημαντικά στοιχεία είναι η μορφή και διαστάσεις του συστήματος ψεκασμού, γιατί επηρεάζει αντίστοιχα τόσο την πλήρωση των κοιλοτήτων, όσο και το στάδιο στερεοποίησης. Για το λόγο αυτό, ο άρτιος σχεδιασμός αποτρέπει αστοχίες όπως για παράδειγμα, φυσαλίδες αέρα, συρρίκνωση και εμφάνιση πόρων. [2023, Guohui Li]

Επιπροσθέτως, ένα εξίσου σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού καλουπιού αποτελεί η πύλη, όπου στην ουσία είναι ένα μικρό άνοιγμα που συνδέει το σύστημα ψεκασμού με τις κοιλότητες, ελέγχοντας τη ροή του ρευστού μέσα σε αυτές. Ο σωστός ή μη σχεδιασμός της, πιθανά να δημιουργήσει προβλήματα στην ποιότητα των χυτών αντικειμένων, γιατί επιδρά στην ταχύτητα πλήρωσης των κοιλοτήτων, την ταχύτητα ψύξης, καθώς και την κατανομή εσωτερικής πίεσης. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι, μια άρτια σχεδιασμένη πύλη μπορεί να μειώσει σημαντικά αστοχίες όπως, φλας περιμετρικά της ραφής (*σημείο εφαρμογής κινητού και σταθερού μέρους του καλουπιού*), επιφανειακή παραμόρφωση και ρωγμές.

Συνεπώς, το στάδιο σχεδιασμού καλουπιών χύτευσης εν θερμώ, δύναται να επηρεάσει τη διαδικασία σε σημαντικό βαθμό, διότι συνδέεται με την ποιότητα, επαναληψιμότητα και ακρίβεια της.

[2017, V. Muthuraman]

2.1 Σημαντικά στοιχεία για το σχεδιασμό καλουπιού χύτευσης εν θερμώ

Ως προς το σχεδιασμό ενός καλουπιού, αποτελεί ένα βασικό στάδιο για όλη τη διαδικασία της χύτευσης, διότι κατά την ανάπτυξη του πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά, αρκετοί παράγοντες για παράδειγμα η γεωμετρία του εκάστοτε αντικειμένου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες της χυτόπρεσσας, οι παράμετροι χύτευσης και η πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια, παρατίθενται επιγραμματικά τα 7 βασικά βήματα που λαμβάνουν χώρα, στο σχεδιασμό ενός καλουπιού χύτευσης, ως:

### **Κύρια μέρη**

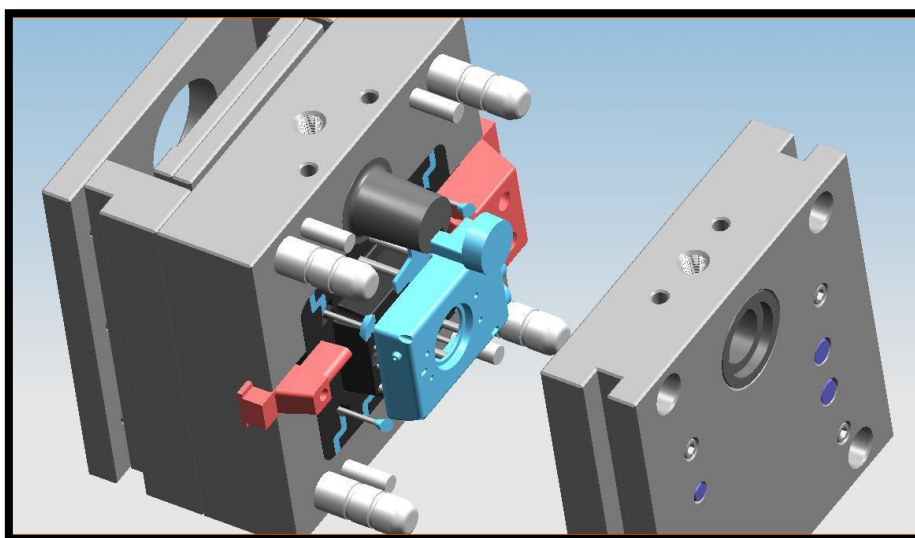
Ως πρώτο βήμα, είναι η δημιουργία ενός 3D μοντέλου για κάθε επιμέρους εξάρτημα του καλουπιού, που θα συντελέσει στο συναρμολόγημα και θα πρέπει να περιλαμβάνουν σχεδιαστικές λεπτομέρειες, όπως φρέζες, chamfer, fillets κτλ.

### **Πύλες και δρομείς**

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, οι πύλες και κανάλια διαδρομής (ή δρομείς) είναι άκρως σημαντικά κατασκευαστικά στοιχεία σε ένα καλούπι, διότι στην ουσία βοηθούν στον έλεγχο ροής του υγρού μετάλλου ή/και κράματος μέσα στις κοιλότητες, η οποία πρέπει να γίνεται ομοιόμορφα και χωρίς δημιουργία δινών.

### **Σκελετός ή βάση καλουπιού**

Ο σκελετός ή βάση καλουπιού, είναι άκρως απαραίτητο να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται, οι τεχνικές απαιτήσεις της χυτόπρεσσας και της διαδικασίας χύτευσης, ως προς το χρόνο set up. Και αυτό γιατί, εκεί θα συν αρμολογηθούν το κινητό και σταθερό μέρος, ο κώνος, η πλάκα εξωλκέων και τα λοιπά υποστηρικτικά εξαρτήματα. [2023, Genick Bar-Meir]



Εικόνα 13. Απεικόνιση 3D μοντέλου για καλούπι hot die casting **πηγή:** [Die casting mold | Aluminum & Zinc Die casting China \(chinametalcastings.com\)](http://chinametalcastings.com)



## Σύστημα Ψύξης

Ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος ψύξης, παίζει σημαντικό ρόλο κατά την παραγωγική διαδικασία της χύτευσης ως προς τη ρύθμιση της θερμοκρασίας στην οποία θα λειτουργήσει το καλούπι, άρα και τα παρελκόμενα εξαρτήματα, με τα αντίστοιχα κανάλια ψύξης να είναι κατασκευασμένα με τέτοια διάταξη ώστε, να διασφαλίζουν την ομαλή ψύξη και στερεοποίηση, ενώ ταυτόχρονα να μειώνουν το χρόνο, του κύκλου της χύτευσης. [2002, Xiong Shoumei]

## Σύστημα εξαερισμού & εξώλκευσης

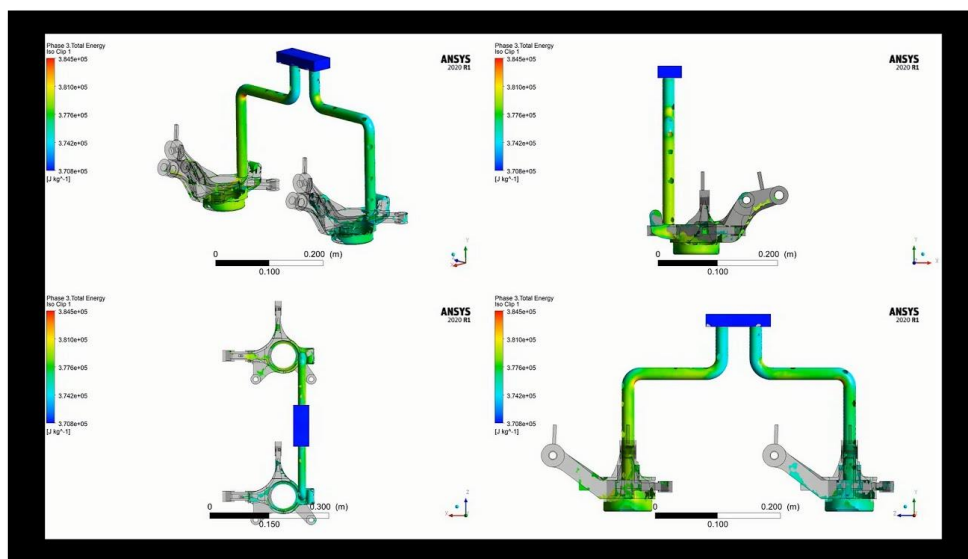
Το σύστημα εξαερισμού, θα πρέπει να σχεδιάζεται με τρόπο ώστε το υγρό μέταλλο ή/και κράμα να ρέει εντός των κοιλοτήτων χωρίς να εγκλωβίζεται αέρας, ενώ οι εξωλκείς πρέπει να βοηθούν τη μπουκαδούρα με τα χυτά εξαρτήματα, να αποκολλώνται από το καλούπι, με την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

## Ανάλυση κατασκευαστικού σχεδίου

Με το πέρας της διαδικασίας, το σχέδιο του καλουπιού πρέπει να υποβληθεί σε σχετική ανάλυση με σκοπό να διασφαλιστεί ότι, δεν υπάρχουν κατασκευαστικές αστοχίες, όπου σαν αποτέλεσμα θα έχουν τη μη σωστή λειτουργία και τη συγκράτηση αντικειμένων, μέσα σε αυτό.

## Προσομοίωση

Τέλος, ως ασφαλιστική δικλίδα για την τήρηση των παραπάνω βημάτων σχεδιασμού καλουπιού χύτευσης θα πρέπει, να γίνεται προσομοίωση μέσω χρήσης κατάλληλων λογισμικών για μηχανικές εφαρμογές, ώστε να υπάρχει αντίστοιχη επαλήθευση αναμενόμενης λειτουργίας, του καλουπιού σε πραγματικές συνθήκες.



Εικόνα 14. Απεικόνιση προσομοίωσης χύτευσης αντικειμένου μέσω του λογισμικού ANSYS πηγή: [cimdesignsolution.co.in/mold-flow-analysis/](http://cimdesignsolution.co.in/mold-flow-analysis/)

## 2.2 Η επιλογή υλικού κατασκευής

Κατά το στάδιο έρευνας και ανάπτυξης, για την κατασκευή ενός καλουπιού χύτευσης είναι πολύ σημαντική η επιλογή του κατάλληλου υλικού, το οποίο θα έχει την απαιτούμενη σκληρότητα, μηχανική και θερμική αντοχή, καθώς και αντοχή στη φθορά, ώστε να εξασφαλισθεί η διάρκεια ζωής, με σκοπό την απόσβεση του κόστους, μέσω αποδοτικής παραγωγής.

Για το λόγο αυτό, θα παραθέσουμε στη συνέχεια τα δεδομένα εκείνα που βοηθούν στη βέλτιστη δυνατή επιλογή υλικού, δεδομένου των παραμέτρων που πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη, βάσει και των συνθηκών λειτουργίας ενός καλουπιού χύτευσης. [2010, J. Tušek]

### **Συνθήκες λειτουργίας του καλουπιού χύτευσης (κινητό – σταθερό μέρος)**

- ❖ τα καλούπια χύτευσης, λειτουργούν σε δύσκολες συνθήκες έναντι άλλων (για παράδειγμα καλούπια κοπής), όπου εξαιτίας των ά υλών (μέταλλα ή/και κράματα), πρέπει να έχουν αντοχή σε υψηλές πιέσεις 150 - 500MPa.
- ❖ λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας, στην οποία λειτουργούν διάφορα κράματα, θα πρέπει να αντέχουν σε υψηλό θερμικό φορτίο από 300°C έως 1000°C, λόγω του ότι ο κύκλος θέρμανσης – ψύξης επαναλαμβάνεται, σε όλη την επιφάνεια του καλουπιού
- ❖ η ταχύτητα του υγρού μετάλλου ή/και κράματος, εισέρχεται εντός των κοιλοτήτων, μέσω των πυλών έχει εύρος 70m/s - 150m/s, κάτι που σε βάθος χρόνου προκαλεί σοβαρή φθορά στο καλούπι
- ❖ το υγρό μέταλλο ή/και κράμα, με τη χρήση και εφόσον εισχωρήσει στα τοιχώματα του καλουπιού, ως αποτέλεσμα κακής συντήρησης μπορεί να το διαβρώσει σε μεγάλο βαθμό, ώστε να μην είναι πλέον κατάλληλο για χρήση

### **Λοιπές σημαντικές απαιτήσεις για χάλυβα κατασκευής καλουπιού χύτευσης**

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η χύτευση ως διαδικασία μπορεί να παράξει αντικείμενα ποικίλης μορφολογίας και γεωμετρίας, με ακρίβεια, μειωμένη τραχύτητα επιφάνειας και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Συνεπώς, ο χάλυβας που θα επιλεγεί για την κατασκευή του καλουπιού χύτευσης, θα πρέπει απαραίτητως να καλύπτει τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- ❖ εξαιρετική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- ❖ πολύ υψηλή αντοχή στη φθορά και αντίσταση στην οξείδωση
- ❖ πολύ καλή λειτουργική απόδοση λόγω της θερμικής κόπωσης
- ❖ σκληρότητα που να διασφαλίζει μικρή παραμόρφωση λόγω θερμικού φορτίου
- ❖ πολύ καλή μηχανουργική κατεργασία και ειδικά κατά τη λείανση ή ρεκτιφιέ
- ❖ συνοχή της δομής του υλικού

### AISI H13

Ο χάλυβας H13, χρησιμοποιείται για την κατασκευή μητρών καλουπιού τα οποία θα παράξουν συμπαγή αντικείμενα και ο οποίος, θα πρέπει να αντέχει σε υψηλό δυναμικό φορτίο, ενώ είναι κατάλληλος για την κατασκευή επιμέρους στοιχείων όπως πλάκες εξωλκέων, σκελετών κτλ. για χρησιμοποιούμενη ύλη αλουμίνιο, χαλκό και κράματα αυτών. [2022, Joeun Choi]

### ASSAB 8407 SUPREME

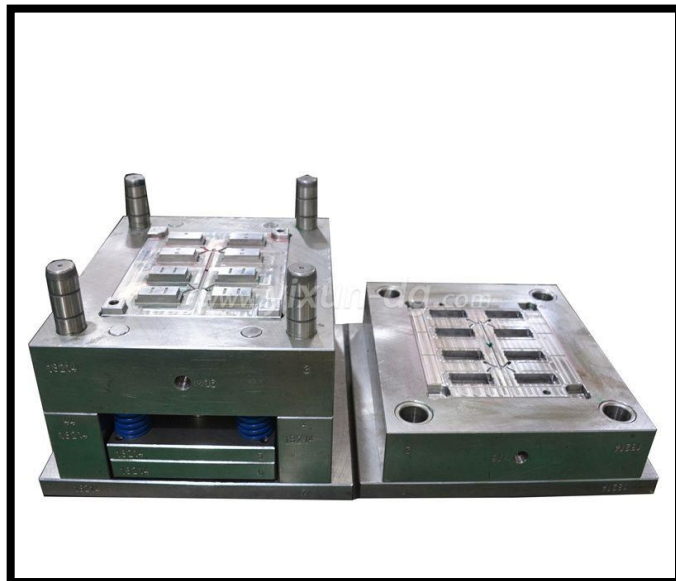
Ο συγκεκριμένος χάλυβας, εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως αντοχή σε υψηλό θερμικό φορτίο, αποφυγή ρηγματώσεων άρα αντοχή σε φθορά, ενώ μπορεί να κατεργαστεί ως προς εργασίες στίλβωσης, δίνοντας παραγωγική σταθερότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής στο καλούπι.

### SKD 61

Το υλικό χάλυβα SKD 61, έχει πολύ καλές μηχανικές και θερμικές αντοχές διότι μπορεί να λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα, σε δύσκολες συνθήκες, ενώ παράλληλα διατηρεί υψηλό επίπεδο κατεργασιμότητας σε κοπή και λείανση, ενώ μπορεί να δεχτεί ως πρώτη ύλη αλουμίνιο, κράματα ψευδαργύρου, κράματα χαλκού κτλ.

### ASSAB 8418

Το συγκεκριμένο υλικό, έχει εξαιρετική αντοχή σε πιθανές επιφανειακές ρωγμές εξαιτίας της θερμικής κόπωσης, αντοχή στη φθορά και στην πλαστική παραμόρφωση. Λόγο αυτών των ιδιοτήτων, το καθιστούν ως μια πολύ καλή επιλογή για τη χύτευση εν θερμώ, συν του ότι μπορεί να λειτουργήσει με κράματα ψευδαργύρου, μαγνησίου, αλουμινίου, τιτανίου κτλ.



Εικόνα 15. Καλούπι χύτευσης εν θερμώ κατασκευασμένο από χάλυβα ASSAB 8418

πηγή: [Die casting mold](#) | [Casting mold parts](#) | [Die casting die - MLS Mold](#)

### 2.3 Οι συνθήκες λειτουργίας του καλουπιού χύτευσης εν θερμώ

Κατά τη διαδικασία της χύτευσης, η πίεση που ασκείται από το έμβολο της μηχανής στο υγρό μέταλλο ή/και κράμα που βρίσκεται ως τήγμα μέσα στο φούρνο της μηχανής, είναι δεκάδων megapascal, ενώ η ταχύτητα πλήρωσης έχει τιμές από 16 έως 80m/sec και ο χρόνος πλήρωσης των κοιλοτήτων του καλουπιού κυμαίνεται, από 0,01 έως 0,3sec. [2020, Jan Majernik]

Ως διαδικασία η χύτευση εν θερμώ, συμπεριλαμβάνει τα βασικά στοιχεία που επενεργούν σε αυτή και δεν είναι άλλα, από το καλούπι, την ίδια τη μηχανή (*με τις ρυθμιζόμενες κάθε φορά παραμέτρους*) και τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη.

Συνεπώς, κατά την πλήρωση των κοιλοτήτων του καλουπιού σε ένα πλήρη κύκλο χύτευσης, οι παράγοντες που επενεργούν στο προαναφερθέν σύστημα είναι, η πίεση, η ταχύτητα, η θερμοκρασία και ο χρόνος.

Αξίζει δε να σημειωθεί ότι, οι συγκεκριμένοι παράγοντες κατά την αλληλεπίδραση τους, μπορούν να περιορίσουν ή/και να υποστηρίξουν ο ένας τον άλλο, όπου ο παράλληλος έλεγχος τους κρίνεται απαραίτητος, ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως εύρυθμη λειτουργία της παραγωγικής διαδικασίας, με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και με το καλύτερο ποιοτικό αποτέλεσμα, επί των χυτών αντικειμένων.

#### Δύναμη έγχυσης

Αναφορικά με τη δύναμη έγχυσης, αυτή δημιουργείται κατά την κίνηση του εμβόλου μέσα στο μηχανισμό του φούρνου της μηχανής, όπου βρίσκεται το τηγμένο μέταλλο και αποτελεί μια βασική παράμετρο λειτουργίας, με το μέγεθός της να καθορίζεται από τη διατομή του κυλίνδρου έγχυσης, καθώς και του υγρού μετάλλου ή/και κράματος.

Ο τύπος, από τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε τη δύναμη έγχυσης είναι:

$$P_{\text{injection force}} = P_{\text{injection cylinder}} \times \pi \times D^2/4$$

$P_{\text{injection force}}$ , η δύναμη έγχυσης ( $N$ )

$P_{\text{injection cylinder}}$ , η πίεση του υγρού που διαπερνά τον κύλινδρο έγχυσης ( $Pa$ )

$D$ , η διάμετρος του κυλίνδρου έγχυσης ( $m$ )

$\pi = 3.1416$

### Ειδική πίεση

Ως προς την ειδική πίεση, είναι αυτή που ασκείται στο υγρό μέταλλο ή/και κράμα εντός του θαλάμου της μηχανής, ανά μονάδα επιφάνειας ως αποτέλεσμα μετατροπής του λόγου της δύναμης έγχυσης, για την περιοχή διατομής του θαλάμου. [2020, Jan Majernik]

Ο βασικός τύπος υπολογισμού της είναι ο ακόλουθος:

$$P_{\text{specific pressure}} = P_{\text{injection force}} / F_{\text{pressure chamber cross-sectional area}}$$

$P_{\text{specific pressure}}$ , η ειδική πίεση ( $Pa$ )

$P_{\text{injection force}}$ , η δύναμη έγχυσης ( $N$ )

$F_{\text{pressure chamber cross-sectional area}}$ , πίεση επιφάνειας διατομής θαλάμου μηχανής ( $m^2$ )

Σε αυτή την περίπτωση όπου έχουμε το μέγεθος,  $F_{\text{pressure chamber cross-sectional area}} = \pi D^2/4$  με  $D$  ( $m$ ) η διάμετρος του θαλάμου

$\pi = 3.1416$

### Επίδραση της πίεσης

Καθώς αυξάνεται η ειδική πίεση, η κρυσταλλική δομή γίνεται πιο λεπτή με αποτέλεσμα το κρυσταλλικό πλέγμα να αυξάνει την πυκνότητα του, άρα και η ποιότητα της επιφάνειας να είναι βελτιωμένη, γιατί μειώνεται η εμφάνιση φυσαλίδων αέρα κάτι που από μηχανικής πλευράς, ενισχύει την αντοχή σε εφελκυσμό, μειώνοντας την επιμήκυνση. [2011, Chang Li]

Συνεπώς, όταν το υγρό μέταλλο ή/και κράμα γεμίσει τις κοιλότητες του καλουπιού κάτω από υψηλή ειδική πίεση, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα έχουμε βελτίωση της ρευστότητας, όπου αποτελεί πολύ θετικό στοιχείο για την ποιότητα της χύτευσης. Όταν το κράμα τήξει γεμίζει την κοιλότητα του καλουπιού υπό υψηλή ειδική πίεση, η θερμοκρασία του κράματος αυξάνεται, η ρευστότητα βελτιώνεται, γεγονός που είναι ευεργετικό για τη βελτίωση της ποιότητας χύτευσης.

### Πίνακας εύρους ειδικής πίεσης

Part Type	Aluminum Alloy	Zinc Alloy	Brass
Parts Under Light Load	30-40 MPa	13-20 MPa	30-40 MPa
Parts Under Heavy Load	40-80 MPa	20-30 MPa	40-60 MPa
Parts with Large Sealing Surface and Thin Walls	80-120 MPa	25-40 MPa	80-100 MPa

Εικόνα 16. Τιμές ειδικής πίεσης για κράματα αλουμινίου, ψευδαργύρου και ορείχαλκου

πηγή: [casting\\_technology\\_fraunhofer\\_ifam.pdf](#)

Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι, κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου χύτευσης με το πέρας του σταδίου πλήρωσης των κοιλοτήτων και της μετάβασης στη στερεά κατάσταση παρατηρείται αύξηση της πίεσης (*πίεση ώθησης*), όπου και δρα στο στερεοποιημένο πλέον μέταλλο ή/και κράμα και μεταδίδεται στην επιφάνεια, τοιχωμάτων του καλουπιού, όπου και αποδίδεται με τον όρο δύναμη διαστολής (*ή αντίθλιψη*).

Επίσης, η δύναμη σύσφιξης καλουπιού (που στην πράξη είναι η δύναμη με την οποία κλείνει το καλούπι), αποτελεί βασική παράμετρο ανάλογα και με τον τύπο της χυτόπρεσας, η οποία δε μπορεί να ρυθμιστεί.

Συμπληρωματικά, η δύναμη διαστολής που δημιουργείται σε ένα καλούπι χύτευσης δρα εκτός από την επιφάνεια και στα πλευρικά τοιχώματα, των κοιλοτήτων.

Η δύναμη διαστολής του καλουπιού, μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$P_{\text{expansion force}} = P_{\text{boost pressure}} \times A_{\text{projected area}}$$

$P_{\text{expansion force}}$ , η δύναμη διαστολής του καλουπιού ( $N$ )

$P_{\text{boost pressure}}$ , η πίεση ενίσχυσης ( $Pa$ )

$A_{\text{projected area}}$ , η προβαλλόμενη περιοχή που φέρει τη δύναμη διαστολής του καλουπιού ( $m^2$ )

Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, η δύναμη σύσφιξης του καλουπιού πρέπει να είναι μεγαλύτερη, από την υπολογισμένη δύναμη της διαστολής καλουπιού. Σε αντίθετη περίπτωση, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του υδραυλικού εμβόλου μέσα στο φούρνο του τηγμένου μετάλλου ή/και κράματος, η επιφάνεια της πλάκας εξωλκέων θα υποχωρήσει εμποδίζοντας το υλικό να εισέλθει στις κοιλότητες του καλουπιού, κάτι το οποίο θα δημιουργήσει αστοχία, κατά τη μορφοποίηση των χυτών αντικειμένων (*φάση στερεοποίησης*) και μη διασφάλιση των διαστασιολογικών ανοχών.

Η δύναμη σύσφιξης του καλουπιού πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$P_{\text{clamping force}} \geq K \times P_{\text{expansion force}}$$

$P_{\text{clamping force}}$ , η δύναμη κλεισίματος του καλουπιού χύτευσης ( $N$ )

$K_{\text{safety factor}}$ , συντελεστής ασφαλείας (όπου συνήθως λαμβάνεται η κλάση  $K=1.3$ )

$P_{\text{expansion force}}$ , η δύναμη διαστολής του καλουπιού ( $N$ )

[2011, Chang Li]

### **Ταχύτητα έγχυσης**

Όπως είναι ευρέως γνωστό, κατά τη χύτευση υπάρχουν δυο τύποι ταχυτήτων, αυτή της διείσδυσης και αυτή της εσωτερικής πλήρωσης, όπου για:

- ❖ αργή έγχυση, με την ταχύτητα διείσδυσης ωθείται το υγρό μέταλλο ή/και κράμα στο εσωτερικό των κοιλοτήτων με 0,3m/sec
- ❖ για γρήγορη έγχυση, το εσωτερικό των κοιλοτήτων του καλουπιού γεμίζει με ταχύτητα διείσδυσης που κυμαίνεται από 4 έως 9 m/sec. Στην περίπτωση που θέλουμε να ενισχύσουμε, την ταχύτητα έγχυσης αυτομάτως μετατρέπουμε και τη θερμική ενέργεια λειτουργίας του καλουπιού, ώστε να βελτιωθεί η ρευστότητα, οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών αντικειμένων και η ποιότητα επιφανείας.

### **Τιμές ταχύτητας**

1. η άμεση ταχύτητα πλήρωσης κυμαίνεται από 15 έως 25 m/sec
2. η ταχύτητα σταδιακής πλήρωσης κυμαίνεται από 20 έως 25 m/sec
3. η εσωτερική ταχύτητα πλήρωσης κυμαίνεται από 30 έως 70 m/sec για μια μεγάλη πύλη εισόδου καλουπιού
4. στην περίπτωση μικρών πυλών, η εσωτερική ταχύτητα πλήρωσης κυμαίνεται από 38 έως 46 m/sec
5. για χυτά αντικείμενα πάχους καναλιού μπουκαδούρας 5mm, η εσωτερική ταχύτητα πλήρωσης κυμαίνεται από 46 έως 40 mm/sec
6. για χυτά αντικείμενα πάχους καναλιού μπουκαδούρας >5 mm, η εσωτερική ταχύτητα πλήρωσης κυμαίνεται από 47 έως 27 mm/sec

[2022, Manar Takla]

## 2.4 Το σύστημα εξαερισμού του καλουπιού ως μέρος του σχεδιασμού

Το σύστημα ψύξης σε ένα καλούπι χύτευσης, στην πραγματικότητα είναι ένα δίκτυο καναλιών, το οποίο βοηθά στη μείωση της θερμότητας σε αυτό κατά τη χύτευση. Επίσης, βοηθάει στον έλεγχο της θερμοκρασίας τόσο του καλουπιού, όσο και του υγρού μετάλλου ή/και κράματος που ρέει εντός, με σκοπό να είναι εφικτή η παραγωγή αντικειμένων με ποιότητα επιφανείας, σε μικρούς χρονικά κύκλους παραγωγής.

Για το λόγο αυτό, τα κανάλια του συστήματος ψύξης κατά κύριο λόγο υποβάλλονται σε μηχανική επεξεργασία και μπορούν να κατασκευαστούν μέσω διάτρησης στο καλούπι, ακολουθώντας το περίγραμμα του και με τοποθέτηση τους σε συγκεκριμένες θέσεις, που πιθανά να συσσωρεύεται η θερμότητα.

Σε ένα πλήρη κύκλο της χύτευσης, το υγρό μέταλλο ή/και κράμα εισέρχεται στις κοιλότητες του καλουπιού υπό υψηλή πίεση, ώστε να αρχίσει η στερεοποίηση μέσω της ψύξης όπου ως αποτέλεσμα, θα έχουμε τη μορφοποίηση του αντικειμένου και αυτό γιατί, τα κανάλια του συστήματος ψύξης, θα επιτρέψουν στο αντίστοιχο μέσο που συνήθως είναι νερό ή λάδι, να κυκλοφορήσει εντός του καλουπιού ώστε να μειωθεί το θερμικό φορτίο. [2022, Manar Takla]

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό, το σύστημα ψύξης έχει ζωτική σημασία για τη διαδικασία της χύτευσης εν θερμώ, λόγω του ότι βοηθά στη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας σε όλο το καλούπι, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο επιφανειακές αστοχίες λόγω παραμόρφωσης και ρωγμάτων.

Παράλληλα δε, συμβάλλει στη μείωση του χρόνου παραγωγής, ανάλογα με τη μορφολογική πολυπλοκότητα και πλήθος των χυτών αντικειμένων, διότι επιτρέπει αντίστοιχα και τη γρηγορότερη εξώλκευση, με αποτέλεσμα να διασφαλίζεται η σταθερότητα ποιότητας επιφανείας, σε συνδυασμό με ικανοποιητικό ρυθμό παραγωγικότητας.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι σημαντικές έννοιες είναι ο ρυθμός ψύξης που στην ουσία, αφορά το ρυθμό κατά τον οποίο ένα μέταλλο ή/και κράμα ψύχεται έως τη στερεοποίηση του, ενώ ο χρόνος ψύξης αφορά το χρονικό διάστημα από τη ψύξη μέχρι και την εξώλκευση του μορφοποιημένου πλέον αντικειμένου, από τη μήτρα του καλουπιού *(αναφορικά με τη χύτευση εν θερμώ ο χρόνος πλήρους κύκλου λειτουργίας είναι μερικά sec)*.

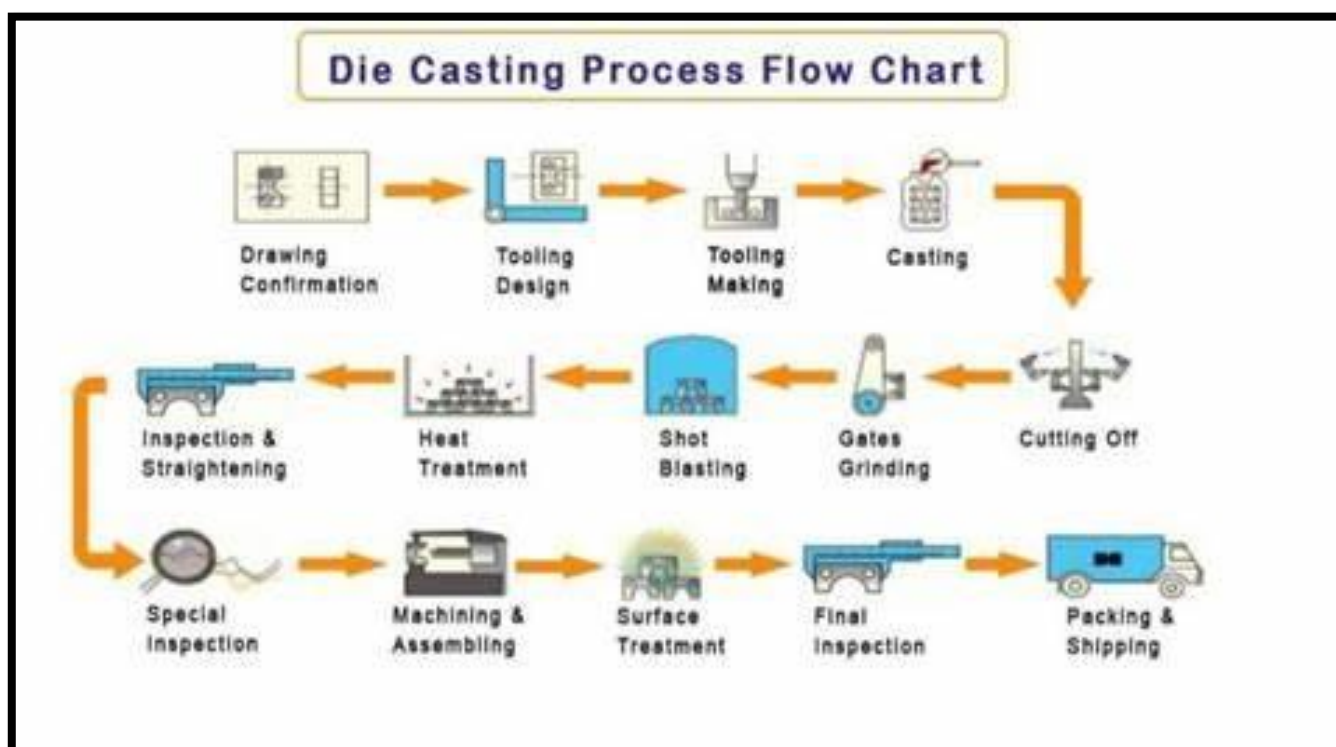
Οι παράγοντες, που μπορεί να επηρεάσουν το ρυθμό ψύξης είναι κυρίως η θερμοκρασία που έχει αναπτύξει το καλούπι, η ροή και πίεση του μετάλλου ή/και



κράματος, όπως επίσης η θερμική αγωγιμότητα τόσο του καλουπιού, όσο και του υγρού στοιχείο.

Για τη διαδικασία της χύτευσης εν θερμώ, αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε μικρού όγκου χυτά εξαρτήματα ο ρυθμός ψύξης μπορεί να είναι αρκετά μικρός, ενώ αντίθετα για μεγαλύτερου όγκου και σύνθετης γεωμετρίας, ο ρυθμός είναι μεγάλος εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας υγρού μετάλλου ή/και κράματος, που πρέπει να ψυχθεί.

Κατά συνέπεια, καθ' όλη τη διαδικασία της χύτευσης εν θερμώ, είναι υψίστης προτεραιότητας ο συνεχής έλεγχος του ρυθμού ψύξης, γιατί μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ποιότητα, του τελικού αντικειμένου.



Εικόνα 17. Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ροής εργασιών της διαδικασίας χύτευσης πηγή: [The Die Casting Process Step By Step | Die Casting Manufacturer](#)

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο ρυθμός ψύξης είναι μεγάλος η κοιλότητα μπορεί να μη γεμίσει πλήρως, με αποτέλεσμα το χυτό αντικείμενο αν υποστεί συρρίκνωση και να εμφανίσει πόρους. [2020, Jan Majernik]

Αντίθετα, στην περίπτωση που ο ρυθμός ψύξης είναι μικρός, το χυτό αντικείμενο δύναται να παραμορφωθεί και να μη μπορεί να εξωλκευθεί από τη μήτρα του καλουπιού, με αποτέλεσμα εμφάνιση αστοχιών, ως προς τις κατασκευαστικές διαστάσεις.

### **Βασικοί παράγοντες που αλληλοεπιδρούν στη διαδικασία χύτευσης εν θερμώ**

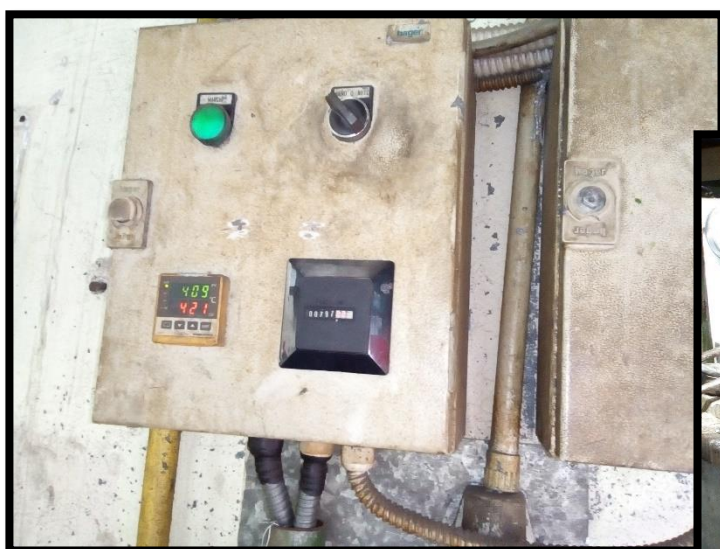
1. **διαφορά θερμοκρασίας:** εφόσον έχουμε μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας, ανάμεσα στο υγρό μέταλλο ή/και κράμα και το περιβάλλον, θα έχουμε αντίστοιχα και μεγάλο ρυθμό ψύξης.
2. **θερμική αγωγιμότητα:** για την περίπτωση που, η θερμική αγωγιμότητα είναι μεγάλη τότε θα είναι εφικτή η γρήγορη διοχέτευση της θερμότητας στο σύστημα καλούπι – υγρή πρώτη ύλη, όπου θα βοηθήσει στη γρήγορη στερεοποίηση.
3. **επιφάνεια:** στην περίπτωση που έχουμε, μεγάλη επιφάνεια χυτού αντικειμένου, ο ρυθμός ψύξης θα είναι μεγαλύτερος διότι η θερμότητα θα διοχετευτεί ευκολότερα.
4. **μορφολογία και μέγεθος:** στην περίπτωση που το χυτό αντικείμενο έχει πολύπλοκη μορφολογία και είναι μεγάλου μεγέθους, δημιουργείται αρνητική επιρροή στο ρυθμό ψύξης και αυτό γιατί, υπάρχει ο κίνδυνος εγκλωβισμού της θερμότητας σε σημεία της επιφάνειας, με αποτέλεσμα το αντικείμενο να ψυχθεί αργά.
5. **είδος πρώτης ύλης:** όπως είναι γνωστό, ανάλογα με την πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθεί στη χύτευση εν θερμώ, όπου στην περίπτωση κράματος μετάλλου η ποικίλη χημική σύσταση, μπορεί να επηρεάσει το ρυθμό ψύξης διότι τα διάφορα κραματοποιητικά στοιχεία, αυξάνουν ή μειώνουν τη θερμική αγωγιμότητα, όπου στην περίπτωση των μετάλλων λόγω υψηλής θερμικής αγωγιμότητας μπορεί να κρυώσουν σε σύντομο χρονικό διάστημα, έναντι των πλαστικών που χρειάζονται περισσότερο χρόνο, εξαιτίας χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας.
6. **περιβάλλον λειτουργίας:** σε ένα πιο ψυχρό περιβάλλον, ο ρυθμός ψύξης των χυτών αντικειμένων αυξάνεται, σε αντίθεση με ένα θερμό περιβάλλον.
7. **μέσο μείωσης θερμοκρασίας:** ο ρυθμός ψύξης επηρεάζεται και από το είδος, του μέσου που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη χύτευση, με το νερό να βοηθά στη γρηγορότερη ψύξη, έναντι του αέρα.

[2011, Chang Li]

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΟΥ ΧΥΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΕΝ ΘΕΡΜΩ

Η εταιρεία CONVEX S.A, παράγει και τυποποιεί προϊόντα κιγκαλερίας υψηλών προδιαγραφών που ως πεδίο εφαρμογής των δραστηριοτήτων της κατά ISO 9001:2015 είναι «Σχεδιασμός, Κατασκευή & Εμπορία Μεταλλικών Εξαρτημάτων & Διακοσμητικών Στοιχείων Επίπλων & Εσωτερικών Χώρων», έχει εντάξει στην παραγωγική της διαδικασία την χύτευση εν θερμώ, όπου είναι και ένα από τα πρώτα στάδια βιομηχανοποίησης των προϊόντων που διαθέτει στην αγορά. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί η βασική αρχή του hot die casting, όπου:

- ❖ γίνεται χρήση χυτόπρεσσας, με θερμό κλίβανο στον οποίο υπάρχει φούρνος, όπου τοποθετούνται πλάκες πρώτης ύλης zamak5, με σκοπό να λιώσουν ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία χύτευσης (αφού πρώτα έχουν προθερμαθεί, ακουμπώντας τες στο επάνω χείλος του φούρνου). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του συστήματος τροφοδοσίας το ρευστό κράμα μετάλλου, θα κατευθυνθεί μέσα στις κοιλότητες του καλουπιού, όπου με τη χρήση του ψυκτικού κυκλώματος και υπό μεγάλες πιέσεις, θα γίνει η στερεοποίηση για να είναι εφικτή η τελική μορφοποίηση των αντικειμένων, όπου ως διαδικασία χρονικά είναι πάρα πολύ σύντομη έως μερικά sec. Αυτό πρακτικά, μπορεί να συνεχιστεί ανάλογα με το πρόγραμμα παραγωγής για αρκετούς κύκλους λειτουργίας της χυτόπρεσσας, παρακολουθώντας τις παραμέτρους που έχουν καθοριστεί (από το panel της μηχανής, λόγω της χρήσης αυτομάτου ελέγχου και ανεπτυγμένης τεχνολογίας).



Εικόνες 18 & 19. Πίνακας ελέγχου θερμοκρασίας υγρού μετάλλου και φούρνος της χυτόπρεσσας 101A

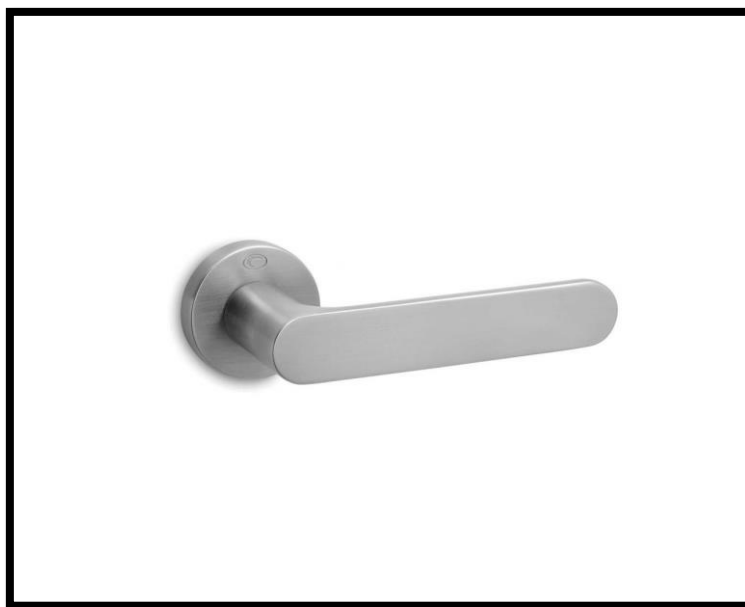
3.1 Σύντομη παρουσίαση του χυτού αντικειμένου μαζικής παραγωγής ως τελικό προϊόν Αναφορικά με, το καλούπι το οποίο θα προσομοιωθεί για τη θερμική ανάλυση χρησιμοποιείται για την παραγωγή της χυτής χειρολαβής με κωδικό **2005 – 1**, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Ως προς το στάδιο της χύτευσης, οι βασικές πληροφορίες επί του αντικειμένου είναι:

- βάρος τεμαχίου: 413 ~ 417gr
- βάρος τεμαχίου με τη μπουκαδούρα: 763,5gr
- τεμάχια / πάτημα: 1
- σύνολο πατημάτων / h: 150

Το τυπικό φασεολόγιο, για την παραγωγή τελικού προϊόντος 2005ROY-R-S05S05 είναι:

- i.χύτευση
- ii.δόνηση σε ουρία για 4h & στέγνωμα σε corncob 15min
- iii.δημιουργία λαιμού σε μηχανή transfer
- iv.λείανση σε robot με ταινίες 100 – 150 – very fine (βάσει μεγέθους κόκκου για απομάκρυνση περίσσειας υλικού και ραφινάρισματος επιφάνειας)
- v.επιμετάλλωση σε matt nickel (σε κωδικό S05)
- vi.συναρμολόγηση με στρογγυλή ροζέτα (κωδικός συνεργαζόμενου 501/192-1) αντίστοιχου κωδικού επιμετάλλωσης, η οποία έχει περάσει από τα ίδια στάδια παραγωγής όπως και η χειρολαβή, ώστε να είναι εφικτός ο χρωματικός τόνος



Εικόνα 20. Τελικό προϊόν χειρολαβής 2005ROY-R-S05S05 πηγή:  
[convexdesign.gr/gr/series-2005](http://convexdesign.gr/gr/series-2005)

### 3.2 Τα βασικά τεχνικά μέρη της μηχανής χύτευσης εν θερμώ

#### **Φούρνος (furnace)**

Ένα πολύ σημαντικό μέρος της χυτόπρεσσας είναι ο φούρνος, ο οποίος βρίσκεται ενσωματωμένος σε αυτή, με αντίστοιχο κλίβανο και θάλαμο καύσης, ώστε μέσω του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, να παράγονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα η πρώτη ύλη (*μέταλλο ή/και κράμα μετάλλου*), να φτάνει σε σημείο τήξης για την έναρξη της διαδικασίας. Για το λόγο αυτό, στη χύτευση εν θερμώ ο κλίβανος βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το καλούπι.

#### **Λαιμός (gooseneck)**

Επίσης, ο λαιμός ή gooseneck όπως είναι η πιο συνηθισμένη ονομασία αποτελεί εξίσου πολύ χρήσιμο μέρος της μηχανής, διότι μέσω αυτού συνδέεται ο μηχανισμός έγχυσης με το κανάλι τροφοδοσίας, απ' όπου το τηγμένο μέταλλο θα προωθηθεί στις κοιλότητες του καλουπιού, το οποίο επιτυγχάνεται εξαιτίας και της βύθισης του στο ρευστό μέταλλο ή/και κράμα μετάλλου. Για να είναι εφικτό αυτό, θα πρέπει να υπάρχει υψηλή θερμική αντίσταση κάτι το οποίο προϋποθέτει την κατασκευή του λαιμού, από εξαιρετικής ποιότητας χυτό ή/και σφυρήλατο χάλυβα. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι, φέρει κυλινδρική επένδυση στην οποία έχει τοποθετηθεί ο θάλαμος και το έμβολο, ως αναπόσπαστο κομμάτι του μηχανισμού έγχυσης, στο σύνολο του.

#### **Ακροφύσιο (nozzle)**

Ένα εξίσου πολύ χρήσιμο τεχνικό μέρος της χυτόπρεσσας είναι, το ακροφύσιο όπου μέσω αυτού ρυθμίζεται η ροή του ρευστού μετάλλου ή/και κράματος, μέσω του λαιμού στις κοιλότητες του καλουπιού. Στην ουσία, αποτελεί την πύλη εισόδου της πρώτης ύλης μέσα στο καλούπι, με πολύ ομαλό και κατευθυνόμενο τρόπο, ενώ κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας το πλεονάζων ρευστό, επιστρέφει στον κλίβανο μέσω του ακροφυσίου.

#### **Έμβολο (hydraulic piston)**

Το εν λόγω μέρος της μηχανής, κατά κύριο λόγο μεταφέρει το ρευστό μέταλλο ή/και κράμα μετάλλου στις κοιλότητες του καλουπιού, διατηρώντας το σε υψηλή πίεση. Σε αυτή την περίπτωση, το έμβολο κινείται παλινδρομικά εντός του θερμού θαλάμου, που ως μέσο για την απαιτούμενη ενέργεια είναι, ένας υδραυλικός κύλινδρος λαδιού ή αερίου.

#### **Καλούπι (die)**

Το καλούπι, ως κύριο μέρος της χυτόπρεσσας (*όχι μόνιμα τοποθετημένο σε αυτή*) περιλαμβάνει τις κοιλότητες και την πλάκα εξωλκέων, για την απομάκρυνση των

αντικειμένων από αυτό, με την ολοκλήρωση της διαδικασίας ενώ μπορεί να φέρει βοηθητικά εξαρτήματα όπως ο κώνος και οι δακτύλιοι σύσφιξης.

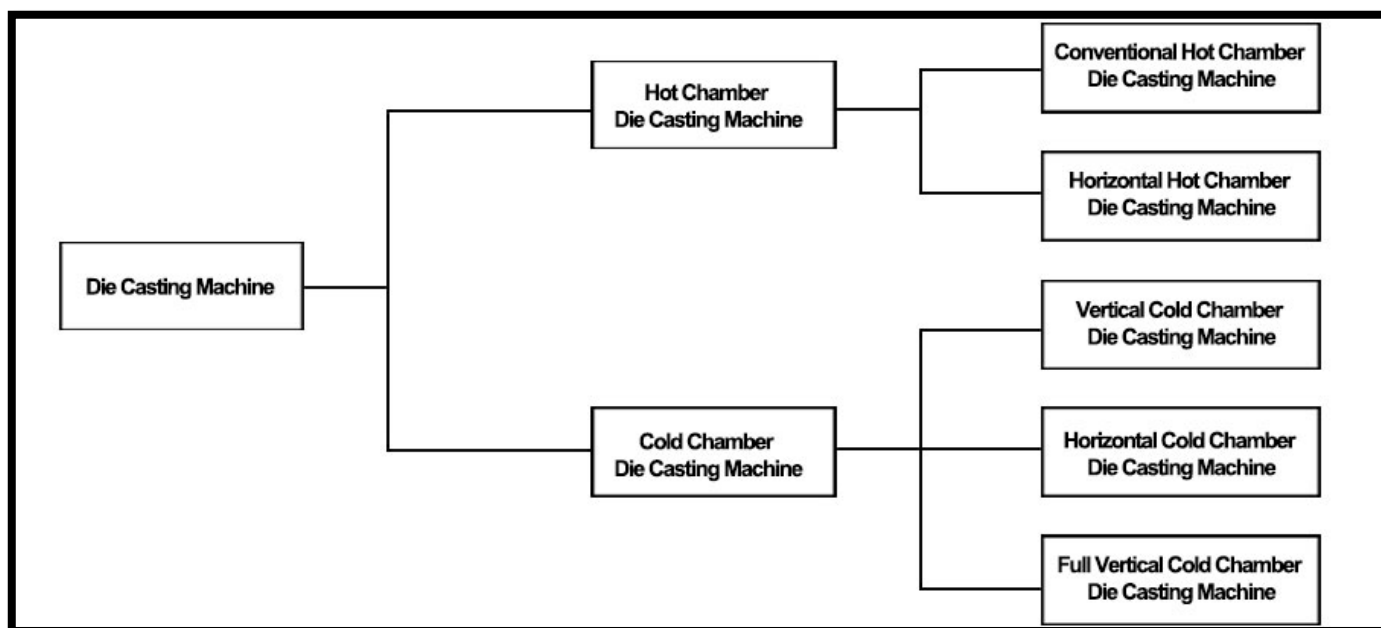
Ως προς την κατηγοριοποίηση (classification), των χυτοπρεσσών υφίστανται αρκετές μέθοδοι που βασίζονται στη λειτουργία με τη διάκριση ως:

- ❖ γενικές μηχανές
- ❖ μηχανές ειδικού σκοπού

Ανάλογα δε, με τη δύναμη συγκράτησης του καλουπιού σε αυτές έχουμε:

- ❖ μικρές χυτόπρεσσες ( $\leq 4.000 \text{ kN}$ )
- ❖ μεσαίες χυτόπρεσσες (από  $4.000$  έως  $10.000 \text{ kN}$ )
- ❖ μεγάλες χυτόπρεσσες ( $\geq 10.000 \text{ kN}$ )

Σε γενικές γραμμές όμως, η κατηγοριοποίηση γίνεται βάσει της δομής της μηχανής, τη θέση που έχει ο θάλαμος έγχυσης (ή θάλαμος πίεσης) και οι λειτουργικές συνθήκες. Στην παρακάτω εικόνα, διακρίνονται οι δυο κατηγορίες μηχανών χύτευσης hot and cold chamber die casting machines, με σύνδεση του είδους χύτευσης στο οποίο μπορούν να λειτουργήσουν.



Εικόνα 21. Κατηγοριοποίηση χυτοπρεσσών πηγή: [Classification of Die Casting Machines and Operational Procedure - Minghe Casting \(diecastingcompany.com\)](http://diecastingcompany.com)

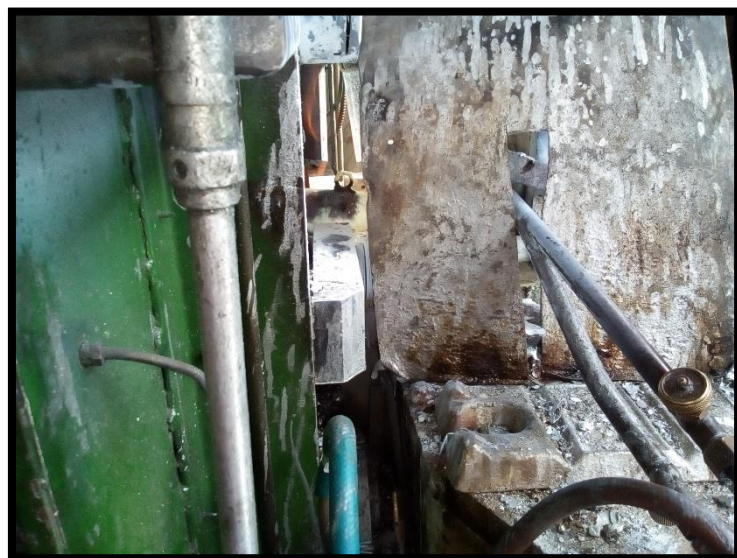
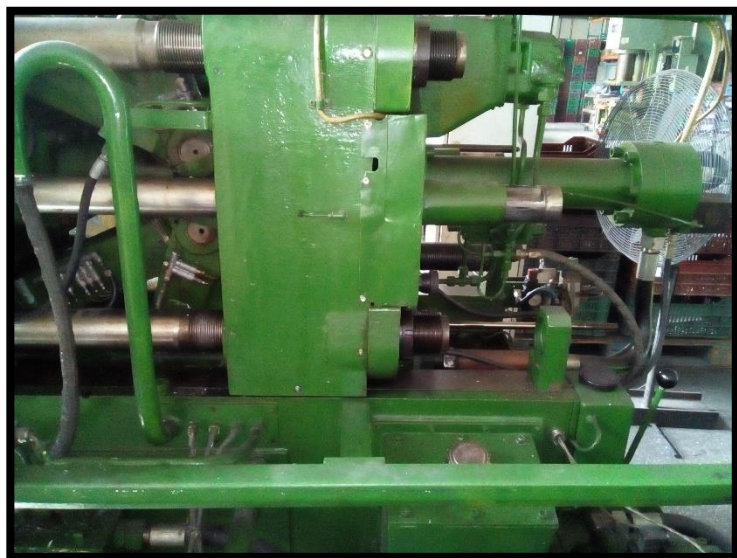
#### Σημαντικά στοιχεία για τη σύνθεση της μηχανής χύτευσης

1. βασικό ρόλο στη διαδικασία χύτευσης, έχει ο μηχανισμός σύσφιξης του καλουπιού επάνω στη μηχανή ώστε να επιτρέπεται η λειτουργία ανοίγματος και κλεισίματος. Για όση χρονική διάρκεια, το καλούπι είναι κλειστό διασφαλίζεται ταυτόχρονα ότι, η



πλήρωση των κοιλοτήτων με υγρό μέταλλο ή/και κράμα θα γίνει ομαλά, χωρίς να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της πλάκας εξωλκέων. Η δύναμη κλεισίματος του καλουπιού (σε  $kN$ ), λοιπόν είναι μια βασική παράμετρος που καθορίζει το είδος της μηχανής.

2. στη συνέχεια, ο μηχανισμός έγχυσης ωθεί το υγρό μέταλλο ή/και κράμα μετάλλου με συγκεκριμένη ταχύτητα στο θάλαμο, αποκτώντας την απαιτούμενη ενέργεια ροής, όπου μέσω του κώνου θα περάσει την πύλη εισόδου του καλουπιού, για να γίνει η πλήρωση των κοιλοτήτων με ορισμένη κάθε φορά πίεση, μέχρι και τη στερεοποίηση του/των τελικού/ων αντικειμένων.
3. την απαιτούμενη κάθε φορά ισχύ και ενέργεια, για την ορθή λειτουργία της μηχανής χύτευσης την παρέχει το υδραυλικό σύστημα.
4. σύμφωνα δε, με το καθοριζόμενο πρόγραμμα παραγωγής που πρέπει να εκτελέσει μια χυτόπρεσσας, σημαντικό ρόλο παίζει το ηλεκτρικό σύστημα, το οποίο ελέγχει τη λειτουργία κάθε μηχανισμού.
5. σε αρκετές χυτόπρεσσες, υπάρχουν προηγμένα συστήματα όπως για παράδειγμα, προσθήκης και ανίχνευσης παραμέτρων ανάλογα με το καλούπι, ειδοποίησης σε περίπτωση σφάλματος ή/και βλάβης, παρακολούθησης της διαδικασίας και παράλληλης αποθήκευσης χρήσιμων δεδομένων παραγωγής (κάτι που υποστηρίζεται από  $H/Y$ ) κτλ.



Εικόνες 22 & 23. Το υδραυλικό σύστημα και σύστημα τροφοδοσίας (με φλόγιστρο) της χυτόπρεσσας

### 3.3 Παράμετροι χύτευσης για την έναρξη και παρακολούθηση της παραγωγής

Στον ακόλουθο πίνακα, έχουν καταγραφεί οι παράμετροι χύτευσης με τις οποίες γίνονται οι ρυθμίσεις της μηχανής, για την εκτέλεση του προγράμματος παραγωγής της χειρολαβής.

<b>Κωδικός χυτόπρεσσας</b>	101A
<b>Σκελετός καλουπιού</b>	B2
<b>Κωδικός προϊόντος</b>	2005 – 1
<b>Ημερομηνία παραγωγής</b>	29/9/23
<b>Έναρξη παραγωγής</b>	14:30
<b>Θερμοκρασία μετάλλου</b>	421°C
<b>Θερμοκρασία φούρνου (τοιχώματα)</b>	232,2°C
<b>Θερμοκρασία φούρνου (στην επιφάνεια του ρευστού κράματος)</b>	285°C
<b>Θερμοκρασία gooseneck</b>	480,8°C
<b>Θερμοκρασία εξωτερικής μονάδας ψύξης</b>	16°C ~ 22°C
<b>Θερμοκρασία λαδιών μηχανής</b>	38,6°C ~ 40,6°C
<b>Καθυστέρηση σφυριού</b>	0sec
<b>Παραμονή σφυριού</b>	1,5sec
<b>Παραμονή πλατό</b>	2,5sec
<b>Καθυστέρηση έναρξης εξωλκέα</b>	0,5sec
<b>Επιστροφή εξωλκέα</b>	1sec
<b>Επανάληψη εξωλκέα</b>	1sec
<b>Χρόνος επανεκκίνησης</b>	4sec
<b>Πίεση πρεσαρίσματος</b>	55MPa

Πίνακας 5. Κρίσιμες παράμετροι για τις ρυθμίσεις της χυτόπρεσσας κατά την έναρξη παραγωγής



### 3.4 Επιλογή υλικού zamak5 για τη χύτευση του αντικειμένου

Μια χρήσιμη πληροφορία, για τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη που επιλέγεται για τη χύτευση προϊόντων της εταιρείας, είναι το κράμα ψευδαργύρου με την εμπορική ονομασία **zamak5** βάσει της τεχνικής προδιαγραφής (*ASTM AC41A*), το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο για τη διαδικασία χύτευσης εν θερμώ, παρουσιάζοντας ορισμένα δυνατά σημεία, ως ακολούθως:

- ❖ υψηλότερη περιεκτικότητα σε χαλκό, πράγμα που του προσδίδει αντοχή
- ❖ μικρότερη ολκιμότητα (*άρα μειωμένη επιμήκυνση*) έναντι του zamak3
- ❖ καλύτερο μέτρο απόδοσης ως προς τον εφέλκυσμό
- ❖ καλύτερη κατεργασιμότητα, ως προς τη λείανση επιφανείας
- ❖ συμβατότητα με χημικές διεργασίες, όπως η επιμετάλλωση

#### Μηχανικές Ιδιότητες

Υλικό	Ονομασία	Επιμήκυνση	Αντοχή σε εφέλκυσμό	Αντοχή διαρροής	Αντοχή κρούσης	Αντοχή σε διάτμηση	Σκληρότητα	Διαδικασία
Μεταλλικό κράμα ψευδαργύρου για χύτευση	zamak5	7 (% σε 50mm)	328 (MPa)	228 (MPa)	65 (J)	262 (MPa)	91 (HB)	Χύτευση εν θερμώ

#### Φυσικές Ιδιότητες

Υλικό	Ονομασία	Πυκνότητα	Σημείο τήξης	Θερμική αγωγιμότητα	Συντελεστής θερμικής διαστολής	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Διαδικασία
Μεταλλικό κράμα ψευδαργύρου για χύτευση	zamak5	6,60 (g / cm <sup>3</sup> )	383 (°C)	109 (W / m K)	27,4 (μm / m *K)	26,0 (% IACS)	Χύτευση εν θερμώ

#### Χημική Σύσταση

Στοιχείο	Αλουμίνιο	Χαλκός	Μαγνήσιο	Σίδηρος	Μόλυβδος (max)	Κάδμιο (max)	Κασσίτερος (max)	Ψευδάργυρος
%	3,5 ~ 4,3	0,75 ~ 1,25	0,03 ~ 0,08	0,1	0,005	0,004	0,003	σε ισορροπία

Πίνακες 6, 7 & 8. Ιδιότητες πρώτης ύλης zamak5 μεταλλικό κράμα ψευδαργύρου

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSYS ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Όπως είναι ευρέως γνωστό, κάθε λογισμικό προσομοίωσης έχει ως βάση του, μια συγκεκριμένη διαδικασία μοντελοποίησης, που αφορά κάποιο πραγματικό φαινόμενο, υπό μια πληθώρα μαθηματικών τύπων.

Στην ουσία, ένα τέτοιου είδους λογισμικό επιτρέπει σε κάθε χρήση/στρία να παρατηρεί κάποια λειτουργία προσομοίωσης όπως για παράδειγμα τη θερμική καταπόνηση ενός αντικειμένου μηχανικού ενδιαφέροντος, χωρίς να τίθεται σε εφαρμογή η εν λόγω λειτουργία.

Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι, στην περίπτωση της βιομηχανοποίησης προϊόντων ένα λογισμικό προσομοίωσης μπορεί να ωφελήσει σημαντικά, κατά το στάδιο του σχεδιασμού διότι μέσω αυτού, μπορεί να ελεγχθεί η συμβατότητα προς τις τεχνικές προδιαγραφές, χωρίς να υφίσταται το κόστος της δοκιμαστικής παραγωγής, άρα και σπατάλης πρώτης ύλης – διάθεσης ανθρώπινου δυναμικού.

Τέτοιου είδους λογισμικά προσομοίωσης, χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς μέχρι και την ανάπτυξη των video games, όμως έχουν αντίκτυπο και σε αρκετούς βιομηχανικούς τομείς, πόσο μάλλον όταν οι δοκιμές παραγωγής είναι δαπανηρές, όπως στις περιπτώσεις της αεροναυπηγικής, τους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς, την πετρελαϊκή βιομηχανία κτλ.



Εικόνα 24. Θερμική ανάλυση χυτού αντικειμένου μέσω του ANSYS CFD [πηγή: Casting Component Thermal Analysis with Ansys CFD \(youtube.com\)](#)

Βάσει των προαναφερθέντων, υπάρχουν προηγμένης τεχνολογίας λογισμικά, ικανά να προσομοιώσουν τη λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, την εμφάνιση καιρικών φαινομένων, τη λειτουργία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, την επίδραση χημικών αντιδράσεων, τη λειτουργία αντλιών θερμότητας, τον έλεγχο ατομικών αντιδράσεων, ακόμα και διάφορες πολυσύνθετες βιολογικές διεργασίες.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, φαινόμενα που αφορούν τους τομείς της μηχανικής, φυσικής, χημείας και βιολογίας τα οποία μπορούν να εκφραστούν με μαθηματικές συναρτήσεις, είναι δυνατό να προσομοιωθούν με τη χρήση H/Y.

Αξίζει δε να σημειωθεί πως, η διαδικασία προσομοίωσης μπορεί να γίνει αρκετά δύσκολη στην περίπτωση ανάλυσης καιρικών φαινομένων, γιατί τόσο το πλήθος επιρροών όσο και οι αιτίες δε μπορούν να προσδιοριστούν πάντοτε με σαφήνεια.

Σε πραγματικές συνθήκες προσομοίωσης, για παράδειγμα σε κάποιο τομέα της μηχανικής ένα πολύ χρήσιμο στοιχείο είναι ο προσδιορισμός των κρίσιμων παραγόντων – παραμέτρων, που δυνητικά μπορούν να επηρεάσουν την ίδια τη διαδικασία.

Με αφορμή το θέμα της εργασίας, αυτό που μπορούμε να αναφέρουμε είναι ότι η προσομοίωση της διαδικασίας χύτευσης, είναι σε θέση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, να λειτουργήσει και ως εργαλείο πρόβλεψης των πιθανών αστοχιών, που σχετίζονται με τη διαδικασία της χύτευσης, το καλούπι, τις δυνατότητες της μηχανής και την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη.

Τα δεδομένα, που συλλέγονται προς αξιολόγηση επί συγκεκριμένου case study, που θα αναλυθούν υπό συγκεκριμένο πλαίσιο, έχουν ως σημείο αναφοράς διαδικασίες όπως:

- ❖ χύτευση βαρύτητας
- ❖ χύτευση υπό πίεση

Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα λογισμικά προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθούν οφείλουν να πληρούν τις ακόλουθες προδιαγραφές για περαιτέρω ανάλυση, όπως:

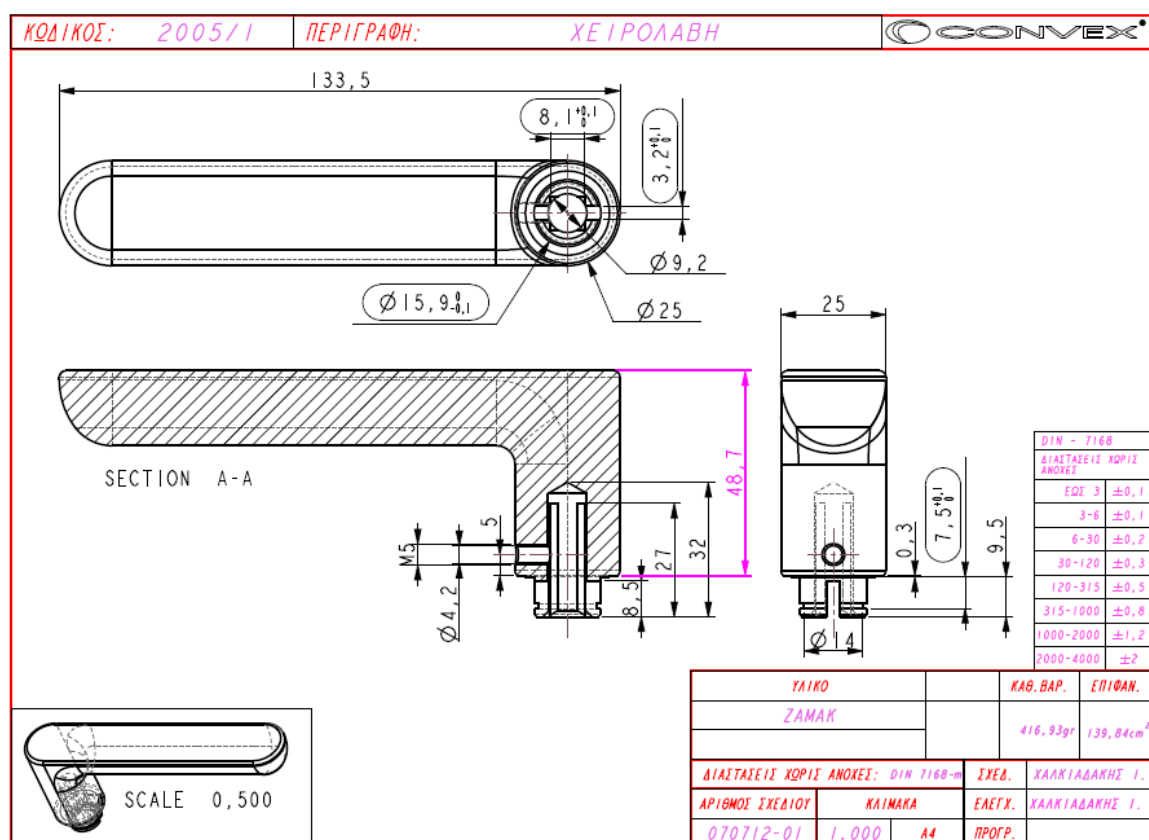
- ❖ είσοδο γεωμετρίας και πλεγματοποίηση
- ❖ ροή ρευστού στο καλούπι
- ❖ στερεοποίησης και ψύξης, μέσω θερμικής και θερμομηχανικής ανάλυσης

#### 4.1 Περιγραφή μοντέλου θερμικής ανάλυσης του επιλεγόμενου καλουπιού χύτευσης εν θερμώ

Για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, που θα αναπτυχθεί στην παρούσα εργασία, από τη στιγμή που γίνεται λόγος για χυτό εξάρτημα, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μετάβαση από μια ρευστή κατάσταση σε στερεή όπου στην ουσία, θα είναι εφικτή η τελική μορφοποίηση.

Για το λόγο αυτό, το μοντέλο θερμικής ανάλυσης πρόκειται να δομηθεί μέσω του thermal transient μέσω του λογισμικού ANSYS, διότι ένας σημαντικός παράγοντας κατά τη χύτευση, άρα και μεταβολή των φάσεων της πρώτης ύλης κατά τη διάρκεια παραγωγής, είναι η θερμοκρασία ως προς το χρόνο.

Η εν λόγω επιλογή μοντέλου έγινε διότι, ένα βασικό μηχανικό μέρος (εξάρτημα) επί του καλουπιού είναι ο κώνος, από το οποίο θα ρεύσει το μεταλλικό κράμα προς τις κοιλότητες, άρα είναι εφικτή η μεταφορά θερμότητας από το υγρό στοιχείο σε μια στερεά δομή.



Εικόνα 25. Κατασκευαστικό σχέδιο χειρολαβής από zamak5 ως χυτό αντικείμενο

Συνεπώς, το μοντέλο θερμικής ανάλυσης πρόκειται να αναπτυχθεί σε δυο μέρη, ως ακολούθως μέσα από το Workbench ANSYS:

1. για το καλούπι χύτευσης: Static structural και Steady – State Thermal
  - i. καταχώρηση βασικών δεδομένων για τη μεταφορά θερμότητας στον κώνο του καλουπιού
  - ii. εισαγωγή γεωμετρίας κώνου
  - iii. συσχέτιση επιφανειών στις οποίες μεταβιβάζεται η θερμότητα (δηλαδή μεταξύ κώνου και κινητού μέρους καλουπιού)
  - iv. καθορισμός οριακών συνθηκών θερμοκρασίας
  - v. επιλογή και καταχώρηση παραμέτρων
  - vi. εξαγωγή αποτελεσμάτων

Σε μια στατική θερμική ανάλυση, τα αντίστοιχα θερμοκρασιακά δεδομένα πρέπει να ικανοποιούν τη συνθήκη  $[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\}$ , όπου οι σταθερές θερμοκρασίες αντιπροσωπεύουν περιορισμούς  $\{T\}$  στο σύστημα (όπως σταθερές μετατοπίσεις εσωτερικά της δομής των συνεργαζόμενων μερών, του καλουπιού).

Στη συγκεκριμένη θερμική ανάλυση, σημαντικά δεδομένα είναι τα στερεά, επιφανειακά και γραμμικά μοντέλα, όπου η διατομή και ο προσανατολισμός μπορεί να οριστεί μέσα από το Design Modeler ή το Space Claim, καθώς επίσης και η λειτουργία της εκάστοτε θερμικής μάζας.

Επιπροσθέτως, οφείλουμε να κάνουμε κάποιες παραδοχές ως προς την πλεγματοποίηση του αντικειμένου, διότι υπάρχει η περίπτωση των κελυφών (*shells*) όπου οι θερμοκρασίες μπορούν να διαφοροποιούνται στην επιφάνεια χωρίς ιδιαίτερη διακύμανση ως προς το πάχος τοιχώματος του αντικειμένου, καθώς και η περίπτωση σωμάτων γραμμής (*line bodies*) όπου η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά μήκος της επιφάνειας του.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως, σε αυτό το μοντέλο θερμικής ανάλυσης σημαντική παράμετρος είναι η θερμική αγωγιμότητα (*thermal conductivity*) του υλικού κατασκευής του καλουπιού και των επιμέρους εξαρτημάτων του.

Σημείωση: κάτι αντίστοιχο όπως και στις δομικές αναλύσεις, οι περιοχές επαφής δημιουργούνται αυτόματα ώστε, να είναι εφικτή η μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα συνεργαζόμενα μέρη του καλουπιού.



Εικόνα 26. Τοποθέτηση κώνου στο κινητό μέρος του καλουπιού χύτευσης

2. για το σύστημα καλούπι – παράμετροι χύτευσης: Transient structural και Transient Thermal
  - i. εισαγωγή δεδομένων που αφορούν το υλικό του καλουπιού και της πρώτης ύλης
  - ii. εισαγωγή γεωμετρίας καλουπιού
  - iii. πλεγματοποίηση καλουπιού
  - iv. καταχώρηση παραμέτρων χύτευσης
  - v. εξαγωγή αποτελεσμάτων

**Σημείωση:** το συγκεκριμένο σύστημα, διέπεται από τη θερμοκρασιακή μεταβολή κατά την αλλαγή κατάστασης της πρώτης ύλης, από ρευστό σε στερεό εντός των κοιλοτήτων του καλουπιού.

Σε αυτή την περίπτωση, οι μεταβατικές δομικές αναλύσεις αφορούν φορτία ή οριακές συνθήκες οι οποίες, μπορούν να μεταβληθούν απότομα κατά τη διάρκεια της χύτευσης, ανάλογα με το πλήθος κύκλων λειτουργίας (*πατημάτων*), όπου και θα παραχθούν τα αντικείμενα. Ουσιαστικά, έχουμε δυναμική απόκριση του συστήματος που μελετάμε με την επίδραση της πρώτης ύλης, ως προς τις μηχανικές τις ιδιότητες να είναι και ο βασικότερος παράγοντας.

#### 4.2 Σταδιακή ανάπτυξη της θερμικής ανάλυσης μέσω του ANSYS Workbench

Σε αυτό το αρχικό στάδιο, θα παρουσιαστεί η ανάπτυξη του μοντέλου θερμικής ανάλυσης για τον κώνο, ο οποίος αφορά το καλούπι μιας και προσαρμόζεται στο κινητό μέρος (*ως βασικό συνεργαζόμενο εξάρτημα*) και που συσχετίζεται με το ακροφύσιο, απ' όπου διαρρέει το υγρό zamak5.

Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η αναφορά στο υλικό κατασκευής του καλουπιού και των δομικών μερών αυτού (*συμπεριλαμβανομένου του κώνου*), με αναφορά σε τεχνικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες, ως ακολούθως:

#### **ORVAR SUPREME**

##### **Βασικές Ιδιότητες**

- ❖ υψηλό επίπεδο αντοχής σε θερμικό σοκ και θερμική καταπόνηση
- ❖ καλή αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία
- ❖ εξαιρετική σκληρότητα και ολκιμότητα
- ❖ καλή μηχανουργική κατεργασία και στιλβωσιμότητα
- ❖ εξαιρετικές ιδιότητες διαμπερούς σκλήρυνσης
- ❖ καλή διαστασιολογική σταθερότητα κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσης
- ❖ βιωσιμότητα χάλυβα 95,91% λόγω της δυνατότητας ανακύκλωσης του

##### **Πεδίο Εφαρμογών**

- ❖ χύτευση (*die casting*)
- ❖ μηχανουργικές διαμορφώσεις (*forging*)
- ❖ θερμή σφράγιση (*hot stamping*)
- ❖ εφαρμογές θερμών εργασιών (*hot work applications*)

##### **Χημική Σύσταση**

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>
0.39	1.00	0.40	5.20	1.40	0.90

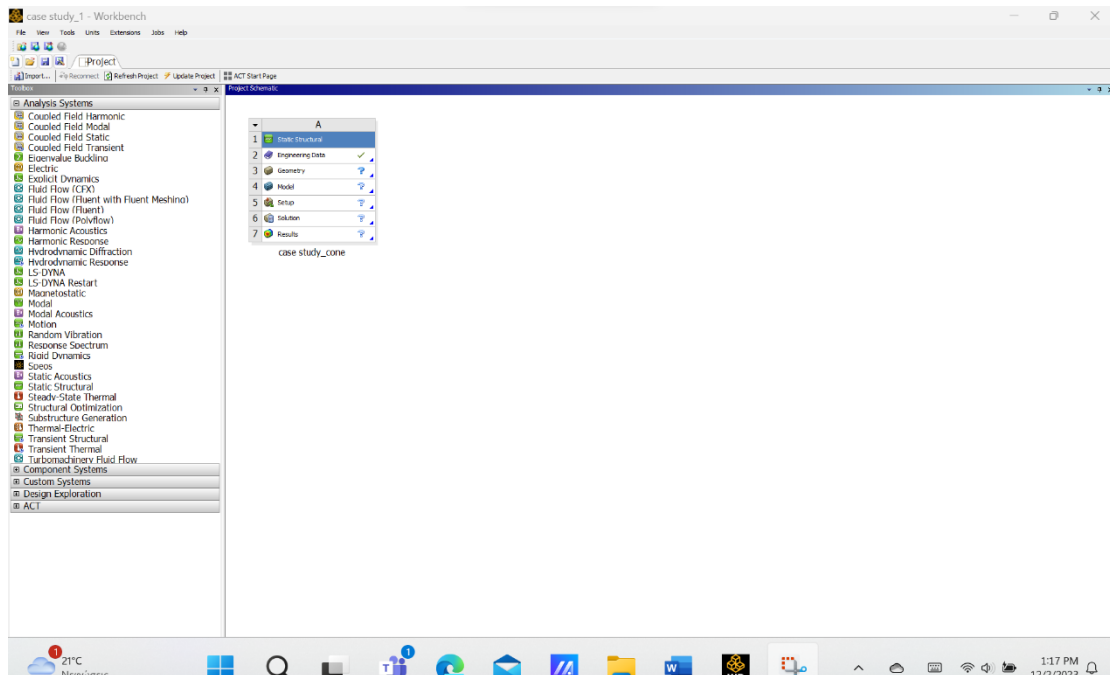
Ο συγκεκριμένος χάλυβας, έχει το χαρακτηριστικό H13 κατά το πρότυπο AISI για όλο το πεδίο εφαρμογών στα οποία χρησιμοποιείται, όπου προσφέρει υψηλό και αξιόπιστο επίπεδο απόδοσης κατεργασιών και έχει βαθμολογηθεί από τον NADCA (*North American Die Casting Association*), βάσει των παρακάτω στοιχείων

- ❖ αντοχή σε θερμική φθορά 40% (*βαθμός αναφοράς κατά H13 40%*)
- ❖ αντοχή σε πλαστική παραμόρφωση 40% (*βαθμός αναφοράς κατά H13 40%*)
- ❖ αντίσταση στη θερμότητα 60% (*βαθμός αναφοράς κατά H13 40%*)
- ❖ αντοχή σε ρωγμές 50% (*βαθμός αναφοράς κατά H13 35%*)



## Μοντέλο Static Structural και Steady – State Thermal

**ΒΗΜΑ 1<sup>ο</sup>:** σε περιβάλλον ANSYS Workbench, εισάγω το static structural στο project schematic αφού έχω αποθηκεύσει το αρχείο ως case study\_1.



Εικόνα 27. Εισαγωγή του static structural με τα πεδία τα οποία θα αναπτυχθούν για το πρώτο μοντέλο

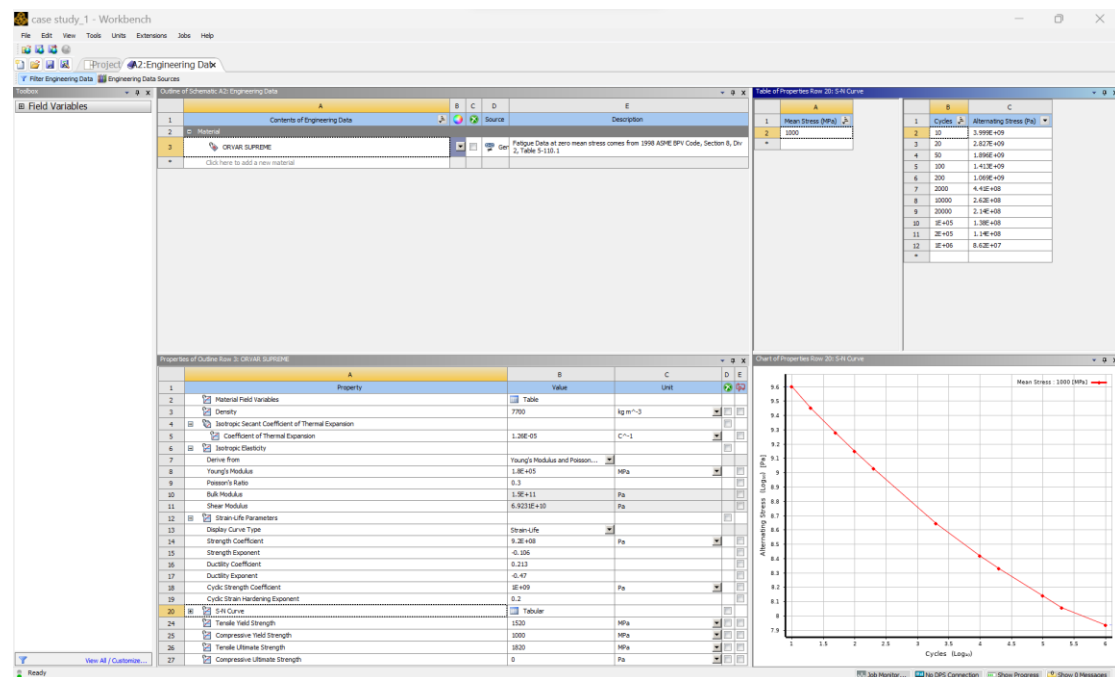
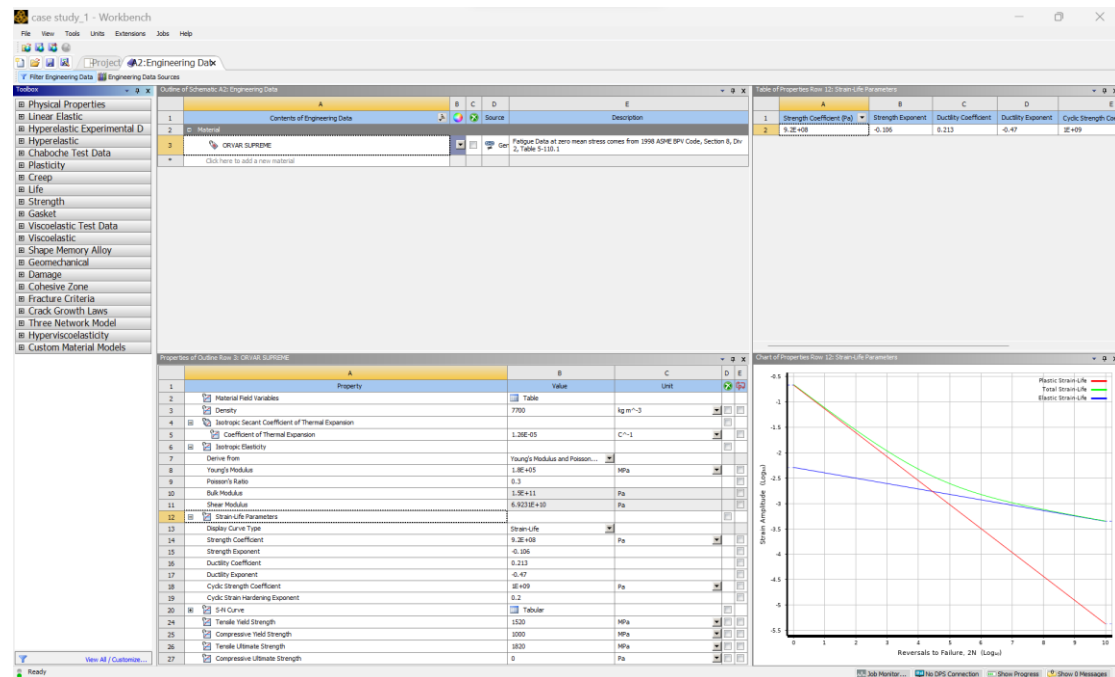
**ΒΗΜΑ 2<sup>ο</sup>:** στο πεδίο engineering data, καταχωρώ τα στοιχεία για το χάλυβα κατασκευής του καλουπιού και εξαρτημάτων αυτού, ORVAR SUPREME ως ακολούθως:

- ❖ στη στήλη material: ORVAR SUPREME
- ❖ στη στήλη property
  - density:  $7.700\text{kg/m}^3$  για θερμοκρασία λειτουργίας  $400^\circ\text{C}$
  - tensile yield strength:  $1.520\text{MPa}$  για σκληρότητα 52HRC
  - compressive yield strength:  $1.000\text{MPa}$  για θερμοκρασία λειτουργίας  $400^\circ\text{C}$
  - tensile ultimate strength:  $1.820\text{MPa}$  για σκληρότητα 52HRC
  - coefficient of thermal expansion:  $12,6 \times 10^{-6}$  για θερμοκρασία λειτουργίας  $400^\circ\text{C}$
  - young's modulus:  $180.000\text{MPa}$

**Σημείωση:** από το menu view, επιλέγω refresh για να αποθηκευτούν τα δεδομένα και να γίνει η συσχέτιση του υλικού.

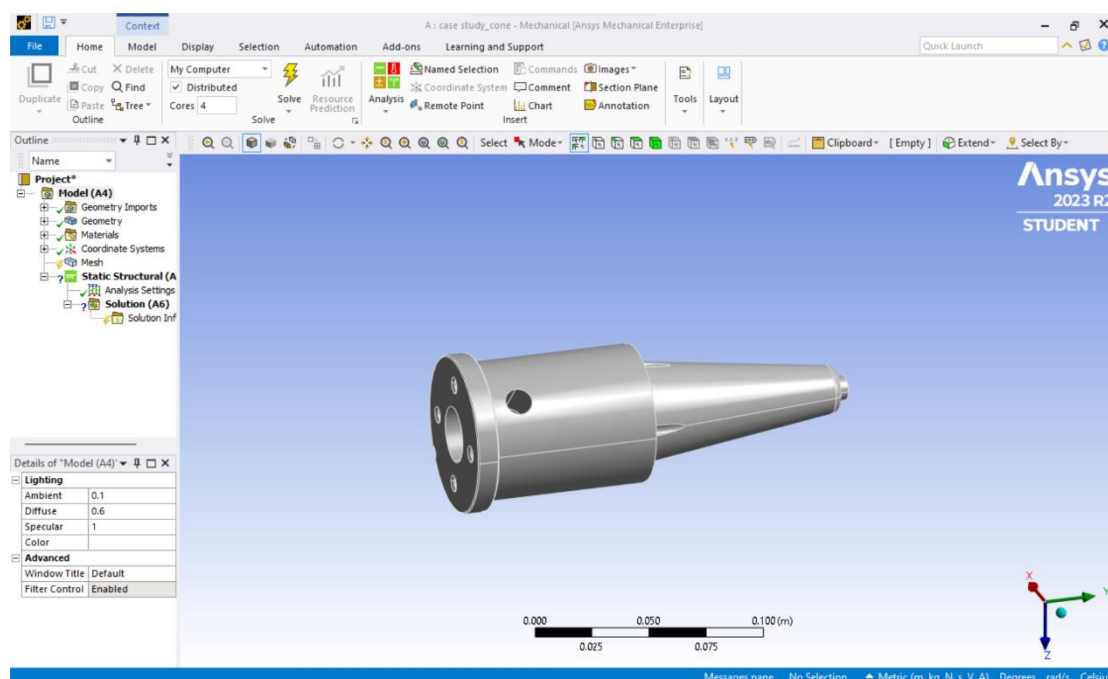


**Σημείωση:** επιλέγοντας S-N curve, στο πεδίο mean stress καταχωρώ 1.000MPa για θερμοκρασία λειτουργίας 400°C.



Εικόνες 28 & 29. Καταχώρηση των δεδομένων του υλικού τα οποία είναι χρήσιμα για την ανάπτυξη του πρώτου μοντέλου

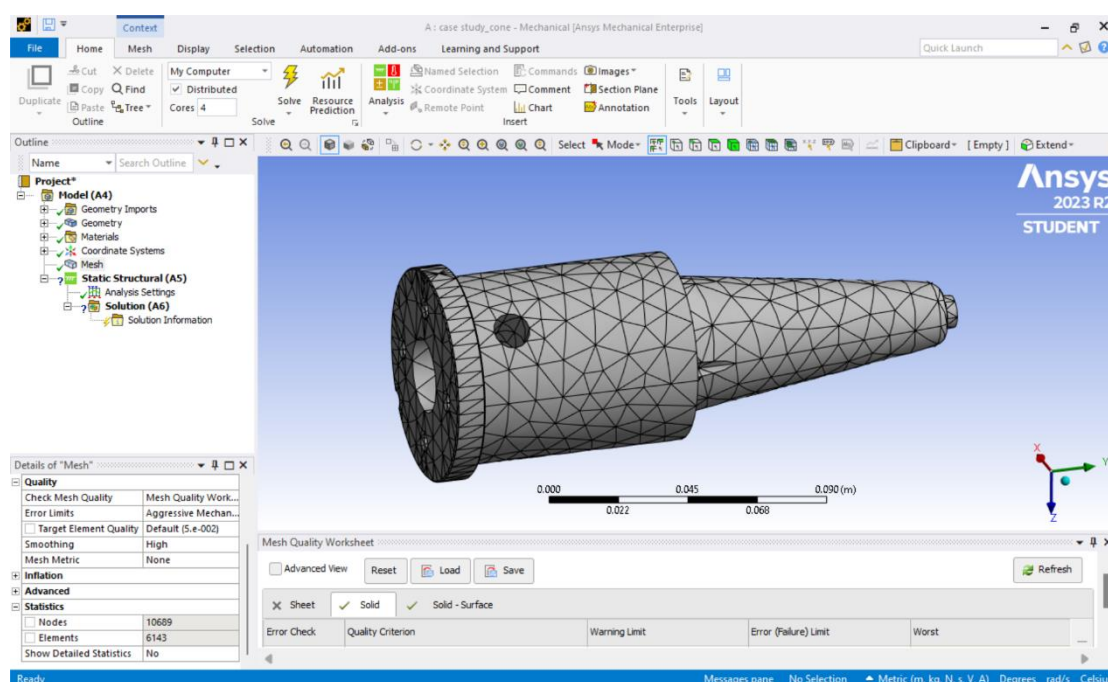
**ΒΗΜΑ 3<sup>ο</sup>:** στο πεδίο geometry, επιλέγω import geometry to αρχείο 2195-1b\_konos.stp



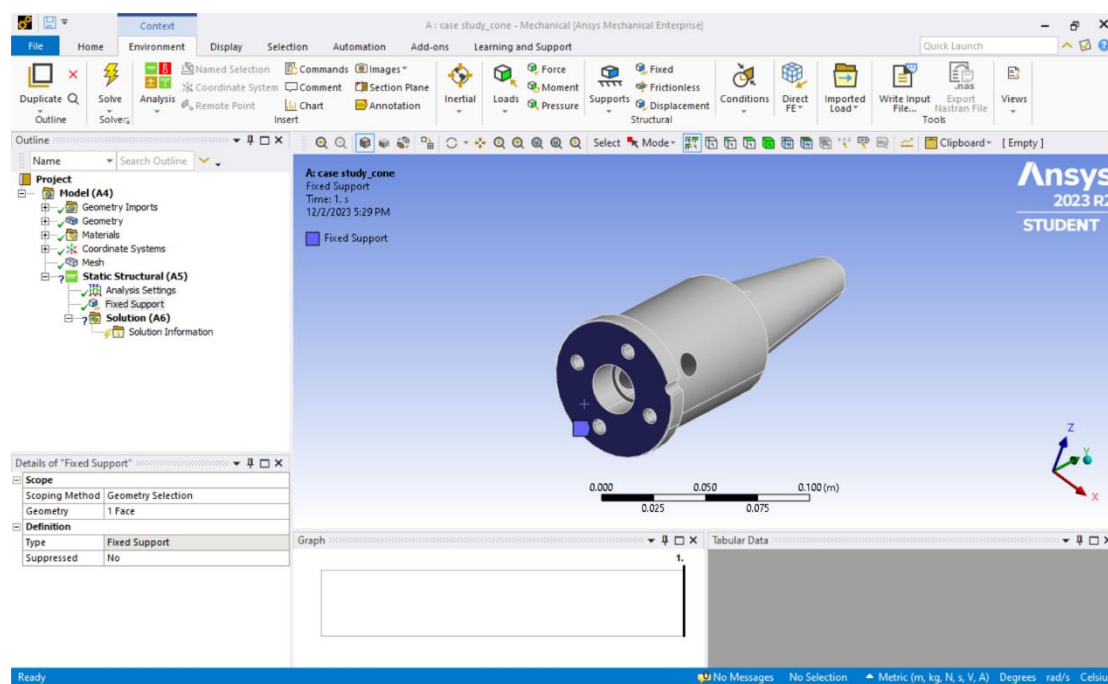
Εικόνες 30 & 31. Η εισαγωγή της γεωμετρίας του 3D μοντέλου επαληθεύεται μέσα στο project schematic και η πλεγματοποίηση

**ΒΗΜΑ 4<sup>ο</sup>:** στο πεδίο model, με διπλό κλικ εισάγομαι στο περιβάλλον mechanical όπου και βλέπω το αντικείμενο όπου στο πεδίο mesh, επιλέγω generate mesh και στο παράθυρο διαλόγου details of mesh, καταχωρώ τα ακόλουθα:

- defaults / physics preference: mechanical
- element order: quadratic
- quality / smoothing: high
- statistics / nodes (10.689) και elements (6.143)



**ΒΗΜΑ 5<sup>ο</sup>:** για τον ορισμό ορίων και φορτίσεων, βάσει των οποίων θα γίνει η ανάλυση όπου στο πεδίο static structural (A5) και από το menu environment, επιλέγω fixed ώστε να προστεθεί στο δέντρο εργασιών και στη συνέχεια με εντολή face, καθορίζω την επιφάνεια του αντικειμένου όπου εδράζεται στο καλούπι και από το παράθυρο διαλόγου, fixed support και apply.

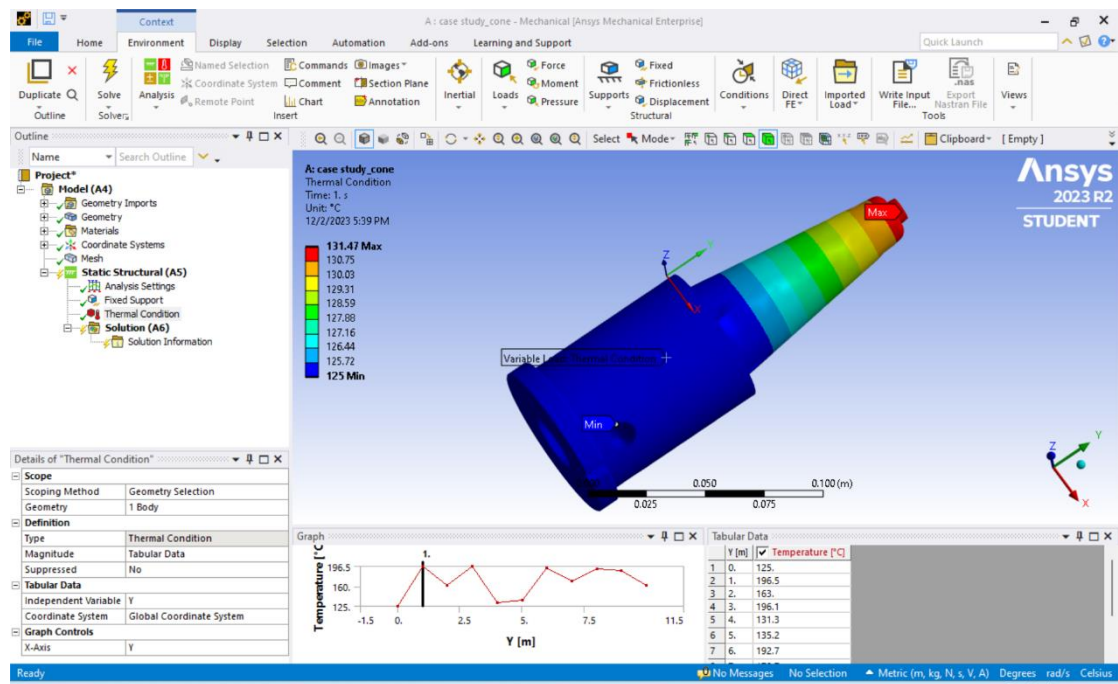


Εικόνα 32. Επιλογή της επιφάνειας του κώνου που εδράζεται στο καλούπι

**ΒΗΜΑ 6<sup>ο</sup>:** στη συνέχεια από το menu environment, επιλέγω loads και thermal condition όπου εισάγω τη θερμοκρασία που αποκτά το αντικείμενο κατά τη λειτουργία (βάσει καταγραφής μετρήσεων), γνωρίζοντας ότι είναι συνδεδεμένο στην κινητή πλάκα του καλουπιού. Ενώ από το παράθυρο διαλόγου thermal condition καταχωρώ τα ακόλουθα:

- definition / magnitude: tabular data
- tabular data / independent variable: Y (όπου καταχωρώ τις μετρήσεις θερμοκρασίας του κώνου για 10 συνεχόμενα πατήματα, από την παραγωγή της χειρολαβής 2005 – 1)
- graph controls / X – axis: Y και επιλέγω apply

$\alpha/\alpha$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
°C	125	196,5	163	196,1	131,3	135,2	192,7	170,7	191,8	188,5

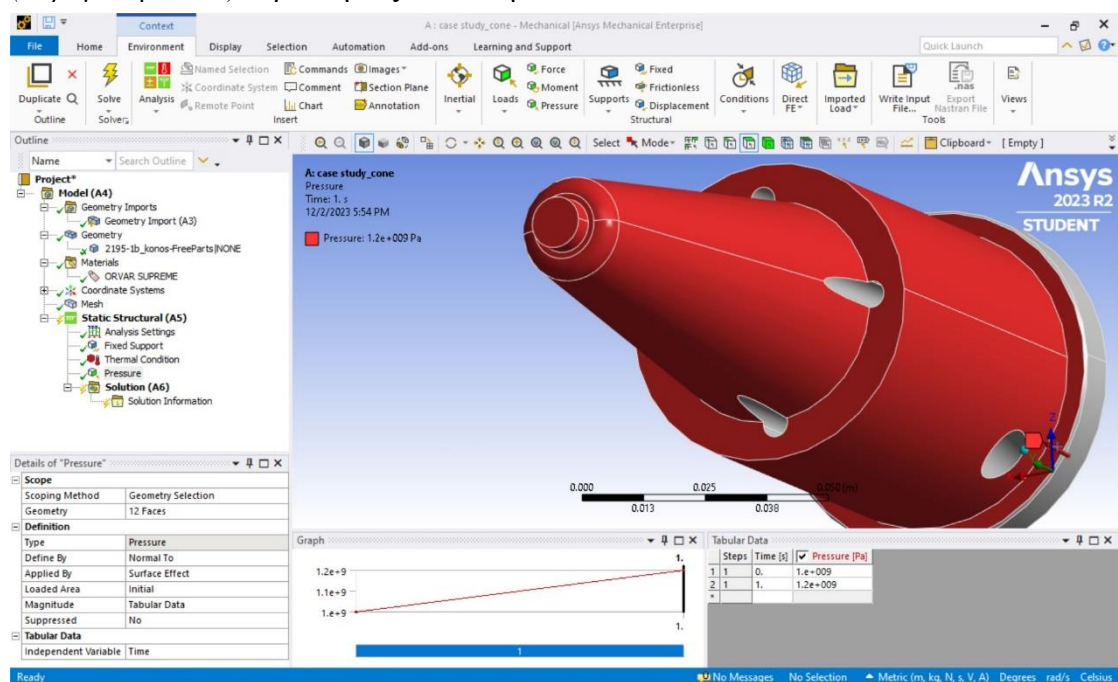


Εικόνες 33 & 34. Καταχώρηση των θερμοκρασιών του κώνου και των πιέσεων

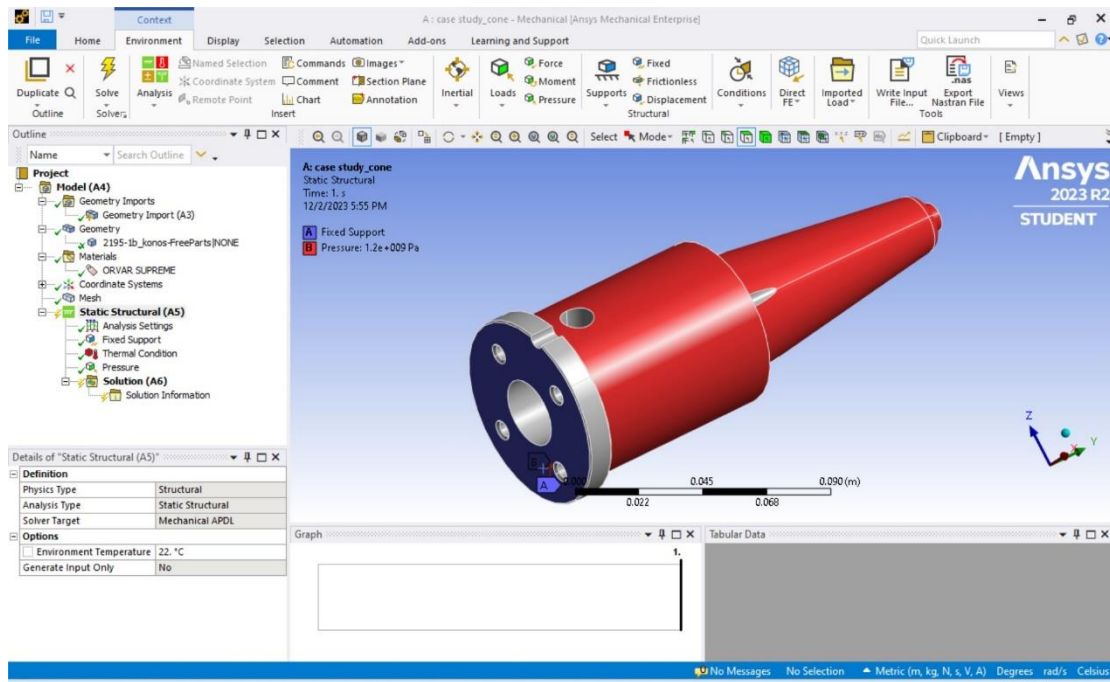
**Σημείωση:** από το δέντρο εργασιών, στο πεδίο analysis settings όπου στο step controls καταχωρώ, τα ακόλουθα:

- number of steps: 4 (χρόνος επανεκκίνησης κύκλου λειτουργίας χυτόπρεσας)
- current step number: 1 (πάτημα)
- step end time: 1 (επιστροφή εξώλκεα)

**Σημείωση:** στο δέντρο εργασιών και μέσα στο static structural, προσθέτω το πεδίο pressure όπου και καταχωρώ στο tabular data, τις τιμές πίεσης που ασκούνται στην επιφάνεια του κώνου κατά τη διάρκεια 2,5sec ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας (παρομονή πλατό), πριν την εξώλκευση.



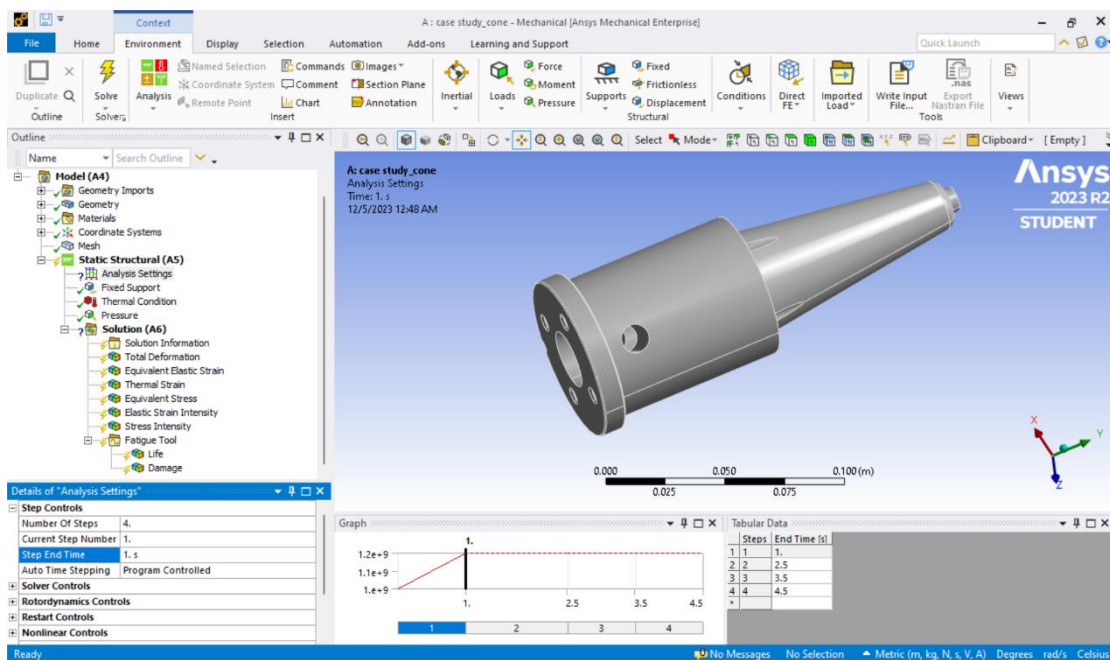




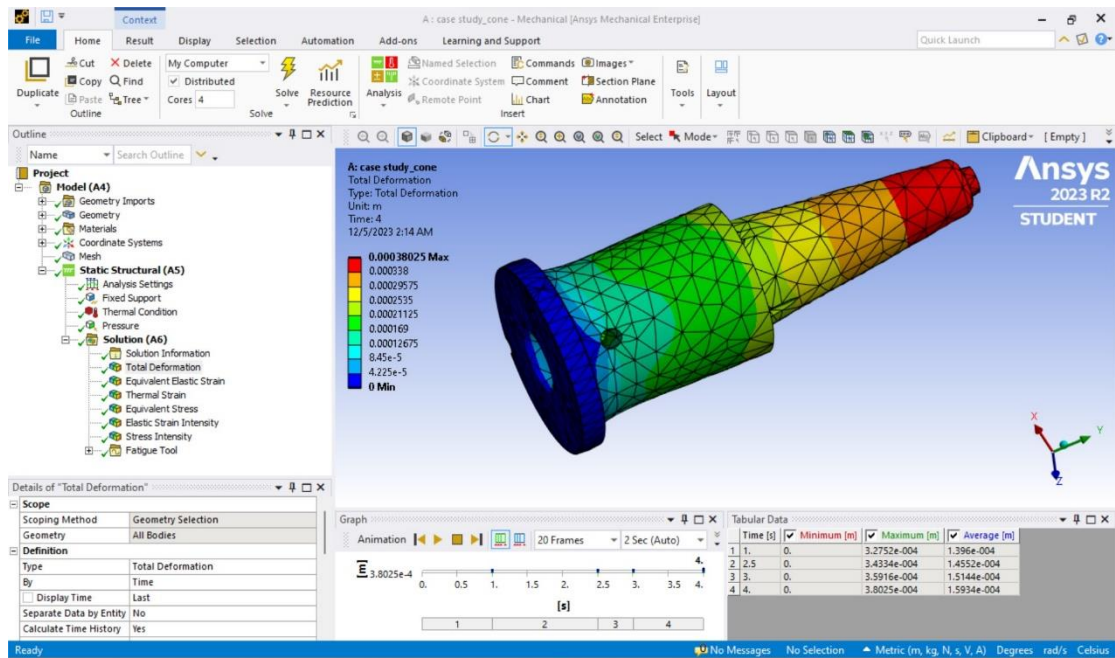
Εικόνα 35. Καθορισμός επιφανειών για τις φορτίσεις

**ΒΗΜΑ 7<sup>ο</sup>:** από το δέντρο εργασιών, επιλέγω solution (A6) και με εντολή insert προσθέτω τα ακόλουθα:

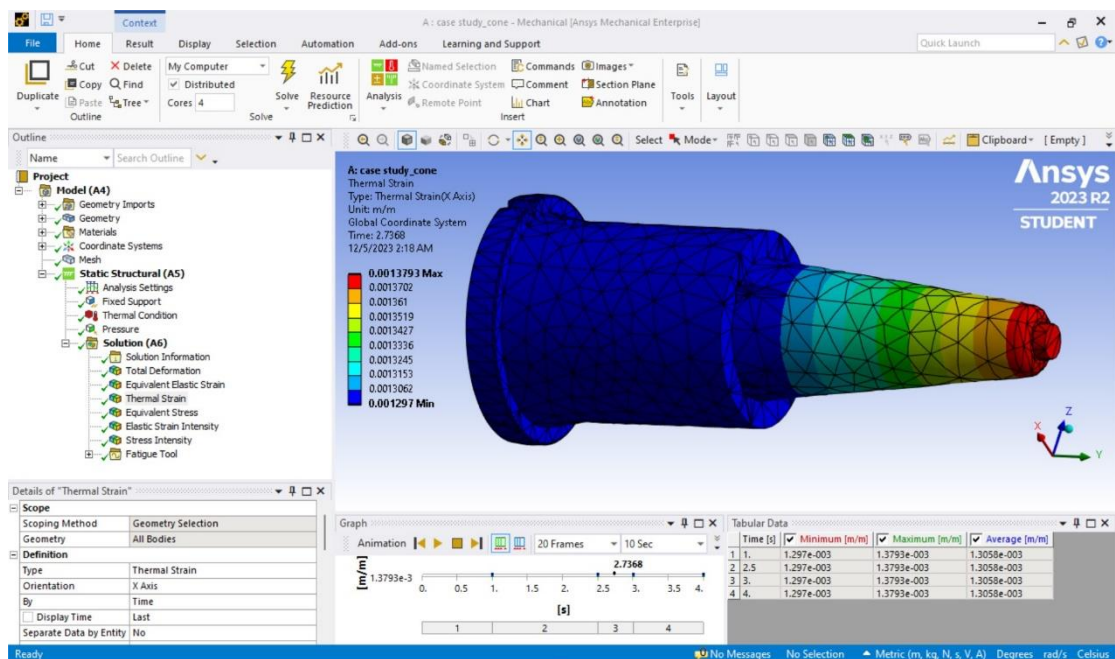
- total deformation
- equivalent elastic strain
- thermal strain
- equivalent stress
- elastic strain intensity
- stress intensity και solve



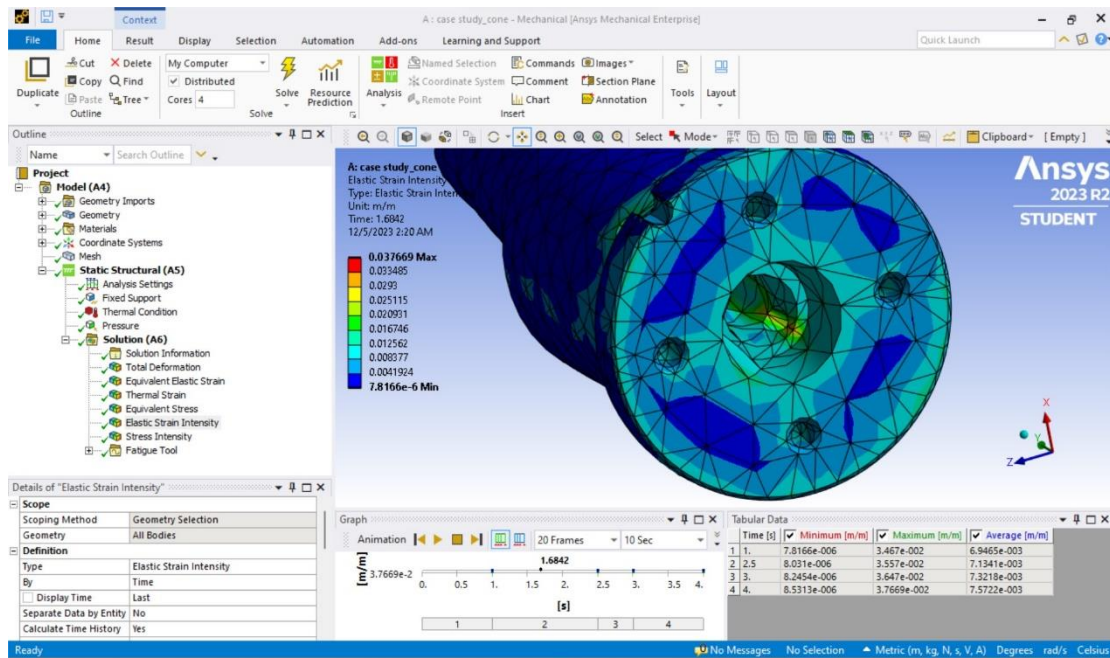
Εικόνα 36. Επιλογές επίλυσης βάσει θερμοκρασιακής φόρτισης και πίεσης



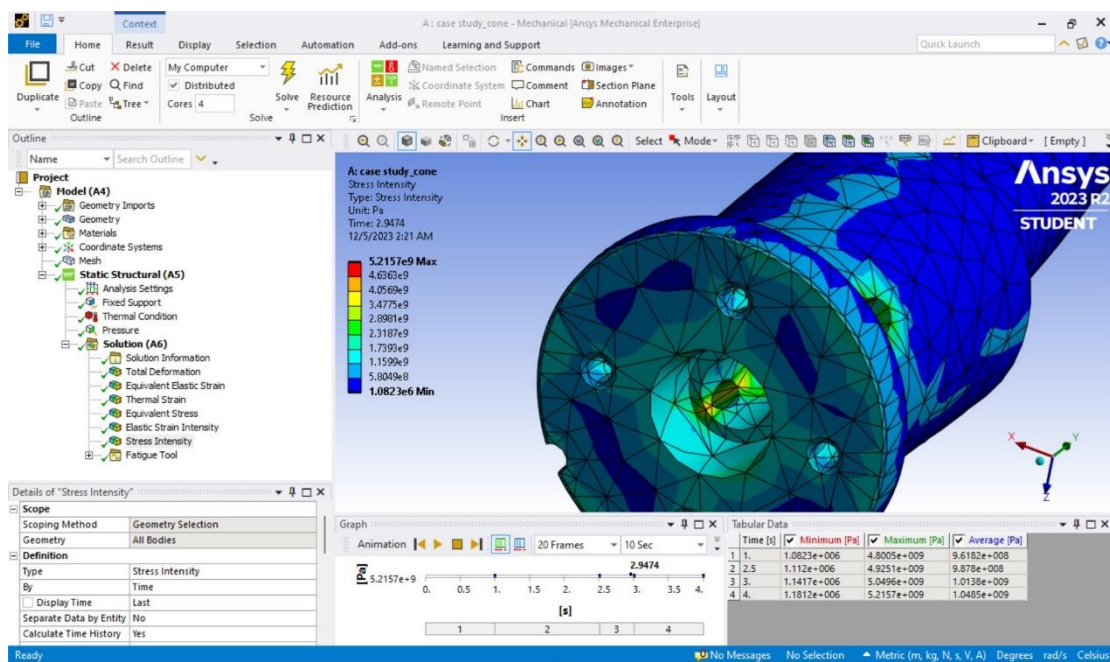
Εικόνα 37. Σχηματική απεικόνιση του total deformation βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης



Εικόνα 38. Σχηματική απεικόνιση του thermal strain βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης



Εικόνα 39. Σχηματική απεικόνιση του elastic strain intensity βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης



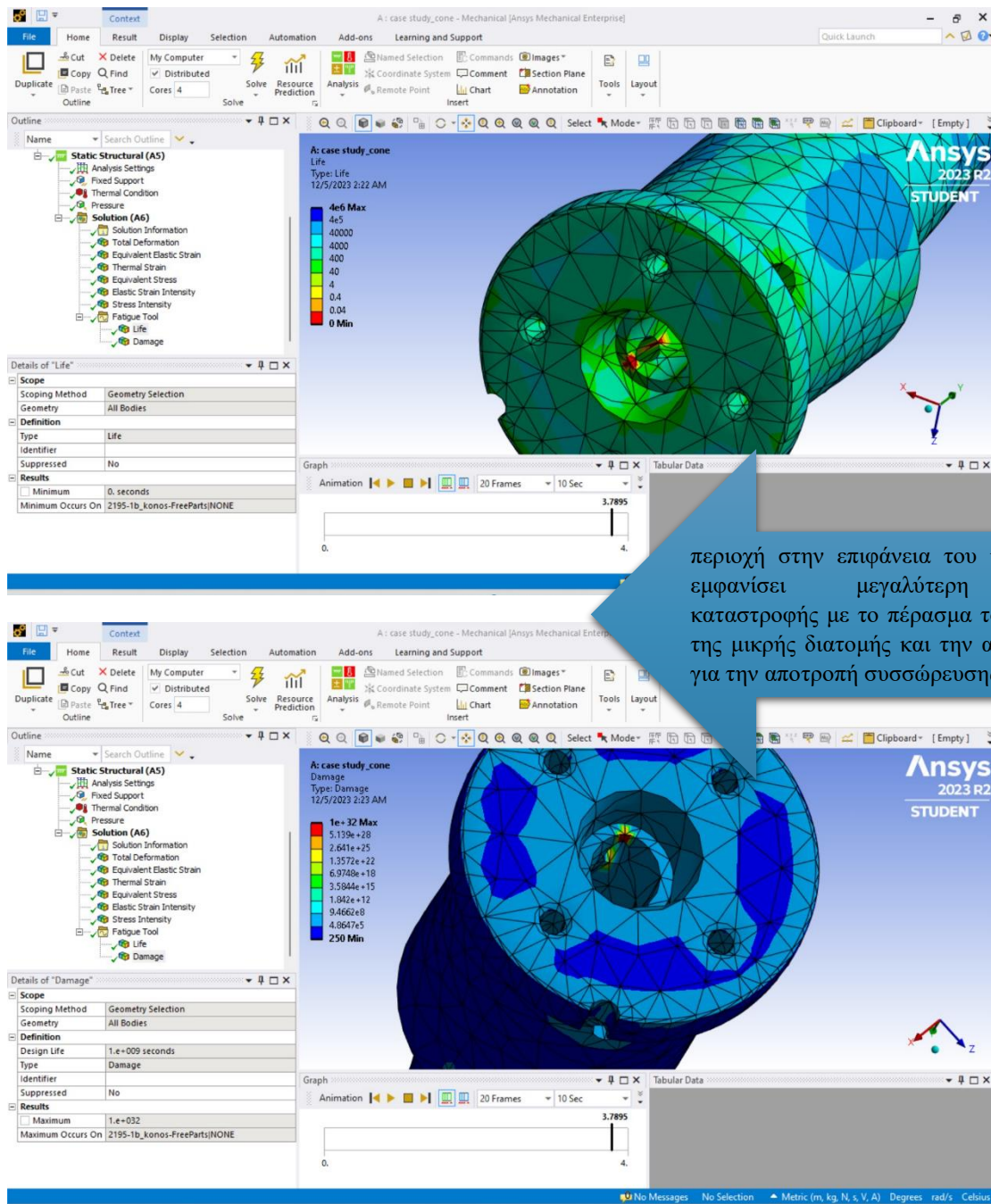
Εικόνα 40. Σχηματική απεικόνιση του stress intensity βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης

**Σημείωση:** στο πεδίο fatigue tool, καταχωρώ τα ακόλουθα στοιχεία εάν λάβουμε υπόψη τον τύπο  $k_f = 1 + q(kt - 1)$ , όπου  $q$  = notch radius (από 0 έως 1).

- fatigue strength factor ( $k_f$ ): 0,75
- loading type: fully reversed
- display time: 2,5sec



- analysis type: stress life
- mean stress theory: mean stress curves
- stress component: equivalent (*von – Mises*)
- units name: second
- cycle is equal to: 4 sec



περιοχή στην επιφάνεια του κώνου όπου θα εμφανίσει μεγαλύτερη πιθανότητα καταστροφής με το πέρασμα του χρόνου λόγω της μικρής διατομής και την απουσία chamfer για την αποτροπή συσσωρευσης τάσεων

Εικόνες 41 & 42. Σχηματική απεικόνιση των περιοχών που καταπονούνται κατά τη χύτευση μέσω του fatigue tool για τη διάρκεια ζωής και τη φθορά

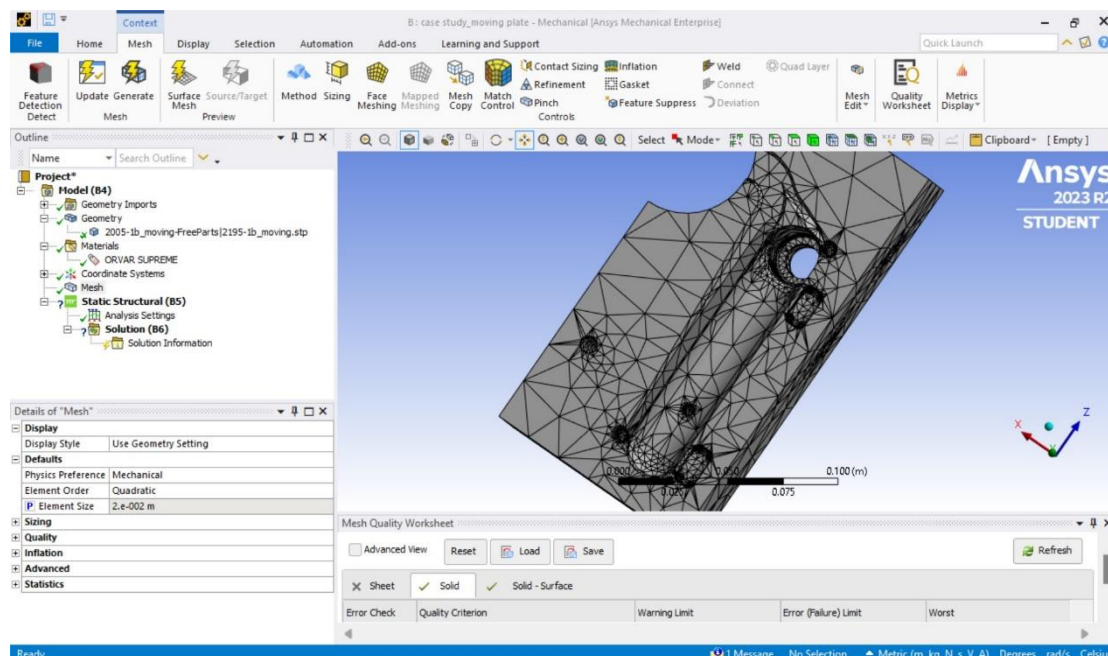


**ΒΗΜΑ 8º:** σε περιβάλλον ANSYS Workbench, εισάγω ξανά το static structural μέσα στο project schematic, συνδέοντας το πεδίο engineering data από την αρχική καταχώρηση, των δεδομένων για το υλικό ORVAR SUPREME.

**ΒΗΜΑ 9º:** εισάγω τη γεωμετρία του κινητού μέρους του καλουπιού, στο οποίο τοποθετείται ο κόνος, για να συνεχίσω με την ανάλυση από τη στιγμή που λαμβάνεται ως σύστημα, κατά τη διάρκεια της χύτευσης (*2005-1b\_moving.stp*).

**ΒΗΜΑ 10º:** δημιουργώ το πλέγμα με τα παρακάτω δεδομένα:

- πεδίο default, element size: 0,02m / element order: quadratic
- πεδίο sizing, resolution: 2 / span angle center: fine / initial size seed: part
- πεδίο quality, smoothing: high
- πεδίο inflation, transition ratio: 0,025 / maximum layer: 2 / growth rate: 0,5



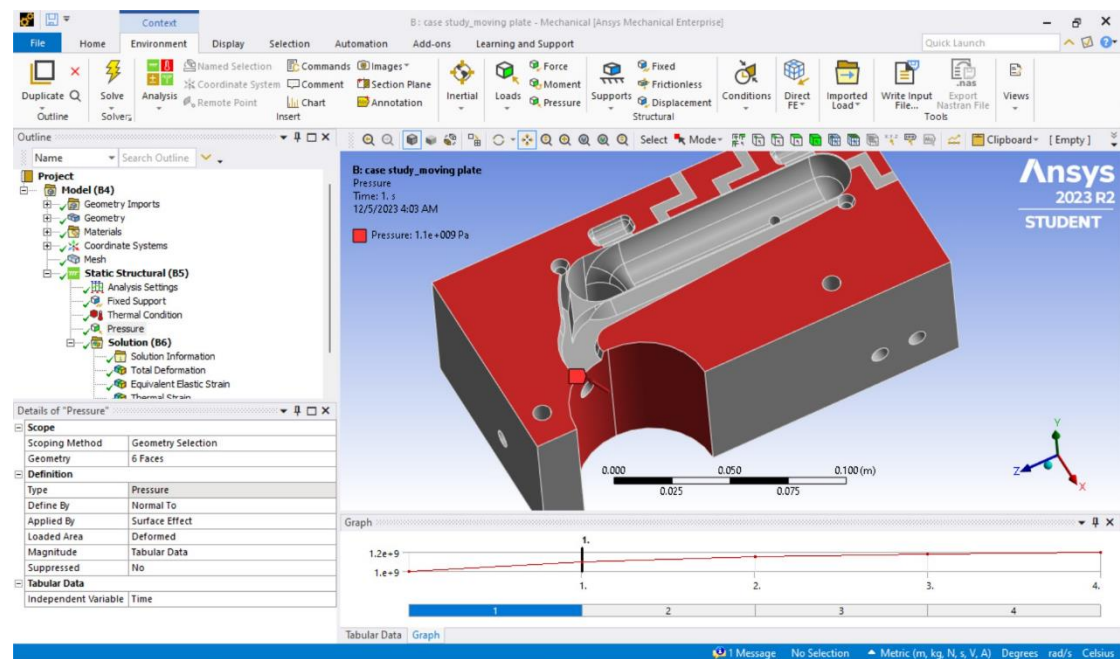
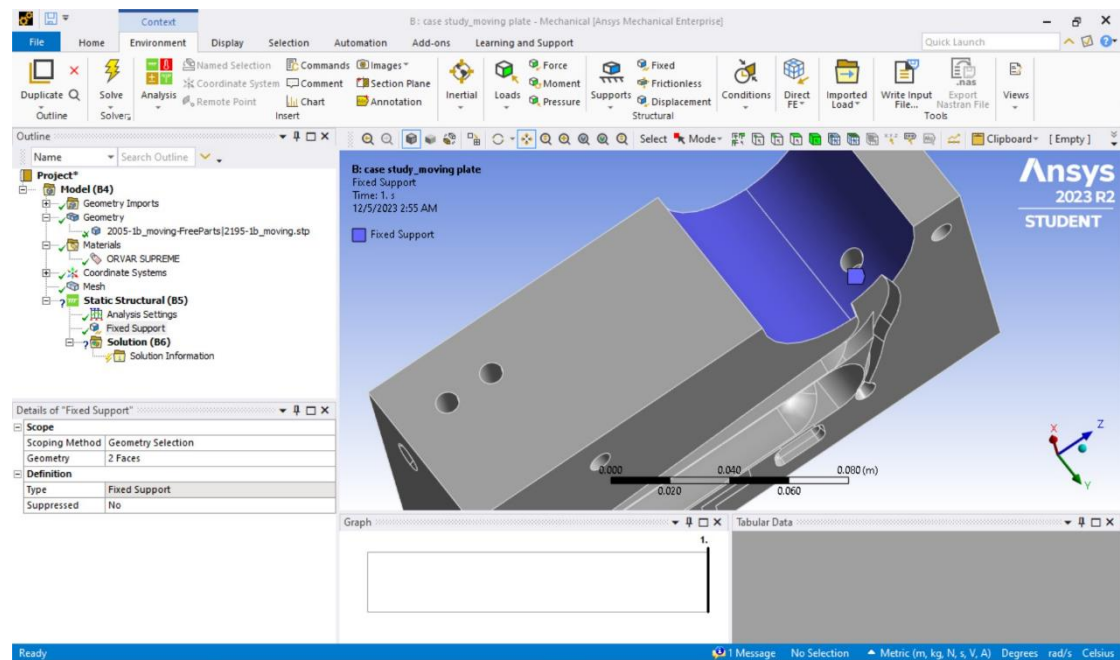
Εικόνα 43. Δημιουργία πλέγματος για το κινητό μέρος του καλουπιού

**ΒΗΜΑ 11º:** από το δέντρο εργασιών στο static structural εισάγω από το menu environment την εντολή fixed support κάνοντας apply την επιφάνεια στην οποία, εφάπτεται ο κόνος και στο πεδίο geometry: 2 faces.

**ΒΗΜΑ 12º:** επίσης, εισάγω την εντολή thermal condition κάνοντας apply όλη την επιφάνεια του κινητού μέρους, με τα ακόλουθα πεδία:

- geometry: 1 body
- magnitude: tabular data
- independent variable: X και καταχωρώ τις τιμές για τη θερμοκρασία της κοιλότητας για 10 συνεχόμενα πατήματα

$\alpha/\alpha$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
°C	121,5	121,3	128,2	125,5	109,0	118,7	121,5	128,8	125,9	122,8

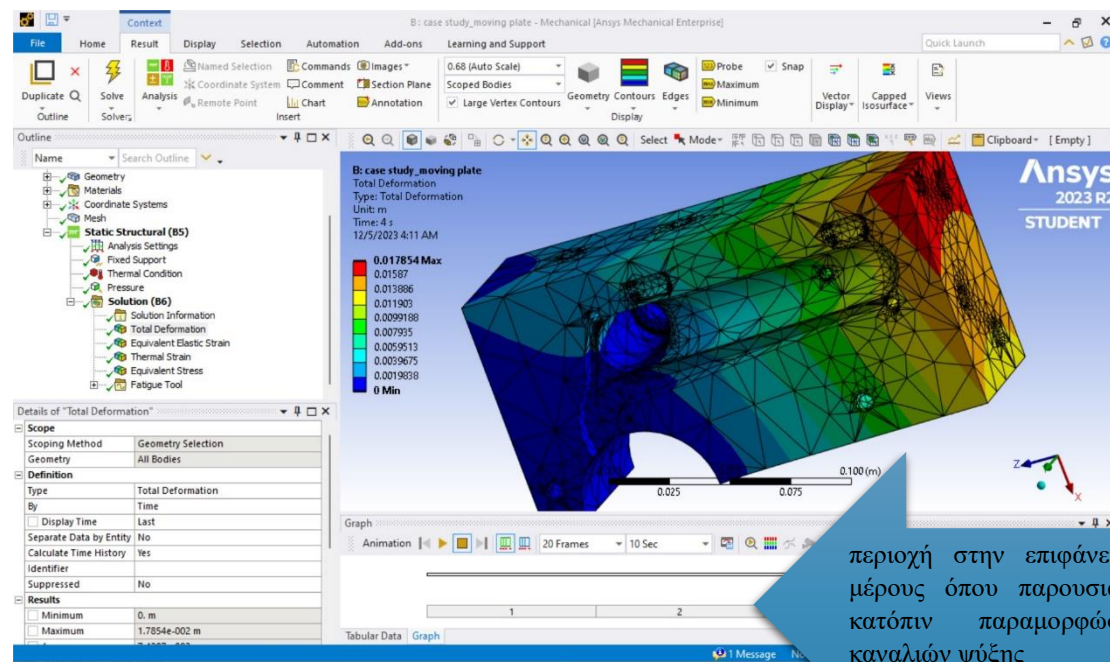


Εικόνες 44 & 45. Σχηματική απεικόνιση των δυο φορτίσεων, ώστε να είναι εφικτή η θερμική ανάλυση

**ΒΗΜΑ 13°:** επίσης εισάγω την εντολή pressure, με max τιμή  $1,2e+009\text{Pa}$  με εφαρμογή στην επιφάνεια που τοποθετείται ο κώνος, καθώς και αυτή του κινητού μέρους όπου αλληλοεπιδρά κατά τη ροή του μετάλλου, μέχρι την είσοδο του στην κοιλότητα, ώστε να ξεκινήσει η στερεοποίηση του.

**ΒΗΜΑ 14°:** στο δέντρο εργασιών για το πεδίο solution (B6) προσθέτω τις παρακάτω εντολές:

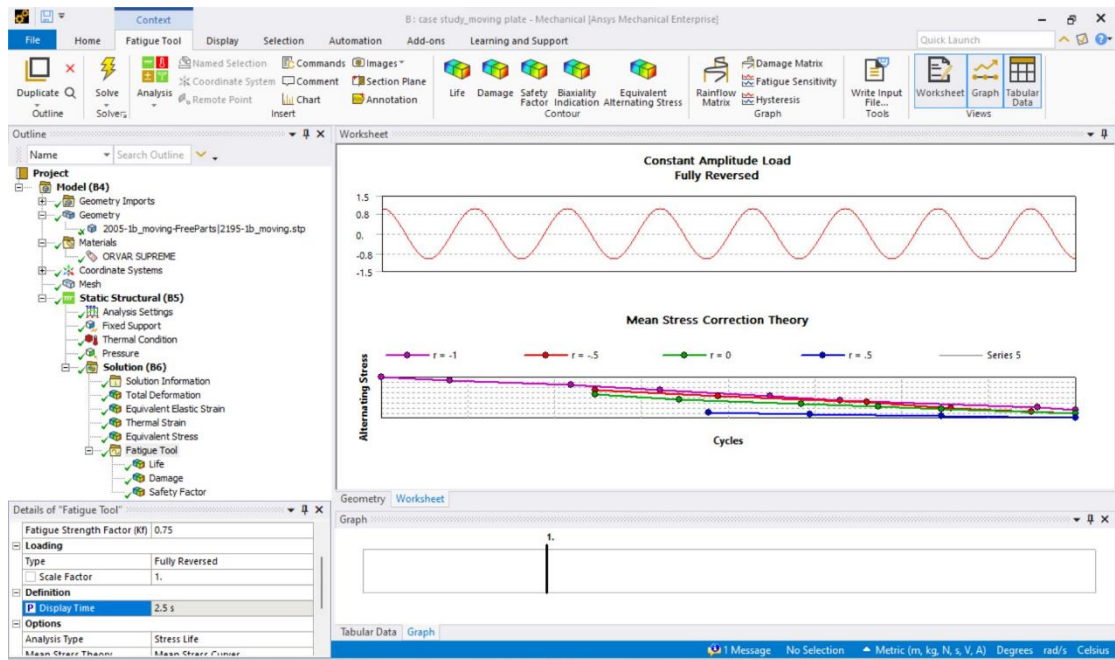
- total deformation
- equivalent elastic strain
- thermal strain
- equivalent stress δεδομένου ότι, έχω χρόνο επανεκκίνησης 4sec χρόνο παραμονής πλατό 2,5sec με εφαρμογή, σε όλη την επιφάνεια όπου στο πεδίο analysis settings θέτω τα ίδια δεδομένα, όπως στο έβδομο βήμα



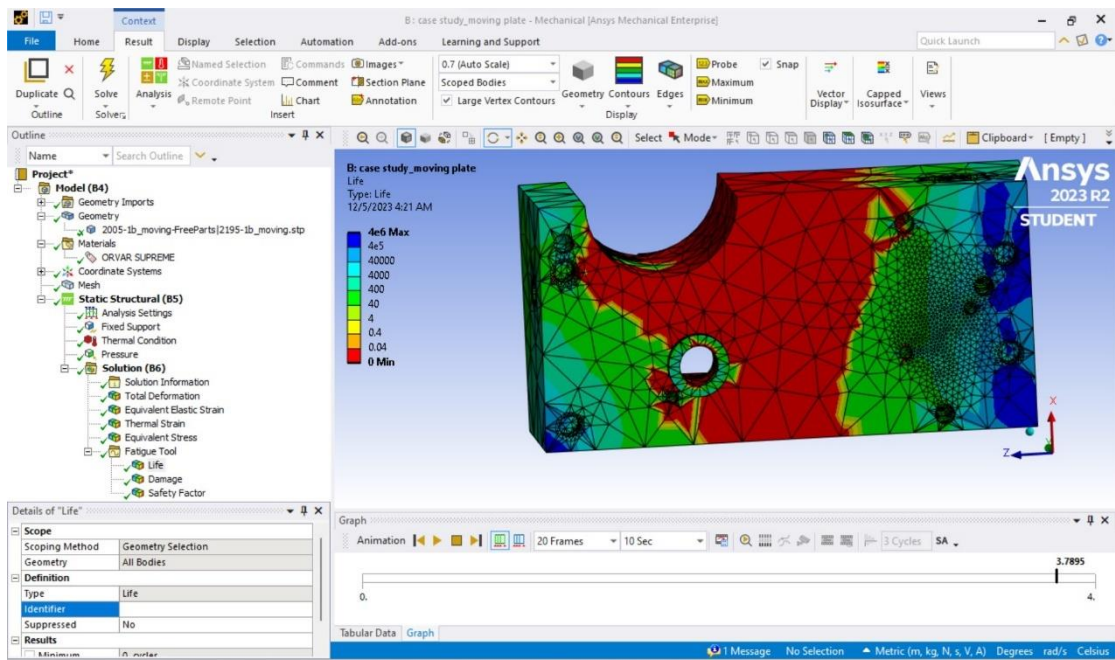
Εικόνα 46. Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης επίλυσης για το κινητό μέρος του καλουπιού

**ΒΗΜΑ 15°:** στο δέντρο εργασιών, για το πεδίο fatigue tool προσθέτω επίσης, τα ακόλουθα:

- life
- damage
- safety factor, όπου για  $k_f=0,75$  με display time 2,5sec και cycle equals to 4sec

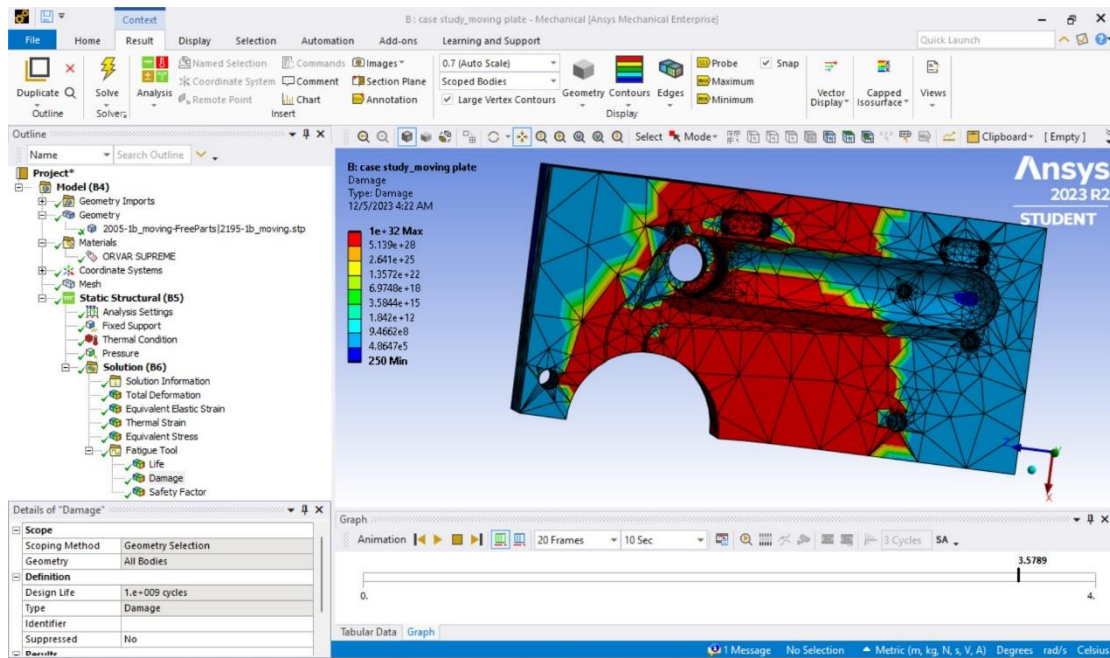


Εικόνα 47. Σχηματική απεικόνιση, της ανάπτυξης του εργαλείου καταπόνησης σε κρίσιμα στάδια μέσω γραφημάτων, με γνώμονα τη μέση πίεση για το κινητό μέρος

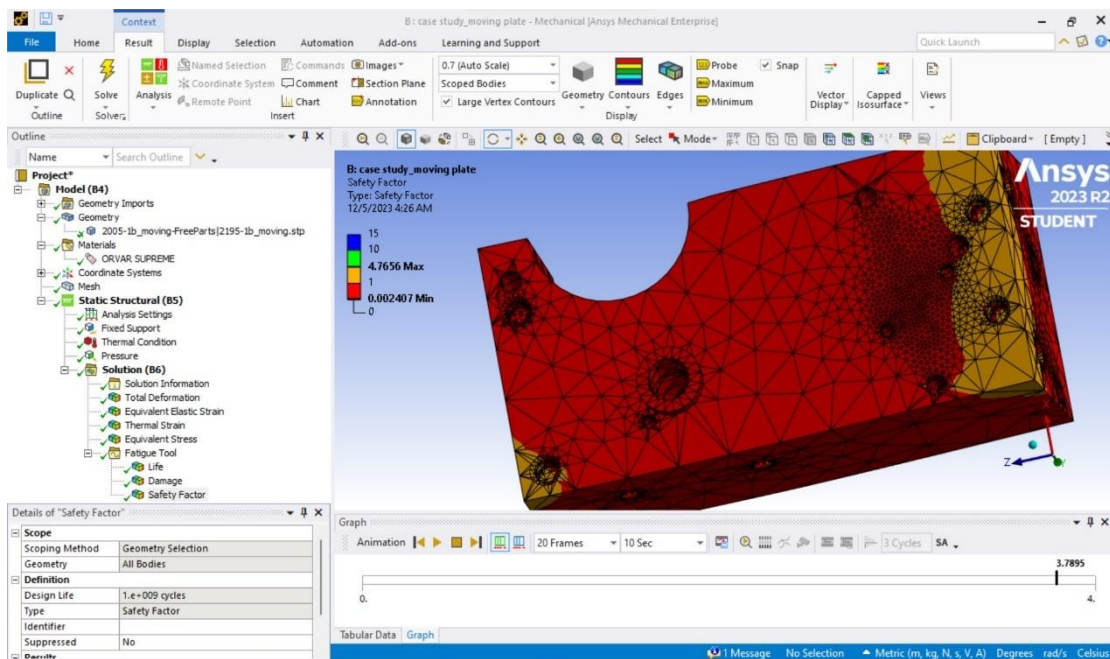


Εικόνα 48. Σχηματική απεικόνιση, των περιοχών στην επιφάνεια που παρουσιάζουν τη μικρότερη διάρκεια ζωής, λόγω των φορτίσεων



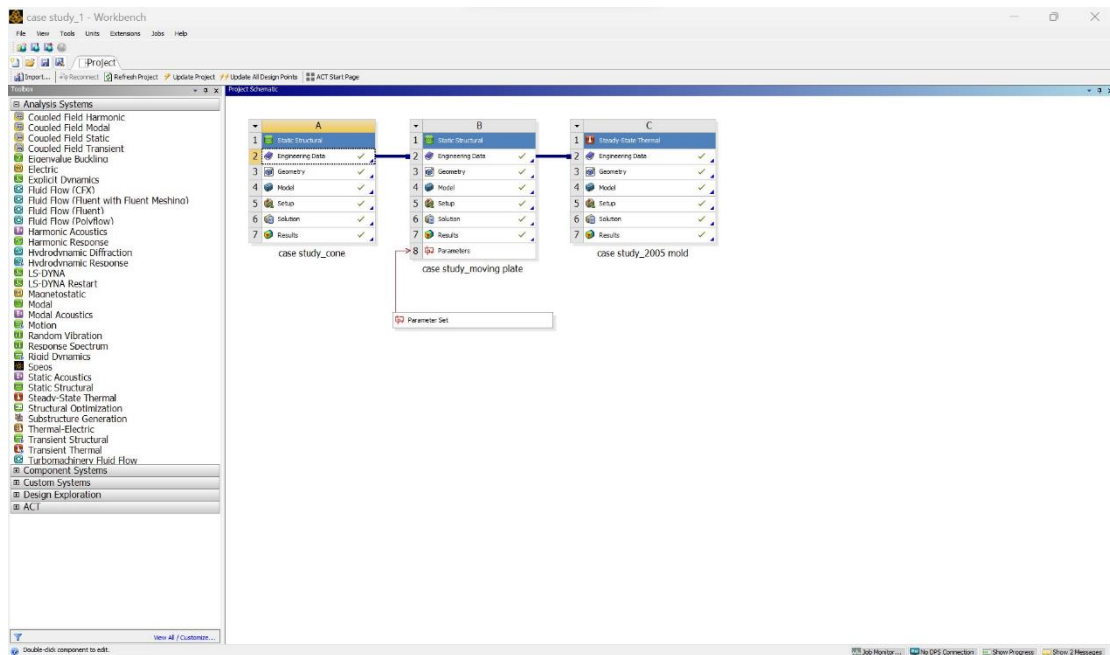


Εικόνα 49. Σχηματική απεικόνιση, των περιοχών στην επιφάνεια του κινητού μέρους όπου έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης φθοράς, σε βάθος χρόνου και εφόσον το καλούπι έχει λειτουργήσει σε περισσότερους κύκλους, από την αρχική σχεδίαση



Εικόνα 50. Σχηματική απεικόνιση, του συντελεστή ασφαλείας αναφορικά με το κινητό μέρος για κύκλους λειτουργίας, περισσότερους από την αρχική σχεδίαση

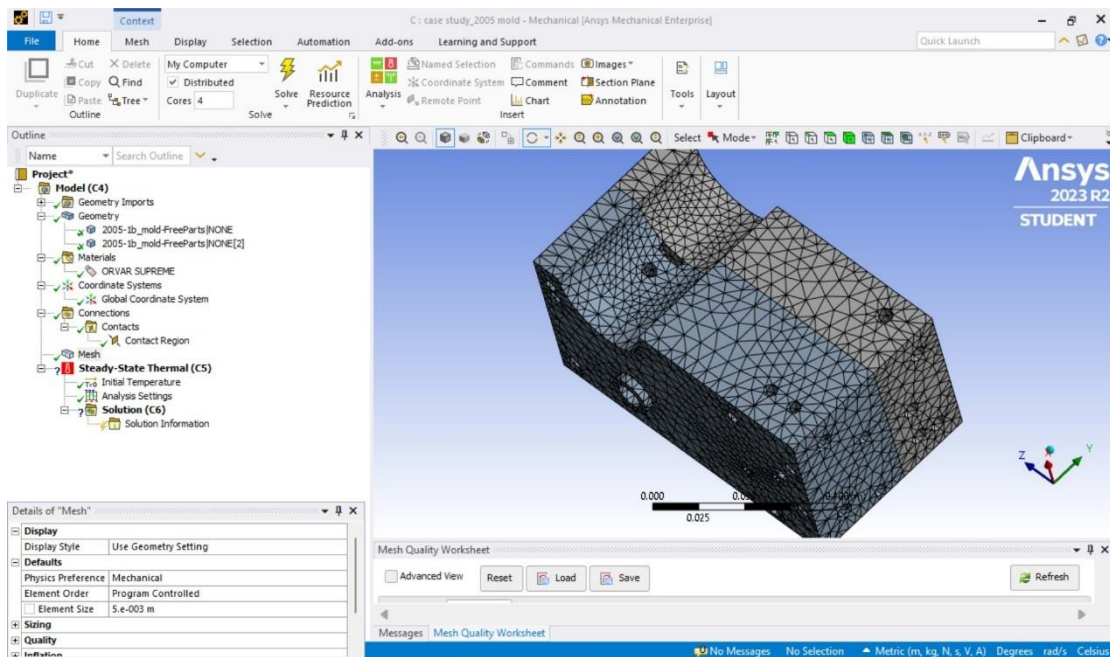
**ΒΗΜΑ 16°:** στο project schematic του ANSYS Workbench, εισάγω το steady – state thermal όπου συνδέω ξανά, τα δεδομένα για το πεδίο engineering data και στη συνέχεια εισάγω τη γεωμετρία του καλουπιού 2005-1b\_mold.stp, μέσω του πεδίου model.



Εικόνα 51. Σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης των πεδίων και της συσχέτισης μοντέλου μετά και την επίλυση θερμικής ανάλυσης

**ΒΗΜΑ 17<sup>ο</sup>:** στο πεδίο mechanical, για να κάνω την πλεγματοποίηση από την εντολή mesh στο παράθυρο διαλόγου, επιλέγω:

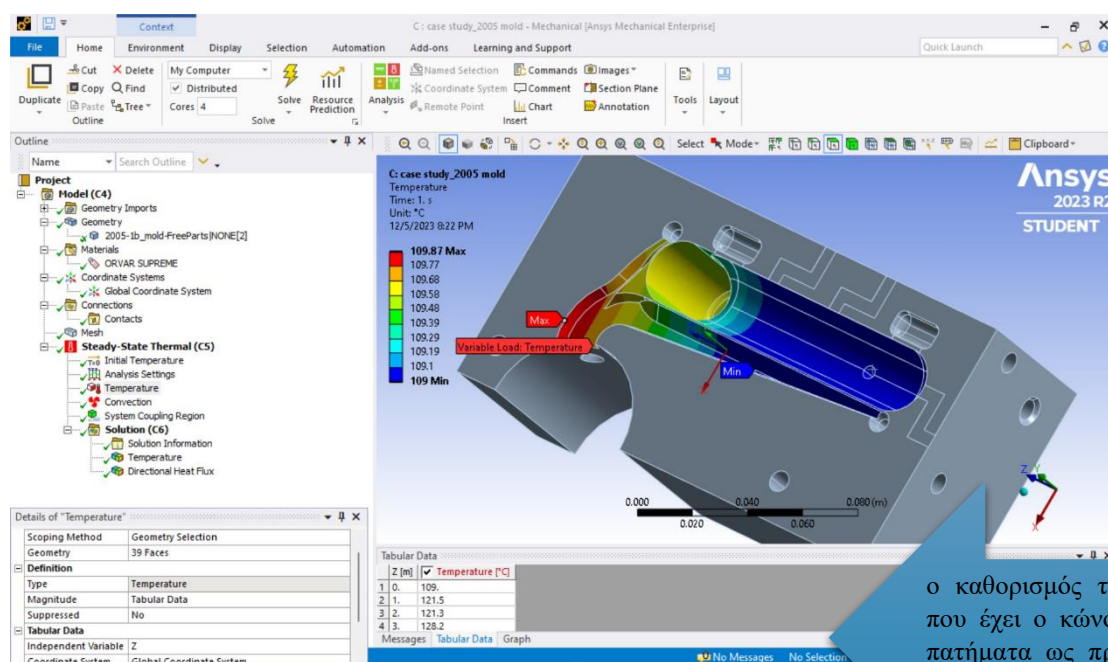
- physics preference: CFD
- solver preference: fluent
- element: order: quadratic
- smoothing: high και generate



Εικόνα 52. Πλεγματοποίηση του 3D μοντέλου για το καλούπι στο σύνολο του (κινητό και σταθερό μέρος, όπου στην επιφάνεια διεπαφής εισέρχεται το ρευστό)

**ΒΗΜΑ 18°:** στο δέντρο εργασιών για το πεδίο steady – state thermal (C5), προσθέτω τα ακόλουθα πεδία:

- temperature, όπου στο παράθυρο διαλόγου επιλέγω την επιφάνεια του κινητού μέρους του καλουπιού, καταχωρώντας ως magnitude: tabular data με τις τιμές θερμοκρασίας κοιλότητας, για 10 συνεχόμενα πατήματα της παραγωγής του αντικειμένου (*χειρολαβή 2005 – I*) και independent variable: Z ώστε να έχουμε τις περιοχές με τη min & max θερμοκρασία με initial temperature 109°C.

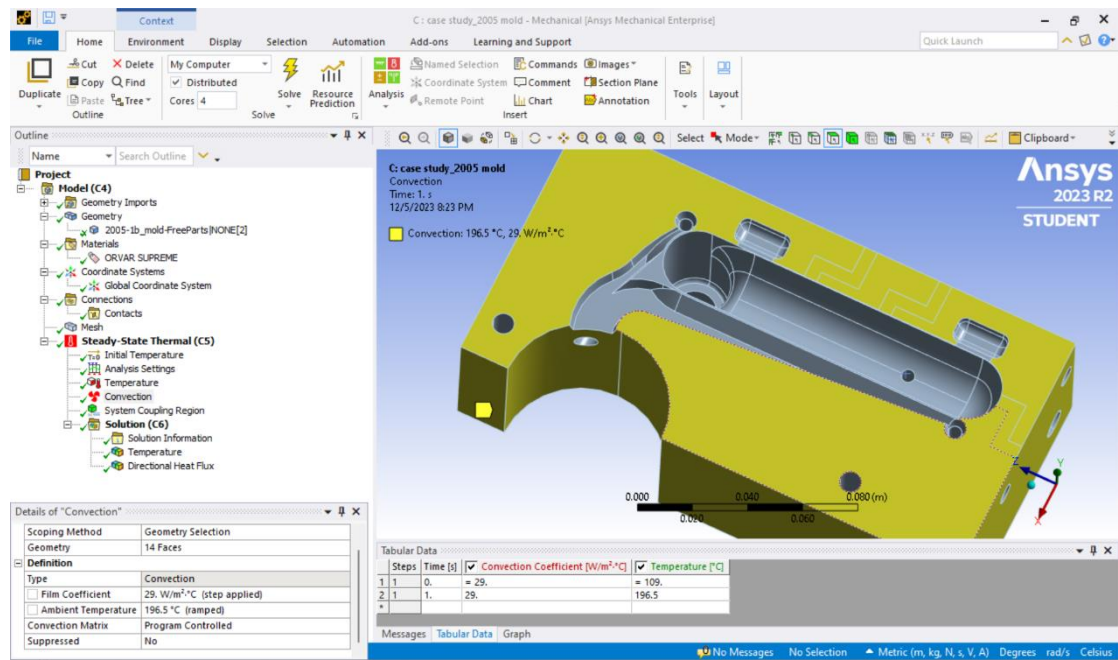


ο καθορισμός των θερμοκρασιών που έχει ο κώνος σε 5 διαδοχικά πατήματα ως προς τις επιφάνειες που έρχεται σε επαφή

Εικόνα 53. Σχηματική απεικόνιση του ορισμού θερμοκρασιών

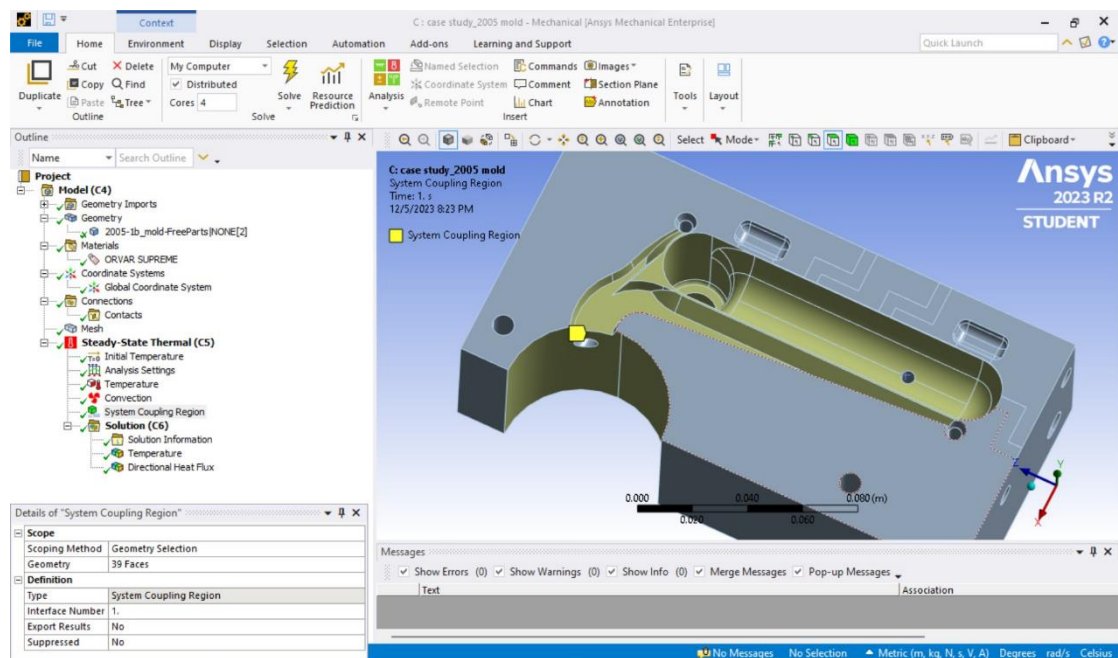
- convection, όπου ορίζω το θερμικό φορτίο μέσω των επιφανειακών περιοχών του κινητού μέρους του καλουπιού, το οποίο λαμβάνεται ως μέρος του συστήματος με το σταθερό μέρος σε συνάρτηση, της κίνησης του ρευστού μετάλλου (*συναγωγή θερμότητα*), μέσω της επιφάνειας διεπαφής του καλουπιού, στο σύνολο του.





Εικόνα 54. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού περιοχών στην επιφάνεια του κινητού μέρους, όπου ασκείται το θερμικό φορτίο κατά τη διαδικασία της χύτευσης

- system coupling region, καθορίζοντας το σύστημα καλούπι / ρευστό ως μια οντότητα στην οποία, μεταφέρεται το θερμικό φορτίο για την επίλυση, όπου στο πεδίο film coefficient καταχωρώ  $29 \text{ W/m}^2$  και αφορά τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού ORVAR SUPREME.

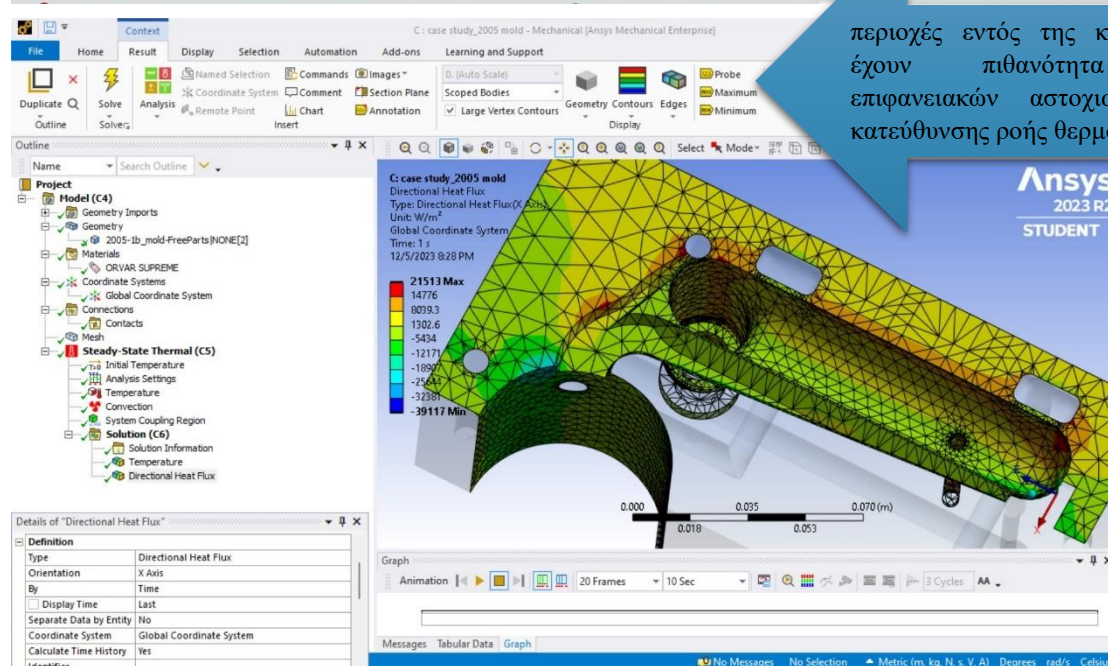
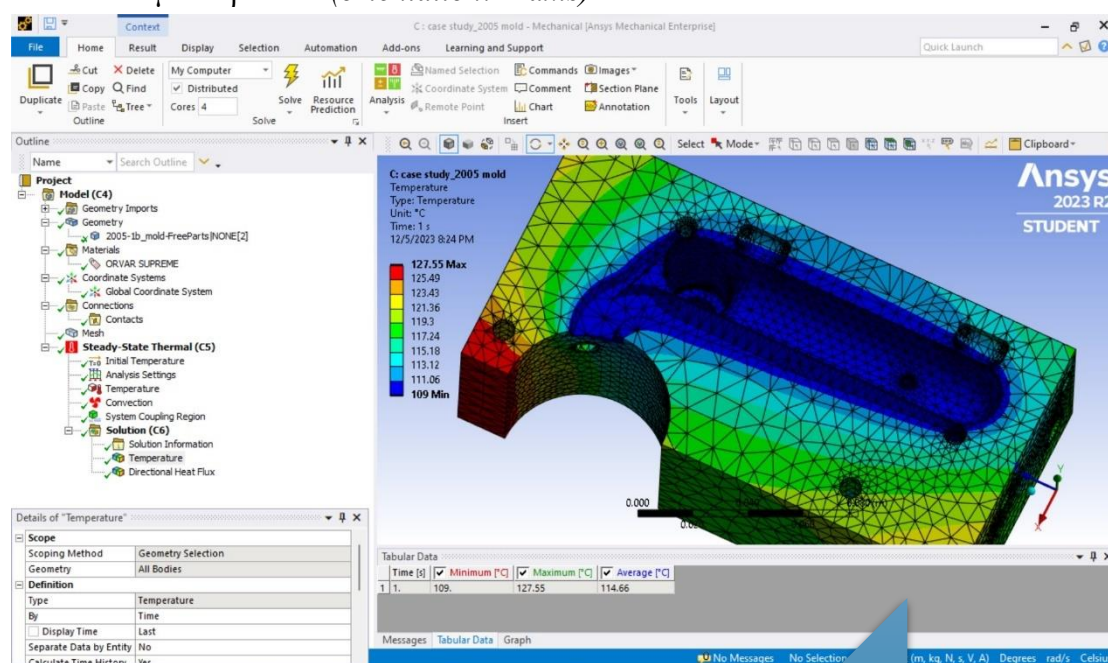


Εικόνα 55. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού συστήματος καλούπι – ρευστό όπου ασκείται το θερμικό φορτίο



**ΒΗΜΑ 19º:** στο δέντρο εργασιών για το πεδίο solution (C6), προσθέτω τα ακόλουθα πεδία:

- temperature καταχωρώντας την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, ως  $109^{\circ}\text{C}$  &  $127,55^{\circ}\text{C}$  όπου υπολογίζεται και μέση θερμοκρασία στους  $114,66^{\circ}\text{C}$
- directional heat flux, όπου προσδιορίζεται η κατεύθυνση ροής θερμότητας μέσω των επιφανειών του καλουπιού, στις περιοχές που έρχονται σε επαφή με το ρευστό (*orientation: X axis*) και solve.

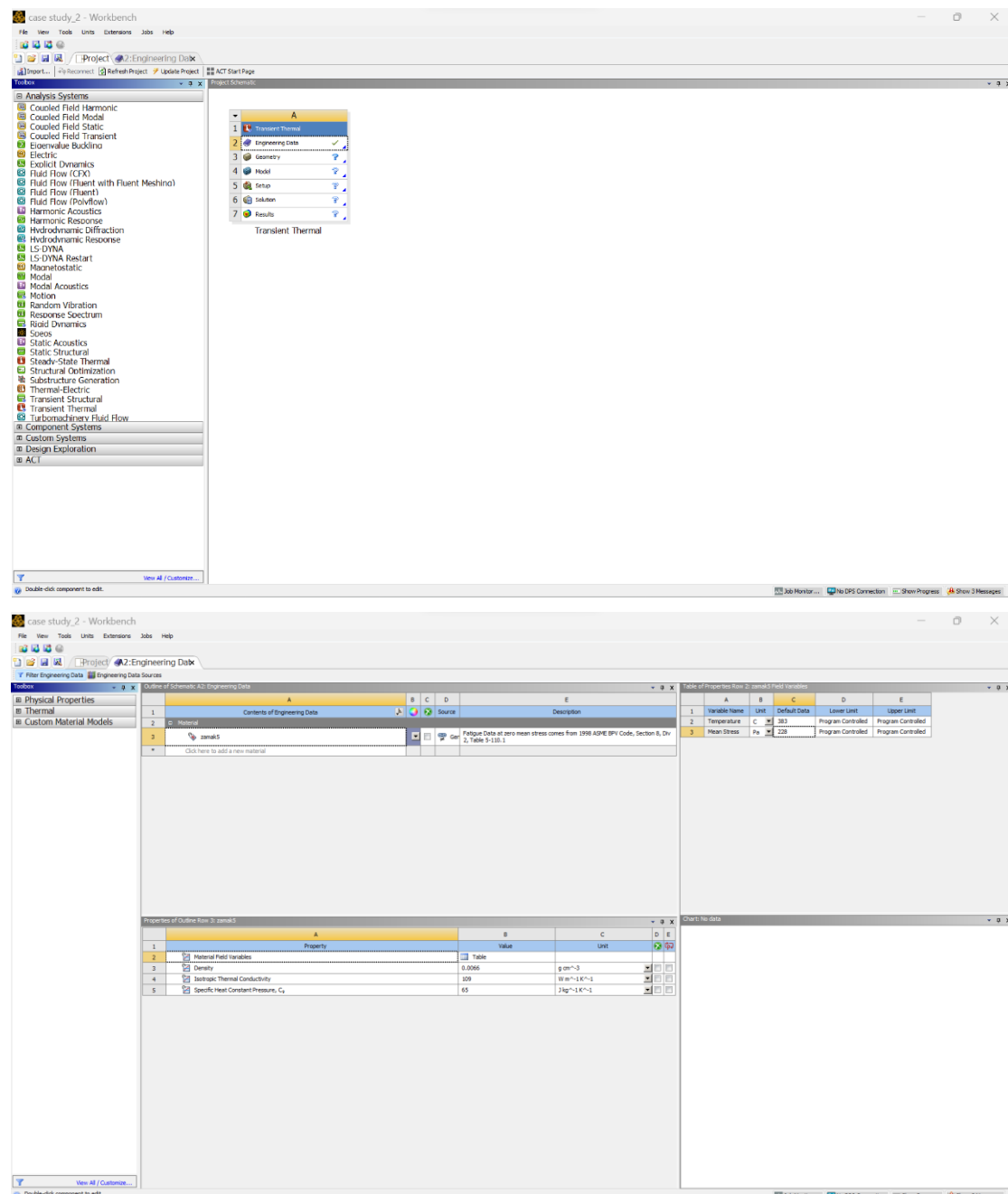


Εικόνες 56 & 57. Σχηματική απεικόνιση των πεδίων επίλυσης για το σύστημα

#### 4.2.1 Εισαγωγή γεωμετρίας καλουπιού και πλεγματοποίηση (Geometry & Mesh)

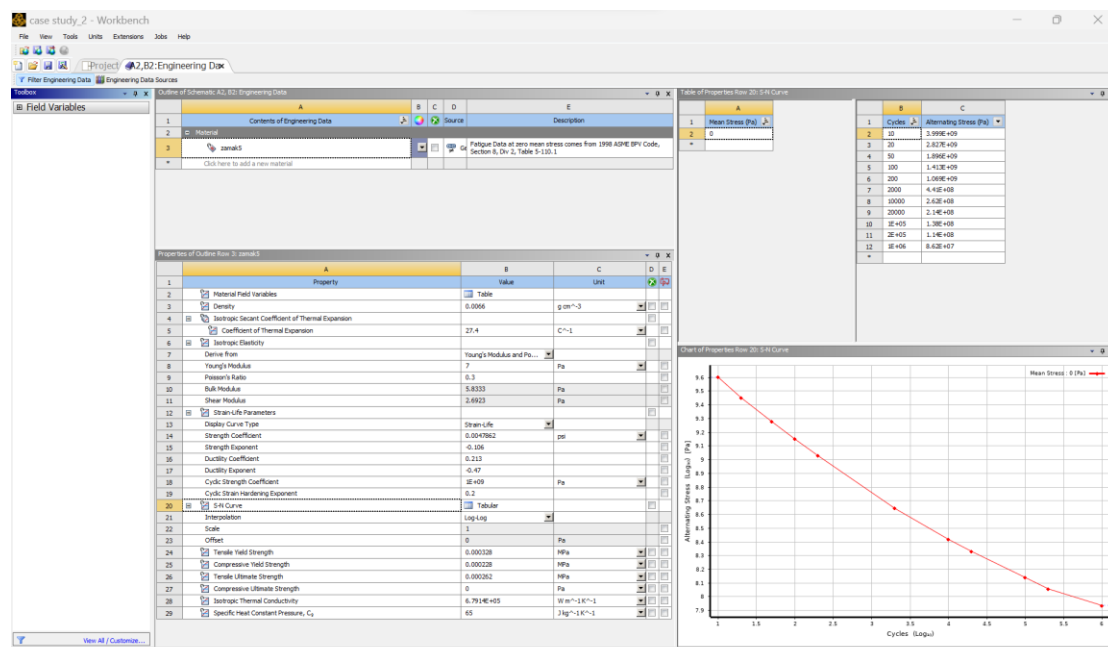
##### Μοντέλο Transient Structural και Transient Thermal

**ΒΗΜΑ 1<sup>ο</sup>:** σε περιβάλλον Workbench ANSYS, προχωρώ με την καταχώρηση των δεδομένων για τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, της πρώτης ύλης zamak5 στο πεδίο engineering data, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες και εφόσον, έχουμε εισάγει στο project schematic το transient thermal.



Εικόνες 58 & 59. Σχηματική απεικόνιση των πρώτων βημάτων για την ανάπτυξη του μοντέλου thermal transient με τη συσχέτιση του υλικού για τη χύτευση

**ΒΗΜΑ 2º:** εισαγωγή του 3D αντικειμένου, όπου είναι το καλούπι χυτής χειρολαβής 2005-1 (κινητό και σταθερό μέρος), στο οποίο θα αναπτύξω το μοντέλο θερμικής ανάλυσης με την επενέργεια της πρώτης ύλης zamak5, για τη διαδικασία χύτευσης εν θερμώ (αρχείο 2005-1b\_mold.stp) και αποθηκεύω ως case study\_2.

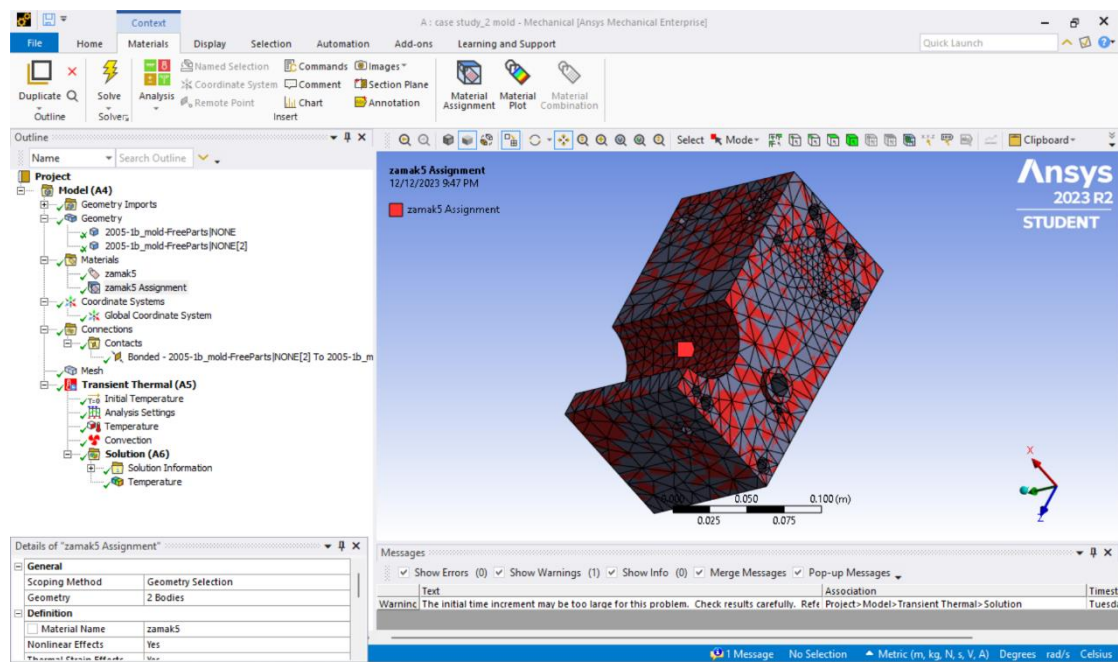


Εικόνα 60. Καταχώρηση των χρήσιμων στοιχείων για την πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο θερμικής ανάλυσης

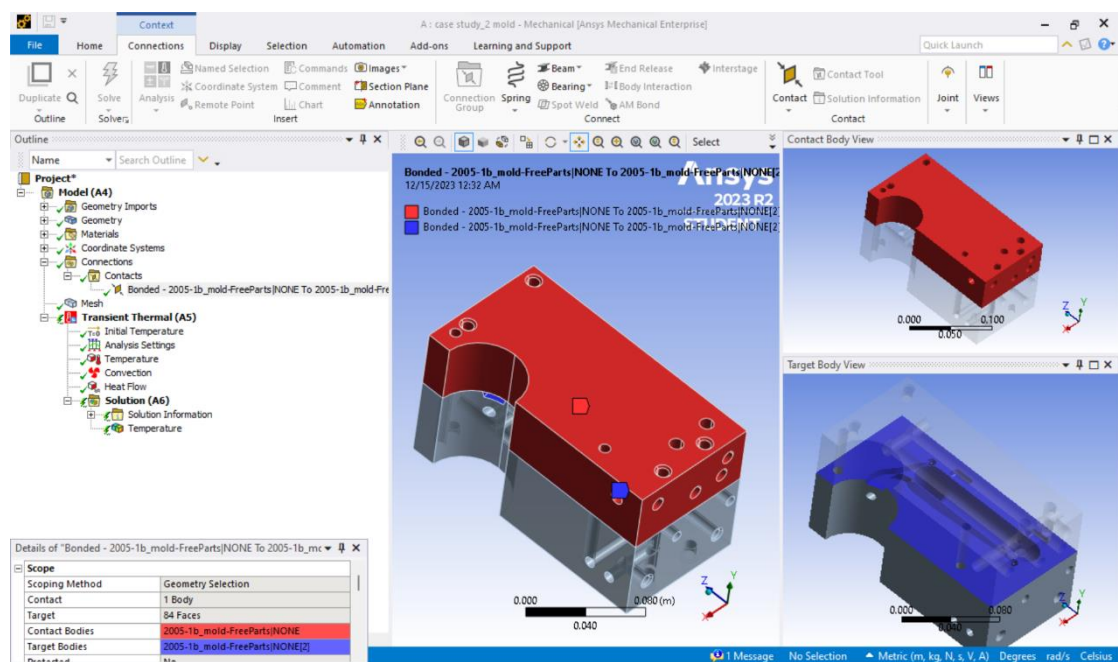
**ΒΗΜΑ 3º:** από το πεδίο model, με διπλό κλικ εισάγομαι σε περιβάλλον mechanical όπου και βλέπω τα 2 μέρη του καλουπιού, από το δέντρο εργασιών (κινητό και σταθερό) καθώς επίσης και την πρώτη ύλη, η οποία διέρχεται σε αυτό κατά τη χύτευση και στη συνέχεια με εντολή materials – insert επιλέγοντας material assignment, για τη γεωμετρία του αντικειμένου.

**ΒΗΜΑ 4º:** από το δέντρο εργασιών στο πεδίο contacts, με εντολή manual contact region καθορίζω την επιφάνεια διεπαφής των 2 μερών του καλουπιού, όπου στο παράθυρο διαλόγου, για τα ακόλουθα πεδία καταχωρώ:

- definition / type: bonded και scope mode: manual
- scope / contact: 1 body (για το σταθερό μέρος) και target: 84 faces (για τις επιφάνειες του κινητού μέρους που έρχονται σε επαφή, με την πρώτη ύλη σε υγρή μορφή)



Εικόνα 61. Συσχέτιση της πρώτης ύλης στη δομή του καλουπιού



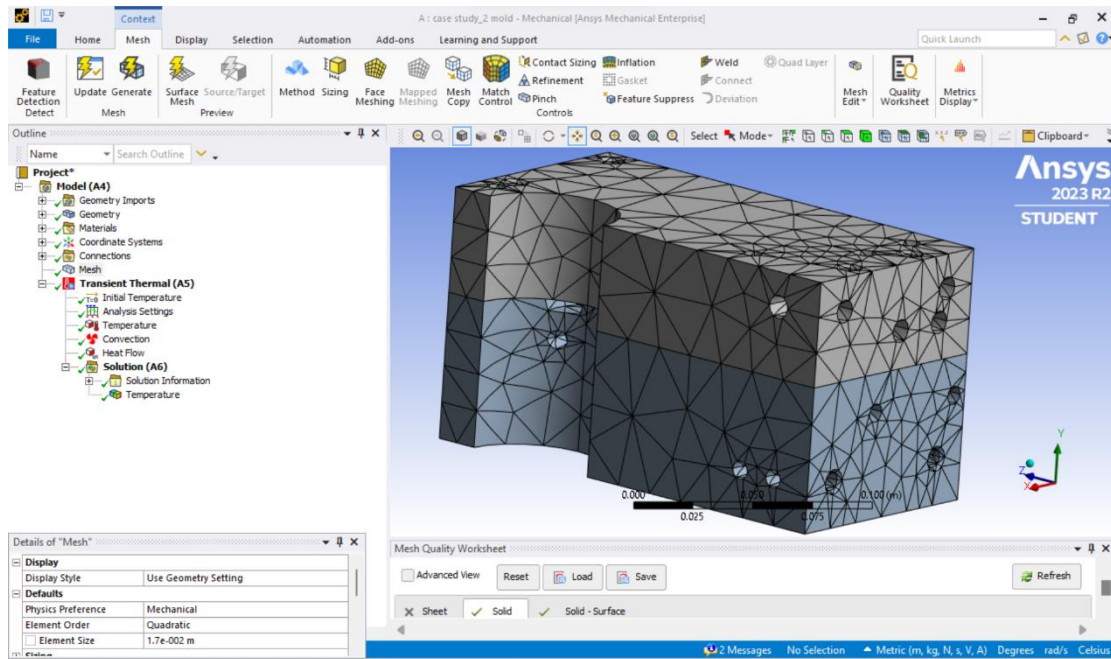
Εικόνα 62. Σχηματική απεικόνιση του συσχετισμού μερών του καλουπιού ως προς την πρώτη ύλη και την επιφάνεια διεπαφής στο κινητό μέρος του καλουπιού

**ΒΗΜΑ 5ο:** για την πλεγματοποίηση, από το παράθυρο διαλόγου καταχωρώ στα παρακάτω πεδία:

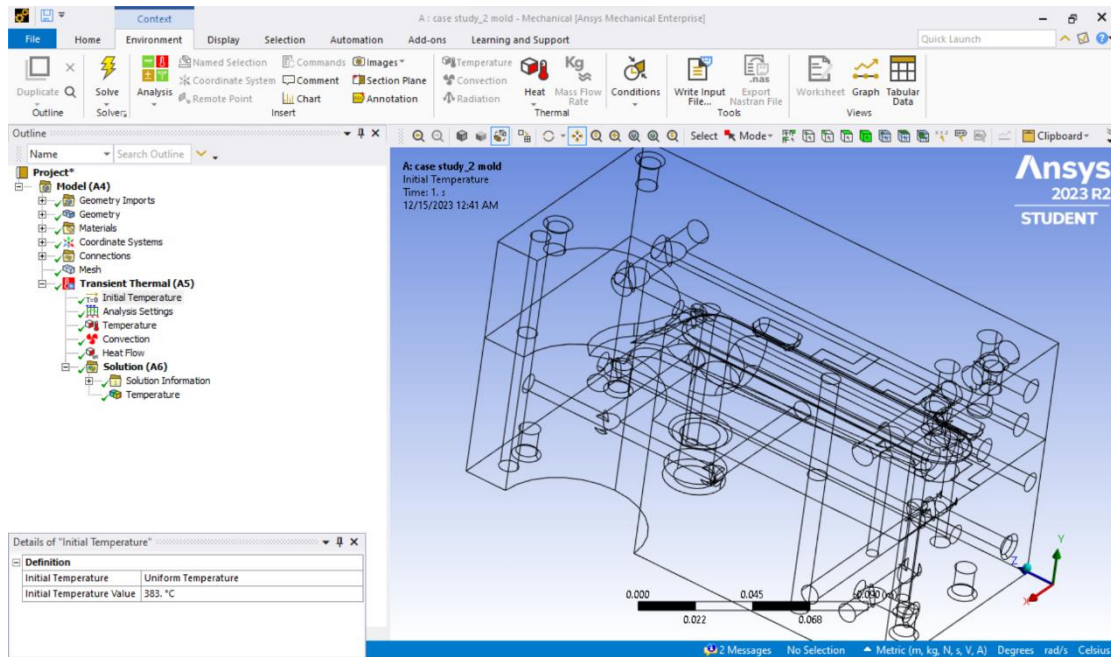
- display / display style: use geometry settings
- defaults / physics preference: mechanical
- element order: quadratic



- element size: 0,017
- quality / smoothing: high και generate



Εικόνα 63. Σχηματική απεικόνιση του πλέγματος για το 3D αντικείμενο του καλουπιού **ΒΗΜΑ 6<sup>ο</sup>**: από το δέντρο εργασιών, στο πεδίο initial temperature του Transient Thermal (A5), καταχωρώ ως δεδομένο τη θερμοκρασία τήξης του zamak5 383°C, όπου στην ουσία το κράμα μετάλλου είναι ρευστό.

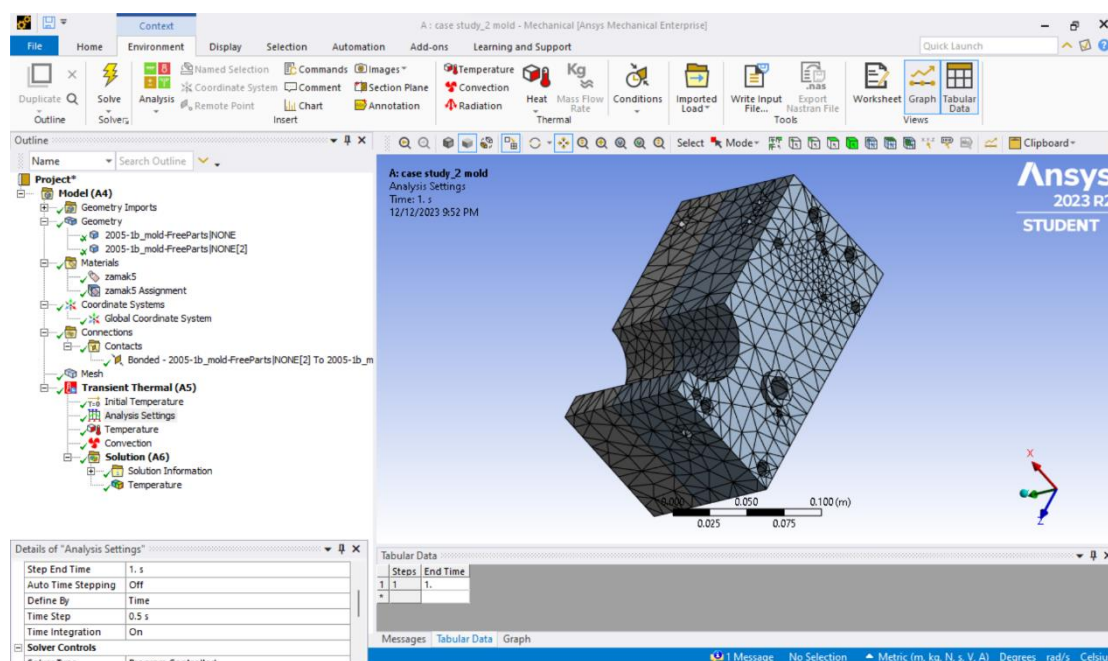


Εικόνα 64. Καθορισμός της αρχικής θερμοκρασίας zamak5 στην υγρή μορφή του που εισέρχεται στο καλούπι

#### 4.2.2 Συσχέτιση υλικού κατασκευής καλουπιού και παραμέτρων χύτευσης για τη θερμική ανάλυση (*Transient Thermal*)

**ΒΗΜΑ 7ο:** από το δέντρο εργασιών, στο πεδίο analysis setting καταχωρώ τα παρακάτω στοιχεία:

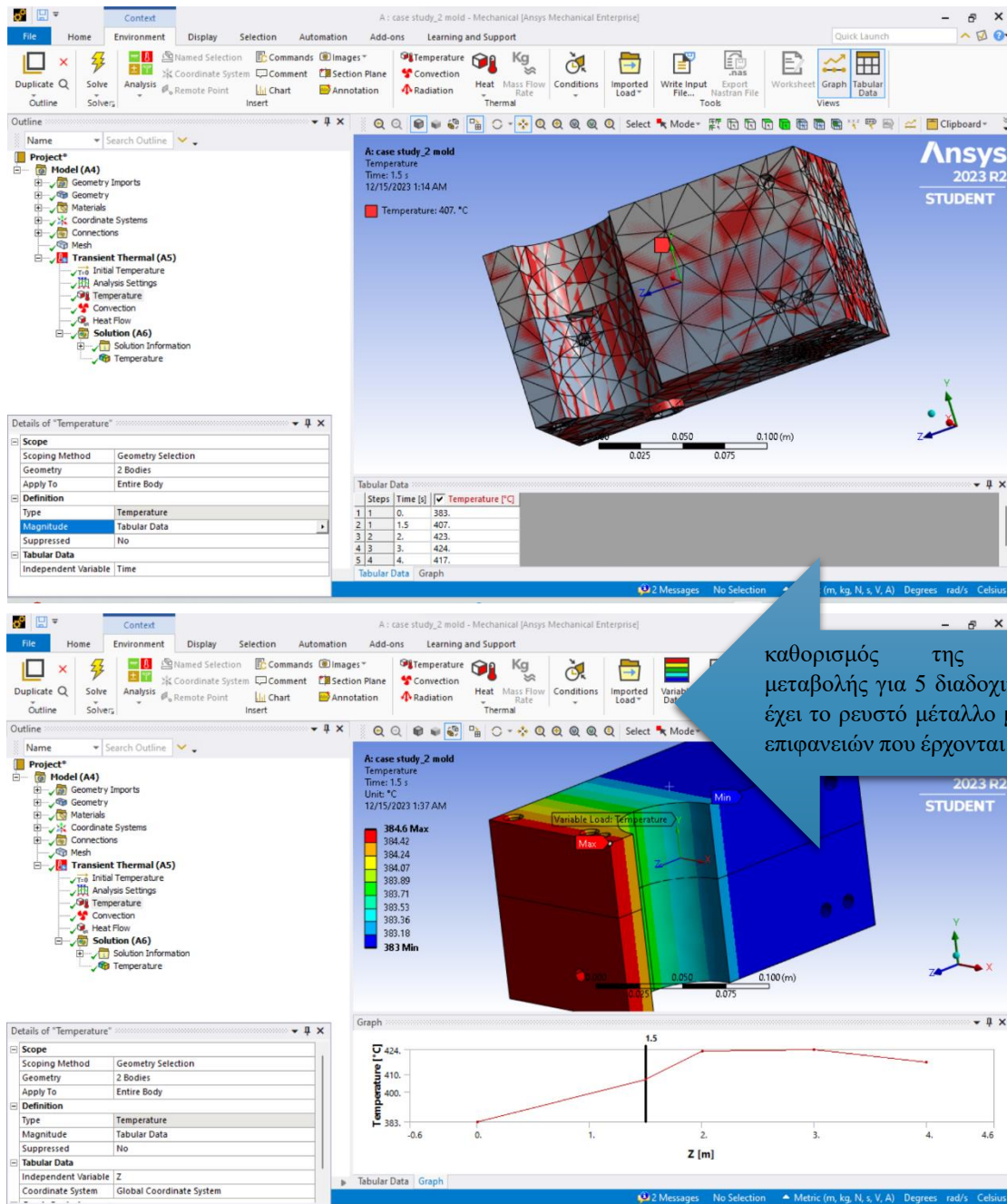
- step controls / number of steps: 4 (χρόνος επανεκκίνησης διαδικασίας χύτευσης)
- current step: 1 (επιστροφή εξωλκεία)
- step end time: 1,5sec (παραμονή σφυριού)
- time step: 0,5 (καθυστέρηση έναρξης εξωλκεία)
- output controls / contact miscellaneous: yes



Εικόνα 65. Καθορισμός των χρόνων στους οποίους θα γίνει η θερμική ανάλυση και σχετίζονται με τα χρονικά στάδια ενός πλήρους κύκλου χύτευσης

**ΒΗΜΑ 8ο:** από τη γραμμή εργαλείων και το menu environment, εισάγω στο δέντρο εργασιών του Transient Thermal (A5), μέσω του παράθυρου διαλόγου ως ακολούθως:

- scope / geometry: 2 bodies
- apply to: entire body
- definition / type: temperature
- magnitude: tabular data όπου και καταχωρώ τις τιμές θερμοκρασίες για το ρευστό zamak5, σε 5 διαδοχικά πατήματα
- tabular data / independent variable: Z (κατεύθυνση ρευστού μέσα στο καλούπι)

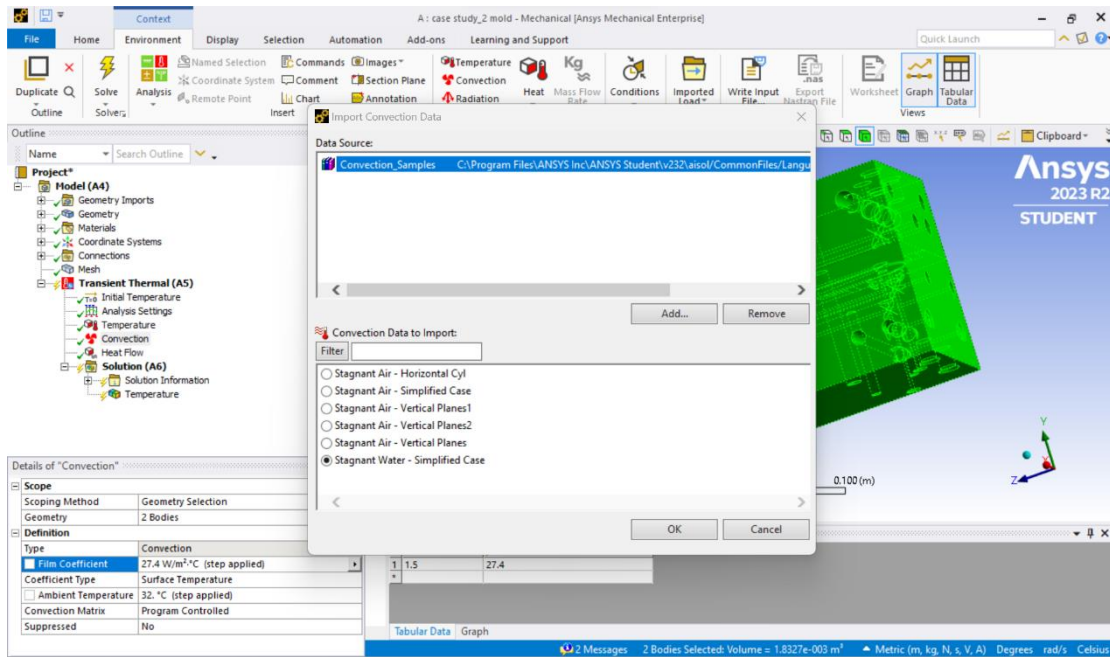


Εικόνες 66 & 67. Προσθήκη του πεδίου temperature στο μοντέλο θερμικής ανάλυσης και καθορισμός της κατεύθυνσης ροής του ρευστού μέσα στο καλούπι, καθώς και των θερμοκρασιών του για 5 διαδοχικά πατήματα, της χυτόπρεσσας

**ΒΗΜΑ 9<sup>ο</sup>:** εισάγω το πεδίο convection, όπου από το παράθυρο του διαλόγου καταχωρώ τα ακόλουθα στοιχεία:

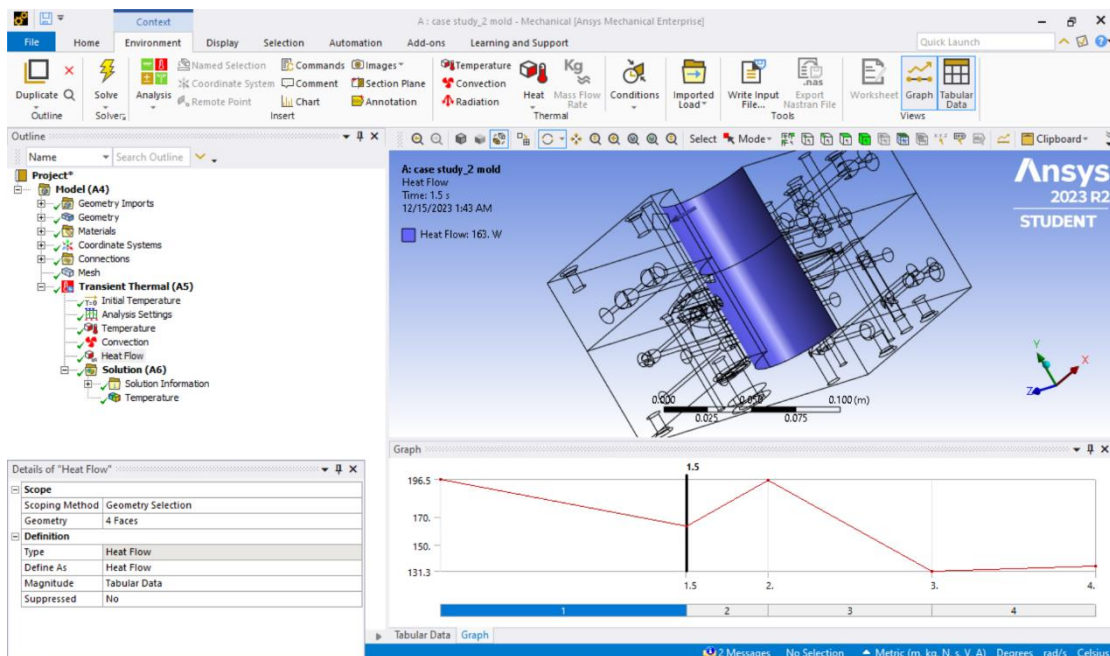
- definition / film coefficient: import convection data
- film coefficient:  $27,4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  (για νερό στους  $25^\circ\text{C}$  ως ψυκτικό μέσο)
- coefficient type: surface temperature
- ambient temperature:  $32^\circ\text{C}$





Εικόνα 68. Συσχετισμός των θερμοκρασιακών ορίων από το ψυκτικό μέσο και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κατά τη διάρκεια της χύτευσης

**ΒΗΜΑ 10<sup>ο</sup>:** εισάγω το πεδίο heat flow, όπου και επιλέγω 4 επιφάνειες οι οποίες εφάπτονται με τον κώνο όπου στην πράξη, έρχονται σε άμεση επαφή με το ρευστό zamak5 καταχωρώντας τις μετρήσεις θερμοκρασίας του εξαρτήματος για 5 συνεχόμενα πατήματα.

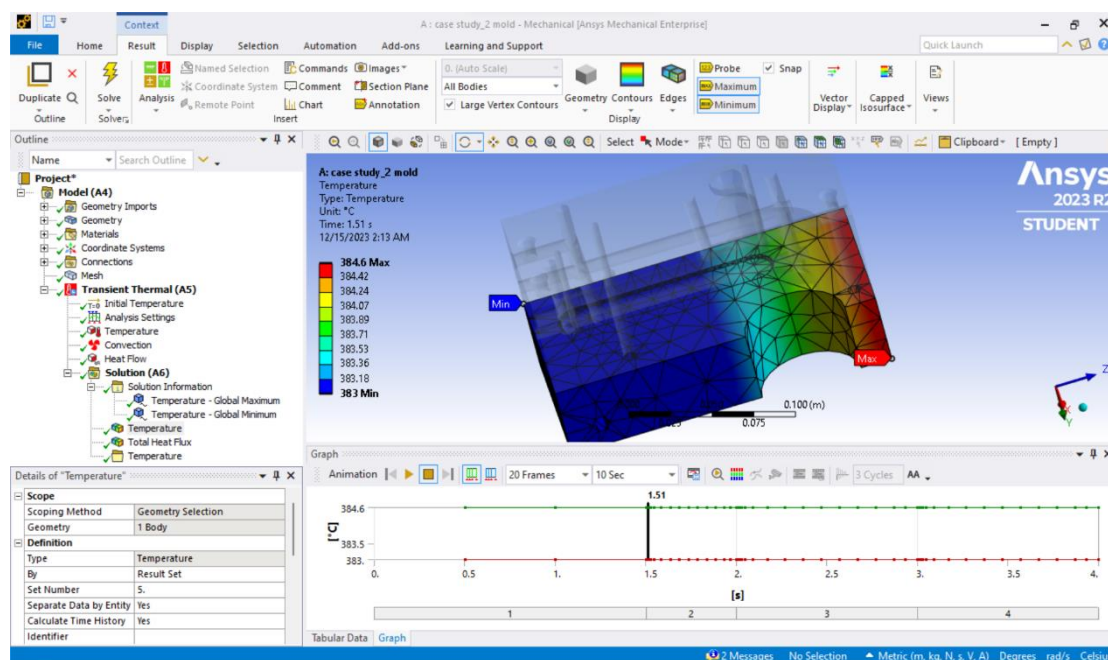


Εικόνα 69. Καθορισμός επιφανειών που συνδέονται με το συνεργαζόμενο εξάρτημα του καλουπιού και επιδρά στη μετάδοση θερμότητας, κατά τη διαδικασία της χύτευσης



**ΒΗΜΑ 11<sup>ο</sup>:** στο δέντρο εργασιών, εισάγω στο Solution (A6) το πεδίο temperature όπου και καταχωρώ τα εξής:

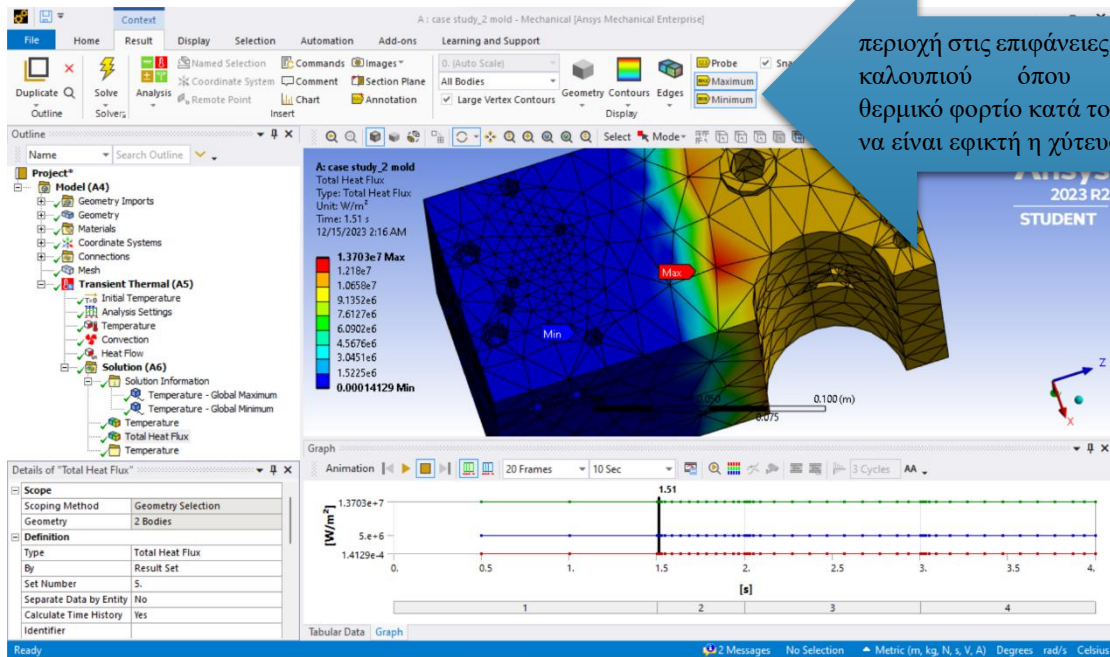
- definition / by: result set
- set number: 5
- scope / geometry: 1 body (συσχετίζω το σταθερό μέρος του καλουπιού το οποίο κατά τη διάρκεια της χύτευσης, μεταβιβάζει πίεση 5,5MPa)
- results: minimum = 383°C / maximum = 384,6°C / average = 383,35°C



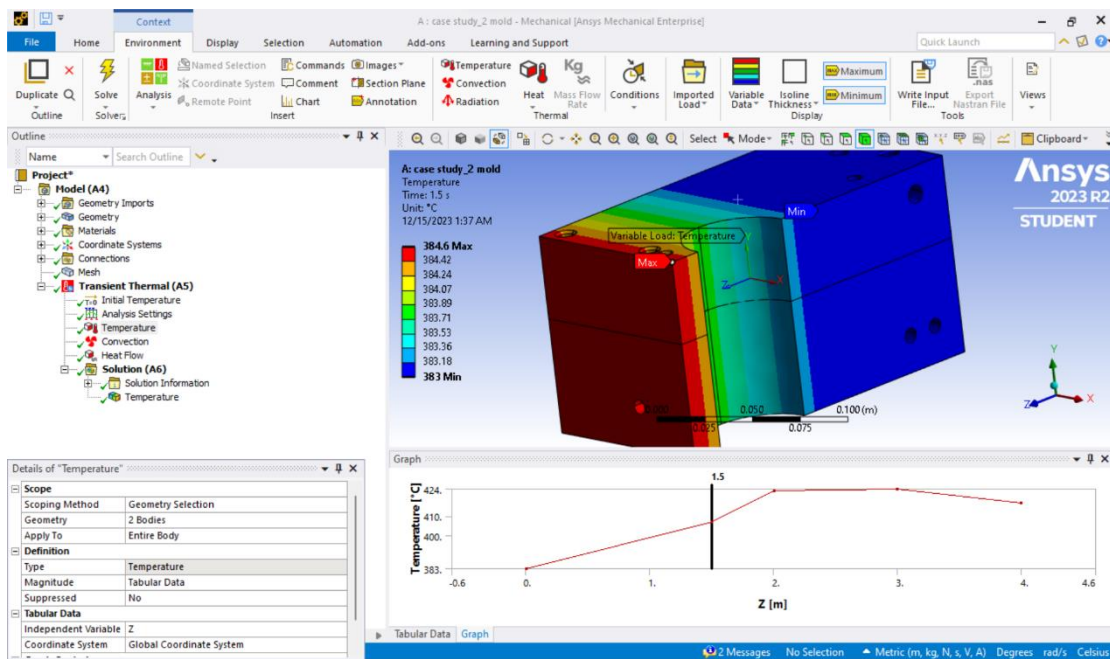
Εικόνα 70. Κατανομή του θερμικού φορτίου στο σταθερό μέρος του καλουπιού βάσει των καταγεγραμμένων τιμών θερμοκρασίας, για 5 συνεχόμενα πατήματα

**ΒΗΜΑ 12<sup>ο</sup>:** στο δέντρο εργασιών, εισάγω στο Solution (A6) το πεδίο total heat flux όπου καταχωρώ τα ακόλουθα:

- scope / geometry: 2 bodies (για σταθερό και κινητό)
- definition / by: result set
- set number: 5
- results / minimum = 1,4129-004W/m<sup>2</sup> / maximum = 1,3703e+007 W/m<sup>2</sup> / average = 4,8316e+006W/m<sup>2</sup>



Εικόνα 71. Κατανομή του θερμικού φορτίου, σε όλο το καλούπι κατά την είσοδο του ρευστού μετάλλου στην κοιλότητα, βάσει των καταγεγραμμένων τιμών θερμοκρασίας, για 5 συνεχόμενα πατήματα

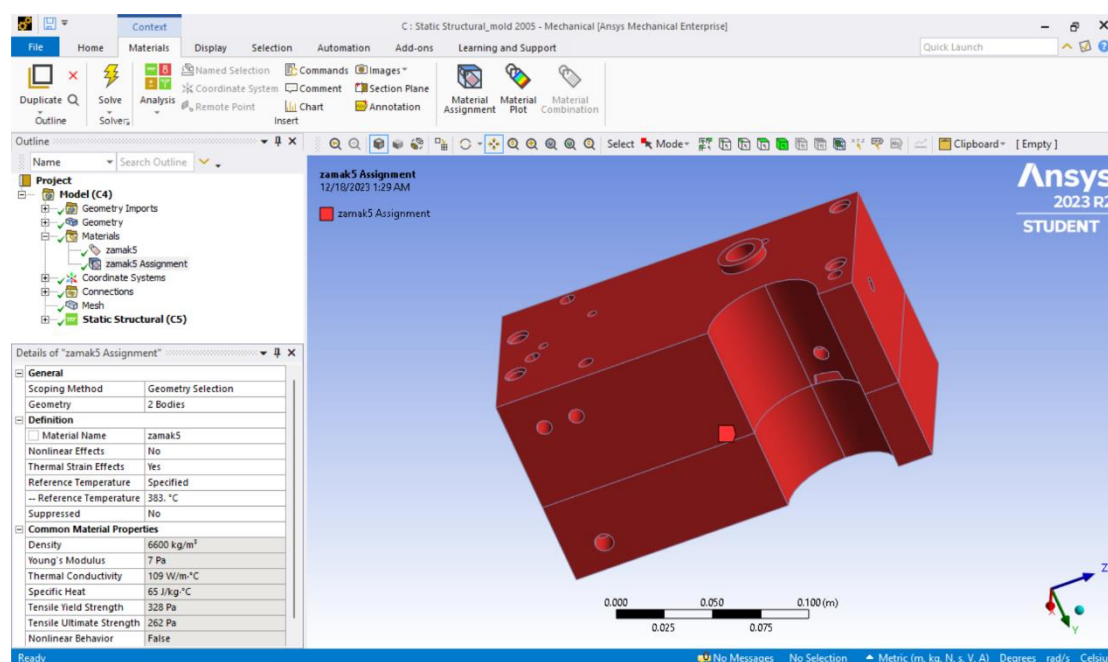


Εικόνα 72. Καθορισμός της θερμοκρασίας του ρευστού μετάλλου εντός του καλουπιού, σε συνδυασμό με την κατεύθυνση του για 5 συνεχόμενα πατήματα

**ΒΗΜΑ 13<sup>ο</sup>:** στο περιβάλλον του Workbench ANSYS, εισάγω το steady – state thermal και static structural, όπου για την ανάπτυξη του μοντέλου και σύνδεση του με το transient thermal, χρησιμοποιώ το δεύτερο αφού το έχω ονομάσει static structural\_mold 2005, καταχωρώντας τα στοιχεία του υλικού zamak5, καθώς επίσης με εντολή import συνδέω τη γεωμετρία του καλουπιού, από το οποίο παράγεται η χυτή χειρολαβή 2005-1.

**ΒΗΜΑ 14<sup>ο</sup>:** με εντολή edit στο πεδίο model, εισάγομαι σε περιβάλλον Mechanical όπου στο δέντρο εργασιών βλέπω τη γεωμετρία του 3D αντικειμένου και την πρώτη ύλη για τη χύτευση, όπου μέσω της εντολής material assignment το συσχετίζω με τη δομή του καλουπιού, δίνοντας ως reference temperature 383°C (σημείο τήξης του zamak5).

**Σημείωση:** οι βασικές ιδιότητες της πρώτης ύλης, έχουν μεταφερθεί από το πεδίο engineering data.

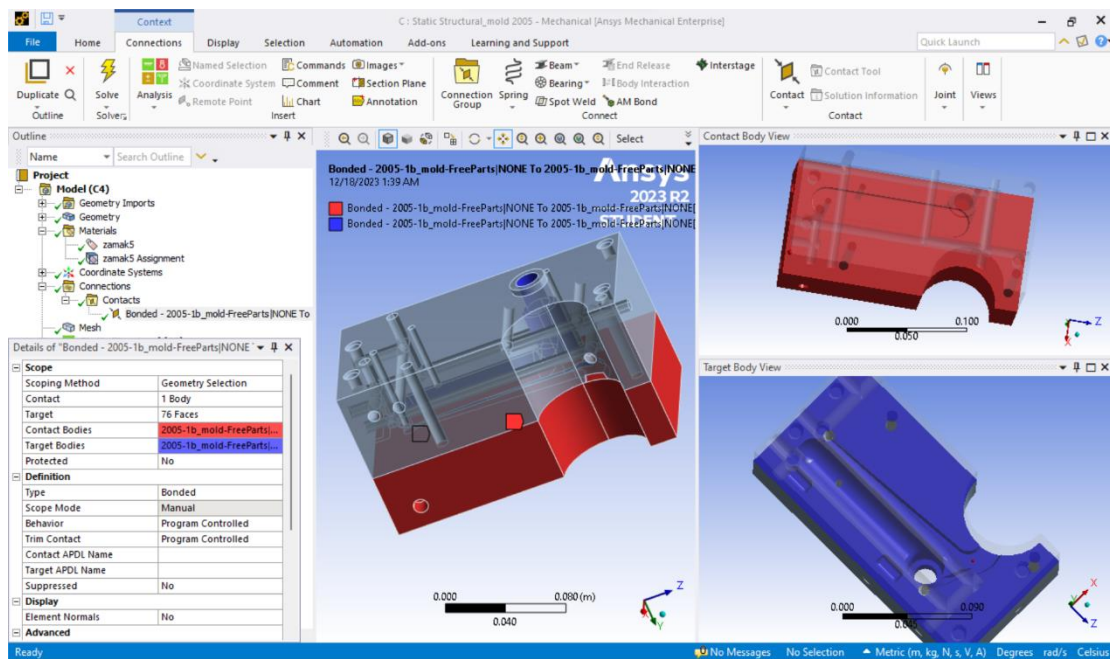


Εικόνα 73. Σχηματική απεικόνιση, της σύνδεσης του υλικού χύτευσης με τη δομή του καλουπιού (σταθερό και κινητό μέρος) στο οποίο εισέρχεται, κατά τη διαδικασία της χύτευσης

**ΒΗΜΑ 15<sup>ο</sup>:** από το δέντρο εργασιών και τα πεδία connections – contacts, καθορίζω τις επιφάνειες διεπαφής των μερών του καλουπιού με το zamak5, όπου:

- contact: 1 body (σταθερό μέρος)
- target: 76 faces (κινητό μέρος)
- scope mode: manual

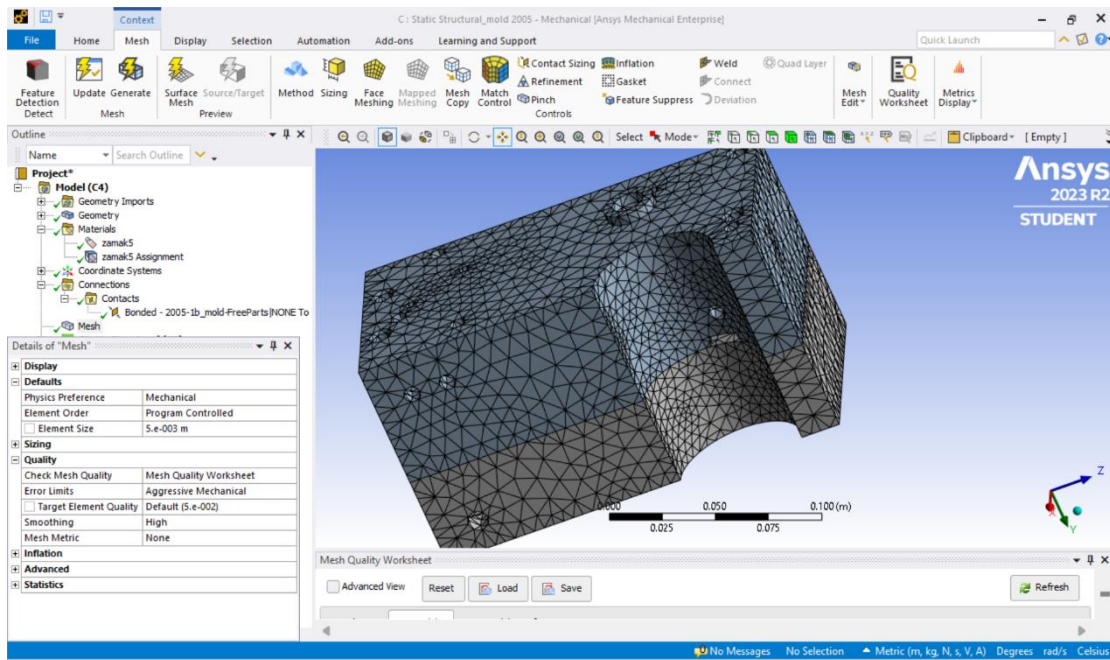




Εικόνα 74. Σχηματική απεικόνιση, του ορισμού των επιφανειών όπου το zamak5 έρχεται σε επαφή με τα μέρη του καλουπιού

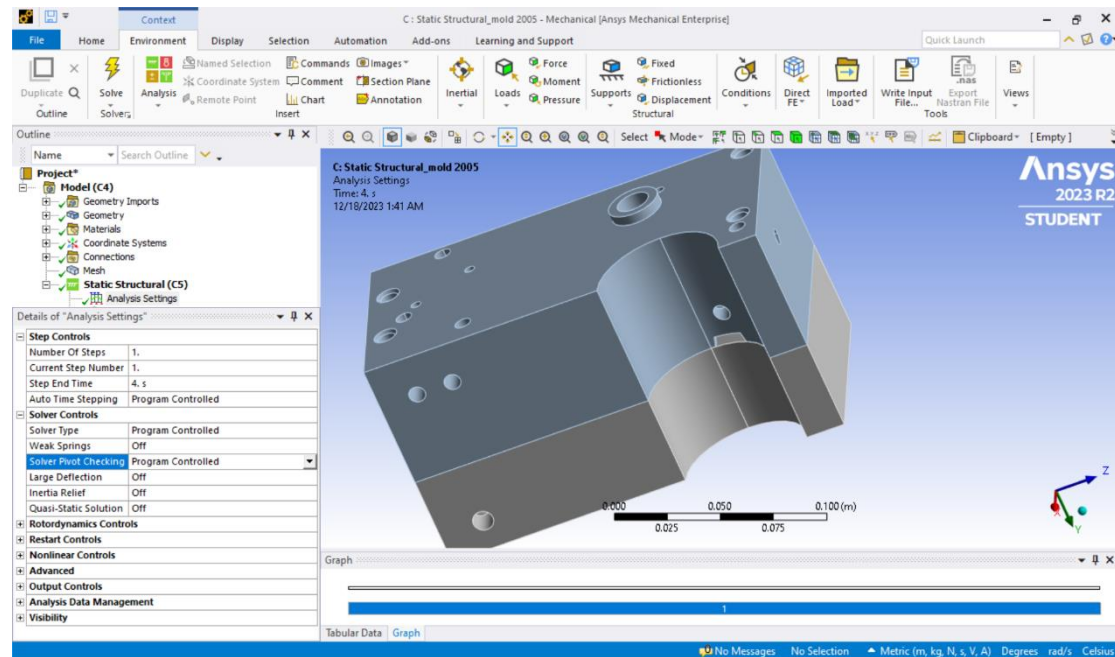
**ΒΗΜΑ 16°:** από το δέντρο εργασιών, στο πεδίο mesh επιλέγω τα ακόλουθα στοιχεία:

- physics preference: mechanical
- element size: 0,005
- smoothing: high



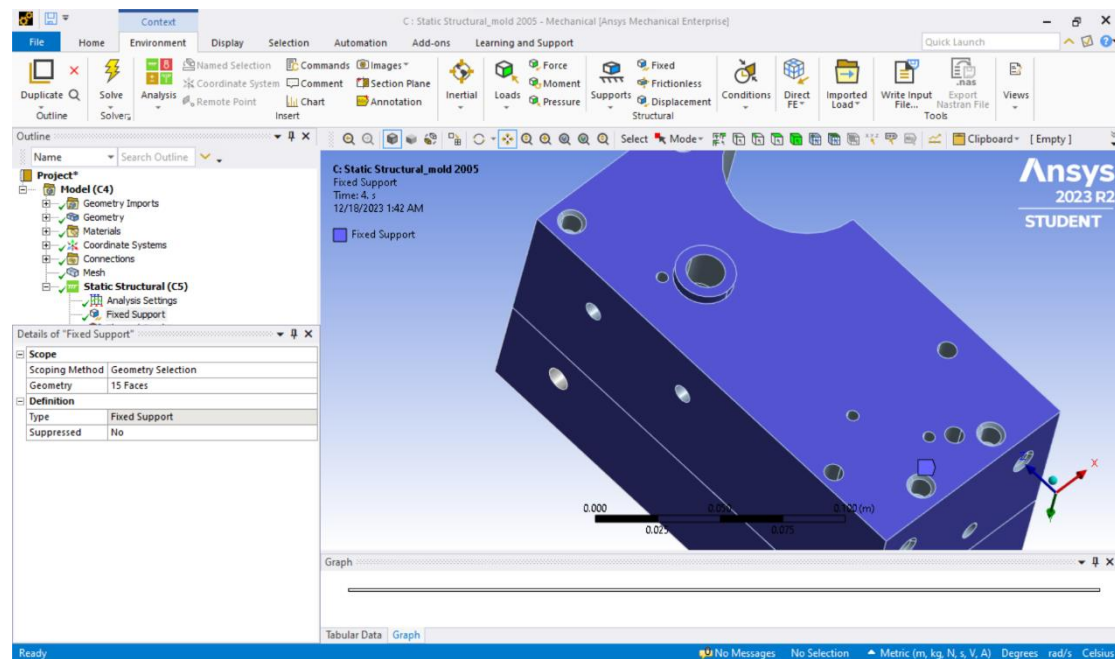
Εικόνα 75. Σχηματική απεικόνιση, της πλεγματοποίησης του 3D αντικειμένου

**ΒΗΜΑ 17°:** στο δέντρο εργασιών από το πεδίο Static Structural (C5), από το analysis settings καταχωρώ στο step end time: 4s (χρόνος επανεκκίνησης).



Εικόνα 76. Σχηματική απεικόνιση, του καθορισμού χρόνου όπου θα γίνει η ανάλυση

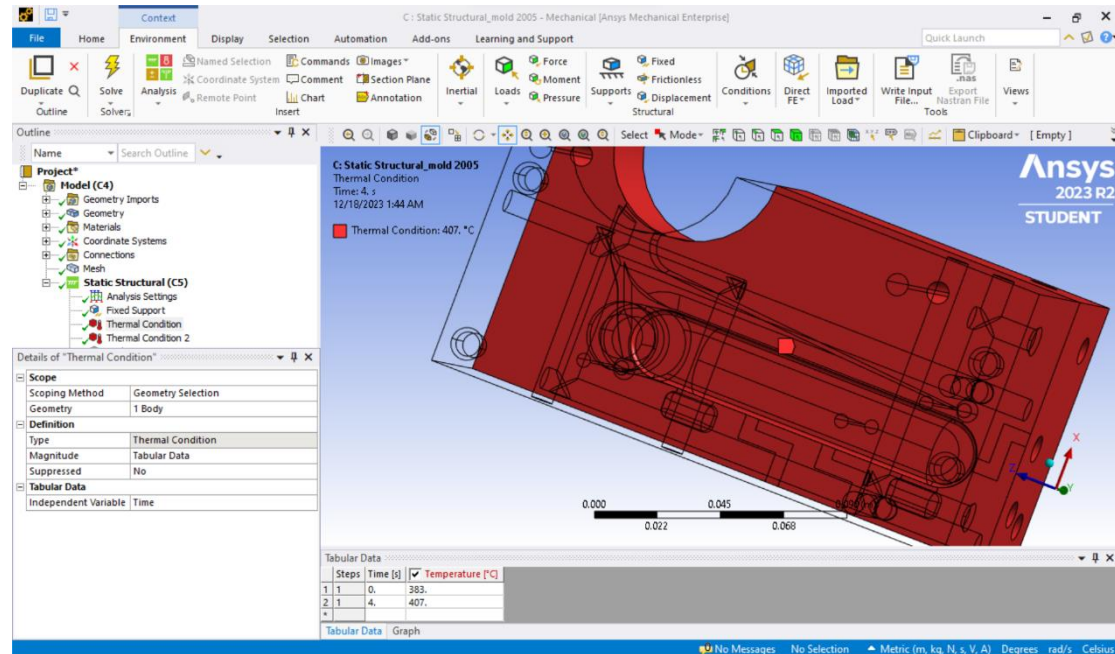
**ΒΗΜΑ 18°:** στο πεδίο Static Structural (C5), με εντολή insert – fixed support μέσω της οποίας καθορίζω τις επιφάνειες οι οποίες παραμένουν σταθερές, κατά τη διάρκεια της χύτευσης διότι, το καλούπι τοποθετείται στο αντίστοιχο σκελετό B2, με geometry: 15 faces.



Εικόνα 77. Σχηματική απεικόνιση, του καθορισμού των επιφανειών που σχετίζονται με fixed support

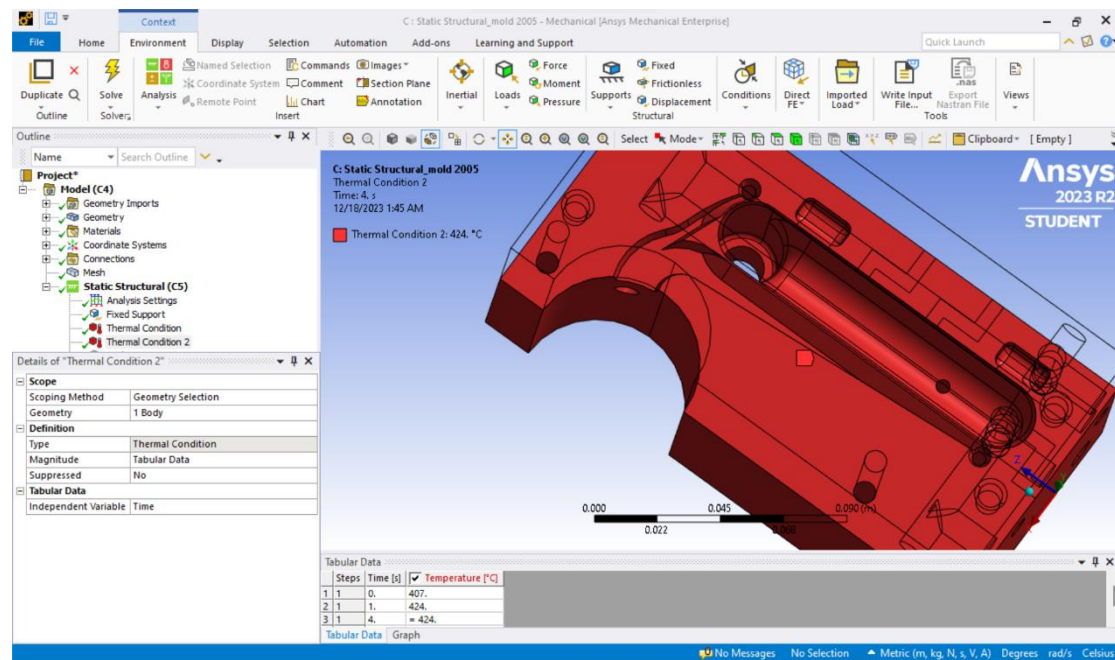
**ΒΗΜΑ 19<sup>ο</sup>:** για την περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου, αρχικά εισάγω μέσω της εντολής insert στο δέντρο εργασιών Static Structural (C5), το πεδίο thermal condition όπου επιλέγω το σταθερό μέρος του καλουπιού και καταχωρώντας:

- magnitude / tabular data: θερμοκρασίες από 383°C ~ 407°C



**ΒΗΜΑ 20<sup>ο</sup>:** ομοίως και για το κινητό μέρος, εισάγω το thermal condition 2 καταχωρώντας:

- magnitude / tabular data: θερμοκρασίες από 407°C ~ 424°C



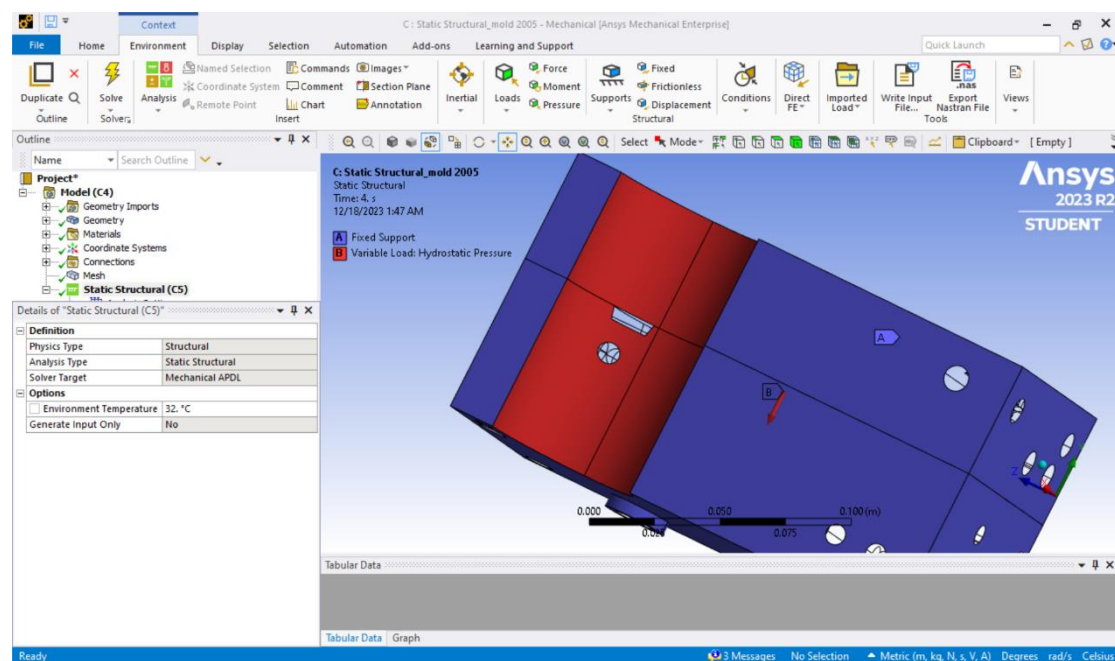
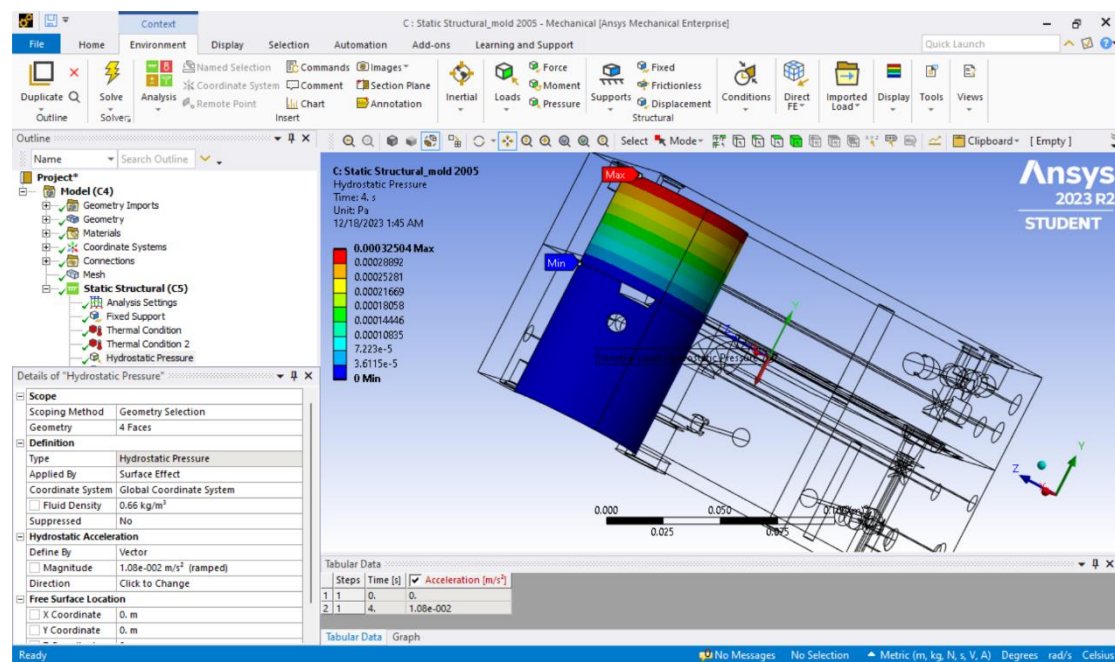
Εικόνες 78 & 79. Σχηματική απεικόνιση, του καθορισμού θερμικού φορτίου για το σταθερό και κινητό μέρος του καλουπιού



**ΒΗΜΑ 21<sup>ο</sup>:** στο δέντρο εργασιών, εισάγω το hydrostatic pressure μέσω της εντολής insert στο δέντρο εργασιών Static Structural (C5), μέσω του ορισμού των αρχικών επιφανειών απ' όπου το zamak5, εισέρχεται στα μέρη του καλουπιού και πιο συγκεκριμένα geometry: 4 faces (επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τον κώνο), καταχωρώντας:

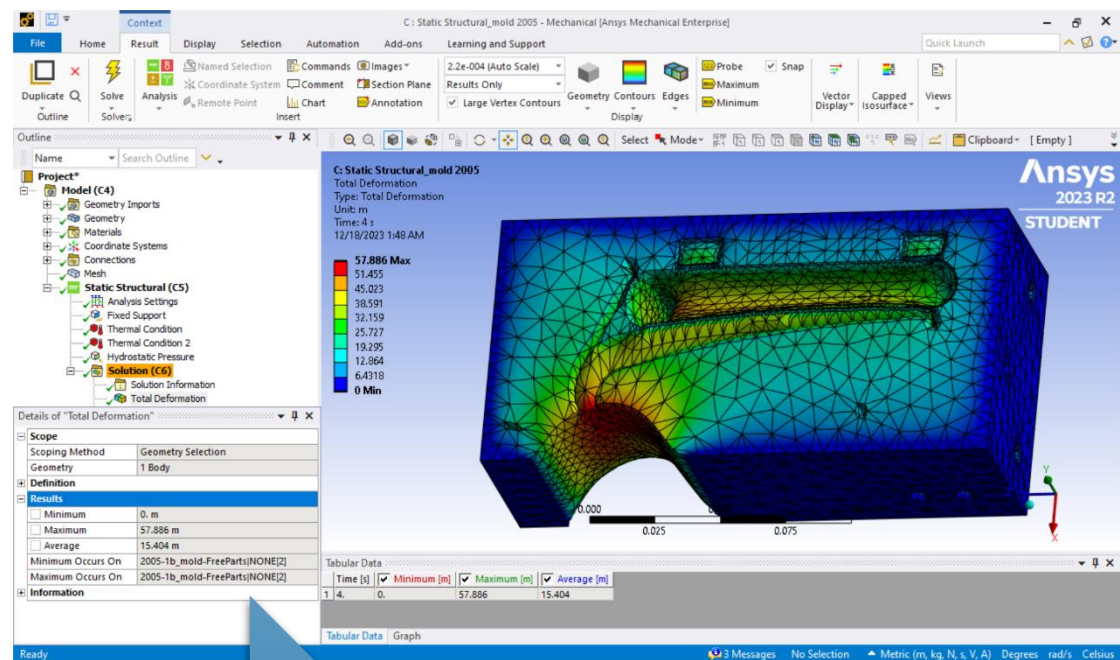
- fluid density:  $0.66\text{kg/m}^3$
- magnitude:  $0,00108\text{m/s}^2$  για χρόνο 4s

**Σημείωση:** είναι σημαντικό να οριστεί και η κατεύθυνση της ροής του zamak5, από το πεδίο define by: vector ώστε να εμφανιστεί και το αντίστοιχο βέλος.

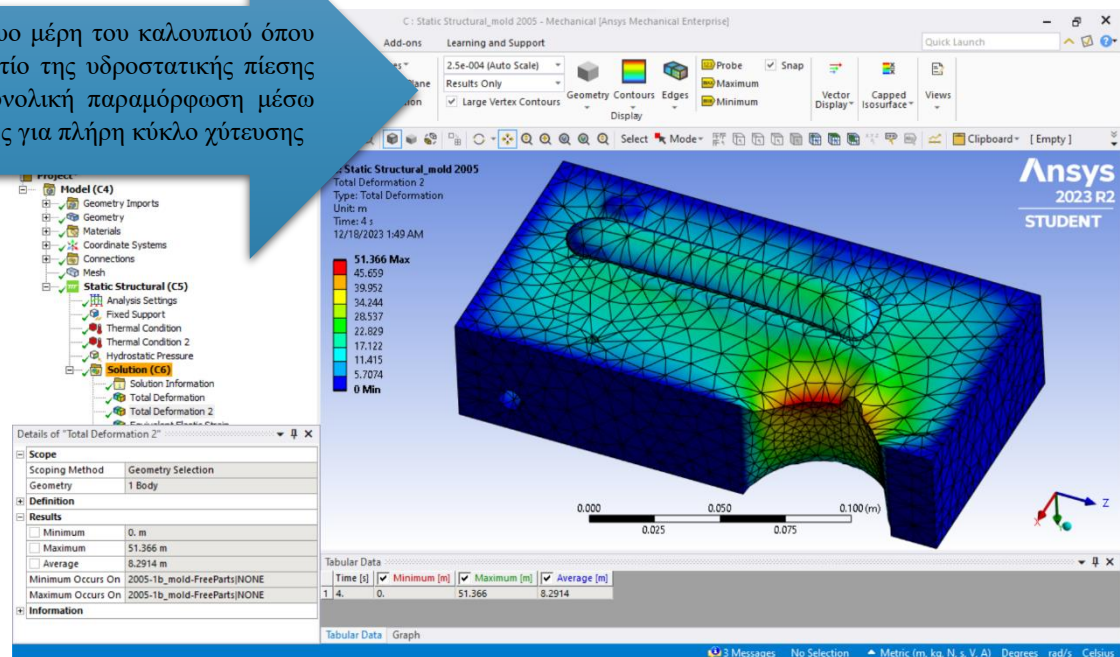


Εικόνες 80 & 81. Σχηματική απεικόνιση, των επιφανειών όπου έρχεται σε επαφή το zamak5 κατά τη διαδικασία της χύτευσης, καθώς επίσης και η επενέργεια της υδροστατικής πίεσης δηλώνοντας παράλληλα, ως environment temperature 32°C.

**ΒΗΜΑ 22º:** στο δέντρο εργασιών και το πεδίο Solution (C6), εισάγω το total deformation επιλέγοντας τη δομή του κινητού μέρους, ενώ στη συνέχεια κάνω ακριβώς το ίδιο για το σταθερό μέρος.



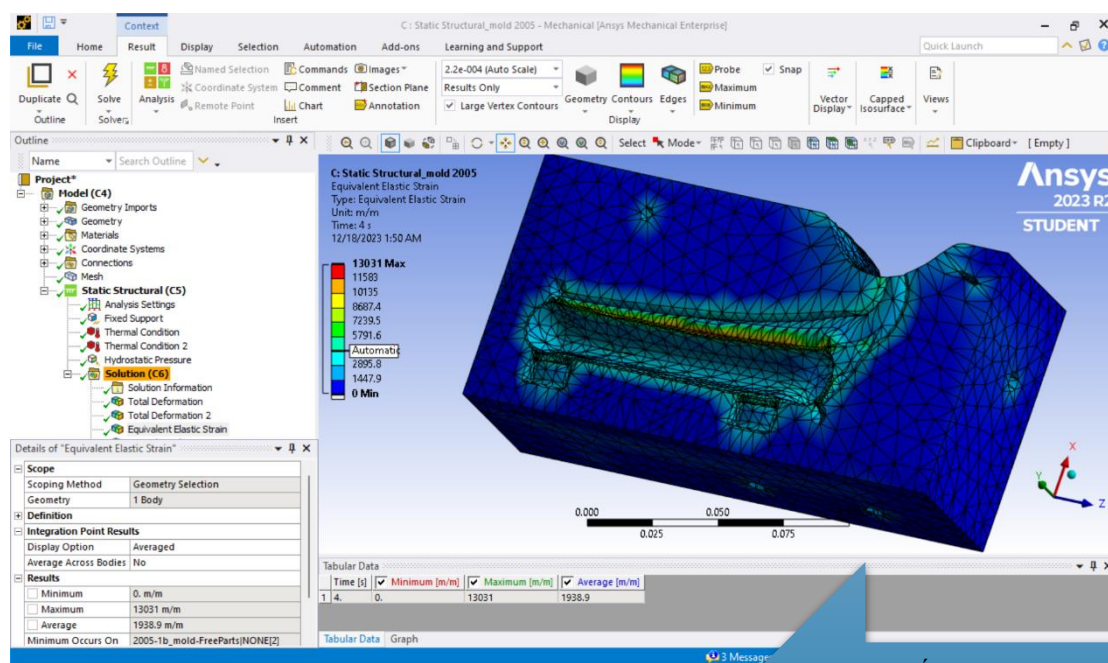
περιοχές στα δυο μέρη του καλουπιού όπου δέχεται το φορτίο της υδροστατικής πίεσης ως προς τη συνολική παραμόρφωση μέσω της πρώτης ύλης για πλήρη κύκλο χύτευσης



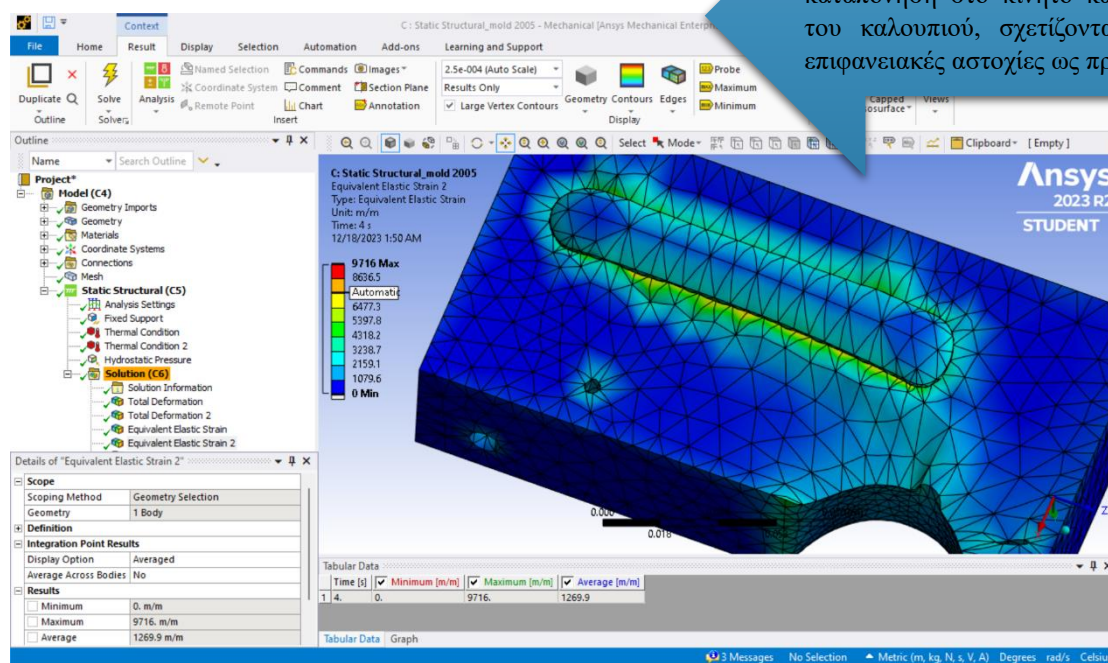
Εικόνες 82 & 83. Σχηματική απεικόνιση, της συνολικής παραμόρφωσης των μερών του καλουπιού σε χρόνο 4sec (διάρκεια πλήρους κύκλου χύτευσης), κατόπιν της επενέργειας του zamak5



**ΒΗΜΑ 23°:** στο δέντρο εργασιών και το πεδίο Solution (C6), εισάγω το equivalent elastic strain για το κινητό και σταθερό μέρος του καλουπιού, όπου στην ουσία θα δούμε την καταπόνηση των δομών ξεχωριστά, στις επιφάνειες που παρουσιάζουν τη συγκέντρωση παραμενουσών τάσεων, από το θερμικό και δυναμικό φορτίο.

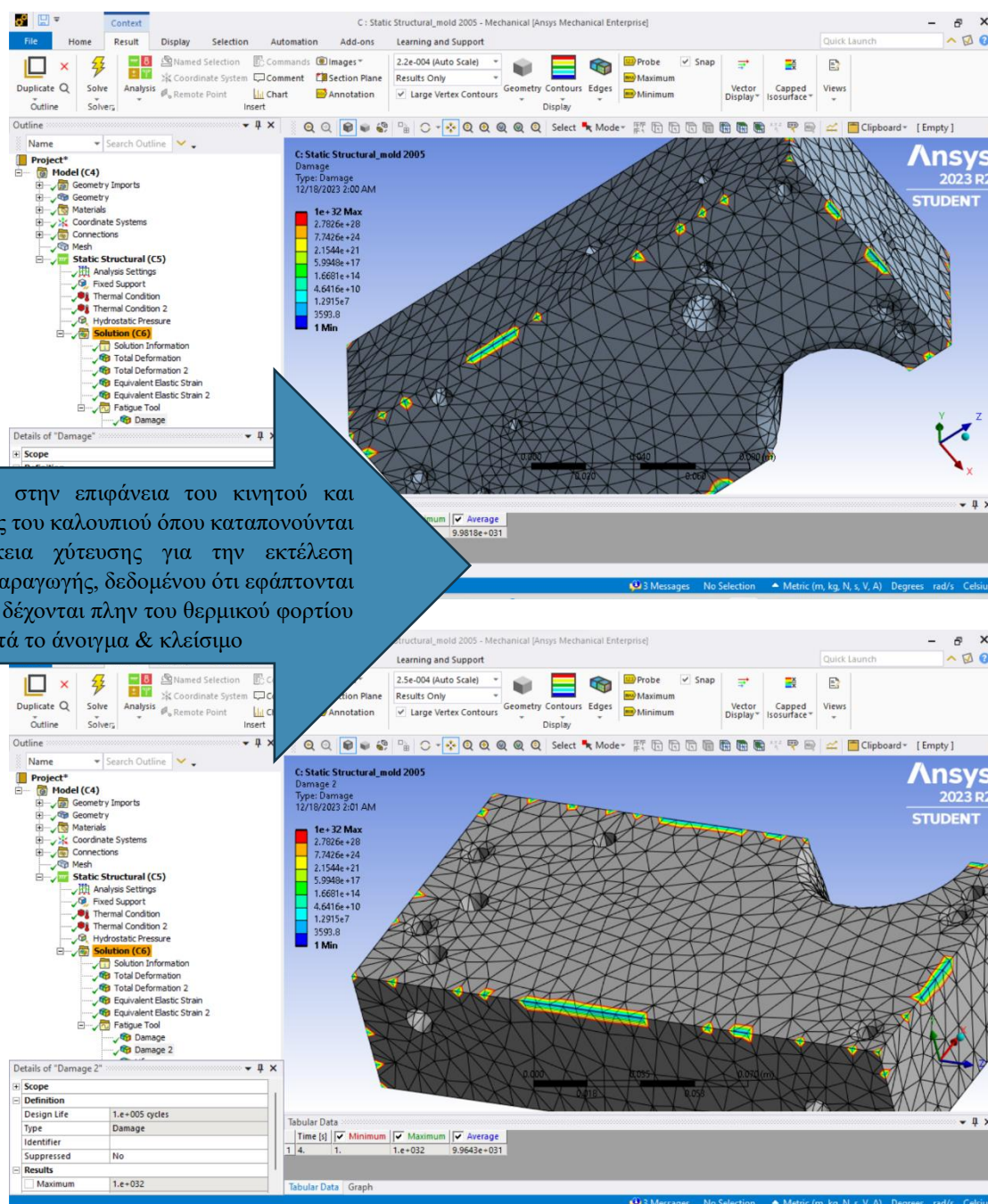


οι περιοχές που παρουσιάζουν ελαστική καταπόνηση στο κινητό και σταθερό μέρος του καλουπιού, σχετίζονται άμεσα με τις επιφανειακές αστοχίες ως προς την ποιότητα



Εικόνες 84 & 85. Σχηματική απεικόνιση, της ελαστικής καταπόνησης κατά τη διάρκεια της χύτευσης, σε χρόνο 4sec για τα δυο μέρη του καλουπιού

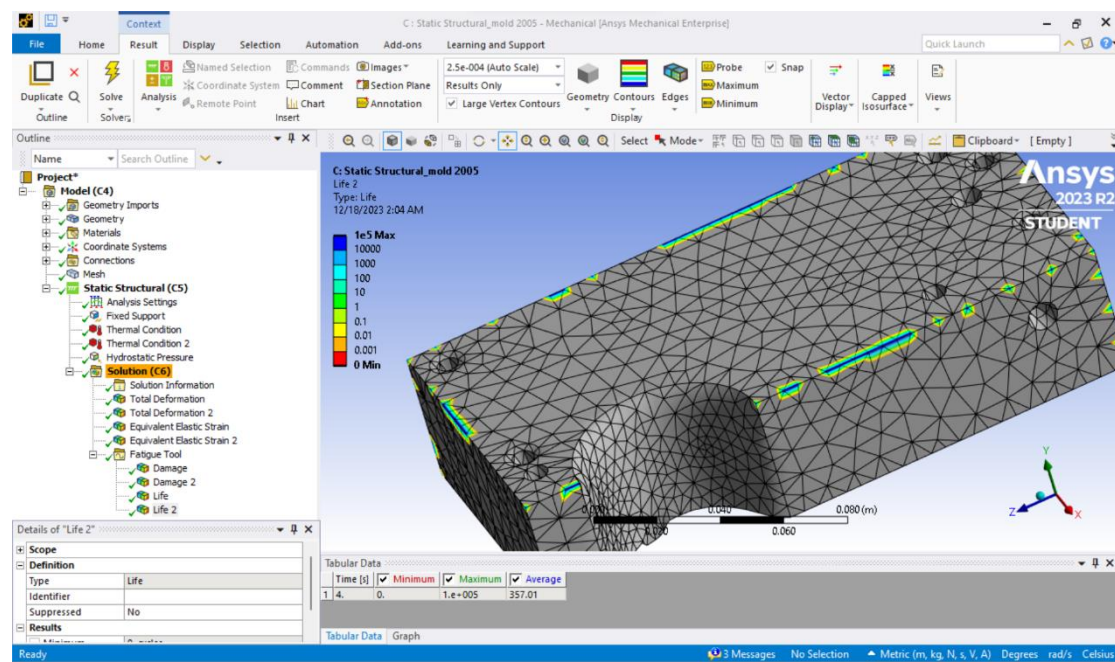
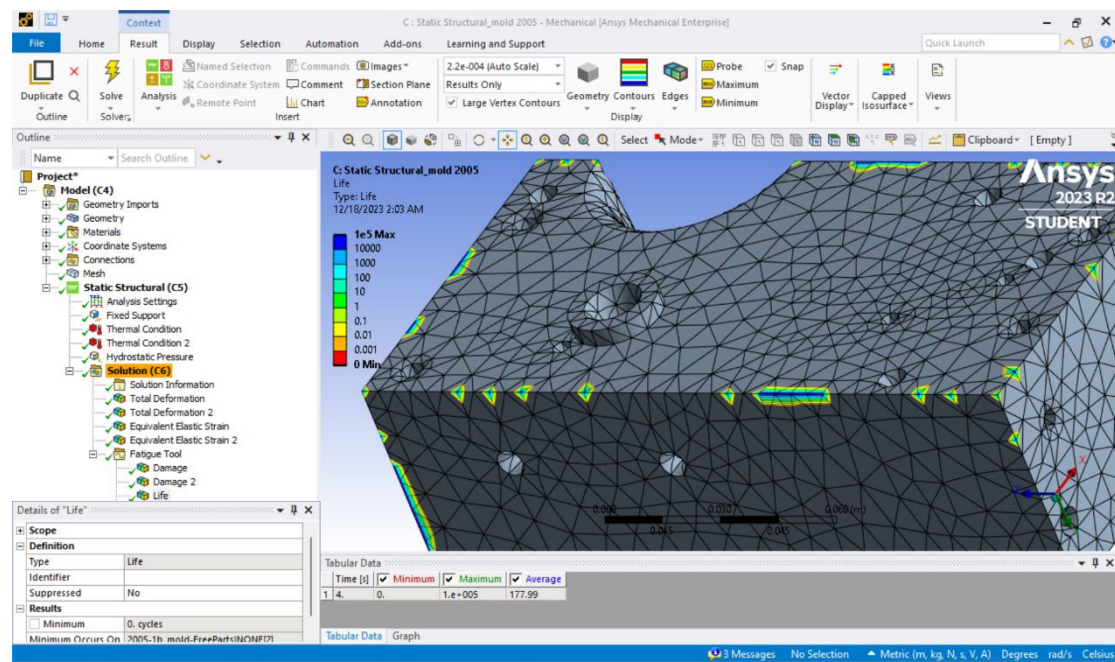
**ΒΗΜΑ 24º:** στο δέντρο εργασιών και το πεδίο Solution (C6), εισάγω το damage όπου στη ουσία εξετάζουμε για τη λειτουργική σχεδίαση, των μερών του καλουπιού design life: 100.000cycles με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια ενός προγράμματος χύτευσης, που θα ολοκληρωθεί σε 1.500 πατήματα, εντός 8 ωρών εργασίας βλέπουμε τις επιφάνειες που πιθανά να εμφανίσουν επιφανειακή αστοχία, λόγω των παραμενουσών τάσεων από τα φορτία.



Εικόνες 86 & 87. Σχηματική απεικόνιση, των επιφανειών που παρουσιάζουν ευαισθησία για μελλοντική πιθανή επιφανειακή αστοχία, με δεδομένο τη διάρκεια ζωής του καλουπιού



**BHMA 25°:** στο δέντρο εργασιών και το πεδίο Solution (C6), εισάγω το life όπου στη ουσία εξετάζουμε την αντοχή, των μερών του καλουπιού για πλήρη λειτουργία από το πεδίο design life: 100.000cycles.

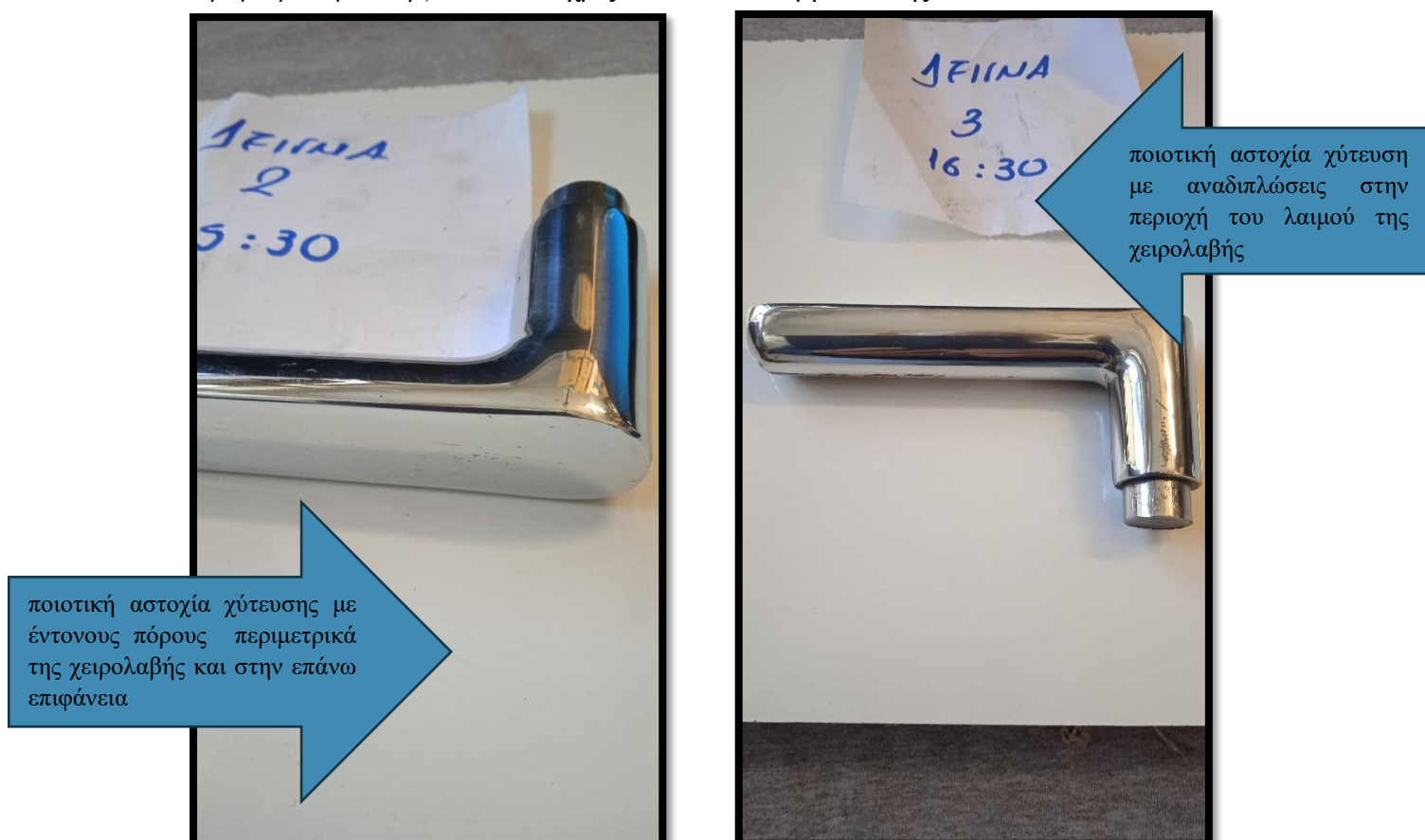


Εικόνες 88 & 89. Σχηματική απεικόνιση, των επιφανειών που παρουσιάζουν τη μικρότερη διάρκεια ζωής, σε βάθος χρόνο με max όριο τους κύκλους λειτουργικής σχεδίασης

#### 4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συσχέτιση με ποιοτικά προβλήματα επί του παραγόμενου αντικειμένου (*solution for temperature fluctuation*)

Βάσει, των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία μπορούν να διεξαχθούν αποτελέσματα, που αφορούν την ποιότητα επιφάνειας του χυτού αντικειμένου, το οποίο θα υποστεί περαιτέρω κατεργασίες για την εξυγίανση της όπως, δόνηση, λείανση (από διαφορετικής κοκκομετρίας ταινίες από N° 80 – 100 – 150 – 320) με σκοπό την επιφανειακή επικάλυψη είτε με ηλεκτροστατική πούδρα, είτε με μεταλλικές επιστρώσεις, ως φινίρισμα για τη συναρμολόγηση τελικού προϊόντος.

Μέσω, των οπτικών ποιοτικών ελέγχων που έχουν διεξαχθεί κατά την παραγωγή των συγκεκριμένων χειρολαβών, στις προαναφερθείσες φάσεις εντός χρονικού διαστήματος ενός έτους, έχουν διαπιστωθεί οι ακόλουθες αστοχίες που καταδεικνύουν προβλήματα κατά τη χύτευση, συνδεδεμένα με τα εξερχόμενα δεδομένα της προσομοίωσης που έλαβε μέρος (επί πραγματικών συνθηκών και των σχετικών παραμέτρων μελέτης), τα οποία χρίζουν επιπλέον εμβάθυνσης.



Εικόνες 90 & 91. Επιφανειακή αστοχία με εμφάνιση πόρων περιφερειακά της χειρολαβής (περιοχή ραφής μπουκαδούρας από το κλείσιμο του καλουπιού) και στην επάνω επιφάνεια, καθώς και αναδιπλώσεων στην περιοχή του λαιμού

### Αστοχίες επιφάνειας από μη αποτελεσματική χύτευση

1. έντονο πορώδες στην περιοχή που κλείνουν τα δυο μέρη του καλουπιού (*κινητό & σταθερό*), λόγω της συσσώρευσης υλικού το οποίο κατά τη στερεοποίηση, έχει τη μορφή ραφής.
2. δημιουργία περιμετρικού φλας, από περίσσεια υλικού το οποίο παραμένει στην πάνω επιφάνεια του κινητού μέρους και ειδικότερα στην περιοχή απαέρωσης, το οποίο αναδιπλώνεται κατά τη δόνηση και είναι δύσκολο να απομακρυνθεί, κατά τις επόμενες παραγωγικές φάσεις (*πρέπει να γίνεται προσθήκη φάσης απογρέζωσης*).
3. συσσώρευση υλικού, στην περιοχή των εξωλκέων το οποίο δημιουργεί κυκλικές επιφάνειες με ύψος  $\sim 2,5\text{mm}$  οι οποίες απομακρύνονται μόνο με πρόσθετη φάση λείανσης, με χοντρή ταινία N° 80.
4. εμφάνιση αναδιπλώσεων υλικού «παγωμάτων», στην επιφάνεια κυρίως του λαιμού των χειρολαβών, ως αποτέλεσμα απότομης ψύξης ή/και δημιουργίας δινών εντός της κοιλότητας κατά την πλήρωση.
5. εμφάνιση φυσαλίδων στην επιφάνεια, κυρίως εσωτερικά και κατά μήκος του λαιμού από εγκλωβισμό αέρα, κατά τη χύτευση.
6. ημιτελής μορφοποίηση του αντικειμένου, κυρίως στην οβάλ άκρη της χειρολαβής από μη επαρκή χύτευση, λόγω απότομης μείωσης της πίεσης του ρευστού μετάλλου κατά την είσοδο στην κοιλότητα.
7. στράβωμα της χειρολαβής, από τη μη σωστή εξώλκευση της λόγω του μειωμένου χρόνου διατήρησης του καλουπιού κλειστό, ώστε να πραγματοποιηθεί ομαλά η στερεοποίηση (*λειτουργικό πρόβλημα κατά τη χύτευση*).

κατά την εξώλκευση του χυτού τεμαχίου από το καλούπι δημιουργείται κυκλική διαμόρφωση στο εσωτερικό μέρος της χειρολαβής το οποίο είναι ποιοτική αστοχία και συνδέεται με τη φθορά των εξωλκέων



Εικόνα 92. Περίσσεια υλικού στην περιοχή των εξωλκέων

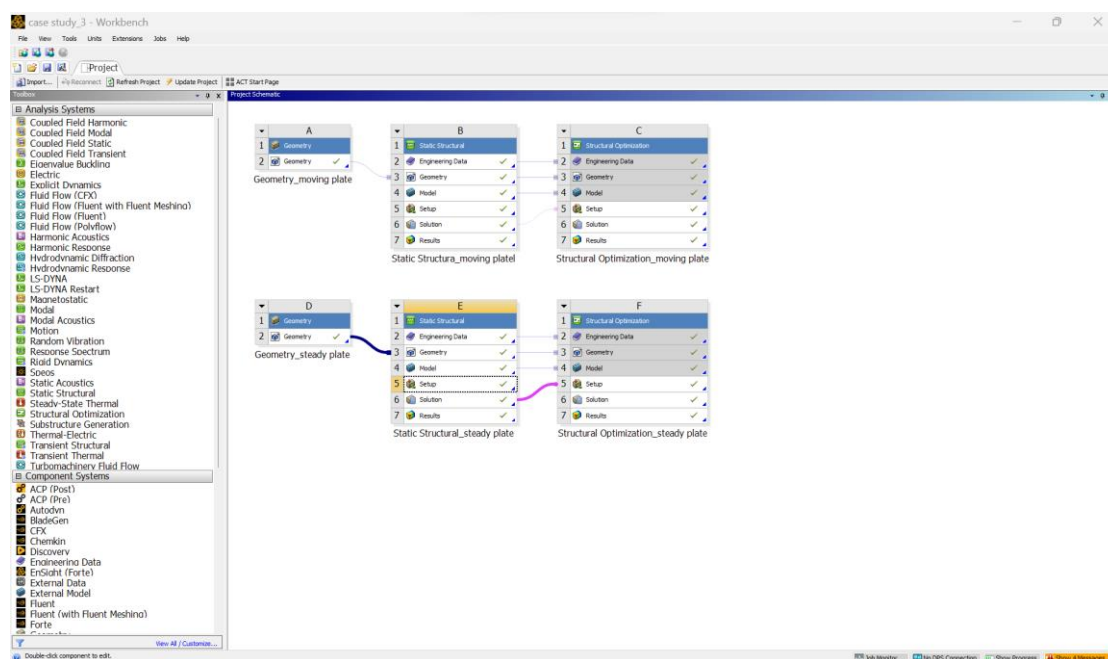


#### 4.4 Βελτιστοποίηση καλουπιού (Structural Optimization)

Για το συγκεκριμένο πεδίο προσομοίωσης, χρησιμοποιούμε το Workbench ANSYS όπου θα αναπτυχθούν δυο ξεχωριστά μοντέλα, για το κινητό και σταθερό μέρος του καλουπιού, από το οποίο παράγεται η χυτή χειρολαβή 2005-1 λόγω της διαφοράς στη μορφολογία και των διαστάσεων, που συμβάλλουν στην παραγωγή του αντικειμένου, μέσω χύτευσης εν θερμώ και τη χρήση πρώτης ύλης, κράματος ψευδαργύρου zamak5. **Σημείωση:** τα βήματα που ακολουθούνται και για τα δυο μοντέλα, με τις αντίστοιχες παραμέτρους είναι ίδια (βάσει του δέντρου εργασιών), ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

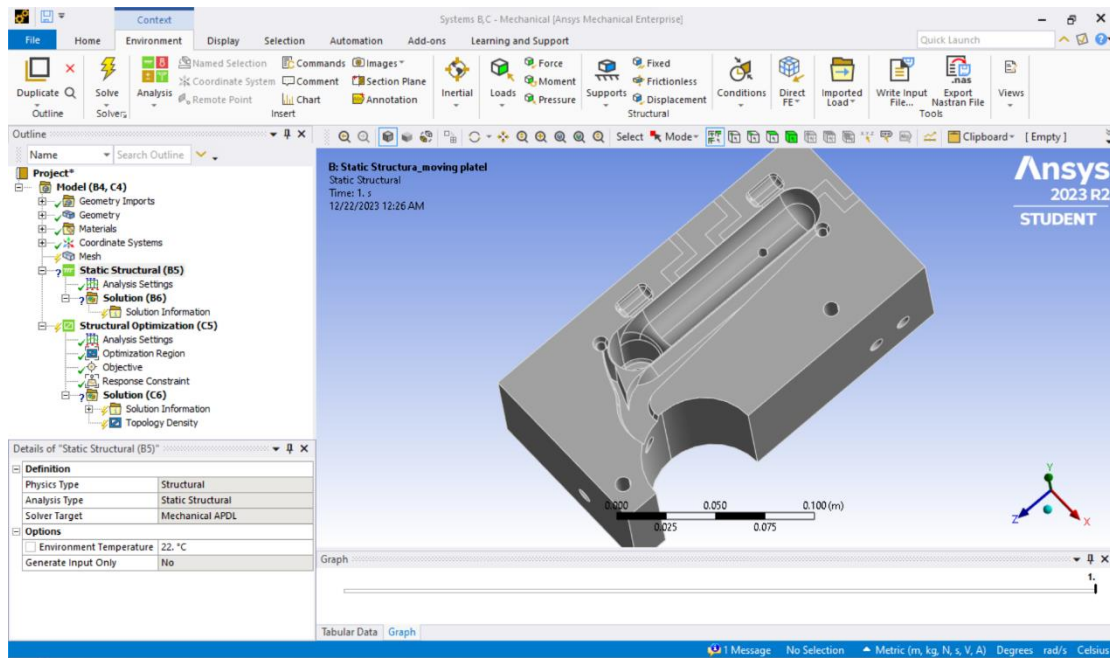
##### **Μοντέλο A – Structural Optimization for Moving Plate**

**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** στο project schematic, εισάγω από το menu της αριστερής στήλης τα πεδία geometry – static structural – structural schematic, όπου και θα εισάγω τα δεδομένα για την ανάπτυξη του μοντέλου για την κατασκευαστική βελτιστοποίηση, του κινητού μέρους από το καλούπι.



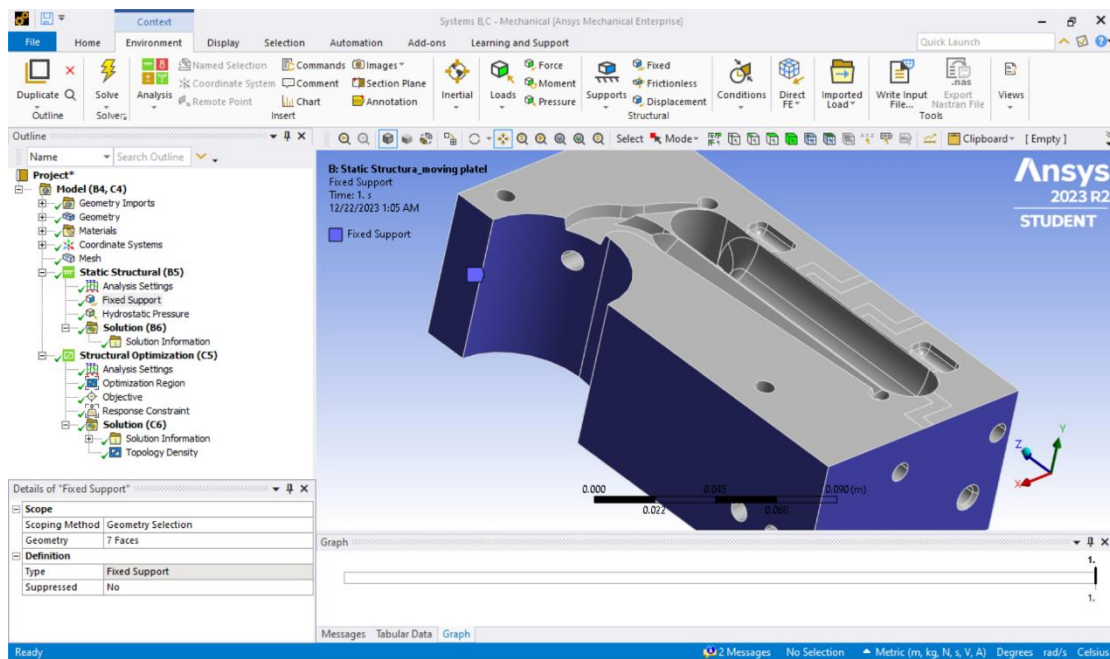
Εικόνα 93. Τα πεδία στα οποία θα αναπτυχθούν τα μοντέλα της κατασκευαστικής βελτιστοποίησης

**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** μέσα από το πεδίο static structural, καταχωρώ τα στοιχεία για την πρώτη ύλη κατασκευής του καλουπιού ORVAR SUPREME και από το πεδίο solution του static structural, μεταφέρω τα δεδομένα στο πεδίο set up του structural optimization για να μεταφερθώ σε περιβάλλον mechanical systems B,C.



Εικόνα 94. Το περιβάλλον όπου θα αναπτυχθεί το μοντέλο structural optimization

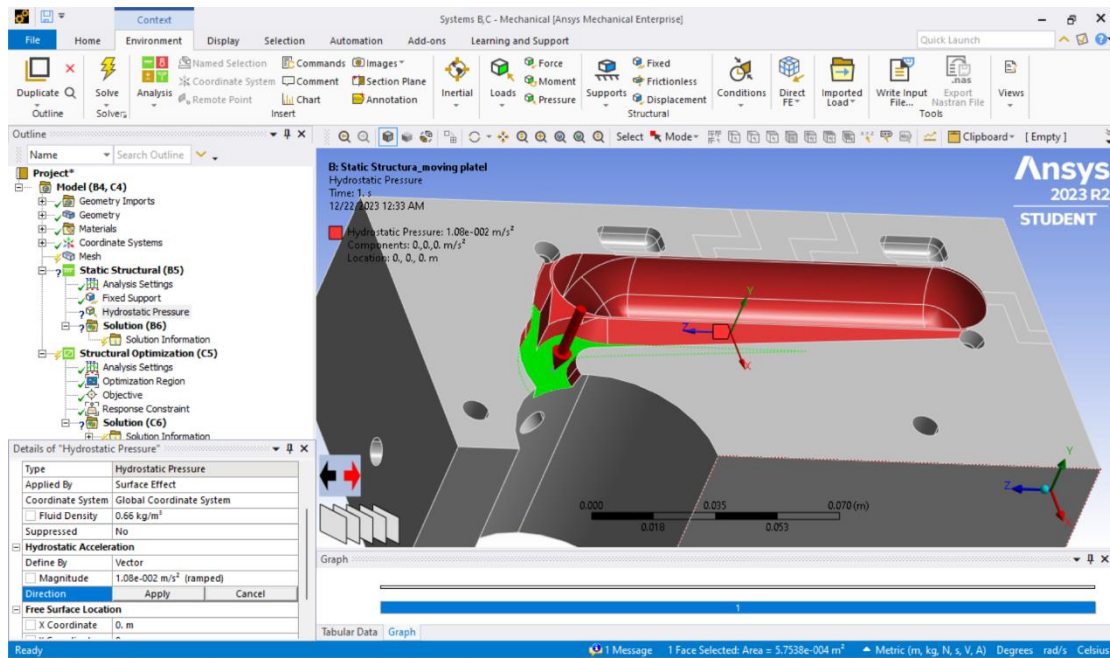
**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** στο δέντρο εργασιών static structural, προσθέτω το πεδίο fixed support ώστε να καθορίσω τις επιφάνειες του καλουπιού που τοποθετούνται στο σκελετό του καλουπιού, συμπεριλαμβανομένου και της περιοχής που εφαρμόζει ο κώνος.



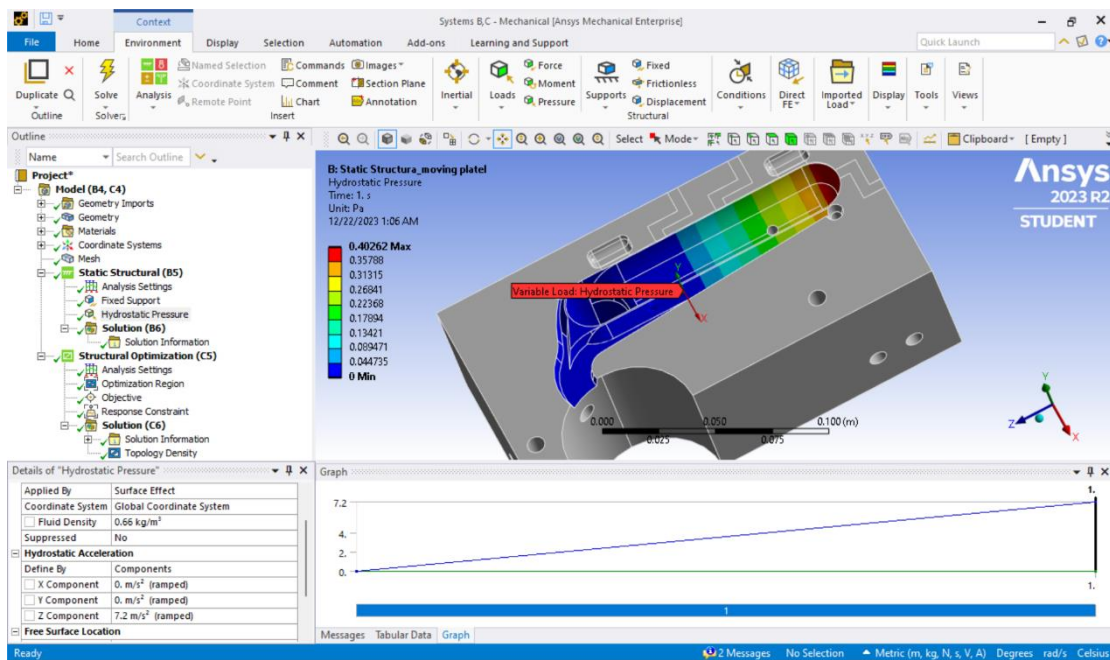
Εικόνα 95. Καθορισμός εξωτερικών επιφανειών στερεοποίησης στο σκελετό του καλουπιού

**Βήμα 4<sup>ο</sup>:** στη συνέχεια, προσθέτω το πεδίο hydrostatic pressure ορίζοντας αρχικά την επιφάνεια του καναλιού, απ' όπου θα περάσει το zamak5 στην υγρή του μορφή, για να προωθηθεί εντός της κοιλότητας, ώστε να γίνει η πλήρωση βάσει κατεύθυνση ροής.





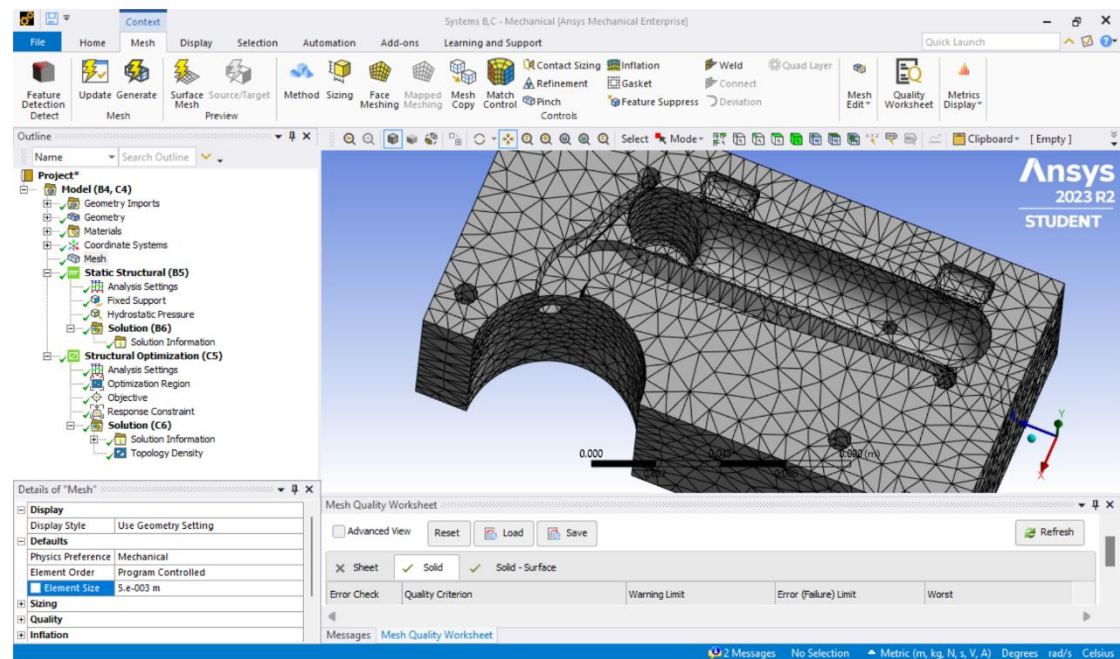
Εικόνα 96. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού υδροστατικής πίεσης του zamak5 στην επιφάνεια της κοιλότητας



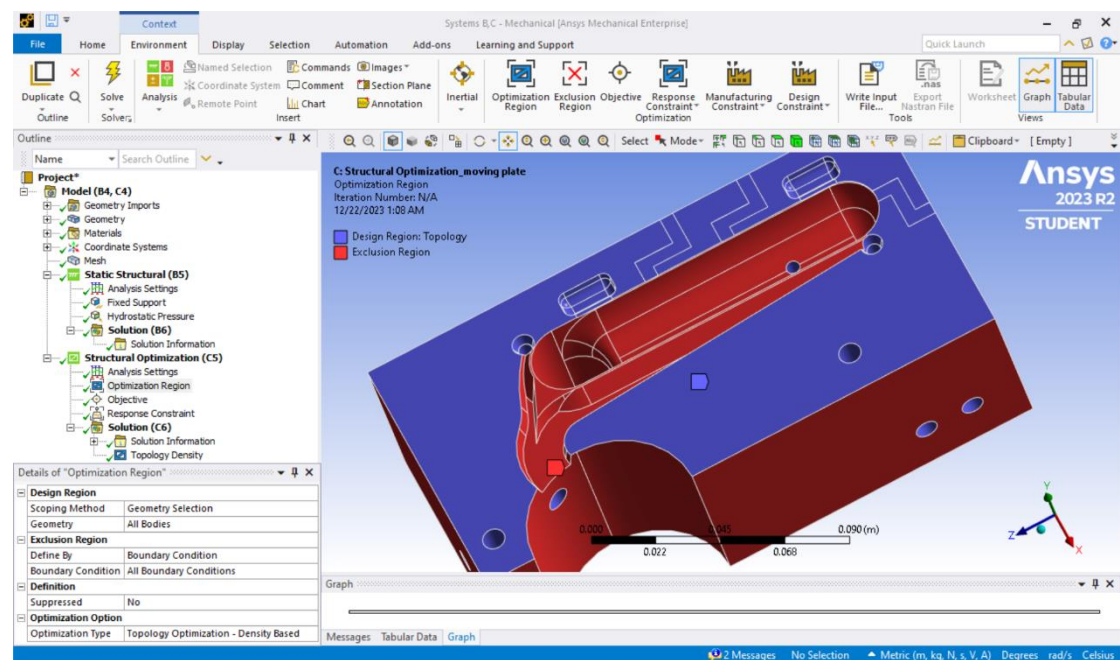
Εικόνα 97. Σχηματική απεικόνιση των τιμών της υδροστατικής πίεσης από την είσοδο του zamak5 μέσα στην κοιλότητα

**Σημείωση:** κατά τον καθορισμό του φορτίου, καταχωρώ την πυκνότητα του υγρού κράματος μετάλλου  $0,66\text{kg/m}^3$  καθώς και την υδροστατική επιτάχυνση  $7,2\text{m/sec}^2$  στον άξονα z όπου, είναι η κατεύθυνση της ροής.

**Βήμα 5<sup>ο</sup>:** από το δέντρο εργασιών, στο πεδίο mesh δίνω ως element size: 0.005mm ώστε με εντολή generate να πραγματοποιηθεί η πλεγματοποίηση.

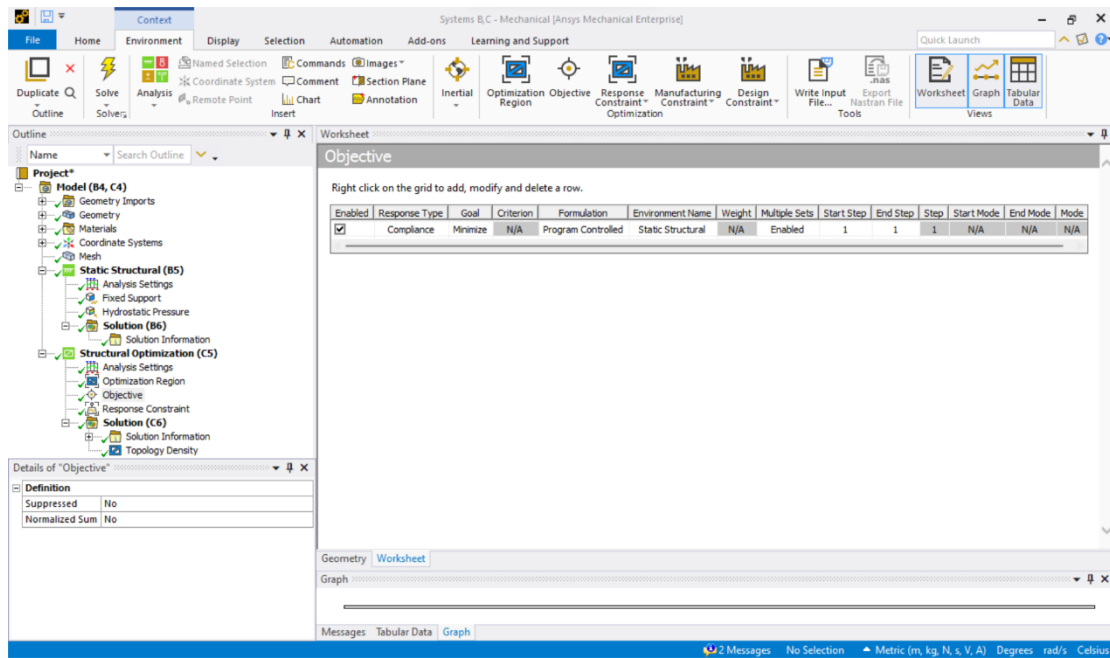


Εικόνα 98. Σχηματική απεικόνιση της πλεγματοποίησης του κινητού μέρους



Εικόνα 99. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού επιφάνειας αρχικού σχεδιασμού στο κινητό μέρος

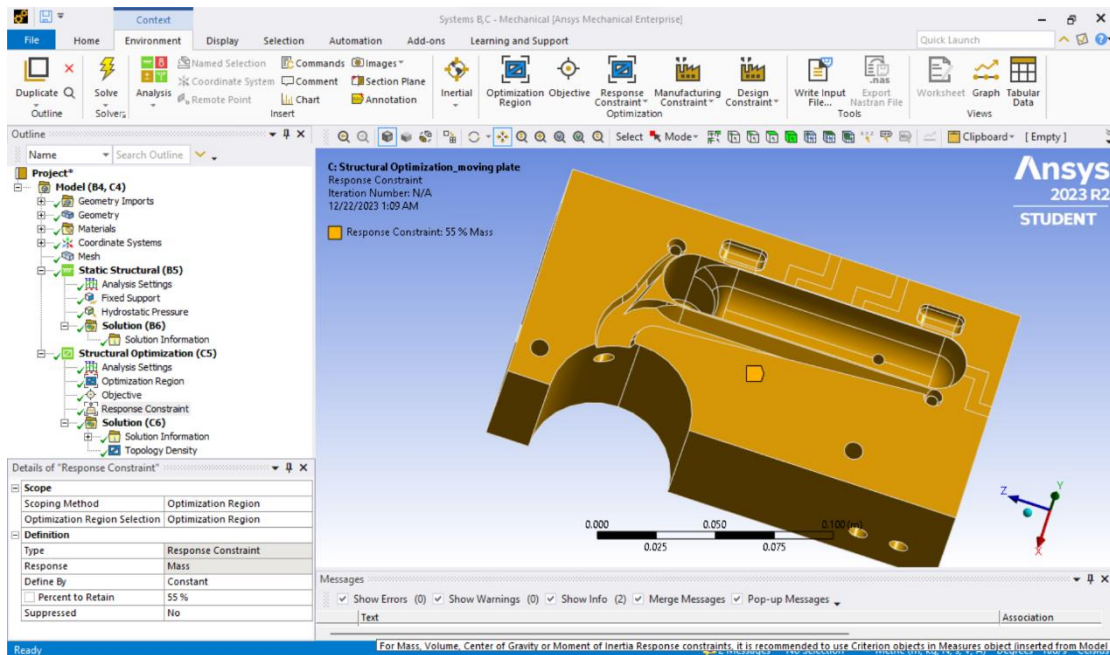
**Σημείωση:** από το δέντρο εργασιών, μέσα στο structural optimization (C5) και το πεδίο optimization region, ορίζω την πάνω επιφάνεια του κινητού μέρους του καλουπιού, βάσει του σχεδιασμού του αποκλείοντας τις περιφερειακές επιφάνειες και την κοιλότητα εσωτερικά, με optimization type: topology optimization – density based.



Εικόνα 100. Σχηματική απεικόνιση των στόχων που θέτω για την τοπολογική βελτιστοποίηση

**Σημείωση:** μέσα από το πεδίο objective, θα πρέπει να καταχωρήσω τα εξής:

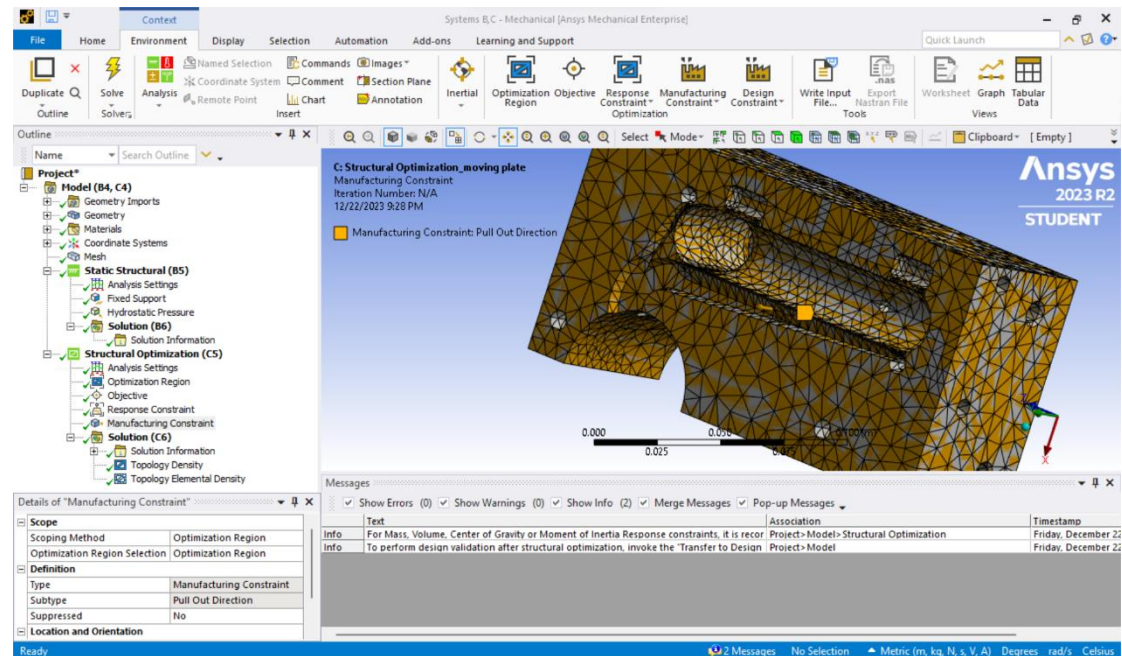
- response type: compliance
- goal: minimize
- formulation: program controlled
- environment name: static structural



Εικόνα 101. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού περιορισμού απόκρισης όπου στο πεδίο percent to retain: 55% ως προς τη συνολική μάζα του κινητού μέρους



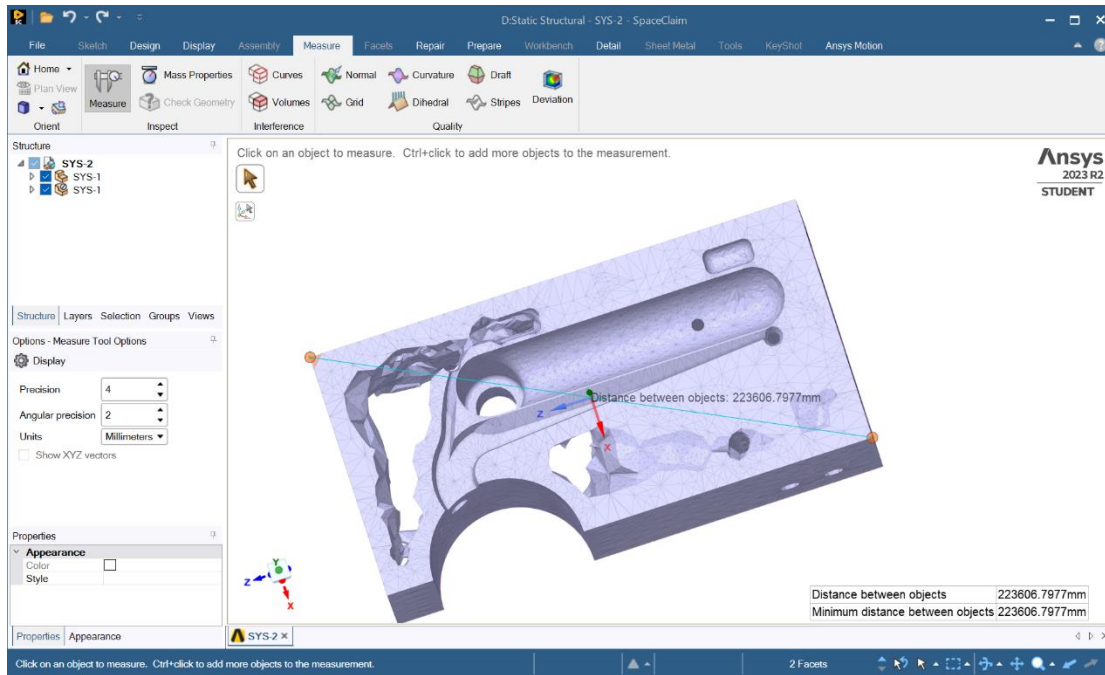
**Βήμα 6<sup>ο</sup>:** στο δέντρο εργασιών του structural optimization (C5), προσθέτω το πεδίο manufacturing constraint, όπου στο subtype: pull out direction με επιλογή του άξονα y, όπου στην ουσία δηλώνω τον κατασκευαστικό περιορισμό με την επενέργεια της πλάκας εξωλκείων, όπου βοηθούν στον αποχωρισμό του στερεού αντικειμένου από την κοιλότητα του κινητού μέρους.



Εικόνα 102. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού manufacturing constraint για το κινητό μέρος του καλουπιού

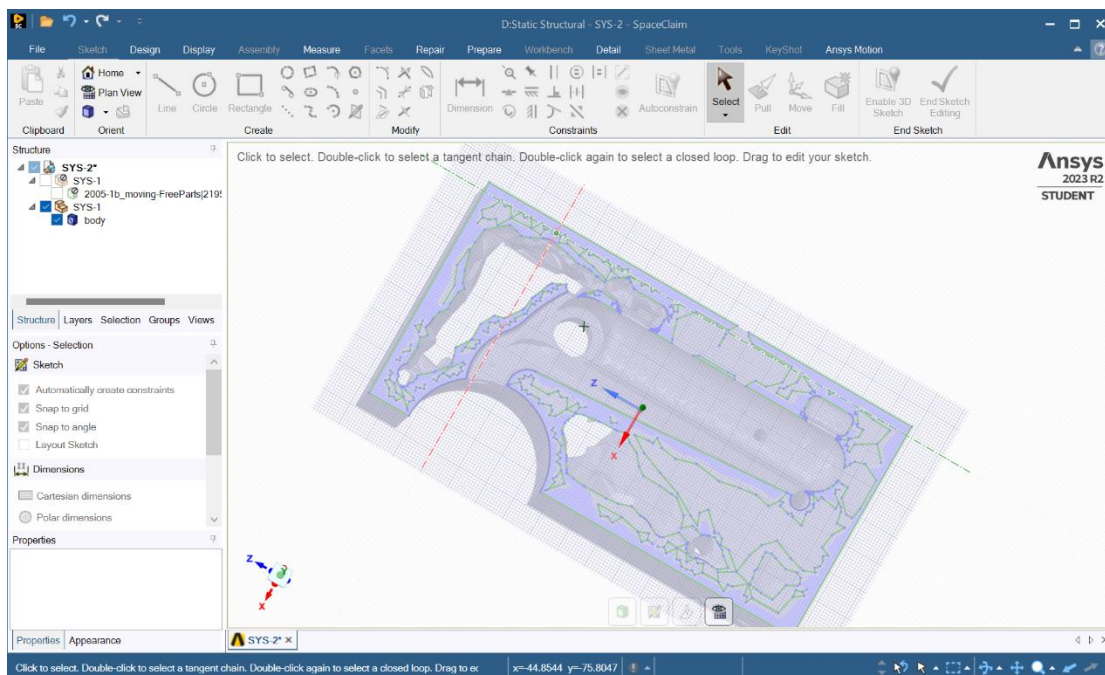
**Βήμα 7<sup>ο</sup>:** για να μπορώ να δω την επιφάνεια από το κινητό μέρος του καλουπιού, την οποία θέλω να βελτιώσω τοπολογικά ή/και σημειακά, εφόσον έχω κάνει μια πρώτη επίλυση μέσω της εντολής solve στο πεδίο solution (C6) χωρίς να έχει εμφανιστεί μήνυμα λάθους, από το Workbench ANSYS πηγαίνω στο πεδίο results και με δεξί κλικ, επιλέγω την εντολή transfer to design validation system (geometry), ώστε να μπω σε περιβάλλον space claim.

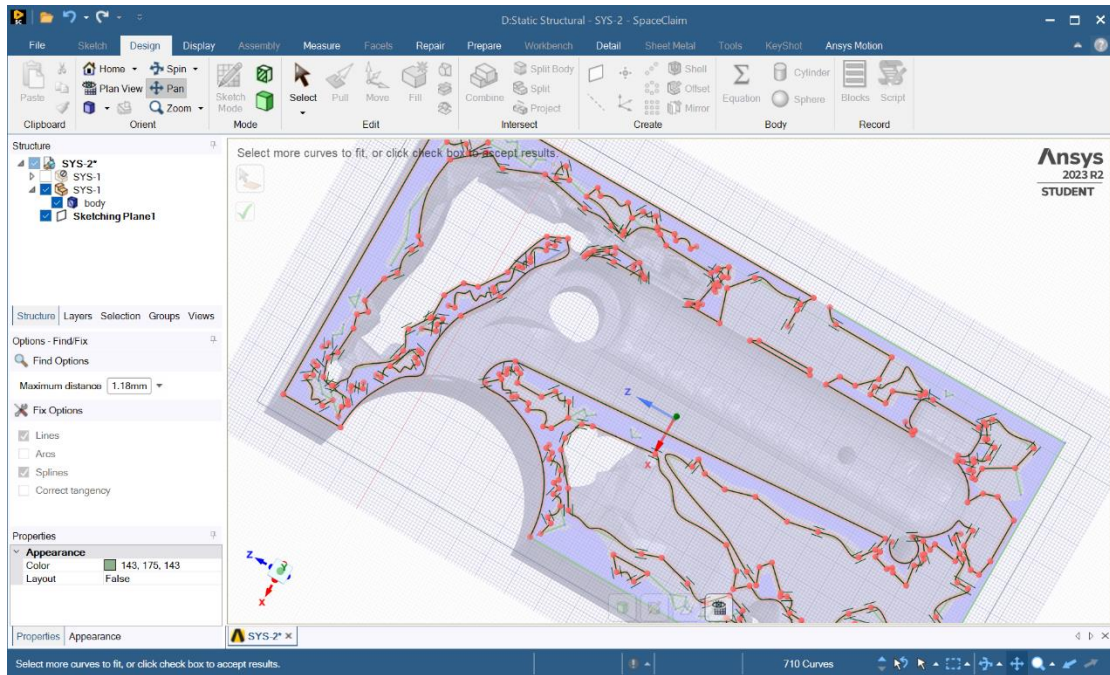
**Σημείωση:** από τη στιγμή που βλέπω, το 3D αντικείμενο με το αντίστοιχο πλέγμα και την περιοχή που ενδέχεται να γίνει τοπολογική βελτιστοποίηση, με χρήση της εντολής measure κάνω μια πρώτη μέτρηση, ορίζοντας 2 σημεία επάνω στην επιφάνεια του κινητού μέρους με distance between objects: 223,6067977mm (~224mm).



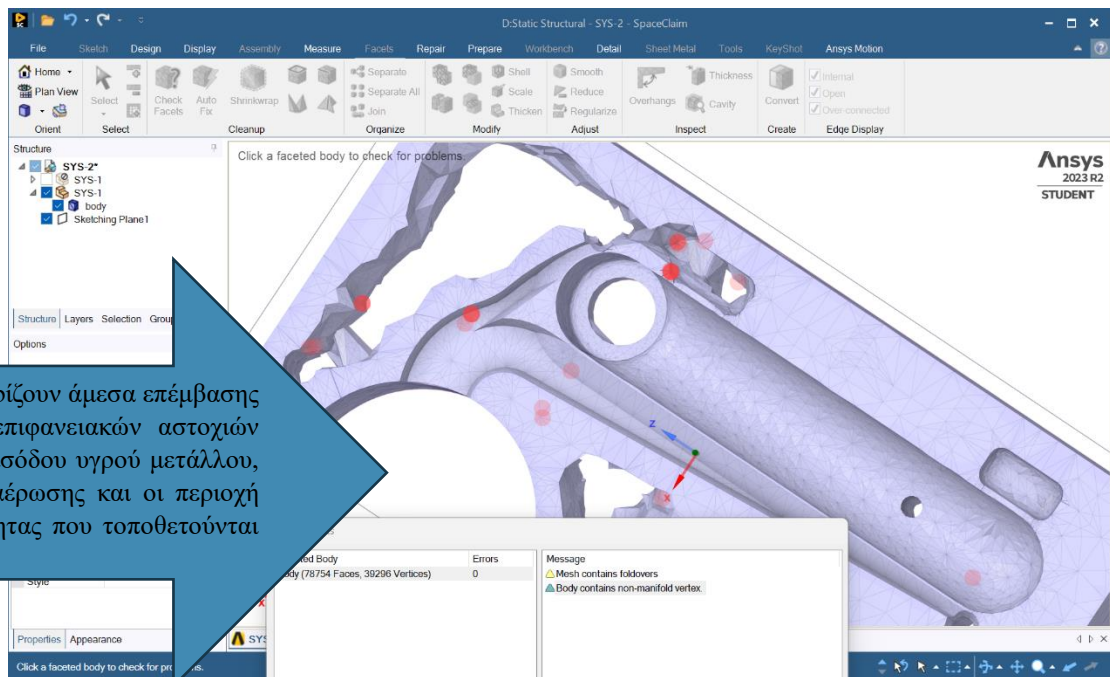
Εικόνα 103. Σχηματική απεικόνιση του 3D αντικειμένου μέσα στο περιβάλλον space claim όπου θα εξετάσω τις περιοχές τοπολογικής βελτιστοποίησης

**Σημείωση:** στις συντεταγμένες που βλέπω το 3D αντικείμενο, με εντολή select το επιλέγω ώστε στη συνέχεια, να δημιουργήσω από το menu design – sketch mode ένα sketching plane στο οποίο ουσιαστικά αντιγράφω την επάνω επιφάνεια, όπου θα κάνω τοπολογικές βελτιώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν τα σημεία ένωσης των τμημάτων του πλέγματος.





Εικόνες 104 & 105. Σχηματική απεικόνιση των σημείων του πλέγματος της επιφάνειας που υπόκεινται σε τοπολογική βελτιστοποίηση

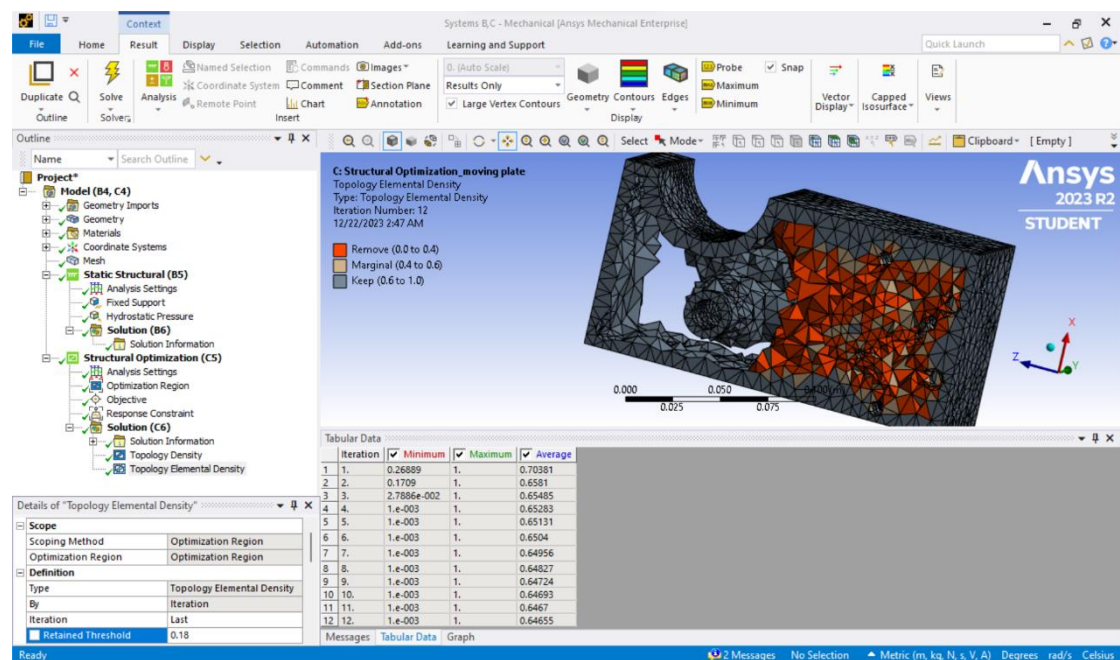
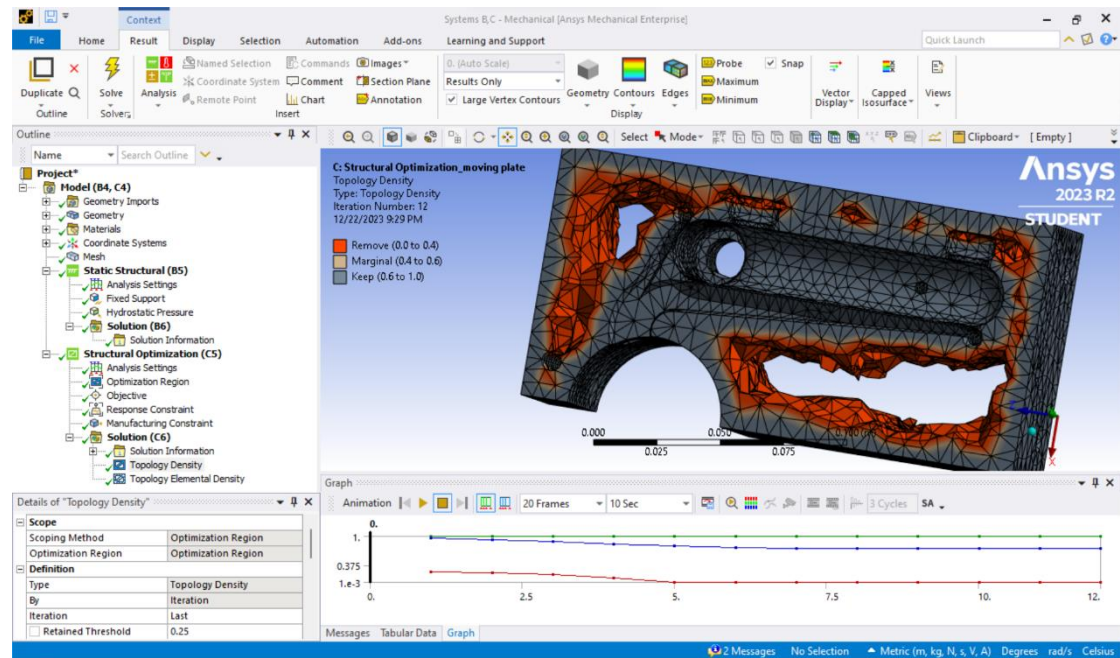


Εικόνα 106. Σχηματική απεικόνιση των περιοχών τοπολογικής βελτιστοποίησης

**Σημείωση:** από την παραπάνω εικόνα διαπιστώνουμε ότι, η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει σε περιοχές του καλουπιού, κοντά στις οπές όπου περνάνε οι εξωλκείς, στο κανάλι εισόδου του υγρού μετάλλου, εντός της κοιλότητας στην άκρη και πλευρικά, καθώς και στην περιοχή των απαερώσεων.



**Βήμα 8<sup>ο</sup>:** από το δέντρο εργασιών, στο πεδίο Solution (C6) μέσω της εντολής solve λαμβάνω τα αποτελέσματα το topology density & elemental density, έχοντας καταχωρήσει στο πεδίο retain threshold για την πρώτη περίπτωση 0,25 ενώ για τη δεύτερη 0,18.



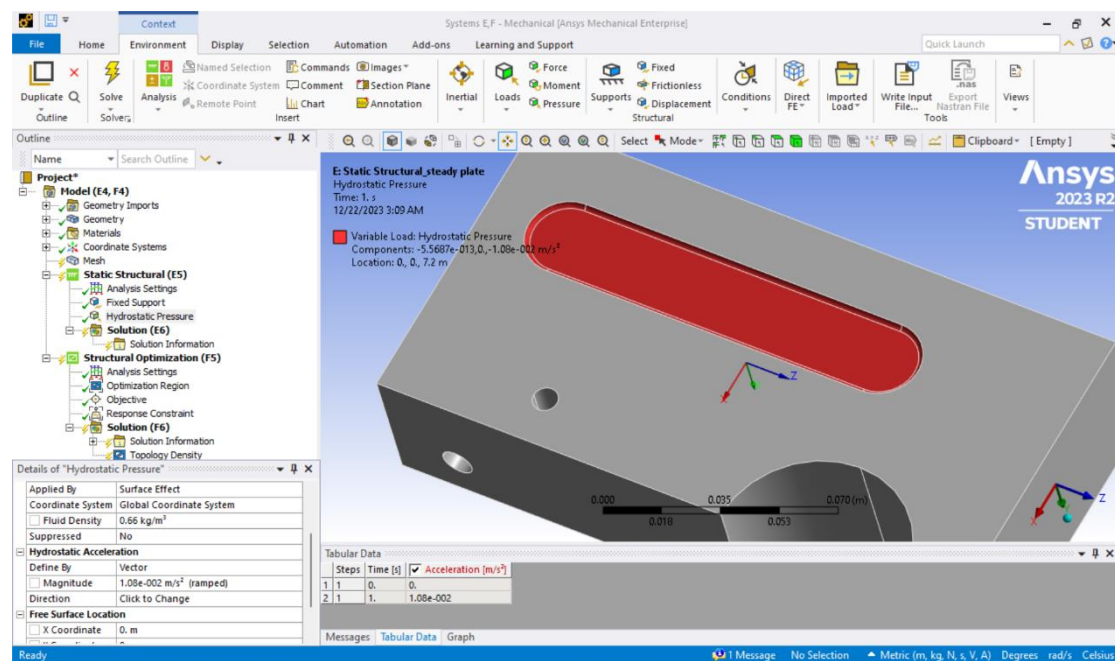
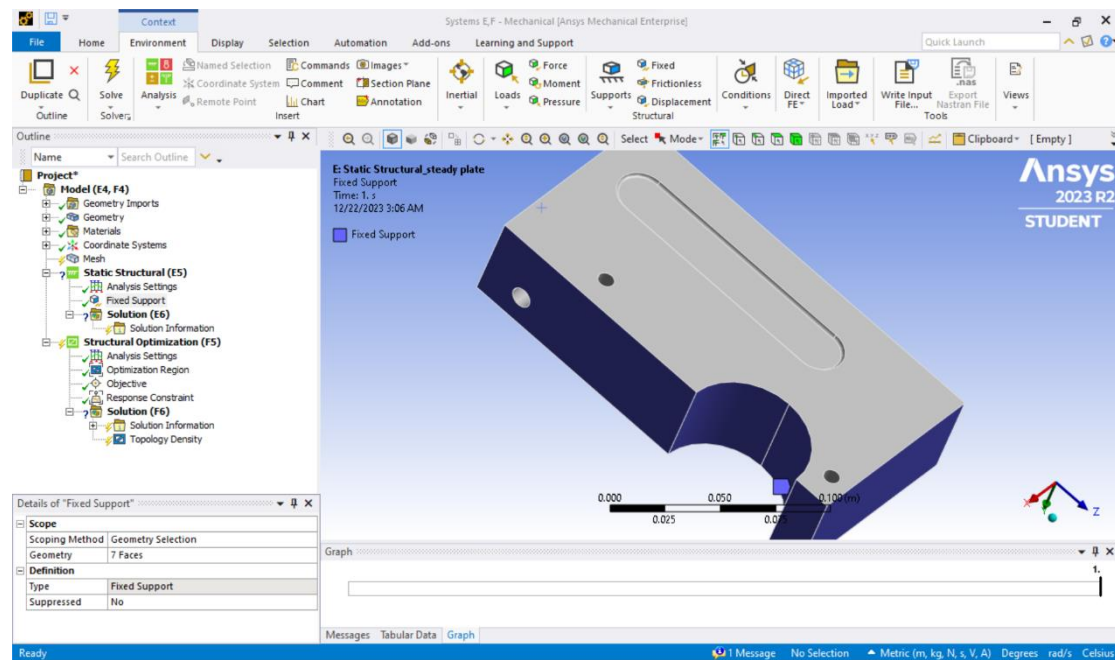
Εικόνες 107 & 108. Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της τοπολογικής βελτιστοποίησης για το κινητό μέρος του καλουπιού



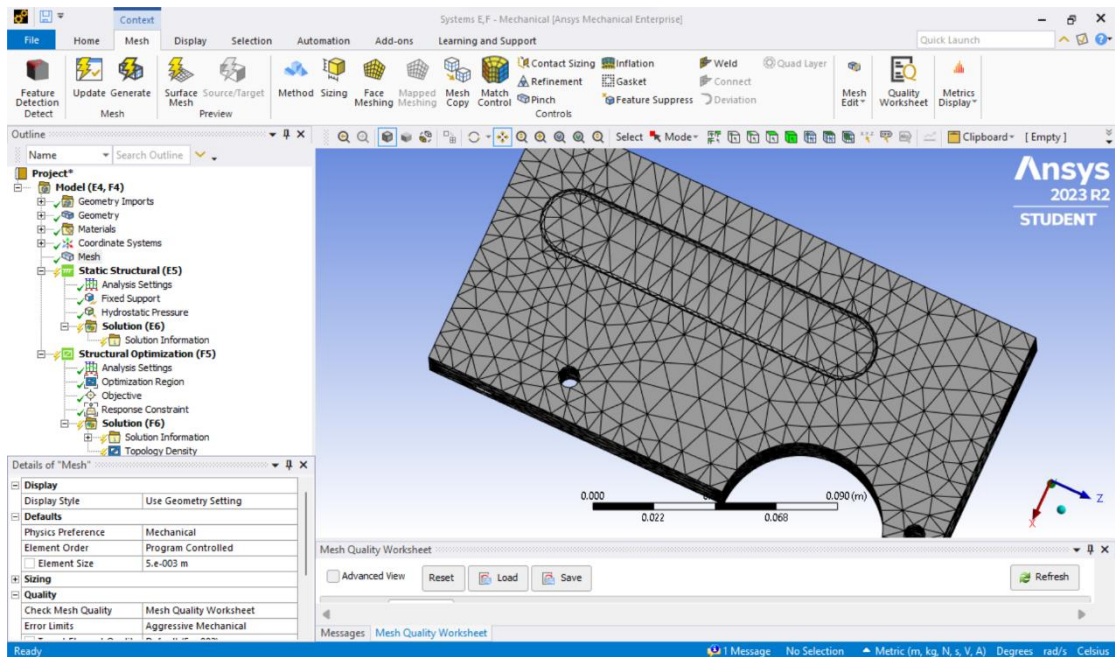
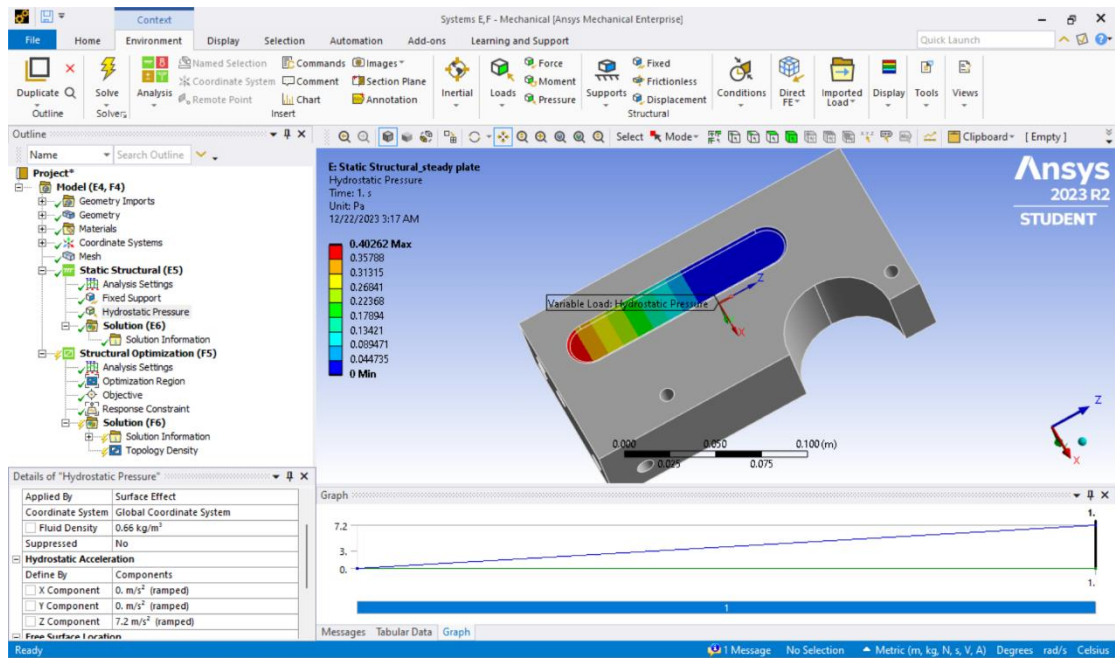
## Μοντέλο Β – Structural Optimization for Steady Plate

Για την ανάπτυξη του μοντέλου, που αφορά το σταθερό μέρος του καλουπιού ενεργούμε με τον ίδιο τρόπο, όπως προηγουμένως με τα βήματα να έχουν όμοια διατύπωση, ως ακολούθως:

**Βήμα 9<sup>ο</sup>:** εισάγω στο δέντρο εργασιών του static structural (E5) την εντολή fixed support, ώστε να ορίσω τις επιφάνειες περιμετρικά του καλουπιού οι οποίες έρχονται σε επαφή με το σκελετό, στον οποίο στηρίζονται τα μέρη του καλουπιού κατά το set up.

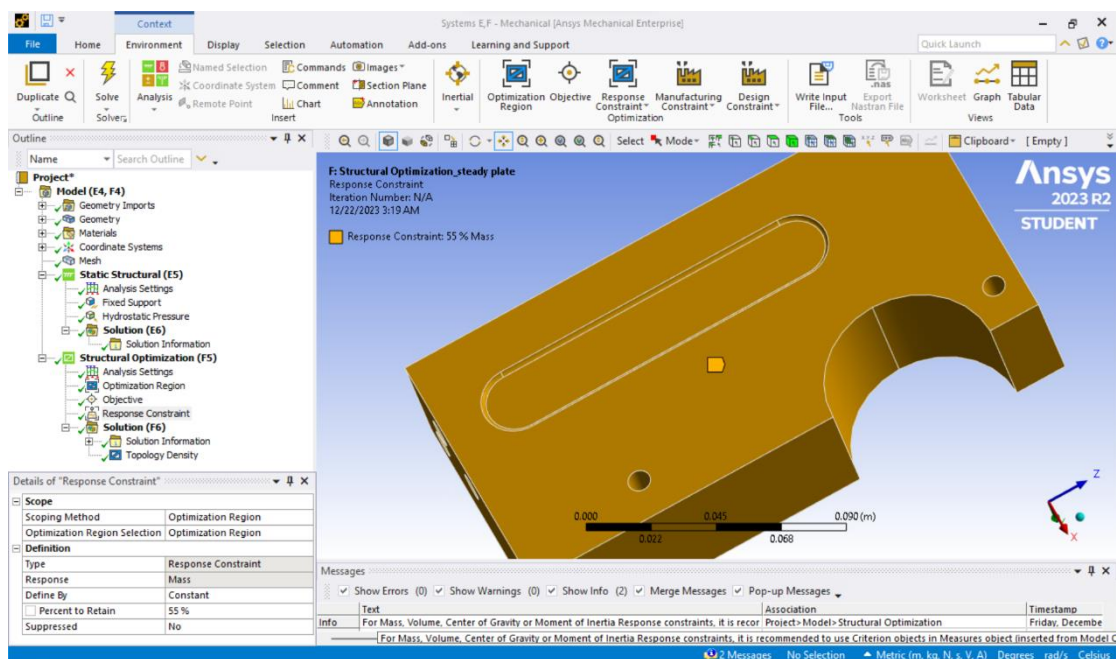
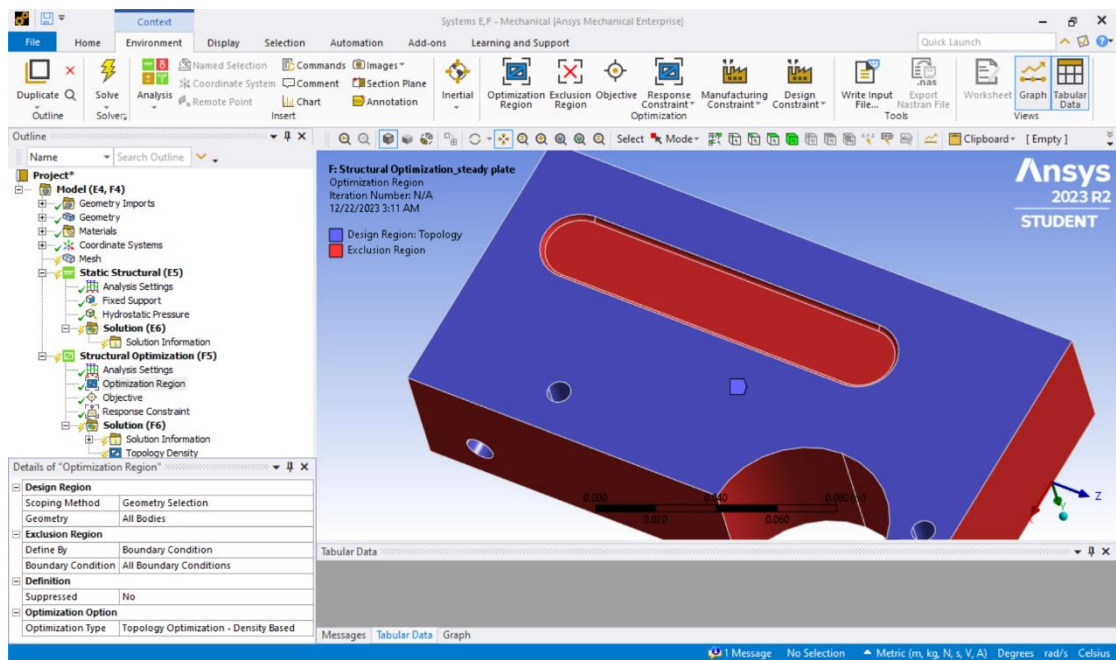


Εικόνες 109 & 110. Ορισμός fixed support & hydrostatic pressure



Εικόνες 111 & 112. Σχηματική απεικόνιση της κατανομής υδροστατικής πίεσης βάσει της πυκνότητας του ρευστού μετάλλου, αναφορικά με την επιφάνεια ροής του όπως επίσης και της πλεγματοποίησης του κινητού μέρους

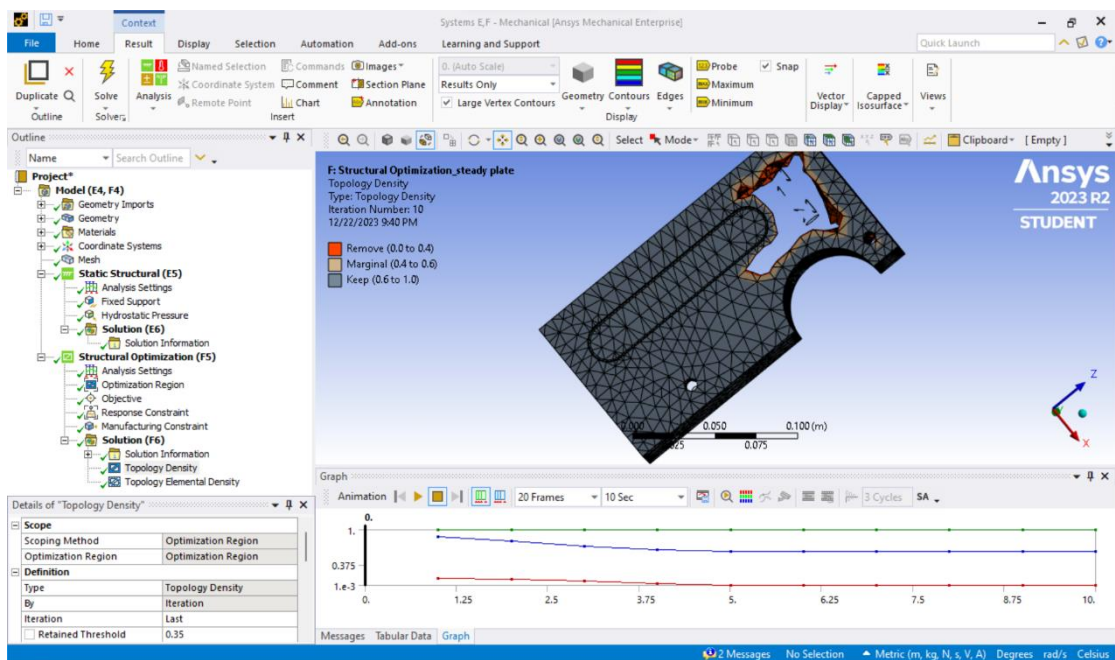
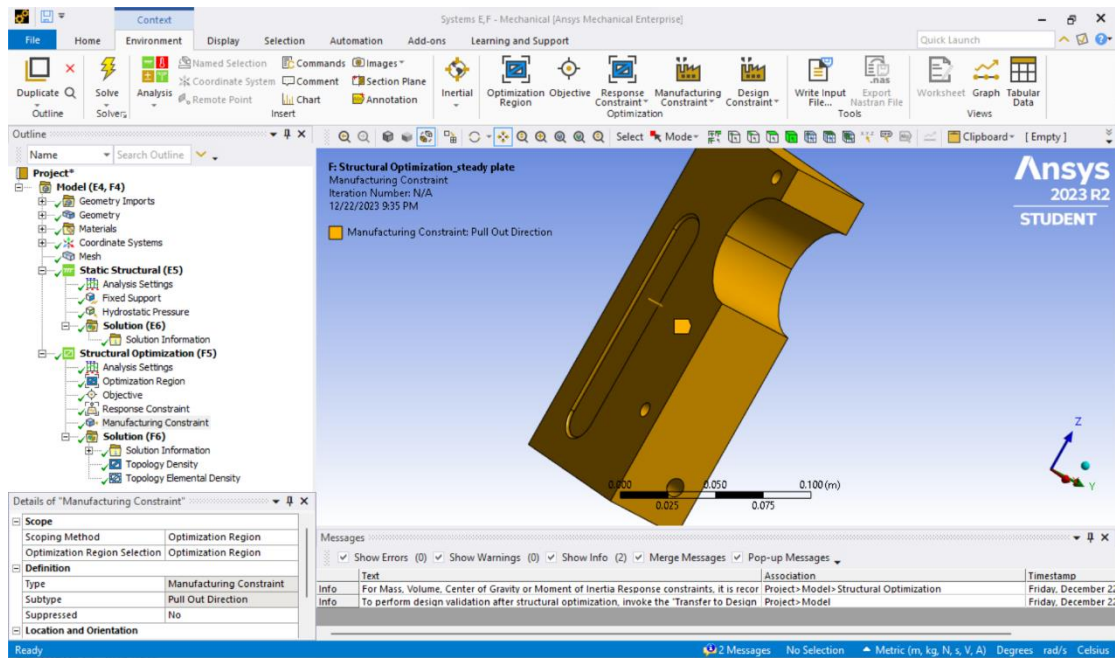
**Βήμα 10<sup>ο</sup>:** η πλεγματοποίηση γίνεται με element size: 0,005m, quality: high και physics preference: mechanical με τον ίδιο τρόπο όπως και το κινητό μέρος, έτσι ώστε να είναι εφικτό να καθορίσουμε στο πεδίο optimization region, την επιφάνεια όπου είναι η σχεδιαστική περιοχή που τοπολογικά θα γίνει βελτιστοποίηση, αποκλείοντας τις περιοχές περιμετρικά του καλουπιού και της κοιλότητας του σταθερού μέρους.



Εικόνες 113 & 114. Σχηματική απεικόνιση των συντομογραφικών περιορισμών στο σταθερό μέρος του καλουπιού καθώς του response constraint κατά 55% της συνολικής μάζας του αντικειμένου

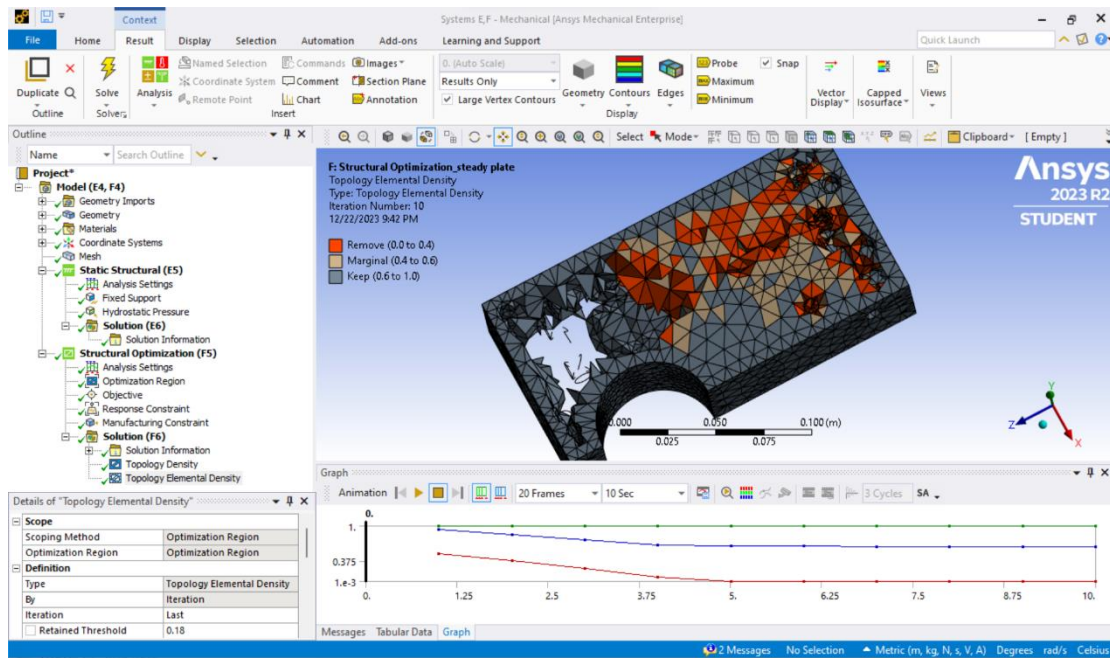
**Βήμα 11°:** κατά την προσθήκη του πεδίου manufacturing constraint, στο δέντρο εργασιών του structural optimization (F5), στο subtype: pull out direction όπου στην ουσία δηλώνω την κατεύθυνση της πλάκας εξωλκέων, η οποία κινείται κατά τον άξονα y στη διάρκεια της διαδικασίας χύτευσης.





Εικόνες 115 & 116. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού κατασκευαστικού περιορισμού και τοπολογικής πυκνότητας κατά την επίλυση

**Βήμα 12<sup>ο</sup>:** στο δέντρο εργασιών του solution (F6), πριν την επίλυση στο πεδίο topology density με retain threshold: 0,35 ενώ αντίστοιχα στο πεδίο topology elemental density θέτω retain threshold: 0,18 όπου στην ουσία τοπολογική βελτιστοποίηση θε πρέπει να διενεργηθεί στην περιοχή επιφάνειας, περιμετρικά των οπών που τοποθετούνται οι εξωλκείς, καθώς και οι πείροι στήριξης του σταθερού μέρους στο σκελετό.



Εικόνα 117. Σχηματική απεικόνιση της περιοχής στην κάτω επιφάνεια του σταθερού μέρους του καλουπιού η οποία επιδέχεται τοπολογική βελτιστοποίηση

**Σημείωση:** στο πεδίο objective, μέσα στο δέντρο εργασιών του structural optimization (F5), ελέγγω τα δεδομένα στα παρακάτω πεδία:

- response type: compliance
- goal: minimize
- formulation: program controlled
- environment name: static structural
- multiple sets: enabled
- start & end step: 1



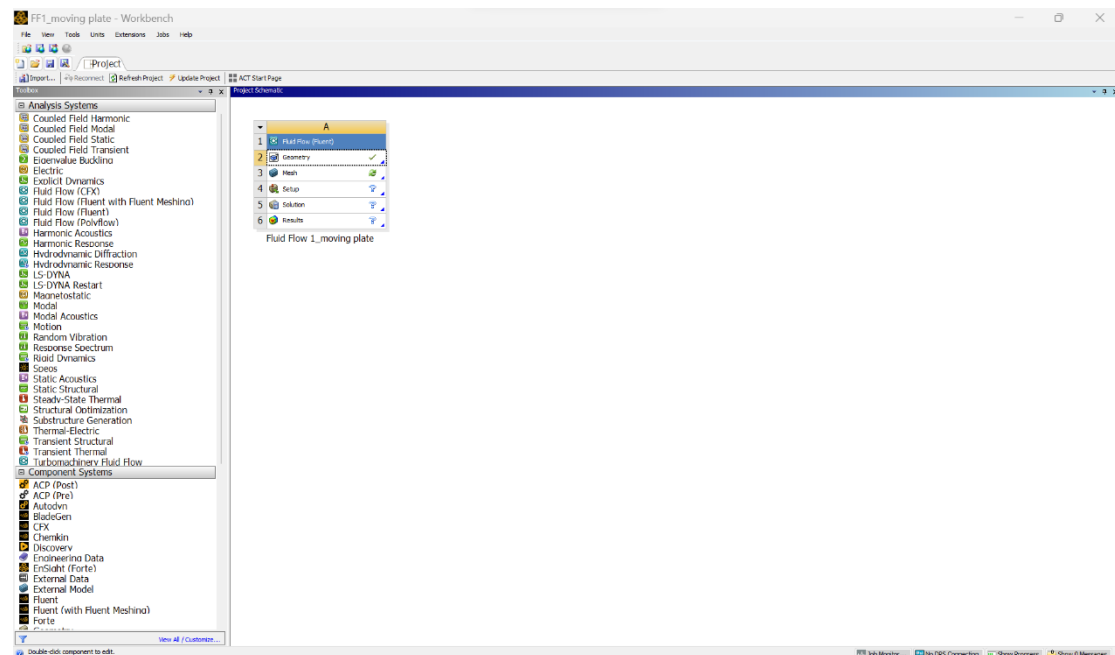
Εικόνα 118. Το σταθερό μέρος του καλουπιού τοποθετημένο στο σκελετό κατά τη χύτευση

#### 4.5 Μελέτη ροής υγρού κράματος μετάλλου εντός του κινητού μέρους (*Fluid Flow*)

Σε αυτή την περίπτωση, με την ανάπτυξη του παρακάτω μοντέλου μπορούμε να δούμε τη ροή του υγρού μετάλλου (*πρώτη ύλη zamak5*), εντός του κινητού μέρους του καλουπιού για την πλήρωση της κοιλότητας, ώστε να ακολουθήσει η στερεοποίηση.

**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** σε περιβάλλον Workbench ANSYS, εισάγω το Fluid Flow (*Fluent*) όπου στο πεδίο geometry – input – το αρχείο 2005-1b\_moving.stp και αποθηκεύω με ονομασία FF1\_moving plate.

Επίσης, από το πεδίο geometry με δεξί κλικ – edit geometry in Space Claim.



Εικόνα 119. Εισαγωγή του Fluid Flow (*Fluent*) για την ανάλυση ροής εντός του κινητού μέρους από το μελετώμενο καλούπι

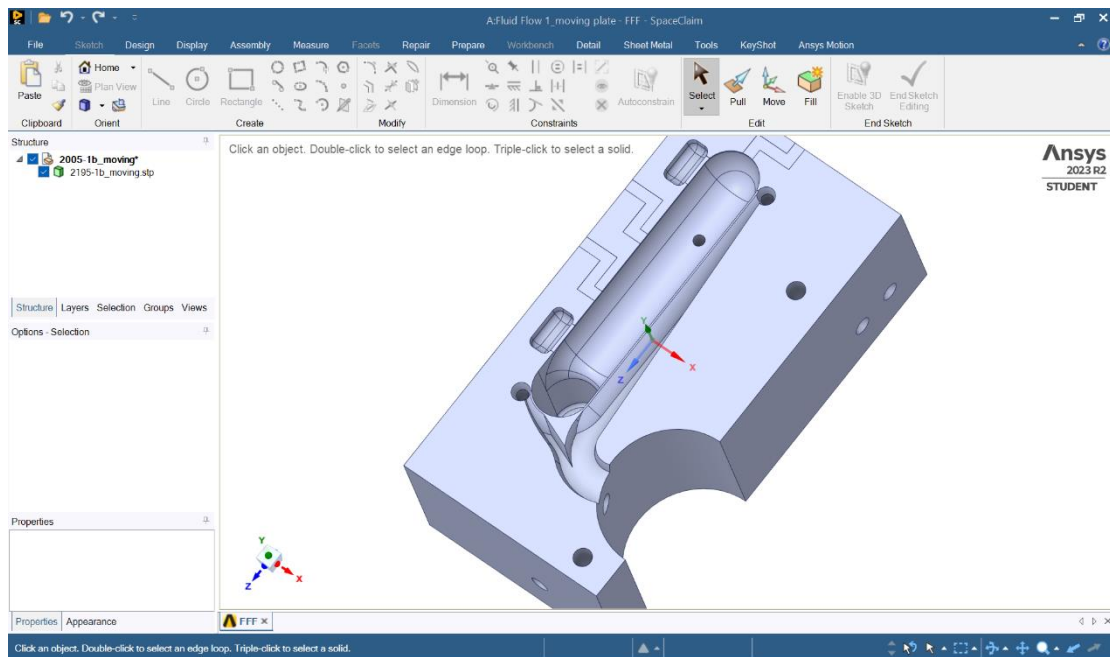
**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** σε περιβάλλον Space Claim, από το menu prepare επιλέγω την εντολή enclosure και την επιφάνεια του καλουπιού, απ' όπου θα εισέλθει το υγρό μέταλλο κατά τη διαδικασία της χύτευσης και √.

**Σημείωση:** στη συνέχεια από το αρχικό περιβάλλον στο πεδίο mesh επιλέγω edit, για να μπω στο CFD Pre Post, όπου στο παράθυρο διαλόγου details of mesh, καταχωρώ:

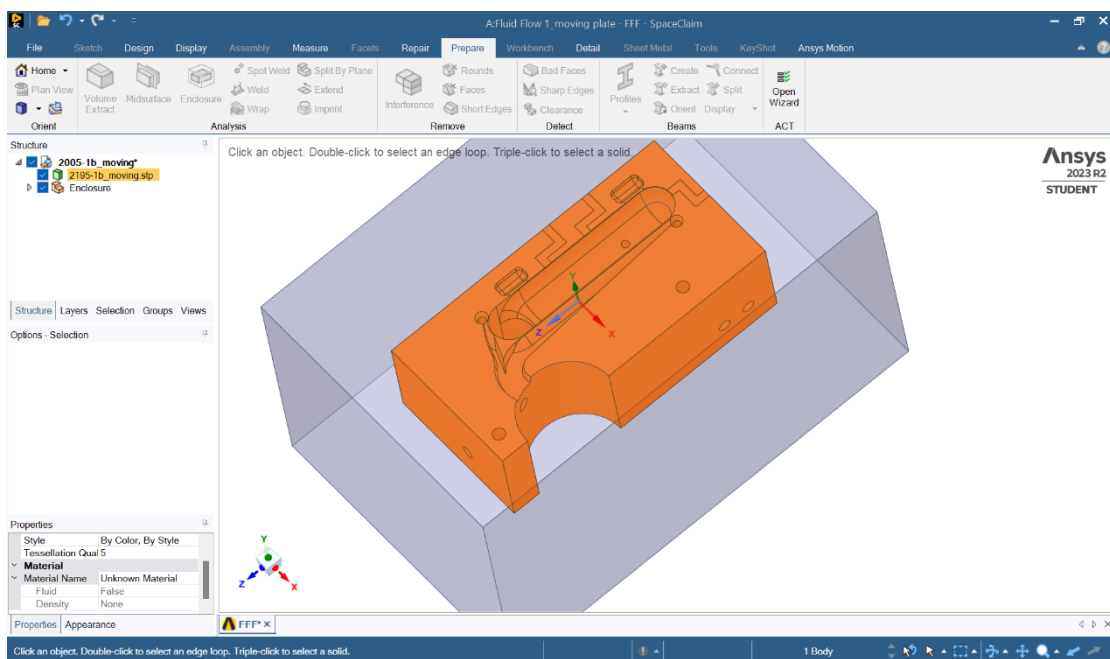
- element order: quadratic
- element size: 0,005m
- smoothing: high & generate

**Σημείωση:** στο δέντρο εργασιών, έχω διαγράψει το enclosure αντικείμενο από το πεδίο geometry

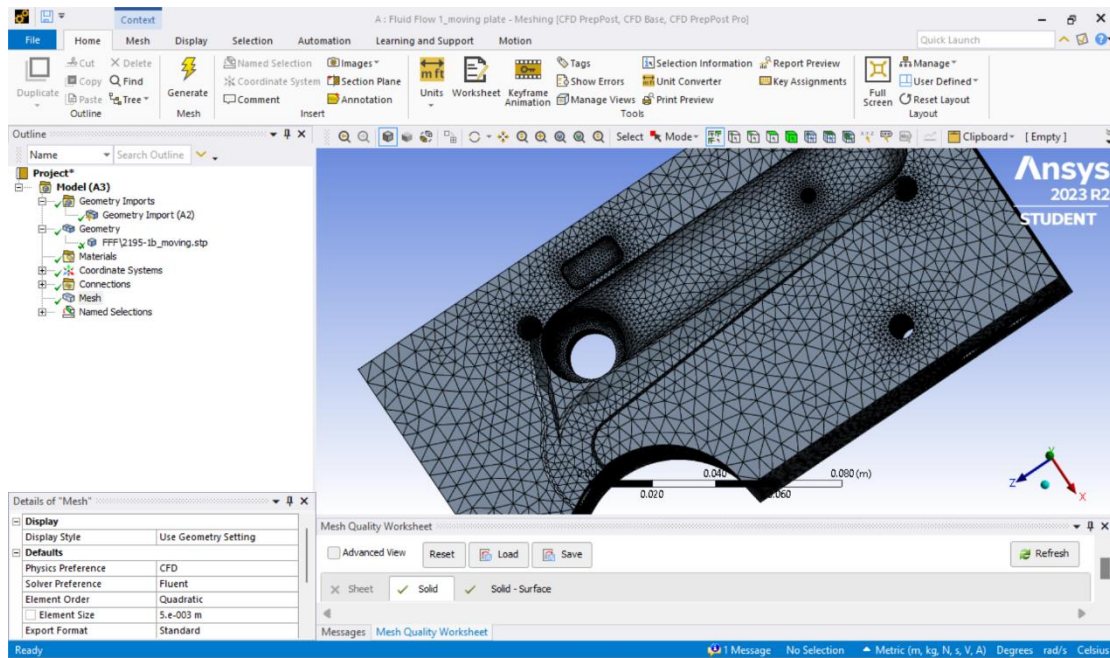




Εικόνα 120. Κατά την εισαγωγή του 3D αντικειμένου στο Space Claim με επιλογή του άξονα z όπου ρέει το υγρό μέταλλο



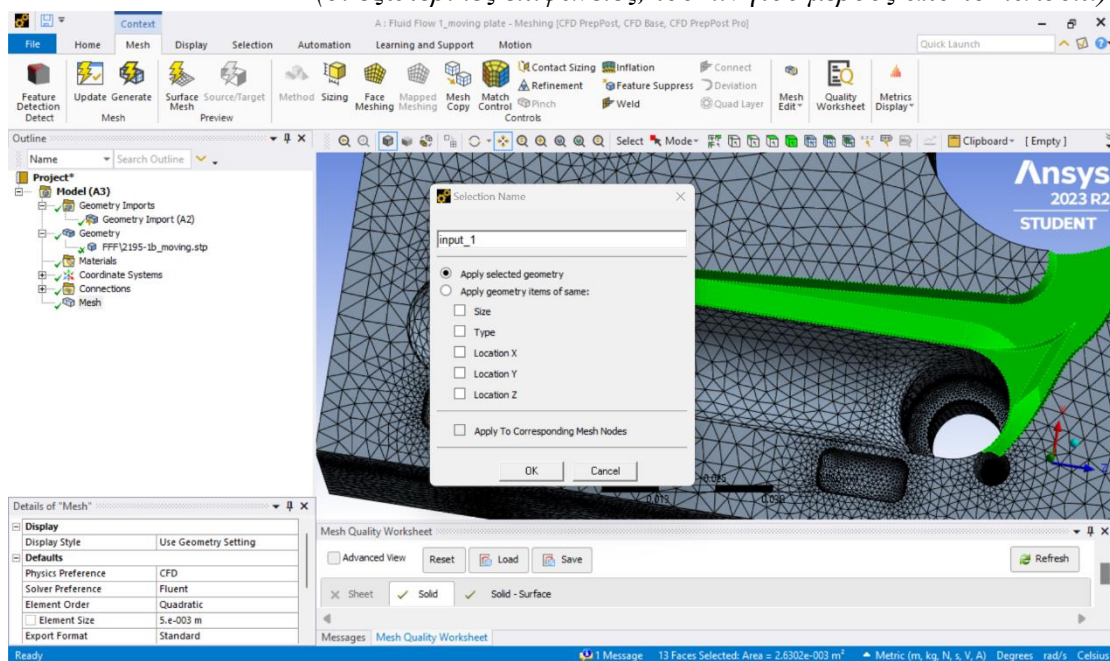
Εικόνα 121. Σχηματική απεικόνιση της χρήσης εντολής enclosure όπου τίθενται τα χωρικά όρια του 3D αντικειμένου



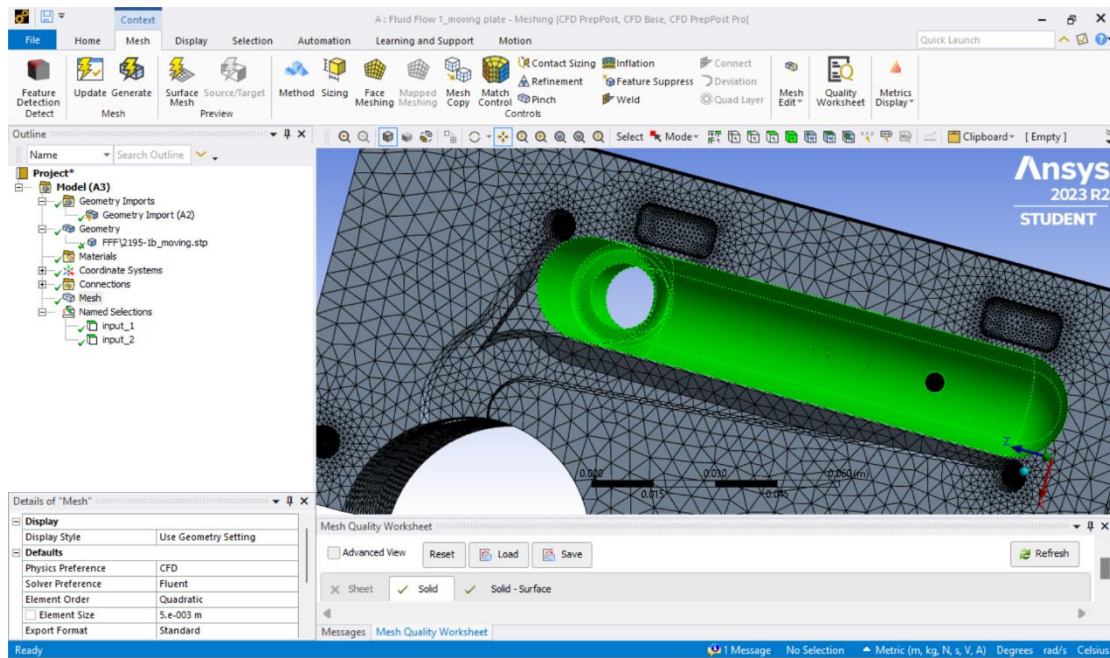
Εικόνα 122. Σχηματική απεικόνιση πλεγματοποίησης σε περιβάλλον CFD Pre Post

**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** με εντολή insert, από το δέντρο εργασιών στο mesh επιλέγω τις επιφάνειες εισόδου του υγρού μετάλλου και με δεξί κλικ create named selection, με τις ακόλουθες καταχωρήσεις:

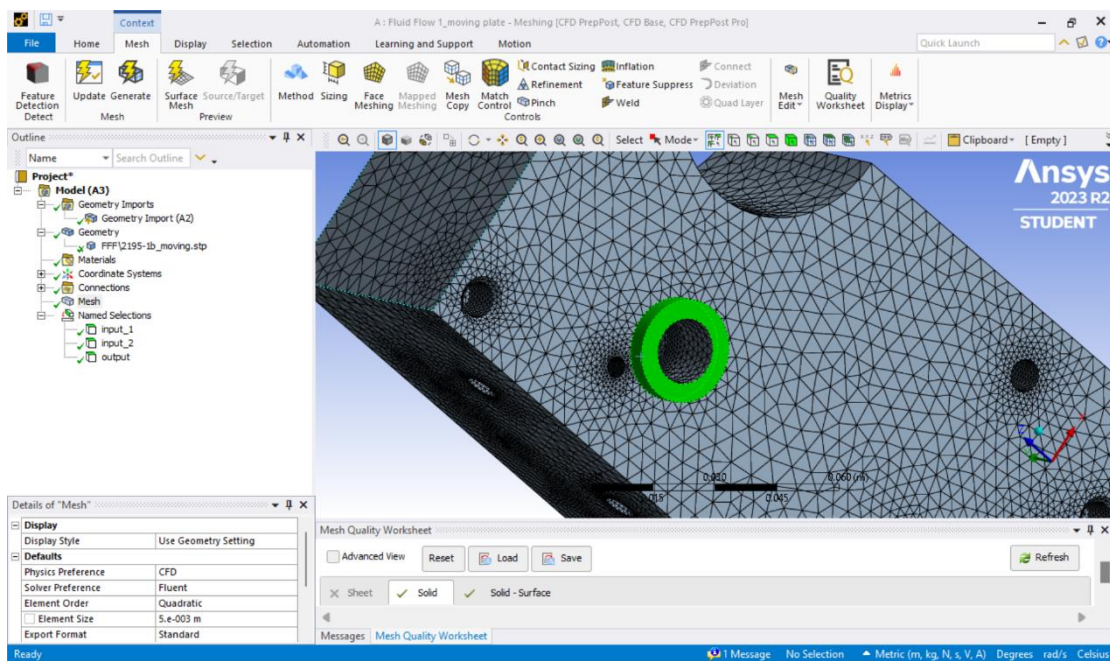
- input\_1 (η επιφάνεια, της πύλης εισόδου του υγρού μετάλλου)
- input\_2 (η επιφάνεια της κοιλότητας, όπου θα γίνει η πλήρωση με υγρό μέταλλο)
- output (η κυλινδρική επιφάνεια στο κάτω μέρος, όπου δημιουργεί το επάνω μέρος του λαιμού της χυτής χειρολαβής)
- external surface (οι εξωτερικές επιφάνειες, του κινητού μέρους από το καλούπι)



Εικόνα 123. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή της πρώτης επιφάνειας – πύλη εισόδου υγρού μετάλλου

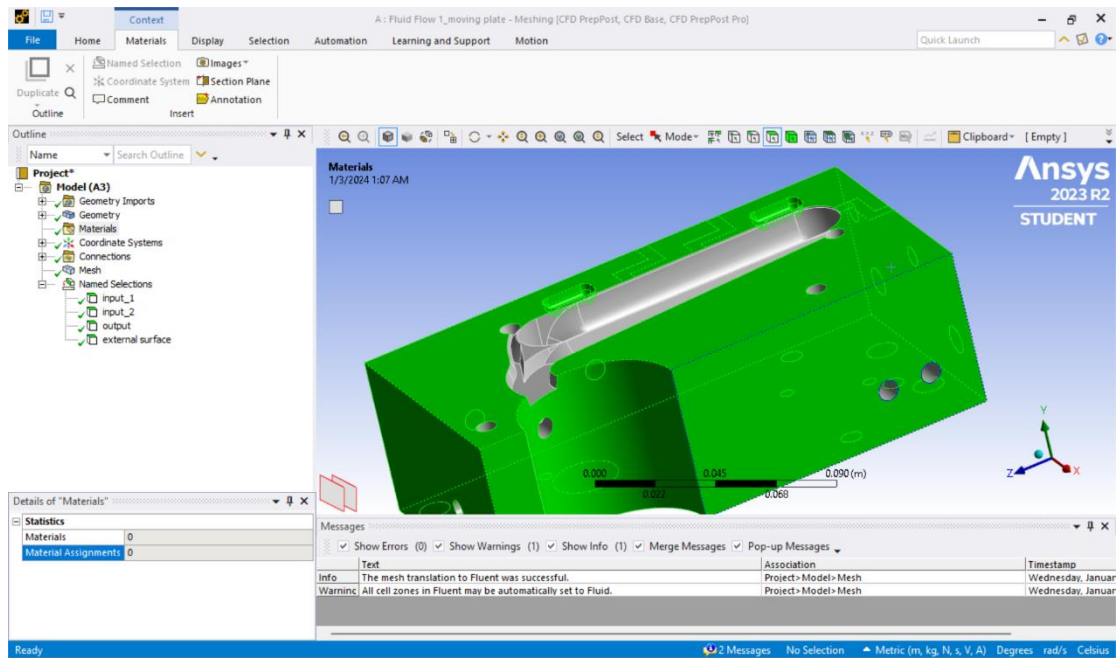


Εικόνα 124. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή των επιφανειών που απαρτίζουν την κοιλότητα στην οποία εισέρχεται το υγρό μέταλλο κατά τη χύτευση



Εικόνα 125. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή της εξωτερικής επιφάνειας η οποία συντελεί στη μορφοποίηση του επάνω μέρους από το λαιμό της χυτής χειρολαβής



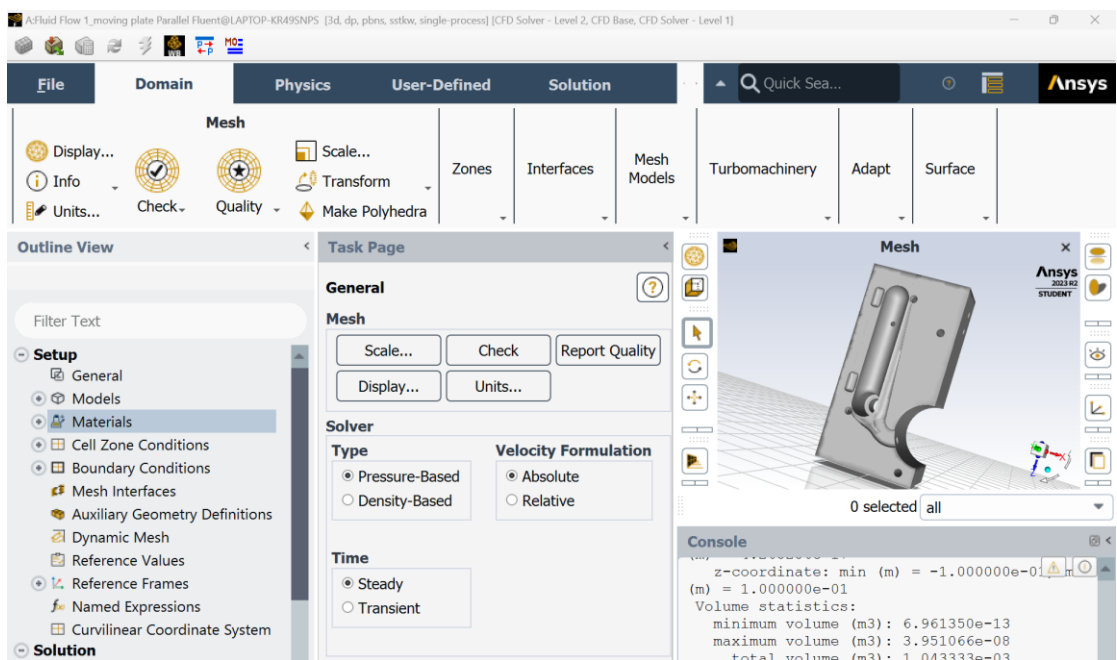


Εικόνα 126. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή των εξωτερικών επιφανειών που αποτελούν και το μέρος στήριξης στο σκελετό του καλουπιού

**Βήμα 4ο:** στο πεδίο setup – edit και στο παράθυρο διαλόγου  $\sqrt{\text{Double Precision}}$  (*solver options*) – start από τη γραμμή εντολών επιλέγω check – perform mesh check, ενώ από το παράθυρο διαλόγου του console βλέπουμε τα δεδομένα

**Σημείωση:** επίσης, από τη γραμμή εντολών, επιλέγω quality – evaluate mesh quality

**Σημείωση:** από το menu info – size όπου λαμβάνω ως δεδομένο το maximum aspect ratio =  $1,48289\text{e}+02$



Εικόνα 127. Εισαγωγή του 3D αντικειμένου στο περιβάλλον CFD Solver για την ανάπτυξη του μοντέλου επίλυσης

**Βήμα 5<sup>ο</sup>:** από το menu επιλέγω στο setup – models & energy (*off*), ενώ στη συνέχεια από το material – fluid και new, όπου στην καρτέλα καταχωρώ τα παρακάτω δεδομένα:

- name: zamak5
- material type: fluid
- density: 6,6 kg/m<sup>3</sup>
- viscosity: 2,636 για T = 420,3°C και create

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field contains 'zamak5'. The 'Material Type' is set to 'fluid'. Under 'Fluent Fluid Materials', 'zamak5' is selected. The 'Mixture' dropdown is set to 'none'. In the 'Properties' section, 'Density [kg/m³]' is set to 'constant' with a value of '6.6'. 'Viscosity [kg/(m s)]' is set to 'constant' with a value of '2.636'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. Buttons at the bottom are 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

Εικόνα 128. Καταχώρηση των βασικών ιδιοτήτων της πρώτης ύλης όπου θα οριστεί ως βασικό στοιχείο για την ανάλυση ροής

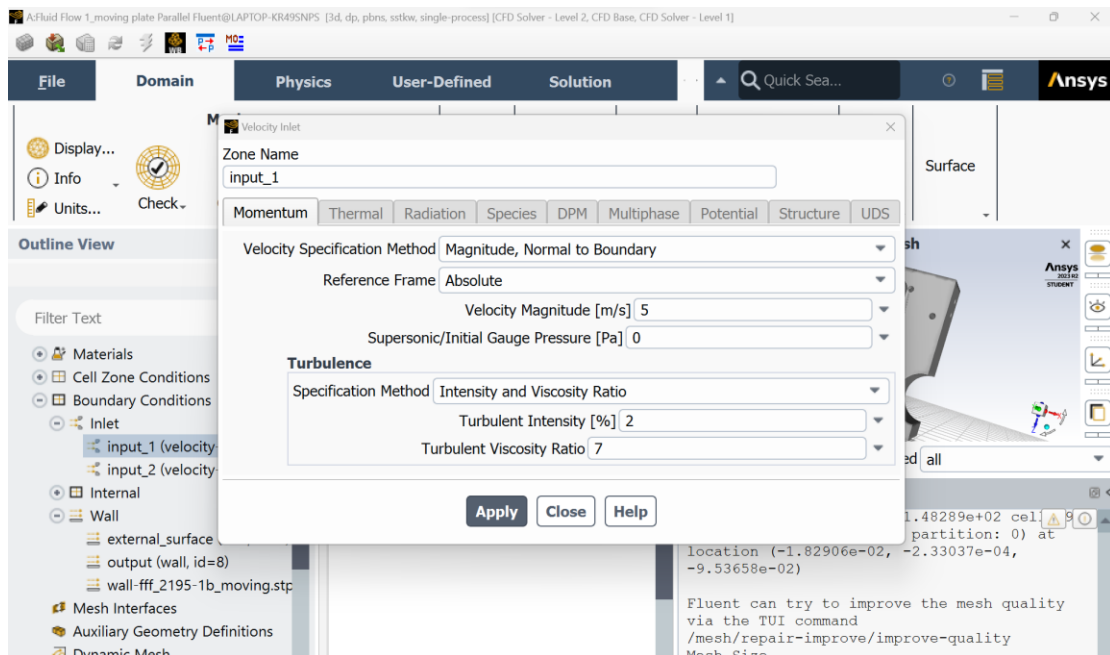
**Βήμα 6<sup>ο</sup>:** από το menu boundary conditions, επιλέγω το input\_1 και με δεξί κλικ velocity – inlet, καταχωρώντας:

- velocity magnitude: 5m/sec
- turbulent intensity: 2%
- turbulent viscosity ratio: 7

ενώ για το input\_2

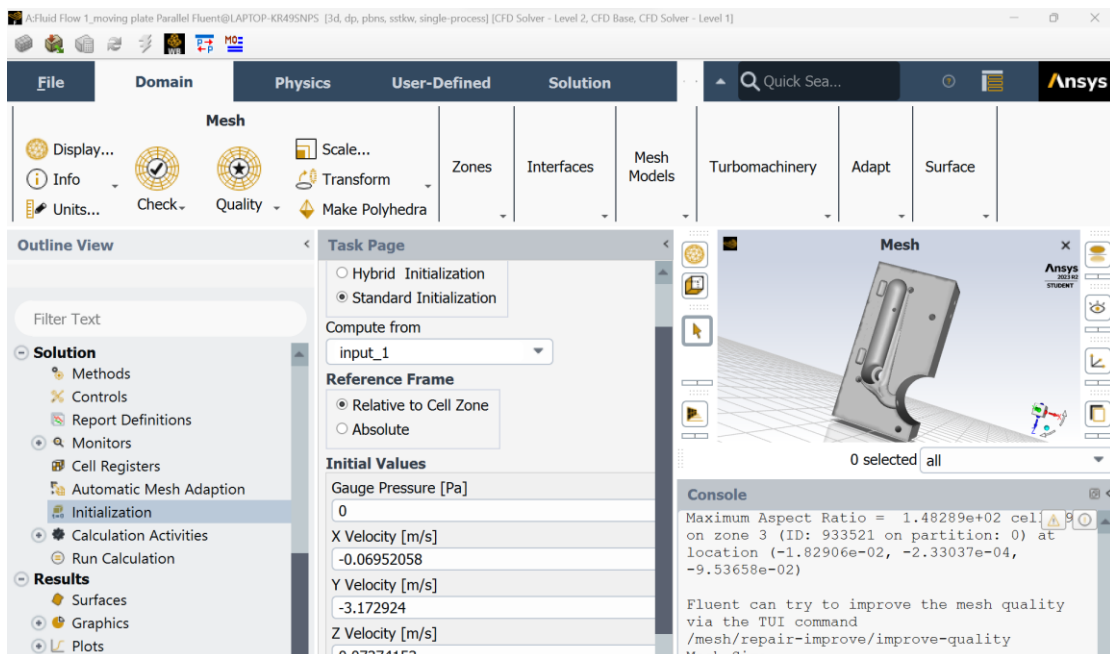
- velocity magnitude: 3,2m/sec
- turbulent intensity: 1,5%
- turbulent viscosity ratio: 5





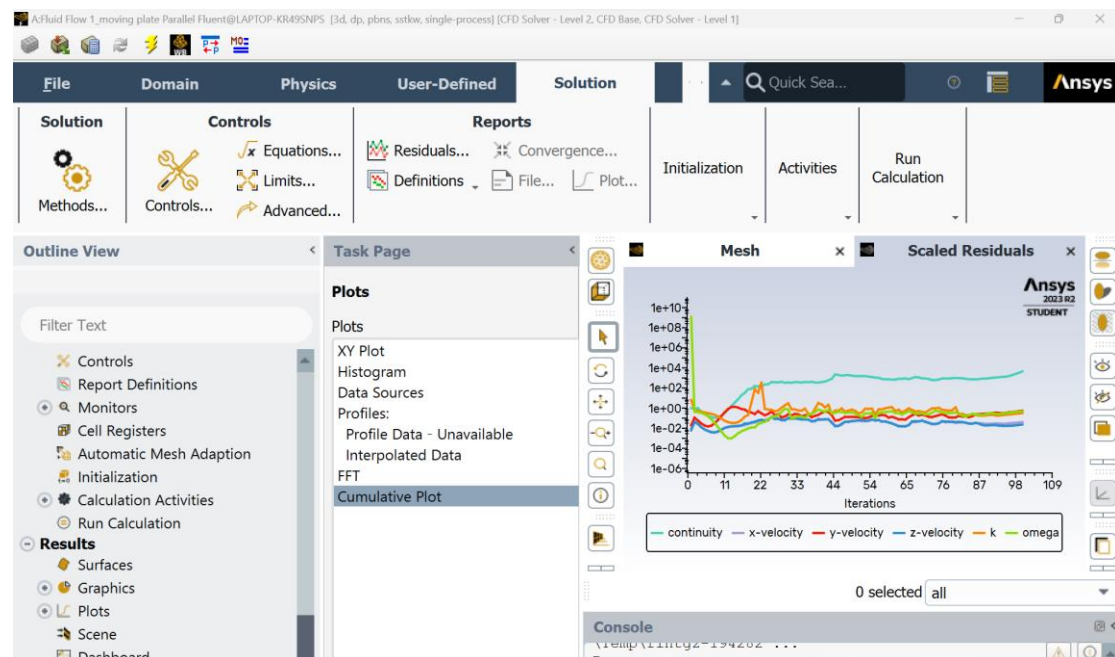
Εικόνα 129. Καταχώρηση ταχύτητας και τυρβώδους ροής υγρού μετάλλου για τη ζώνη input\_1 ως αρχικό σημείο εισόδου για την ανάλυση

**Βήμα 7<sup>ο</sup>:** από το δέντρο εργασιών, initialization – standard initialization – compute from: 1 & initialize

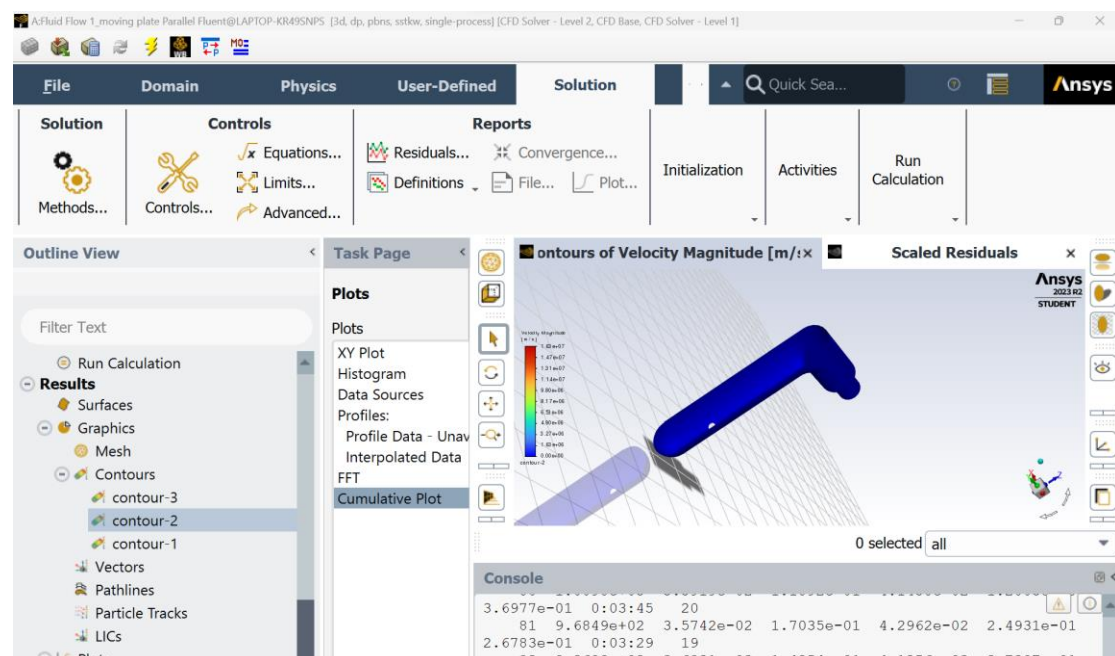


Εικόνα 130. Επιλογή κανονικής αρχικοποίησης για την επίλυση με σημείο αναφοράς την επιφάνεια input\_1

**Βήμα 8°:** από το δέντρο εργασιών, run calculation με number of iterations: 100 & calculate

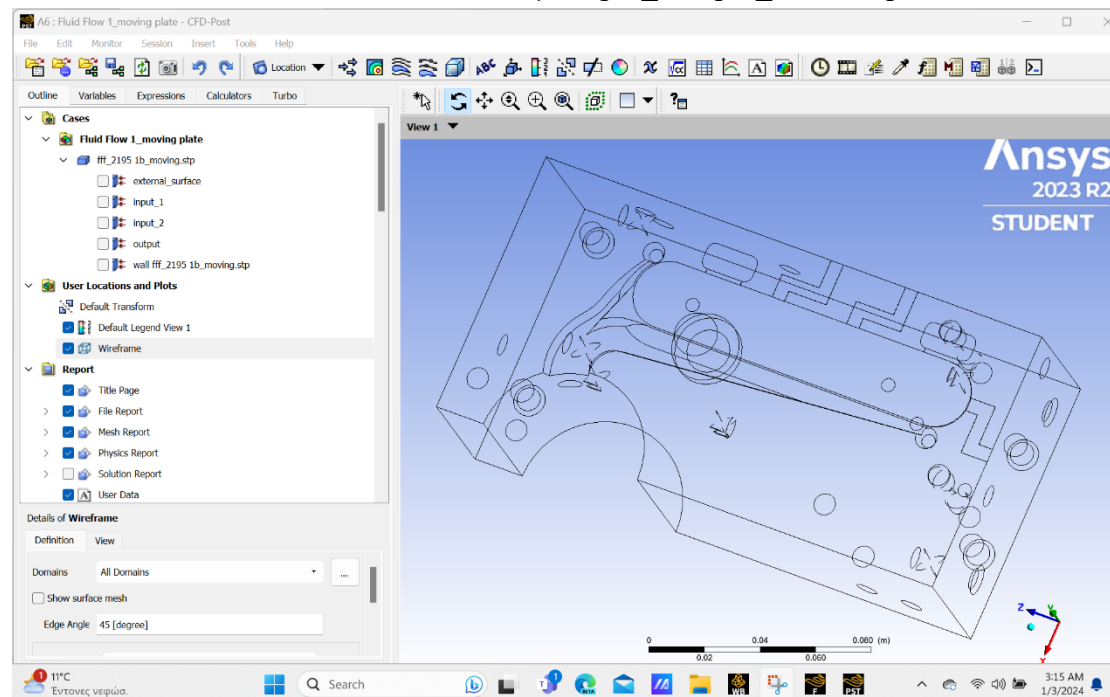


Εικόνα 131. Σχηματική απεικόνιση του συγκεντρωτικού γραφήματος για την ταχύτητα ροής στους 3 άξονες, της συνέχειας και των παραμέτρων k και omega με την ολοκλήρωση της επίλυσης

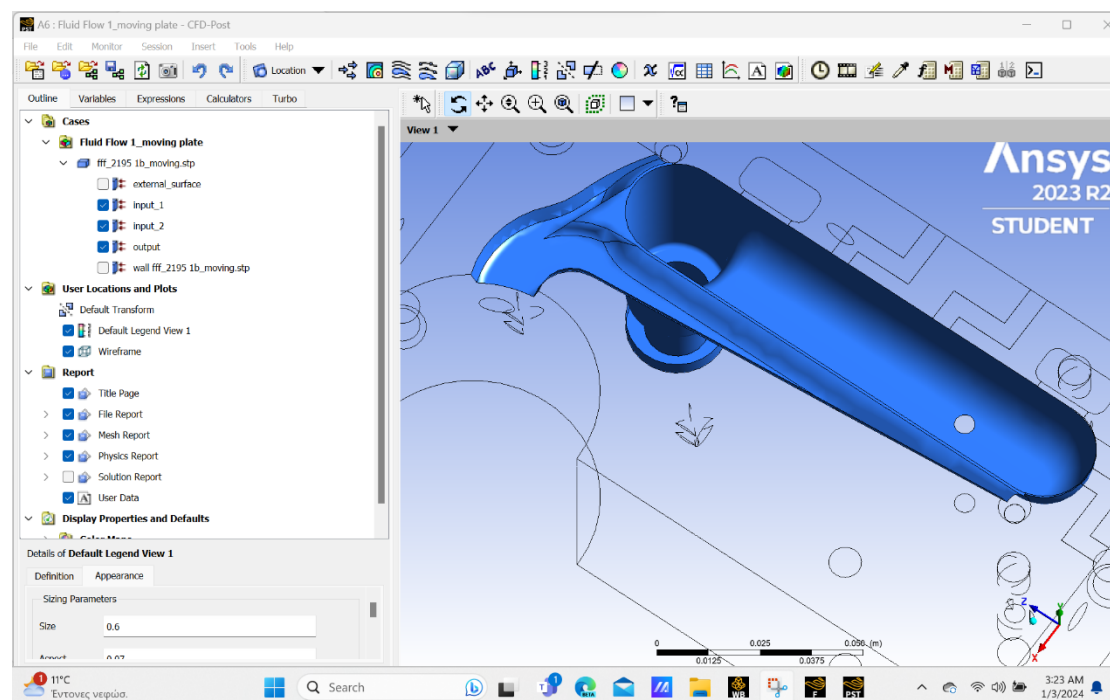


Εικόνα 132. Σχηματική απεικόνιση από την τελική μορφοποίηση του χυτού αντικειμένου βάσει της ροής μετάλλου εντός της κοιλότητας

**Βήμα 9<sup>ο</sup>:** από το αρχικό περιβάλλον, με διπλό κλικ στο πεδίο results εισάγομαι στο CFD Post όπου στο wireframe – edge angle: 45° και από τη γραμμή εντολών contour – contour1 – ok, ενώ στο locations επιλέγω input\_1, input\_2 και output



Εικόνα 133. Σχηματική απεικόνιση κατά την επιλογή results στο περιβάλλον Workbench ANSYS, όπου γίνεται εισαγωγή στον CFD Post του 3D αντικειμένου



Εικόνα 134. Οι επιφάνειες όπου ρέει το υγρό μέταλλο για την πλήρωση της κοιλότητας με σκοπό τη μορφοποίηση του χυτού αντικειμένου συναρτήσει των περιοχών που εμφανίζονται αστοχίες και χρίζουν τοπολογικής βελτιστοποίησης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Για κάθε επιχείρηση, που δραστηριοποιείται στον κλάδο της βιομηχανίας και δε της μεταποίησης όπως η εταιρεία CONVEX S.A της οποίας ο κύκλος δραστηριότητας (βάσει των πιστοποιήσεων της κατά ISO 9001:2015 & ISO 14001:2015) είναι «Σχεδιασμός, Κατασκευή και Εμπορία Μεταλλικών Εξαρτημάτων & Διακοσμητικών Στοιχείων για Έπιπλα & Εσωτερική Χρήση», έχει μεγάλη σημασία η εύρυθμη λειτουργία της γραμμής παραγωγής, στα πρωτογενή στάδια όπως η χύτευση με στόχο τη διατήρηση του ρυθμού, αλλά και της επίτευξης ποιοτικών στόχων, με επίκεντρο τη μείωση διαδικαστικών αστοχιών, αλλά και μη – συμμορφώσεων στα παραγόμενα προϊόντα.

Προς αυτή την κατεύθυνση, έχοντας βάλει στο μικροσκόπιο την παραγωγική φάση της χύτευσης και με μελέτη περίπτωσης χυτό αντικείμενο, το οποίο αφορά τον κωδικό χειρολαβής 2005 – 1 η οποία έχει μια αρκετά απλουστευμένη μορφή, όπου συμπεριλαμβάνεται στην κλασική γκάμα προϊόντων της εταιρείας, με βασικά φινιρίσματα της επιφάνειας, όπως διοχετεύεται στην αγορά.



Εικόνα 135. Απεικόνιση της χειρολαβής όπως βγαίνει από τη μηχανή χύτευσης ως πρώτο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας

Έχοντας παρακολουθήσει, τόσο την παραγωγική διαδικασία της συγκεκριμένης χειρολαβής ως προς τη χρήση και set up της μηχανής από τους χειριστές του τμήματος, τις παραμέτρους χύτευσης, αλλά και το ίδιο το αντικείμενο μέσω των οπτικών, διαστασιολογικών και λειτουργικών ελέγχων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η

ποιότητα του τελικού προϊόντος, βασίζεται στο μεγαλύτερο μέρος στους ακόλουθους παράγοντες:

- ❖ ο αρχικός σχεδιασμός του καλουπιού χύτευσης και η επιλογή κατάλληλου υλικού για την κατασκευή (*βάσει των συνθηκών λειτουργίας*)
- ❖ η ορθή συντήρηση για τη διατήρηση της λειτουργικότητας του καλουπιού
- ❖ η λειτουργική κατάσταση της μηχανής
- ❖ οι κρίσιμες παράμετροι χύτευσης
- ❖ η χρήση πιστοποιημένης πρώτης ύλης

Στην προσπάθεια, διερεύνησης για τη συσχέτιση των αιτιών ποιοτικών αστοχιών (*με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού σκάρτων, αλλά και του κόστους επιδιόρθωσης των επιφανειακών αστοχιών*) του χυτού αντικειμένου με βασικούς άξονες, το καλούπι, τις παραμέτρους χύτευσης (*δεδομένα από το set up της μηχανής και τις μετρήσεις των σημαντικών μεγεθών, που επενεργούν στη διαδικασία χύτευσης*) και την πρώτη ύλη, σημαντικό εργαλείο ήταν η μέθοδος προσομοίωσης, με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος ANSYS 2023 R2, όπου στην ουσία αναλύουμε τη το θερμικό φορτίο του καλουπιού, κατά την παραγωγική διαδικασία της χύτευσης.

Ως αποτέλεσμα, από τη χρήση του εν λόγω εργαλείου πολύ σημαντική είναι η κατανόηση των παραγόντων που αλληλοεπιδρούν τόσο μεταξύ τους, όσο και με την τελική ποιότητα δομής και επιφανείας του αντικειμένου, φέρνοντας στην επιφάνεια πεδία, όπως:

- ❖ ανάλυση του θερμικού φορτίου, για τη γεωμετρία του κώνου και του κινητού μέρους, ως συνεργαζόμενα μέρη κατά τη χύτευση, με συσχέτιση του υλικού κατασκευής των δομών (*case study\_1*), μέσω του μοντέλου Static structural και Steady – State Thermal
- ❖ ανάλυση του θερμικού φορτίου, για τη γεωμετρία του κινητού και σταθερού μέρους, κατόπιν συσχέτισης της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται κατά τη χύτευση, με προέκταση στην κόπωση που υφίστανται οι δομές ως προς τη φθορά σε βάθος χρόνου λειτουργίας και τη διάρκεια ζωής τους (*case study\_2*), μέσω του μοντέλου Transient structural και Transient Thermal
- ❖ τοπολογική βελτιστοποίηση των μερών του καλουπιού, με συσχέτιση ως προς τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη και το υλικό κατασκευής των δομικών μερών, με την επενέργεια της υδροστατικής πίεσης (*case study\_3*), μέσω του μοντέλου Structural Optimization



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Parth Lakum, Student M.E. CAD/CAM, A.I.T.S, Rajkot, Gujarat, India «*Shrinkage Porosity & Temperature Distribution analysis of air-cooled Cylinder liner block of Grey cast iron – ASTM class 35*», Vol-2 Issue-3 2016, available from: [www.ijariie.com](http://www.ijariie.com), pp. 569 – 576
2. B.Gangadevi, U.G.Scholars Department of Mech, Nalanda Institute of Engineering & Technology, Sattenapalli «*Design and Analysis of Die Casting Mold*», August 2021, Journal for Modern Trends in Science and Technology, pp. 167 – 171
3. Doru M. Stefanescu, The Ohio State University «*Fundamentals of Solidification*», February 2014, available from: <https://www.researchgate.net/publication/260038120>, pp. 1 – 16
4. Utkarsh Chadha, Department of Manufacturing Engineering, School of Mechanical Engineering (SMEC), Vellore Institute of Technology (VIT), Vellore 632014, Tamil Nadu, India «*Phase Change Materials in Metal Casting Processes: A Critical Review and Future Possibilities*», February 2022, available from: <https://doi.org/10.1155/2022/7520308>, pp. 2 – 8
5. Sang Chol Om, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology «*A simulation method for the optimization of cooling water slot structure in slab continuous casting mold combined with submerged entry nozzle*», June 2023, available from: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11671-z>, pp. 3223 - 3237
6. Jian Yang, ISIJ International «*A three-dimensional real-time heat transfer model for continuous casting blooms*», May 2023, available from: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-051>, pp. 4 – 22
7. Junhao Sun, Department of Metallurgical and Materials Engineering Campus of Jiangsu University of Science and Technology «*Casting process design of high pressure and heat resistant steam chamber casting*», Volume 62 (2023), available from: Highlights in Science, Engineering and Technology, pp. 157 – 163
8. Vaibhav Ingle, ME Mechanical Student, SCOE, Navi Mumbai «*Defects, Root Causes in Casting Process and Their Remedies: Review*», March 2017, available from: [www.ijera.com](http://www.ijera.com), pp. 47 – 52

9. Kai-tian Zhang, ISIJ International «*Comprehensive Evaluation Method for Cooling Effect on Process Thermal Dissipation Rate during Continuous Casting Mold*», February 2023, available from: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-478>, pp. 2 – 23
10. Genick Bar–Meir, «*Fundamentals of Die Casting Design*», July 2023, available from: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5523594>, pp. 125 – 161
11. Frank E Goodwin, International Zinc Association «*Zinc and Zinc Alloy Castings*», June 2008, available from: <http://ijesc.org/>, pp. 20168 - 20170
12. P. Capela, Journal of Materials Engineering and Performance «*Experimental Analysis of Heat Transfer at the Interface between Die Casting Molds and Additively Manufactured Cooling Inserts*», June 2023, available from: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08425-z>, pp. 1 – 6
13. Dr. Frank E. Goodwin, NADCA «*Zinc Die Casting Alloys: Past, Present and Future*», 2009, available from: [www.diecastingengineer.org](http://www.diecastingengineer.org), pp. 50 - 55
14. Frank E Goodwin, International Zinc Association «*Update on the New High Fluidity Zinc Die Casting Alloy*», November 2020, available from: <https://www.researchgate.net/publication/345126034>, pp. 30 – 31
15. Guohui Li, Science and Technology Department, Gongqing Institute of Science and Technology «*Flow and Heat Transfer on the Surface of Molten Steel Slag Layer in Continuous Casting Mold*», 5 September 2023, available from: <https://www.mdpi.com/journal/coatings>, pp. 1 – 9
16. Genick Bar-Meir, Potto Project NFP «*Intensification Pressure in Die Casting*», May 2023, available from: <https://www.researchgate.net/publication/370679503>, pp. 47 – 51
17. V. Muthuraman, Mechanical Engineering Department, Vels University, Chennai, India «*MODELLING AND SIMULATION ANALYSIS OF METAL CASTINGS*», March 2017, available from: [www.arpnjournals.com](http://www.arpnjournals.com), pp. 1876 – 1878
18. Xiong Shoumei, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing «*An efficient thermal analysis system for the die-casting process*», January 2002, available from: [www.elsevier.com/locate/jmatprotec](http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec), pp. 19 – 24
19. J. Tušek, University of Ljubljana «*Thermal fatigue cracking of Die-casting dies*», January 2010, available from: <https://www.researchgate.net/publication/26843741>, pp. 9 – 12

20. Joeun Choi, Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul  
«*Fatigue Life Prediction Methodology of Hot Work Tool Steel Dies for High-Pressure Die Casting Based on Thermal Stress Analysis*», October 2022, available from: <https://www.mdpi.com/journal/metals>, pp. 2 – 16
21. JAN MAJERNIK, Institute of Technology and Business in Ceske Budejovice  
«*EVALUATION OF THERMAL CONDITIONS AT CAST-DIE CASTING MOLD INTERFACE*», November 2020, MM SCIENCE JOURNAL, pp. 4112 – 4117
22. Chang Li, Harbin Engineering University «*Study on the Temperature Field of Casting Process in ANSYS*», December 2011, available from: <https://www.researchgate.net/publication/271626708>, pp. 856 – 860
23. Manar Takla, Al-Baath University «*Thermal analysis using ANSYS Workbench Program*», November 2022, available from: <https://www.researchgate.net/publication/366714843>, pp. 1 – 9

## **Παράρτημα**

Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση των βασικών μερών μιας χυτόπρεσσας που επενεργούν στη διαδικασία της χύτευσης (σελ. 13)

Εικόνα 2. Διάγραμμα μεταβολής ελεύθερης ενέργειας κατά το στάδιο στερεοποίησης (σελ. 15)

Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση της απόστασης από τη διεπιφάνεια υγρού – στερεού συναρτήσει της θερμοκρασίας (σελ. 16)

Εικόνα 4. Σχηματική απεικόνιση, της στερεοποίησης των κραμάτων μετάλλου με την επενέργεια του καλουπιού, στις αντίστοιχες θερμοκρασιακές μεταβολές (σελ. 16)

Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση της κρυσταλλικής δομής του χυτού κατά τη στερεοποίηση, από υγρή σε στερεά κατάσταση (σελ. 17)

Εικόνα 6. Σχηματική απεικόνιση των σταδίων ανάπτυξης (σελ. 17)

Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση για τα είδη καλουπιών die casting (σελ. 18)

Εικόνα 8. Σχηματική απεικόνιση βασικών στοιχείων μιας μηχανής χύτευσης που επενεργούν στην παραγωγική διαδικασία (σελ. 22)

Εικόνα 9. Σχηματική απεικόνιση κατηγοριοποίησης της διαδικασίας χύτευσης (σελ. 25)

Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση της ροής εργασιών κατά την παραγωγική διαδικασία της χύτευσης (σελ. 27)

Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ισορροπίας φάσεων Al – Zn (σελ. 30)

Εικόνα 12. Σχηματική απεικόνιση της κρυσταλλικής δομής διμερούς κράματος Zn – Al βάσει διαγράμματος ισορροπίας (σελ. 32)

Εικόνα 13. Απεικόνιση 3D μοντέλου για καλούπι hot die casting (σελ. 35)

Εικόνα 14. Απεικόνιση προσομοίωσης χύτευσης αντικειμένου μέσω του λογισμικού ANSYS (σελ. 36)

Εικόνα 15. Καλούπι χύτευσης εν θερμώ κατασκευασμένο από χάλυβα ASSAB 8418 (σελ. 38)

Εικόνα 16. Τιμές ειδικής πίεσης για κράματα αλουμινίου, ψευδαργύρου και ορείχαλκου (σελ. 40)

Εικόνα 17. Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ροής εργασιών της διαδικασίας χύτευσης (σελ. 44)

Εικόνες 18 & 19. Πίνακας ελέγχου θερμοκρασίας υγρού μετάλλου και φούρνου της χυτόπρεσσας 101A (σελ. 46)

Εικόνα 20. Τελικό προϊόν χειρολαβής 2005ROY-R-S05S05 (σελ. 47)

Εικόνα 21. Κατηγοριοποίηση χυτοπρεσσών (σελ. 49)

Εικόνες 22 & 23. Το υδραυλικό σύστημα και σύστημα τροφοδοσίας (με φλόγιστρο) της χυτόπρεσσας (σελ. 50)

Εικόνα 24. Θερμική ανάλυση χυτού αντικειμένου μέσω του ANSYS CFD (σελ. 53)

Εικόνα 25. Κατασκευαστικό σχέδιο χειρολαβής από zamak5 ως χυτό αντικείμενο (σελ. 55)

Εικόνα 26. Τοποθέτηση κώνου στο κινητό μέρος του καλουπιού χύτευσης (σελ. 57)

Εικόνα 27. Εισαγωγή του static structural με τα πεδία τα οποία θα αναπτυχθούν για το πρώτο μοντέλο (σελ. 59)

Εικόνες 28 & 29. Καταχώρηση των δεδομένων του υλικού τα οποία είναι χρήσιμα για την ανάπτυξη του πρώτου μοντέλου (σελ. 60)

Εικόνες 30 & 31. Η εισαγωγή της γεωμετρίας του 3D μοντέλου επαληθεύεται μέσα στο project schematic και η πλεγματοποίηση (σελ. 61)

Εικόνα 32. Επιλογή της επιφάνειας του κώνου που εδράζεται στο καλούπι (σελ. 62)

Εικόνες 33 & 34. Καταχώρηση των θερμοκρασιών του κώνου και των πιέσεων (σελ. 63)

Εικόνα 35. Καθορισμός επιφανειών για τις φορτίσεις (σελ. 64)

Εικόνα 36. Επιλογές επίλυσης βάσει θερμοκρασιακής φόρτισης και πίεσης (σελ. 64)

Εικόνα 37. Σχηματική απεικόνιση του total deformation βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης (σελ. 65)

Εικόνα 38. Σχηματική απεικόνιση του thermal strain βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης (σελ. 65)

Εικόνα 39. Σχηματική απεικόνιση του elastic strain intensity βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης (σελ. 66)

Εικόνα 40. Σχηματική απεικόνιση του stress intensity βάσει του θερμικού και δυναμικού φορτίου, κατά τη διάρκεια της χύτευσης (σελ. 66)

Εικόνες 41 & 42. Σχηματική απεικόνιση των περιοχών που καταπονούνται κατά τη χύτευση μέσω του fatigue tool για τη διάρκεια ζωής και τη φθορά (σελ. 67)

Εικόνα 43. Δημιουργία πλέγματος για το κινητό μέρος του καλουπιού (σελ. 68)

Εικόνες 44 & 45. Σχηματική απεικόνιση των δυο φορτίσεων, ώστε να είναι εφικτή η θερμική ανάλυση (σελ. 69)

Εικόνα 46. Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης επίλυσης για το κινητό μέρος του καλουπιού (σελ. 70)



Εικόνα 47. Σχηματική απεικόνιση, της ανάπτυξης του εργαλείου καταπόνησης σε κρίσιμα στάδια μέσω γραφημάτων, με γνώμονα τη μέση πίεση για το κινητό μέρος (σελ. 71)

Εικόνα 48. Σχηματική απεικόνιση, των περιοχών στην επιφάνεια που παρουσιάζουν τη μικρότερη διάρκεια ζωής, λόγω των φορτίσεων (σελ. 71)

Εικόνα 49. Σχηματική απεικόνιση, των περιοχών στην επιφάνεια του κινητού μέρους όπου έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης φθοράς, σε βάθος χρόνου και εφόσον το καλούπι έχει λειτουργήσει σε περισσότερους κύκλους, από την αρχική σχεδίαση (σελ. 72)

Εικόνα 50. Σχηματική απεικόνιση, του συντελεστή ασφαλείας αναφορικά με το κινητό μέρος για κύκλους λειτουργίας, περισσότερους από την αρχική σχεδίαση (σελ. 72)

Εικόνα 51. Σχηματική απεικόνιση της σύνδεσης των πεδίων και της συσχέτισης μοντέλου μετά και την επίλυση θερμικής ανάλυσης (σελ. 73)

Εικόνα 52. Πλεγματοποίηση του 3D μοντέλου για το καλούπι στο σύνολο του (κινητό και σταθερό μέρος, όπου στην επιφάνεια διεπαφής εισέρχεται το ρευστό) (σελ. 73)

Εικόνα 53. Σχηματική απεικόνιση του ορισμού θερμοκρασιών (σελ. 74)

Εικόνα 54. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού περιοχών στην επιφάνεια του κινητού μέρους, όπου ασκείται το θερμικό φορτίο κατά τη διαδικασία της χύτευσης (σελ. 75)

Εικόνα 55. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού συστήματος καλούπι – ρευστό όπου ασκείται το θερμικό φορτίο (σελ. 75)

Εικόνες 56 & 57. Σχηματική απεικόνιση των πεδίων επίλυσης για το σύστημα (σελ. 76)

Εικόνες 58 & 59. Σχηματική απεικόνιση των πρώτων βημάτων για την ανάπτυξη του μοντέλου thermal transient με τη συσχέτιση του υλικού για τη χύτευση (σελ. 77)

Εικόνα 60. Καταχώρηση των χρήσιμων στοιχείων για την πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο θερμικής ανάλυσης (σελ. 78)

Εικόνα 61. Συσχέτιση της πρώτης ύλης στη δομή του καλουπιού (σελ. 79)

Εικόνα 62. Σχηματική απεικόνιση του συσχετισμού μερών του καλουπιού ως προς την πρώτη ύλη και την επιφάνεια διεπαφής στο κινητό μέρος του καλουπιού (σελ. 79)

Εικόνα 63. Σχηματική απεικόνιση του πλέγματος για το 3D αντικείμενο του καλουπιού (σελ. 80)

Εικόνα 64. Καθορισμός της αρχικής θερμοκρασίας zamak5 στην υγρή μορφή του που εισέρχεται στο καλούπι (σελ. 80)

Εικόνα 65. Καθορισμός των χρόνων στους οποίους θα γίνει η θερμική ανάλυση και σχετίζονται με τα χρονικά στάδια ενός πλήρους κύκλου χύτευσης (σελ. 81)

Εικόνες 66 & 67. Προσθήκη του πεδίου temperature στο μοντέλο θερμικής ανάλυσης και καθορισμός της κατεύθυνσης ροής του ρευστού μέσα στο καλούπι, καθώς και των θερμοκρασιών του για 5 διαδοχικά πατήματα, της χυτόπρεσσας (σελ. 82)

Εικόνα 68. Συσχετισμός των θερμοκρασιακών ορίων από το ψυκτικό μέσο και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κατά τη διάρκεια της χύτευσης (σελ. 83)

Εικόνα 69. Καθορισμός επιφανειών που συνδέονται με το συνεργαζόμενο εξάρτημα του καλουπιού και επιδρά στη μετάδοση θερμότητας, κατά τη διαδικασία της χύτευσης (σελ. 83)

Εικόνα 70. Κατανομή του θερμικού φορτίου στο σταθερό μέρος του καλουπιού βάσει των καταγεγραμμένων τιμών θερμοκρασίας, για 5 συνεχόμενα πατήματα (σελ. 84)

Εικόνα 71. Κατανομή του θερμικού φορτίου, σε όλο το καλούπι κατά την είσοδο του ρευστού μετάλλου στην κοιλότητα, βάσει των καταγεγραμμένων τιμών θερμοκρασίας, για 5 συνεχόμενα πατήματα (σελ. 85)

Εικόνα 72. Καθορισμός της θερμοκρασίας του ρευστού μετάλλου εντός του καλουπιού, σε συνδυασμό με την κατεύθυνση του για 5 συνεχόμενα πατήματα (σελ. 85)

Εικόνα 73. Σχηματική απεικόνιση, της σύνδεσης του υλικού χύτευσης με τη δομή του καλουπιού (σταθερό και κινητό μέρος) στο οποίο εισέρχεται, κατά τη διαδικασία της χύτευσης (σελ. 86)

Εικόνα 74. Σχηματική απεικόνιση, του ορισμού των επιφανειών όπου το zamak5 έρχεται σε επαφή με τα μέρη του καλουπιού (σελ. 87)

Εικόνα 75. Σχηματική απεικόνιση, της πλεγματοποίησης του 3D αντικειμένου (σελ. 87)

Εικόνα 76. Σχηματική απεικόνιση, του καθορισμού χρόνου όπου θα γίνει η ανάλυση (σελ. 88)

Εικόνα 77. Σχηματική απεικόνιση, του καθορισμού των επιφανειών που σχετίζονται με fixed support (σελ. 88)

Εικόνες 78 & 79. Σχηματική απεικόνιση, του καθορισμού θερμικού φορτίου για το σταθερό και κινητό μέρος του καλουπιού (σελ. 89)

Εικόνες 80 & 81. Σχηματική απεικόνιση, των επιφανειών όπου έρχεται σε επαφή το zamak5 κατά τη διαδικασία της χύτευσης, καθώς επίσης και η επενέργεια της υδροστατικής πίεσης δηλώνοντας παράλληλα, ως environment temperature 32°C (σελ. 91)

Εικόνες 82 & 83. Σχηματική απεικόνιση, της συνολικής παραμόρφωσης των μερών του καλουπιού σε χρόνο 4sec (διάρκεια πλήρους κύκλου χύτευσης), κατόπιν της επενέργειας του zamak5 (σελ. 91)

Εικόνες 84 & 85. Σχηματική απεικόνιση, της ελαστικής καταπόνησης κατά τη διάρκεια της χύτευσης, σε χρόνο 4sec για τα δυο μέρη του καλουπιού (σελ. 92)

Εικόνες 86 & 87. Σχηματική απεικόνιση, των επιφανειών που παρουσιάζουν ευαισθησία για μελλοντική πιθανή επιφανειακή αστοχία, με δεδομένο τη διάρκεια ζωής του καλουπιού (σελ. 93)

Εικόνες 88 & 89. Σχηματική απεικόνιση, των επιφανειών που παρουσιάζουν τη μικρότερη διάρκεια ζωής, σε βάθος χρόνο με max όριο τους κύκλους λειτουργικής σχεδίασης (σελ. 94)

Εικόνες 90 & 91. Επιφανειακή αστοχία με εμφάνιση πόρων περιφερειακά της χειρολαβής (περιοχή ραφής μπουκαδούρας από το κλείσιμο του καλουπιού) και στην επάνω επιφάνεια, καθώς και αναδιπλώσεων στην περιοχή του λαιμού (σελ. 95)

Εικόνα 92. Περίσσεια υλικού στην περιοχή των εξωλκείων (σελ. 96)

Εικόνα 93. Τα πεδία στα οποία θα αναπτυχθούν τα μοντέλα της κατασκευαστικής βελτιστοποίησης (σελ. 97)

Εικόνα 94. Το περιβάλλον όπου θα αναπτυχθεί το μοντέλο structural optimization (σελ. 98)

Εικόνα 95. Καθορισμός εξωτερικών επιφανειών στερεοποίησης στο σκελετό του καλουπιού optimization (σελ. 98)

Εικόνα 96. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού υδροστατικής πίεσης του zamak5 στην επιφάνεια της κοιλότητας (σελ. 99)

Εικόνα 97. Σχηματική απεικόνιση των τιμών της υδροστατικής πίεσης από την είσοδο του zamak5 μέσα στην κοιλότητα (σελ. 99)

Εικόνα 98. Σχηματική απεικόνιση της πλεγματοποίησης του κινητού μέρους (σελ. 100)

Εικόνα 99. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού επιφάνειας αρχικού σχεδιασμού στο κινητό μέρος (σελ. 100)

Εικόνα 100. Σχηματική απεικόνιση των στόχων που θέτω για την τοπολογική βελτιστοποίηση (σελ. 101)

Εικόνα 101. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού περιορισμού απόκρισης όπου στο πεδίο percent to retain: 55% ως προς τη συνολική μάζα του κινητού μέρους (σελ. 101)

Εικόνα 102. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού manufacturing constraint για το κινητό μέρος του καλουπιού (σελ. 102)

Εικόνα 103. Σχηματική απεικόνιση του 3D αντικειμένου μέσα στο περιβάλλον space claim όπου θα εξετάσω τις περιοχές τοπολογικής βελτιστοποίησης (σελ. 103)

Εικόνες 104 & 105. Σχηματική απεικόνιση των σημείων του πλέγματος της επιφάνειας που υπόκεινται σε τοπολογική βελτιστοποίηση (σελ. 104)

Εικόνα 106. Σχηματική απεικόνιση των περιοχών τοπολογικής βελτιστοποίησης (σελ. 104)

Εικόνες 107 & 108. Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της τοπολογικής βελτιστοποίησης για το κινητό μέρος του καλουπιού (σελ. 105)

Εικόνες 109 & 110. Ορισμός fixed support & hydrostatic pressure (σελ. 106)

Εικόνες 111 & 112. Σχηματική απεικόνιση της κατανομής υδροστατικής πίεσης βάσει της πυκνότητας του ρευστού μετάλλου, αναφορικά με την επιφάνεια ροής του όπως επίσης και της πλεγματοποίησης του κινητού μέρους (σελ. 107)

Εικόνες 113 & 114. Σχηματική απεικόνιση των συνοριακών περιορισμών στο σταθερό μέρος του καλουπιού καθώς του response constraint κατά 55% της συνολικής μάζας του αντικειμένου (σελ. 108)

Εικόνες 115 & 116. Σχηματική απεικόνιση του καθορισμού κατασκευαστικού περιορισμού και τοπολογικής πυκνότητας κατά την επίλυση (σελ. 109)

Εικόνα 117. Σχηματική απεικόνιση της περιοχής στην κάτω επιφάνεια του σταθερού μέρους του καλουπιού η οποία επιδέχεται τοπολογική βελτιστοποίηση (σελ. 110)

Εικόνα 118. Το σταθερό μέρος του καλουπιού τοποθετημένο στο σκελετό κατά τη χύτευση (σελ. 110)

Εικόνα 119. Εισαγωγή του Fluid Flow (*Fluent*) για την ανάλυση ροής εντός του κινητού μέρους από το μελετώμενο καλούπι (σελ. 111)

Εικόνα 120. Κατά την εισαγωγή του 3D αντικειμένου στο Space Claim με επιλογή του άξονα z όπου ρέει το υγρό μέταλλο (σελ. 112)

Εικόνα 121. Σχηματική απεικόνιση της χρήσης εντολής enclosure όπου τίθενται τα χωρικά όρια του 3D αντικειμένου (σελ. 112)

Εικόνα 122. Σχηματική απεικόνιση πλεγματοποίησης σε περιβάλλον CFD Pre Post (σελ. 113)

Εικόνα 123. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή της πρώτης επιφάνειας – πύλη εισόδου υγρού μετάλλου (σελ. 113)

Εικόνα 124. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή των επιφανειών που απαρτίζουν την κοιλότητα στην οποία εισέρχεται το υγρό μέταλλο κατά τη χύτευση (σελ. 114)

Εικόνα 125. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή της εξωτερικής επιφάνειας η οποία συντελεί στη μορφοποίηση του επάνω μέρους από το λαιμό της χυτής χειρολαβής (σελ. 114)

Εικόνα 126. Σχηματική απεικόνιση από την επιλογή των εξωτερικών επιφανειών που αποτελούν και το μέρος στήριξης στο σκελετό του καλουπιού (σελ. 115)

Εικόνα 127. Εισαγωγή του 3D αντικειμένου στο περιβάλλον CFD Solver για την ανάπτυξη του μοντέλου επίλυσης (σελ. 115)

Εικόνα 128. Καταχώρηση των βασικών ιδιοτήτων της πρώτης ύλης όπου θα οριστεί ως βασικό στοιχείο για την ανάλυση ροής (σελ. 116)

Εικόνα 129. Καταχώρηση ταχύτητας και τυρβώδους ροής υγρού μετάλλου για τη ζώνη input\_1 ως αρχικό σημείο εισόδου για την ανάλυση (σελ. 117)

Εικόνα 130. Επιλογή κανονικής αρχικοποίησης για την επίλυση με σημείο αναφοράς την επιφάνεια input\_1 (σελ. 117)

Εικόνα 131. Σχηματική απεικόνιση του συγκεντρωτικού γραφήματος για την ταχύτητα ροής στους 3 άξονες, της συνέχειας και των παραμέτρων k και omega με την ολοκλήρωση της επίλυσης (σελ. 118)

Εικόνα 132. Σχηματική απεικόνιση από την τελική μορφοποίηση του χυτού αντικειμένου βάσει της ροής μετάλλου εντός της κοιλότητας (σελ. 118)

Εικόνα 133. Σχηματική απεικόνιση κατά την επιλογή results στο περιβάλλον Workbench ANSYS, όπου γίνεται εισαγωγή στον CFD Post του 3D αντικειμένου και των επιφανειών που έχω επιλέξει στο στάδιο της επίλυσης (σελ. 119)

Εικόνα 134. Οι επιφάνειες όπου ρέει το υγρό μέταλλο για την πλήρωση της κοιλότητας με σκοπό τη μορφοποίηση του χυτού αντικειμένου συναρτήσει των περιοχών που εμφανίζονται αστοχίες και χρίζουν τοπολογικής βελτιστοποίησης (σελ. 119)

Εικόνα 135. Απεικόνιση της χειρολαβής όπως βγαίνει από τη μηχανή χύτευσης ως πρώτο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας (σελ. 120)

Εικόνα 136. Καθορισμός της εξωτερικής επιφάνειας του καλουπιού (σελ. 134)

Εικόνα 137. Σχηματική απεικόνιση της ταχύτητας ροής υγρού μετάλλου από την πύλη εισόδου του καλουπιού (σελ. 135)

Εικόνα 138. Σχηματική απεικόνιση της ταχύτητας ροής υγρού μετάλλου εντός της κοιλότητας (σελ. 135)

Εικόνα 139. Σχηματική απεικόνιση της ταχύτητας ροής υγρού μετάλλου στην έξοδο (σελ. 136)

Εικόνα 140. Σχηματική απεικόνιση της έναρξης επίλυσης (σελ. 136)



Εικόνα 141. Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων ως προς τα μελετώμενα μεγέθη με την ολοκλήρωση της επίλυσης και του συγκεντρωτικού διαγράμματος (σελ. 137)

Εικόνα 142. Σχηματική απεικόνιση των βασικών μεγεθών κατά τη διάρκεια της χύτευσης για 100 συνεχόμενα πατήματα (σελ. 137)

Εικόνα 143. Σχηματική απεικόνιση της τυρβώδους ροής και συχνότητας αυτής κατά τη διάρκεια της χύτευσης για 100 συνεχόμενα πατήματα (σελ. 138)

Εικόνα 144. Σχηματική απεικόνιση της ροής αναφορικά με την επιφάνεια της πύλης εισόδου υγρού zamak5 (σελ. 138)

Εικόνα 145. Σχηματική απεικόνιση της ροής αναφορικά με την επιφάνεια της κοιλότητας η οποία γεμίζει με υγρό zamak5 (σελ. 139)

Εικόνα 146. Σχηματική απεικόνιση της πίεσης για την επιφάνεια της κοιλότητας κατά την πλήρωση από υγρό zamak5 με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή συνοριακά (σελ. 139)

Εικόνα 147. Σχηματική απεικόνιση της θερμοκρασίας που έχει το υγρό zamak5 ως προς την ελάχιστη και μέγιστη μετρούμενη τιμή στο φούρνο της χυτόπρεσσας κατά την πλήρωση της κοιλότητας μέχρι την επιφάνεια εξόδου (σελ. 140)

Εικόνα 148. Σχηματική απεικόνιση της καταπόνησης των εξωτερικών επιφανειών του καλουπιού που έρχονται σε επαφή με το σκελετό κατά την τοποθέτηση σε αυτόν βάσει της ελάχιστης και μέγιστης πίεσης κατά τη διάρκεια της χύτευσης (σελ. 140)

Πίνακας 1. Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τη χύτευση ως παραγωγική διαδικασία (σελ. 21)

Πίνακας 2. Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τη χύτευση εν θερμώ ως παραγωγική διαδικασία (σελ. 24)

Πίνακες 3 & 4. Χρήσιμα στοιχεία για τα κράματα ψευδαργύρου (σελ. 31)

Πίνακας 5. Κρίσιμες παράμετροι για τις ρυθμίσεις της χυτόπρεσσας κατά την έναρξη παραγωγής (σελ. 51)

Πίνακες 6, 7 & 8. Ιδιότητες πρώτης ύλης zamak5 μεταλλικό κράμα ψευδαργύρου (σελ. 52)

### **Πηγές από το διαδίκτυο**

1. [Temperature Control Of Die Casting Mold - How Important Is Temperature In Die Casting Mold | Diecasting-Mould](#)
2. [What is the reason for the high temperature of the die-casting mold? - Cnc Machining](#)
3. [Analysis of Causes of Porosity Change of Castings under the Influence of Variable Biscuit Height in the Filling Chamber - PMC \(nih.gov\)](#)
4. [Die Casting \(magmasoft.com\)](#)
5. [Uddeholm Orvar Supreme - premium steel for all hot work tool applications](#)
6. [Phase Diagrams and Solidification \(all content\) \(doitpoms.ac.uk\)](#)
7. [Die Casting: Processes, Materials, Applications, Costs | RapidDirect Blog](#)

## Παράρτημα Επίλυσης Fluid Flow

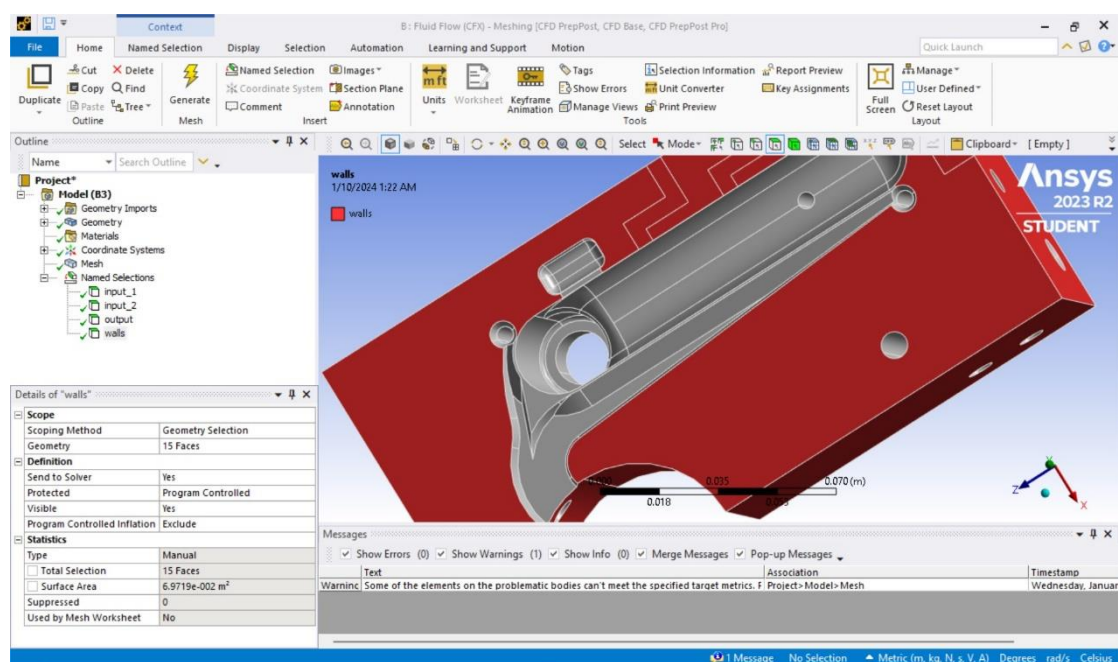
Για τη μελέτη ροής του υγρού μετάλλου, εντός του κινητού μέρους του καλουπιού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το Fluid Flow (CFX), για την ανάπτυξη του μοντέλου ως ακολούθως:

**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** σε περιβάλλον Workbench ANSYS, εισάγω το πεδίο Fluid Flow (CFX), όπου στη συνέχεια συνδέω τη γεωμετρία από το αρχείο 2005-1b\_moving.stp ονομάζοντας το μοντέλο που θα αναπτύξω Fluid Flow (CFX)\_moving plate και save.

Ενώ στη συνέχεια, σε περιβάλλον CFD Pre Post θα κάνω την πλεγματοποίηση του αντικειμένου με τα εξής στοιχεία:

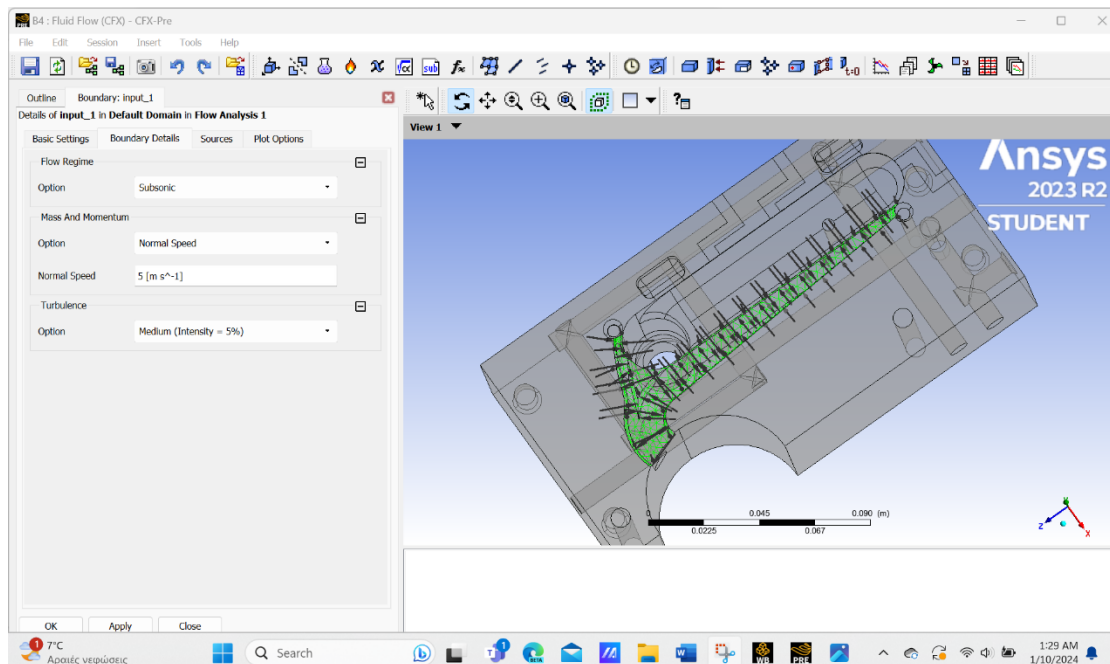
- element order: quadratic
- element size: 0,005m
- smoothing: high

**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** ορίζω με την εντολή name selections, τις επιφάνειες που θα λάβουν μέρος στην επίλυση ως input\_1 / input\_2 / output / walls



Εικόνα 136. Καθορισμός της εξωτερικής επιφάνειας του καλουπιού

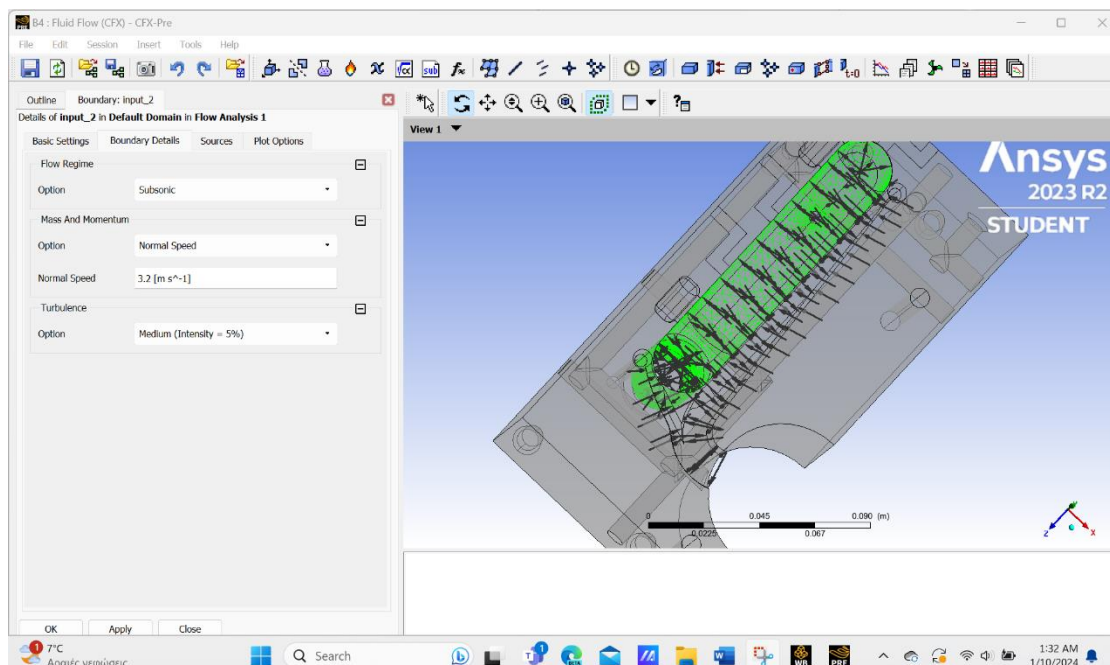
**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** εφόσον έχω κάνει updates στο mesh, συνεχίζω στο πεδίο setup από το αρχικό περιβάλλον ώστε, από όπου εισάγομαι στο CFX Pre καθορίζοντας τις οριακές συνθήκες αρχικά για την επιφάνεια input\_1 (πύλη εισόδου υγρού μετάλλου) ως boundary type: inlet ενώ στο πεδίο boundary details – normal speed: 5m/sec



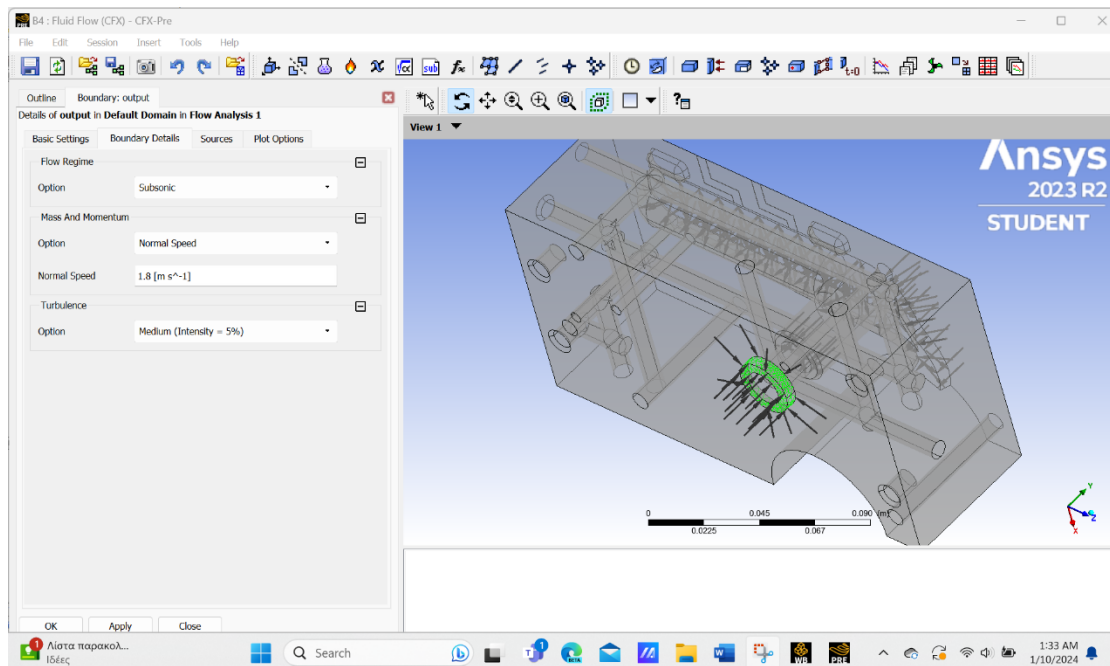
Εικόνα 137. Σχηματική απεικόνιση της ταχύτητας ροής υγρού μετάλλου από την πύλη εισόδου του καλουπιού

Αντίστοιχα, ενεργώ με τον ίδιο τρόπο για την επιφάνεια της κοιλότητας και την έξοδο με τα ακόλουθα στοιχεία:

- input\_2 normal speed: 3,2m/sec
- output normal speed: 1,8m/sec

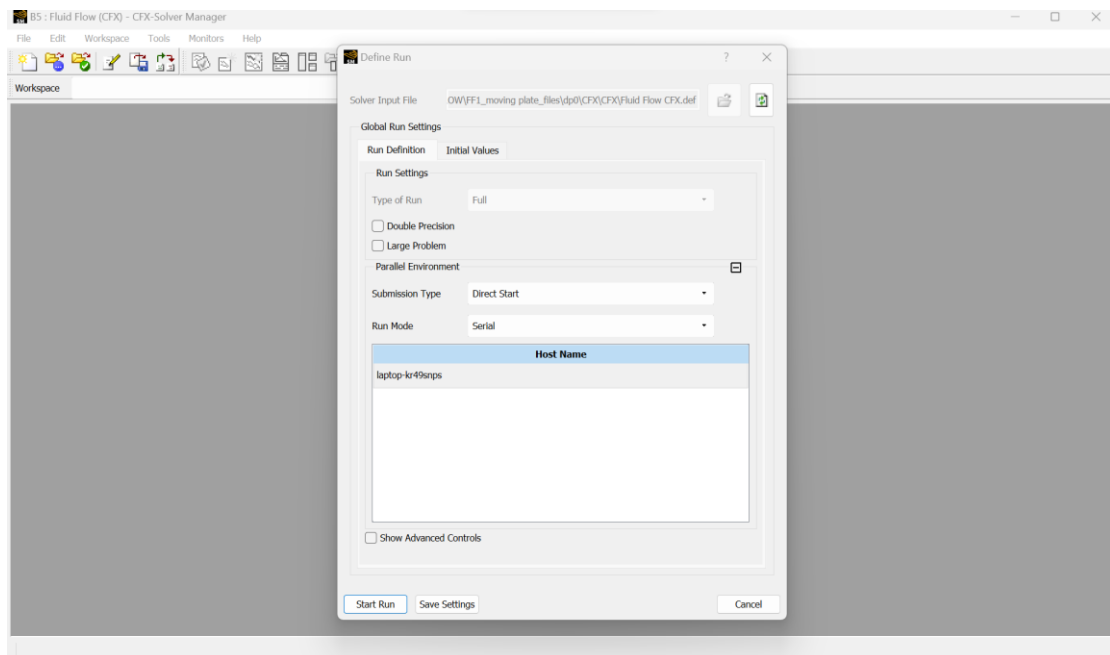


Εικόνα 138. Σχηματική απεικόνιση της ταχύτητας ροής υγρού μετάλλου εντός της κοιλότητας



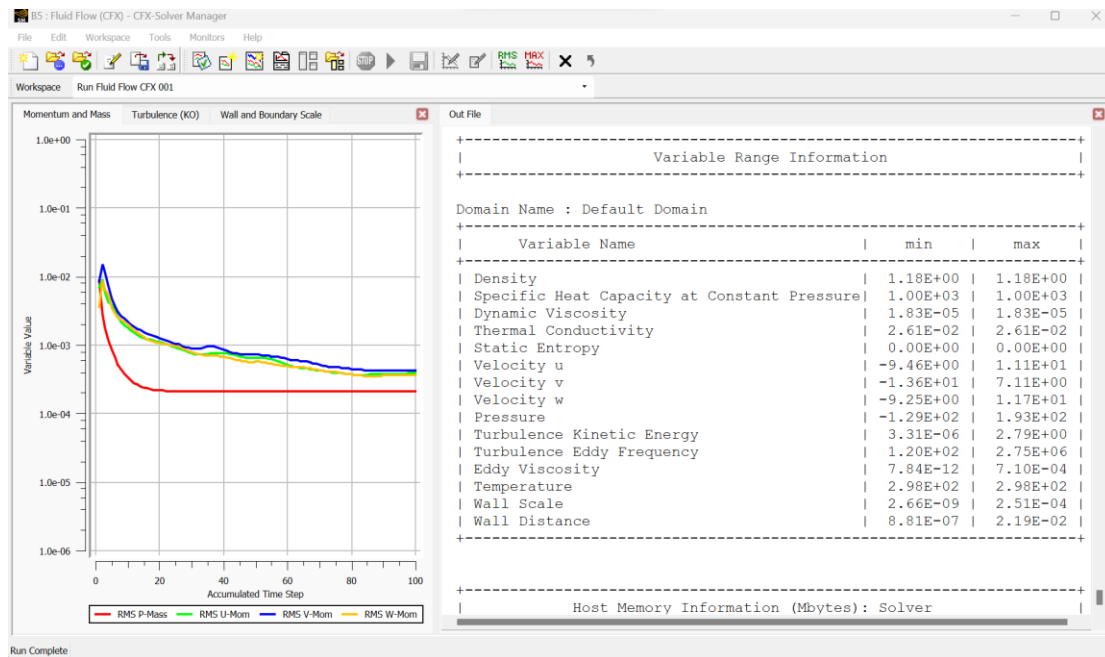
Εικόνα 139. Σχηματική απεικόνιση της ταχύτητας ροής υγρού μετάλλου στην έξοδο  
**Βήμα 4<sup>ο</sup>:** στο επόμενο στάδιο, καθορίζω το υλικό (*zamak5*) το οποίο συμμετέχει στην  
 ανάλυση του μοντέλου καταχωρώντας τις βασικές ιδιότητες, όπως:

- molar mass: 1,07 kg/kmol<sup>-1</sup>
- density: 6,6 kg m<sup>-3</sup>
- specific heat capacity: 65 Jkg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

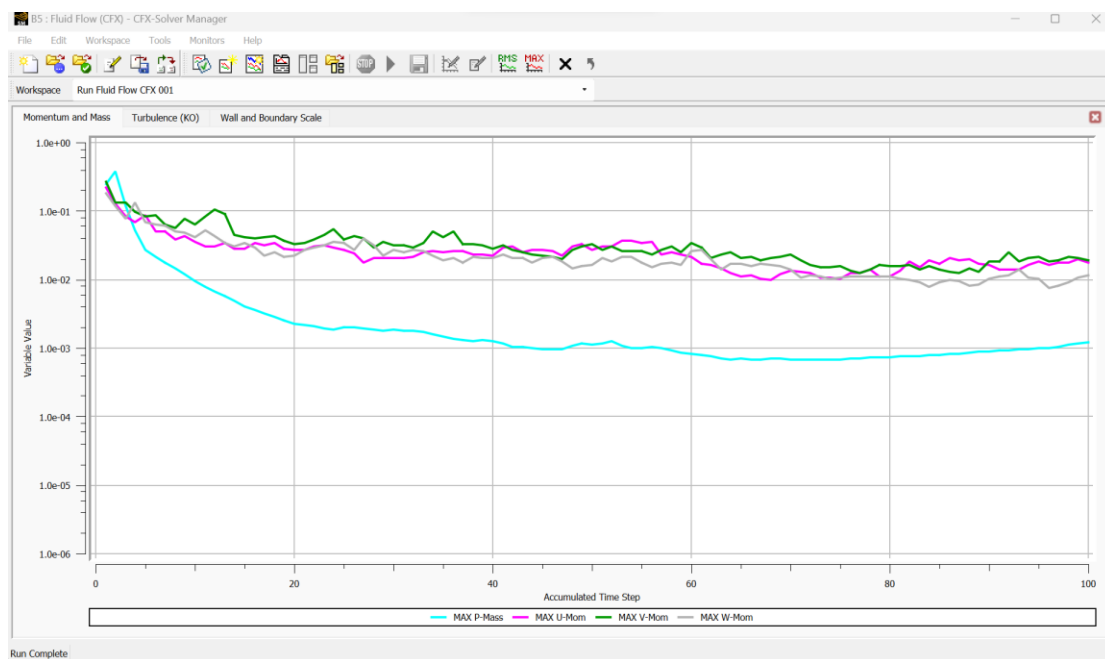


Εικόνα 140. Σχηματική απεικόνιση της έναρξης επίλυσης

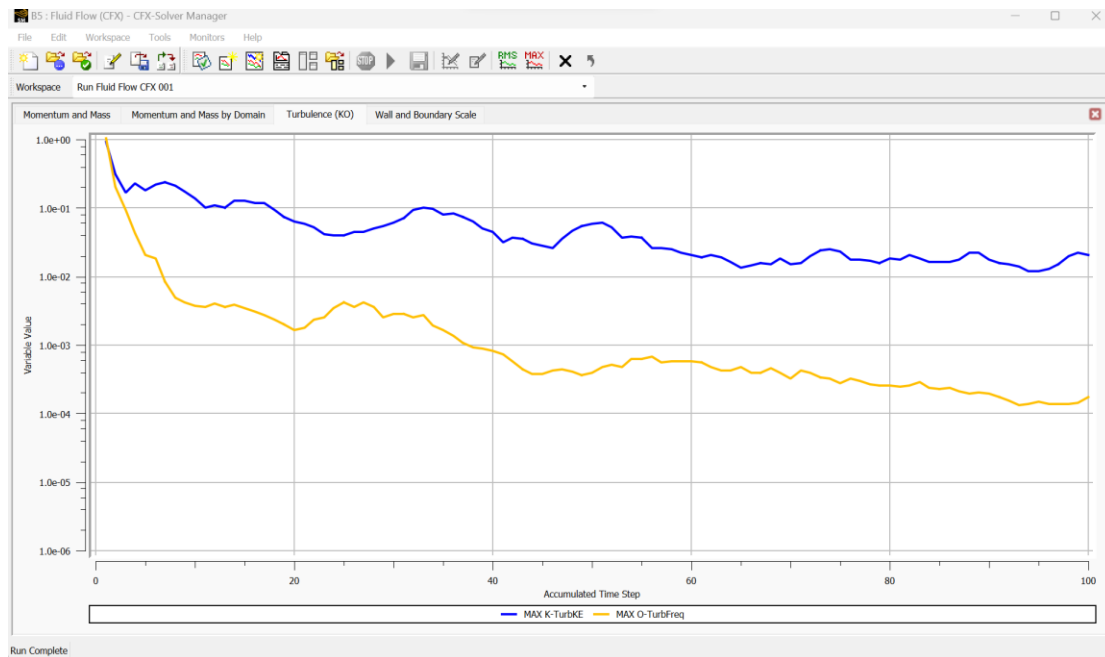




Εικόνα 141. Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων ως προς τα μελετώμενα μεγέθη με την ολοκλήρωση της επίλυσης και του συγκεντρωτικού διαγράμματος

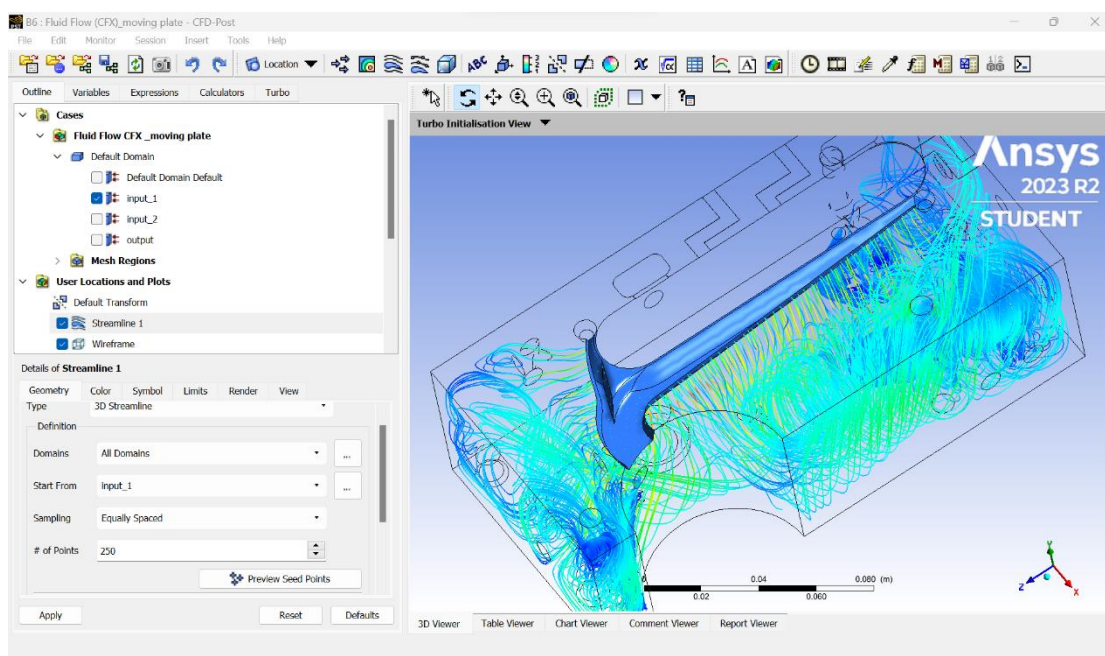


Εικόνα 142. Σχηματική απεικόνιση των βασικών μεγεθών κατά τη διάρκεια της χύτευσης για 100 συνεχόμενα πατήματα

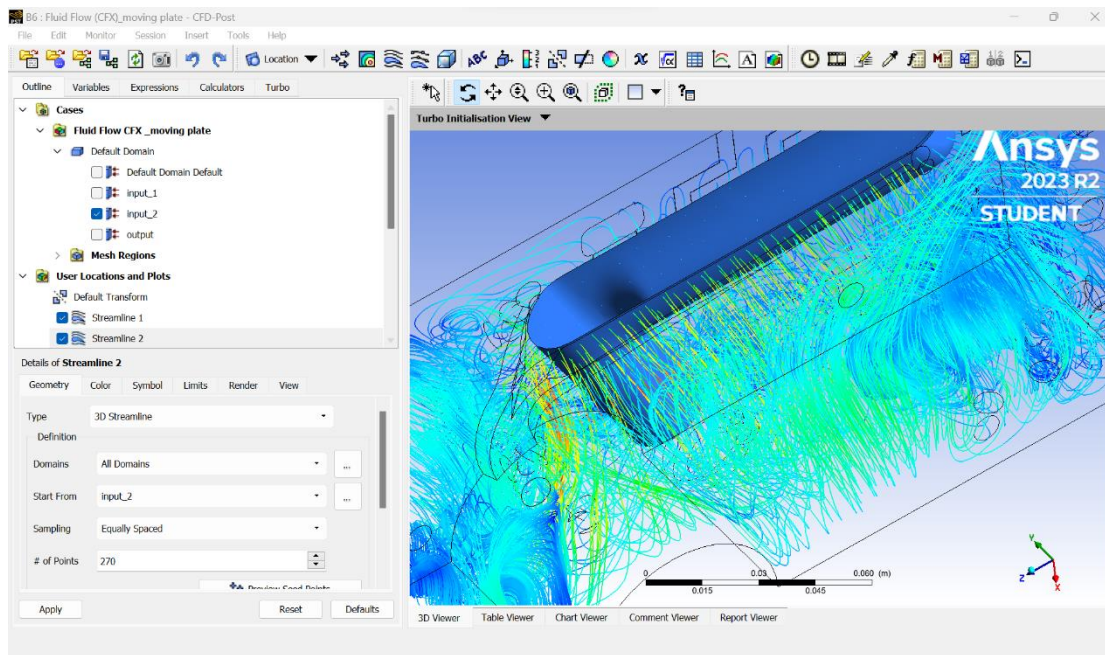


Εικόνα 143. Σχηματική απεικόνιση της τυρβώδους ροής και συχνότητας αυτής κατά τη διάρκεια της χύτευσης για 100 συνεχόμενα πατήματα

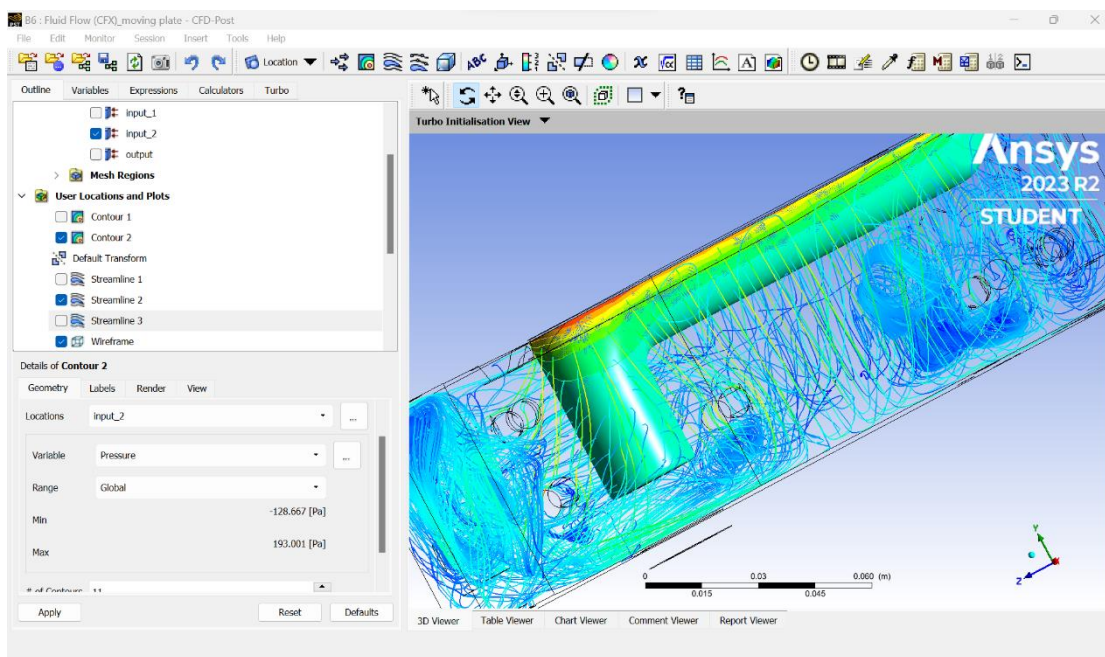
**Βήμα 5<sup>ο</sup>:** σε επόμενο στάδιο, επιλέγω το πεδίο results ώστε μέσα σε περιβάλλον CFD-Post για κάθε default domain δημιουργώ ένα streamline, καθορίζοντας την επιφάνεια έναρξης όπως για παράδειγμα, για το streamline1 με start from: input\_1 με number of points: 250 και apply



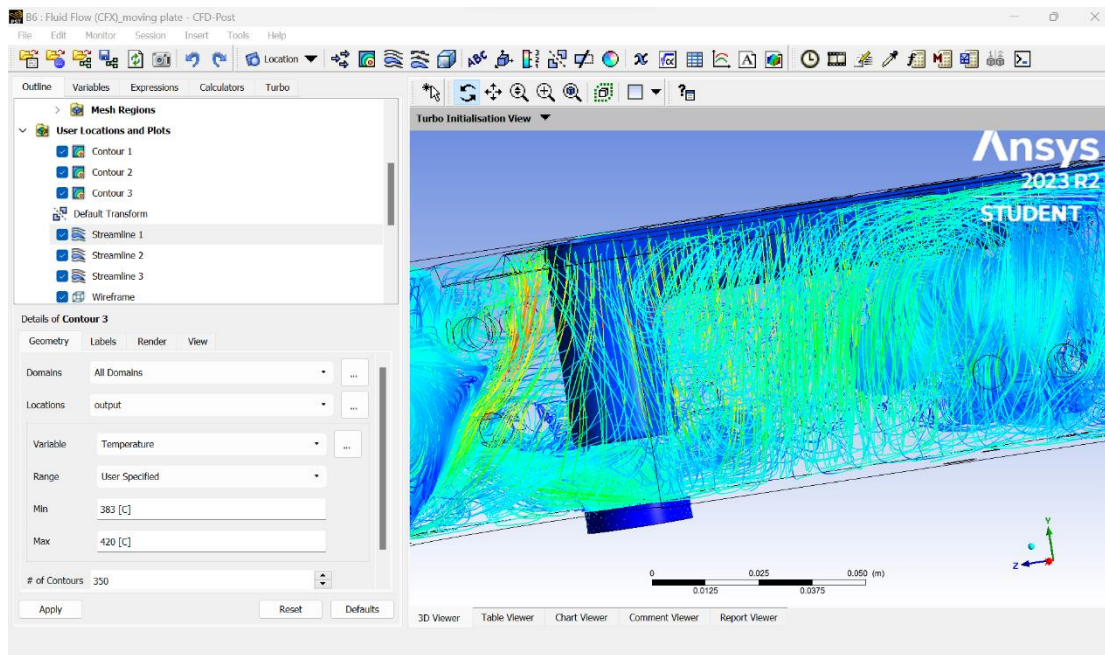
Εικόνα 144. Σχηματική απεικόνιση της ροής αναφορικά με την επιφάνεια της πύλης εισόδου υγρού zamak5



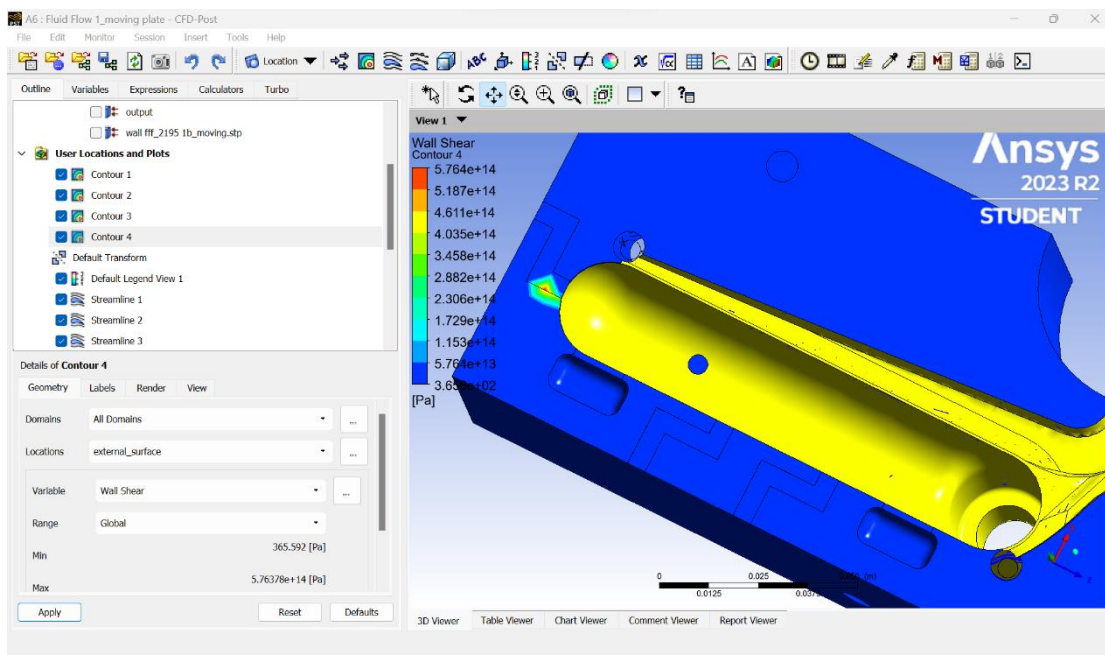
Εικόνα 145. Σχηματική απεικόνιση της ροής αναφορικά με την επιφάνεια της κοιλότητας η οποία γεμίζει με υγρό zamak5



Εικόνα 146. Σχηματική απεικόνιση της πίεσης για την επιφάνεια της κοιλότητας κατά την πλήρωση από υγρό zamak5 με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή συνοριακά



Εικόνα 147. Σχηματική απεικόνιση της θερμοκρασίας που έχει το υγρό zamak5 ως προς την ελάχιστη και μέγιστη μετρούμενη τιμή στο φούρνο της χυτόπρεσσας κατά την πλήρωση της κοιλότητας μέχρι την επιφάνεια εξόδου



Εικόνα 148. Σχηματική απεικόνιση της καταπόνησης των εξωτερικών επιφανειών του καλουπιού που έρχονται σε επαφή με το σκελετό κατά την τοποθέτηση σε αυτόν βάσει της ελάχιστης και μέγιστης πίεσης κατά τη διάρκεια της χύτευσης