



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

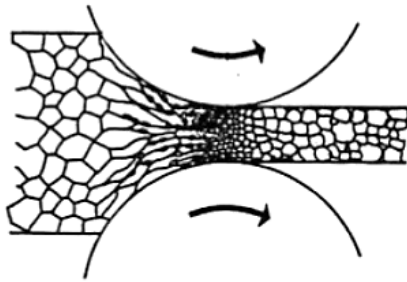
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Προσομοίωση της κατεργασίας θερμής έλασης κραμάτων αλουμινίου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Διδακτορική Διατριβή

Γαβαλάς Ευάγγελος



Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Προσομοίωση της κατεργασίας θερμής έλασης κραμάτων αλουμινίου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Διδακτορική Διατριβή

Γαβαλάς Ευάγγελος

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος 3μελούς συμβουλευτικής επιτροπής

Δ. Πάνιας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος 3μελούς συμβουλευτικής επιτροπής

Ν. Μιχαηλίδης, Καθηγητής Α.Π.Θ.

Μέλος 7μελούς εξεταστικής επιτροπής

Σπ. Καραμάνος, Καθηγητής Π.Θ.

Μέλος 7μελούς εξεταστικής επιτροπής

Α. Μαρκόπουλος, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος 7μελούς εξεταστικής επιτροπής

Π. Τσακιρίδης, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος 7μελούς εξεταστικής επιτροπής

I. Ευχαριστίες

Θα ήθελα μέσα από την καρδιά μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Dr. – Ing. Σπύρο Παπαευθυμίου, για την πολύτιμη καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία κατά την διάρκεια διδακτορικής μου Διατριβής. Η συμβολή του ήταν κρίσιμη τόσο στην επιστημονική όσο και κοινωνική μου ωρίμανση. Ακόμα και πριν την έναρξη της Διατριβής με βοήθησε να κερδίσω μια θέση στο πανεπιστήμιο του RWTH Aachen κάτι που ήταν σημαντικός σταθμός της ζωής μου αφού μου επέτρεψε να διεκδικήσω μια θέση για διδακτορικό. Τον ευχαριστώ επίσης για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να είμαι μέλος της ομάδα του και να μου επιτρέψει να ασχοληθώ με αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα παρόλο που γνώριζε τις δυσκολίες που θα αντιμετωπίζαμε.

Επίσης, ευχαριστώ την τριμελή μου επιτροπή για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές τους αυτά τα χρόνια αλλά και τα μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής για τις υποδείξεις τους και τον χρόνο που μου αφιέρωσαν για τον έλεγχο του κειμένου της Διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά τη διοίκηση των εταιρειών «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.» και «ΕΛΒΑΛ Α.Ε.», οι οποίες με στήριξαν με κάθε τρόπο και σε κάθε στάδιο εκπόνησης της εργασίας μου και που επέτρεψαν την χρήση των βιομηχανικών δεδομένων.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τους συναδέλφους από «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.» και «ΕΛΒΑΛ Α.Ε.» για τις ουσιαστικές συζητήσεις και την βοήθεια τους κατά την διάρκεια της εκπόνησης της Διατριβής και συγκεκριμένα την κα. Μπουζούνη, τον κ. Πρέσσα από το ΕΛΚΕΜΕ και τους κ. Γονιδάκη, κ. Τοτόμη και κ. Κορτσέλη την ΕΛΒΑΛ.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που βρίσκονται παρόντες στην κάθε μου προσπάθεια και με υποστηρίζουν με κάθε δυνατό τρόπο.

II. Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εξέλιξη της επιτεδότητας πλάκας αλουμινίου κατά την θερμή έλαση προκειμένου μέσω προσομοίωσης κατά το σχέδιο έλασης προκειμένου να αξιοποιηθεί για την ρύθμισή της μέσω των καμπτικών συστημάτων του ελάστρου. Για την προσομοίωση αναπτύχθηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για το οποίο χρησιμοποιήθηκε η ακριβής γεωμετρία του θερμού ελάστρου της ΕΛΒΑΛ, καθώς και πραγματικά δεδομένα παραγωγής για το κράμα 5754, ώστε να επικυρωθεί βιομηχανικά η εγκυρότητα του μοντέλου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι σε συμφωνία με τα δεδομένα παραγωγής και επομένως το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον προσδιορισμό του σχεδίου έλασης. Η επιτεδότητα μπορεί να ρυθμιστεί μέσω του συστήματος κάμψης του ελάστρου, ωστόσο, το εύρος του συχνά δεν είναι αρκετό. Έγινε μελέτη της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας κατά το μήκος του υποβιβασμού λόγω θερμικού φορτίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κύριο μέρος της μεταβολής της επιτεδότητας της πλάκας οφείλεται στην μεταβολή της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας. Η θερμική διαστολή του ράουλου εργασίας παίζει σημαντικό ρόλο στην επιτεδότητα της πλάκας κατά το μήκος της κάτι το οποίο μπορεί να βελτιωθεί με την κατάλληλη χρήση και στρατηγική ψύξης του ράουλου. Ως εκ τούτου, για την βελτίωση της γεωμετρικής σταθερότητας του ράουλου προτείνεται:

- Βελτίωση των συνθηκών ψύξης του ράουλου εργασίας και συγκεκριμένα η χρήση της ψυκτικής μονάδας στην είσοδο αλλά και στην έξοδο του εκάστοτε υποβιβασμού.
- Αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας κατά τη διάρκεια του σχεδίου έλασης, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με την απενεργοποίηση της ψύξης στο ράουλο εργασίας κατά τον χρόνο μεταξύ των υποβιβασμών.
- Μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εμπρόσθιου/οπίσθιου μέρους της πλάκας σε σχέση με το κυρίως σώμα απενεργοποιώντας την ψύξη κατά την έναρξη υποβιβασμών για τα πρώτα ~10 s.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

- Επιπλέον, πλεονέκτημα της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας είναι η βελτίωση της ανισοκατανομής της θερμοκρασίας, όπου το εμπρόσθιο και το οπίσθιο μέρος της πλάκας είναι πιο ψυχρό σε σχέση με το υπόλοιπο σώμα.

III. Synopsis

The increased demand for high strip shape quality of rolled aluminum flat products has led to various studies associated with the effect of rolling parameters on the strip's profile. In hot rolling, a plate is reduced in progressive steps from an initial thickness to final thickness. During this process, high forces develop between the strip and the work rolls, which result in roll deflection. The deflected rolls are not parallel to each other anymore, and the gap between the rolls is not perfectly rectangular but curved from the top and bottom side (work roll sides). The geometry of the roll gap is imprinted on the rolled strip resulting in uneven thickness distribution across the width called crown. More specifically, the center of the strip is thicker comparing to the edges. The rolls deflection due to separating force together with thermal expansion and wear of the rolls consist of the main factors that determine the final strip profile [1,2].

Most rolling plants utilize the same equipment for rolling a wide range of materials with various levels of mechanical properties, initial geometry of the plate and final specifications. As a consequence, the same pass schedule cannot satisfy the profile requirements of the different products. For this purpose, conventional 4-high rolling mills are equipped with hydraulic systems that allow the bending of the rolls in order to correct the strip's crown according to the required specifications. In most cases, the adjustment of roll bending is pre-specified for each pass schedule and relies heavily on the scheduler, the operator and the experience gained from previous pass schedules [3]. However, in a real production environment, the final crown depends on many factors and the correct bending force is difficult to be determined during the pass schedule design stage, let alone to be adjusted between the rolling passes. Nevertheless, some rolling mills are equipped with automatic roll bending actuators than either determining the bending set-point is of great importance or they require a lot of rolling data and training to define the bending set-point automatically, something that it is not suitable for production plants utilizing the same equipment for rolling a wide range of products.

In order to determine the process parameters, predictive analytical modeling based on FEM and has been widely employed by many researchers for rolling simulations, due to the increased quality of the results and the possibility to apply realistic boundary conditions and constraints in complicated models [4,5,6].

Different finite element software is commercially available and often used by metallurgical companies for bulk metal forming processes. The majority of that software is based on either static implicit method or dynamic explicit method. The static implicit method has been shown to work well for quasi-static metal forming processes as reported by many researchers [7,8,9].

Implicit algorithms allow working with larger time step size, as a set of equations must be solved repeatedly until a convergence criterion is satisfied for each time increment achieving higher accuracy. However, it is not favored by problems dominated by highly discontinuous non-linearities such as rapidly changing contact conditions, frictional sliding, local instabilities and non-linear time-dependent materials. A complex model leads to larger memory requirements and to a higher CPU cost, resulting in significantly increased computational time. Convergence difficulties may arise to such an extent that very small time increments and more iterations per increment are required, and in many cases a solution is difficult to obtain whatsoever [10,11,12,13,14].

For these problems to be overcome, the dynamic explicit techniques were introduced. In the explicit method, the diagonal mass matrix is used to solve the equations of motion with so small time step that a stable solution is ensured [15]. Unlike the implicit solution, the time increment is only influenced by element size and material properties and not by complex contact conditions and non-linearities, as such, there is no significant increase in memory or CPU cost per increment, as the problem size and complexity increases. Nevertheless, stability is obtained only when the maximum time increment is lower than a critical value of the smallest transition times for a dilatational wave to cross any element in the mesh. In forming processes, the time increment can become so small compared with the process time that it might be unrealistic to perform the analysis [16].

In order to evaluate the effectiveness of the implicit and the explicit methods, in the simulation of aluminum rolling, a 4-high mill with typical geometry was modeled in ANSYS™

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

and LS-DYNA™. A typical time frame, showing the von Mises stresses, during solution is depicted in Error! Reference source not found..

The system consists of the work roll, coming in contact with the plate. The backup roll provides the rigidity required to prevent excess bending under working load. Additionally, the bushes in each roll provide the necessary movement restriction in order to predict more precisely the influence of roll bending. Identical material properties and models were used in both the implicit and the explicit analysis. A generalized aluminum alloy of 6000 series was adopted for the plate and hardened steel for the rolls. The material properties, were considered at elevated temperature and steady throughout the process. The material model is a bilinear isotropic hardening elastic-plastic model for the plate and isotropic elastic for the rolls. One of the main parameters that are considered in the current analysis is the meshing, which is calculated from the number of nodes in each model. Four different mesh densities, marked below as coarse, medium and fine and very fine were set.

The force, calculated by the two methods, presents a small deviation of ~ 0.5 MN (**Figure 2**). These results are representative for the contact forces during the steady-state interval. It is profound that the dynamic component plays an important role in rolling simulation, and, therefore, a careful choice of boundary and initial conditions as well as a thorough validation is crucial, in order to achieve high quality results.

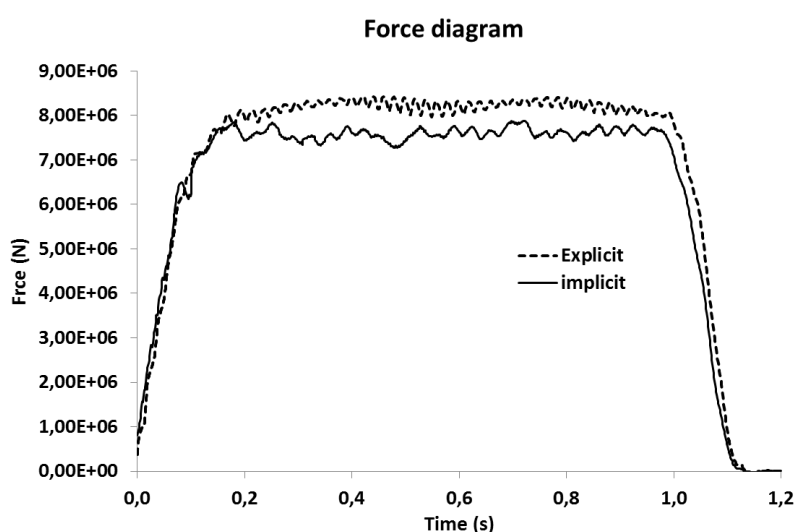


Figure 1. Force diagrams resulting from implicit and explicit analysis

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

A minimum model size is necessary for the force to converge into a solution. Models with node number greater than 70000 are adequate for a reliable result as indicated in **Figure 3**. The implicit method is affected more from the model size comparing to the explicit method, more particularly in the very coarse models where the force value is 10 % higher than the converged solution of the finer models.

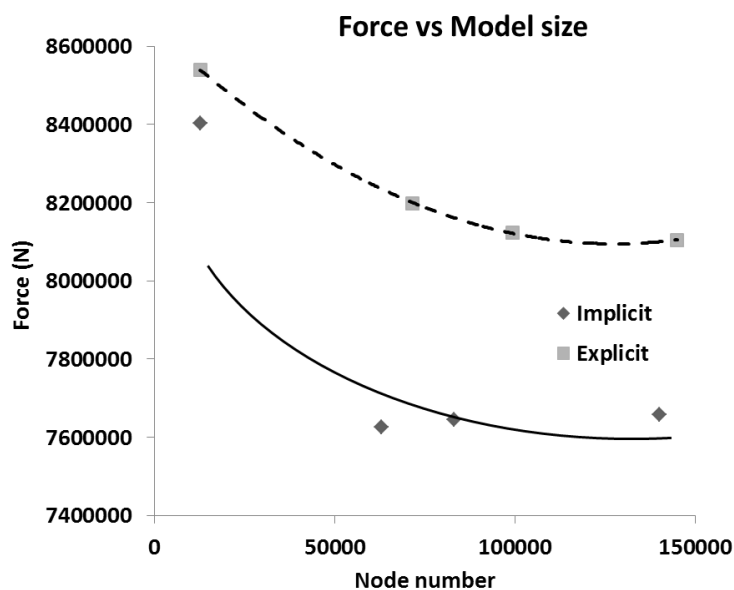


Figure 2. Average force value for different model sizes.

The calculation time for the implicit and the explicit methods are illustrated in **Figure 4** for different model sizes.

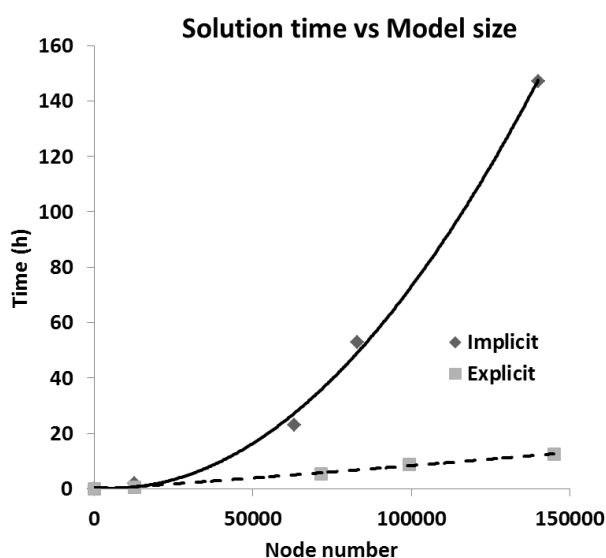


Figure 3. Comparison of implicit and explicit method in solution time for different model sizes.

Model size plays an important role for the implicit analysis as the solution time increases exponentially with the increase in node number. On the contrary, in the explicit method the solution time increases almost linearly with the node number.

The time step during the implicit solution was 1 millisecond. When convergence problems were faced, the time step was dropping as low as 1 microsecond in order to overcome the instability, extending the overall solution time. For the explicit method, the exact time step can be calculated using equation (7), but in most cases it was in the order of 1 microsecond, running steadily throughout the experiment.

The explicit method is more time efficient than the implicit method. For small models (<20000 nodes) the difference in computational time for the two methods is narrow, and more specifically 1 hour for the explicit method versus the 2 hours for the implicit in the very coarse model. However, the same difference increases tremendously with the increasing node number, reaching the maximal difference of ~135 hours for the fine model. Additionally, the implicit method frequently encountered stability issues necessitating high refinement effort to reach a solution. The explicit models were more robust and never failed.

The small time increments, used in the explicit solver, ensured that the non-linearities are dealt with a minimal increase in time. Although the implicit solver employs larger time increments the computationally intensive inversion of the stiffness matrix and the decrease in time step size, when non-linearities are encountered, are responsible for the longer solution times.

Once the most efficient solver was determined, a high accuracy 3D Finite Element Model (3D-FEM) was designed to study the effect of bending force on the final strip profile in aluminum hot rolling process. Industrially used rolling parameters were used as input for the calculation and the results can be used as set points during pass schedule design and as guidance for adjustment between different passes in real production environment.

The influence of the rolling parameters analysis was held on LS-DYNA software employing a 3D-FEM, as shown in Figure 4. For the rolls the element size was 15 mm at the surface and for the plate the element size was 10 mm length- and width-wise. Thickness-wise the

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

element size was 5 mm for the thick passes (>15 mm) and for the thin passes (< 15 mm) 3 elements were the minimum number of elements since a lower number had great variation in the final results. Rolling is considered a quasistatic process, however, especially during heavy passes or when rolling speed is high both strain and strain rate can become significant.

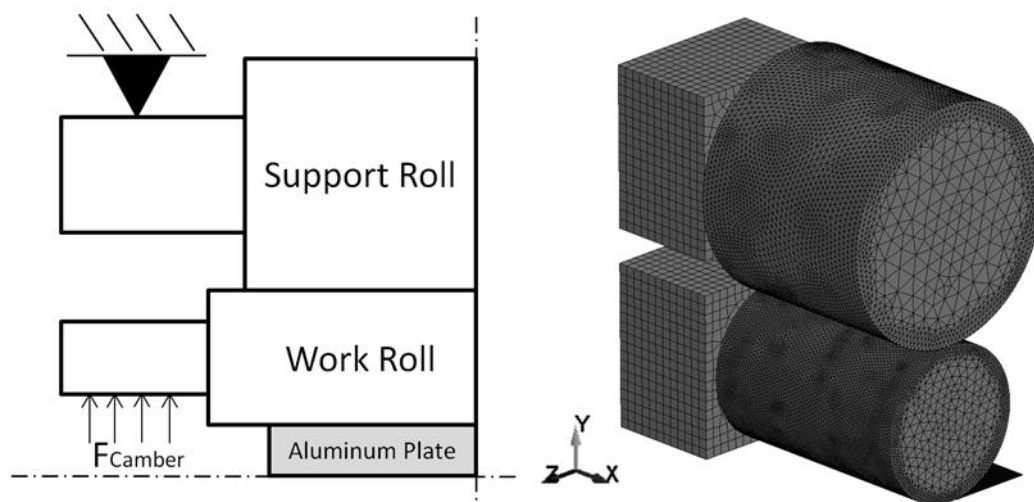


Figure 4. Schematic diagram of the (a) 4-high hot rolling mill, (b) 3D-FEM model

The mill consists of a pair of work rolls and support rolls, mainly used to control flatness of the rolled strip, and is equipped with a hydraulic system able to apply a bending load between the work rolls and between the work rolls and the support rolls. The exact geometry of the hot rolling mill installed in the ELVAL's plant was used. To minimize the overall computational cost, the system was considered as fully symmetric and only one quarter of the complete model was simulated by setting two symmetry planes and the proper boundary conditions.

Both steel rolls were modeled as elastic, while the 5754-O aluminum strip was modeled as elastic-viscoplastic utilizing the Johnson-Cook's constitutive equation. Typical parameters found in literature were used for both the rolls and the aluminum plate [22-23].

The Johnson-Cook material model is a strain, strain rate and temperature sensitive model, widely used in forming processes. The parameters used for both materials as well as the physical and thermal properties are summarized in Table 2 and Table 3 respectively.

The description of the contact between the roll and the strip requires the definition of the frictional conditions and the thermal properties. Literature values from similar set ups and mill/plate sizes were assumed in this work, which in most cases is concluded from iterative trial and error procedure in industrial environment.

As friction is a vast phenomenon to describe. Both the Coulomb's friction model and the shear friction model were used in cooperation summing all the mechanisms into a non-dimensional coefficient or factor [23].

The thermal boundary conditions in the contact between the strip and the roll strongly depend on specific conditions, such as the applied pressure on the roll, the surface roughness, the lubrication, the material, etc. An adequate designation of the contact thermal properties requires the definition of the conductance at the contact region and the convection to the air and the coolant. The roll-strip heat transfer coefficient was validated via industrial measurements. The remaining interface conditions were found in literature [23].

The material is reduced from a 660 mm thick slab to an 8.9 mm thin strip after several rolling passes. The initial conditions (roll speed, plate temperature, reduction percentage, etc.) are taken as input data from existing pass schedules. The temperature profile of the strip and the rolls is considered homogeneous at the beginning of each simulation step. Both separation force and temperature evolution was calculated in certain passes. Several simulations for the last pass were conducted varying the bending force. The crown is calculated as follows:

$$\text{Crown (\%)} = \frac{t_{\text{middle}} - t_{\text{edge}}}{t_{\text{middle}}} \times 100 \quad \text{III.5}$$

Where t_{middle} is the thickness of the strip at the middle widthwise and t_{edge} the thickness at the edge of the strip .

The prediction of the crown development requires a validated simulation model, which is crucial for the industrial practice. The separation force and the temperature are the two main factors that were compared and validated based on industrial data. The exact

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

parameters of each pass and critical production data were disclosed due to confidentiality reasons.

The rolling load development according to the FEM simulation is depicted in Figure 5. Once the strip comes into contact with the work rolls, the force rises until it reaches a steady state, where it remains almost constant. To indicate a specific value for the rolling force, the average of the highest and lowest value of rolling force was considered.

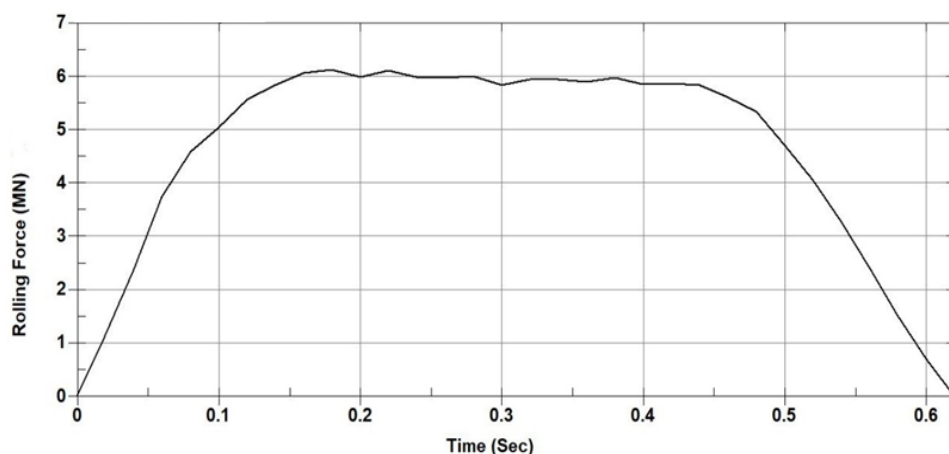


Figure 5. Simulated rolling force.

Comparison of rolling force between the simulated and measured value for 10 passes is shown in Figure 6. The simulated values come into good agreement with the measured results.

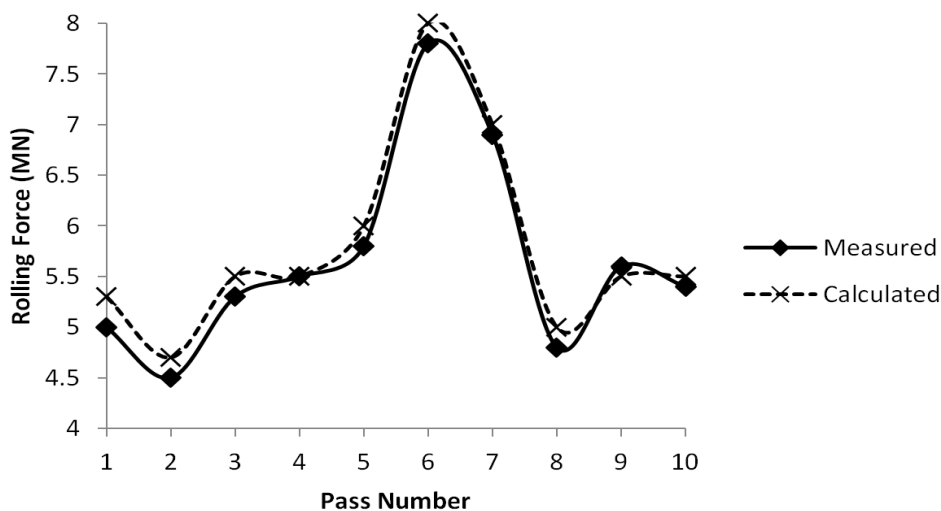


Figure 6. Comparison between measured and simulated separation force.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

The surface temperature was simulated for the same passes that were used also for the force validation. Indicative result of the last pass from a specific pass schedule are illustrated in Figure 7 and Figure 8 and agree well with actual measurements taken during trials using an IR thermocamera (Figure 9). The comparison refers to the calculated and measured surface temperature after the required time for the strip to reach the measuring point since the thermocamera is located several meters away from the roll bite.

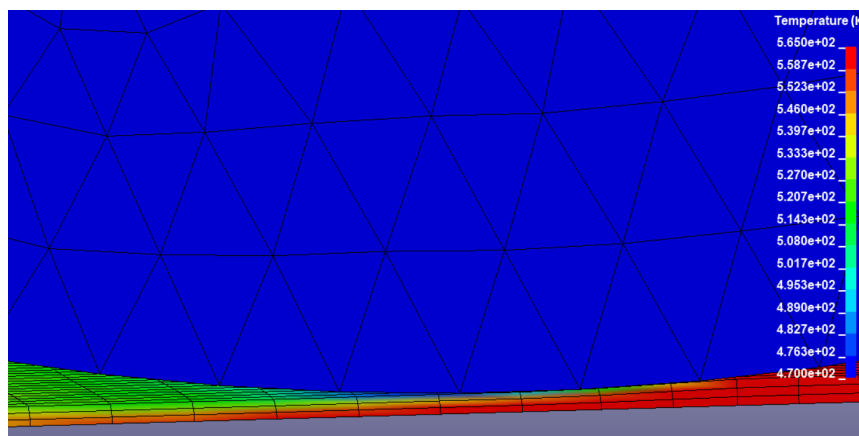


Figure 7. Temperature profile of the strip during hot rolling process.

The temperature distribution throughout the strip's thickness is illustrated in Figure 8. Temperature inhomogeneity can be observed through the thickness of the strip as it comes into contact with the roll, where heat is transferred from the strip's surface to the roll. Nevertheless, the temperature becomes uniform again shortly after the strip is disengaged from the mill. A temperature rise can be observed at the center of the strip, which can be attributed to the energy from the plastic deformation.

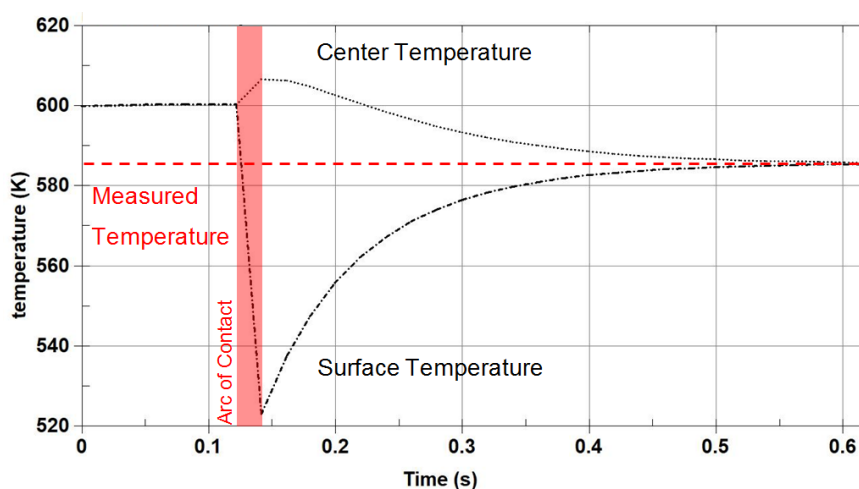


Figure 8. Temperature evolution on the surface and the center of the strip.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

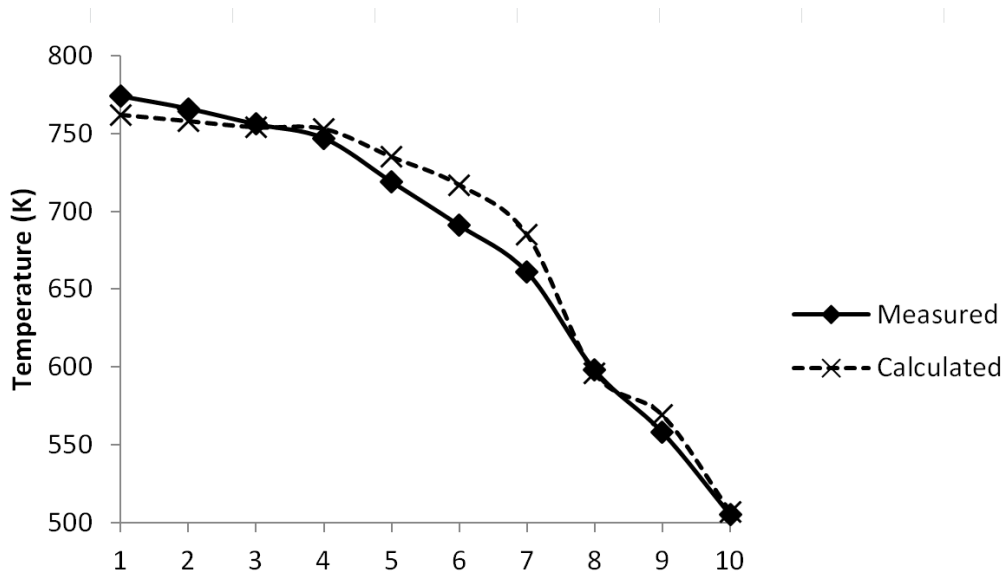


Figure 9. Comparison between measured and simulated temperature.

During rolling, the separation force causes the deflection of the rolls resulting in the final geometry of the strip not to be flat, but crowned. The final thickness at the center of the strip is larger compared to the edges. Figure 10 depicts the influence of the bending force on the resulting strip's crown after the pass. The initial crown of the plate before this pass was 0.45 %.

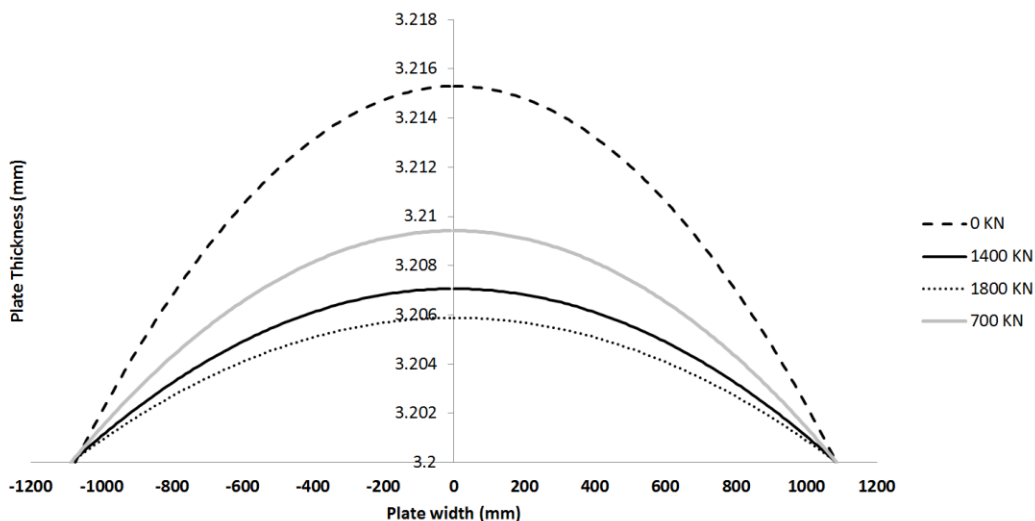


Figure 10. Influence of bending force on the plate's crown.

The simulated crown was compared with crown deducted from the mills integrated crown measuring system for different passes (Figure 11). The mill's crown measuring system can be

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

utilized only in the final passes of the pass schedule where the strips thickness falls below a critical value (< 15 mm) necessary for the device to work.

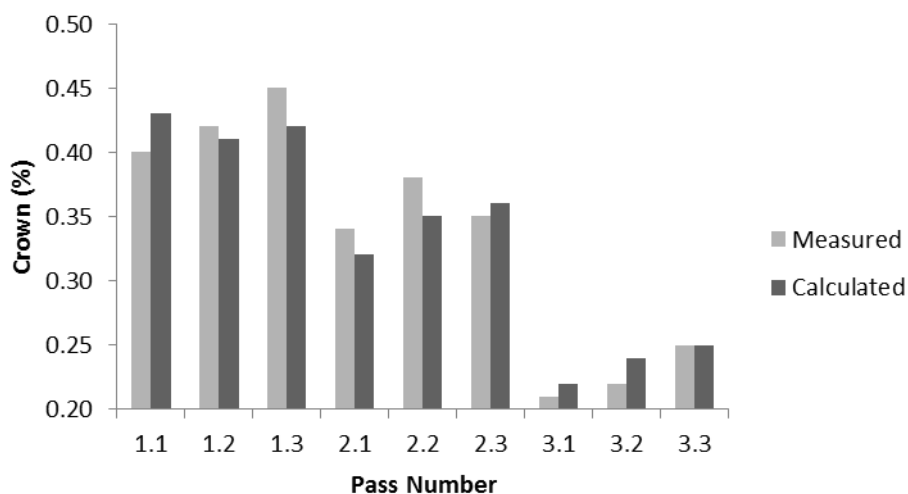


Figure 11. Comparison between measured and simulated crown.

After validation, the FEM model provides important information and guidance for the pass schedule design with respect to profile and flatness optimization, better process parameter control and rolling mill throughput improvement (e.g. geometry of the work and support roll). Moreover, process limitations and improvement possibilities can be identified more easily at significantly lower cost. During hot rolling operations, the flatness actuators on the profile (F_{camber}) together with the thermal expansion of the rolls are the most important direct influencing factors in order to control the crown evolution throughout the rolling process.

Work roll thermal camber has a direct influence on profile and is caused by the temperature increase and the presence of temperature gradient due to heat conducted from the hot strip to the roll. Radial thermal expansion differs across the roll width due to axial heat flux towards the roll sides. The result is higher increase at the center comparing to the edges creating a thermal camber [8]. Thermal camber changes dynamically during production since the thermal state is influenced by many parameters such as the rolls core temperature, the temperature of the plate, the length of the pass, inter-pass time, rolling time since the last work roll replacement, etc.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Thus, a model was designed to study the influence of process parameters on the evolution of roll temperature and thermal camber. Industrially applied rolling parameters were employed for the calculation, and the results can be used as guidance for process optimization in a real production environment.

Thermal boundary loads (heating and cooling) were applied on the rotating roll separated in 5 main regions, as shown in Figure 12. The roll's surface temperature increases due to heat flux (\dot{q}_{strip}) in the contact with the plate which is hotter comparing to the roll during hot rolling. Heat is extracted from the roll due to natural convection and radiation (\dot{q}_{air}). Stronger cooling (\dot{q}_{cool}) is the effect of the nozzle sprays and the contact with the support roll (\dot{q}_{WB}). Between the cooling unit and the hot strip the coolant flows over the roll creating different cooling conditions (\dot{q}_{wet}). Each thermal load was calculated individually.

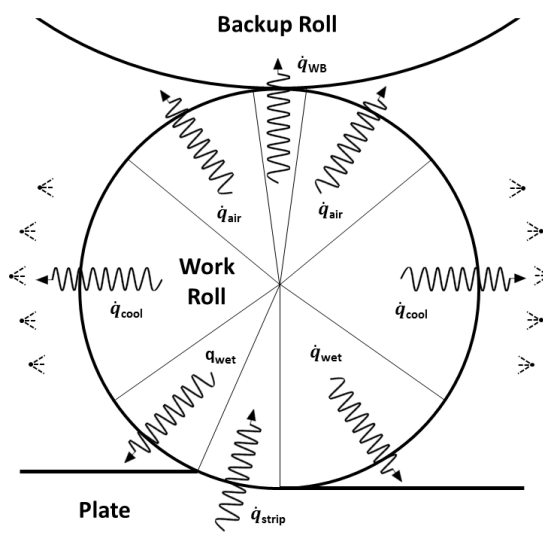


Figure 12. Schematic illustration of the zones with the different boundary conditions

The model can only be considered reliable after a validation process takes place. Validation can be very difficult in the aggressive industrial environment that also has various limitations. Such an example is the dynamic temperature measurement on the roll surface due to high temperatures, limited space and water/oil mist that limits the accuracy of the measurements. Additionally, the dynamic measurement of the roll diameter during the pass schedule is out of question. Even the static measurement of the roll can be very difficult because the roll has to be removed from the mill which requires enough time to finally make the measurement unrealistic. The validation was based on the assumption that the variation

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

on the roll geometry is reflected on the final strip geometry evolution something that can easily and reliably be measured by the rolling mills gauge measurement system. Thus, the difference between the strip crown at the beginning and at the end of a predesigned industrial pass trial was compared with the roll camber difference between the beginning and the end of the same pass. The result of the original data recording from the online thickness measuring device can be seen in Figure 13. The data refer to a pass with reduction from 6.6 mm to 4.4 mm, with entry temperature of 560 K. The average separating force for the pass was 5.8 MN. The roll temperature was measured before the pass to be 340 K.

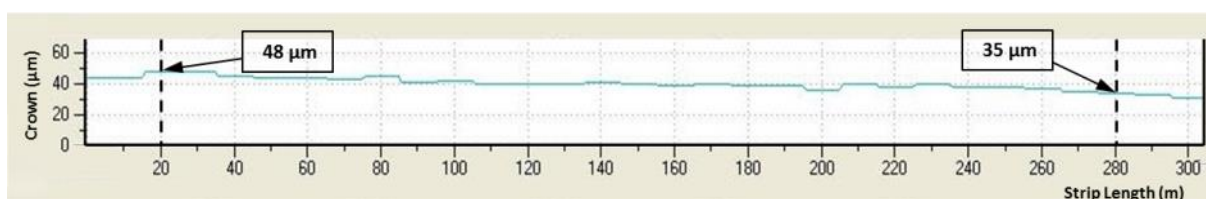


Figure 13. Original record of crown from the online thickness measuring device.

The original data were compared with the simulation result of the same pass. The crown evolution simulation result is illustrated in Figure 14. The first 20 meters were omitted from each case to avoid any instability and local effects; however, the thermal load on first 20 meters was included in the calculation.

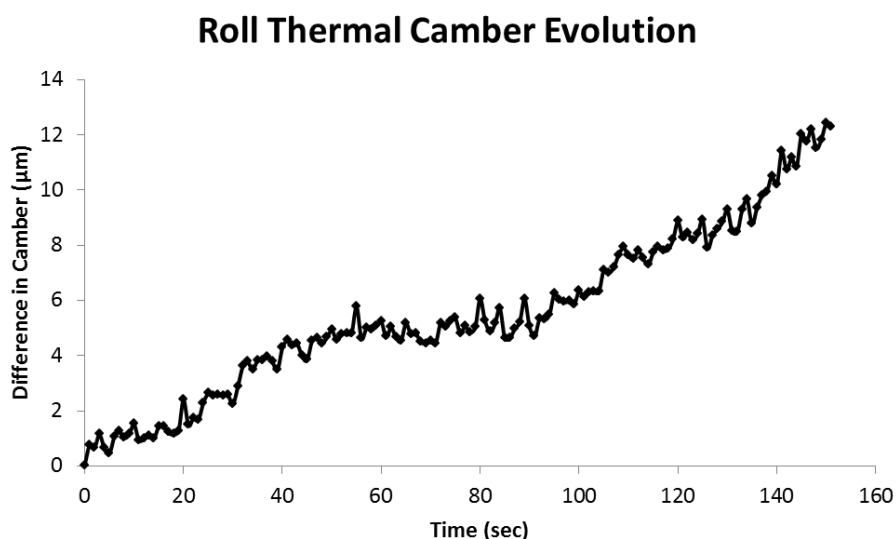


Figure 14. Calculated roll thermal camber evolution for the validation pass.

The measured crown on the plate (Figure 13) and the calculated camber of the roll (Figure 14) are in good agreement. The increase in crown of the plate was measured to be 13 μm

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

while the increase in camber was calculated to be 12.3 μm . After this validation step, the model was considered as reliable for further analysis.

The temperature gradient from a characteristic experiment is illustrated in Figure 15. The red color depicts the highest temperature region on the roll surface while in contact with the high temperature plate. Soon after the roll surface disengages from the plate, it quickly cools down passing through the cooling units, reaching the same temperature, when in steady state as before the contact with the plate. The width of the thermally affected region is similar to the width of the strip.

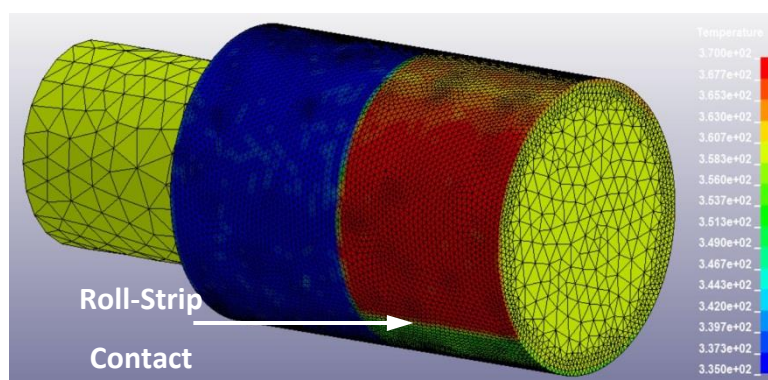


Figure 15. Roll temperature evolution in Kelvin (K).

In Figure 16 the temperature evolution of the surface and 13, 30, 45, 60 mm below the surface is illustrated. The surface temperature reaches steady state approximately 60 sec after the pass initiation while all the other temperatures never reach the steady state, which shows that although the surface temperature becomes stable, the overall temperature of the roll changes through the length of the pass.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

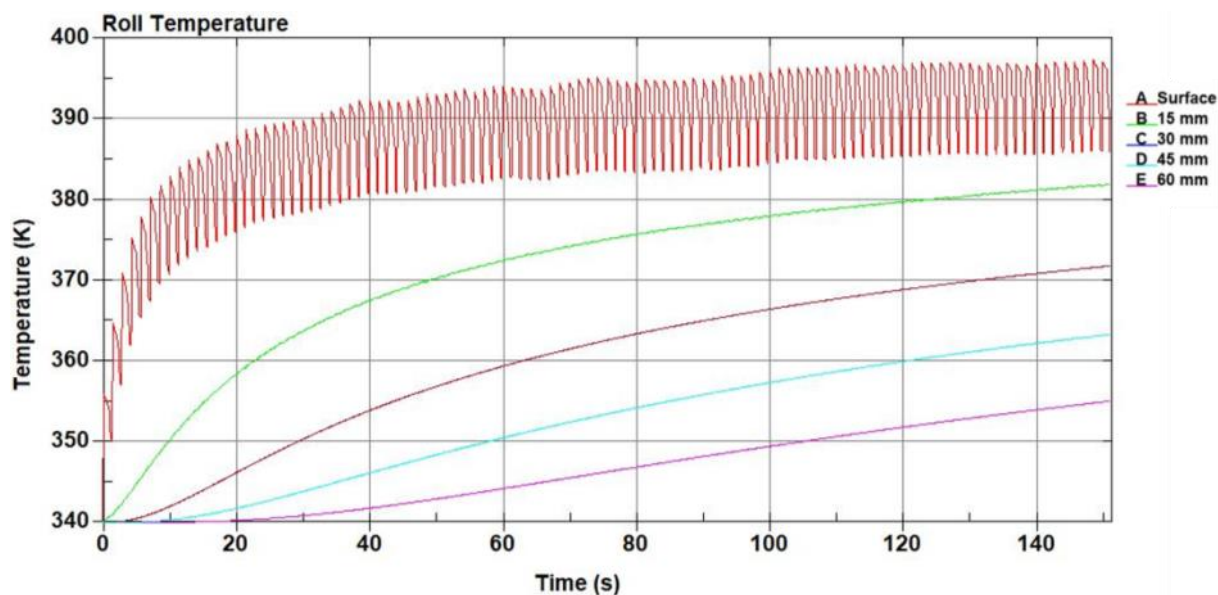


Figure 16. Roll Temperature Evolution

During the last passes cooling only at the entry side is applied on the roll as can be seen in Figure 17. In the above mentioned validation step, only the entry cooling was applied as well. However, the mill can utilize cooling also to the exit side, which in most cases is not used due to limitation related to surface quality and stains. Of course, the application of cooling from both sides is more efficient comparing to entry side only and more specifically it will be $\sim 30\%$ more efficient to use both cooling units.

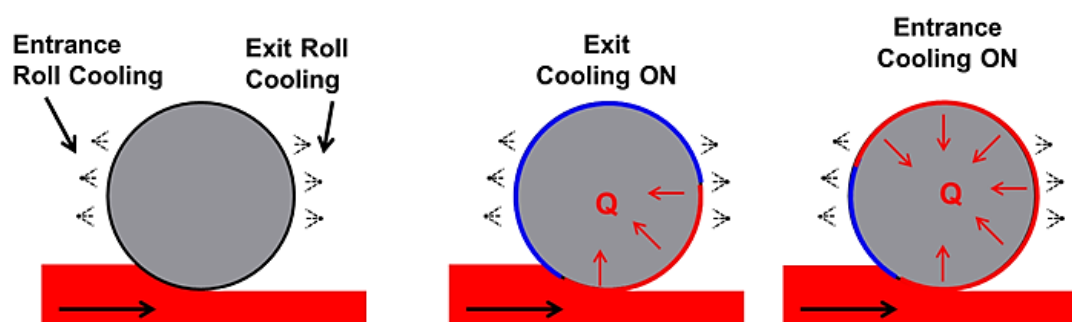


Figure 17. Schematic representation of the position of the cooling units and their influence on the energy balance.

This cooling efficiency difference is imprinted on the geometric evolution of the roll through the pass. As can be seen in Figure 18, after 100 s of processing the camber increases by $\sim 6\ \mu\text{m}$ in the case of only entry cooling and $\sim 4\ \mu\text{m}$ when cooling from both sides is applied.

Entry/Both cooling units comparison

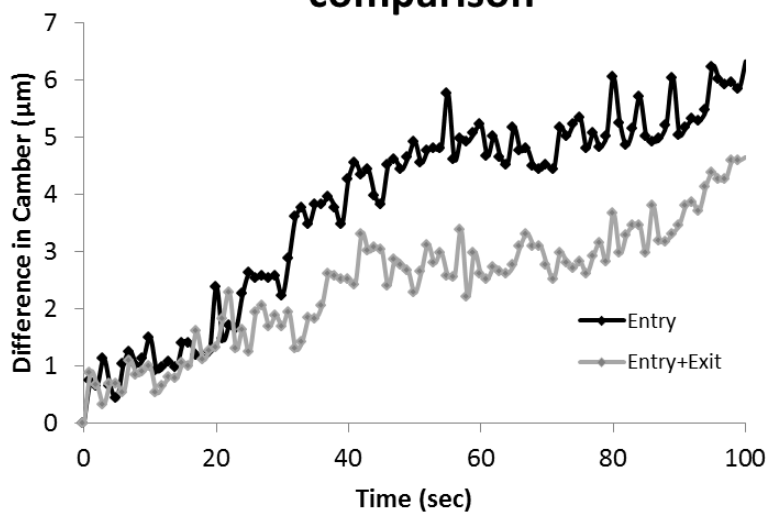


Figure 18. Comparison of camber evolution between entry cooling applied and entry and exit cooling applied simultaneously

Very important is also the influence of the roll's initial temperature on the camber evolution as can be seen in Figure 19. After 100 s of processing the camber increases by ~ 6 μm in the case of 340 K roll initial temperature and ~ 4 μm in case of 380 K roll initial temperature.

340 K/380 K initial roll temperature comparison

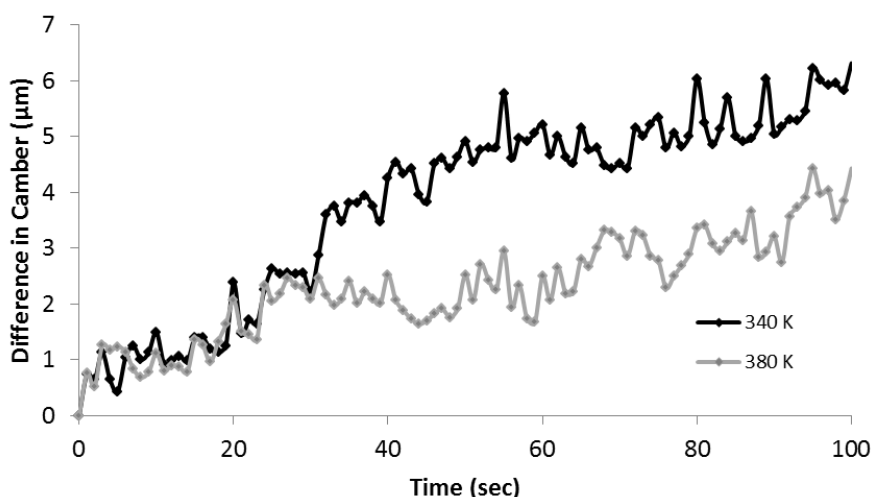


Figure 19. Comparison of camber evolution between rolls with 340 K και 380 K initial temperature

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

The higher temperature rolls apart from geometrically more stable are also thermally more stable. In Figure 20 the temperature evolution diagram can be seen for 340 K initial roll temperature and 380 K initial roll temperature. For 100 s of processing and for 15 mm away from the surface, the temperature difference between the start and the finish of the simulation experiment is 38 K ($\Delta T_{340K} = 340 - 378 = 38 \text{ K}$) for the cold roll and 13 K ($\Delta T_{380K} = 380 - 393 = 13 \text{ K}$) for the hot one. Very interesting is the fact that although the temperature difference at the beginning of the simulation experiment between the rolls is 40 K, the temperature after 100 s is very close with only 5 K difference in surface temperature.

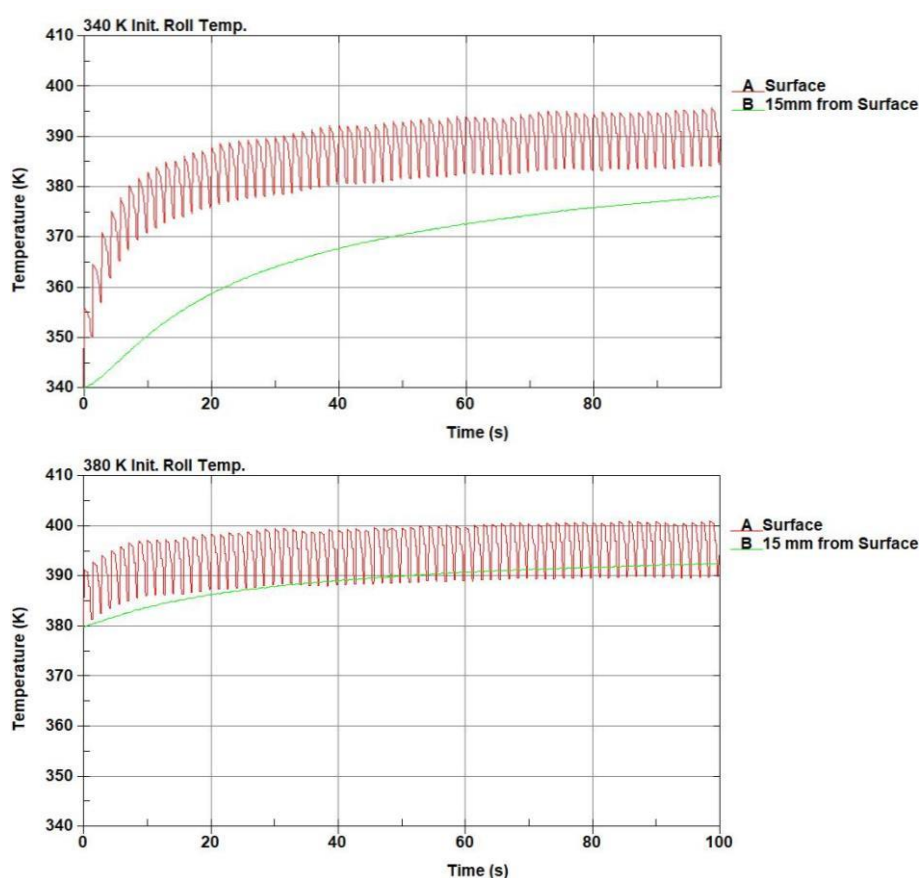


Figure 20. Comparison of temperature evolution between rolls with 340 K (up) και 380 K (down) initial temperature

The hot roll has slightly lower heat dissipation from the plate to the roll (~1%) during the steady state comparing to the cold roll, however, it has significantly lower heat dissipation at the beginning of the pass (~7%). The lower heat dissipation will balance the temperature difference between the front and back end of the plate comparing to the main body,

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

something that will further improve the flatness of the plate through the length as the temperature variation has a result the rolling force variation and thus crown variation.

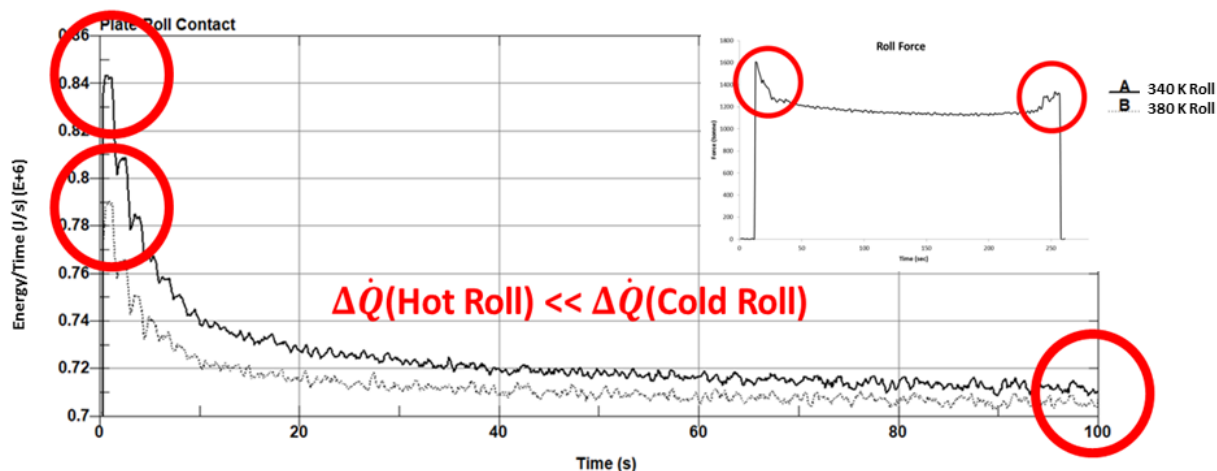


Figure 21. Comparison of heat dissipation from the plate towards the roll for different initial roll temperatures (340 K και 380 K).

Although the plate temperature is also a factor that might be able to alter the roll camber, as can be seen in Figure 22, the influence is not as significant comparing to the above mentioned process parameters.

560 K and 620 K initial plate temperature comparison

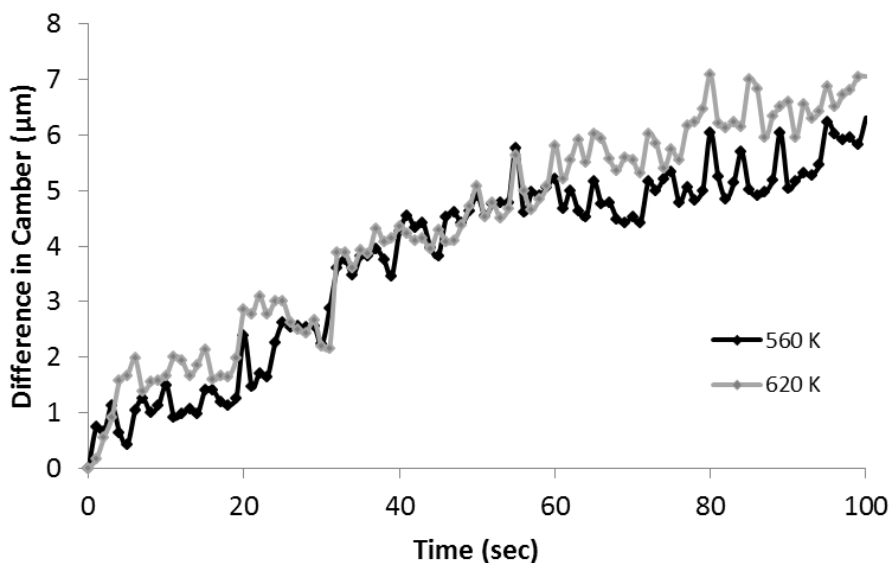


Figure 22. Comparison of roll camber evolution for rolling plates with different temperature (560 K και 620 K)

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

After the roll's thermal balance simulation, the model was modified to predict the crown through the length. Indicative result, seen in Figure 23, show that in a specific pass the whole range of bending force was not adequate to completely normalize the crown though the length of the pass. The pass started with 0 bar pressure and gradually was raised to the maximum pressure. The crown was simulated to be 0.23 % at the beginning and 0.15 % at the end which is good agreement also with the measured crown.

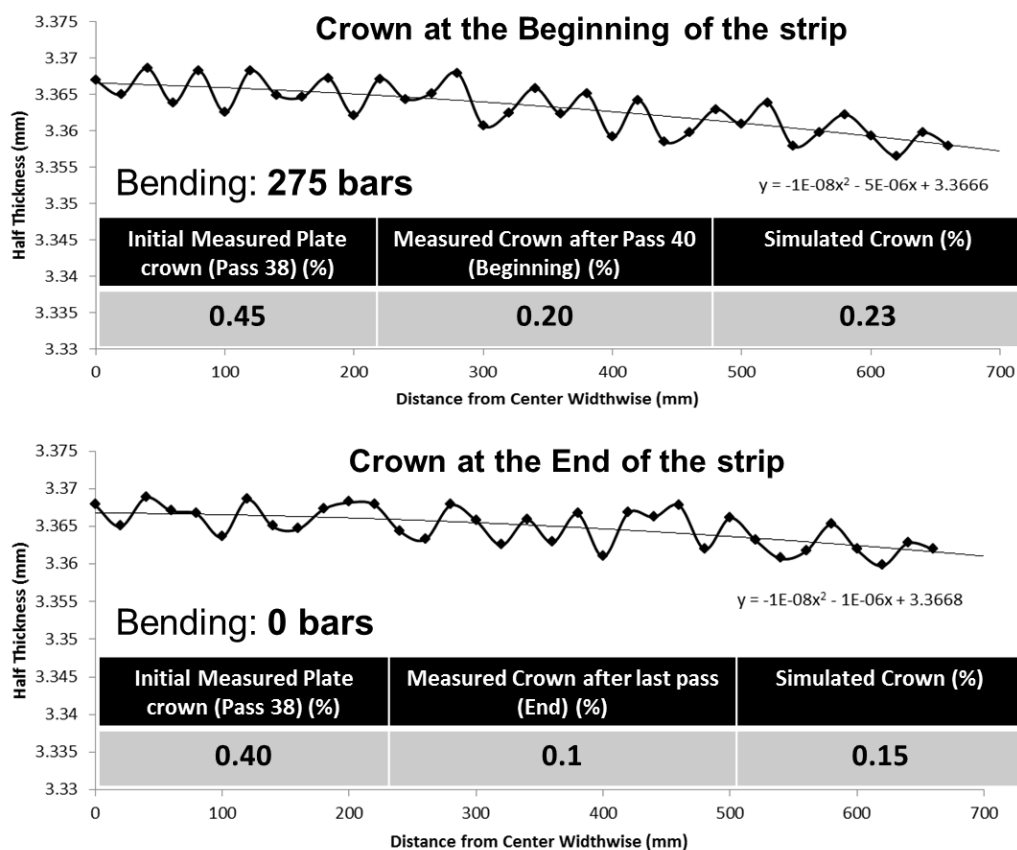


Figure 23. Comparison between simulated and measured crown at the beginning and end of a pass using adjustable roll bending force

The conclusions of the present dissertation are summarized below:

1. The calculated rolling force, crown, and temperature are in good agreement with the real industrial measurements. The variation between the calculated and measured data falls below 10 % for the force and temperature and below 15% for the crown.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

2. The roll deformation in different passes can be applied by the application of counter bending force. Nevertheless, in certain passes the range of the bending system is not adequate to perfectly correct the crown through length.
3. Important role in the resulting crown plays the thermal expansion of the rolls.
4. By increasing the roll temperature will lead to a more thermally stable roll. As a result:
 - i. A more uniform heat extraction from the plate through the length can be achieved.
 - ii. The roll will be more stable geometrically
 - iii. Less difference in the heat extraction between the front end and the main body of the plate until the roll's surface reaches steady state.
5. The use of both cooling units will increase cooling efficiency.

IV. Περιεχόμενα

I. Ευχαριστίες	4
II. Περίληψη	5
III. Synopsis.....	7
IV. Περιεχόμενα.....	27
V. Λίστα Εικόνων	31
VI. Λίστα Πινάκων.....	37
VII. Εισαγωγή	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Η κατεργασία της έλασης	48
1.1 Το αλουμίνιο και τα κράματά του	49
1.1.1 Κράματα αλουμινίου σειράς 5xxx	51
1.2 Θερμή έλαση	55
1.3 Μηχανολογικός εξοπλισμός.....	57
1.4 Επιπεδότητα	61
1.4.1 Κάμψη των ράουλων και αντισταθμιστικός μηχανισμός.....	64
1.4.2 Θερμική διαστολή των ράουλων	66
1.5 Μηχανική της έλασης.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Μηχανική της μορφοποίησης των μετάλλων	74
2.1 Τάσεις και παραμορφώσεις	75
2.1.1 Τάση	75
2.1.2 Παραμόρφωση.....	79
2.1.3 Ο κύκλος του Mohr	82

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

2.2	Ελαστικότητα	83
2.3	Θεωρία της Πλαστικότητας	84
2.3.1	Κριτήριο Tresca	85
2.3.2	Κριτήριο von Mises	86
2.3.3	Κανόνες πλαστικής διαρροής	87
2.4	Φαινόμενα κατά την πλαστική διαρροή	88
2.4.1	Το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.....	88
2.4.2	Σκλήρυνση από ενδοτράχυνση	91
2.4.3	Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στο όριο διαρροής.....	92
2.4.4	Η επίδραση της θερμοκρασίας στο όριο διαρροής.....	93
2.4.5	Βασικά μαθηματικά μοντέλα υλικών	93
2.5	Έργο και ενέργεια της παραμόρφωσης	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :	Μεθοδολογία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία	97
3.1	Στάδια ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	98
3.2	Διακριτοποίηση	100
3.3	Ορισμός οριακών συνθηκών	102
3.4	Βασικές εξισώσεις της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :	Σύγκριση Implicit και Explicit μεθόδων για την προσομοίωση της έλασης	
	112	
4.1	Εισαγωγή	112
4.2	Χρονική ολοκλήρωση στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων - Time integration in Finite Element Method (FEM)	115
4.2.1	Έμμεση ολοκλήρωση.....	115
4.2.2	Άμεση ολοκλήρωση	116
4.3	Διαδικασία της προσομοίωσης	117

**Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση
πεπερασμένων στοιχείων**

4.4	Αποτελέσματα σύγκρισης των μεθόδων χρονικής ολοκλήρωσης.....	120
4.4.1	Υπολογισμός φορτίου έλασης και σύγκλιση.	120
4.4.2	Υπολογισμός φορτίου έλασης και σύγκλιση.	121
4.4.3	Επίδραση της τριβής στον υπολογιστικό χρόνο.	123
4.5	Συμπεράσματα ως προς τις μεθόδους προσομοίωσης	124
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :	Προσομοίωση της κατεργασίας θερμής έλασης αλουμινίου	125
5.1	Μοντέλο θερμού ελαστρού 4-high	125
5.1.1	Προετοιμασία της γεωμετρίας του τμήματος για την ανάλυση	125
5.1.2	Επιβεβαίωση ελαστικής παραμόρφωσης ελαστρού	127
5.2	Μοντέλο υλικού για την πλάκα αλουμινίου	129
5.3	Μοντέλο τριβής	131
5.4	Θερμικές οριακές συνθήκες για την πλάκα	132
5.5	Θερμικές οριακές συνθήκες στο ράουλο εργασίας.....	135
5.5.1	Θερμική αγωγιμότητα.....	136
5.5.2	Οριακή συνθήκη για την επαφή μεταξύ ράουλου εργασίας και πλάκας	137
5.5.3	Οριακή συνθήκη για το ψυκτικό μέσο.....	137
5.5.4	Οριακή συνθήκη για την επαφή μεταξύ ράουλου εργασίας και ράουλου αντιστήριξης.....	138
5.5.5	Οριακή συνθήκη για την επιφάνεια διαβροχής μεταξύ ψυκτικών μονάδων και πλάκας	139
5.5.6	Οριακή συνθήκη για την ψύξη στο περιβάλλον	140
5.6	Αναλυτική περιγραφή της σύνθεσης των εντολών.....	141
5.6.1	Ορισμός μερών	142
5.6.2	Μοντέλα υλικών.....	143
5.6.3	Ορισμός οριακών συνθηκών.....	144

**Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση
πεπερασμένων στοιχείων**

5.6.4	Αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας.....	147
5.6.5	Οριακές συνθήκες επαφής μεταξύ μερών.	148
5.6.6	Έλεγχος μοντέλου προσομοίωσης.....	149
5.6.7	Ανάθεση ιδιοτήτων στα διαφορετικά μέρη.....	151
5.6.8	Έλεγχος δεδομένων αποθήκευσης.....	152
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Υπολογισμός της επιπεδότητας της πλάκας αλουμινίου μετά από θερμή έλαση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.		
6.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης της έλασης	155
6.1.1	Υπολογισμός δύναμης έλασης.....	159
6.1.2	Θερμική ανάλυση.....	161
6.1.3	Πρόβλεψη επιπεδότητας	162
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Εξέλιξη της θερμοκρασίας και της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας .		
7.1	Επικύρωση θερμικού μοντέλου	167
7.2	Θερμική ανάλυση.....	169
7.3	Επίδραση της θέσης της ψυκτικής μονάδας.....	171
7.4	Επίδραση της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας	173
7.5	Επίδραση της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : Συζήτηση για τα αποτελέσματα		
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : Συμπεράσματα.....		
VIII.	Βιβλιογραφία	190
IX.	Σύντομο Βιογραφικό	209

V. Λίστα Εικόνων

Εικόνα VII.1. Γράφημα εξέλιξης της παραγωγής αλουμινίου (1900-2015).....	39
Εικόνα VII.2. Περίγραμμα της Διατριβής.	46
Εικόνα 1.1. Σκαρίφημα της κατεργασίας της έλασης.....	48
Εικόνα 1.2. Διάγραμμα επιμήκυνσης-αντοχής σε εφελκυσμό για κράματα αλουμινίου και χάλυβα.	50
Εικόνα 1.3. Διάγραμμα επιμήκυνσης-ειδικής αντοχής σε εφελκυσμό για κράματα αλουμινίου και χάλυβα.....	50
Εικόνα 1.4. Διμερές διάγραμμα ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγνησίου	52
Εικόνα 1.5. Μέρη αυτοκινήτου κατασκευασμένα από αλουμίνιο	53
Εικόνα 1.6. Βασικές μέθοδοι παραγωγής ελασμάτων από χύτευση και θερμή έλαση.....	56
Εικόνα 1.7. Βασικές διατάξεις ελάστρων με παράλληλα ράουλα	58
Εικόνα 1.8. Σκαρίφημα διάταξης ελάστρου τύπου «4-high»	59
Εικόνα 1.9. Εγκατεστημένο έλαστρο τύπου «4-high»	59
Εικόνα 1.10. Επιπεδότητα του ελάσματος κατά το πλάτος.....	61
Εικόνα 1.11. Αιτίες μεταβολής της γεωμετρίας των ράουλων εργασίας.....	62
Εικόνα 1.12. Επίπεδα ελέγχου της επιπεδότητας	63
Εικόνα 1.13. Εφαρμογή δύναμης για την αντίρροπη κάμψη των ράουλων	65
Εικόνα 1.14. Ανάπτυξη θερμικής διαστολής στα ράουλα εργασίας κατά την έλαση.....	66
Εικόνα 1.15. Χρήση ψυκτικών μονάδων για την ψύξη του ράουλου εργασίας	67
Εικόνα 1.16. Γεωμετρική αντιστοιχία πλάκας εισόδου και εξόδου	68
Εικόνα 1.17. Ισοζύγιο δυνάμεων στην πλάκα κατά παραμόρφωση στην έλαση	68
Εικόνα 1.18. Λόφος τριβής στην έλαση	71
Εικόνα 1.19. Επίδραση της τάνυσης στον λόφο τριβής.....	72

**Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση
πεπερασμένων στοιχείων**

Εικόνα 1.20. Επίδραση της συμπεριφοράς του υλικού στον λόφο τριβής	72
Εικόνα 1.21. Επίδραση της τριβής και του υποβιβασμού στον λόφο τριβής	73
Εικόνα 2.1. Ορισμός τάσεων	75
Εικόνα 2.2. Οι εννιά συνιστώσες τάσεων που ασκούνται στην μοναδιαία κυψελίδα	76
Εικόνα 2.3. Ισορροπία της εντατικής κατάστασης σε τρεις διαστάσεις.....	77
Εικόνα 2.4. Γραφική απεικόνιση των ορθών τάσεων	78
Εικόνα 2.5. Παραμόρφωση στο επίπεδο x-y	80
Εικόνα 2.6. Τρισδιάστατος κύκλος του Mohr	82
Εικόνα 2.7. Απεικόνιση του ορίου διαρροής Tresca.....	85
Εικόνα 2.8. Απεικόνιση του ορίου διαρροής von Mises.....	86
Εικόνα 2.9. Καμπύλη μηχανικής τάσης - παραμόρφωσης	88
Εικόνα 2.10. Καμπύλη πραγματικής τάσης - παραμόρφωσης.....	89
Εικόνα 2.11. Μεταβολή του ορίου διαρροής κατά την κυκλική φόρτιση.....	90
Εικόνα 2.12. Επίδραση της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση στον γεωμετρικό τόπο του κριτηρίου διαρροής.	91
Εικόνα 2.13. Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στην τάση πλαστικής διαρροής.....	92
Εικόνα 2.14. Επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση πλαστικής διαρροής.....	93
Εικόνα 2.15. Γραφικές παραστάσεις μοντέλων υλικού για ενδοτράχυνση	95
Εικόνα 3.1. Στάδια για την επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	99
Εικόνα 3.2. Τύποι στοιχείων	100
Εικόνα 3.3. Διαδικασία μοντελοποίησης με εφαρμογή σε θερμό έλαστρο	101
Εικόνα 3.4. Τύποι οριακών συνθηκών	102
Εικόνα 3.5. Γραφική αναπαράσταση παραμόρφωσης σώματος σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων	104
Εικόνα 3.6. 8-κομβικό εξάεδρο στερεό στοιχείο	108

**Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση
πεπερασμένων στοιχείων**

Εικόνα 4.1. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της κατεργασίας έλασης.	117
Εικόνα 4.2. Διάγραμμα δυνάμεων που προκύπτουν από την άμεση και έμμεση ανάλυση.	120
Εικόνα 4.3. Μέση τιμή φορτίου έλασης για διαφορετικά μεγέθη μοντέλων.	121
Εικόνα 4.4. Σύγκριση χρόνου επίλυσης της έμμεσης και άμεσης μεθόδου για διαφορετικά μεγέθη μοντέλων.	122
Εικόνα 4.5. Επίδραση του συντελεστή τριβής στον χρόνο επίλυσης.	123
Εικόνα 5.1. Σχηματική απεικόνιση του (a) θερμού ελάστρου, (b) 3D-FEM μοντέλου.	127
Εικόνα 5.2. Καμπύλη ελαστικότητας θερμού ελάστρου.	129
Εικόνα 5.3. Εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο από αλουμίνιο σειράς 5xxx μετά την χύτευση (πάνω αριστερά), μετά την θερμή έλαση (πάνω δεξιά) και μετά την ψυχρά έλαση (κάτω)	129
Εικόνα 5.4. Χάρτης IPF της μικροδομής μετά την θερμή έλαση.	130
Εικόνα 5.5. Σκαρίφημα θερμικών φορτίων κατά την θερμή έλαση.	133
Εικόνα 5.6. Σκαρίφημα μεθοδολογίας επικύρωσης συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμής πλάκας και ράουλου εργασίας.	135
Εικόνα 5.7. Σχηματική απεικόνιση των ζωνών με διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά την επιβολή θερμικών φορτίων στο ράουλο εργασίας.	136
Εικόνα 5.8. Στιγμιότυπο από το γραφικό περιβάλλον χρήστη του λογισμικού LS-PrePost.	141
Εικόνα 5.9. Καρτέλα “Entity Creation” για τον ορισμό των διαφορετικών μερών.	142
Εικόνα 5.10. Μοντέλο «MAT_JOHNSON_COOK» για την πλάκα αλουμινίου.	143
Εικόνα 5.11. Μοντέλο «MAT_ELASTIC» για τα ράουλα.	143
Εικόνα 5.12. Θερμικό μοντέλο «MAT_THERMAL_ISOTROPIC».	143
Εικόνα 5.13. Μοντέλο θερμικής διαστολής «MAT_ADD_THERMAL_EXPANSION».	144
Εικόνα 5.14. Επίπεδο συμμετρίας επιπέδου YZ.	144
Εικόνα 5.15. Καρτέλα εντολής «CONSTRAINED_GLOBAL» για τον ορισμό επιπέδου συμμετρίας.	145

**Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση
πεπερασμένων στοιχείων**

Εικόνα 5.16. Κόμβοι για τον ορισμό περιορισμών «BOUNDARY_SPC_SET».	145
Εικόνα 5.17. Καρτέλα εντολής «BOUNDARY_SPC_SET» για τον περιορισμό βαθμών ελευθερίας συγκεκριμένων κόμβων.....	146
Εικόνα 5.18. Καρτέλα εντολής «BOUNDARY_CONVOLUTION_SET» για την απαγωγή θερμότητας από την επιφάνεια της πλάκας προς το περιβάλλον.....	146
Εικόνα 5.19. Άκαμπτο σώμα (πράσινο) στην άκρη του ράουλου εργασίας (ροζ) στο οποίο θα εφαρμοστεί η οριακή συνθήκη περιστροφής.	147
Εικόνα 5.20. Καρτέλα εντολής BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID για την περιστροφή του ράουλου εργασίας.	147
Εικόνα 5.21. Καρτέλα εντολής «INITIAL_TEMPERATURE_SET» για τον ορισμό αρχικής θερμοκρασίας κόμβων.....	148
Εικόνα 5.22. Καρτέλα εντολής «INITIAL_VELOCITY» για τον ορισμό αρχικής ταχύτητας σωμάτων.	148
Εικόνα 5.23. Καρτέλα εντολής «CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_SMOOTH» για επαφή μεταξύ σωμάτων.....	149
Εικόνα 5.24. Καρτέλα εντολής για τον τερματισμό της προσομοίωσης.	149
Εικόνα 5.25. Καρτέλα εντολής για το χρονικό βήμα του θερμικού μοντέλου.....	150
Εικόνα 5.26. Καρτέλα εντολής για την ενεργοποίηση συζευγμένης θερμομηχανικής προσομοίωσης.....	150
Εικόνα 5.27. Καρτέλα επιλογής παραμέτρων θερμικής ανάλυσης.....	150
Εικόνα 5.28. Καρτέλα επιλογής παραμέτρων επαφών μεταξύ μερών.	151
Εικόνα 5.29. Καρτέλα ενεργοποίησης ενημέρωσης τάσεων δεύτερης τάξης.	151
Εικόνα 5.30. Καρτέλα ενεργοποίησης αποθήκευσης αρχείου .dgnain.....	151
Εικόνα 5.31. Καρτέλα επιλογής μοντέλου περιγραφής των πεπερασμένων στοιχείων.....	152
Εικόνα 5.32. Καρτέλα ανάθεσης ιδιοτήτων στα εκάστοτε μέρη.....	152

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Εικόνα 6.1. Στιγμιότυπο προσομοίωσης υπολογισμού των τάσεων von mises σε λεπτή πλάκα και στα ράουλα εργασίας και αντιστήριξης σε (MPa).....	156
Εικόνα 6.2. Στιγμιότυπο της προσομοίωσης της κατανομής της πίεσης κατά την έλαση σε χονδρή πλάκα σε (N/mm ²).....	156
Εικόνα 6.3. Στιγμιότυπο της προσομοίωσης της κατανομής της πλαστικής παραμόρφωσης κατά το πάχος σε χονδρή πλάκα.....	157
Εικόνα 6.4. Στιγμιότυπο της προσομοίωσης της κατανομής της πλαστικής παραμόρφωσης κατά το πάχος σε λεπτή πλάκα.....	157
Εικόνα 6.5. Μετατόπιση της επιφάνειας κατά την έλαση λεπτής πλάκας.	158
Εικόνα 6.6. Διαγράμματα συνολική ενέργειας (επάνω) και εξωτερικού έργου (κάτω) του συστήματος.....	159
Εικόνα 6.7. Προσομοίωση της δύναμης έλασης.	160
Εικόνα 6.8. Σύγκριση μεταξύ της μετρούμενης στο έλαστρο και της υπολογιζόμενης τιμής του φορτίου της έλασης.	160
Εικόνα 6.9. Θερμοκρασιακό προφίλ ελάσματος κατά την διαδικασία της θερμής έλασης.	161
Εικόνα 6.10. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στην επιφάνεια και στο κέντρο της πλάκας.	162
Εικόνα 6.11. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενη και υπολογιζόμενης θερμοκρασία της πλάκας.	162
Εικόνα 6.12. Η επίδραση της καμπτικής δύναμης στην επιπεδότητα της πλάκας.	163
Εικόνα 6.13. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης καμπυλότητας.	164
Εικόνα 7.1. Καταγραφή της επιπεδότητας της πλάκας κατά το μήκος της από το εγκατεστημένο στο έλαστρο μετρητικό όργανο υψηλής ακρίβειας.	168
Εικόνα 7.2. Εξέλιξη της καμπυλότητας του ράουλου εργασίας κατά την διάρκεια του υποβιβασμού.	169
Εικόνα 7.3. Στιγμιότυπο της θερμικής προσομοίωσης του ράουλου εργασίας.	170
Εικόνα 7.4. Εξέλιξη της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας.....	171

**Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση
πεπερασμένων στοιχείων**

Εικόνα 7.5. Σκαρίφημα της θέσης των ψυκτικών μονάδων και της επίδρασης αυτών στο θερμικό ισοζύγιο.....	171
Εικόνα 7.6. Συνολική ροή θερμότητας από το ράουλο εργασίας προς τις ψυκτικές μονάδες	172
Εικόνα 7.7. Σύγκριση της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας με χρήση μόνο της ψυκτικής μονάδας εισόδου και της χρήσης των ψυκτικών μονάδων εισόδου και εξόδου ταυτόχρονα	173
Εικόνα 7.8. Σύγκριση της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας για ράουλο εργασίας με αρχική θερμοκρασία 340 K και 380 K	174
Εικόνα 7.9. Συγκριτικά διαγράμματα της εξέλιξης της θερμοκρασίας για αρχική θερμοκρασία 340 K (επάνω) και 380 K (κάτω).....	175
Εικόνα 7.10. Σύγκριση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ράουλων εργασίας με διαφορετική θερμοκρασία (340 K και 380 K).	176
Εικόνα 7.11. Σύγκριση της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας για πλάκα με αρχική θερμοκρασία 560 K και 620 K	177
Εικόνα 8.1. Σύγκριση της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης επιτεδότητας για την αρχή και το τέλος υποβιβασμού με χρήση μεταβλητής πίεσης του υδραυλικού συστήματος κάμψης.....	183
Εικόνα 8.2. Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας του ράουλου εργασίας χωρίς ψύξη	185
Εικόνα 8.3. Πρόταση για βελτίωση της θερμικής ισορροπίας του ράουλου εργασίας.....	186

VI. Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.1. Ταξινόμηση των σειρών των κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου	51
Πίνακας 4.1. Διαστάσεις συστήματος μελέτης για την προσομοίωση της έλασης	118
Πίνακας 4.2. Ιδιότητες υλικών για την προσομοίωση	119
Πίνακας 4.3. Πυκνότητες πλέγματος που μετρούνται σε αριθμούς κόμβων	119
Πίνακας 5.2. Μηχανικές ιδιότητες ράουλων και πλάκας αλουμινίου [135]	131
Πίνακας 5.4. Παράμετροι μοντέλου τριβής μεταξύ ράουλου και πλάκας [136]	132
Πίνακας 5.5. Παράμετροι για την θερμική ανάλυση του ράουλου εργασίας	140

VII. Εισαγωγή

VII.1 Γενικό υπόβαθρο

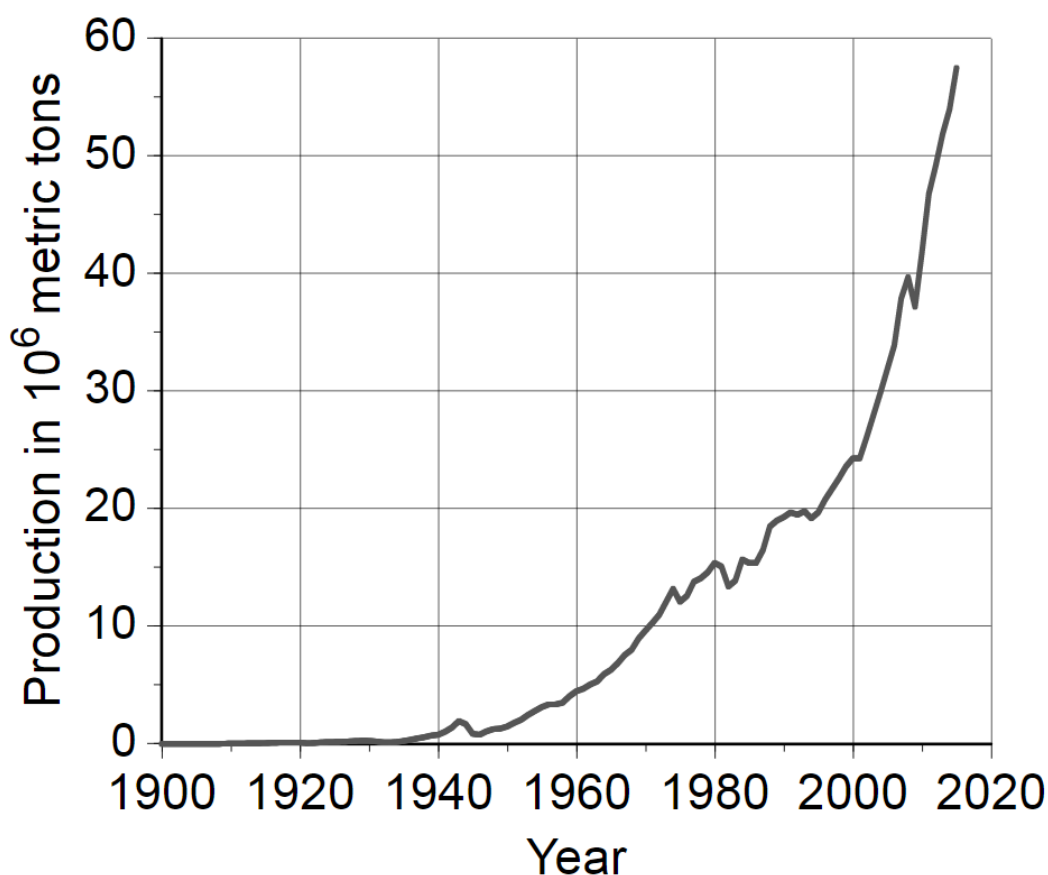
Μεταξύ των τεχνολογιών μορφοποίησης, η μέθοδος της έλασης είναι από τις πιο διαδεδομένες για τη διαμόρφωση των περισσότερων ευρέως χρησιμοποιούμενων μεταλλικών κραμάτων. Έλαση ορίζεται η κατεργασία κατά την οποία το προς διαμόρφωση τεμάχιο πχ. μια μεταλλική πλάκα εισέρχεται μεταξύ δύο αντίστροφα περιστρεφόμενων ράουλων με διάκενο μικρότερο του πάχους του υπό διαμόρφωση υλικού με αποτέλεσμα στην έξοδο να μειώνεται το πάχος του. Κατά την κατεργασία της έλασης συμβαίνουν πολύπλοκα φαινόμενα στο υλικό, καθώς και στο έλαστρο λόγω της αλληλεπίδρασή τους, τα οποία με την σειρά τους επηρεάζουν την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.

Όταν η διαμόρφωση συμβαίνει σε υψηλή θερμοκρασία κοντά ή και υψηλότερα της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του υπό διαμόρφωση υλικού, χαρακτηρίζεται ως θερμή έλαση. Σε χαμηλότερες του σημείου ανακρυστάλλωσης του υλικού, έχουμε την ψυχρή έλαση. Τα φαινόμενα, που λαμβάνουν χώρα και μεταβάλλονται προσοδευτικά ή τάχιστα είναι εξαιρετικά περίπλοκο ή αδύνατο να μετρούνται επί τόπου και να ελέγχονται κατά τη διάρκεια των διαφορετικών βημάτων παραμόρφωσης. Επομένως, η βελτιστοποίηση της κατεργασίας έλασης είναι ένα εξόχως πολύπλοκο και εξαιρετικά δύσκολο εγχείρημα. Το πεδίο των τάσεων, η τοπική παραμόρφωση, το θερμοκρασιακό πεδίο, η τελική γεωμετρία, κ.α., επηρεάζουν την τελική ποιότητα του υλικού. Αυτά με τη σειρά τους μπορούν να ελεγχθούν με τις κατάλληλες συνθήκες και παραμέτρους έλασης (φορτίο, ταχύτητα, θερμοκρασία εισόδου, ψυκτικές μονάδες, τάνυση, συστήματα κάμψης, κτλ.).

Βασικά βιομηχανικά υλικά, των οποίων ο κύριος όγκος ετησίως παράγεται μέσω έλασης είναι ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Η χρήση του αλουμινίου έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια (Εικόνα VII.1) [17], λόγω του συνδυασμού καλής αντοχής και χαμηλού βάρους [18]. Αν εξαιρέσουμε το υψηλό κόστος πρωτογενούς παραγωγής του, το εως σήμερα σχετικά μικρό ποσοστό ανακύκλωσής του και την ανάγκη για χρήση καθαρού αλουμινίου

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

(σειρά 1xxx) και πρωτογενή κραμάτωση για την παραγωγή των διαφορετικών βιομηχανικών κραμάτων, οι διαδικασίες της χύτευσης και διαμόρφωσής του πραγματοποιούνται εν σειρά με σχετικά απλά βήματα ως σήμερα. Περαιτέρω, το αλουμίνιο παρουσιάζει ικανοποιητική αντίσταση σε χημικά, καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και είναι επιδεκτικό σε επιφανειακές κατεργασίες. Για τους λόγους αυτούς βρίσκει πολλές εφαρμογές οι σημαντικότερες των οποίων είναι για την κατασκευή μέσων μεταφοράς, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην συσκευασία, στα τρόφιμα, ως δομικό στοιχείο στον τομέα των κατασκευών, στα ηλεκτρονικά και αλλού.



Εικόνα VII.1. Γράφημα εξέλιξης της παραγωγής αλουμινίου (1900-2015)

Η αυξημένη ζήτηση για υψηλής ποιότητας πλατεών προϊόντων αλουμινίου έλασης έχει οδηγήσει σε διάφορες μελέτες που σχετίζονται με την επίδραση των παραμέτρων έλασης στην επιτεδότητα της πλάκας, όπου είναι και ένα από τα βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Οι μεγάλες δυνάμεις, που αναπτύσσονται μεταξύ της πλάκας και των ράουλων εργασίας έχουν ως αποτέλεσμα την κάμψη αυτών, αλλά και των ράουλων αντιστήριξης και, κατά συνέπεια, την ανισοκατανομή του πάχους κατά το πλάτος της πλάκας. Η κάμψη των

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

ράουλων λόγω του φορτίου έλασης μαζί με την θερμική διαστολή και τη φθορά τους αποτελούν τους κύριους παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την τελική γεωμετρία της πλάκας [1,19,2].

Τα περισσότερα εργοστάσια παραγωγής πλατεών προϊόντων χρησιμοποιούν τον ίδιο εξοπλισμό για την έλαση ενός ευρέως φάσματος υλικών με διάφορα επίπεδα μηχανικών ιδιοτήτων, αρχική γεωμετρία της πλάκας και προδιαγραφές τελικού προϊόντος. Κατά συνέπεια, το ίδιο σχέδιο έλασης δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις επιπεδότητας όλων των προϊόντων. Για τον σκοπό αυτό, όλα τα έλαστρα με ράουλα εργασίας και αντιστήριξης είναι εφοδιασμένα με υδραυλικά συστήματα, που επιτρέπουν την ρύθμιση της κάμψης των ράουλων για τη διόρθωση της επιπεδότητας της πλάκας σύμφωνα με τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ρύθμιση της κάμψης κυλίνδρων είναι προκαθορισμένη για κάθε σχέδιο έλασης και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον μηχανικό που όρισε το σχέδιο έλασης, τον χειριστή και την εμπειρία που αποκτήθηκε από προηγούμενα σχέδια έλασης [3]. Ωστόσο, σε πραγματικό περιβάλλον παραγωγής, η τελική επιπεδότητα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και η σωστή αντισταθμιστική δύναμη κάμψης για την διόρθωση της επιπεδότητας είναι δύσκολο να προσδιοριστεί κατά τη διάρκεια του σταδίου προετοιμασίας του σχεδίου έλασης, πόσο μάλλον να ρυθμιστεί μεταξύ των διαδοχικών υποβιβασμών. Ακόμα και στα έλαστρα με αυτόματο καμπτικό μηχανισμό, ο σωστός προσδιορισμός του στόχου για την δύναμη κάμψης έχει μεγάλη σημασία.

Στην παρούσα Διατριβή, αναπτύχθηκε τρισδιάστατο μοντέλο της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της έλασης στην επιπεδότητα τη πλάκας αλουμινίου κατά την κατεργασία της θερμής έλασης. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό του σχεδίου έλασης, καθώς και ως οδηγός για τις ρυθμίσεις της καμπτικής δύναμης μεταξύ των διαφορετικών υποβιβασμών σε πραγματικό περιβάλλον παραγωγής.

VII.2 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της έλασης

Μια από τις πιο επιφανείς και ευρέως διαδεδομένες υπολογιστικές μεθόδους είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM). Η FEM είναι μια αριθμητική μέθοδος, κατά την οποία ένα πολύπλοκο σύστημα διακριτοποιείται σε πεπερασμένα μικρότερα και απλούστερα συστήματα (πεπερασμένα στοιχεία) και στη συνέχεια, μελετάται η απόκλιση των μελετώμενων μεγεθών από μια στιγμή αναφοράς σε μια επόμενη μέσω της επίλυσης διαφορικών εξισώσεων για την προσέγγιση της λύσης. Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο κόστος μιας βιομηχανικής δοκιμής, την διάθεση υπολογιστικών μετρήσεων σε μεγέθη, που διαφορετικά θα ήταν αδύνατο να λάβουμε, τη δυνατότητα θεώρησης διαφορετικών βημάτων κατεργασίας κ.α., η FEM έχει κερδίσει μεγάλη δημοτικότητα στη μελέτη τέτοιων σύνθετων προβλημάτων.

Πολλοί αλγόριθμοι της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, που είναι βασισμένοι είτε στην στατική έμμεση (implicit) είτε την δυναμική άμεση (explicit) επίλυση, είναι εμπορικά διαθέσιμοι για την προσομοίωση των κατεργασιών μορφοποίησης. Η έμμεση μέθοδος μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική σε ημι-στατικά (quasi-static) προβλήματα όπως η μορφοποίηση μετάλλων [7,8,9]. Τα μεγάλα χρονικά βήματα και η επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων μέχρι την πλήρωση ενός κριτηρίου σύγκλισης εξασφαλίζει την μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την αποτελεσματικότητα ως προς τον χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η επίλυση. Ωστόσο, προβλήματα με τοπικές αστάθειες, μη γραμμικά υλικά (όπως για παράδειγμα ελαστοπλαστικά υλικά με σκλήρυνση που εξαρτάται από την παραμόρφωση, τον ρυθμό παραμόρφωσης και την θερμοκρασία), ολίσθηση υπό τριβή, εναλλασσόμενες και πολύπλοκες συνθήκες επαφών είναι δύσκολο να διαχειριστούν λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ και του μεγάλου χρόνου επίλυσης. Σε αυτή την περίπτωση το χρονικό βήμα μειώνεται σημαντικά και χρειάζονται περισσότερες επαναλήψεις για να επιτευχθεί η μαθηματική σύγκλιση, η οποία σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί και ο υπολογισμός να τερματιστεί πρόωρα [10,11,12,20,21,22,23,13,14].

Η δυναμική άμεση μέθοδος εισήχθη ως λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα. Η εξίσωση της κίνησης επιλύεται με την αναστροφή του τανυστή μάζας, μια πολύ απλούστερη

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

λειτουργία σε σύγκριση με την αντιστροφή του τανυστή ακαμψίας που απαιτείται στη έμμεση μέθοδο. Το επαναληπτικό σχήμα αντικαθίσταται από το πολύ μικρό χρονικό βήμα προκειμένου να εξασφαλιστεί σταθερή λύση [14,15,16]. Το χρονικό βήμα επηρεάζεται μόνο από τη συνθήκη Courant-Friedrichs-Lewy, η οποία εξαρτάται από την διακριτοποίηση του προβλήματος και τις ιδιότητες του υλικού, και δεν επηρεάζεται από την πολυπλοκότητα του μοντέλου και τις μη γραμμικότητες [13,14,16]. Παρ' όλα αυτά, η σταθερότητα επιτυγχάνεται μόνο όταν το χρονικό βήμα είναι μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή του μικρότερου χρόνου μετάβασης, που χρειάζεται ένα διαστολικό κύμα για να διασχίσει οποιοδήποτε στοιχείο στο πλέγμα. Κατά την προσομοίωση της έλασης, το χρονικό βήμα μπορεί να γίνει τόσο μικρό, ώστε ο χρόνος που απαιτείται για τη λύση του προβλήματος να γίνει μη ρεαλιστικός.

Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων για την προσομοίωση έλασης μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία [24,25,4]. Στην προσομοίωση της έλασης, αν και μπορεί να επιτευχθεί παρόμοια ακρίβεια μεταξύ των δύο μεθόδων, η έμμεση μέθοδος (explicit method) είναι πιο αποτελεσματική και σταθερή μέθοδος για τα 2D προβλήματα σε σύγκριση με τη άμεση μέθοδο (implicit method) [24]. Ωστόσο, οι πιο πρόσφατες εξελίξεις στον έμμεσο επιλύτη για τις κατεργασίες μορφοποίησης αύξησαν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε βαθμό που κατέστη σε πολλές περιπτώσεις αποτελεσματικότερη σε σύγκριση με τη άμεση μέθοδο, ακόμη και σε μοντέλα τρισδιάστατης έλασης [25]. Παρ' όλα αυτά, όταν το μοντέλο 3D γίνεται πιο περίπλοκο και περιλαμβάνει, επίσης, ελαστικά ράουλα εργασίας και ράουλα αντιστήριξης, η άμεση μέθοδος γίνεται και πάλι πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με τη έμμεση μέθοδο [4].

Τα τελευταία χρόνια η προσέγγιση των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) έχει καταστεί μια καθιερωμένη μέθοδος για την προσομοίωση της κατεργασίας της έλασης. Κατά την έλαση, αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις μεταξύ της πλάκας και των ράουλων και, επιπλέον, η θερμοκρασία διαφοροποιείται τόσο στην πλάκα όσο και στα ράουλα κατά την πρόοδο της κατεργασίας. Το έργο της έλασης προκαλεί αύξηση θερμοκρασίας στην πλάκα και στα ράουλα διαμόρφωσης, ενώ η στοχευμένη απόψυξη των ράουλων, αλλά και η φυσική ψύξη της πλάκας οδηγούν σε προφίλ θερμοκρασίας κατά το πάχος της πλάκας με συνακόλουθες επιπτώσεις στην επιδεκτικότητα διαμόρφωσης του υλικού. Ως εκ τούτου, τα φαινόμενα

αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Πέραν του γεγονότος ότι τα περισσότερα έλαστρα χρησιμοποιούν τον ίδιο εξοπλισμό για να διαμορφώσουν ένα ευρύ φάσμα υλικών με διάφορα επίπεδα μηχανικών ιδιοτήτων, αρχική γεωμετρία πλάκας και τελικές προδιαγραφές, η εξέλιξη της δύναμης και της θερμοκρασίας είναι τα θεμελιώδη ζητήματα που προκαλούν πονοκέφαλο στους μηχανικούς παραγωγής κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας του σχεδίου έλασης. Και οι δύο παράμετροι, συμπεριλαμβανομένων των τάσεων και παραμορφώσεων, μπορούν να υπολογιστούν με επιτυχία από τη μελέτη με FEM, τα αποτελέσματα της οποίας παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες. Πολλοί ερευνητές [26,27,28,29,30,31,32] ανέπτυξαν μοντέλα για την μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της έλασης στην κατεργασία και πραγματοποίησαν παραμετρική ανάλυση. Οι Le Mat et al. [33] ανέπτυξαν ένα μοντέλο έλασης για να προβλέπουν την παραμόρφωση, τον ρυθμό παραμόρφωσης, το πεδίο των τάσεων και την θερμοκρασία σε πλάκα αλουμινίου AA1200, το οποίο και αντιπαραβέβησαν με αποτελέσματα από πειραματική διάταξη. Αντιστοίχως, οι Riahiifar et al. [34] έκαναν αντίστοιχη δουλειά και παραμετρική ανάλυση για κράμα αλουμινίου AA3003 και οι Shahani et al. [35,36], οι Ahmed et al. [37] και οι Motallebi et al. [38] για αλουμίνιο AA5083. Οι Duan et al. [39,40] χρησιμοποίησαν την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την θερμή έλαση αλουμινίου AA3003, της οποίας τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τόσο σε εργαστηριακή διάταξη ελάστρου όσο και σε βιομηχανικές δοκιμές. Έδειξαν ότι σημαντικό ρόλο παίζει η κατανομή της πίεσης του ράουλου εργασίας πάνω στην πλάκα. Οι Bagheripoor et al. [41] μελέτησαν την επίδραση της εξέλιξης της θερμοκρασίας από τις παραμέτρους της έλασης. Οι Jiang et al. [42,43] και Utsunomiya et al. [44] μελέτησαν την ροή του μετάλλου κατά την έλαση και πως αυτή διαμορφώνει την τελική γεωμετρία του υλικού. Σημαντικό ρόλο στην πλαστική ροή του υλικού παίζουν οι τριβολογικές συνθήκες. Οι Lin et al. [45] έδειξαν ότι, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας της έλασης (θερμή/ψυχρή), όσο μεγαλύτερος είναι ο υποβιβασμός τόσο περισσότερες γίνονται και οι παραμένουσες τάσεις στο υλικό, καθώς και τόσο μεγαλύτερη γίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας του έργου της έλασης. Οι Tseng et al. [46] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας στην επαφή του ράουλου με την πλάκα ενώ οι Pesin et al. [47,48] μελέτησαν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για ειδικές συνθήκες έλασης με υψηλές διατμητικές τάσεις ή πολύ χαμηλή θερμοκρασία του υλικού. Οι Phaniraj et al. [49] χρησιμοποίησαν την μέθοδο των

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

πεπερασμένων στοιχείων για να υπολογίσουν την παραμόρφωση και την θερμοκρασία που αργότερα τα χρησιμοποίησαν για να κάνουν πρόβλεψη της εξέλιξης της μικροδομής με ημι-εμπειρικά μοντέλα. Οι Tieu et al. [50] ανέπτυξαν ιδιοσυσκευή για να μετρήσουν την κατανομή της πίεσης και στην συνέχεια να μελετήσουν την επίδραση της λίπανσης στην κατεργασία. Οι Misovic et al. [51] μελέτησαν την επίδραση της οπίσθιας και της εμπρόσθιας τάνυσης στην ψυχρή έλαση αλουμινίου. Οι Yoon et al. [52] μελέτησαν την ροή του υλικού σε επιδερμικούς υποβιβασμούς λαμβάνοντας υπόψη την ελαστικότητα των ράουλων εργασίας. Οι Boldetti et al. [53] σχεδίασαν πειράματα όπου χάραξαν πλέγμα πάνω στην πλάκα για να την συγκρίνουν μετά την έλαση με τα αποτελέσματα του μοντέλου τους των πεπερασμένων στοιχείων. Οι Bagheri-roo et al. [54] μελέτησαν στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τις διακυμάνσεις και τις αστάθειες στην δύναμη και τη ροπή έλασης για την προσομοίωση της κατεργασίας. Οι Serajzadeh et al. [55] συμπεριέλαβαν και το φαινόμενο της γήρανσης λόγω παραμόρφωσης στο μοντέλο του υλικού που χρησιμοποίησαν, του οποίου τα αποτελέσματα ήταν σε καλή συμφωνία με πειραματικές μετρήσεις.

Η περαιτέρω χρήση της FEM επέτρεψε την προσομοίωση διαφόρων άλλων ποιοτικών χαρακτηριστικών. Πολλή προσοχή έχει τραβήξει η βελτιστοποίηση της τελικής γεωμετρίας και η βελτίωση της επιτεδότητας. Το προφίλ της πλάκας (crown) συσχετίζεται με την παραμόρφωση των ραούλων εργασίας και αντιστήριξης και μπορεί να ελεγχθεί με την αντίθετη κάμψη των κυλίνδρων με τη χρήση εγκατεστημένων στο έλαστρο υδραυλικών συστημάτων εφαρμογής αντίρροπης δύναμης από αυτή της έλασης στα έδρανα των ραούλων. Χρήσιμες πληροφορίες για την επιτεδότητα μπορούν να ληφθούν από τον υπολογισμό μέσω της FEM και μπορούν να ενσωματωθούν στο σχέδιο έλασης [1,2,6,56,57,58,59,60,61]. Το ίδιο ισχύει και για την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας στις άκρες της πλάκας, η οποία είναι σημαντική για τη μείωση των ρωγμών που δημιουργούνται σε αυτές και, επομένως, την μείωση του υλικού που αφαιρείται από τις άκρες λόγω αυτών των σφαλμάτων [25,62,63,64]. Η εμφάνιση ρωγμών και η έναρξη ρηγματώσεων, καθώς και άλλα ανεπιθύμητα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την έλαση, όπως η φθορά και η απόρριψη εισόδου της πλάκας στο έλαστρο λόγω υπερβάσης της γωνίας αρπαγής έχουν μελετηθεί επίσης μέσω της FEM [65,66,67,68,69].

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Η εξέλιξη της θερμοκρασίας και η κατανομή, που προκαλείται από τη ροή θερμότητας από την πλάκα προς το ράουλο εργασίας έχουν σημαντική επίδραση στη κατεργασία και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η θερμική κατάσταση των ράουλων εργασίας έχει άμεση επίπτωση στην στιγμιαία γεωμετρία τους και, επομένως, στην επιτεδότητα των προϊόντων. Πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην πρόβλεψη της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας λόγω θερμικού φορτίου και στη μεθοδολογία για την αφαίρεση θερμότητας μέσω ψύξης [70,71,72,73,74].

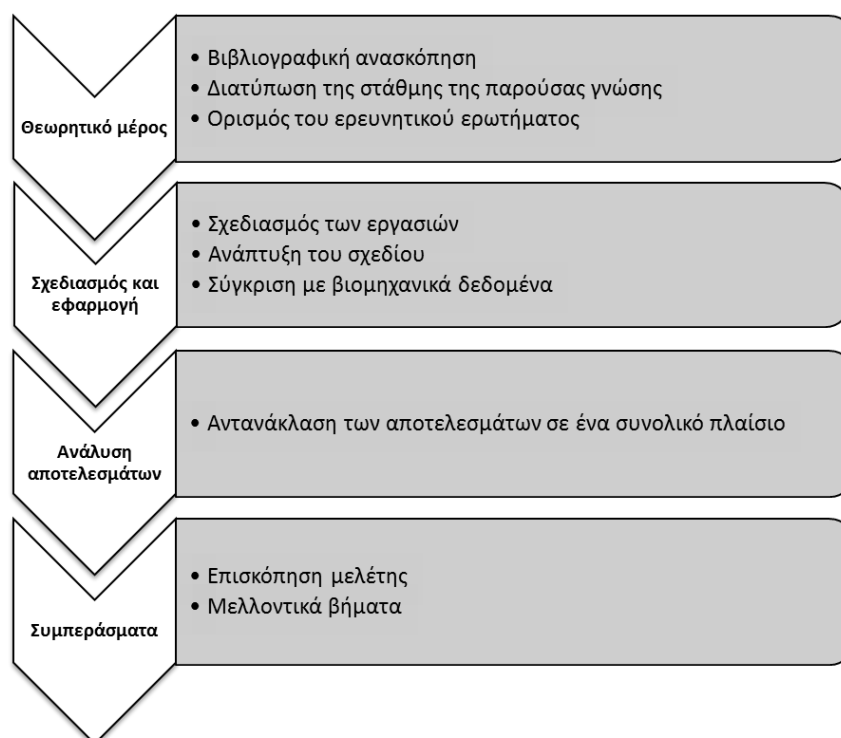
Περαιτέρω, η θερμοκρασία στο υλικό διευκολύνει την έναρξη των μικροδομικών αλλαγών. Έχουν καταβληθεί πολλές προσπάθειες για την ενσωμάτωση αλγορίθμων σε μοντέλα FEM, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις μεταλλουργικές πτυχές που οδηγούν το υλικό είτε να μαλακώνει με το χρόνο μέσω απότασης και ανακρυστάλλωσης, είτε να σκληραίνει μέσω μετασχηματισμών ή κατακρήμνισης φάσεων και να μεταβάλλει τον κρυσταλλογραφικό του ιστό και την ανισοτροπία του [75,76,77,78,79,80,81,82,83].

VII.3 Δομή της εργασίας

Η Διατριβή δομείται σε **12** κεφάλαια. Μια πλήρης επισκόπηση της προσέγγισης και της δομής της εργασίας φαίνεται στην Εικόνα VII.2. Το κίνητρο της εργασίας σε συνδυασμό με βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται και των επιστημονικών ερωτημάτων, που απασχολούν την σύγχρονη επιστημονική κοινότητα, καθώς και σύντομη ιστορική αναδρομή παρουσιάζονται στην εισαγωγή και προηγούνται του θεωρητικού μέρους. Στα **Κεφάλαια 1-3**, που ανήκουν στο **Θεωρητικό Μέρος**, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο και οι έννοιες, στις οποίες βασίζεται η παρούσα μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται η θεωρία της έλασης, στο **Κεφάλαιο 2** οι νόμοι της μηχανικής των στερεών, που ισχύουν κατά την έλαση και στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αξιοποιεί την μηχανική των στερεών και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την μελέτη της έλασης. Στην συνέχεια ακολουθούν τα κεφάλαια που αποτελούν το **Πειραματικό Μέρος**. Στο **Κεφάλαιο 4** πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των σημαντικότερων αλγορίθμων χρονικής ολοκλήρωσης που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (implicit, explicit) προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

προσέγγιση. Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται ο σχεδιασμός του τρισδιάστατου μοντέλου FEM σε συνδυασμό με τις βασικές εξισώσεις, τις οριακές συνθήκες, τις κρίσιμες παραμέτρους καθώς και τον τρόπο που αυτά εντάχθηκαν στο λογισμικό. Στο **Κεφάλαιο 6** συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου FEM με βιομηχανικά δεδομένα και μελετάται η επίδραση της δύναμης του συστήματος κάμψης του ελαστρού στην επιτεδότητα της πλάκας. Στο **Κεφάλαιο 7** πραγματοποιείται θερμική ανάλυση στο ράουλο εργασίας και μελετάται το πως η εξέλιξη της θερμοκρασίας επηρεάζει τη γεωμετρία του και κατά συνέπεια την γεωμετρία της πλάκας. Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζονται μελέτες περιπτώσεων όπου το μοντέλο έδωσε σημαντικές πληροφορίες για την παραγωγή πλακών αλουμινίου. Τα τελευταία κεφάλαια ανήκουν στο μέρος «**Συζήτηση αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα**». Στο **Κεφάλαιο 9** γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, πως αυτά μπορούν να ενταχθούν, να φανούν χρήσιμα και να βελτιστοποιήσουν την υπάρχουσα μέθοδο παραγωγής πλακών αλουμινίου καθώς και η συνεισφορά της παρούσας εργασίας σε αυτή την βελτιστοποίηση της παραγωγής. Στο **Κεφάλαιο 10** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της Διατριβής. Τέλος, ακολουθεί η παράθεση της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε.

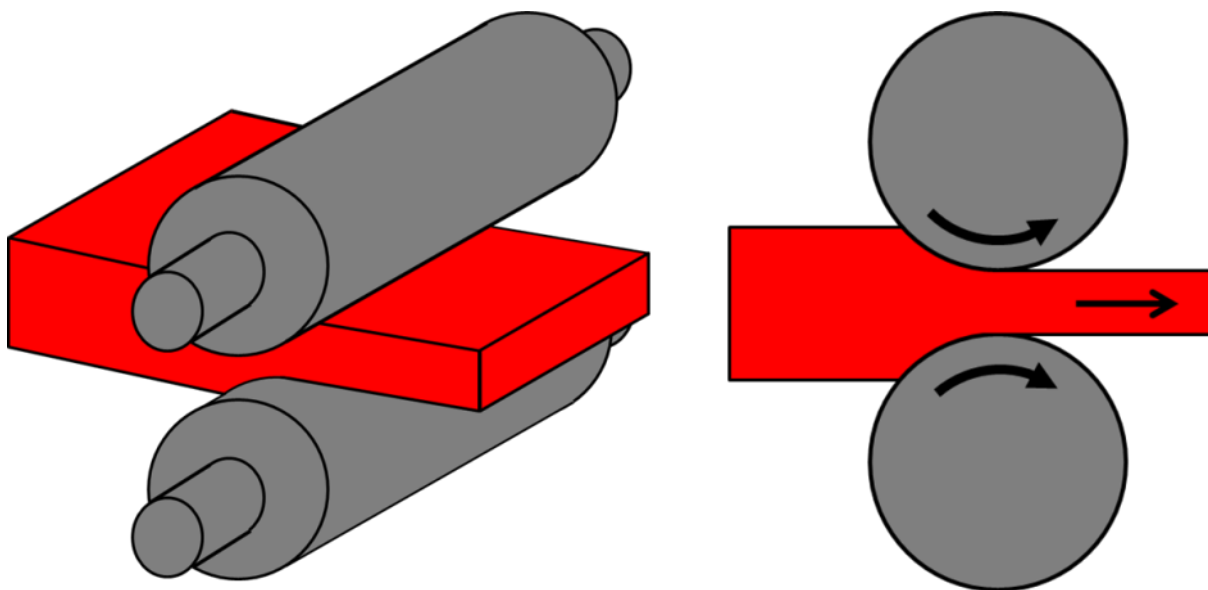


Εικόνα VII.2. Περίγραμμα της Διατριβής.

Θεωρητικό Μέρος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Η κατεργασία της έλασης

Έλαση είναι η πιο σημαντική κατεργασία μεταλλοτεχνίας, αφού περισσότερο από το 95% των μετάλλων υπόκειται σε αυτή σε κάποιο στάδιο της παραγωγής του προτού καταλήξει στο τελικό προϊόν. Κατά την έλαση, ένα μεταλλικό κομμάτι υποβιβάζεται από το αρχικό του πάχος σε ένα προκαθορισμένο τελικό πάχος, καθώς περνάει από δύο αντιστρόφως περιστρεφόμενους κυλίνδρους γνωστούς και ως ράουλα. Τα δύο ράουλα καθώς περιστρέφονται «αρπάζουν» το κομμάτι και το παραμορφώνουν πλαστικά φέρνοντάς το στη νέα του γεωμετρία (Εικόνα 1.1). Όταν αυτή η γεωμετρία είναι ορθογώνια τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο τότε η κατεργασία ονομάζεται επίπεδη έλαση και το κομμάτι ονομάζεται έλασμα ή πλάκα στην περίπτωση της θερμής έλασης που επικρατούν μεγάλα πάχη (> 6mm) και φύλλο στην περίπτωση της ψυχράς έλασης, που επικρατούν λεπτά πάχη (< 6mm).



Εικόνα 1.1. Σκαρίφημα της κατεργασίας της έλασης

Λόγω του μικρού πάχους και των αυστηρών προδιαγραφών γεωμετρικής ακρίβειας τα ελάσματα δεν μπορούν να παραχθούν απευθείας με χύτευση. Ωστόσο, η επίτευξη της τελικής γεωμετρίας δεν είναι ο μοναδικός στόχος της έλασης. Μέσω αυτής γίνεται και τροποποίηση της μικροδομής του υλικού με άμεσο αντίκτυπο στις τελικές ιδιότητες. Η

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

χονδρομερής δενδριτική δομή τροποποιείται κατά την έλαση και μέσω της παραμόρφωσης και της ανακρυστάλλωσης οδηγείται σε μια νέα αναδιατεταγμένη κρυσταλλική δομή.

Η κατεργασία της έλασης μπορεί ως προς διάφορες συνθήκες ή μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Αυτές είναι:

- Η θερμοκρασία του υλικού – θερμή έλαση ή ψυχρή έλαση.
- Η γεωμετρία των ελασμένων προϊόντων – επίπεδα, διατομή διαφορετικών γεωμετριών ή με κοιλότητα.
- Διεύθυνση της έλασης – κατά το μήκος, κατά το πλάτος, έλαση υπό κλίση.
- Τρόπος της έλασης – συνεχής μιας κατεύθυνσης ή με αντιστροφή όπου η διεύθυνση περιστροφής των ραούλων αλλάζει.

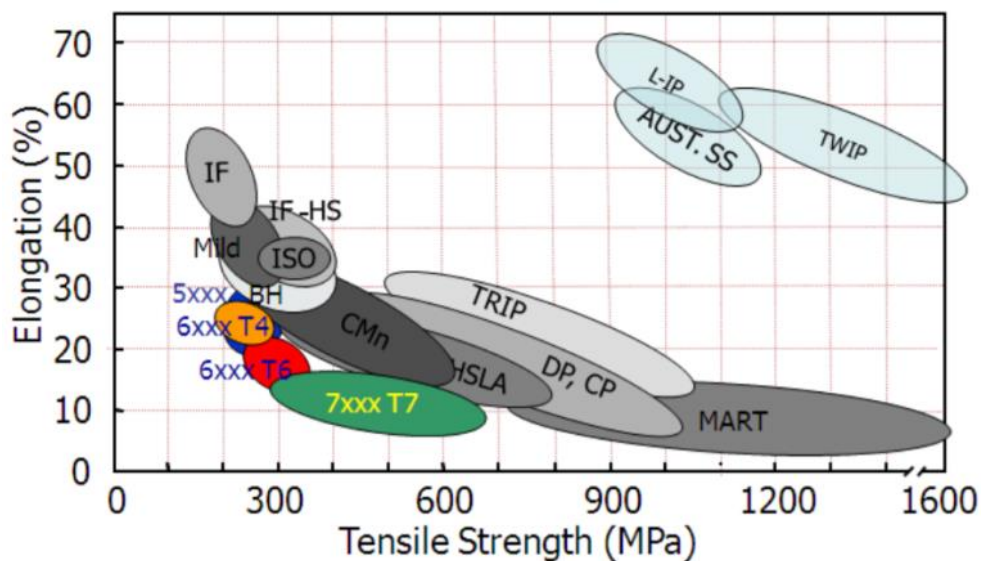
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνεκτικά οι αρχές της έλασης και βασικές έννοιες. Για περαιτέρω εμβάθυνση θα πρέπει να ανατρέξει κανείς στις πηγές οι οποίες αποτελούνται από καταξιωμένα βιβλία και έγκυρες δημοσιεύσεις [18,84,85,86,87,88,89,90,91,92].

1.1 Το αλουμίνιο και τα κράματά του

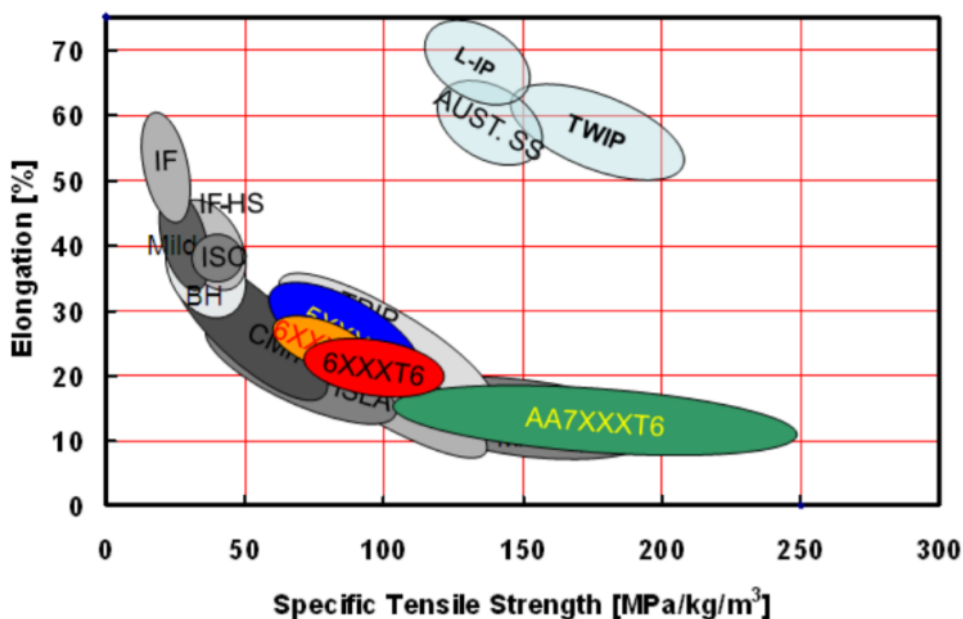
Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ όλκιμο μέταλλο με πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η πυκνότητά του είναι χαμηλή ($2,7 \text{ g/cm}^3$), περίπου το ένα τρίτο της πυκνότητας του σιδήρου ($7,8 \text{ g/cm}^3$). Το χαμηλό βάρος σε συνδυασμό με τις καλές μηχανικές του ιδιότητες το κάνουν κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται μείωση του βάρους της κατασκευής όπως σε αεροσκάφη και αυτοκίνητα [93,94].

Στην Εικόνα 1.2 και Εικόνα 1.3 φαίνεται ότι παρόλο που πολλά κράματα χάλυβα έχουν σημαντικά υψηλότερη αντοχή, το αλουμίνιο έχει πολύ υψηλή ειδική αντοχή που είναι η αντοχή ανηγμένη στην πυκνότητα [95]. Η ειδική αντοχή δείχνει ότι παρόλο που χρειάζεται περισσότερο υλικό για να επιτευχθεί η συνολική αντοχή μιας κατασκευής και πάλι αυτή θα έχει χαμηλότερο βάρος σε πολλές περιπτώσεις σε σχέση με την ίδια κατασκευή κατασκευασμένη από χάλυβα [93,94].

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 1.2. Διάγραμμα επιμήκυνσης-αντοχής σε εφελκυσμό για κράματα αλουμινίου και χάλυβα [95].



Εικόνα 1.3. Διάγραμμα επιμήκυνσης-ειδικής αντοχής σε εφελκυσμό για κράματα αλουμινίου και χάλυβα [95].

Το αλουμίνιο έχει υψηλή κατεργασιμότητα, μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε μορφή, δεν υπάρχει σχεδόν κανένα όριο στα διαφορετικά προφίλ (σχήματα), στα οποία μπορεί να διελαθεί. Επίσης, έχει σημαντική αντοχή στη διάβρωση, λόγω της ανοδίσωσης. Η εκτεθειμένη επιφάνεια αλουμινίου αντιδρά με το οξυγόνο και σχηματίζει ένα αδρανές φιλμ οξειδίου του αργιλίου (αλουμίνα), το οποίο δεν απομακρύνεται για να εκθέσει μια νέα

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

επιφάνεια σε περαιτέρω οξείδωση. Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να συγκολληθούν με πολλές μεθόδους, όπως brazing, soldering, GMAW και GTAW. Επιπρόσθετα, υπάρχουν κράματα υψηλής σκληρότητας που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη, όπως τα κράματα 2124, 7050 και 7475. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι το 82% κ. β. ενός Boeing 747 και το 79% κ. β. ενός Boeing 757 αποτελούνται από αλουμίνιο. Τέλος, το αλουμίνιο και τα κράματά του μπορούν να ανακυκλωθούν απευθείας στα ίδια προϊόντα υψηλής ποιότητας [93,94].

Τα κράματά του αλουμινίου διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα διαμόρφωσης (wrought alloys) και χύτευσης (cast alloys). Κατηγοριοποιούνται, περαιτέρω ανάλογα με τον τρόπο σκλήρωσης τους, στα μη θερμικώς επεξεργάσιμα (cold work) και στα θερμικώς επεξεργάσιμα (heat treat) [96]. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι σειρές κραμάτων αλουμινίου ανάλογα των κραματικών προσθηκών και μηχανισμών σκλήρωσης που χρησιμοποιούνται στα κράματα διαμόρφωσης, σύμφωνα με το ενοποιημένο σύστημα κατηγοριοποίησης της Aluminum Association [93,94].

Πίνακας 1.1. Ταξινόμηση των σειρών των κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου

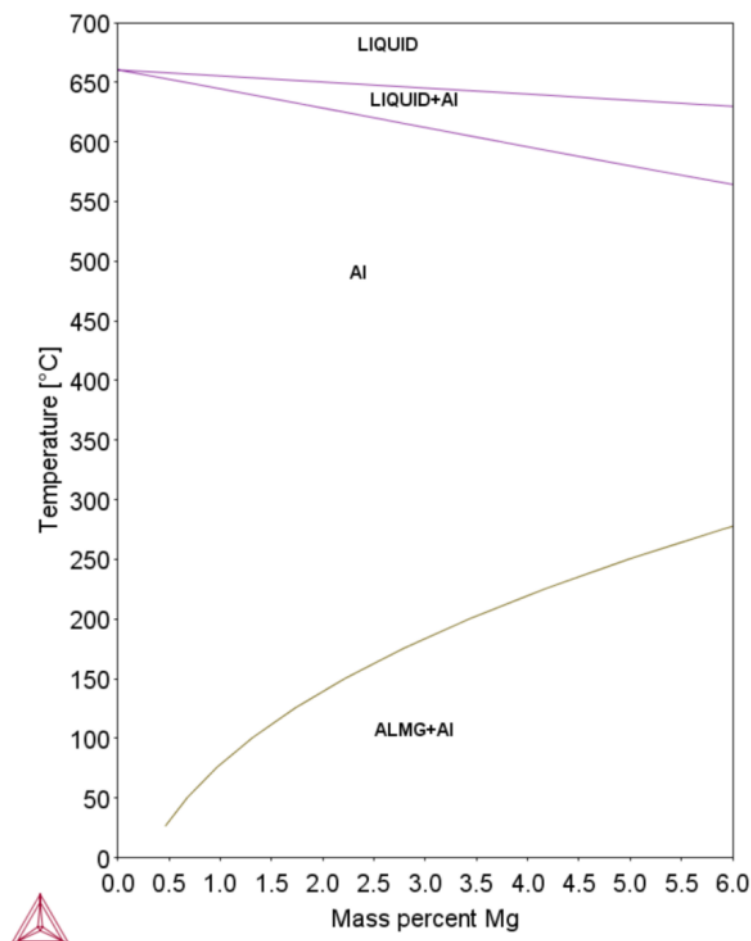
Σειρές αλουμινίου	Κραματικά στοιχεία	Εύρος ορίου αντοχής (MPa)
1xxx	Al	70–175
2xxx	Al-Cu	170–310
3xxx	Al-Mn	140–280
4xxx	Al-Si	105–350
5xxx	Al-Mg	140–280
6xxx	Al-Mg-Si	150–380
7xxx	Al-Zn	380–520
8xxx	Όλα τα υπόλοιπα	-

1.1.1 Κράματα αλουμινίου σειράς 5xxx

Κύρια κραματική προσθήκη της σειράς 5xxx είναι το μαγνήσιο. Το αλουμίνιο και το μαγνήσιο σχηματίζουν στερεά διαλύματα σε διαμορφώσιμα κράματα που περιέχουν από 0,8% έως λίγο περισσότερο από 5% μαγνήσιο. Οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων της σειράς 5xxx εξαρτώνται σημαντικά από την περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και την

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

ενδοτράχυνση. Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα ισορροπίας αλουμινίου- μαγνησίου στο Εικόνα 1.4, το μεγαλύτερο ποσοστό του μαγνησίου βρίσκεται σε στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο με την μορφή μεσομεταλλικών ενώσεων [97].

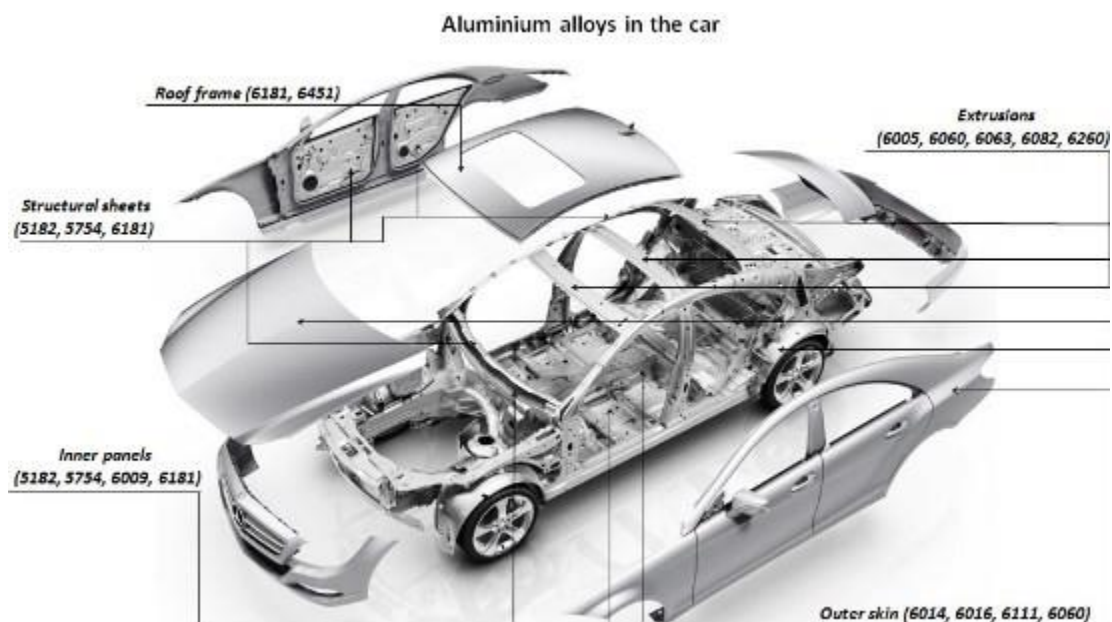


Εικόνα 1.4. Διμερές διάγραμμα ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγνησίου

Ο συνδυασμός των ιδιοτήτων της σειράς 5xxx, με εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση ακόμη και σε θαλασσινό νερό, πολύ υψηλή αντοχή ακόμη και σε κρυογονικές συνθήκες κοντά στο απόλυτο μηδέν, η καλή επιδεκτικότητα σε συγκόλληση με διάφορες τεχνικές, τα καθιστούν ιδανικά για πολλές χρήσεις. Κυρίως χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα (σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές, γέφυρες, αυτοκινητοδρόμους), σε δεξαμενές αποθήκευσης χημικών, πετρελαίου και υγροποιημένου φυσικού αερίου, σε δοχεία πίεσης για χαμηλές θερμοκρασίες ως -273°C και σε θαλάσσιες εφαρμογές [96]. Επίσης, ορισμένα κράματα της σειράς 5xxx έχουν ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, ιδίως αυτά με

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

μεγαλύτερη περιεκτικότητα μαγνησίου, όπως τα κράματα 5182 και 5754 για εσωτερικά μέρη του σκελετού του αυτοκινήτου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5 [98,99].



Εικόνα 1.5. Μέρη αυτοκινήτου κατασκευασμένα από αλουμίνιο [98]

Τα κράματα της σειράς 5xxx έχουν ως κύρια κραματική προσθήκη το μαγνήσιο, όπως αναφέρθηκε, και συνήθως περιέχουν μικροκραματικές προσθήκες στοιχείων μετάπτωσης, όπως μαγγάνιο, σίδηρο, πυρίτιο, χαλκό, χρώμιο και ψευδάργυρο.

Μαγγάνιο. Το μαγγάνιο αυξάνει την αντοχή είτε στο στερεό διάλυμα είτε ως λεπτή κατακρημνισμένη φάση. Τα λεπτά διεσπαρμένα σωματίδια Al_6Mn , $Mn_2Mg_3Al_{18}$ συνεργούν στον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων, διορθώνουν το σχήμα των βελονοειδών/πλακοειδών φάσεων σιδήρου και αυξάνουν την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, αποτρέποντας την μεγέθυνση των κόκκων. Το μαγγάνιο είναι δύο φορές πιο αποτελεσματικό στην αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό από το μαγνήσιο και δεν επηρεάζει την αντοχή σε διάβρωση. Αυτό προσφέρει την προοπτική χρησιμοποίησης κραμάτων με μειωμένη περιεκτικότητα σε μαγνήσιο, εάν πρέπει να αποφευχθεί η κατακρήμνιση της β-φάσης [93,96].

Χρώμιο. Το χρώμιο έχει αργό ρυθμό διάχυσης και σχηματίζει λεπτές διεσπαρμένες φάσεις ($Cr < 0.35\%$ κ.β.), οι οποίες συμβάλλουν στον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων και έχουν μεγάλη επίδραση στην ηλεκτρική αντίσταση. Στα κράματα 5xxx, τα διασκορπισμένα σωματίδια $Al_{18}Mg_3Cr_2$ κατακρημνίζονται κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης των

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

πλινθωμάτων. Το χρώμιο εντοπίζεται σε φάσεις που εμπεριέχουν σίδηρο, όπως Al_3Fe και $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$, αλλά το μεγαλύτερο μέρος του χρωμίου παραμένει στο στερεό διάλυμα. [93,96],

Σίδηρος. Ουσιαστικά όλα τα κράματα αλουμινίου περιέχουν κάποιο ποσοστό σιδήρου ως ακαθαρσία που παραμένει μετά το εξευγενισμό του βωξίτη και τη τήξη. Ανάλογα με το βαθμό στερεοποίησης και την παρουσία άλλων στοιχείων όπως το μαγγάνιο, μπορούν να σχηματιστούν μεσομεταλλικές ενώσεις της μετασταθούς ορθορομβικής φάσης Al_6Fe αντί της ισορροπίας Al_3Fe . Η μέγιστη στερεή διαλυτότητα του σιδήρου στο αλουμίνιο είναι 0,05% [93,96].

Χαλκός. Οι μικροκραματικές προσθήκες χαλκού προκαλούν αύξηση στην ποσότητα των δευτερογενών φάσεων. Επίσης, έχει παρατηρηθεί μείωση της IGC με μικρή προσθήκη χαλκού στα κράματα της σειράς 5xxx, λόγω του διαφορισμού μεταξύ των Cu και Mg σε μερικά από τα όρια των κόκκων, όπου το ευγενές στοιχείο του Cu θα αυξήσει το πολύ αρνητικό ηλεκτροχημικό δυναμικό των λιγότερο ευγενών στρώσεων Mg. Περαιτέρω, ο σχηματισμός σωματιδίων Al_2CuMg συνδέει μερικά άτομα Mg, μειώνοντας έτσι την ποσότητα διαχυμένου Mg που είναι διαθέσιμο για τον σχηματισμό της επιβλαβούς φάσης $\beta-Al_3Mg_2$ [93,96].

Ψευδάργυρος. Η προσθήκη σε μικρές ποσότητες που φτάνουν μέχρι 1.5% (π.χ. κράμα 5059) έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής σε θραύση και διάβρωση, αποτρέποντας τα φαινόμενα SCC και IGC με τον σχηματισμό της ενδομεταλλικής ένωσης $\tau-Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ [93,96].

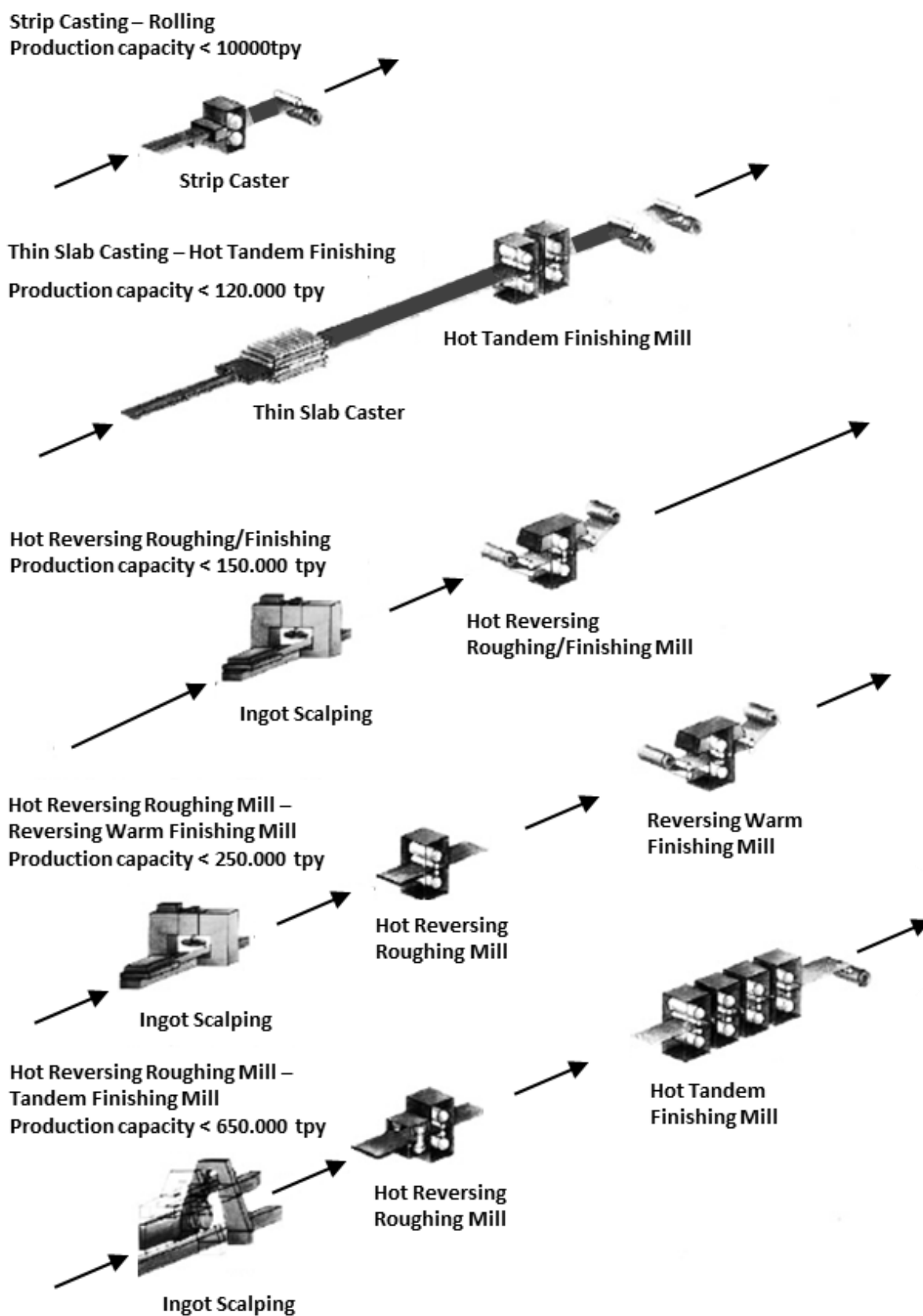
Πυρίτιο. Το πυρίτιο μετά τον σίδηρο, είναι σε υψηλότερο ποσοστό ακαθαρσίας σε εμπορικά κράματα αλουμινίου (0.01 έως 0.15%). Το πυρίτιο μειώνει το σημείο τήξεως και βελτιώνει την ευχυτότητα του αλουμινίου. Κατά την ομογενοποίηση και την ανόπτηση αυξάνονται τα σωματίδια της φάσης Mg_2Si . Ακόμα, παρατηρούνται τα σωματίδια Mg_2Si , σε μεγαλύτερο μέγεθος, στη φάση $\alpha-Al(Fe,Mn)Si$ που δημιουργείται ανάμεσα απ' τους δενδρίτες, όπου ο διαφορισμός έχει οδηγήσει στην αύξηση της συγκέντρωσης πυριτίου [93,96].

1.2 Θερμή έλαση

Στην θερμη έλαση το υλικό υποβιβάζεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης. Αυτό έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα. Πρώτα, σε υψηλή θερμοκρασία οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού μειώνονται σημαντικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το όριο διαρροής των υλικών σε θερμοκρασία έναρξης της θερμής έλασης είναι κατά κανόνα το 5-10% αυτού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον, τα μεταλλικά υλικά, που κρυσταλλώνονται στο χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό σύστημα, διαθέτουν σε υψηλή θερμοκρασία εξαιρετική επιδεκτικότητα διαμόρφωσης, δηλαδή τεράστια δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Έτσι, γίνεται κατανοητό ότι η συνολική δύναμη που απαιτείται για την παραμόρφωση υλικών εν θερμώ είναι σημαντικά χαμηλότερη από ό,τι εν ψυχρώ με αποτέλεσμα να μπορεί να πραγματοποιηθεί από μηχανολογικό εξοπλισμό με χαμηλότερες δυνατότητες (μικρότερη απαιτούμενη κάθετη δύναμη, μικρότερη ανάγκη λίπανσης). Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι ένα υλικό που βρίσκεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης μπορεί να δεχθεί μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να εργοσκληρυνθεί, αφού η ανακρυστάλλωση υποστηρίζει την απελευθέρωση των παραμενουσών τάσεων και η μεγέθυνση των κόκκων, που αυτή επιφέρει, διευρύνει τις δυνατότητες πλαστικής παραμόρφωσης χωρίς αστοχία. Με την εργοσκλήρυνση αυξάνεται η τάση παραμόρφωσης όλο και περισσότερο μέχρι που το υλικό γίνεται σκληρό και δύσκολα κατεργάσιμο σε σημείο, που η περαιτέρω παραμόρφωση θα επιφέρει αστοχία του υλικού.

Στην Εικόνα 1.6 [18] φαίνονται οι βασικές εγκαταστάσεις διαμόρφωσης, οι οποίες μπορούν να ακολουθηθούν για την παραγωγή χονδρών ελασμάτων αλουμινίου, τα οποία είτε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν τελικό προϊόν είτε να προχωρήσουν σε ψυχρά έλαση για να καταλήξουν σε μικρότερα πάχη [100]. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από το εύρος των προϊόντων και τις απαιτήσεις για παραγωγικότητα. Μονά έλαστρα διπλής κατεύθυνσης (single stand reversing mills), όπου πραγματοποιούνται πολλαπλοί υποβιβασμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τους αρχικούς χονδρούς υποβιβασμούς (roughing passes) όσο και για του τελικούς υποβιβασμούς (finishing passes) που οι απαιτήσεις σε γεωμετρικά και επιφανειακά χαρακτηριστικά είναι υψηλότερες. Η διάταξη με συστοιχία ελάστρων (tandem mills) χρησιμοποιείται μόνο για τους τελικούς εν θερμώ υποβιβασμούς.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



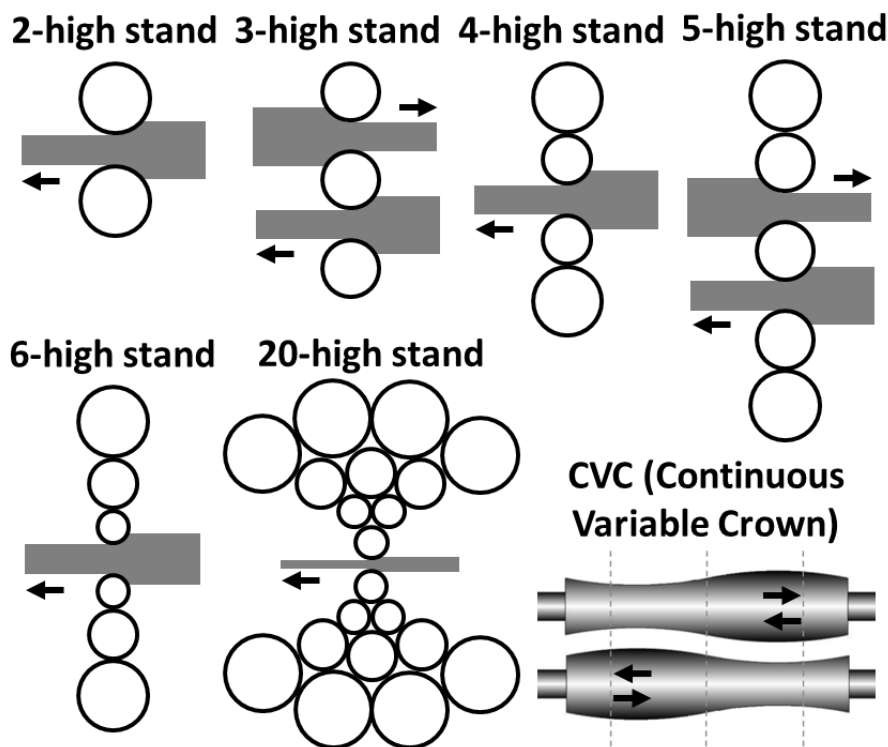
Εικόνα 1.6. Βασικές μέθοδοι παραγωγής ελασμάτων από χύτευση και θερμή έλαση.

Όταν οι απαιτήσεις για παραγωγικότητα είναι χαμηλές, η διάταξη της χύτευσης σε φύλλο στο τελικό πάχος ή σε πάχος που αποσκοπεί στους ελάχιστους υποβιβασμούς εν θερμώ είναι η πιο συμφέρουσα. Χρησιμοποιείται κυρίως για ελαφρώς κραματωμένα κράματα κάθε σειράς αλουμινίου, ωστόσο γίνονται όλο και περισσότερες προσπάθειες τα τελευταία χρόνια και για πιο ειδικά προϊόντα με πιο αυστηρές προδιαγραφές (π.χ. αντοχής, επιπεδότητας). Οι διατάξεις με μονό έλαστρο σε κάποιες διατάξεις χρησιμοποιούνται για να ολοκληρώσουν όλο το σχέδιο έλασης μέχρι τέλους και σε άλλες διατάξεις χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιήσουν τους χονδρούς υποβιβασμούς και οι τελικοί υποβιβασμοί πραγματοποιούνται σε άλλο μονό έλαστρο μια συνήθη τεχνική με μεγαλύτερη παραγωγικότητα. Η διάταξη με συστοιχία ελαστρων για τους τελικούς υποβιβασμούς βελτιώνει περαιτέρω την παραγωγικότητα. Ωστόσο, τα μονά έλαστρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μικρές σε όγκο παραγωγές έχοντας μεγαλύτερη ευελιξία. Βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι για μερικά προϊόντα αυτή η μέθοδος μπορεί να δημιουργεί προβλήματα στις μηχανικές ιδιότητες λόγω ανισοκατανομής της μικροδομής και του κρυσταλλογραφικού ιστού κατά το μήκος.

Στην Ελλάδα οι παραγωγικές μονάδες πλατεών προϊόντων αλουμινίου χρησιμοποιούν την μέθοδο της χύτευσης σε τελική ή σχεδόν τελική διάσταση και διάταξη με μονό έλαστρο για την ολοκλήρωση του σχεδίου θερμής έλασης με παραγωγικότητα 300000 τόνων αλουμινίου. Νέες επενδύσεις με συστοιχία ελαστρων θα ανεβάσει την παραγωγικότητα στους 500000 τόνων το χρόνο.

1.3 Μηχανολογικός εξοπλισμός

Τα έλαστρα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την διάταξη των ράουλων σε αυτά με: α) παράλληλα ράουλα, β) κάθετα ράουλα, γ) παράλληλα και κάθετα ράουλα, δ) κεκλιμένα ράουλα και ε) άλλους τύπους ράουλων.



Εικόνα 1.7. Βασικές διατάξεις ελάστρων με παράλληλα ράουλα

Στην Εικόνα 1.7 φαίνονται οι βασικές διατάξεις ράουλων για έλαστρα με παράλληλα ράουλα. Τα ράουλα που έρχονται σε επαφή με το υλικό ονομάζονται σε όλες τις περιπτώσεις ράουλα εργασίας. Στις περιπτώσεις, που υπάρχουν περισσότερα από τα δύο ράουλα εργασίας, τότε τα υπόλοιπα ονομάζονται ράουλα αντιστήριξης.

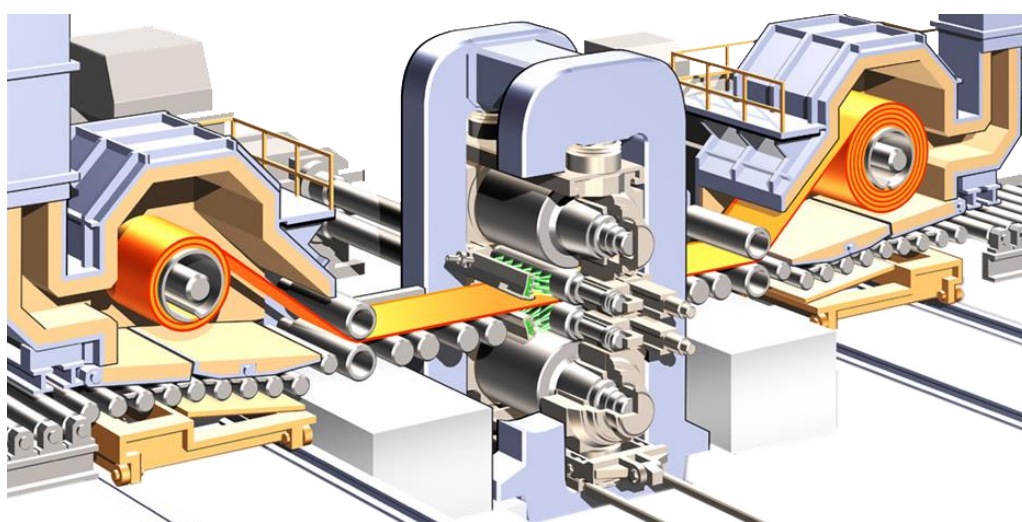
Χρησιμοποιώντας μικρότερης διαμέτρου ράουλα εργασίας μειώνεται το κάθετο φορτίο της έλασης. Συνεπώς, μπορεί να αξιοποιηθεί έλαστρο μικρότερου δυναμικού, αλλά και είναι εφικτή η επίτευξη μικρότερου τελικού πάχους προϊόντος. Τα μικρότερης διαμέτρου ράουλα είναι πιο αδύναμα με αποτέλεσμα να κάμπτονται με την επιβολή φορτίου (Κεφάλαιο 1.3-1.4). Ο ρόλος των ράουλων αντιστήριξης είναι να υποστηρίξουν το ράουλο εργασίας και να ελέγχουν το βέλος κάμψης του. Τα ράουλα αντιστήριξης μπορεί να βρίσκονται είτε στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο (π.χ. 4-high, 5-high, κλπ) ή σε διαφορετικά (π.χ. 20-high). Η γεωμετρία του ράουλου που έχει καμφθεί από το φορτίο αποτυπώνεται στο υλικό που υποβιβάζεται. Το φαινόμενο αναλύεται περαιτέρω στο Κεφάλαιο 2.3.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε έλαστρο τύπου «4-high», δηλαδή με 2 ράουλα εργασίας και δύο ράουλα αντιστήριξης. Στην Εικόνα 1.8 και στην Εικόνα 1.9 απεικονίζονται χαρακτηριστικές διατάξεις ελαστρων τύπου «4-high» [101].



Εικόνα 1.8. Σκαρίφημα διάταξης ελαστρού τύπου «4-high» [101]



Εικόνα 1.9. Εγκατεστημένο έλαστρο τύπου «4-high» [101]

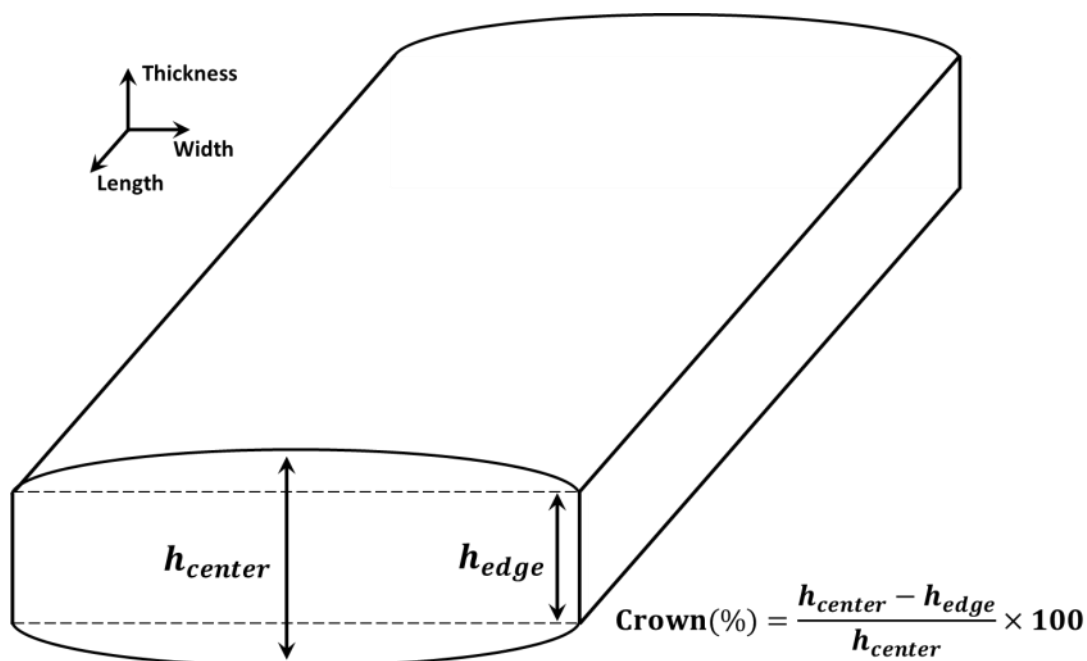
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Τα περισσότερα έλαστρα τύπου 4-high για θερμή έλαση αλουμινίου αποτελούνται από βασικά εξαρτήματα, μηχανισμούς και συστήματα. Αυτά είναι:

- 1) Τα ράουλα εργασίας, μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται η έλαση.
- 2) Τα ράουλα αντιστήριξης για τον έλεγχο του βέλους κάμψης των ραούλων εργασίας.
- 3) Τα έδρανα κύλισης των ραούλων.
- 4) Τους μηχανισμούς ελέγχου θέσης των ραούλων. Ο μηχανισμός στο επάνω μέρος του ελάστρου (στα σύγχρονα έλαστρα είναι δύο μεγάλοι κοχλίες, ένας και κάθε μεριά εδράνων) καθορίζει το διάκενο μεταξύ των ραούλων εργασίας. Ο μηχανισμός στο κάτω μέρος αποτελείται από δύο μεγάλα υδραυλικά έμβολα για μικρές ρυθμίσεις της παραλληλίας και του ορισμού του άξονα συμμετρίας του ελάστρου, που χρησιμεύουν στον έλεγχο της κατεργασίας της έλασης.
- 5) Το πλαίσιο του ελάστρου, στο οποίο ολισθαίνουν τα έδρανα στον κατακόρυφο άξονα και στο οποίο μεταδίδεται η δύναμη έλασης μέσω του μηχανισμού ελέγχου θέσης.
- 6) Τον μηχανισμό αντικατάστασης των ραούλων όταν αυτά φθαρούν.
- 7) Τις τυλικτικές μηχανές εκατέρωθεν του ελάστρου.
- 8) Τους κινητήρες, που μεταδίδουν την κίνηση μέσω του μειωτήρα στροφών και αξόνων στα ράουλα εργασίας.
- 9) Τις ψυκτικές μονάδες, τόσο για την ψύξη των ραούλων όσο και για την ψύξη της πλάκας.
- 10) Τα συστήματα λίπανσης.
- 11) Τα υδραυλικά συστήματα κάμψης των ραούλων, που ασκούν κατακόρυφη δύναμη στα έδρανα των ραούλων για τον έλεγχο της επιπεδότητας.
- 12) Τα όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας, καθώς και του πάχους της πλάκας.
- 13) Τις περιστρεφόμενες βούρτσες για τον συνεχή καθαρισμό της επιφάνειας του ραούλου εργασίας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- 14) Τους ραουλόδρομους πάνω στους οποίους μεταφέρεται η πλάκα.
- 15) Τους διάφορους σχιστικούς μηχανισμούς και τα ψαλίδια για την αφαίρεση περίσσειας υλικού για την ακριβή διαστασιολόγηση του υλικού.

1.4 Επιπεδότητα

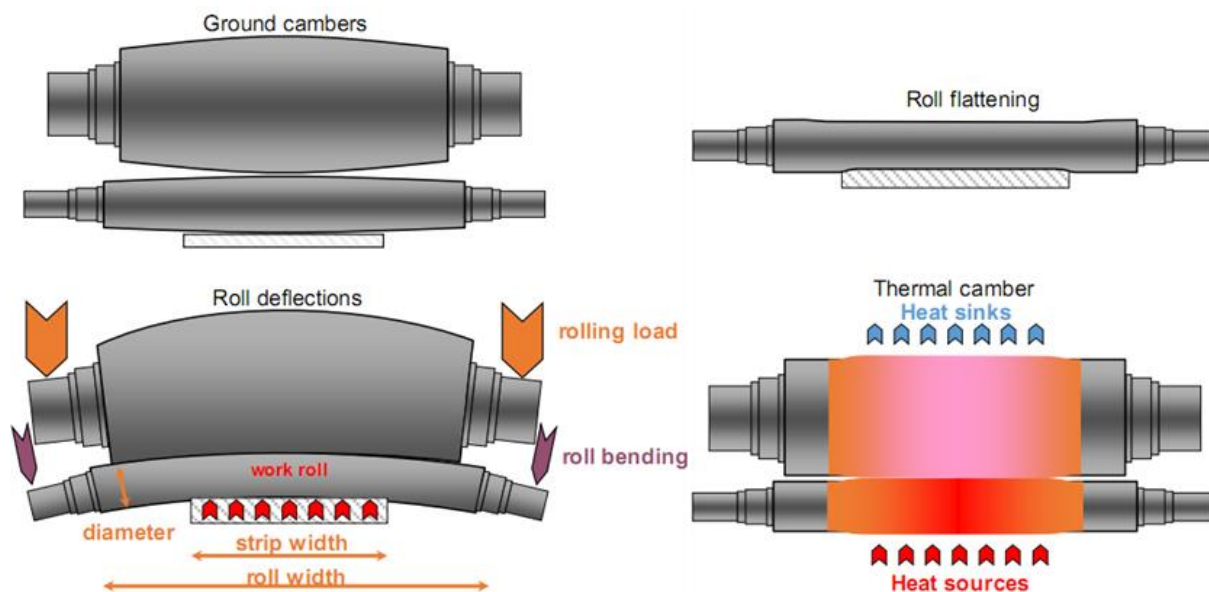
Ο όρος επιπεδότητα (Crown) αναφέρεται στην απόκλιση της γεωμετρίας του ελάσματος από ένα τέλειο παραλληλεπίπεδο. Το έλασμα είναι πρακτικά αδύνατο να είναι απολύτως επίπεδο αλλά λόγω της κατεργασίας της έλασης δημιουργείται μια ανισοκατανομή του πάχους κατά το πλάτος και το μήκος του. Στην παρούσα εργασία μελετάται η ανισοκατανομή κατά το πλάτος του ελάσματος και με τον όρο επιπεδότητα γίνεται αναφορά στην κατανομή του πάχους μόνο κατά το πλάτος, η οποία εκφράζεται σε ποσοστό (Εικόνα 1.10). Έτσι, ως θετική επιπεδότητα αναφέρεται αυτή όπου το κέντρο του ελάσματος είναι πιο παχύ σε σχέση με τις άκρες ενώ αρνητική το αντίστροφο.



Εικόνα 1.10. Επιπεδότητα του ελάσματος κατά το πλάτος

Η απόκλιση από την απόλυτη επιπεδότητα οφείλεται στην ανομοιόμορφη γεωμετρία του διακένου μεταξύ των ράουλων εργασίας. Η γεωμετρία του διακένου είναι το αποτέλεσμα γεωμετρικών αποκλίσεων από το ιδανικό, που δημιουργείται για διάφορους λόγους όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.11 [91].

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 1.11. Αιτίες μεταβολής της γεωμετρίας των ράουλων εργασίας

Κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι σταθερά και κάποια μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Συνολικά, οι παράγοντες, που συμβάλλουν στην αλλαγή της γεωμετρίας των ραούλων είναι οι εξής:

1. Η παραμόρφωση λόγω επιβολής φορτίου (Roll deflection): Η παραμόρφωση των ράουλων είναι ανάλογη του φορτίου της έλασης. Το φορτίο εξαρτάται από το υλικό (πλάτος, μηχανικές ιδιότητες, κλπ) και από τις παραμέτρους της έλασης (ταχύτητα, ποσοστό υποβιβασμού, τάνυση, κλπ). Η παραμόρφωση είναι διαφορετική, συνεπώς, πρακτικά σε κάθε υποβιβασμό.
2. Η αρχική γεωμετρία των ράουλων (ground camber): Δημιουργείται κατά την μηχανουργική κατεργασία του ράουλου, το οποίο συνήθως δεν είναι απολύτως κυλινδρικό, αλλά έχει μια παραβολική μορφολογία. Σκοπός αυτή της παραβολικής γεωμετρίας είναι να αντισταθμίσει την παραμόρφωση του ράουλου κατά την επιβολή του φορτίου της έλασης. Η επιλογή της γεωμετρίας είναι ένας συμβιβασμός προκειμένου να μπορεί να ανταποκριθεί σε όλο το εύρος των προϊόντων μιας μονάδας παραγωγής.
3. Μεταβολή της γεωμετρίας λόγω θερμικού φορτίου (Thermal Camber): Η θερμοκρασία των ραούλων μεταβάλλεται λόγω της θερμότητας, που δημιουργείται κατά την τριβή, εξαιτίας της ενέργειας της παραμόρφωσης, καθώς και της ενέργειας

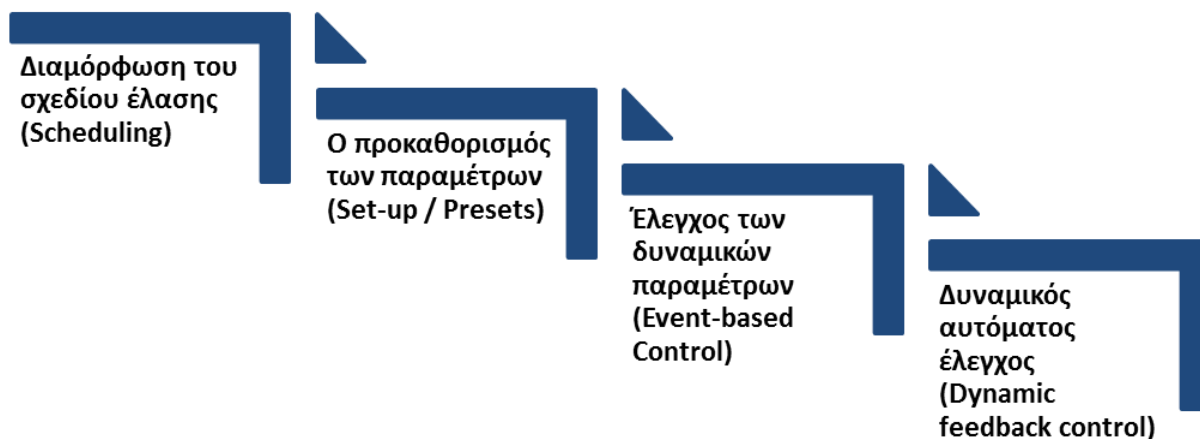
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

που μεταφέρεται από την θερμότερη πλάκα στο ψυχρότερο ράουλο. Οι περιοχές του ράουλου, οι οποίες δεν έρχονται σε επαφή με την θερμή πλάκα παραμένουν σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με αυτές που έρχονται σε επαφή. Η ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με την θερμική διαστολή έχουν ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της γεωμετρίας των ράουλων.

4. Τοπική παραμόρφωση του ράουλου (roll flattening): Υπό τα υψηλά φορτία της έλασης το ράουλο παραμορφώνεται ελαστικά. Πλησιάζοντας την άκρη του ελάσματος η ελαστική παραμόρφωση μειώνεται μέχρι που μηδενίζεται στην περιοχή που το ράουλο δεν δέχεται πιέσεις. Τοπικά δημιουργείται μια έντονη παραμόρφωση του ελάσματος. Τότε, η επιφάνεια εκείνου του σημείου δεν ακολουθεί πλέον την παραβολική μορφή, που διαθέτει το υπόλοιπο έλασμα.

Είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά τα παραπάνω φαινόμενα διαμορφώνουν την γεωμετρία του διακένου μεταξύ των δύο ράουλων. Ένα φαινόμενο, το οποίο είναι επίσης άξιο αναφοράς και επηρεάζει την επιπεδότητα, είναι η φθορά. Ωστόσο, εφόσον επηρεάζει μόνο έμμεσα το αποτέλεσμα της επιπεδότητας, αφού εξελίσσεται αργά μεταξύ των σχεδίων έλασης, δεν λαμβάνεται υπόψη στις μεθόδους ελέγχου της επιπεδότητας.

Η επιπεδότητα καθορίζεται σε 4 βασικά επίπεδα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.12.



Εικόνα 1.12. Επίπεδα ελέγχου της επιπεδότητας

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Τα επίπεδα αυτά είναι:

1. Διαμόρφωση του σχεδίου έλασης (Scheduling): Ένα σωστό σχέδιο έλασης είναι πολύ σημαντικό. Τα προβλήματα ενός μέτριου σχεδίου (π.χ. επιπεδότητα, αντοχή) διορθώνονται δύσκολα στην πορεία.
2. Ο προκαθορισμός των παραμέτρων (Set-up / Presets): Το αποτέλεσμα ενός σχεδίου έλασης εξαρτάται από τον προκαθορισμό των στόχων για διαφορετικές παραμέτρους, όπως η ταχύτητα, οι πιέσεις στα υδραυλικά συστήματα, οι θερμοκρασίες των λιπαντικών και των ψυκτικών μέσων, κ.α. .
3. Έλεγχος των δυναμικών παραμέτρων (Event-based Control): Πρόβλεψη της εξέλιξης των παραμέτρων με τον υπάρχοντα σχεδιασμό και αναπροσαρμογή σε περίπτωση που είναι απαραίτητο.
4. Δυναμικός αυτόματος έλεγχος (Dynamic feedback control): Τα αυτόματα συστήματα που είναι εγκατεστημένα σε πολλά έλαστρα συγκρίνουν τις μετρούμενες τιμές εξόδου με μια προκαθορισμένη τιμή στόχου και πραγματοποιούν κατά την διάρκεια της κατεργασίας διορθωτικές κινήσεις μέχρι να επιτευχθεί βελτίωση.

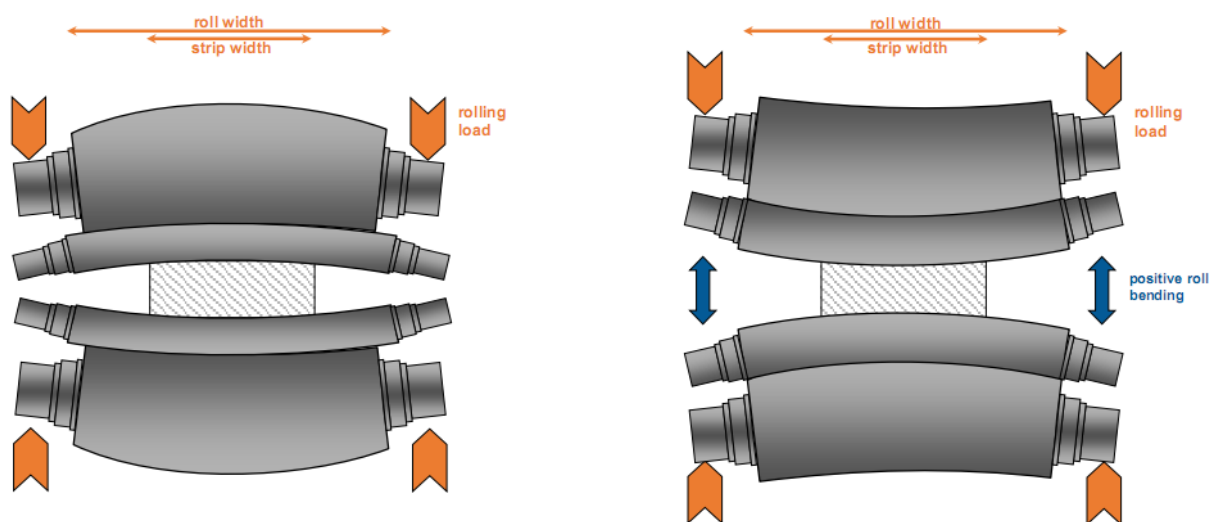
Όπως περιγράφεται και στο κεφάλαιο της εισαγωγής (Κεφάλαιο IV), η παρούσα Διατριβή επικεντρώνεται, κυρίως, στην παραμόρφωση των ράουλων λόγω επιβολής φορτίου (Roll deflection) και την μεταβολή της γεωμετρίας λόγω θερμικού φορτίου (Thermal Camber) στο δεύτερο και τρίτο επίπεδο καθορισμού της επιπεδότητας, δηλαδή στον προκαθορισμό των παραμέτρων (Set-up / Presets) και ελέγχου των δυναμικών παραμέτρων (Event-based Control). Φυσικά και το σχέδιο έλασης (Scheduling) επηρεάζεται και επαναπροσδιορίζεται κατά την ενδελεχή μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της έλασης στην προσπάθεια προκαθορισμού των στόχων για κάθε παράμετρο.

1.4.1 Κάμψη των ράουλων και αντισταθμιστικός μηχανισμός

Κατά τον υποβιβασμό του ελάσματος ασκούνται φορτία, τα οποία κάμπτουν τα ράουλα. Η θερμική διαστολή δρα αντίθετα από αυτή την κάμψη και η παραβολική γεωμετρία του ράουλου χρησιμεύει για την εξάλειψη της υπολειπόμενης γεωμετρικής απόκλισης. Το ράουλο διαμορφώνεται μηχανουργικά όμως σε μια γεωμετρία («ρεκτιφιέ») η οποία είναι

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

συμβιβασμός για όλο το εύρος προϊόντων, που παράγονται με το συγκεκριμένο έλαστρο με αποτέλεσμα η απόκλιση από την στοχευόμενη επιτεδότητα να μην αντισταθμίζεται πλήρως για όλα τα προϊόντα. Για να διορθωθεί περαιτέρω αυτή η αναντιστοιχία χρησιμοποιείται το ικό σύστημα κάμψης του ελάστρου, το οποίο εφαρμόζει αντίρροπη κάμψη στο ράουλο από αυτήν που εφαρμόζεται από την κατεργασία (Εικόνα 1.13) [91].



Εικόνα 1.13. Εφαρμογή δύναμης για την αντίρροπη κάμψη των ράουλων

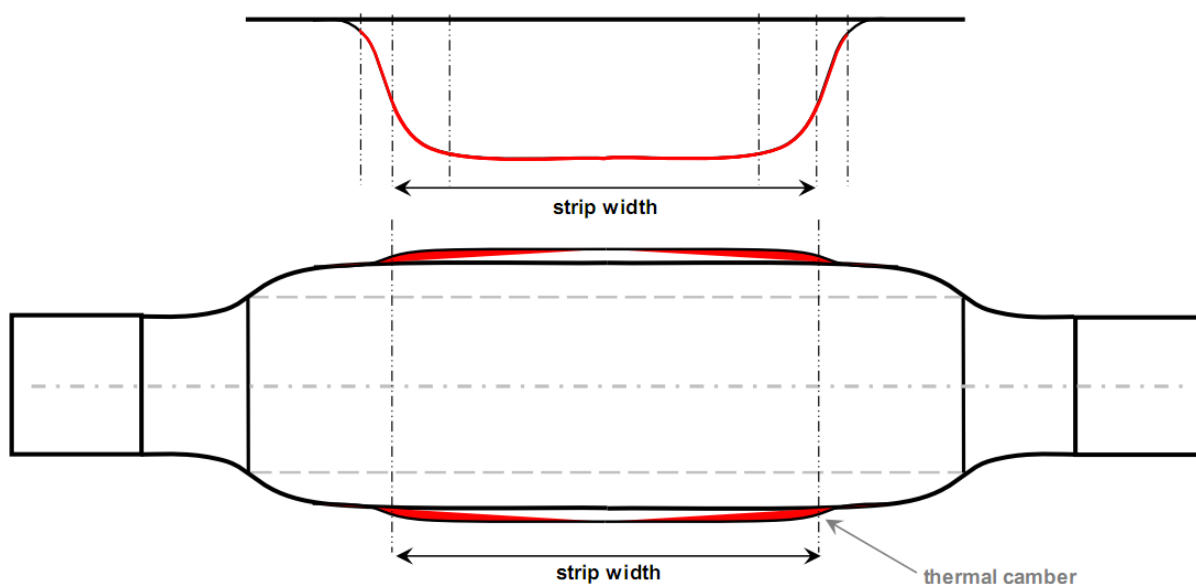
Υδραυλικά έμβολα εφαρμόζουν δύναμη μεταξύ των δύο ράουλων εργασίας, η οποία κάμπτε τα ράουλα αντίρροπα. Επίσης, ένα αντίστοιχο υδραυλικό σύστημα είναι τοποθετημένο μεταξύ των ράουλων εργασίας και αντιστήριξης, του οποίου η δράση τείνει να αυξήσει το θετικό ποσοστό της επιτεδότητας του ελάσματος.

Για να αυξηθεί το ποσοστό της επιτεδότητας κανείς πρέπει να αυξήσει την αρνητική δύναμη κάμψης (την δύναμη μεταξύ ράουλων εργασίας και αντιστήριξης) ή να μειώσει την θετική δύναμη κάμψης (δύναμη μεταξύ των δύο ράουλων εργασίας). Το αντίστροφο πρέπει να συμβεί για να μειωθεί το ποσοστό της επιτεδότητας.

Το αποτέλεσμα της αλλαγής της δύναμης κάμψης στην επιτεδότητα του ελάσματος είναι σχεδόν ακαριαίο. Κάτι τέτοιο την καθιστά κατάλληλη για ρυθμίσεις κατά την διάρκεια του μήκους ενός υποβιβασμού, καθώς μπορεί με γρήγορο τρόπο να διορθώσει μεταβολές που μπορεί να οφείλονται σε μεταβαλλόμενες παραμέτρους, όπως η ταχύτητα κατά την επιτάχυνση ή ανισοκατανομή της θερμοκρασίας κατά το μήκος του ελάσματος.

1.4.2 Θερμική διαστολή των ράουλων

Τα ράουλα εργασίας έχουν από την κατασκευή τους παραβολική γεωμετρία. Όταν έρχονται σε επαφή με το υπό διαμόρφωση έλασμα, τότε διαστέλλονται θερμικώς ακολουθώντας την εξέλιξη του πεδίου της θερμοκρασίας, που αναπτύσσεται (Εικόνα 1.14) [91].

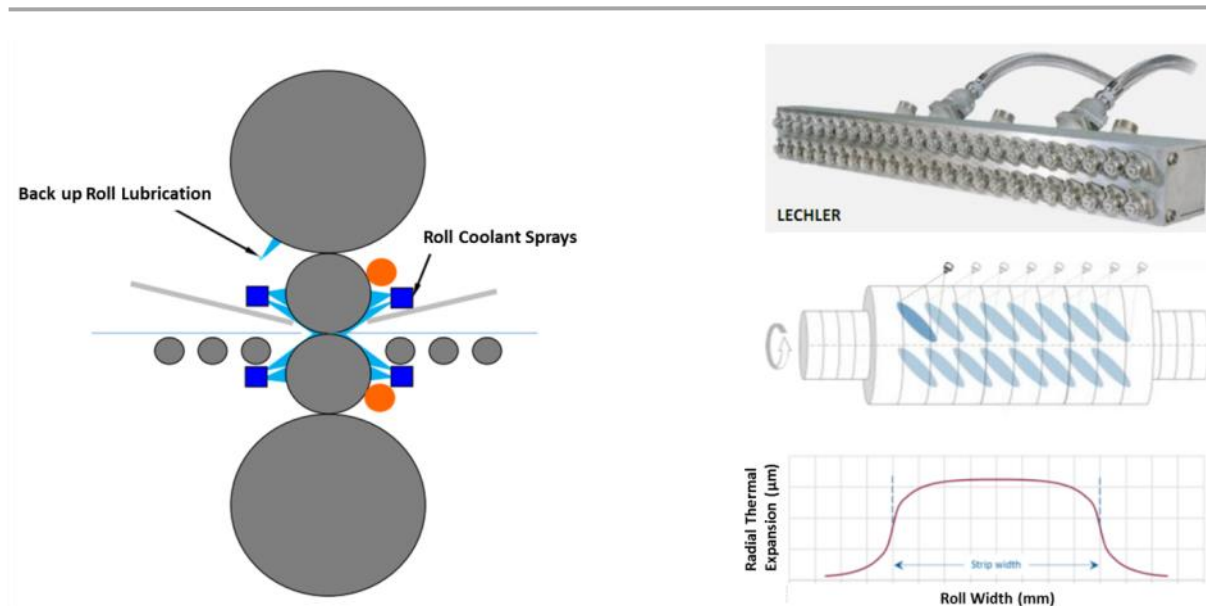


Εικόνα 1.14. Ανάπτυξη θερμικής διαστολής στα ράουλα εργασίας κατά την έλαση

Το πλάτος της επιφάνειας, που διαστέλλεται εξαρτάται από το πλάτος του ελάσματος με το οποίο είναι σε επαφή. Η γεωμετρία του διάκενου μεταξύ των ράουλων εργασίας επηρεάζεται σημαντικά από την θερμική διαστολή και τα συστήματα κάμψης αναλαμβάνουν να αντισταθμίσουν αυτή την μεταβολή. Ωστόσο, αν αυτή η μεταβολή είναι πολύ μεγάλη κατά το μήκος του υποβιβασμού τότε τα συστήματα κάμψης μπορεί να μην επαρκούν για να επιφέρουν την διόρθωση.

Η εφαρμογή ψύξης με συστοιχίες εγχυτήρων νερού είναι η μέθοδος για τον περιορισμό της θερμικής διαστολής (Εικόνα 1.15) [91]. Συνήθως, η ψύξη εφαρμόζεται σε όλο το πλάτος του ράουλου εργασίας και συχνά προστίθενται ή αφαιρούνται μεμονωμένοι εγχυτήρες για τον καλύτερο έλεγχο στις άκρες του ελάσματος.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 1.15. Χρήση ψυκτικών μονάδων για την ψύξη του ράουλου εργασίας

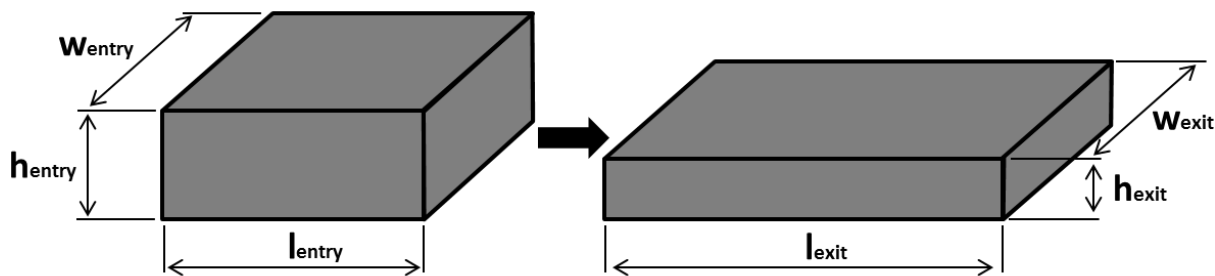
Η στρατηγική για το πότε και ποιοι εγχυτήρες χρησιμοποιούνται είναι πολύ σημαντική για τον έλεγχο της επιπεδότητας του ελάσματος, αλλά και για την διατήρηση της σωστής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του ράουλου, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη επικάλυψη λιπαντικού στην επιφάνεια.

1.5 Μηχανική της έλασης

Προκειμένου να κατανοήσει κανείς την κατεργασία της έλασης είναι σημαντικό να κατανοήσει πρώτα κάποιους όρους που χρησιμοποιούνται, οι οποίοι ονομάζονται και παράμετροι της έλασης και πως αυτοί επιδρούν στην κατεργασία. Έτσι, παρόλο που οι σύγχρονες υπολογιστικές μέθοδοι επιτρέπουν την ανάλυση πολύπλοκων τρισδιάστατων μοντέλων, η μέθοδος της πλάκας (slab method) είναι ακόμα δημοφιλής μεταξύ των μηχανικών. Γνωστή και ως μέθοδος ισοζυγίου ελεύθερου σώματος, προτάθηκε πρώτη φορά από τον Orowan το 1943 [87].

Στην επίπεδη έλαση όπως και στη μηχανική των στερεών ισχύει η αρχή διατήρησης του όγκου. Η ροή του υλικού κατά το πλάτος θεωρείται αμελητέα και για την ευκολία της μεθόδου γίνεται η υπόθεση ότι το πλάτος παραμένει σταθερό (Εικόνα 1.16).

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

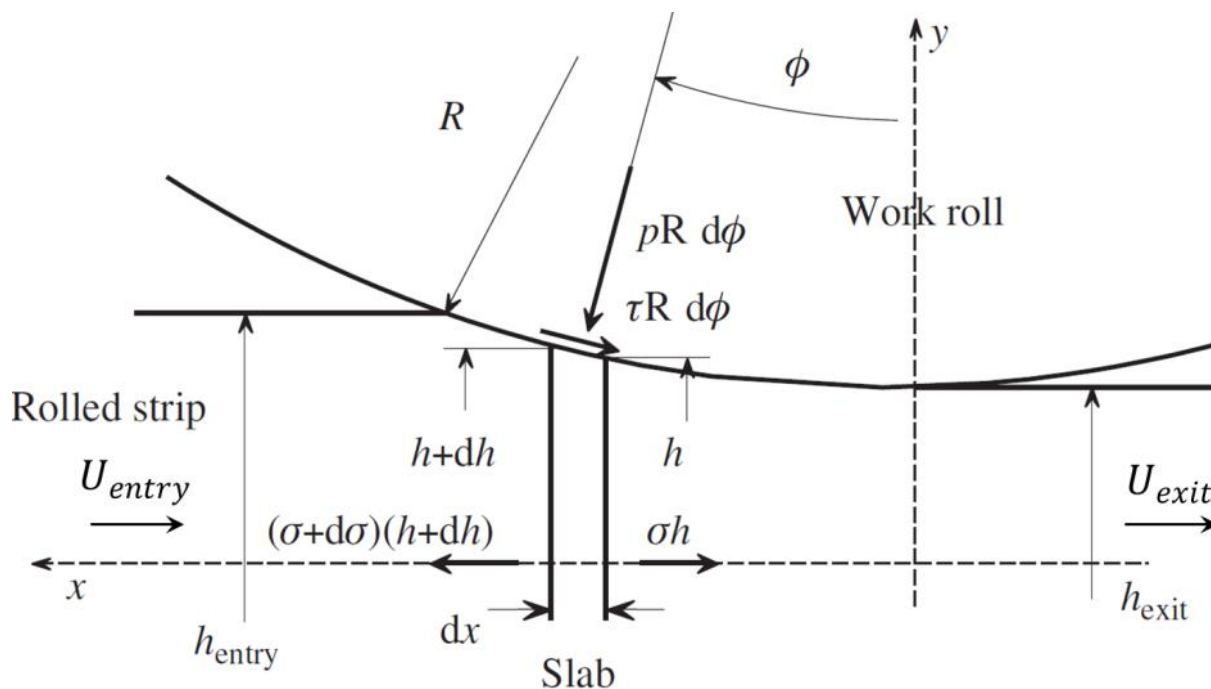


Εικόνα 1.16. Γεωμετρική αντιστοιχία πλάκας εισόδου και εξόδου

$$V_{entry} = h_{entry} w_{entry} l_{entry} = h_{exit} w_{exit} l_{exit} = V_{exit} , w_{entry} = w_{exit} \quad 1.1$$

Τηρώντας το παραπάνω ισοζύγιο, το πάχος της πλάκας στην είσοδο θα είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό στην έξοδο μετά τον υποβιβασμό και κατά συνέπεια η ταχύτητα στην είσοδο U_{entry} θα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή στην έξοδο U_{exit} . Εντός του τόξου αρπαγής υπάρχει ένα σημείο στην επιφάνεια της πλάκας N όπου η ταχύτητα της επιφάνειας της πλάκας είναι ίση με την περιφερειακή ταχύτητα το ράουλου. Αυτό το σημείο N ονομάζεται ουδέτερο σημείο.

Το μοντέλο βασίζεται σε στατικό ισοζύγιο δυνάμεων για κάθε μοναδιαίο όγκο, που υπόκειται πλαστική παραμόρφωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.17 [87].



Εικόνα 1.17. Ισοζύγιο δυνάμεων στην πλάκα κατά παραμόρφωση στην έλαση

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Οι δυνάμεις λόγω των πιέσεων, που κατανέμονται στην επιφάνεια του ράουλου κατά την κατεργασία, οι διατμητικές τάσεις και οι τάσεις στον διαμήκη και στον εγκάρσιο άξονα συνθέτουν το σύστημα των δυνάμεων, του οποίου το ισοζύγιο στην διεύθυνση της έλασης δίνει την βασική εξίσωση ισορροπίας.

$$\frac{d(\sigma_x h)}{dx} + p \frac{dh}{dx} \pm 2\tau = 0 \quad 1.2$$

Όπου p είναι η πίεση στην επιφάνεια του ράουλου, h το πάχος της πλάκας, R η διάμετρος του ράουλου, τ η διατμητική τάση της επιφάνειας επαφής και σ_x η τάση στην φορά της έλασης όπου το x υποδεικνύει την απόσταση κατά την φορά της έλασης από την ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δύο ράουλων. Ο συμβολισμός \pm υποδηλώνει ότι η εξίσωση περιγράφει την συνθήκη ισορροπίας διαφορετικά εκατέρωθεν του ουδέτερου σημείου. Για την μεριά της εισόδου χρησιμοποιείται το αρνητικό πρόσημο και από την μεριά της εξόδου το θετικό πρόσημο.

Η διατμητική τάση που δημιουργείται στην διεπιφάνεια μεταξύ του ράουλου και της πλάκας μπορεί να υπολογιστεί:

$$\tau = \mu p \quad 1.3$$

Για την επίλυση συνολικά της κατανομής της πίεσης στην επιφάνεια του ράουλου είναι επιπλέον απαραίτητη η ανεξάρτητη συνάρτηση που συνδέει την τάση κατά την φορά της έλασης σ_x με την κάθετη πίεση p . Αυτή προκύπτει από την θεωρία της πλαστικότητας. Με την υπόθεση της συνθήκης παραμόρφωσης επιπέδου (plane strain), αυτή γράφεται:

$$\sigma_x + p = 2k \quad 1.4$$

Όπου k η αντοχή του μετάλλου σε διατμητική τάση. Η άλλη μεταβλητή είναι το σημειακό πάχος της πλάκας που μπορεί να υπολογιστεί από:

$$h = h_2 + 2R (1 - \cos\varphi) \approx h_2 + \frac{x^2}{R} \quad 1.5$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Στην παραπάνω εξίσωση η ακτίνα του ράουλου R μπορεί να αντικατασταθεί από την ακτίνα R' η οποία λαμβάνει υπόψη την παραμόρφωση του ράουλου λόγω φορτίου η οποία σύμφωνα με την εξίσωση του Hitchcock [87] γίνεται:

$$R' = R \left[1 + \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E(h_{entry}-h_{exit})} P \right] \quad 1.6$$

Η ανάγκη για συνυπολογισμό της παραμόρφωσης του ράουλου κάνει την διαδικασία του υπολογισμού επαναληπτική, αφού πρώτα πρέπει να γίνει ο υπολογισμός του φορτίου έλασης και μετά αυτός να χρησιμοποιηθεί για την νέα γεωμετρία του ράουλου. Ωστόσο, στην θερμή έλαση, όπου οι πιέσεις είναι χαμηλές συγκριτικά με την ψυχρά έλαση μπορεί να παραληφθεί γενικά αυτό το βήμα. Στην συνέχεια, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.3 και 2.4 και 2.5 στην 2.2 τότε αυτή γράφεται:

$$\frac{dp}{dx} \pm 2\mu \frac{p}{h} = \frac{2k}{h} \frac{dh}{dx} + \frac{d(2k)}{dx} \quad 1.7$$

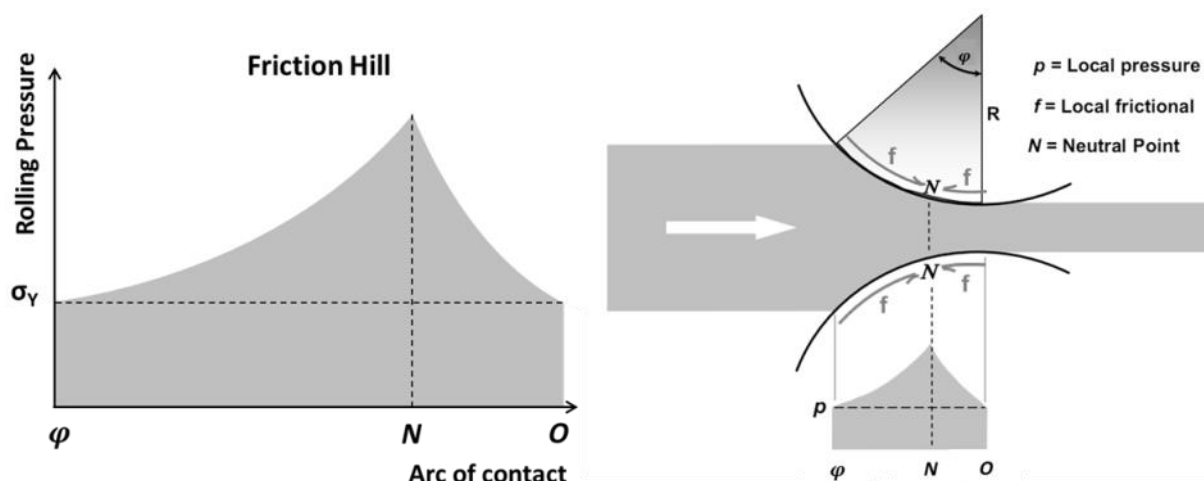
Τέλος, ο υπολογισμός του φορτίου της έλασης προκύπτει από την μαθηματική ολοκλήρωση της πίεσης για όλη την ζώνη παραμόρφωσης. Αρχίζοντας από την είσοδο ισχύει η οριακή συνθήκη:

$$p_{entry} = \sigma_{entry} - 2k_{entry} - \tau \tan\varphi_1 \quad 1.8$$

Όπου φ_1 η γωνία αρπαγής. Από την ολοκλήρωση από την μεριά της εισόδου προκύπτει μια καμπύλη την κατανομής της πίεσης. Αντιστοίχως, ολοκληρώνοντας από την μεριά της εξόδου χρησιμοποιώντας την οριακή συνθήκη:

$$p_{exit} = 2k_{exit} - \sigma_{exit} \quad 1.9$$

Προκύπτει άλλη μια καμπύλη της κατανομής της πίεσης. Οι δύο αυτές καμπύλες δίνουν την κατανομή της πίεσης που ασκείται από το έλασμα στο ράουλο, γνωστές και ως λόφος τριβής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.18 [91]. Το σημείο τομής των δύο καμπύλων ορίζει το ουδέτερο σημείο, όπου η ταχύτητα του ελάσματος εξισώνεται με την περιφερειακή ταχύτητα του ράουλου.



Εικόνα 1.18. Λόφος τριβής στην έλαση

Έτσι το φορτίο της έλασης P υπολογίζεται:

$$P = R \int_0^{\varphi_{entry}} p d\varphi \quad 1.10$$

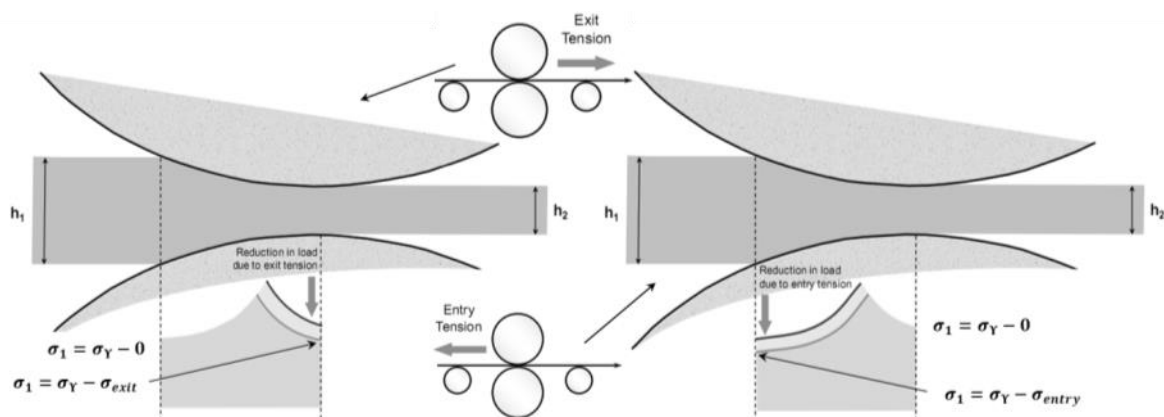
Και αντιστοίχως η ροπή έλασης:

$$\tau = R \int_0^{\varphi_{entry}} f d\varphi \quad 1.11$$

Οι όροι σ_{entry} και σ_{exit} στις εξισώσεις 1.8 και 1.9 αναφέρονται στην τάνυση, που χρησιμοποιείται συχνά κατά την βιομηχανική έλαση δηλαδή μια εφελκυστική τάση που ασκείται μέσω επιβολής εφελκυστικού φορτίου στο έλασμα, είτε από την μεριά της εισόδου είτε από την μεριά της εξόδου είτε αμφίπλευρα.

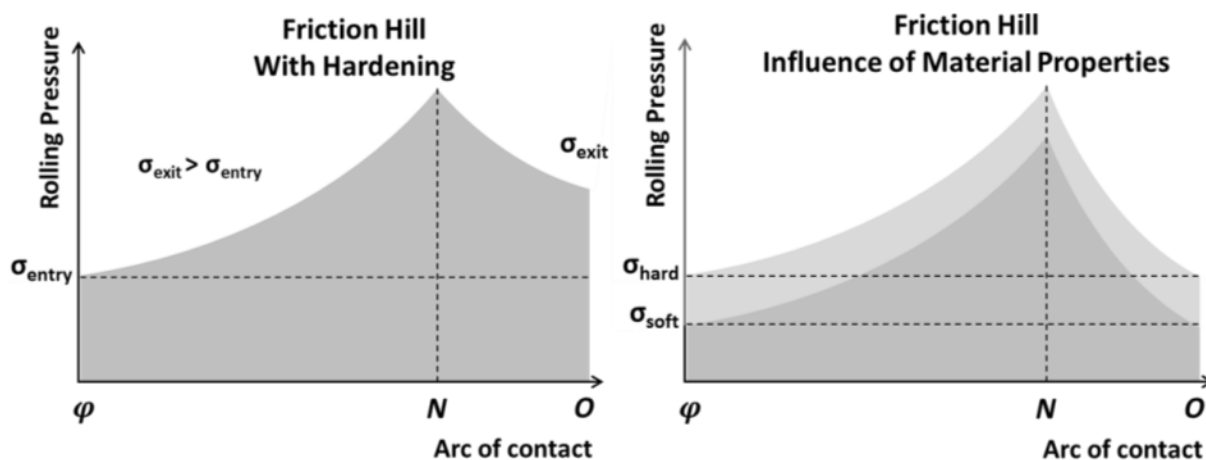
Αν η τάνυση αυξηθεί, είτε στην είσοδο είτε στην έξοδο, τότε η πίεση θα μειωθεί αντιστοίχως, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.19 [91]. Κάτι τέτοιο θα μειώσει και την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη με συνέπεια την μείωση του φορτίου της έλασης.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 1.19. Επίδραση της τάνυσης στον λόφο τριβής

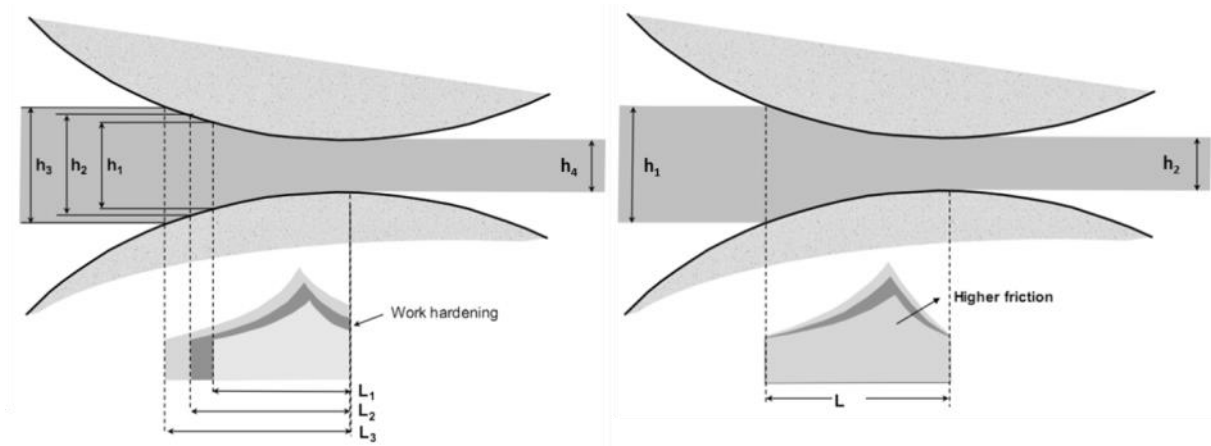
Ο λόφος τριβής επηρεάζεται την μηχανική συμπεριφορά του υλικού Εικόνα 1.20 [91]. Η ενδοτράχυνση θα οδηγήσει σε υψηλότερη τάση διαρροής στην έξοδο με αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου έλασης. Αντιστοίχως, η καμπύλη ενός σκληρού υλικού θα είναι μετατοπισμένη προς τα επάνω σε σχέση με αυτή ενός μαλακού υλικού με αποτέλεσμα και πάλι την αύξηση του φορτίου έλασης.



Εικόνα 1.20. Επίδραση της συμπεριφοράς του υλικού στον λόφο τριβής

Οι παράμετροι τις έλασης επιδρούν επίσης στον λόφο τριβής. Στην Εικόνα 1.21 [91] παρουσιάζεται ενδεικτικά η επίδραση του υποβιβασμού και της τριβής στο λόφο τριβής. Όσο μεγαλύτερος είναι ο υποβιβασμός τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το φορτίο της έλασης. Ομοίως και με την αύξηση της τριβής.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 1.21. Επίδραση της τριβής και του υποβιβασμού στον λόφο τριβής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Μηχανική της μορφοποίησης των μετάλλων

Η μηχανική των στερεών αποτελείται από ένα σύνολο φυσικών νόμων, μαθηματικών τεχνικών και υπολογιστικών αλγορίθμων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός στερεού υλικού, το οποίο υπόκειται μηχανική ή θερμική φόρτιση. Όταν λοιπόν ασκηθεί τάση στο υλικό, αυτό θα παραμορφωθεί. Οι παράγοντες που διέπουν την αντίσταση του υλικού στην παραμόρφωση αποτελούν την αντοχή του.

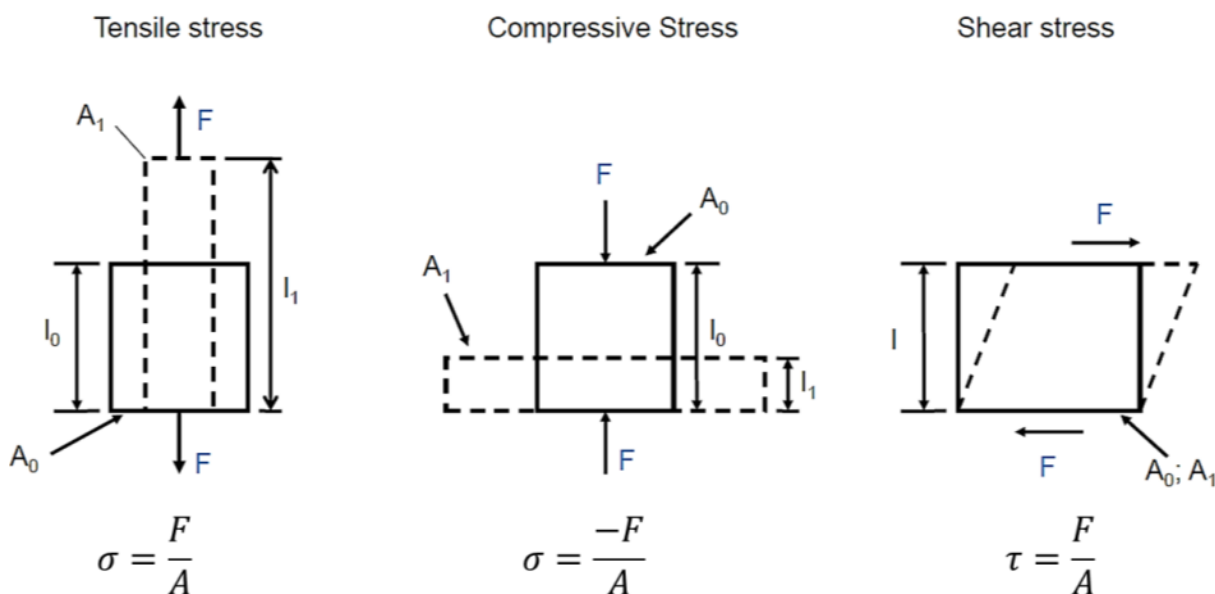
Όταν ένα φορτίο ασκείται σε ένα υλικό, αρχικά επιφέρει την ελαστική του παραμόρφωση. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό/τεμάχιο θα επανέλθει στην αρχική του γεωμετρία όταν το φορτίο πάψει πλέον να υφίσταται. Σε μεγαλύτερα φορτία το ίδιο υλικό θα παραμορφωθεί πλαστικά, δηλαδή το υλικό/τεμάχιο θα υποστεί παραμόρφωση, άρα αλλαγή των αρχικών του διαστάσεων, η οποία θα συνεχίσει να υφίσταται και μετά την αναίρεση της φόρτισης.

Από την μια πλευρά είναι επιθυμητές οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες για ένα υλικό προκειμένου να μπορεί να αντεπεξέλθει στις καταπονήσεις κατά την χρήση. Από την άλλη όμως, είναι επιθυμητές οι χαμηλές μηχανικές ιδιότητες στο στάδιο της μεταλλοτεχνικής κατεργασίας προκειμένου το υλικό να μορφοποιείται ευκολότερα στο επιθυμητό σχήμα. Η συμπεριφορά της παρούσας κατάστασης του υλικού μπορεί να διατυπωθεί με μαθηματικές εξισώσεις ώστε να γίνει εφικτή η περιγραφή της συμπεριφοράς του υπό πολύπλοκες καταπονήσεις. Η θεωρία της μηχανικής των στερεών χρησιμοποιείται ευρέως στην μελέτη των κατεργασιών μορφοποίησης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και βασικές έννοιές της. Για περαιτέρω εμβάθυνση θα πρέπει να ανατρέξει κανείς στις πηγές οι οποίες αποτελούνται από καταξιωμένα βιβλία και έγκυρες δημοσιεύσεις [102,103,104,90,105,106,107,108,109,110].

2.1 Τάσεις και παραμορφώσεις

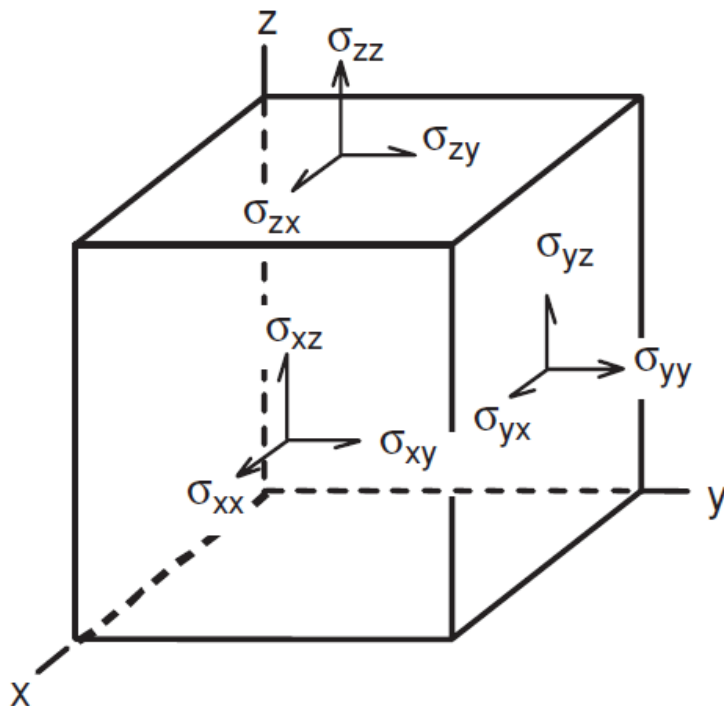
2.1.1 Τάση

Η τάση είναι το μέτρο μιας εξωτερικής δύναμης που δρα πάνω σε οποιαδήποτε διατομή ενός αντικειμένου και μπορεί να εκφραστεί όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 και διαχωρίζεται στην εφελκυστική (tensile), την θλιπτική (compressive) και την διατμητική (shear) τάση αντιστοίχως.



Εικόνα 2.1. Ορισμός τάσεων

Τα στερεά σώματα τις περισσότερες φορές υποβάλλονται σε πολλές δυνάμεις ή διανύσματα δυνάμεων με διαφορετικές διευθύνσεις και μέτρα. Η τάσεις που προκύπτουν από μια τέτοια πολύπλοκη φόρτιση δεν μπορούν να εκφραστούν από ένα και μόνο διάνυσμα τάσης. Χρειάζονται συνολικά εννέα συνιστώσες για να περιγραφεί η εντατική κατάσταση στην μοναδιαία κυψελίδα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Τρεις από αυτές είναι οι ορθές τάσεις όπου ασκούνται κάθετα σε κάθε επίπεδο και μπορεί να είναι είτε εφελκυστικές είτε συνθλιπτικές. Οι υπόλοιπες έξι ασκούνται παράλληλα σε κάθε επίπεδο και ονομάζονται διατμητικές.



Εικόνα 2.2. Οι εννιά συνιστώσες τάσεων που ασκούνται στην μοναδιαία κυψελίδα

Οι συνιστώσες ορίζονται από δύο δείκτες. Ο πρώτος δείκτης υποδηλώνει το κάθετο στην διεύθυνση επίπεδο, στο οποίο εφαρμόζεται η δύναμη και ο δεύτερος δείκτης υποδηλώνει την διεύθυνση της δύναμης. Επομένως, σ_{xx} είναι εφελκυστική ή συνθλιπτική τάση κατά την διεύθυνση x , η οποία ονομάζεται ορθή τάση, ενώ σ_{xy} είναι η τάση που ασκείται στο κάθετο επίπεδο στην διεύθυνση x με φορά προς την διεύθυνση y και ονομάζεται διατμητική τάση.

Η εντατική κατάσταση μπορεί να περιγραφεί από τον τανυστή των τάσεων, γνωστό και ως τανυστή τάσεων Cauchy:

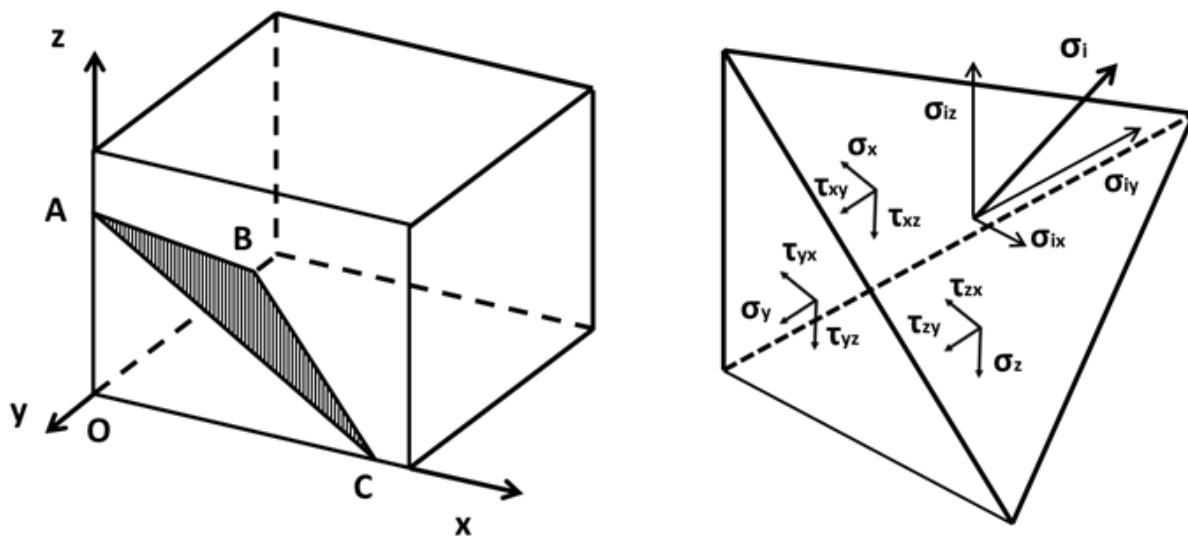
$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \quad 2.1$$

Για ευκολότερο διαχωρισμό των συνιστωσών οι ορθές τάσεις μπορούν να συμβολιστούν με ένα μόνο δείκτη, π.χ. $\sigma_{xx} \equiv \sigma_x$ και οι διατμητικές μπορούν να συμβολιστούν με το σύμβολο τ , π.χ. $\sigma_{xy} \equiv \tau_{xy}$. Επομένως, ο τανυστής των τάσεων σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να γραφεί:

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad 2.2$$

Λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία σε ένα τετράεδρο το οποίο έχει αποκοπεί από την γωνία ενός κύβου (Εικόνα 2.3), μια τάση σ_i ενεργεί στο κεκλιμένο επίπεδο ABC.



Εικόνα 2.3. Ισορροπία της εντατικής κατάστασης σε τρεις διαστάσεις

Οι πλευρές OBC, OCA και OAB έχουν επιφάνεια $\cos(a)$ ABC, $\cos(b)$ ABC και $\cos(c)$ ABC (όπου \cos το συνημίτονο) αντίστοιχα όπου a , b και c είναι οι γωνίες μεταξύ των αντίστοιχων επιπέδων. Έτσι οι συνιστώσες της τάσης σ_i μπορούν να υπολογιστούν:

$$\sigma_{ix} = \cos a \sigma_x + \cos b \tau_{xy} + \cos c \tau_{zx} \quad 2.3$$

$$\sigma_{iy} = \cos a \tau_{xy} + \cos b \sigma_y + \cos c \tau_{yz} \quad 2.4$$

$$\sigma_{iz} = \cos a \tau_{zx} + \cos b \tau_{yz} + \cos c \sigma_z \quad 2.5$$

Και η τιμή της τάσης σ_i προκύπτει από τον υπολογισμό των ριζών της εξίσωσης:

$$\sigma_i^3 - I_1 \sigma_i^2 - I_2 \sigma_i - I_3 = 0 \quad 2.6$$

όπου

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

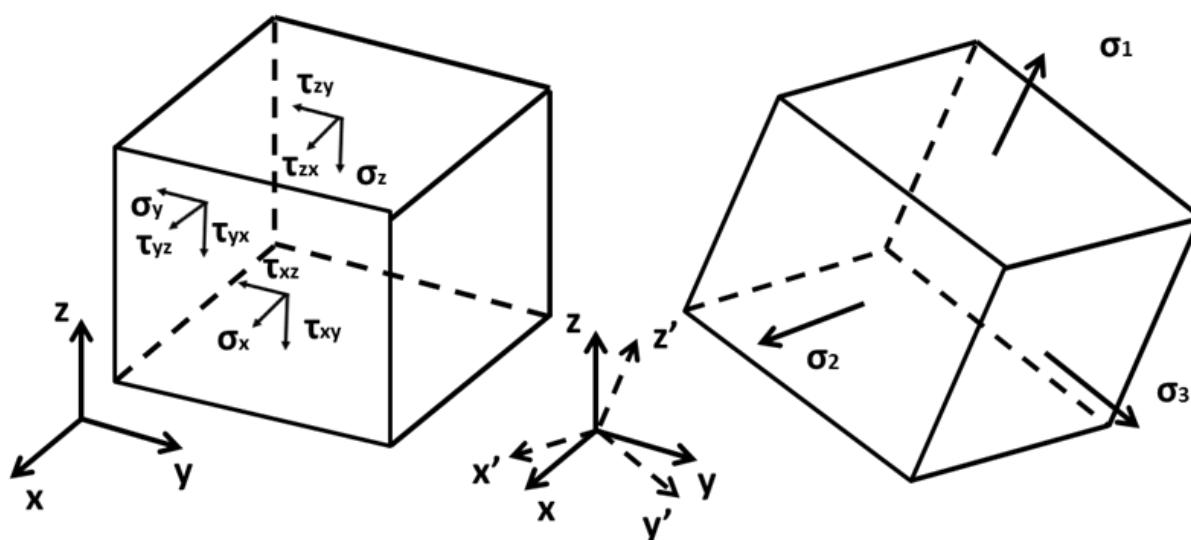
$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad 2.7$$

$$I_2 = -\sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad 2.8$$

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{yx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \tau_{zx}\tau_{xy}^2 \quad 2.9$$

Τα I_1, I_2, I_3 είναι ανεξάρτητα της επιλογής των αξόνων αναφοράς και ονομάζονται σταθερές του τανυστή των τάσεων.

Σε κάθε περίπτωση είναι πάντα δυνατό να βρεθεί ένα σύστημα αξόνων κατά μήκος των οποίων θα εξαφανίζονται οι διατμητικές τάσεις. Σε αυτή την περίπτωση οι ορθές τάσεις, $\sigma_1, \sigma_2,$ και $\sigma_3,$ ονομάζονται κύριες τάσεις και οι άξονες είναι οι κύριοι άξονες (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4. Γραφική απεικόνιση των ορθών τάσεων

Οι κύριες τάσεις περιγράφουν τις μέγιστες τάσεις, καθώς και σε ποια γωνία ασκούνται αυτές στο σώμα. Σε αυτή την περίπτωση ο τανυστής των ορθών τάσεων γίνεται:

$$\sigma_{principal} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad 2.10$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Ο τανυστής των τάσεων μπορεί να χωριστεί σε δύο κομμάτια, στο άθροισμα της υδροστατικής τάσης ($\sigma_{hydrostatic} = \sigma_o$: hydrostatic stress) και των αποκλινουσών τάσεων ($\sigma_{deviatoric}$: deviatoric stresses):

$$\sigma = \sigma_{hydrostatic} + \sigma_{deviatoric} \quad 2.11$$

Όπου

$$\sigma_{hydrostatic} = \sigma_o = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad 2.12$$

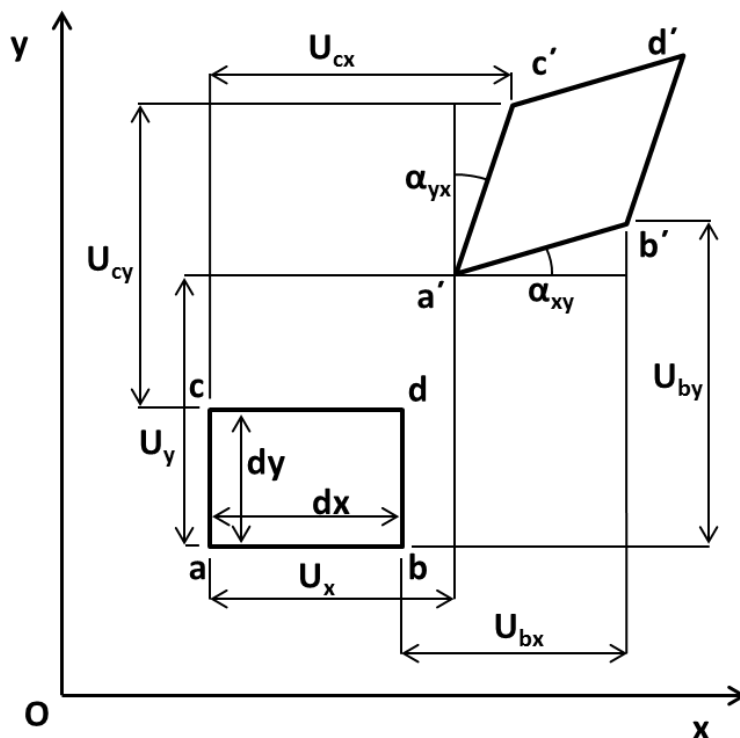
Ο τανυστής των αποκλινουσών τάσεων μπορεί να οριστεί όταν από τις ορθές τάσεις του τάσεων αφαιρεθεί η υδροστατική τάση σ_o . Έτσι, προκύπτουν και οι αποκλίνουσες τάσεις:

$$\sigma_{deviatoric} = \begin{vmatrix} (\sigma_x - \sigma_o) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - \sigma_o) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - \sigma_o) \end{vmatrix} \quad 2.13$$

Η υδροστατική τάση σ_o τείνει να αλλάξει τον όγκο του αντικειμένου, το οποίο υποβάλλεται σε φορτίο ενώ οι αποκλίνουσες τάσεις $\sigma_{deviatoric}$ τείνουν να παραμορφώσουν το σώμα το οποίο υποβάλλεται σε φορτίο.

2.1.2 Παραμόρφωση

Ένα σώμα παραμορφώνεται όταν συμβαίνουν αλλαγές στη σχετική θέση των στοιχείων του όγκου του ως αποτέλεσμα των τυχαίων καταστάσεων φόρτισης. Καθώς τα σώματα παραμορφώνονται, συχνά υφίστανται μετατοπίσεις και περιστροφές, καθώς και παραμορφώσεις. Η παραμόρφωση πρέπει να ορίζεται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να αποκλείονται οι συνέπειες της μετατόπισης και της περιστροφής. Θεωρούμε ένα απειροελάχιστο δισδιάστατο σώμα, $abcd$, το οποίο υφίσταται παραμόρφωση σε παραλληλόγραμμο, $a'b'c'd'$ (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5. Παραμόρφωση στο επίπεδο x-y

Οι συντεταγμένες ενός σημείου είναι αρχικά x και y . Μετά από την παραμόρφωση, το ίδιο σημείο έχει τις συντεταγμένες x' και y' . Μπορεί κανείς να προσδιορίσει το μέγεθος της μετατόπισης του σημείου b , u_{bx} ως συνάρτηση της μετατόπισης του σημείου a . Αυτή η τιμή, u_{bx} , είναι διαφορετική από την μετατόπιση του σημείου a , u_x , για τη μεταβολή της συνάρτησης u_x στο μήκος dx . Ο υπολογισμός μπορεί να εφαρμοστεί και στις τρισδιάστατες περιπτώσεις.

$$u_{bx} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx; \quad u_{by} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial y} dy \quad 2.14$$

Η παραμόρφωση στην διεύθυνση x είναι:

$$\varepsilon_x = \frac{u_{bx} - u_x}{dx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad 2.15$$

Αντιστοίχως:

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad 2.16$$

Σε μικρές παραμορφώσεις, η αλλαγή γωνίας είναι αμελητέα και μπορεί να παραληφθεί. Επομένως:

$$a_{xy} = \frac{u_{bx} - u_y}{u_{bx} + dx - u_x} \quad 2.17$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 3.15 και λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του ε τότε:

$$a_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x}; \quad a_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad 2.18$$

Επομένως, οι συνολικές γωνιακές παραμορφώσεις είναι:

$$\gamma_{xy} = a_{xy} + a_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad 2.19$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad 2.20$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \quad 2.21$$

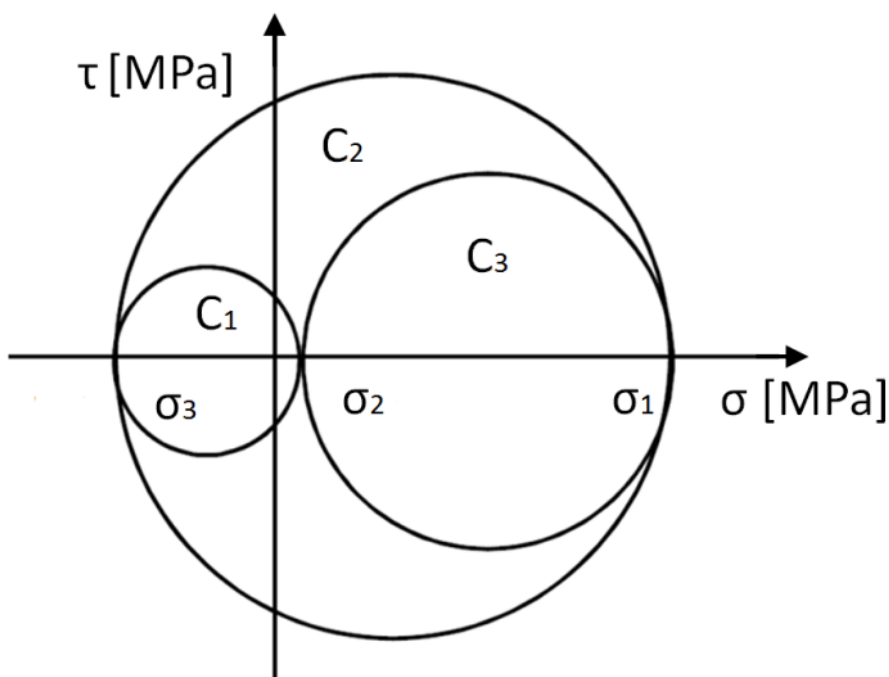
Η παραμορφωμένη κατάσταση σε ένα σημείο περιγράφεται με τον ταυιστή των παραμορφώσεων, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση του ταυιστή των τάσεων.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zy} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad 2.22$$

Τα στοιχεία της διαγωνίου είναι οι ορθές παραμορφώσεις και προκαλούν την αλλαγή του όγκου του στοιχείου, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία αναφέρονται στις διατμητικές παραμορφώσεις, οι οποίες προκαλούν αλλαγή του σχήματος του στοιχείου.

2.1.3 Ο κύκλος του Mohr

Ο κύκλος του Mohr αποτελεί μια γραφική αναπαράσταση του τανυστή των τάσεων (Εικόνα 2.6). Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των τάσεων με γραφικό τρόπο εφαρμόζοντας ένα σύστημα περιστρεφόμενων συντεταγμένων. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να απλοποιηθεί μια πολύπλοκη εντατική κατάσταση πολλών επιπέδων σε δύο ή τρία μόνο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα.



Εικόνα 2.6. Τρισδιάστατος κύκλος του Mohr

Για την κατασκευή του κύκλου του Mohr (Εικόνα 2.6) για μια γενικευμένη τρισδιάστατη περίπτωση, πρώτα πρέπει να προσδιοριστούν οι κύριες τάσεις ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) και οι διευθύνσεις τους. Οι κύκλοι θα έχουν ακτίνα:

$$R_1 = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3); \quad R_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3); \quad R_3 = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad 2.23$$

Και τα κέντρα τους θα έχουν συντεταγμένες:

$$C_1: \left[\frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3), 0 \right]; \quad C_2: \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3), 0 \right]; \quad C_3: \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2), 0 \right] \quad 2.24$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Επομένως, η εξίσωση των τριών κύκλων στο σύστημα συντεταγμένων θα είναι:

$$C_1: \tau^2 + [\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)]^2 \geq [\frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)]^2 \quad 2.25$$

$$C_2: \tau^2 + [\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 \geq [\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)]^2 \quad 2.26$$

$$C_3: \tau^2 + [\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)]^2 \geq [\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)]^2 \quad 2.27$$

Οι εξισώσεις των κύκλων του Mohr δείχνουν ότι τα σημεία των τάσεων (σ_n, τ_n) βρίσκονται υποχρεωτικά επάνω ή μέσα στους κύκλους.

2.2 Ελαστικότητα

Όταν ένα σώμα παραμορφώνεται ελαστικά με την επιβολή φορτίου, τότε αυτό θα επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση τη στιγμή που το φορτίο πάψει πλέον να ασκείται. Δηλαδή, η ελαστική παραμόρφωση είναι μια αντιστρεπτή κατάσταση. Για τα μεταλλικά υλικά είναι ασφαλής η υπόθεση ότι η παραμόρφωση είναι ανάλογη της τάσης. Τόσο η επαναφορά ελατηρίου όσο και οι παραμένουσες τάσεις οφείλονται στις ελαστικές ιδιότητες του υλικού.

Ισότροπο ονομάζεται ένα υλικό, το οποίο έχει τις ίδιες ιδιότητες προς όλες του τις διευθύνσεις. Όταν μια μοναξονική τάση, έστω στη διεύθυνση x , εφαρμοστεί στο υλικό αυτό, τότε, σύμφωνα με τον νόμο του Hooke, η παραμόρφωση θα είναι:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad 2.28$$

Όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus). Η μονοαξονική αυτή φόρτιση θα επιφέρει, ωστόσο, και πλευρικές παραμορφώσεις. Η παραμόρφωση στην κάθετη διεύθυνση y θα είναι:

$$\varepsilon_y = \nu \varepsilon_x \quad 2.29$$

Όπου ν είναι ο συντελεστής Poisson (Poisson's ratio). Λαμβάνοντας υπόψη και τον συντελεστή Poisson, η γενικευμένη μορφή του νόμου του Hooke γίνεται:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad 2.30$$

Οι διατμητικές παραμορφώσεις επηρεάζονται μόνο από τις αντίστοιχες διατμητικές τάσεις, επομένως:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad 2.31$$

Όπου γ η διατμητική παραμόρφωση, τ η διατμητική τάση και G το μέτρο διάτμησης.

Το μέτρο του όγκου B (Bulk modulus) ορίζεται από την σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης του όγκου και της μέσης τάσης:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{B} \quad 2.32$$

2.3 Θεωρία της Πλαστικότητας

Η θεωρία της πλαστικότητας ασχολείται με τον ορισμό του ορίου της ελαστικής περιοχής και το σημείο απ' όπου αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση κάτω από πολύπλοκη εντατική κατάσταση. Ο μαθηματικός νόμος, που ορίζει αυτό το σημείο, ονομάζεται κριτήριο διαρροής και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε ιδανικά υλικά όσο και σε υλικά για διαφορετικές καταστάσεις, ανισότροπα και με ιστορικό εξέλιξης της θερμοκρασίας, των τάσεων και των παραμορφώσεων. Στην συνέχεια, αφού επέλθει η ελαστική παραμόρφωση, οι νόμοι πλαστικής διαρροής προβλέπουν την νέα γεωμετρία του υλικού.

Όσον αφορά στα διαγράμματα του κύκλου του Mohr, η κρίσιμη παράμετρος είναι τα μεγέθη των κύκλων (όχι οι θέσεις τους). Αυτά καθορίζουν εάν θα υπάρξει πλαστική

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

διαρροή. Οι περιοχές που απεικονίζουν την εντατική κατάσταση έξω από τον κύκλο καθώς και ακριβώς πάνω σε αυτόν θα προκαλέσει πλαστική διαρροή, ενώ εκείνη που βρίσκεται εντός του κύκλου τόσο δεν θα προκαλέσει.

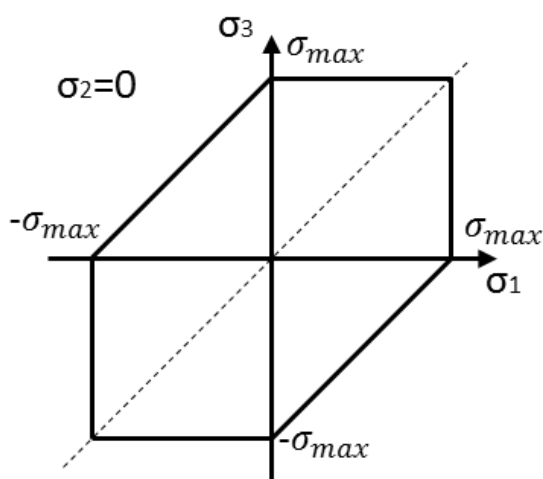
2.3.1 Κριτήριο Tresca

Το απλούστερο κριτήριο διαρροής είναι το κριτήριο του Tresca. Μετά από μια σειρά πειραμάτων στην διέλαση μετάλλων ο Tresca κατέληξε ότι η διαρροή του υλικού θα συμβεί όταν η μέγιστη διατμητική τάση στο υλικό φτάσει μια κρίσιμη τιμή. Το κριτήριο θεωρεί ότι η ενδιάμεση κύρια τάση σ_2 δεν έχει καμία επίδραση στην διαρροή του υλικού. Το κριτήριο μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\sigma_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_{max} = \bar{\sigma} \quad , \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad 2.33$$

Όπου $\bar{\sigma}$ η ενεργή τάση της πλαστικής διαρροής (effective stress). Η αντίστοιχη παραμόρφωση για την τάση $\bar{\sigma}$ είναι η ενεργή πλαστική παραμόρφωση (effective strain) και συμβολίζεται $\bar{\epsilon}$.

Η παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει το όριο διαρροής αν αυτή αποτυπωθεί σε ένα διάγραμμα $\sigma_1 - \sigma_2$ όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7. Απεικόνιση του ορίου διαρροής Tresca

Το κριτήριο του Tresca εφαρμόζεται σε προβλήματα με υψηλό βαθμό συμμετρίας, όπου το μέγεθος και η διεύθυνση των κύριων τάσεων είναι προκαθορισμένη. Σε αυτές τις

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

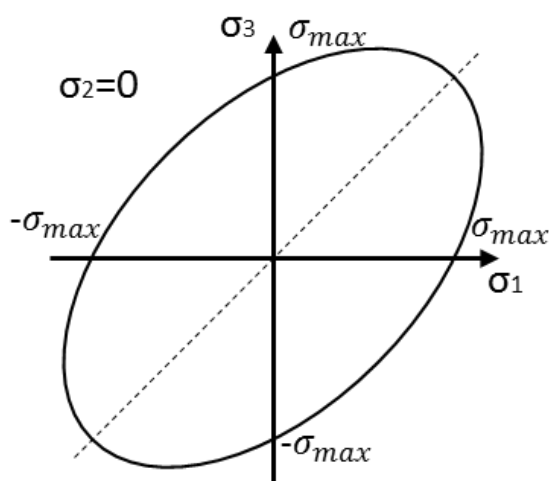
περιπτώσεις το κριτήριο μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο, λόγω της απλότητάς του, χωρίς όμως να περιορίζεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων. Σε αντίθετη περίπτωση όμως, δηλαδή σε προβλήματα μικρής συμμετρίας μπορεί να οδηγήσει σε πολύ πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς και μειωμένη ακρίβεια.

2.3.2 Κριτήριο von Mises

Το κριτήριο von Mises θεωρεί πως η πλαστική διαρροή εξαρτάται από ένα συνδυασμό ορθών και διατμητικών τάσεων, των οποίων οι τιμές δεν αλλάζουν κατά τον μετασχηματισμό από ένα συστημα αξόνων σε ένα άλλο, και το μέτρο τους ισούται με την τετραγωνική ρίζα των τριών κύκλων του Mohr. Για ισοαξονική φόρτιση μπορεί να γραφεί:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = \bar{\sigma} \quad 2.34$$

Ο νόμος του Von Mises υποδηλώνει ότι η ελαστική ενέργεια της παραμόρφωσης φτάνει μια συγκεκριμένη τιμή στο όριο διαρροής. Αυτή είναι απαραίτητη ενέργεια για την μεταβολή του όγκου, επομένως, όλες οι τάσεις που προκαλούν μόνο ελαστική ενέργεια για την μεταβολή όγκου δεν προκαλούν διαρροή του υλικού. Στην Εικόνα 2.8 αποτυπώνεται το κριτήριο διαρροής του von Mises για $\sigma_2 = 0$. Το διάγραμμα είναι μια έλλειψη.



Εικόνα 2.8. Απεικόνιση του ορίου διαρροής von Mises

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Το κριτήριο von Mises μπορεί επίσης να εκφραστεί και με όρους χωρίς τις κύριες τάσεις. Σε αυτή την περίπτωση:

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) = 2\sigma_{max}^2 \quad 2.35$$

2.3.3 Κανόνες πλαστικής διαρροής

Με την έναρξη της πλαστικής διαρροής στο υλικό η παραμόρφωση εξαρτάται από την εντατική κατάσταση που προκάλεσε την πλαστική διαρροή. Οι κανόνες που συνδέουν την τάση με την πλαστική παραμόρφωση ονομάζονται κανόνες πλαστικής διαρροής (flow rules). Η γενικευμένη του μορφή μπορεί να γραφεί:

$$\frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} = d\lambda \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right) \quad 2.36$$

Όπου f είναι η εξίσωση που περιγράφει το κριτήριο διαρροής και συχνά αναφέρεται ως το πλαστικό δυναμικό (plastic potential). Το αριστερό μέρος της εξίσωσης 3.36 εξαρτάται από την καμπύλη $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$.

Σύμφωνα με την αρχή της κανονικότητας (principle of normality), το άθροισμα των διανυσμάτων των πλαστικών παραμορφώσεων είναι πάντα κάθετο στην καμπύλη του κριτηρίου πλαστικής διαρροής και ότι, για ισότροπα υλικά, οι διευθύνσεις του διανύσματος

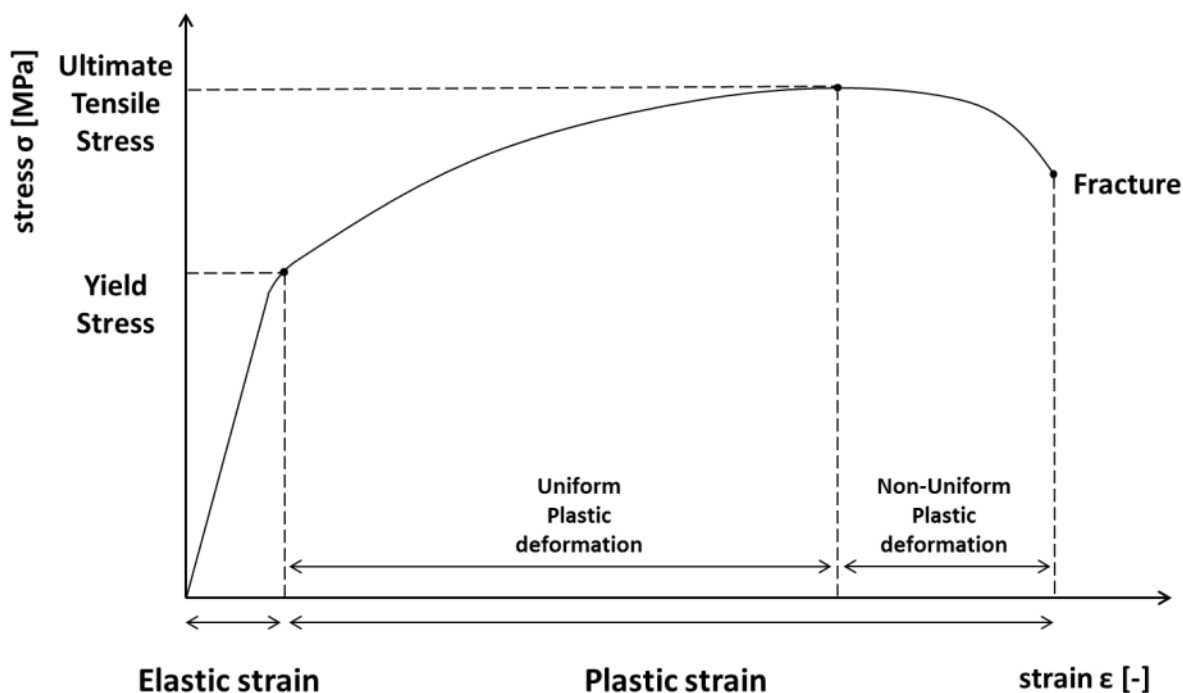
$$\frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_2} = -\frac{\partial \sigma_2}{\partial \sigma_1} \quad 2.37$$

όπου $\partial \sigma_2 / \partial \sigma_1$ είναι η κλίση της καμπύλης του κριτηρίου διαρροής στο σημείο της διαρροής.

2.4 Φαινόμενα κατά την πλαστική διαρροή

2.4.1 Το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι μια από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους για την μέτρηση της επίδρασης της παραμόρφωσης στην αντοχή του υλικού. Αρχικά το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά και η εφελκυστική τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης με κλίση E , γνωστή και ως μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus). Η ελαστική παραμόρφωση είναι αντιστρεπτή με την απομάκρυνση του φορτίου. Με την αύξηση του φορτίου κάποια στιγμή επέρχεται το σημείο όπου ξεκινά η πλαστική διαρροή πάνω από το οποίο η παραμόρφωση είναι πλέον μόνιμη στο υλικό. Η δύναμη αυξάνεται μέχρι ένα μέγιστο το οποίο ονομάζεται σημείο μέγιστης αντοχής και στην συνέχεια φθίνει (με σχηματισμό λαιμού στο τεμάχιο) μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Στην Εικόνα 2.9 φαίνεται η σχηματική απεικόνιση της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης.



Εικόνα 2.9. Καμπύλη μηχανικής τάσης - παραμόρφωσης

Η τάση και η παραμόρφωση υπολογίζονται από μετρήσεις δύναμης F και επιμήκυνσης ΔL που λαμβάνονται κατά την διάρκεια της δοκιμής. Έτσι:

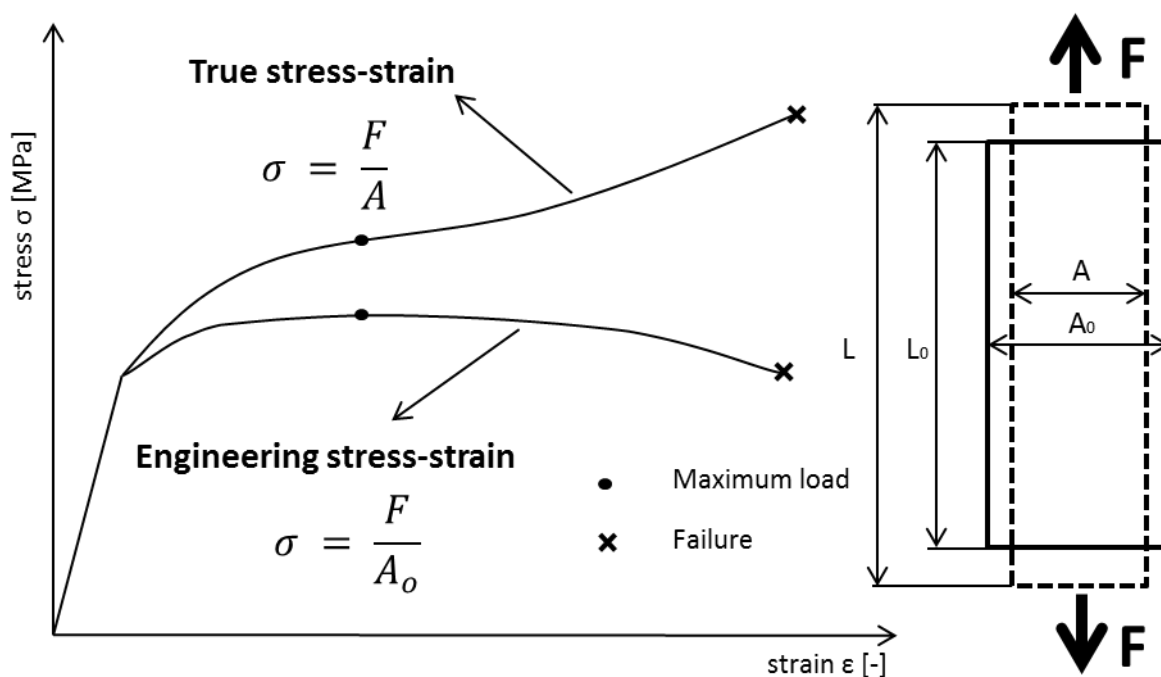
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad 2.38$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 2.39$$

Όπου σε αυτή την περίπτωση το σ και το ε είναι η μηχανική τάση και η μηχανική παραμόρφωση αντίστοιχα (engineering stress/strain), A_0 η αρχική διατομή του υλικού και L_0 το αρχικό μήκος του υλικού.

Η καμπύλη μηχανικής τάσης - παραμόρφωσης είναι πολύ χρήσιμη, καθώς είναι εύκολο να υπολογιστεί και αποτυπώνει πολύ καλά την μέγιστη δύναμη σε εφελκυσμό. Ωστόσο, η πραγματική εντατική κατάσταση περιγράφεται σωστά από την καμπύλη πραγματικής τάσης - πραγματικής παραμόρφωσης (true stress-strain) όπως φαίνεται στην εικόνα Εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10. Καμπύλη πραγματικής τάσης - παραμόρφωσης

Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών είναι πως σε αντίθεση με την καμπύλη που κάνει αναγωγή στην αρχική γεωμετρία του δοκιμίου, στην καμπύλη πραγματικής τάσης -

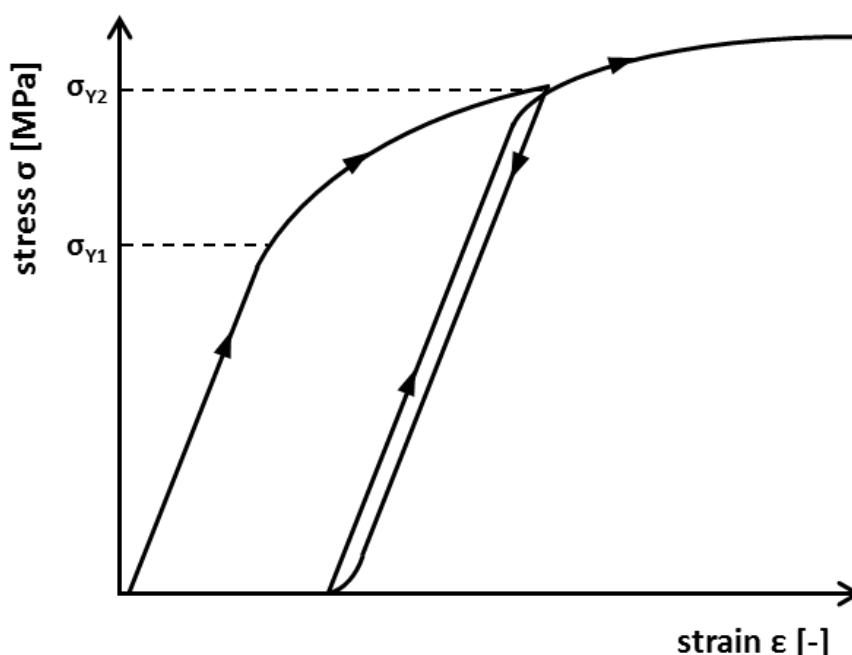
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

παραμόρφωσης γίνεται αναγωγή στην στιγμιαία. Έτσι, η τάση και η παραμόρφωση υπολογίζονται:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 2.40$$

$$\varepsilon = \int \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad 2.41$$

Όταν το υλικό παραμορφωθεί πλαστικά μέχρι κάποιο σημείο και στην συνέχεια απομακρυνθεί το φορτίο, τότε θα υπάρξει μια ελαστική επαναφορά ακολουθώντας μια γραμμή με κλίση ίση με το μέτρο ελαστικότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11. Όταν εφαρμοστεί φορτίο εκ νέου στο ήδη παραμορφωμένο κομμάτι, τότε η διαρροή δεν θα επέλθει στο ίδιο φορτίο με αυτό που επήλθε κατά την άλλη φόρτιση, αλλά σε μεγαλύτερο και ίσο με το φορτίο που ολοκληρώθηκε η προηγούμενη φόρτιση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11. Επομένως, όσο μεγαλύτερη η προ-φόρτιση σε ένα υλικό τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το όριο διαρροής, καθώς και τόσο πιο επίπεδη θα είναι η καμπύλη στην πλαστική περιοχή σε τέτοιο βαθμό που πολύ έντονα παραμορφωμένα υλικά μπορούν να θεωρηθούν ιδανικά πλαστικά (δηλαδή να μην σκληραίνουν περαιτέρω).



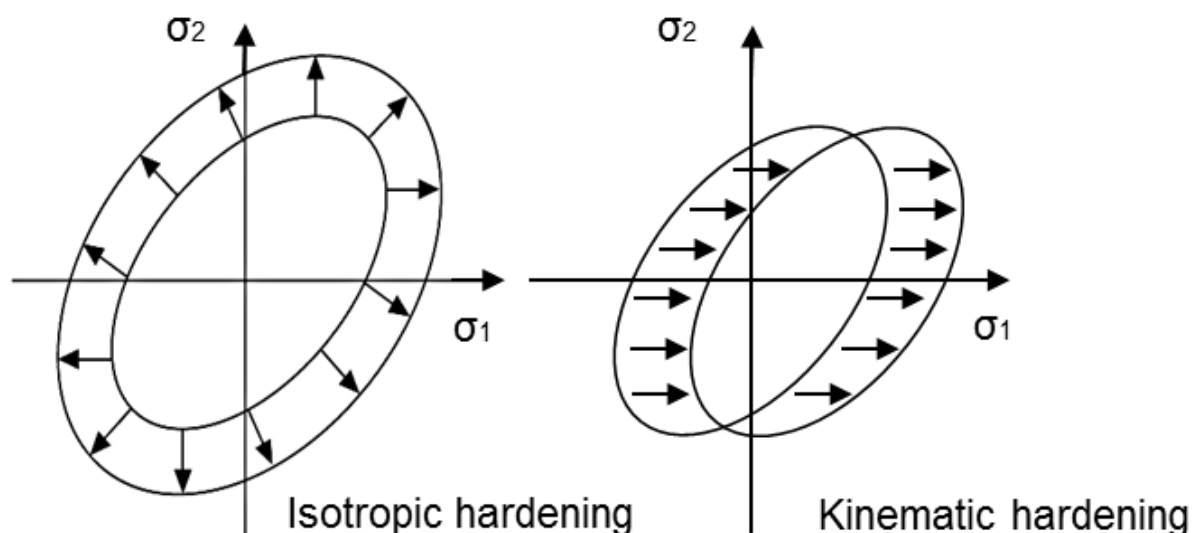
Εικόνα 2.11. Μεταβολή του ορίου διαρροής κατά την κυκλική φόρτιση

2.4.2 Σκλήρυνση από ενδοτράχυνση

Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της ισότροπης σκλήρυνσης από ενδοτράχυνση γίνεται με την επέκταση της καμπύλης του ορίου διαρροής προς όλες τις κατευθύνσεις (Εικόνα 2.12). Το σχήμα του γεωμετρικού τόπου παραμένει ίδιο και η τάση διαρροής αυξάνεται αντίστοιχα με τον τρόπο που μεγεθύνεται ο γεωμετρικός τόπος. Η βασική υπόθεση είναι $\sigma = f(\varepsilon)$. Παρόλο που το μοντέλο ονομάζεται ιστροπικό, εφαρμόζεται με επιτυχία και σε ανισότροπα υλικά.

Η εναλλακτική αυτού είναι το κινηματικό μοντέλο. Το μοντέλο μπορεί να προβλέψει την σκλήρυνση μετακινώντας τον γεωμετρικό τόπο του κριτηρίου διαρροής χωρίς όμως να μεταβάλλεται το μέγεθος του ή η γεωμετρία του (Εικόνα 2.12). Αν αυτή η μετατόπιση είναι αρκετά μεγάλη, η αποφόρτιση του υλικού μπορεί από μόνη της να προκαλέσει πλαστική διαρροή.

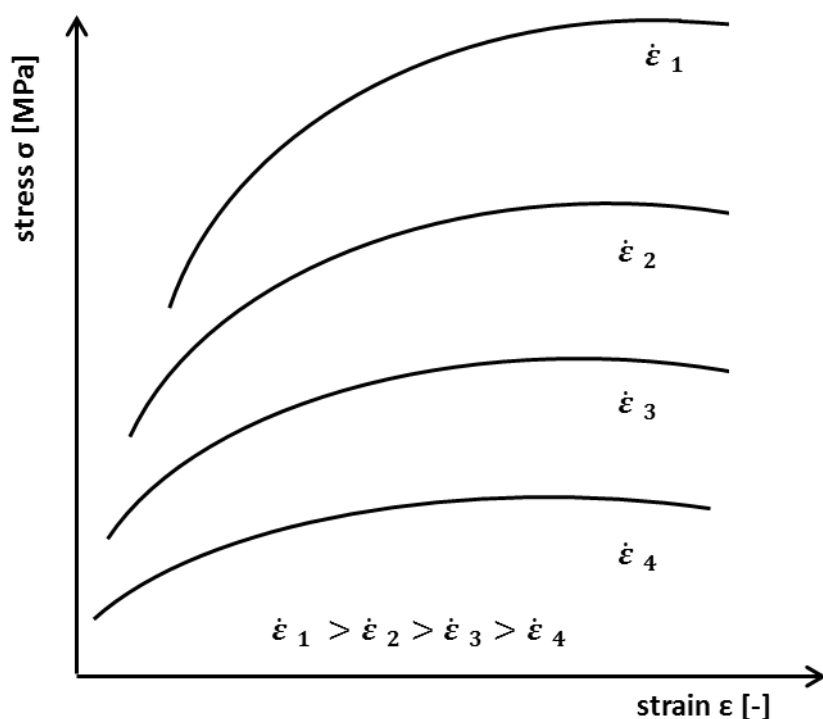
Το κινηματικό μοντέλο δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε μικρές παραμορφώσεις μετά από αλλαγές στην διεύθυνση της παραμόρφωσης. Από την άλλη το ιστροπικό μοντέλο θεωρείται πιο αξιόπιστο για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού σε μεγάλες παραμορφώσεις μετά από αλλαγές στην διεύθυνση της παραμόρφωσης.



Εικόνα 2.12. Επίδραση της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση στον γεωμετρικό τόπο του κριτηρίου διαρροής.

2.4.3 Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στο όριο διαρροής

Η πλαστική διαρροή και η ενεργή τάση εξαρτάται, εκτός από το ίδιο το μέτρο της παραμόρφωσης, και από τον ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης (strain rate). Στα περισσότερα υλικά η αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης θα επιφέρει και αύξηση της τάσης παραμόρφωσης (Εικόνα 2.13), το οποίο είναι πολύ σημαντικό για τις κατεργασίες μορφοποίησης στις οποίες συχνά αναπτύσσονται υψηλοί ρυθμοί παραμόρφωσης που επηρεάζουν σημαντικά την εντατική κατάσταση του υλικού.



Εικόνα 2.13. Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στην τάση πλαστικής διαρροής

Ο σημειακός ρυθμός παραμόρφωσης προσδιορίζεται από την κατανομή των τοπικών ταχυτήτων. Η ταχύτητα είναι η μεταβολή της μετατόπισης ως προς χρόνο για όλες τις διευθύνσεις x , y , z :

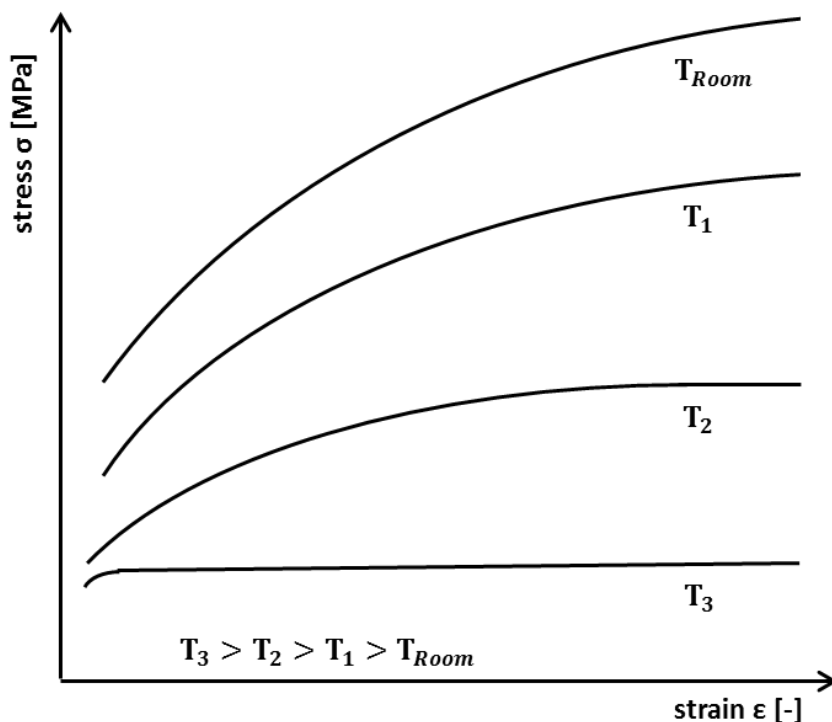
$$v_x = \frac{\partial u_x}{\partial t}; \quad v_y = \frac{\partial u_y}{\partial t}; \quad v_z = \frac{\partial u_z}{\partial t}; \quad 2.42$$

Αντιστοίχως, ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι η μεταβολή της ταχύτητας στις διευθύνσεις x , y και z :

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad 2.43$$

2.4.4 Η επίδραση της θερμοκρασίας στο όριο διαρροής

Με την αύξηση της θερμοκρασίας η τάση πλαστικής διαρροής μειώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.14. Επιπροσθέτως, στα μεταλλικά υλικά μειώνεται σημαντικά και η ενδοτράχυνση λόγω παραμόρφωσης, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας ενεργοποιούνται μηχανισμοί εντός του υλικού, π.χ. η ανακρυστάλλωση, που λειτουργούν ανταγωνιστικά της ενδοτράχυνσης.



Εικόνα 2.14. Επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση πλαστικής διαρροής

2.4.5 Βασικά μαθηματικά μοντέλα υλικών

Με την επιβολή φορτίου αρχικά το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά σύμφωνα με τον νόμο του Hooke μέχρι το σημείο πλαστικής διαρροής, όπως περιγράφεται από τα κριτήρια πλαστικής διαρροής. Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφεται η μαθηματική προσέγγιση μετά την πλαστική διαρροή του υλικού.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Το απλούστερο μοντέλο θεωρεί το υλικό ιδανικά πλαστικό και δεν λαμβάνει υπόψη την ενδοτράχυνση. Η τάση παραμόρφωσης σ είναι ανεξάρτητη της παραμόρφωσης ε :

$$\sigma = A \quad 2.44$$

Όπου A η τάση πλαστικής διαρροής στον εφελκυσμό. Για γραμμική περιγραφή της ενδοτράχυνσης το μοντέλο γράφεται:

$$\sigma = A + B \varepsilon \quad 2.45$$

Είναι σύνηθες τα υλικά να σκληραίνουν με ρυθμό που φθίνει σε σχέση με την παραμόρφωση. Έτσι ένα μοντέλο που συχνά μπορεί να περιγράψει καλύτερα το φαινόμενο είναι ο νόμος εκθετικής ενδοτράχυνσης (power law):

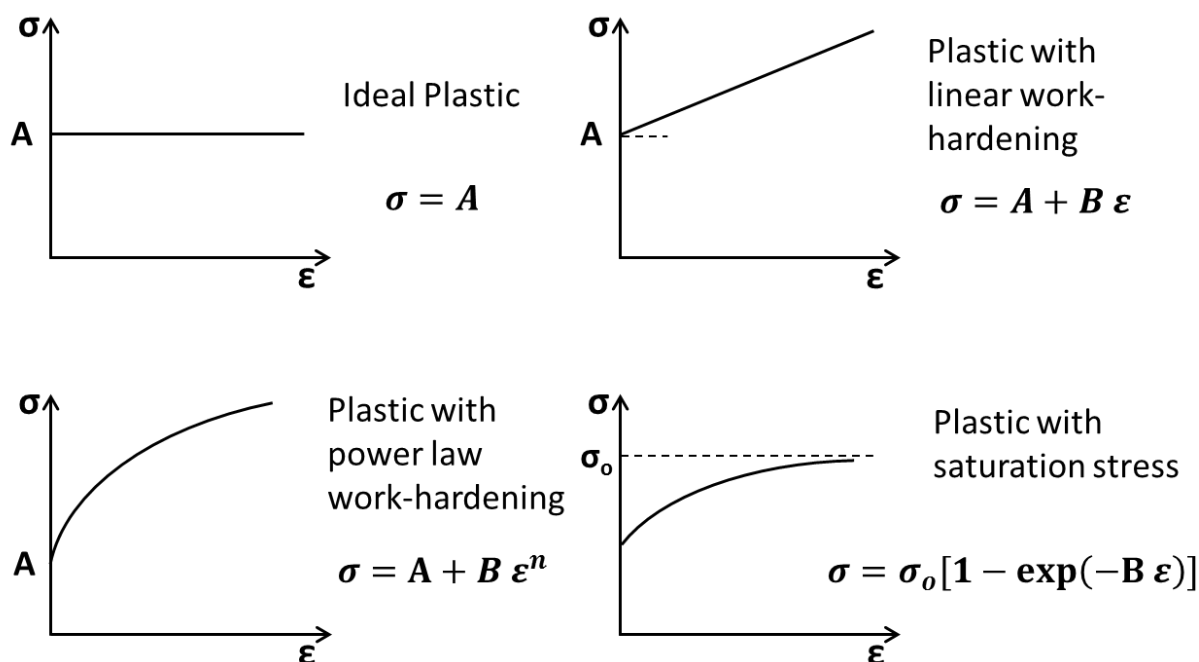
$$\sigma = A + B \varepsilon^n \quad 2.46$$

Ακόμα ένα μοντέλο είναι το μοντέλο κορεσμού, το οποίο προβλέπει ότι η τάσεις αυξάνονται ασυμπτωτικά ως προς μια μέγιστη τιμή τάσης σ_0 , σε μεγάλες παραμορφώσεις.

$$\sigma = \sigma_0 [1 - \exp(-A \varepsilon)] \quad 2.47$$

Οι γραφικές παραστάσεις των παραπάνω μοντέλων φαίνονται στην Εικόνα 2.15

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 2.15. Γραφικές παραστάσεις μοντέλων υλικού για ενδοτράχυνση

Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στην τάση πλαστικής διαρροής μπορεί να περιγραφεί για τα περισσότερα υλικά από:

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m \quad 2.48$$

Όπου C είναι συντελεστής του υλικού, $\dot{\epsilon}$ είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης και το m ονομάζεται συντελεστής ευαισθησίας στον ρυθμό παραμόρφωσης.

Η απλούστερη σχέση θερμοκρασίας και ρυθμού παραμόρφωσης, με την τάση είναι εκείνη των «Zener» και «Hollomon», οι οποίοι θεώρησαν την πλαστική παραμόρφωση ως μία θερμικά ενεργοποιούμενη διαδικασία. Έτσι, κατέληξαν στην εξής σχέση :

$$\sigma = f(Z) \quad 2.49$$

Όπου Z είναι η παράμετρος Zener-Hollomon, γνωστή και σαν μια θερμοκρασιακά διορθωμένη έκφραση του ρυθμού παραμόρφωσης, και δίνεται από τον τύπο:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad 2.50$$

Όπου Q είναι η ενέργεια ενεργοποίησης και R η σταθερά των αερίων.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Στην βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων που είτε συνδυάζουν κάποια από τα παραπάνω μοντέλα είτε χρησιμοποιούν διαφορετικές περιγραφές της συμπεριφοράς του υλικού. Ένα από αυτά τα μοντέλα είναι αυτό των Johnson-Cook, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην προσομοίωση της μορφοποίησης των μετάλλων και εξαρτάται από την παραμόρφωση, τον ρυθμό παραμόρφωσης και την θερμοκρασία:

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad 2.51$$

Όπου A, B, C, m, n είναι σταθερές του υλικού, ε η παραμόρφωση, $\dot{\varepsilon}$ και $\dot{\varepsilon}_0$ ο ρυθμός παραμόρφωσης και ο ρυθμός παραμόρφωσης αναφοράς, T, T_r και T_m η θερμοκρασία, η θερμοκρασία δωματίου και η θερμοκρασία τήξης αντίστοιχα. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία.

2.5 Έργο και ενέργεια της παραμόρφωσης

Αν μια δοκός με μήκος x και διατομή A υποβληθεί σε εφελκυστική δύναμη F , η οποία θα οδηγήσει σε αύξηση του μήκους της dx , το βαθμιαίο έργο dW είναι:

$$dW = F dx \quad 2.52$$

Το έργο στον όγκο μπορεί να υπολογιστεί από:

$$dw = \frac{dW}{A x} = \frac{F dx}{A x} = \sigma d\varepsilon \quad 2.53$$

Και η ενέργεια της παραμόρφωσης:

$$d\dot{W} = \sigma d\dot{\varepsilon} \quad 2.54$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Μεθοδολογία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM) χρησιμοποιεί μια τμηματικά συνεχή προσέγγιση όπου το συνεχές αντικείμενο προς μελέτη χωρίζεται σε υπό-μέρη, τα οποία αποκαλούνται πεπερασμένα στοιχεία. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο επιλύεται ανεξάρτητα και αργότερα, η συνολική λύση για το συνεχές επιτυγχάνεται συνδυάζοντας αυτά τα μεμονωμένα πεπερασμένα αποτελέσματα στοιχείων. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ανάλυση προβλημάτων με πολύπλοκες γεωμετρίας, αφού αυτή μπορεί να παρασταθεί χωρίς τροποποιήσεις.

Η ανάπτυξη γρήγορων υπολογιστικών συστημάτων έχει κάνει το εύρος εφαρμογής της FEM αρκετά μεγάλο. Η FEM έχει αποδειχθεί να είναι ένα ισχυρό, οικονομικό και αξιόπιστο εργαλείο για την ανάλυση κατεργασιών. Ένα μοντέλο της FEM μπορεί να προβλέψει πολλές μεταβλητές όπως η ταχύτητα, η τάση, η παραμόρφωση, η θερμοκρασία κ.α. . Η συνεχής εξέλιξη των κατεργασιών παραγωγής για βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και μείωση του κόστους κατασκευής οδήγησε στην παράλληλη εξέλιξη λογισμικών, που χρησιμοποιούν την FEM με τη μορφή εμπορικών υπολογιστικών πακέτων. Τα κύρια πλεονεκτήματα της FEM, σε σύγκριση με άλλες αριθμητικές μεθόδους και αναλυτικές τεχνικές, είναι τα εξής [18]:

- Αποφεύγεται η ανάγκη για υπόθεση ομοιογενούς παραμόρφωσης
- Παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες κατά την διαδικασία, όπως η τάση, η παραμόρφωση, η θερμοκρασία και η ταχύτητα
- Λαμβάνει υπόψη τις σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραμόρφωσης, ρυθμού παραμόρφωσης, θερμοκρασίας, μικροδομής και τάσης ροής
- Χρησιμοποιεί πολύ ρεαλιστικά μοντέλα για να αναπαραστήσει μια πραγματική διαδικασία λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους, όπως ο συντελεστής τριβής, και φαινόμενα, όπως η μεταφορά θερμότητας κτλ.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

- Οπτικοποιεί την διαδικασία παραμόρφωσης
- Αντικαθιστά την πειραματική φάση μερικώς ή πλήρως

Παρόλο που είναι εφικτή η μελέτη πολύπλοκων συστημάτων και φαινομένων με την FEM, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη κάποιες υποθέσεις, οι οποίες δεν αντιστοιχούν στην πραγματική κατεργασία. Το πόσο ρεαλιστικές είναι αυτές είναι ένα από τα κριτήρια που θα καθορίσει την ποιότητα αποτελεσμάτων. Για να είναι κανείς βέβαιος για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η επικύρωση αυτών μέσω της σύγκρισης τους με τα αποτελέσματα της πραγματικής κατεργασίας (validation) προτού διενεργηθεί περαιτέρω μελέτη. Η FEM είναι κατάλληλη και για την ανάλυση προβλημάτων σε μεγάλη βιομηχανική κλίμακα.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη εισαγωγή της μεθόδου των πεπερασμένων και των βημάτων της μεθόδου. Για περαιτέρω εμβάθυνση θα πρέπει να ανατρέξει κανείς στις πηγές οι οποίες αποτελούνται από καταξιωμένα βιβλία και έγκυρες δημοσιεύσεις [111,112,113,114,115,116,117,118,119,120].

3.1 Στάδια ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

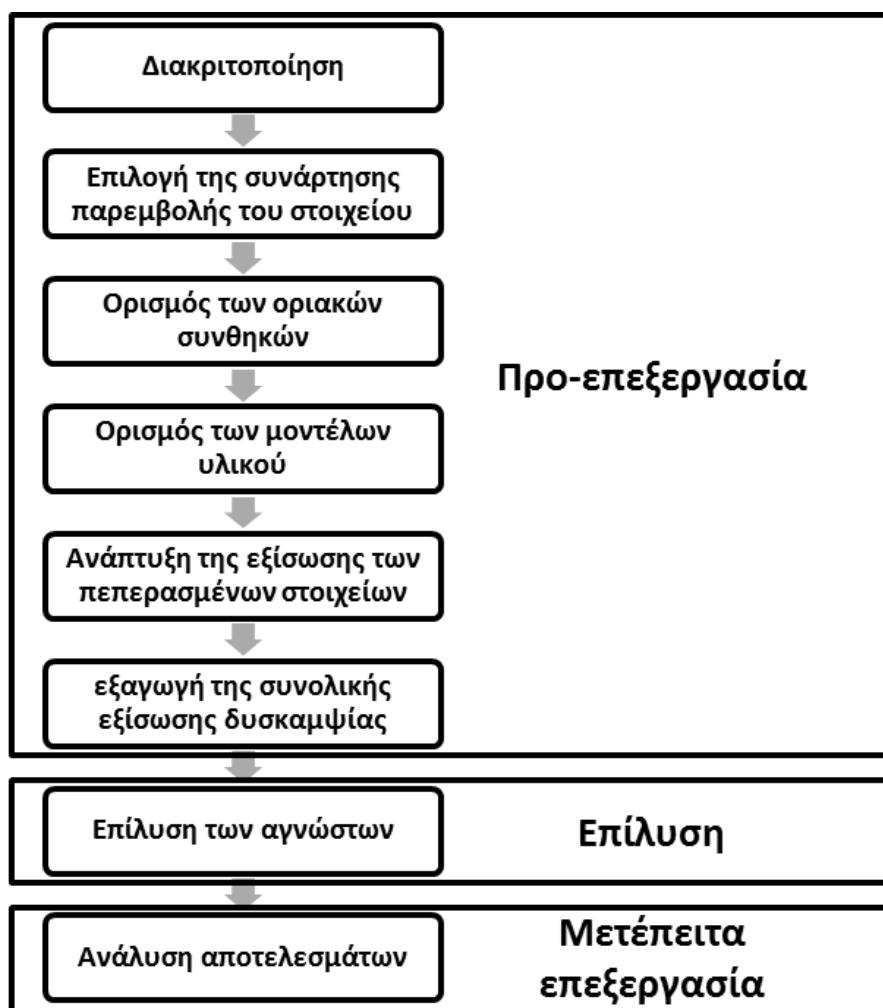
Με την ανάπτυξη της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται εφικτός ο ακριβέστερος προσδιορισμός των μεταβλητών που διέπουν τη ροή μετάλλων στις κατεργασίες μορφοποίησης, και περιλαμβάνουν γεωμετρικές οριοθετήσεις, σύνθετες συνθήκες τριβής και ρεαλιστικά ελαστο-πλαστικά μοντέλα τάσης-παραμόρφωσης. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται με τη FEM διαφέρουν ως προς:

- Τον τύπο της ανάλυσης (στατική, ημί-στατική, δυναμική)
- Το είδος διατύπωσης του προβλήματος (incremental, variational, flow)
- Την τεχνική επίλυσης του προβλήματος (Lagrangian, Eulerian, Arbitrary Lagrange-Euler)
- Τους καταστατικούς νόμους που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού (ελαστοπλαστικό, ελαστο-ιξωδοπλαστικό, τελείως πλαστικό, κ.α.)

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

- Το είδος της διακριτοποίησης (1-D,2-D,3-D)
- Το είδος της ανάλυσης (μηχανική, θερμική ή θερμομηχανική συζευγμένη)

Ανεξαρτήτως των διαφοροποιήσεων μεταξύ των μοντέλων η ανάλυση περνάει από κάποια βασικά στάδια (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1. Στάδια για την επίλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Τα πρώτα πέντε στάδια, τα οποία είναι:

1. η διακριτοποίηση (Discretization),
2. η επιλογή της συνάρτησης παρεμβολής του στοιχείου (Selection of the appropriate shape function),
3. ο ορισμός των οριακών συνθηκών και των μοντέλων υλικού (Boundary conditions and material models),

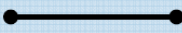

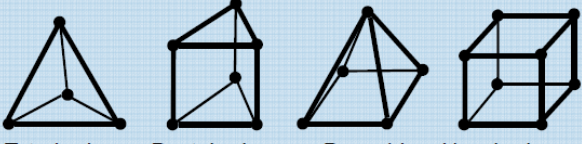
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

4. η ανάπτυξη της εξίσωσης των πεπερασμένων στοιχείων (Development of finite element equation) και
5. η εξαγωγή της συνολικής εξίσωσης δυσκαμψίας (Derive overall stiffness equation) ανήκουν στο στάδιο της προεπεξεργασίας (Pre-processing).

Στην συνέχεια ακολουθεί η επίλυση (Solve for the unknowns) και ακολουθεί το στάδιο της μετέπειτα επεξεργασίας (Post-processing), στο οποίο γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τα μοντέλα υλικών αναπτύσσονται στο Κεφάλαιο 3, ενώ τα υπόλοιπα στάδια επίλυσης με FEM στην συνέχεια του Κεφαλαίου 4.

3.2 Διακριτοποίηση

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, για την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τα σώματα, που αποτελούν το σύστημα διαχωρίζονται σε μικρότερα κομμάτια, τα οποία ονομάζονται στοιχεία (elements) και συνδέονται μεταξύ τους μέσω των κόμβων (nodes), οι οποίοι είναι και τα σημεία όπου πραγματοποιείται ο υπολογισμός. Οι τύποι στοιχείων, που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων συνοψίζονται στην Εικόνα 3.2.

<i>Dimension</i>	<i>Element type (load)</i>	<i>Geometry</i>
1D	Rod (strain)	
2D	Beam (strain, bending) Membrane (2-dim. strain) Shell (strain, bending)	
3D	Volume element (strain)	 Tetrahedron Pentahedron Pyramid Hexahedron

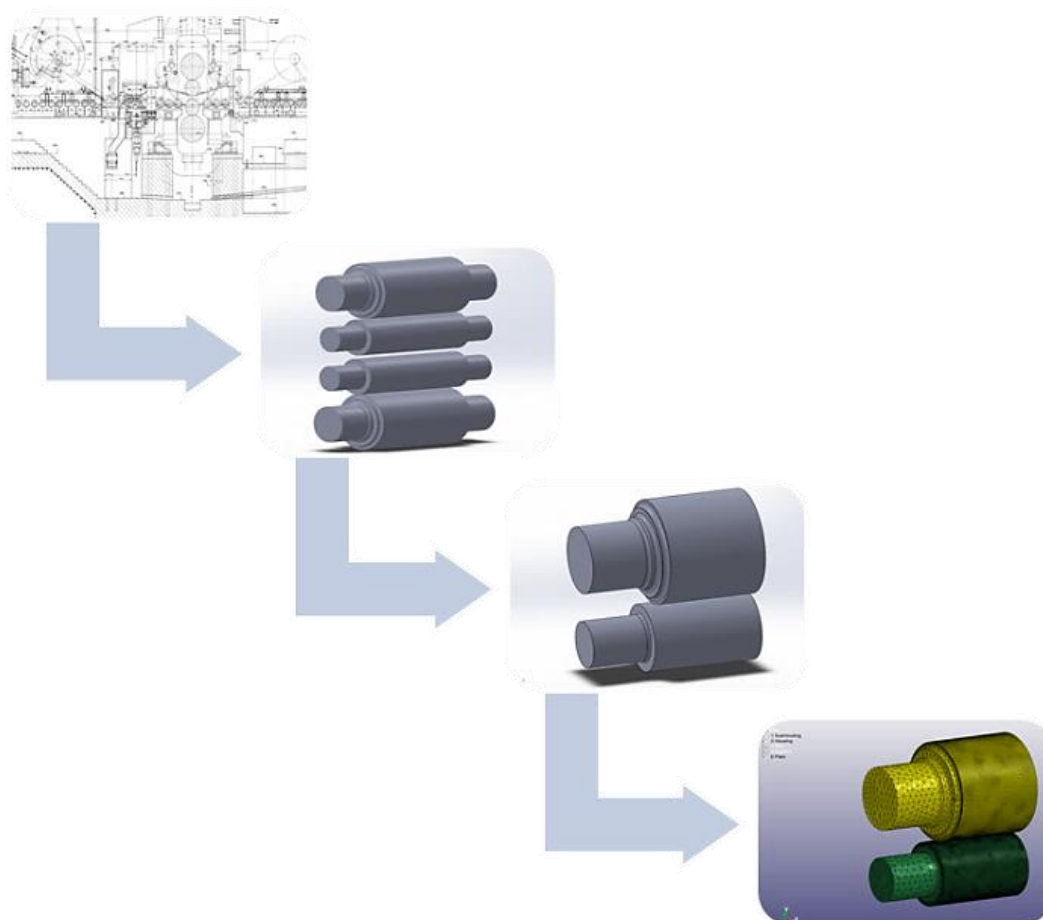
Εικόνα 3.2. Τύποι στοιχείων

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Τα βασικά στάδια της διακριτοποίησης είναι:

- 1) Πραγματική γεωμετρία σε σχεδιαστικό μοντέλο CAD
- 2) Εξαγωγή εξιδανικευμένου μοντέλου
- 3) Διακριτοποίηση

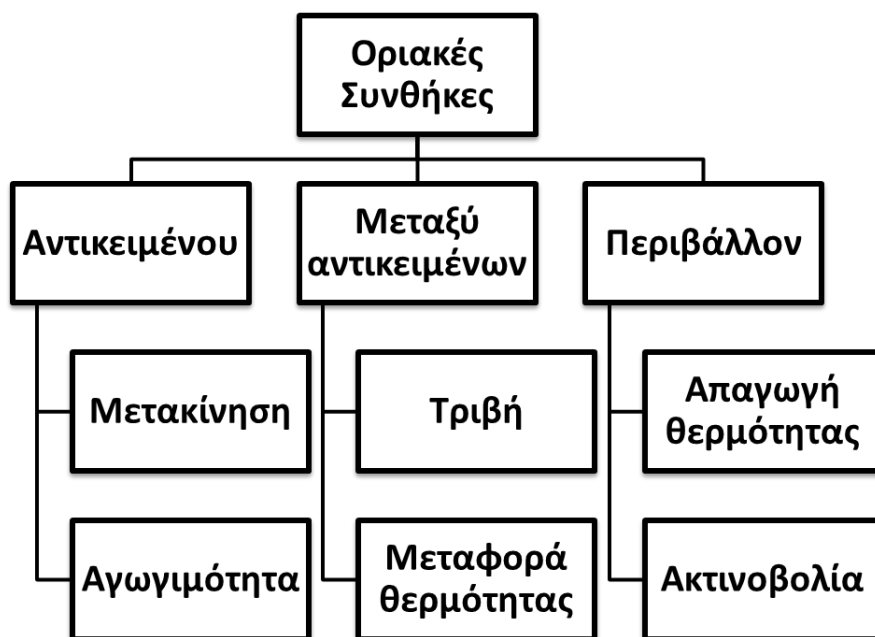
Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται η διαδικασία για την μοντελοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία. Ανάλογα με το ζητούμενο του προβλήματος αυτό θα πρέπει να απλοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο χάριν ευκολίας υπολογισμού. Για παράδειγμα, μικρές τρύπες, μικρές σχισμές, ραφές συγκολλήσεων, περιφερειακά εξαρτήματα, κ.α., θα πρέπει να αποφευχθούν όσο το δυνατόν περισσότερο. Η μοντελοποίηση του ενός τετάρτου του συνολικού προβλήματος λόγω διπλής συμμετρίας θα βοηθήσει περαιτέρω στην απλοποίηση του συστήματος χωρίς μείωση της ποιότητας του αποτελέσματος.



Εικόνα 3.3. Διαδικασία μοντελοποίησης με εφαρμογή σε θερμό έλαστρο

3.3 Ορισμός οριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες (Boundary conditions) είναι περιορισμοί απαραίτητοι για την επίλυση ενός προβλήματος οριακής τιμής. Ένα πρόβλημα οριακής τιμής μεταφέρεται ως μια διαφορική εξίσωση (ή σύστημα διαφορικών εξισώσεων) που πρέπει να επιλυθεί σε έναν τομέα, στο όριο του οποίου είναι γνωστό ένα σύνολο συνθηκών. Αντίθετα, στο «πρόβλημα της αρχικής τιμής» είναι γνωστές μόνο οι συνθήκες στο ένα άκρο του διαστήματος. Τα προβλήματα οριακής τιμής είναι εξαιρετικά σημαντικά, καθώς διαμορφώνουν ένα τεράστιο αριθμό φαινομένων και εφαρμογών, από τη στερεή μηχανική έως τη μεταφορά θερμότητας, από την μηχανική ρευστών έως την ακουστική. Ο ορισμός τους φυσικά είναι απαραίτητος σε κάθε πρόβλημα, που βασίζεται σε μια διαφορική εξίσωση που πρέπει να λυθεί στον χώρο. Σε μια θερμομηχανική προσομοίωση οι οριακές συνθήκες αφορούν τόσο στο μηχανικό μέρος όσο και στο θερμικό μέρος του προβλήματος. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι οριακών συνθηκών όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4. Τύποι οριακών συνθηκών

Ο πρώτος τύπος αφορά σε οριακές συνθήκες για κάθε σώμα. Με αυτές ορίζεται η κίνηση κάθε σώματος, όπως η ταχύτητα ή η επιτάχυνση, καθώς και οι βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο υπολογισμού. Κάθε ελεύθερο σώμα έχει συνολικά έξι (6) βαθμούς ελευθερίας (6 DOF), τρεις (3) βαθμούς ελευθερίας γραμμικής μετατόπισης (ένα για κάθε άξονα x, y, z) και

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

τρεις (3) βαθμούς ελευθερίας σε περιστροφική κίνηση (ένα για την περιστροφή γύρω από κάθε άξονα x, y, z). Ο ορισμός των αξόνων συμμετρίας είναι ένα παράδειγμα περιορισμού βαθμών ελευθερίας των κόμβων, που βρίσκονται ακριβώς πάνω στα επίπεδα συμμετρίας. Τέλος, πρέπει να οριστούν οι θερμικές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας εντός του σώματος ή αλλιώς η θερμική αγωγιμότητα.

Ο δεύτερος τύπος οριακών συνθηκών είναι αυτός, που ισχύει μεταξύ των διαφορετικών σωμάτων. Ως προς το μηχανικό μέρος, οι συνθήκες τριβής είναι αυτές, οι οποίες πρέπει να περιγραφούν κατά την επαφή δύο ή περισσότερων σωμάτων. Στην συνέχεια, οι συνθήκες μεταφοράς θερμότητας θα περιγράψουν την συναλλαγή θερμότητας μεταξύ των σωμάτων.

Ο τελευταίος τύπος είναι αυτός της αλληλεπίδρασης του σώματος με το περιβάλλον και αφορούν κυρίως σε θερμικά φαινόμενα και συγκεκριμένα στην απαγωγή της θερμότητας προς το περιβάλλον και αντιστρόφως.

3.4 Βασικές εξισώσεις της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Έστω ένα σώμα (Εικόνα 3.5), στο οποίο γίνεται η ανάλυση της παραμόρφωσης ως προς τον χρόνο. Σε σταθερό σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων, ξεκινάει από μια αρχική θέση X_α ($\alpha = 1, 2, 3$) και μετατοπίζεται σε νέα θέση x_i ($i = 1, 2, 3$). Για την προσομοίωση της μορφοποίησης η μέθοδος Lagrange είναι η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται. Έτσι, η παραμόρφωση μπορεί να γραφεί:

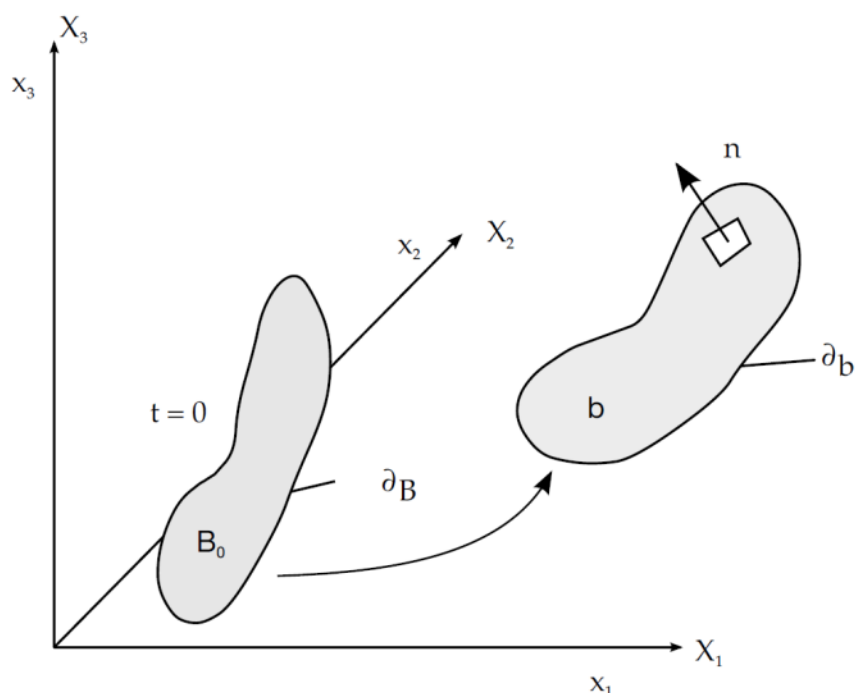
$$x_i = x_i(X_\alpha, t) \quad 4.1$$

Για χρόνο $t = 0$, οι αρχικές συνθήκες είναι:

$$x_i(X, 0) = X_i \quad 4.2$$

$$\dot{x}_i(X, 0) = V_i(X) \quad 4.3$$

Όπου V η αρχική ταχύτητα.



Εικόνα 3.5. Γραφική αναπαράσταση παραμόρφωσης σώματος σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων

Στόχος είναι η επίλυση της εξίσωσης της ορμής:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad 4.4$$

που ικανοποιεί την οριακή συνθήκη:

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t) \quad 4.5$$

Στο όριο ∂b_1 , την οριακή συνθήκη της μετατόπισης:

$$x_i(X_\alpha, t) = D_i(t) \quad 4.6$$

Στο όριο ∂b_2 , την οριακή συνθήκη της ασυνέχειας της επαφής:

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_i = 0 \quad 4.7$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Σε όλο το εσωτερικό όριο ∂b_3 όπου $x_i^+ = x_i^-$. Εδώ το σ είναι η τάση, ρ η πυκνότητα, f η δύναμη, που ασκείται στο σώμα και \ddot{x} η επιτάχυνση. Το κόμμα στο $\sigma_{ij,j}$ δηλώνει την παράγωγο συμμεταβλητών. Ο παράγοντας του τανυστή παραμόρφωσης, F_{ij} :

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad 4.8$$

Και το ρ_o είναι η πυκνότητα αναφοράς:

$$\rho V = \rho_o \quad 4.9$$

Όπου V ο όγκος. Η εξίσωση της ενέργειας:

$$\dot{E} = V s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p + q) \dot{V} \quad 4.10$$

ολοκληρώνεται στο χρόνο και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της εξίσωσης της κατάστασης και να παρακολουθεί το ισοζύγιο ενέργειας. Το $\dot{\epsilon}_{ij}$ είναι ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης, ενώ τα s_{ij} και p είναι οι αποκλίνουσες τάσεις και η πίεση αντίστοιχα:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - (p + q) \delta_{ij} \quad 4.11$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij} - q = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} - q \quad 4.12$$

Όπου q το ιξώδες του όγκου, δ_{ij} ο συντελεστής Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ εάν $i = j$ αλλιώς $\delta_{ij} = 0$). Σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$\int_V (\rho \ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - \rho f) \delta x_i dv + \int_{\partial b_1} (\sigma_{ij} n_j - t_i) \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds = 0 \quad 4.13$$

Όπου το δx_i ικανοποιεί την οριακή συνθήκη ∂b_2 και η ολοκλήρωση γίνεται στην τρέχουσα γεωμετρία. Με την εφαρμογή του θεωρήματος της απόκλισης (divergence theorem) γίνεται:

$$\int_v (\sigma_{ij} \delta x_i)_j dv = \int_{\partial b_1} \sigma_{ij} n_j \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds \quad 4.14$$

Και σημειώνοντας ότι:

$$(\sigma_{ij} \delta x_i)_j - \sigma_{ij} \delta x_i = \sigma_{ij} \delta x_{i,j} \quad 4.15$$

Τότε οδηγείται στην αδύναμη μορφή (weak form) της εξίσωσης ισορροπίας:

$$\delta \pi = \int_v \rho \ddot{x}_i \delta x_i dv + \int_v \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_v \rho f_i \delta x_i dv - \int_{\partial b_1} t_i \delta x_i ds = 0 \quad 4.16$$

που αποτελεί μια έκφανση της αρχής του εικονικού έργου (virtual work). Εάν αυτό εφαρμοστεί πάνω στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, που συνδέεται μέσω των κομβικών σημείων και αναλυθεί ως προς τον χρόνο, τότε:

$$x_i(X_\alpha, t) = x_i(X_\alpha, (\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^k N_j(\xi, \eta, \zeta) x_t^j(t) \quad 4.17$$

Όπου N_j είναι η συνάρτηση μορφής ή παρεμβολής του στοιχείου (shape function) στις παραμετρικές συντεταγμένες (ξ, η, ζ) , k είναι ο αριθμός των κομβικών στοιχείων που ορίζουν το στοιχείο και x_t^j οι κομβικές συντεταγμένες του κόμβου με αριθμό j και διεύθυνση i . Κάθε συνάρτηση μορφής έχει πεπερασμένη υποστήριξη και περιορίζεται στο στοιχείο, με το οποίο σχετίζονται οι κόμβοι και από εκεί βγαίνει και το όνομα της μεθόδου (μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων). Συνεπώς, η εξίσωση παρεμβολής του στοιχείου εξαρτάται μόνο από του κόμβους, που ανήκουν σε αυτό το στοιχείο.

Η εισαγωγή σε αυτό το σημείο ενός διανυσματικού χώρου με διαστάσεις $\mathbb{R}^{(\text{number of nodes})}$ με βάση τις καρτεσιανές συντεταγμένες $\{e_i^j\}_{i=1}^{(\text{number of nodes})}$ είναι πολύ χρήσιμη. Αφού το σώμα έχει διακριτοποιηθεί σε n στοιχεία, οι ολοκληρώσεις της εξίσωσης 4.16 μπορούν να χωριστούν λαμβάνοντας το χωρικό όρο ολοκλήρωσης, έναν για κάθε στοιχείο:

$$\delta\pi = \sum_{m=1}^n \delta\pi_m = 0 \quad 4.18$$

Επομένως, η συνεισφορά κάθε στοιχείου είναι:

$$\begin{aligned} \delta\pi_m = & \int_{v_m} \rho \dot{x}_i \delta x_i dv + \int_{v_m} \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_{v_m} \rho f_i \delta x_i dv \\ & - \int_{\partial b_1 \cap \partial v_m} t_i \delta x_i ds \end{aligned} \quad 4.19$$

Επανατοποθετώντας την συνεισφορά του κάθε στοιχείου στο σύστημα των εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho \dot{x}_i (e \otimes v^m) dv + \int_{v_m} \sigma_{ij}^m (e \otimes v_{,j}^m) dv - \int_{v_m} \rho f_i (e \otimes v^m) dv \right. \\ \left. - \int_{\partial b_1 \cap \partial v_m} t_i (e \otimes v^m) ds \right\} = 0 \end{aligned} \quad 4.20$$

όπου

$$v^m = \sum_{i=1}^k N_i e'_{n_m(i)} \quad 4.21$$

Όπου $n_m(i)$ είναι ο αριθμός κόμβου στο χώρο.

Εφαρμόζοντας την προσέγγιση της εξίσωσης 4.17 στις εξαρτημένες μεταβλητές της εξίσωσης 4.20 προκύπτει:

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho N_m^T N_m a dv + \int_{v_m} B_m^T \sigma dv - \int_{v_m} \rho N_m^T b dv - \int_{\partial b_1} N_m^T b ds \right\} = 0 \quad 4.22$$

Όπου

σ το διάνυσμα τάσης:

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

$$\sigma^T = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad 4.23$$

a είναι ο ταυστής των κομβικών επιταχύνσεων:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} a_x^1 \\ a_x^2 \\ \vdots \\ a_y^k \\ a_z^k \end{bmatrix} = Na \quad 4.24$$

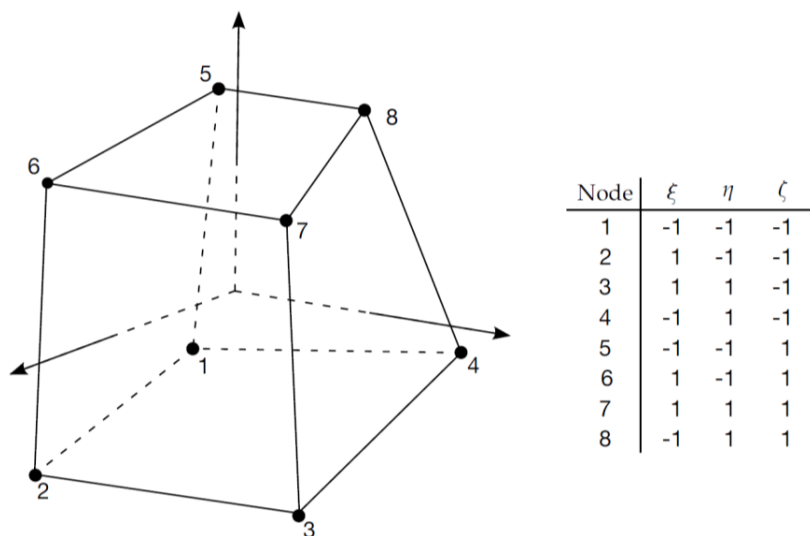
b είναι ο ταυστής δύναμης-φορτίου του σώματος και t είναι το εφαρμοζόμενο ελκτικό φορτίο:

$$b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, \quad t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad 4.25$$

Ας υποθεθεί ένα πλέγμα που αποτελείται από 8-κομβικά εξάεδρα. Τότε η συνάρτηση παρεμβολής του στοιχείου ορίζεται από αυτούς τους 8 κόμβους ως:

$$N_j = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_j)(1 + \eta \eta_j)(1 + \zeta \zeta_j) \quad 4.26$$

Όπου τα ξ_j , η_j και ζ_j παίρνουν τιμές $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ σύμφωνα με την Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6. 8-κομβικό εξάεδρο στερεό στοιχείο

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Ο ταυστής N ορθογωνικής μορφής 3×24 και δίνεται από:

$$N(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & \dots & \varphi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \varphi_8 \end{bmatrix} \quad 4.27$$

Το B είναι στην εξίσωση 4.22 είναι ο 6×24 ταυστής παραμόρφωσης-μετατόπισης:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad 4.28$$

Οι τιμές που παίρνουν οι μεταβλητές υπολογίζονται στους κόμβους και χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση αυτών σε μη κομβικά σημεία εντός του στοιχείου. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά και χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία είναι αυτή των στερεών στοιχείων πλήρους ολοκλήρωσης (Fully integrated solid element), όπου η πίεση είναι σταθερή σε όλο το στοιχείο και η παραμόρφωση υπολογίζεται από:

$$\Delta \varepsilon_{xx} = \frac{\partial \Delta u}{\partial x^{n+1/2}} + \varphi, \quad \Delta \varepsilon_{xy} = \frac{\frac{\partial \Delta v}{\partial x^{n+1/2}} + \frac{\partial \Delta u}{\partial y^{n+1/2}}}{2} \quad 4.29$$

$$\Delta \varepsilon_{yy} = \frac{\partial \Delta u}{\partial y^{n+1/2}} + \varphi, \quad \Delta \varepsilon_{yz} = \frac{\frac{\partial \Delta w}{\partial y^{n+1/2}} + \frac{\partial \Delta v}{\partial z^{n+1/2}}}{2} \quad 4.30$$

$$\Delta \varepsilon_{zz} = \frac{\partial \Delta w}{\partial z^{n+1/2}} + \varphi, \quad \Delta \varepsilon_{zx} = \frac{\frac{\partial \Delta u}{\partial z^{n+1/2}} + \frac{\partial \Delta w}{\partial x^{n+1/2}}}{2} \quad 4.31$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Όπου το φ τροποποιεί τις ορθές παραμορφώσεις, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το συνολικό βήμα παραμόρφωσης του όγκου σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης είναι πανομοιότυπο:

$$\varphi = \Delta \varepsilon_v^{n+1/2} - \frac{\left(\frac{\partial \Delta u}{\partial x^{n+1/2}} + \frac{\partial \Delta v}{\partial y^{n+1/2}} + \frac{\partial \Delta w}{\partial z^{n+1/2}} \right) dv^{n+1/2}}{2} \quad 4.32$$

Όπου Δu , Δv και Δw είναι τα βήματα παραμόρφωσης στις διευθύνσεις x , y και z αντίστοιχα και:

$$x^{n+1/2} = \frac{(x^n + x^{n+1})}{2} \quad 4.33$$

$$y^{n+1/2} = \frac{(y^n + y^{n+1})}{2} \quad 4.34$$

$$z^{n+1/2} = \frac{(z^n + z^{n+1})}{2} \quad 4.35$$

Για να ικανοποιηθεί η συνθήκη ότι η περιστροφή ενός σώματος δεν δημιουργεί παραμόρφωση (π.χ. η περιστροφή των ράουλων), η γεωμετρία πρέπει να αξιολογείται στο μέσω κάθε χρονικού βήματος και όχι στο τέλος του όπως είναι η προεπιλεγμένη ρύθμιση στις συμβατικές επιλύσεις.

Πειραματικό Μέρος

Προσομοίωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Σύγκριση Implicit και Explicit μεθόδων για την προσομοίωση της έλασης

Κατά την αριθμητική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η διακριτοποίηση του χρόνου είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης. Μια προσέγγιση, η οποία είναι άνευ όρων σταθερή στην γραμμική ανάλυση, λόγω του εγγενούς ελέγχου της ισορροπίας μετά από επαναλήψεις, είναι η προφανής επιλογή για ένα ημι-στατικό πρόβλημα, όπως η έλαση μετάλλων. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι δύσκολη σε σύγκλιση με τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών και τις περίπλοκες συνθήκες επαφής. Επομένως, συχνά υιοθετείται μια μη επαναληπτική μέθοδος προκειμένου να επιτευχθεί υπολογιστική ακρίβεια μέσω πολύ μικρών χρονικών βημάτων. Στην παρούσα εργασία τα ANSYS™ (έμμεση μέθοδος – Implicit method) και LS-DYNA™ (άμεση μέθοδος – Explicit method) συγκρίνονται μεταξύ τους.

4.1 Εισαγωγή

Η αριθμητική ανάλυση των διαδικασιών μορφοποίησης είναι ένα δημοφιλές υπολογιστικό εργαλείο τόσο για την ανάπτυξη νέων προϊόντων όσο και για βιομηχανικό σχεδιασμό. Διάφορα λογισμικά για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) είναι εμπορικά διαθέσιμα και χρησιμοποιούνται ευρέως από Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα για την προσομοίωση των κατεργασιών μορφοποίησης. Η πλειοψηφία αυτών των λογισμικών βασίζεται είτε στη στατική, έμμεση μέθοδο, (implicit method) είτε στη δυναμική, άμεση μέθοδο (explicit method). Η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων κάθε αλγορίθμου είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια, η αποδοτικότητα και η στιβαρότητα της αριθμητικής προσομοίωσης στην κατεργασία επίπεδης έλασης.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Η μορφοποίηση θεωρείται «ημι-στατική» κατεργασία και σε αυτή την περίπτωση η στατική, έμμεση μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί καλά [7,8,9]. Η έμμεση μέθοδος επιτρέπει μεγαλύτερα χρονικά βήματα (time steps), καθώς ένα σύνολο εξισώσεων πρέπει να επιλυθεί επανειλημμένα έως ότου ικανοποιηθεί ένα κριτήριο σύγκλισης για κάθε χρονικό βήμα, κάτι το οποίο επιτυγχάνει μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση της κατεργασίας εν γένει. Ωστόσο, δεν ευνοείται από προβλήματα, που χαρακτηρίζονται από έντονες μη γραμμικότητες και ασυνέχειες, όπως οι ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες επαφής, η τριβή ολίσθησης, οι τοπικές αστάθειες και τα, εξαρτώμενα από τον χρόνο (ρυθμό παραμόρφωσης), μη γραμμικά (ελαστο-πλαστικά) υλικά. Ένα πολύπλοκο μοντέλο οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις μνήμης από τον υπολογιστή και σε υψηλότερο υπολογιστικό κόστος και ανάγκη για μεγάλη υπολογιστική ισχύ, με αποτέλεσμα τον σημαντικά αυξημένο χρόνο υπολογισμού. Δυσκολίες σύγκλισης μπορεί να προκύψουν σε τέτοιο βαθμό, ώστε να απαιτούνται πολύ μικρά χρονικά βήματα και περισσότερες επαναλήψεις ανά βήμα και σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο ακόμα και να επιτευχθεί η επίλυση [10,11,12,20,21,22,23,13,14].

Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, εισήχθησαν οι δυναμικές άμεσες τεχνικές. Στην άμεση μέθοδο, χρησιμοποιείται η διαγώνιος της μήτρας της μάζας (Mass Matrix) για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης με τόσο μικρό χρονικό βήμα, ώστε να εξασφαλίζεται μια σταθερή λύση [14,15,16]. Σε αντίθεση με την έμμεση επίλυση, η αύξηση του χρονικού βήματος επηρεάζεται μόνο από την διακριτοποίηση (meshing) και τις ιδιότητες του υλικού και όχι από πολύπλοκες συνθήκες επαφής και μη γραμμικότητες. Έτσι, δεν υπάρχει σημαντική αύξηση της ανάγκης για επεξεργαστική ισχύ ανά υπολογιστικό βήμα όσο η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται. Παρόλα αυτά, η σταθερότητα επιτυγχάνεται μόνο όταν το μέγιστο χρονικό βήμα είναι μικρότερο από μια κρίσιμη ελάχιστη τιμή χρόνου μετάβασης, που χρειάζεται ένα κύμα παραμόρφωσης για να διασχίσει οποιοδήποτε στοιχείο στο πλέγμα. Στη μορφοποίηση, το χρονικό βήμα μπορεί να γίνει τόσο μικρό σε σύγκριση με το χρόνο της διαδικασίας, που μπορεί να είναι μη ρεαλιστικό για την εκτέλεση της ανάλυσης [13,14,16].

Διάφοροι ερευνητές προσπάθησαν να αποκομίσουν οφέλη και από τις δύο μεθόδους χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό για να λύσουν το πρόβλημα [121,122,123]. Συγκρίσεις

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

των έμμεσων και άμεσων μεθόδων σε γραμμικά και μη γραμμικά προβλήματα έχουν εκτενώς αναφερθεί στη βιβλιογραφία [7,9,10,14,121,124,125,126,127,128]. Οι Sun et al. [8] έδειξαν ότι για τα γρήγορα γραμμικά προβλήματα επαφής το υπολογιστικό κόστος της άμεσης μεθόδου είναι πολύ λιγότερο σε σύγκριση με την έμμεση μέθοδο. Αντίθετα, η έμμεση μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική για αργά προβλήματα γραμμικής επαφής, καθώς στην άμεση μέθοδο, ο αριθμητικός θόρυβος καθίσταται πιο σημαντικός και επηρεάζει το αποτέλεσμα. Οι Soltani et al. [129] συνέκριναν τις δύο μεθόδους στη διαδικασία σφυρηλάτησης. Η κύρια διαφορά οφειλόταν στον μεγάλο χρόνο υπολογισμού για επίλυση των συστημάτων εξισώσεων στην έμμεση μέθοδο και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η άμεση μέθοδος είναι καλύτερη μόνο λόγω του υπολογιστικού κόστους και όχι λόγω της ακρίβειας, καθώς τα αποτελέσματα είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Οι Chen et al. [130] συνέκριναν τις δύο μεθόδους για τη μορφοποίηση μεταλλικής πλάκας καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η δυναμική, άμεση μέθοδος είναι σε κάθε περίπτωση ανώτερη από την στατική, έμμεση μέθοδο. Οι Pauskar et al. [13] ανακάλυψαν ότι για τη κατεργασία της έλασης δακτυλίων, τόσο η ακρίβεια όσο και η χρονική αποτελεσματικότητα βελτιώθηκαν με την άμεση δυναμική μέθοδο. Ο συγγραφέας, ωστόσο, επισημαίνει ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την έμμεση μέθοδο για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων. Αν και η έμμεση μέθοδος ήταν προτιμητέα για μικρά δισδιάστατα (2D) προβλήματα, αντιμετώπισε δυσκολίες σύγκλισης σε πιο περίπλοκα τρισδιάστατα (3D) μοντέλα, λόγω μεγάλης παραμόρφωσης των στοιχείων, εξαιρετικά μη γραμμικής πλαστικότητας και επαφής μεταξύ επιφανειών, όπως φαίνεται από τους Rebelo et al. [131]. Ο άμεσος επιλύτης ήταν πιο ισχυρός σε τέτοια σύνθετα μοντέλα. Ωστόσο, οι Lindgren et al. [24] έδειξε ότι για την επίπεδη έλαση, ακόμη και για τα 2D προβλήματα, η άμεση μέθοδος μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική σε ορισμένες περιπτώσεις και ευκολότερη στην απόκτηση αποτελεσμάτων χωρίς προβλήματα σύγκλισης. Παρ' όλα αυτά, η ίδια ακρίβεια ελήφθη τόσο από την έμμεση όσο και από την άμεση μέθοδο. Οι μέθοδοι δεν συγκρίθηκαν σε πιο σύνθετα προβλήματα 3D προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα και η στιβαρότητα σε πιο ρεαλιστικά μοντέλα.

Στο Κεφάλαιο 5 δίνεται προσοχή στη σύγκριση των δύο μεθόδων, που εφαρμόζονται στην τρισδιάστατη (3D) ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων της διαδικασίας επίπεδης έλασης. Ο

στόχος είναι να εκτιμηθούν οι επιδόσεις των δύο μεθόδων και να καθοριστεί ποια είναι καταλληλότερη για μελλοντική ανάλυση.

4.2 Χρονική ολοκλήρωση στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων - Time integration in Finite Element Method (FEM)

Στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) η ανάλυση ενός μη γραμμικού ημι-στατικού συστήματος διέπεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων. Η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης κίνησης μπορεί να αναπαρασταθεί στην ακόλουθη μορφή [118,111,132]:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} - \{I\} \quad 5.1$$

Όπου $[m]$ ο τανυστής της μάζας, $[c]$ ο τανυστής της απόσβεσης, $[k]$ ο τανυστής της ακαμψίας, x η μετατόπιση, $\{F\}$ το διάνυσμα της επιβαλλόμενης δύναμης και $\{I\}$ το διάνυσμα της εσωτερικής δύναμης. Η ύπαρξη υλικών, γεωμετρικών και μη-γραμμικοτήτων επαφής, προκαλούν τις παραμένουσες δυνάμεις, $\{F\} - \{I\}$, να συμπεριφέρονται ομοίως με μη γραμμικό τρόπο.

4.2.1 Έμμεση ολοκλήρωση

Στην έμμεση μέθοδο το μοντέλο ενημερώνεται από το χρόνο t σε $t + \Delta t$ με βάση τις πληροφορίες κατά τη στιγμή $t + \Delta t$. Ένα μεγάλο σύστημα εξισώσεων επιλύεται επαναληπτικά σε κάθε χρονικό βήμα για να ληφθούν οι κομβικές μετατοπίσεις χρησιμοποιώντας την τεχνική Newton-Raphson. Η σύγκλιση μπορεί να επιτευχθεί όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη για την μέγιστη υπολοιπόμενη δύναμη [13] [132,133].

$$\{\Delta u_{i+1}^{t+\Delta t}\} = [K(\varepsilon)_{i+1}^{t+\Delta t}]^{-1} \cdot (\{F\} - \{I\}) \quad 5.2$$

$$\{u_{i+1}^{t+\Delta t}\} = \{u_i^{t+\Delta t}\} + \{\Delta u_{i+1}^{t+\Delta t}\} \quad 5.3$$

όπου $\{\Delta u\}$ είναι το διάνυσμα του βήματος της μετατόπισης, ο δείκτης $t + \Delta t$ είναι ο χρόνος, στον οποίο λύνονται οι εξισώσεις και οι δείκτες i και $i + 1$ δείχνουν την τρέχουσα και την επόμενη επανάληψη αντιστοίχως. Ο τανυστής της ακαμψίας $[k]$ ορίζεται από έναν τανυστή,

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

ο οποίος με την σειρά του ορίζεται από μια πρόβλεψη μετατόπισης, $\{\epsilon\}$, βασισμένη στην βέλτιστη μέχρι στιγμής μετατόπιση. Η αντιστροφή του μητρώου ακαμψίας είναι πολύ χρονοβόρα, ειδικά όταν χρειάζονται πολλές επαναλήψεις ή μικρά βήματα για να επιτευχθεί η σύγκλιση.

4.2.2 Άμεση ολοκλήρωση

Στη άμεση μέθοδο οι εξισώσεις λύνονται για χρόνο $t + \Delta t$ με βάση την πληροφορία κατά το χρόνο t και μεταβαίνουν στη νέα κινηματική κατάσταση χωρίς επαναλήψεις. Η άμεση διατύπωση βασίζεται στη θεμελιώδη εξίσωση δυναμικής, όπου ο φορέας επιτάχυνσης $\{\ddot{u}_t\}$ στην αρχή του χρονικού βήματος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση [8] [122] [124] [133] [134]:

$$\{\ddot{u}_t\} = [M]^{-1} \cdot (\{F\} - \{I\}) \quad 5.4$$

Ο τανυστής της μάζας $[M]$ είναι διαγώνιος και αρκετά απλούστερος να αντιστραφεί σε σύγκριση με τον τανυστή της ακαμψίας στην έμμεση μέθοδο. Η επιτάχυνση $\{\ddot{u}_t\}$ και η ταχύτητα $\{\dot{u}\}$ θεωρούνται σταθερές για ένα πολύ μικρό χρονικό βήμα και ολοκληρώνεται για τον υπολογισμό της αλλαγής ταχύτητας και της μετατόπισης.

$$\{\dot{u}\}_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \{\dot{u}\}_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left(\frac{\Delta t_{t+\Delta t} + \Delta t_t}{2}\right) \cdot \{\ddot{u}\}_t \quad 5.5$$

$$\{u\}_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \{u\}_t + \Delta t_{t+\Delta t} \cdot \{\dot{u}\}_{t+\frac{\Delta t}{2}} \quad 5.6$$

Παρόλο που κάθε χρονικό βήμα είναι εύκολο στην επίλυση, η μέθοδος είναι σταθερή μόνο όταν πληρείται η συνθήκη σταθερότητας Courant-Friedrich-Lewy:

$$\Delta t \leq \Delta t_{\min} = \min\left(\pi \frac{L}{C}\right) \quad 5.7$$

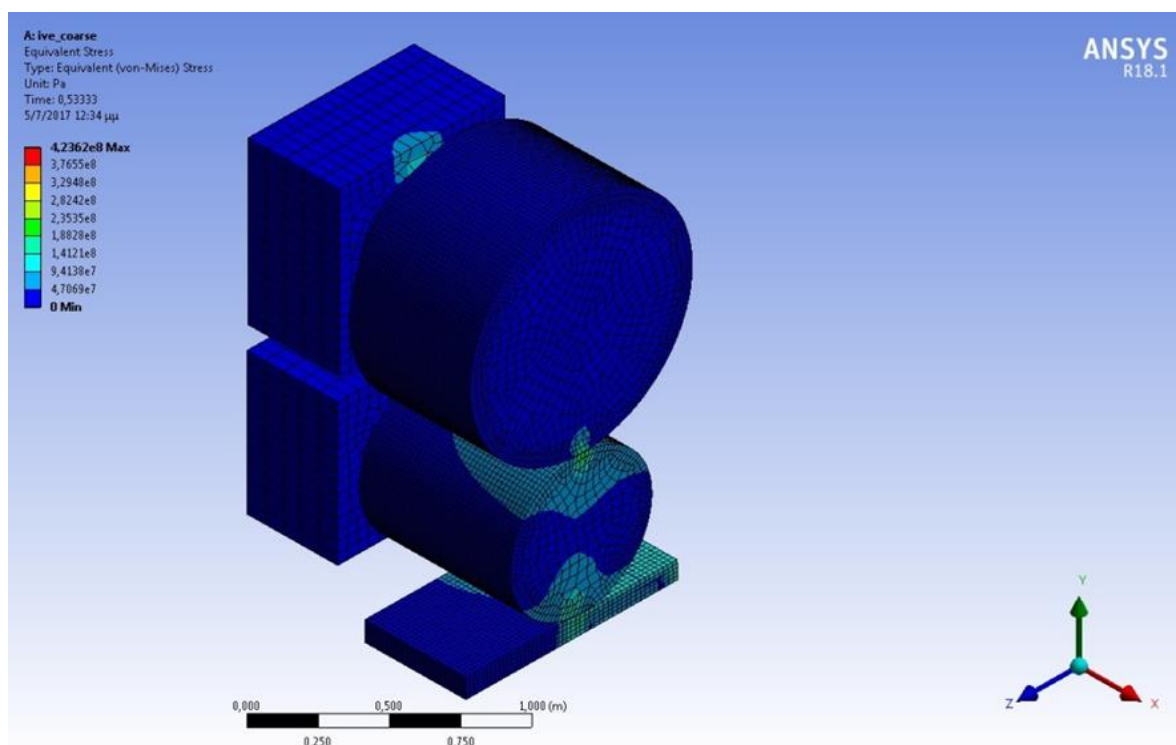
$$C = \sqrt{\frac{E}{(1 - \nu^2)\rho}} \quad 5.8$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Όπου L είναι η χαρακτηριστική διάσταση του στοιχείου, C η στιγμιαία ταχύτητα κύματος, ρ η πυκνότητα, E το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson. Το χαρακτηριστικό χρονικό βήμα είναι πολύ μικρό στην άμεση μέθοδο. Σε περίπτωση, που η πραγματική κατεργασία απαιτεί πολύ χρόνο, τότε ο χρόνος επίλυσης μπορεί να είναι μη ρεαλιστικός (π.χ. εβδομάδες, μήνες, κλπ.) και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

4.3 Διαδικασία της προσομοίωσης

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων, στη προσομοίωση της κατεργασίας της έλασης αλουμινίου, μοντελοποιήθηκε ένα έλαστρο 4 ραούλων (2 εργασίας και 2 αντιστοίριξης) σε ANSYS™ και LS-DYNA™. Η Εικόνα 4.1 δείχνει ένα τυπικό στιγμιότυπο των τάσεων κατά von Mises κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε ένας επεξεργαστής διπλού πυρήνα 3,2 GHz με 32 GB RAM.



Εικόνα 4.1. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της κατεργασίας έλασης.

Το σύστημα αποτελείται από το ράουλο εργασίας, που έρχεται σε επαφή με την πλάκα. Το ράουλο αντιστήριξης παρέχει την απαιτούμενη ακαμψία για την αποφυγή της υπερβολικής κάμψης υπό την επίδραση του φορτίου εργασίας. Επιπλέον, οι εδράσεις σε κάθε ράουλο

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

παρέχουν τον απαραίτητο περιορισμό κίνησης για να προβλέπεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η επίδραση της κάμψης των κυλίνδρων. Οι βασικές διαστάσεις του υπό μελέτη συστήματος συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Διαστάσεις συστήματος μελέτης για την προσομοίωση της έλασης

Ράουλο εργασίας	Ράουλο εργασίας	Ράουλο Αντιστήριξης	Ράουλο Αντιστήριξης	Πλάκα	Πλάκα	Πλάκα
Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)
700	750	1100	600	1000	500	100

Για την ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης, αλλά χωρίς αρνητική επίδραση στην ακρίβεια και την ποιότητα των αποτελεσμάτων, μόνο ένα τέταρτο του πλήρους συστήματος προσομοιώνεται με την τοποθέτηση δύο επιπέδων συμμετρίας. Στην εγκυρότητα των υπολογισθέντων αποτελεσμάτων συνηγορεί η επιλογή των κατάλληλων οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες συμμετρίας αναιρούν την κίνηση του αντίστοιχου σώματος κατά μήκος του φυσιολογικού προς τον εν λόγω επίπεδο φορέα.

Ίδιες ιδιότητες και μοντέλα υλικών χρησιμοποιήθηκαν και για τις δύο μεθόδους ανάλυσης (Implicit και Explicit). Ένα τυπικό κράμα αλουμινίου σειράς 6xxx χρησιμοποιήθηκε για την πλάκα και ένας τυπικός επιφανειακά σκληρυνόμενος χάλυβας για τα ράουλα. Οι ιδιότητες των υλικών, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 εξετάστηκαν σε αυξημένη θερμοκρασία και σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας [135]. Για το μοντέλο έγινε επιλογή ενός ισότροπου ελαστοπλαστικού υλικού με δυνατότητα εργοσκλήρυνσης για την πλάκα και ένα ισότροπο ελαστικό για τα ράουλα.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Πίνακας 4.2. Ιδιότητες υλικών για την προσομοίωση

	Πυκνότητα (kg/m ³)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson	Όριο διαρροής (MPa)
Αλουμίνιο 6061	2770	71	0.33	80
Εργαλειοχάλυβας	7850	200	0.3	1650

Μία από τις κύριες παραμέτρους, που εξετάζονται είναι η διακριτοποίηση. Αυτή υπολογίζεται από τον αριθμό των κόμβων σε κάθε μοντέλο. Τέσσερις διαφορετικές πυκνότητες πλεγμάτων χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Η πλεγματοποίηση γίνεται αυτόματα από το εκάστοτε λογισμικό και έτσι προκύπτουν μικρές διαφοροποιήσεις στον αριθμό κόμβων της κάθε κατηγορίας πλεγματοποίησης. Ωστόσο, αυτές οι διαφοροποιήσεις δεν επηρεάζουν την μελέτη καθώς οι κατηγορίες πλεγματοποίησης χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό του διαγράμματος συσχετισμού του χρόνου επίλυσης με το μέγεθος του μοντέλου (όπως παρουσιάζεται παρακάτω στο υποκεφάλαιο 4.4.2) από το οποίο προκύψαν τα συμπεράσματα.

Πίνακας 4.3. Πυκνότητες πλέγματος που μετρούνται σε αριθμούς κόμβων

Πλεγματοποίηση	Μέθοδος Implicit	Μέθοδος Explicit
Πολύ χονδρομερής	12700	12750
Χονδρομερής	63000	71500
Μέτρια	83000	99300
Λεπτομερής	140000	145000

Για τον συντελεστή τριβής στις επαφές μεταξύ ράουλου αντιστήριξης και εργασίας, καθώς και μεταξύ ράουλου εργασίας και πλάκας επιλέχθηκε μια ονομαστική τιμή 0,2 από την βιβλιογραφία [49,50].

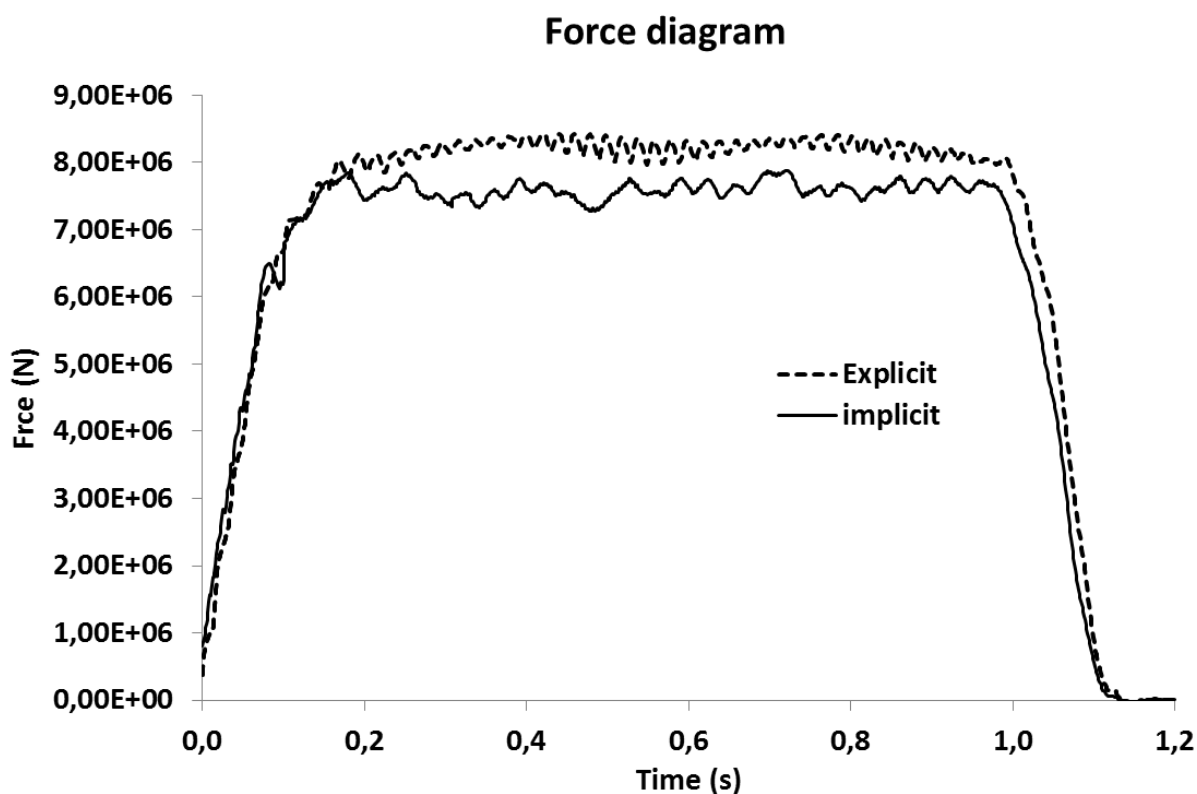
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν πειράματα προσομοίωσης με διαφορετικούς συντελεστές τριβής 0,2, 0,4 και 0,6 για να εκτιμηθεί η επίδραση των συνθηκών επαφής στον συνολικό χρόνο υπολογισμού.

4.4 Αποτελέσματα σύγκρισης των μεθόδων χρονικής ολοκλήρωσης

4.4.1 Υπολογισμός φορτίου έλασης και σύγκλιση.

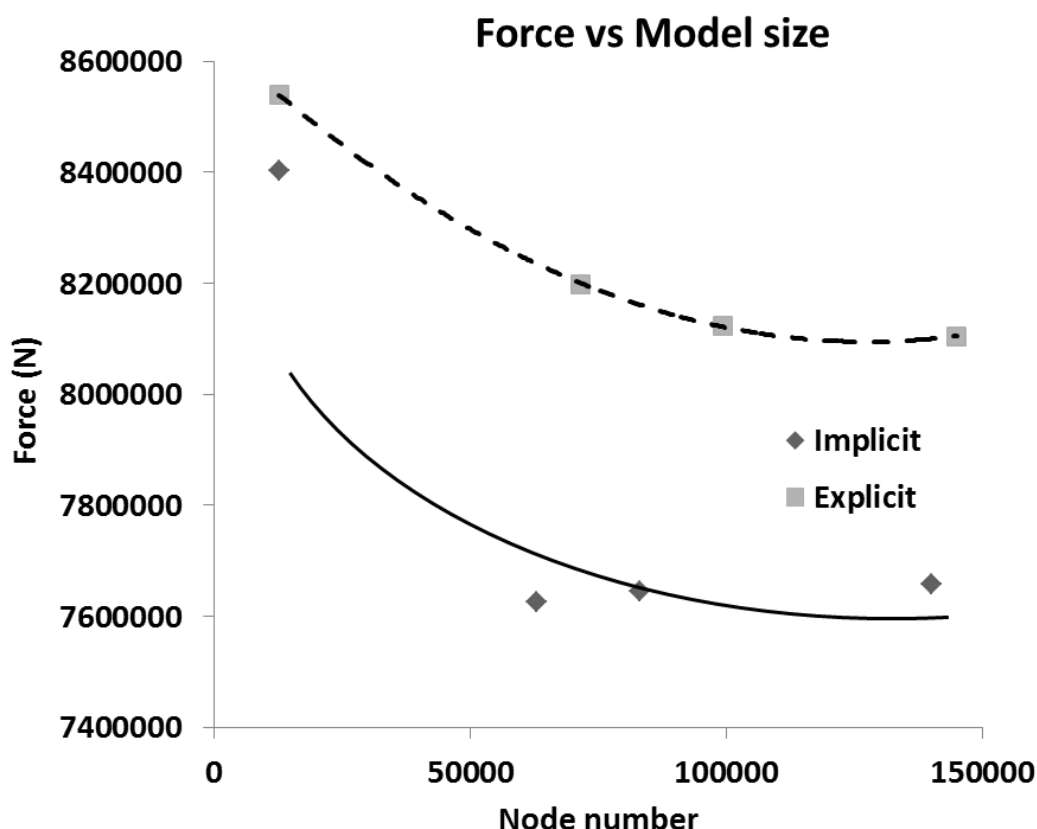
Η δύναμη, υπολογιζόμενη και με τις δύο μεθόδους, παρουσιάζει μικρή απόκλιση $\sim 0,5$ MN στα 8 MN όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2 [4]. Είναι εμφανές το γεγονός ότι το δυναμικό στοιχείο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση της έλασης και ως εκ τούτου, η προσεκτική επιλογή των οριακών και αρχικών συνθηκών, καθώς και η ενδελεχής αντιπαραβολή τους με πραγματικά δεδομένα και επιβεβαίωση των δεδομένων εισόδου στο μοντέλο είναι υψίστης σημασίας, προκειμένου να επιτευχθούν αποτελέσματα υψηλής ποιότητας.



Εικόνα 4.2. Διάγραμμα δυνάμεων που προκύπτουν από την άμεση και έμμεση ανάλυση για τα μοντέλα με μέτρια πυκνότητα πλέγματος.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

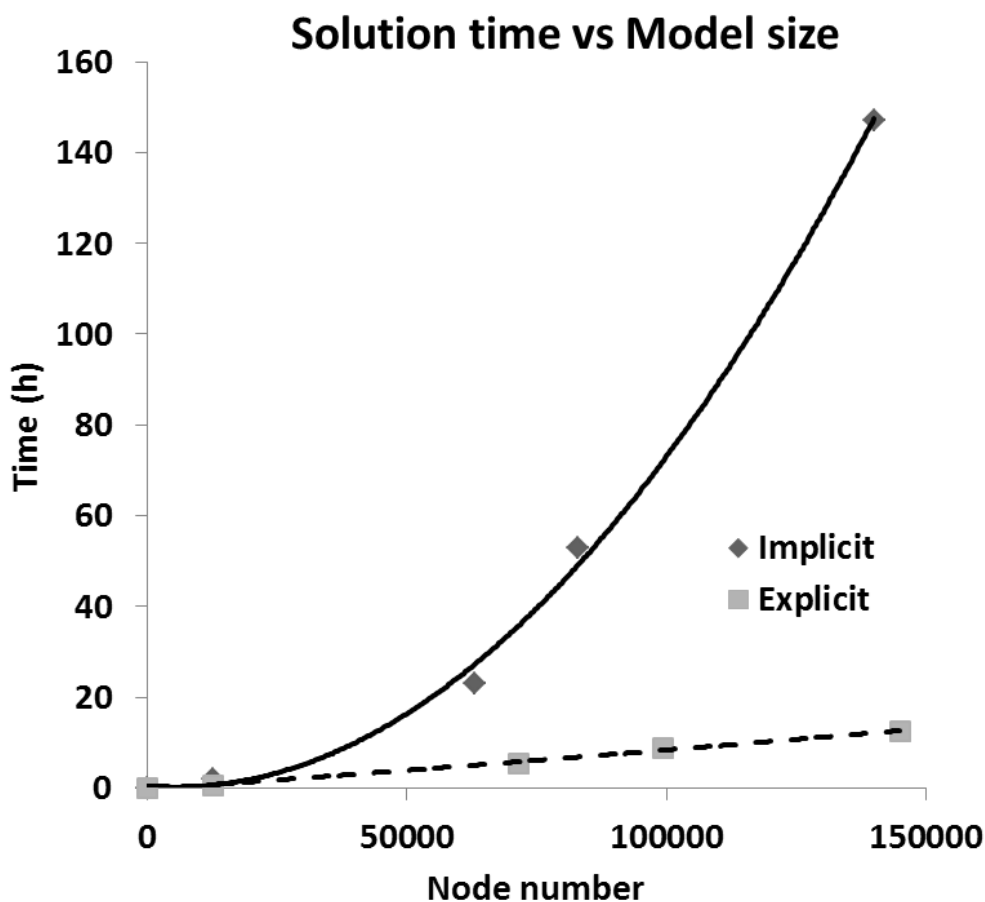
Απαιτείται ένα ελάχιστο μέγεθος μοντέλου, ώστε η δύναμη να συγκλίνει σε μια λύση. Τα μοντέλα με αριθμό κόμβων μεγαλύτερο από 70.000 είναι επαρκή για ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3 [4]. Η έμμεση μέθοδος επηρεάζεται περισσότερο από το μέγεθος του μοντέλου, ειδικότερα στα πολύ χονδροειδή μοντέλα, όπου η τιμή δύναμης φτάνει να έχει απόκλιση ακόμα και 10%, σε αντίθεση με την άμεση μέθοδο όπου η τιμή της δύναμης δεν αποκλίνει περισσότερο από 5%.



Εικόνα 4.3. Μέση τιμή φορτίου έλασης για διαφορετικά μεγέθη μοντέλων.

4.4.2 Υπολογισμός φορτίου έλασης και σύγκλιση.

Ο χρόνος υπολογισμού των δύο μεθόδων απεικονίζεται στην Εικόνα 4.4 [4] για διαφορετικά μεγέθη μοντέλων.



Εικόνα 4.4. Σύγκριση χρόνου επίλυσης της έμμεσης και άμεσης μεθόδου για διαφορετικά μεγέθη μοντέλων.

Το μέγεθος του μοντέλου παίζει σημαντικό ρόλο στην έμμεση ανάλυση, καθώς ο χρόνος της επίλυσης αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του αριθμού κόμβων. Αντίθετα, με τη άμεση μέθοδο ο χρόνος λύσης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τον αριθμό των κόμβων.

Το χρονικό βήμα κατά τη διάρκεια της έμμεσης λύσης ήταν 1 ms. Όταν αντιμετωπίστηκαν προβλήματα σύγκλισης, το χρονικό βήμα μειώθηκε στο 1 μs προκειμένου να ξεπεραστεί η αστάθεια, αυξάνοντας τον συνολικό χρόνο επίλυσης. Για τη άμεση μέθοδο, το ακριβές χρονικό βήμα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7), και στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν της τάξης του ενός μs, που τρέχει σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος προσομοίωσης.

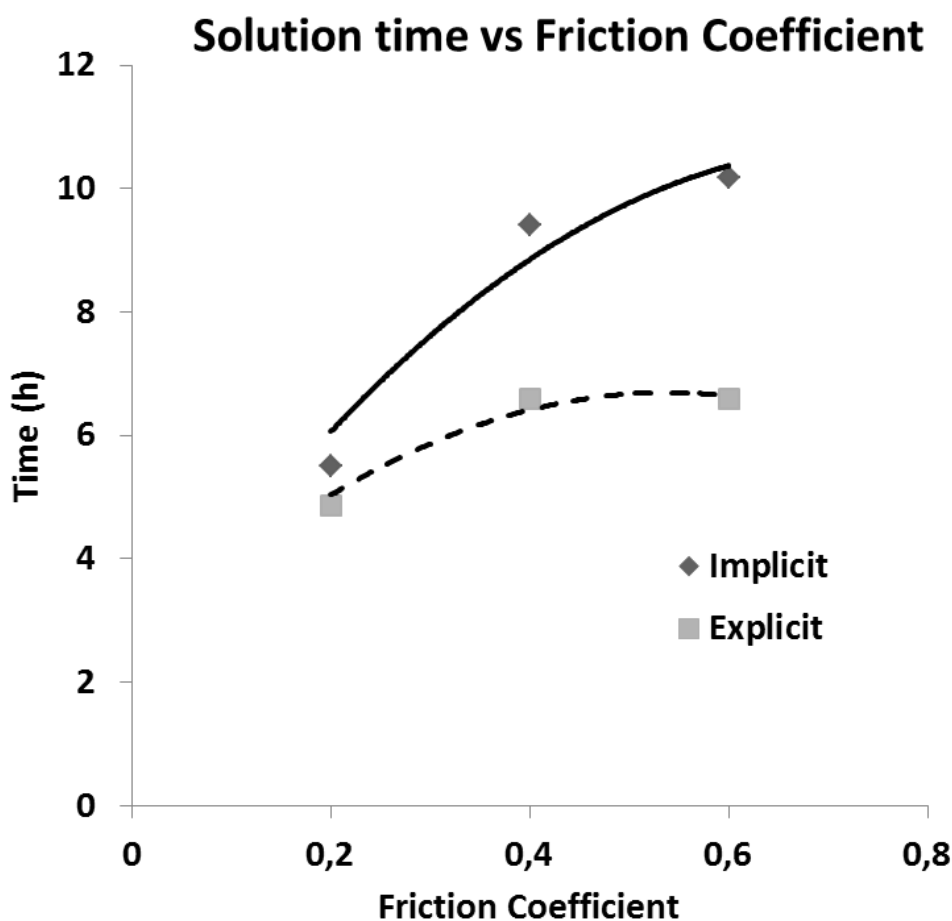
Η άμεση μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική από την έμμεση μέθοδο. Για τα μικρά μοντέλα (<20.000 κόμβους) η διαφορά στον υπολογιστικό χρόνο για τις δύο μεθόδους είναι μικρή

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

και πιο συγκεκριμένα 1 ώρα για τη άμεση μέθοδο έναντι 2 ωρών για την έμμεση στο πολύ χονδροειδές μοντέλο. Ωστόσο, η ίδια διαφορά αυξάνει εντυπωσιακά με τον αυξανόμενο αριθμό κόμβων, φθάνοντας στη μέγιστη διαφορά ~ 135 ώρες για το λεπτομερές μοντέλο.

4.4.3 Επίδραση της τριβής στον υπολογιστικό χρόνο.

Στην Εικόνα 4.5 [4] φαίνεται η επίδραση του συντελεστή τριβής μεταξύ του ράουλου εργασίας και της πλάκας στον χρόνο επίλυσης. Όσο υψηλότερος είναι ο συντελεστής, τόσο πιο έντονα μη γραμμικό γίνεται το πρόβλημα με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση του χρόνου επίλυσης των δύο μεθόδων. Για συντελεστή τριβής ίσο με 0,2, και οι δύο μέθοδοι απαιτούν παρόμοιο χρόνο για την επίλυση. Ο χρόνος της επίλυσης επηρεάζεται ελαφρώς από τον συντελεστή τριβής για την άμεση μέθοδο. Αντίθετα, στην έμμεση μέθοδο, ο χρόνος λύσης ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τον συντελεστή τριβής, καθώς απαιτεί διπλάσιο χρόνο σε συντελεστή τριβής 0,6 σε σύγκριση με το 0,2.



Εικόνα 4.5. Επίδραση του συντελεστή τριβής στον χρόνο επίλυσης.

Τα φαινόμενα που διέπουν την επαφή μεταξύ των μερών είναι ευκολότερα στην διαχείριση με τον άμεσο επιλύτη. Στην έμμεση μέθοδο συχνά προκύπτουν προβλήματα σταθερότητας, με σημαντική μείωση του χρονικού βήματος.

4.5 Συμπεράσματα ως προς τις μεθόδους προσομοίωσης

Η έλαση μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας και τις δύο προσεγγίσεις, τόσο την δυναμική, άμεση μέθοδο, αλλά και την στατική, έμμεση μέθοδο. Για τα μοντέλα με χονδρομερή πλεγματοποίηση ο χρόνος επίλυσης είναι παρόμοιος και για τις δύο μεθόδους, με την άμεση μέθοδο να παρουσιάζει ένα μικρό μόνο πλεονέκτημα. Ωστόσο, για τα μοντέλα με πιο λεπτομερή πλεγματοποίηση η άμεση μέθοδος είναι υπολογιστικά πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με την έμμεση, καθώς απαιτεί πολύ μικρότερο χρόνο επίλυσης. Επιπλέον, η έμμεση μέθοδος αντιμετωπίζει συχνά προβλήματα σταθερότητας, τα οποία απαιτούν μεγάλη προσπάθεια βελτίωσης και μικρο-ρυθμίσεων σε κάθε πείραμα για την εξεύρεση λύσης. Τα άμεσα μοντέλα ήταν πιο σταθερά και δεν απέτυχαν ποτέ να συγκλίνουν και να φέρουν αποτελέσματα.

Τα μικρά χρονικά βήματα, που χρησιμοποιούνται στον άμεσο επιλύτη εξασφάλισαν ότι οι μη γραμμικότητες αντιμετωπίζονται με μια ελάχιστη αύξηση του χρόνου. Αν και ο έμμεσος επιλύτης χρησιμοποιεί μεγαλύτερα χρονικά βήματα, η αντιστροφή του τανυστή ακαμψίας, που είναι μια ιδιαίτερος απαιτητική υπολογιστικά διαδικασία, σε συνδυασμό με τη μείωση στο μέγεθος του χρονικού βήματος όταν συναντώνται μη γραμμικότητες, ευθύνονται για τους μεγαλύτερους χρόνους επίλυσης. Συνεπώς, ο συντελεστής τριβής επηρέασε ελάχιστα την επίδοση του άμεσου επιλύτη, ενώ είχε σημαντική επίπτωση στον έμμεσο επιλύτη.

Τα αποτελέσματα και για τις δύο μεθόδους συγκλίνουν ήδη από τα μεσαία σε μέγεθος μοντέλα και συμφωνούν μεταξύ τους. Η περαιτέρω βελτιστοποίηση των παραμέτρων και μια σχολαστική επιλογή συντελεστή τριβής και μοντέλων υλικών είναι σημαντικά για τη βελτίωση της ακρίβειας και την εξαγωγή ταυτόσημων αποτελεσμάτων και για τις δύο μεθόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Προσομοίωση της κατεργασίας θερμής έλασης αλουμινίου

Για την θερμομηχανική προσομοίωση της θερμής έλασης αλουμινίου σχεδιάστηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων υψηλής ακρίβειας (3D-FEM). Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και ο σχεδιασμός του μοντέλου αυτού και για την προσομοίωση και την ανάλυση των παραμέτρων έλασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LS-DYNA.

5.1 Μοντέλο θερμού ελάστρου 4-high

Το έλαστρο αποτελείται από ένα ζεύγος ράουλων εργασίας και ένα ζεύγος ράουλων αντιστήριξης που χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο της επιπεδότητας της ελασμένης πλάκας και είναι εφοδιασμένο με ένα υδραυλικό σύστημα ικανό να εφαρμόζει ένα φορτίο κάμψης μεταξύ των ράουλων εργασίας και μεταξύ των ράουλων εργασίας και των ράουλων αντιστήριξης.

5.1.1 Προετοιμασία της γεωμετρίας του τμήματος για την ανάλυση

Για την προσομοίωση την κατεργασίας της θερμής έλασης, η γεωμετρία του ελάστρου πρέπει να προσεγγιστεί με ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements) και, επιπλέον, να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες. Αυτό το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων προκύπτει συνήθως από την διακριτοποίηση γεωμετρίας, που έχει αρχικά δημιουργηθεί σε λογισμικό σχεδιασμού (CAD). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SOLIDWORKS για την διακριτοποίηση.

Η γεωμετρία του ράουλου εργασίας και του ράουλου αντιστήριξης λήφθηκαν από τα πραγματικά τεχνικά χαρακτηριστικά θερμού ελάστρου Ελληνικής Βιομηχανίας και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1). Για να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

υπολογιστικό κόστος, το σύστημα θεωρήθηκε ως πλήρως συμμετρικό και μόνο το ένα τέταρτο του πλήρους μοντέλου προσομοιώθηκε ορίζοντας δύο επίπεδα συμμετρίας και τις κατάλληλες οριακές συνθήκες.

Πίνακας 5.1. Γεωμετρία των ράουλων εργασίας και αντιστήριξης

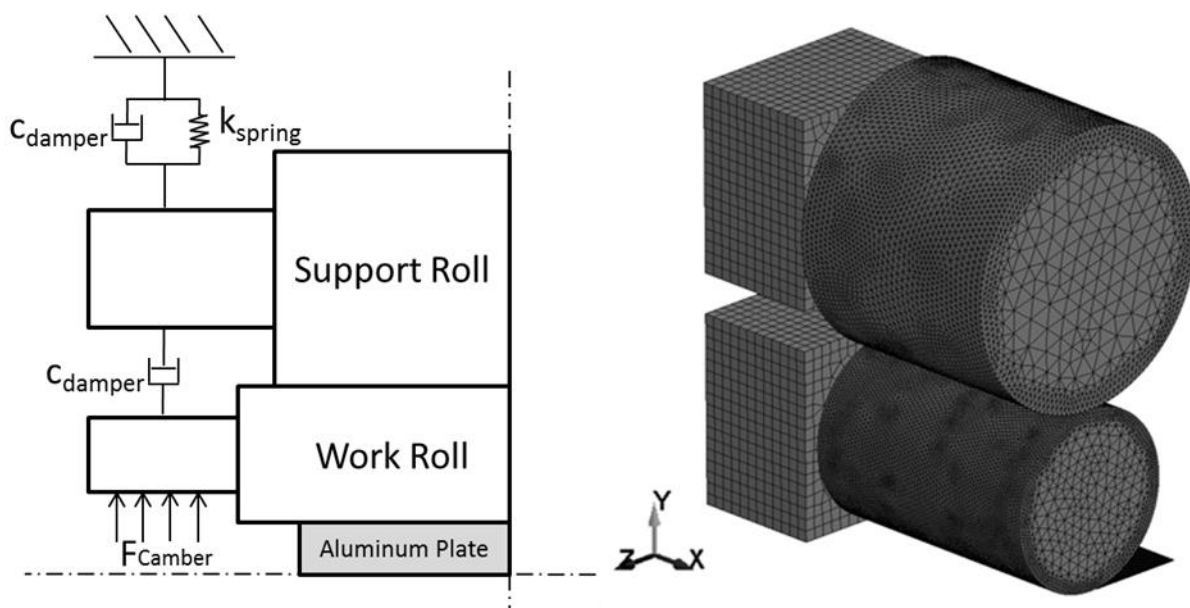
Ράουλο εργασίας	Τιμή
Μήκος (mm)	3000
Διάμετρος (mm)	950
Ράουλα αντιστήριξης	
Μήκος (mm)	2500
Διάμετρος (mm)	1500

Στην συνέχεια έγινε με ημι-αυτόματο τρόπο η διακριτοποίηση με χρήση του λογισμικού ANSYS 17.2 το οποίο και έχει και περισσότερες δυνατότητες επιλογής παραμέτρων διακριτοποίησης και απλούστερη σύζευξη της γεωμετρίας με το διακριτοποιημένο μοντέλο. Το λογισμικό κατακερματίζει βάσει κριτηρίων επιλεγμένων από τον χρήστη, την γεωμετρία σε μικρότερα τμήματα, των οποίων οι κόμβοι θα χρησιμοποιηθούν αργότερα ως σημεία υπολογισμού κατά την επίλυση. Οι κόμβοι μπορεί να έχουν τόσο γραμμικούς όσο και περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας και πάνω σε αυτούς θα εφαρμοστούν οι κινηματικοί περιορισμοί και οι οριακές συνθήκες.

Οι εδράσεις των ράουλων αντιστήριξης είναι πακτωμένες, ενώ στις εδράσεις των ράουλων εργασίας επιτρέπεται η μετακίνηση στον κατακόρυφο άξονα. Ο λόγος του βαθμού ελευθερίας στον κατακόρυφο άξονα δίνεται προκειμένου σε αυτές να εφαρμόζεται μια δύναμη F_{Camber} , η οποία ευθύνεται για τον έλεγχο της επιπεδότητας του ράουλου εργασίας και, επομένως, και της τελικής γεωμετρίας της πλάκας καθώς αντισταθμίζει την κάμψη των ράουλων εργασίας, ενώ αυτά κάμπτονται κατά την επιβολή του φορτίου. Ο συνολικός αριθμός κόμβων του μοντέλου ανέρχεται σε ~170.000.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Για την επίδραση της ανάλυσης των παραμέτρων έλασης χρησιμοποιήθηκε μοντέλο, όπως φαίνεται στο Εικόνα 5.1 [58]. Για τα ράουλα το μέγεθος στοιχείου ήταν 15 mm στην επιφάνεια και για το έλασμα το μέγεθος του στοιχείου ήταν 10 mm κατά το μήκος και πλάτος. Για τα μεγάλα πάχη πλάκας (> 15 mm) το μέγεθος του στοιχείου ήταν 5 mm και για τα λεπτά πάχη πλάκας (<15 mm) 3 στοιχεία ήταν ο ελάχιστος αριθμός στοιχείων δεδομένου ότι μικρότερος αριθμός έχει μεγάλη διακύμανση στα τελικά αποτελέσματα.



Εικόνα 5.1. Σχηματική απεικόνιση του (α) θερμού ελαστρού, (β) 3D-FEM μοντέλου.

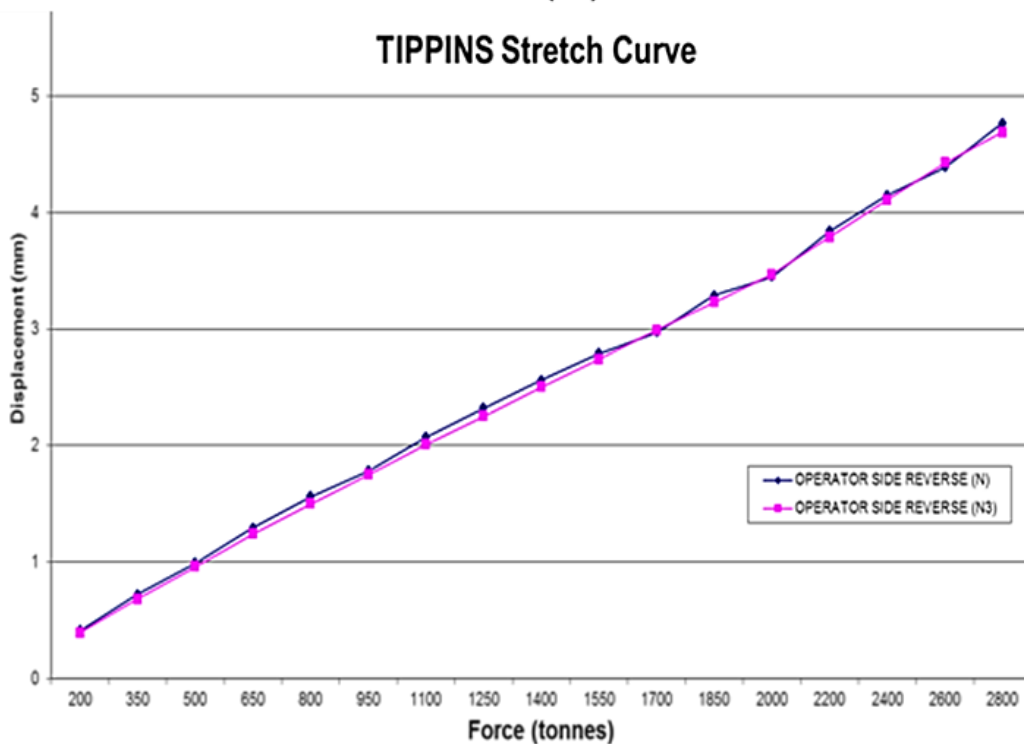
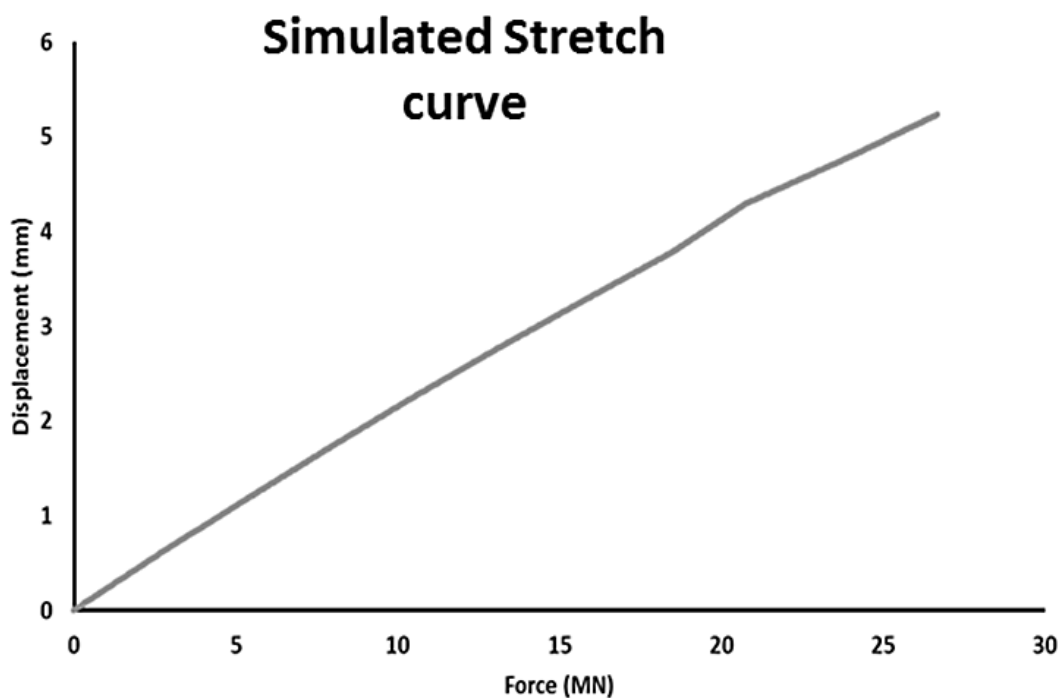
5.1.2 Επιβεβαίωση ελαστικής παραμόρφωσης ελαστρού

Πέραν της ελαστικότητας των ίδιων των ράουλων εργασίας και αντιστήριξης, το ίδιο το έλαστρο ανταποκρίνεται ελαστικά στις δυνάμεις τις έλασης. Ένα χαρακτηριστικό ενός ελαστρού, το οποίο μετράται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για έλεγχο της κατάστασής του, είναι η ελαστικότητά του για συγκεκριμένα φορτία.

Για να συμπεριληφθεί η ελαστικότητα του ίδιου του ελαστρού στον υπολογισμό, χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη γραμμικού ελατηρίου και αποσβεστήρων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1. Διενεργήθηκαν στατικά πειράματα με όμοιο τρόπο με αυτόν που γίνεται στην πραγματικότητα, ώστε να χαρακτηριστεί το γραμμικό ελατήριο και να εξαχθεί η χαρακτηριστική ελαστική καμπύλη, η οποία και συγκρίθηκε με την πραγματική. Για τα

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

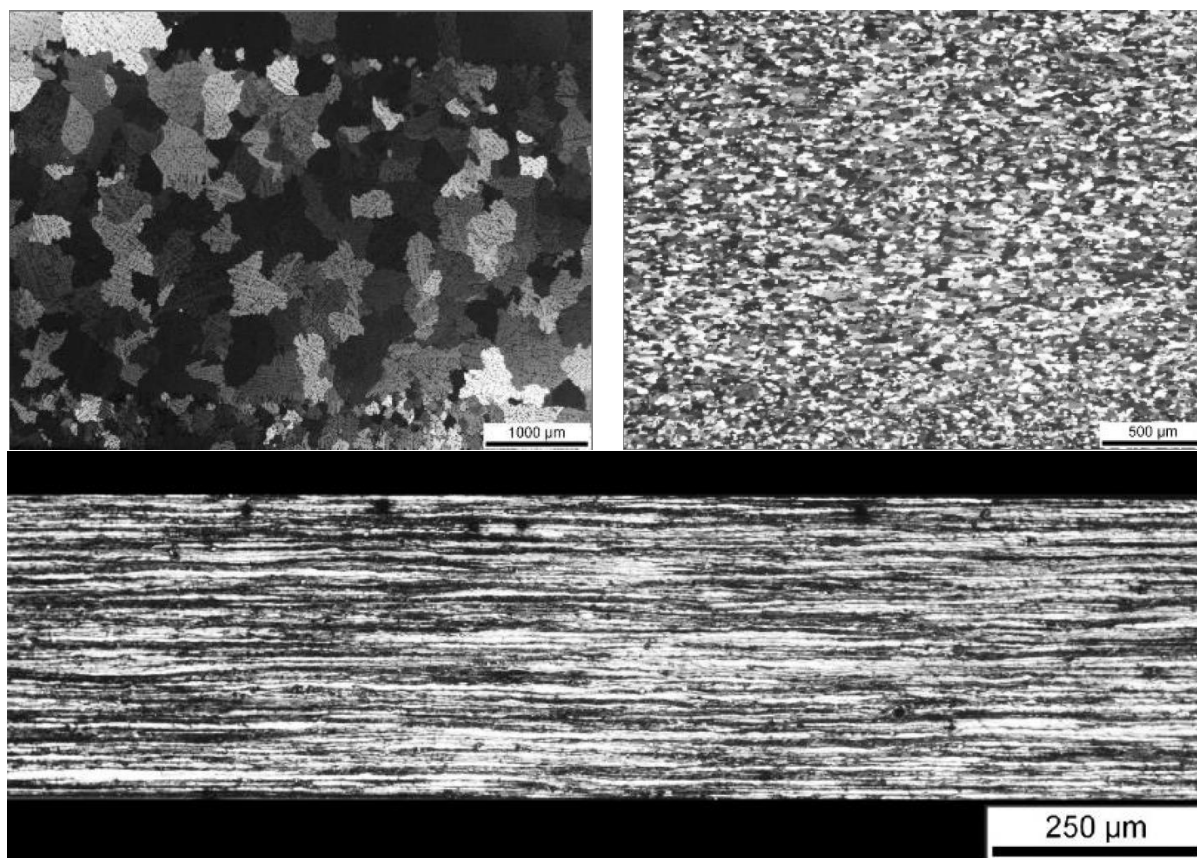
ράουλα χρησιμοποιήθηκε ελαστικό μοντέλο με τις παραμέτρους, που παρουσιάστηκαν προηγουμένως (Πίνακας 5.1). Για την μέτρηση ασκούνται συγκεκριμένα φορτία μεταξύ των τριβών των αξόνων των ράουλων εργασίας και μετράται η μετατόπισή τους. Στην Εικόνα 5.2 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ της πραγματικής μέτρησης (αριστερά) και της μέτρησης του μοντέλου (δεξιά) για σκληρότητα ελατηρίου 5 MN/mm.



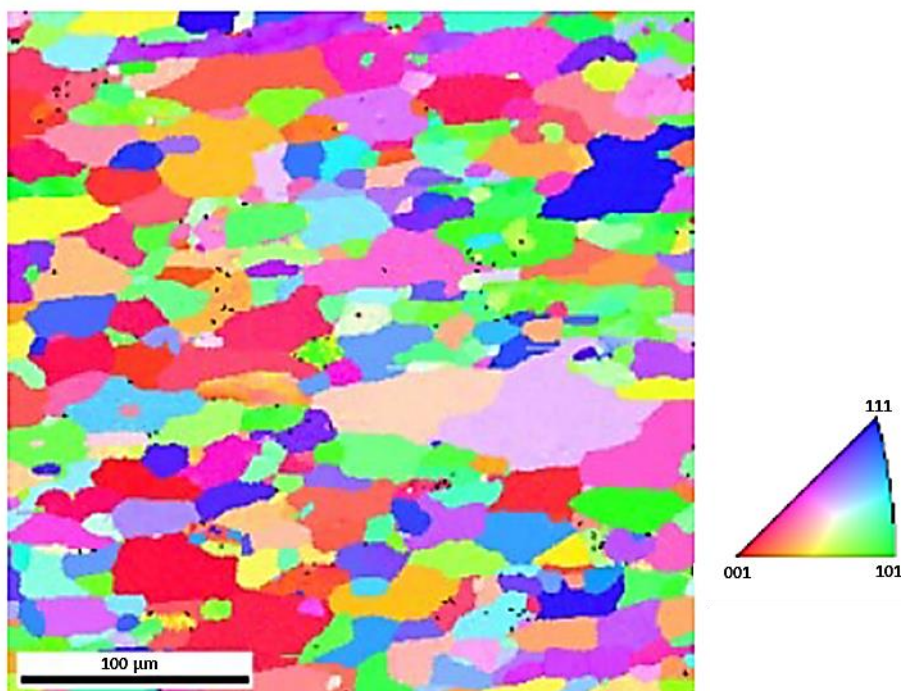
Εικόνα 5.2. Καμπύλη ελαστικότητας θερμού ελαστρού

5.2 Μοντέλο υλικού για την πλάκα αλουμινίου

Στην συνέχεια της Διατριβής η μελέτη θα βασιστεί στο κράμα αλουμινίου 5754, το οποίο είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο κράμα αλουμινίου με διαθέσιμα παραγωγικά δεδομένα. Στην Εικόνα 5.3 φαίνονται ενδεικτικά φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο της εξέλιξης της μικροδομή από το χυτό μέχρι και τον τελευταίο ψυχρό υποβιβασμό. Όπως φαίνεται μετά την χύτευση το υλικό είναι χονδρόκοκκο με εμφανή δενδριτική μικροδομή, η μικροδομή λεπτοδιαμερίζεται κατά την θερμή έλαση, όπου η θερμοκρασία περάτωσης αυτής να παίζει σημαντικό ρόλο στην ανακρυστάλλωση και την μορφολογία των κόκκων και, τέλος, έντονα ινώδης μορφολογία με παραμορφωμένους κόκκους να επικρατεί μετά την ψυχρά έλαση. Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται ενδεικτικά ο χάρτης IPF της μικροδομής μετά την θερμή έλαση ο οποίος λήφθηκε μέσω EBSD (Electron Back Scatter Diffraction analysis).



Εικόνα 5.3. Εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο από αλουμίνιο σειράς 5xxx μετά την χύτευση (πάνω αριστερά), μετά την θερμή έλαση (πάνω δεξιά) και μετά την ψυχρά έλαση (κάτω)



Εικόνα 5.4. Χάρτης IPF της μικροδομής μετά την θερμή έλαση

Για την αλουμινένια πλάκα χρησιμοποιήθηκε το ελαστο-πλαστικό Johnson-Cook για αλουμίνιο 5754-O [136]:

$$\sigma_f = (A + B \varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^*)^m \quad 5.1$$

Αν το σ_f είναι τάση διαρροής, τα A , B , n , C και m είναι οι συντελεστές του μοντέλου υλικού Johnson-Cook, ε_p είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, $\dot{\varepsilon}_p^*$ είναι η αδιάστατος ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης και T^* είναι η σχετική θερμοκρασία .

Το μοντέλο υλικού του Johnson-Cook λαμβάνει υπόψη του την θερμοκρασία, παραμόρφωση και ρυθμό παραμόρφωσης και χρησιμοποιείται ευρέως στις κατεργασίες μορφοποίησης. Οι παράμετροι, που χρησιμοποιούνται για τα υλικά όσο και για τις φυσικές και θερμικές τους ιδιότητες, συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 5.2. Μηχανικές ιδιότητες ράουλων και πλάκας αλουμινίου Πίνακας 5.2Error! Reference source not found. και Πίνακας 5.3) .

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Πίνακας 5.2. Μηχανικές ιδιότητες ράουλων και πλάκας αλουμινίου [136]

Πλάκα αλουμινίου	Τιμή
Λόγος Poisson	0.33
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	70
A [MPa]	103
B [MPa]	296.6
C	0.4368
n	-0.003101
m	1.2451299

Χαλύβδινα ράουλα	
Λόγος Poisson	0.3
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	200

Πίνακας 5.3. Φυσικές και θερμικές ιδιότητες ράουλων και πλάκας αλουμινίου [137]

Πλάκα αλουμινίου	Τιμή
Πυκνότητα [Kg/m^3]	2700
Θερμοχωρητικότητα	904
Θερμική αγωγιμότητα [W/m K]	220

Steel Rolls	
Πυκνότητα [Kg/m^3]	7800
Θερμοχωρητικότητα [$\text{J}/(\text{kg K})$]	485
Θερμική αγωγιμότητα [W/m K]	38

5.3 Μοντέλο τριβής

Η περιγραφή της επαφής μεταξύ του ράουλου και της πλάκας αλουμινίου απαιτεί τον καθορισμό των συνθηκών τριβής. Οι χρησιμοποιούμενες τιμές επιλέγησαν από την βιβλιογραφία από παρόμοιες διατάξεις και μεγέθη ελάστρων / πλάκας, οι οποίες στις

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

περισσότερες περιπτώσεις προέκυψαν από διαδοχικές διαδικασίες δοκιμής και σφάλματος σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Δύο μοντέλα τριβής χρησιμοποιούνται συνήθως για να περιγράψουν την κατάσταση τριβής (τ_f) στις κατεργασίες μορφοποίησης μετάλλου: το μοντέλο τριβής του Coulomb και το μοντέλο τριβής διάτμησης. Δεδομένου ότι η τριβή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο για να περιγραφεί, και τα δύο μοντέλα αθροίζουν όλους τους μηχανισμούς σε έναν αδιάστατο συντελεστή ή παράγοντα [137].

$$\tau_f = \begin{cases} \mu p, & \text{when } p < \frac{m}{\mu} \tau_s \\ m \tau_s, & \text{when } p > \frac{m}{\mu} \tau_s \end{cases} \quad 5.2$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής, το p είναι η πίεση, m είναι ο συντελεστής διάτμησης και τ_s είναι η τάση διαρροής σε διάτμηση. Η διατμητική τάση τριβής σε χαμηλή πίεση είναι ανάλογη της κανονικής πίεσης, που δίνεται από το μοντέλο του Coulomb. Εντούτοις, εξισώνεται με την περιορισμένη κατά m μέγιστη διατμητική τάση σε υψηλές πιέσεις. Ο Πίνακας 5.4. συνοψίζει τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους.

Πίνακας 5.4. Παράμετροι μοντέλου τριβής μεταξύ ράουλου και πλάκας [137]

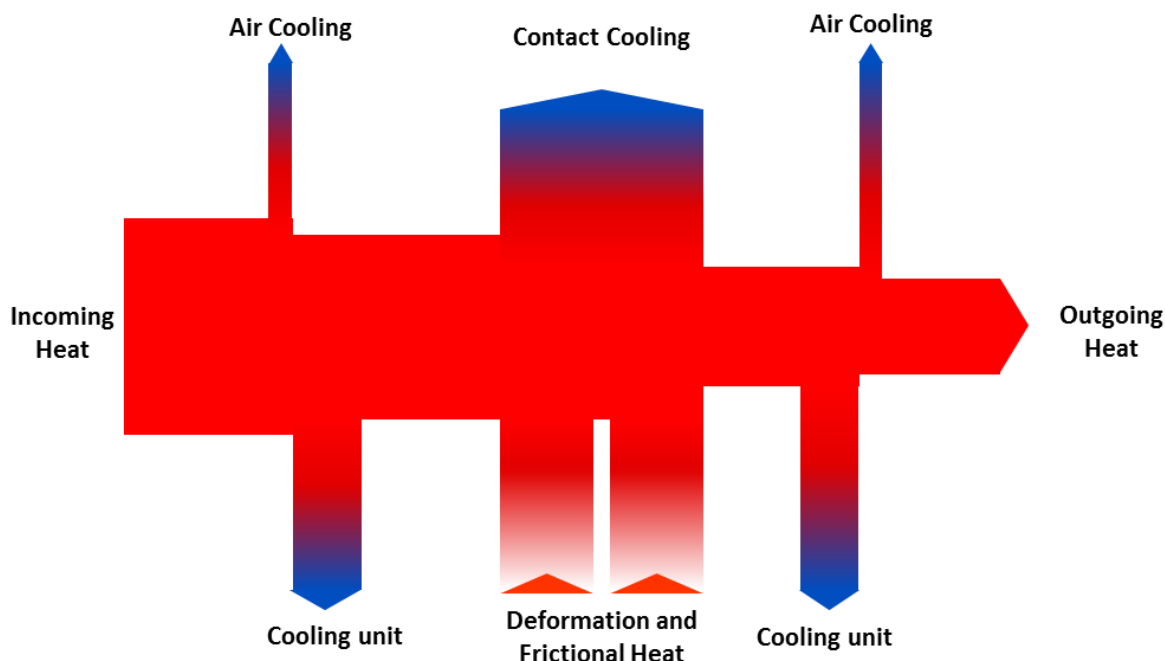
Frictional boundary	Value
coefficient of friction, μ	0.4
shear factor, m	0.8

5.4 Θερμικές οριακές συνθήκες για την πλάκα

Προκειμένου να είναι ρεαλιστική η προσέγγιση, είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό τα θερμικά φαινόμενα. Στην Εικόνα 5.5 απεικονίζονται τα θερμικά φορτία, που συμβαίνουν κατά την κατεργασία της θερμής έλασης. Η θερμή πλάκα απάγει θερμότητα προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, θερμότητα απάγεται προς την ψυκτική μονάδα σε περίπτωση που γίνεται χρήση αυτής. Κατά την επαφή της πλάκας με τα ράουλα εργασίας, θερμότητα απάγεται από την πλάκα προς το ράουλο και τα ψυκτικά μέσα, καθώς και λόγω

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

της θερμότητας που δημιουργείται από την τριβή και την παραμόρφωση θερμότητα μεταδίδεται τόσο προς το ράουλο εργασίας όσο και προς την πλάκα.



Εικόνα 5.5. Σκαρίφημα θερμικών φορτίων κατά την θερμή έλαση.

Η μετάδοση της θερμότητας από την πλάκα προς το περιβάλλον γίνεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας και μπορεί να περιγραφεί ως:

$$\dot{q}_{air} = h_{air} (T_s(t) - T_{air}) + \sigma \varepsilon A (T_s(t)^4 - T_{air}^4) \quad 5.3$$

Όπου h_{air} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προς τον αέρα (W/m^2K), $T_s(t) - T_{air}$ η σχετική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας και του αέρα (K), σ η σταθερά Stephan-Boltzmann (kg/s^3K^4), A η επιφάνεια του σώματος (m^2) και ε ο συντελεστής εκπομπής της ακτινοβολίας για το αλουμίνιο. Αντιστοίχως, η απαγωγή θερμότητας λόγω της ψύξης από την ψυκτική μονάδα (\dot{q}_{cool}) μπορεί να περιγραφεί ως:

$$\dot{q}_{cool} = h_{cool} (T_{Roll}(t) - T_{coolant}) \quad 5.4$$

Όπου h_{cool} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο (W/m^2K), $T_s(t) - T_{coolant}$ η σχετική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας και

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

του αέρα (K). Στα σχέδια έλασης, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη δεν χρησιμοποιείται η επιπλέον ψύξη της πλάκας.

Οι θερμικές οριακές συνθήκες στην επαφή μεταξύ του ράουλου και της πλάκας εξαρτώνται έντονα από συγκεκριμένες συνθήκες, όπως η εφαρμοζόμενη πίεση επί του ράουλου, η τραχύτητα της επιφάνειας, τη λίπανση, το υλικό κτλ. Ένας επαρκής προσδιορισμός των θερμικών ιδιοτήτων επαφής απαιτεί καθορισμό της θερμικής αγωγιμότητας στην περιοχή επαφής και της μεταφοράς θερμότητας προς τον αέρα και το ψυκτικό μέσο.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h_c (T_s(t) - T_r) - q_{fric} \quad 5.5$$

Όπου h_c είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της επαφής (W/m^2K), $T_s(t) - T_r$ είναι η σχετική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας και του ράουλου εργασίας (K), q_{fric} είναι η παραγόμενη ενέργεια λόγω τριβής ($Kg m^2/s^2$) και k είναι η θερμική αγωγιμότητα ($W/m K$) [41]. Η ενέργεια λόγω τριβής είναι ίση με το έργο λόγω της δύναμης τριβής και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$q_{fric} = \tau_f d \quad 5.6$$

Όπου τ_f η τριβής (N) και d η διανυόμενη απόσταση (m).

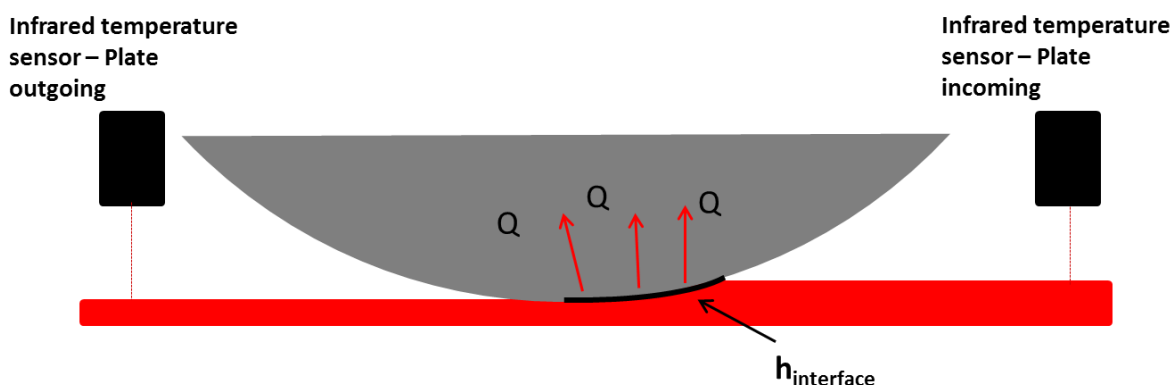
Η θερμότητα που παράγεται κατά την πλαστική παραμόρφωση επηρεάζει το θερμικό ισοζύγιο και την κατανομή της θερμοκρασίας, η οποία επηρεάζεται από την κατανομή των παραμορφώσεων εντός της πλάκας. Η αύξηση της θερμοκρασίας (ΔT) σε κάθε σημείο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{\rho C_p} = \frac{\beta}{\rho C_p} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma d\varepsilon \quad 5.7$$

Όπου Q η θερμική ενέργεια, ρ η πυκνότητα, C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα, σ η τάση, ε η παραμόρφωση και β το ποσοστό της παραμόρφωσης, η οποία μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Το β λαμβάνεται ως 0.9 στην μορφοποίηση γενικά και δείχνει ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό αποθηκεύεται μέσα στο υλικό σαν ελαστική παραμόρφωση.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Οι παράμετροι που περιγράφονται παραπάνω και θεωρούνται σταθερές και όμοιες ανεξαρτήτως της κατεργασίας λήφθηκαν από την βιβλιογραφία και συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5. Ωστόσο, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της πλάκας και του ράουλου εργασίας (h_c) είναι χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου ελάστρου και ο χαρακτηρισμός του έγινε μέσω επικύρωσης από βιομηχανικές δοκιμές.



Εικόνα 5.6. Σκαρίφημα μεθοδολογίας επικύρωσης συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ θερμής πλάκας και ράουλου εργασίας.

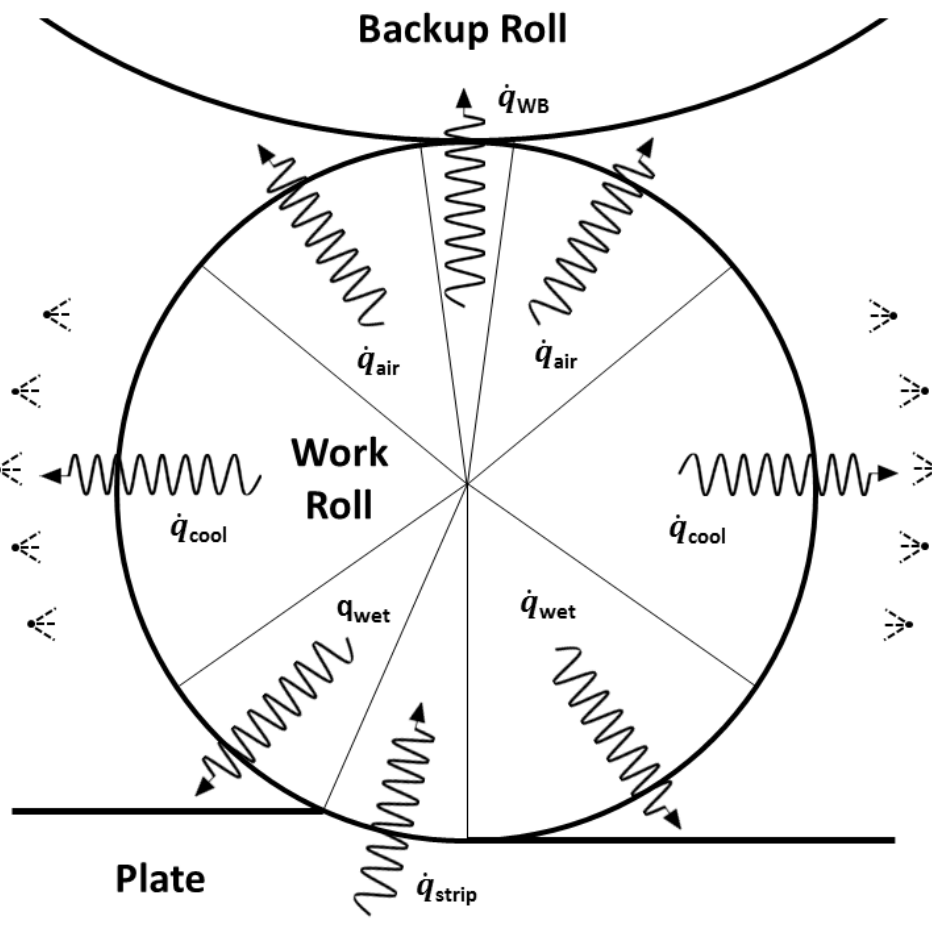
Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίστηκε σε δοκιμή και σφάλμα, όπου έχοντας καταγραφή θερμοκρασίας της πλάκας στην είσοδο και την έξοδο του ελάστρου (Εικόνα 5.6) έγινε η βαθμονόμηση της τιμής του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της πλάκας και του ράουλου εργασίας h_c . Αυτή η μεθοδολογία ακολουθείται ευρέως από τους ερευνητές όπως αποτυπώνεται και στην βιβλιογραφία [25] και ο συντελεστής h_c μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστικό του ελάστρου για συγκεκριμένο υλικό (Πίνακας 5.5).

5.5 Θερμικές οριακές συνθήκες στο ράουλο εργασίας

Για την προσομοίωση του θερμικού ισοζυγίου στο ράουλο εφαρμόστηκαν θερμικά φορτία στο περιστρεφόμενο ράουλο, τα οποία χωρίστηκαν σε 5 διαφορετικές ζώνες για τις οποίες ισχύουν διαφορετικές οριακές συνθήκες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.7. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του ράουλου αυξάνεται λόγω της ροής θερμότητας από την υψηλής θερμοκρασίας πλάκα στο χαμηλότερης θερμοκρασίας ράουλο (\dot{q}_{strip}). Η επιφάνεια του ράουλου χάνει θερμότητα στο περιβάλλον μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας (\dot{q}_{air}). Η ισχυρότερη ψύξη έρχεται από την απαγωγή θερμότητας στο ψυκτικό μέσο (\dot{q}_{cool}) και

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

κατόπιν από την επαφή του ράουλου εργασίας με το ράουλο αντιστήριξης (\dot{q}_{WB}). Μεταξύ των ψυκτικών μονάδων και της πλάκας ψυκτικό μέσο ρέει στην επιφάνεια του ράουλου εργασίας δημιουργώντας μια ζώνη με διαφορετικές οριακές συνθήκες (\dot{q}_{wet}).



Εικόνα 5.7. Σχηματική απεικόνιση των ζωνών με διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά την επιβολή θερμικών φορτίων στο ράουλο εργασίας.

5.5.1 Θερμική αγωγιμότητα

Η βασική εξίσωση της αγωγιμότητας της θερμότητας για κυλινδρικές συντεταγμένες και ιστροπικές ιδιότητες μπορεί να γραφεί ως [138,139,140]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{wr} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k_{wr} r \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{wr} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T(t)}{\partial t} \quad 5.8$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Όπου ρ είναι η πυκνότητα (g/cm^3), C_p ο συντελεστής ειδικής θερμοχωρητικότητας ($\text{J}/\text{kg K}$), T η θερμοκρασία (K), t ο χρόνος (sec), r η ακτινική διεύθυνση (m), φ η γωνιακή διεύθυνση (m), z η διαμήκης διεύθυνση και k_{wr} ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($\text{W}/\text{m K}$). Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5. Η αρχική θερμοκρασία T_{init} θεωρήθηκε ομοιόμορφη σε όλα τα σημεία του ράουλου εργασίας στην έναρξη κάθε υπολογισμού:

$$T_{Roll}(r, \varphi, m, t)|_{t=0} = T_{init} \quad 5.9$$

Όπου T_{Roll} είναι η θερμοκρασία του ράουλου εργασίας (K) και T_{init} η αρχική θερμοκρασία (K).

5.5.2 Οριακή συνθήκη για την επαφή μεταξύ ράουλου εργασίας και πλάκας

Η μόνη πηγή θερμότητας που μπορεί να επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας του ράουλου είναι η θερμότητα που ρέει από την θερμή πλάκα προς το ράουλο κατά την επαφή τους. Η ροή θερμότητας (\dot{q}_{strip}) (W/m^2) εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ράουλου και της πλάκας και προκειμένου να υπολογιστεί αποτελεσματικά αυτή υποτέθηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h_{strip}) ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), ο οποίος και χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση 5.10 [138,139,140]:

$$\dot{q}_{strip} = h_{strip} (T_{Strip} - T_{Roll}(t)) \quad 5.10$$

Ο συντελεστής h_{strip} παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια του κάθε υπολογισμού και διακριβώθηκε μέσω βιομηχανικών μετρήσεων. Ως θερμοκρασία της πλάκας (T_{Strip}) λήφθηκε η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της πλάκας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της από τόξο επαφής, όπως αυτή προέκυψε κατά την προσομοίωση της κατεργασίας της έλασης, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7. Η θερμοκρασία του ράουλου εργασίας ($T_{Roll}(t)$) μεταβάλλεται με τον χρόνο.

5.5.3 Οριακή συνθήκη για το ψυκτικό μέσο

Η πιο αποτελεσματική ψυκτική ζώνη είναι αυτή του ψυκτικού μέσου, το οποίο ψεκάζεται με μεγάλη πίεση στην επιφάνεια του ράουλου εργασίας από την ψυκτική μονάδα. Η μεταφορά θερμότητας σε αυτή την ζώνη (\dot{q}_{cool}) μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 5.11 [138,139,140]:

$$\dot{q}_{cool} = h_{cool} (T_{Roll}(t) - T_{coolant}) \quad 5.11$$

Όπου h_{cool} είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την ψυκτική μονάδα (W/m^2K) και $T_{Roll}(t) - T_{coolant}$ η στιγμιαία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του ράουλου εργασίας και του ψυκτικού μέσου (K). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της ψυκτική μονάδα h_{cool} μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 5.12 [140]:

$$h_{cool} = 6870 W^{0.19} P_{jet}^{0.27} \quad (T_{Roll}(t) \leq 373 K) \quad 5.12$$

$$h_{cool} = 29 \cdot 10^5 W^{0.08} P_{jet}^{0.05} \frac{T_{Roll}(t) - 373}{100} \frac{B}{T_{Roll}(t) - T_{coolant}} + 6870 W^{0.19} P_{jet}^{0.27} \frac{573 - T_{Roll}(t)}{100} \quad (T_{Roll}(t) > 373 K) \quad 5.13$$

Όπου P_{jet} η πίεση των ψεκαστήρων ($Kg/m s$), το $W = V_{jet}/A_{jet}$ αναφέρεται στην παροχή του ψυκτικού μέσου ανά μονάδα επιφάνειας στο ράουλο εργασίας και το $B = ((T_{jet} - 373)/16)^{-0.17}$. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από τα δεδομένα της παραγωγής και συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

5.5.4 Οριακή συνθήκη για την επαφή μεταξύ ράουλου εργασίας και ράουλου αντιστήριξης

Η οριακή συνθήκη για την μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ράουλου εργασίας και του ράουλου αντιστήριξης (\dot{q}_{WB}) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 6.14 [138,139,140]:

$$\dot{q}_{WB} = h_{WB} (T_{Roll}(t) - T_{BRoll}) \quad 5.14$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Όπου h_{WB} ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην επαφή μεταξύ ράουλου εργασίας και ράουλου αντιστήριξης (W/m^2K) και $T_{Roll}(t) - T_{BRoll}$ η στιγμιαία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ράουλου εργασίας και του ράουλου αντιστήριξης (K).

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ράουλου εργασίας και του ράουλου αντιστήριξης (h_{WB}) μπορεί να υπολογιστεί από:

$$h_{WB} = \frac{1.26 k_{wr}}{\pi D_W \sqrt{\pi \alpha_{wr}}} \sqrt{L_c v_{wr}} \quad 5.15$$

Όπου k_{wr} είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ράουλου εργασίας (W/mK), D_W είναι η διάμετρος του ράουλου εργασίας (m), $\alpha_{wr} = \frac{k_{wr}}{\rho C_p}$ είναι ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του ράουλου εργασίας (m^2/s), L_c είναι το μήκος επαφής μεταξύ του ράουλου εργασίας και του ράουλου αντιστήριξης (m) και v_{wr} είναι η ταχύτητα περιστροφής του ράουλου εργασίας. Το μήκος επαφής L_c θεωρήθηκε ίσο με το συνολικό μήκος του ράουλου αντιστήριξης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

5.5.5 Οριακή συνθήκη για την επιφάνεια διαβροχής μεταξύ ψυκτικών μονάδων και πλάκας

Η επιφάνεια του ράουλου κάτω από τις ψυκτικές μονάδες βρέχεται από ψυκτικό μέσο (νερό), που ρέει στην επιφάνεια σε ατμοσφαιρική πίεση. Η οριακή συνθήκη σε αυτή την ζώνη μπορεί να περιγραφεί από [138,139,140]:

$$\dot{q}_{wet} = h_{wet} (T_{Roll}(t) - T_{coolant}) \quad 5.16$$

Όπου h_{wet} ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην βρεγμένη από ψυκτικό μέσο επιφάνεια κάτω από τις ψυκτικές μονάδες (W/m^2K) και $T_{Roll}(t) - T_{coolant}$ η στιγμιαία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ράουλου εργασίας και ψυκτικού μέσου (K). Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_{wet} μπορεί να υπολογιστεί από [140]:

$$h_{wet} = 0.023 \left(\frac{v_w l_c}{\mu_{coolant}} \right)^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k_{coolant}}{l_c} \quad 5.17$$

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Όπου v_{wr} είναι η περιστροφική ταχύτητα του ράουλου εργασίας (m/s), l_c είναι το μήκος της επιφάνειας επαφής του ψυκτικού επάνω στο ράουλο εργασίας (m), $\mu_{coolant}$ είναι ο συντελεστής ιξώδους του ψυκτικού ($kg/m s$), Pr είναι ο συντελεστής Prandl (-) και $k_{coolant}$ είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ψυκτικού μέσου ($W/m K$). Το μήκος της επιφάνειας επαφής του ψυκτικού μέσου με το ράουλο εργασίας λήφθηκε ίσο με το μήκος του ράουλου εργασίας. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

5.5.6 Οριακή συνθήκη για την ψύξη στο περιβάλλον

Στην περιοχή μεταξύ των ψυκτικών μονάδων και της επαφής μεταξύ του ράουλου εργασίας και του ράουλου ανιστήριξης η θερμότητα χάνεται προς το περιβάλλον και ο ρυθμός αυτής μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 6.18 [138,139,140]:

$$\dot{q}_{air} = h_{air} (T_{Roll}(t) - T_{air}) + \sigma \varepsilon A (T_{Roll}(t)^4 - T_{air}^4) \quad 5.18$$

Όπου h_{air} ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον ($W/m^2 K$), $T_{Roll}(t) - T_{air}$ η στιγμιαία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ράουλου εργασίας και του περιβάλλοντος (K), σ η σταθερά ακτινοβολίας Stephan-Boltzmann ($kg/s^3 K^4$), A η επιφάνεια που ακτινοβολεί (m^2) και ε ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του χάλυβα. Ο Πίνακας 5.5. συνοψίζει τις παραμέτρους, που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 5.5. Παράμετροι για την θερμική ανάλυση του ράουλου εργασίας

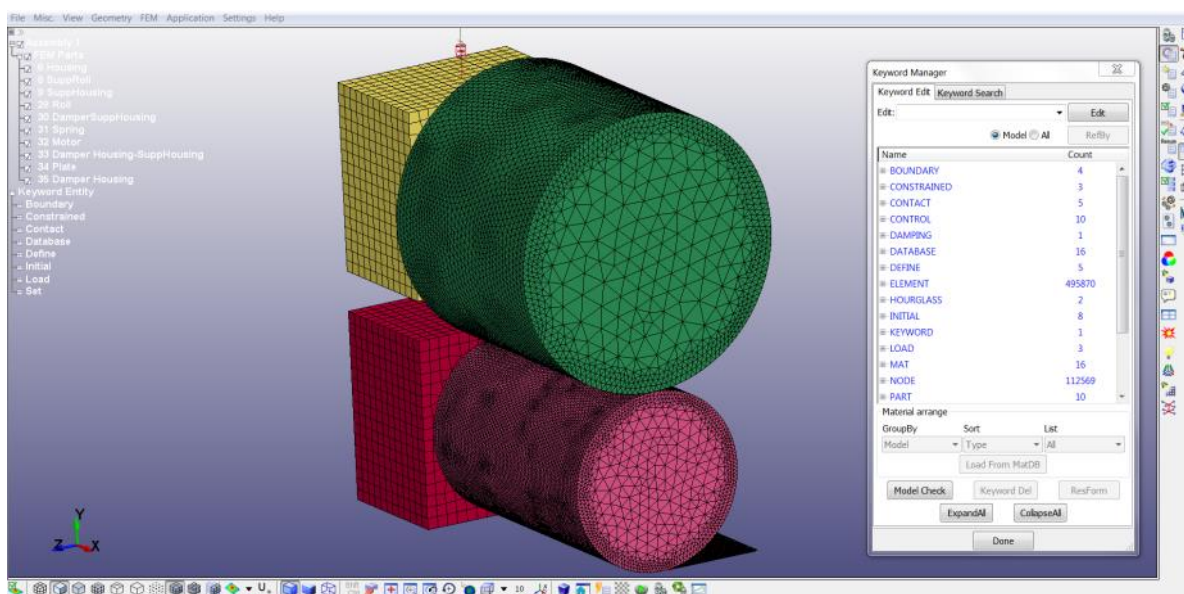
ρ [kg/m^3]	7800
C_p [$J/kg K$]	485
k_{wr} [$W/m K$]	38
h_{strip} [$W/m^2 K$]	100
V_{jet} [Liter/min]	3500
A_{jet} [m^2]	0.4
P_{jet} [Pa]	0.5×10^6

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

$T_{coolant}$ [K]	323
$\mu_{coolant}$ ($Kg/m s$)	4×10^{-4}
Pr [-]	2
$k_{coolant}$ [$W/m K$]	0.65
h_{air} [W/m^2K]	10
T_{air} [K]	300
σ [Kg/s^3K^4]	5.67×10^{-8}
ε [-]	0.5

5.6 Αναλυτική περιγραφή της σύνθεσης των εντολών

Ο επιλογή των κατάλληλων εξισώσεων, καθώς και ο ορισμός των παραμέτρων και των οριακών συνθηκών είναι πολύ σημαντικά για την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια, αυτά πρέπει να περιγραφούν σε ένα λογισμικό με τρόπο που θα είναι κατανοητά από τον επιλύτη, ώστε να θα μπορέσει να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός. Το λογισμικό, που χρησιμοποιήθηκε για την προ-επεξεργασία (preprocessing) του μοντέλου πριν την οριστική επίλυση, καθώς και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων μετά την επίλυση είναι το LS-PrePost® (Livermore Software Technology). Στην συνέχεια του Κεφαλαίου 6 παρουσιάζονται οι εντολές, που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.



Εικόνα 5.8. Στιγμιότυπο από το γραφικό περιβάλλον χρήστη του λογισμικού LS-PrePost.

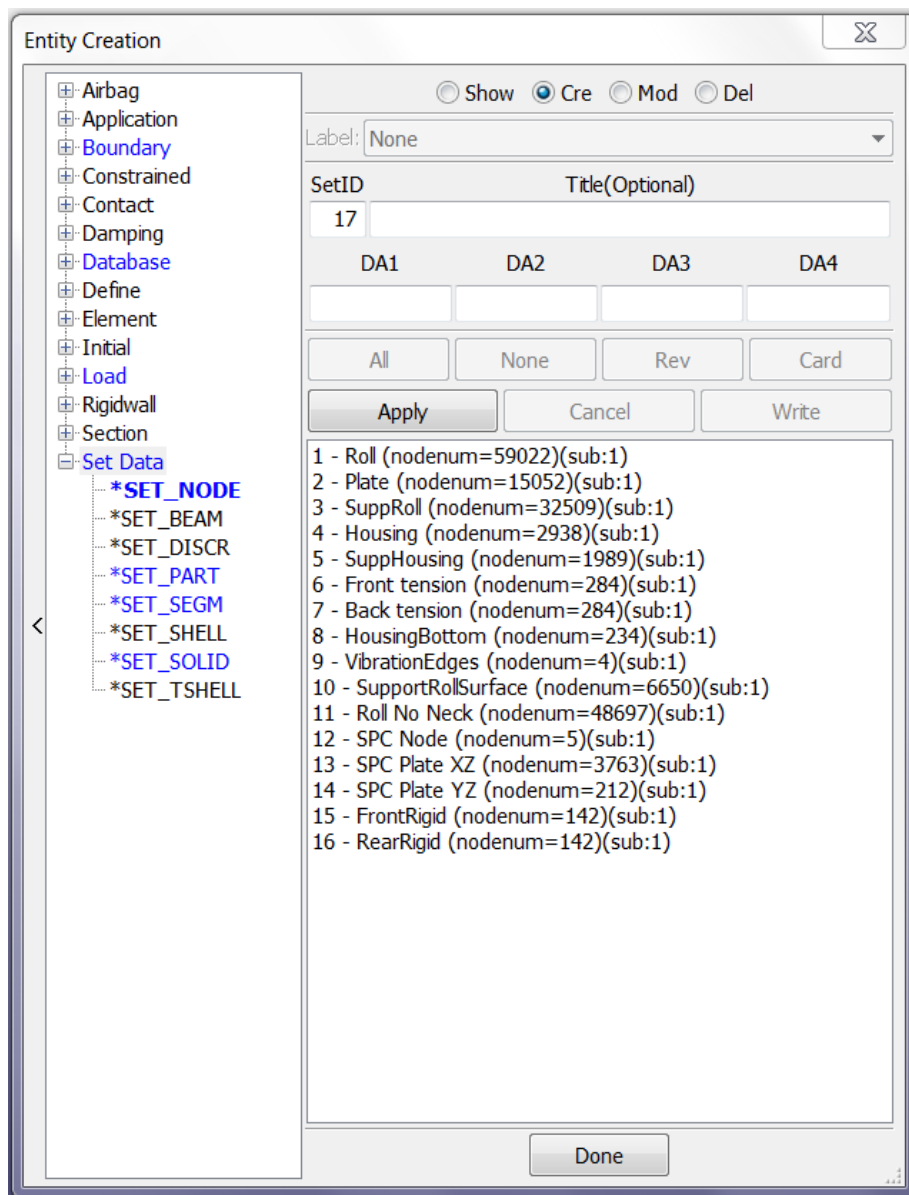
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Στην Εικόνα 5.8 απεικονίζεται στιγμιότυπο από το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού LS-PrePost, όπου διακρίνονται τα διακριτοποιημένα ράουλα και η πλάκα όπως επίσης και το παράθυρο “Keyword Manager” από το οποίο δίνονται οι εντολές και σχεδιάζεται το μοντέλο.

5.6.1 Ορισμός μερών

Πριν ξεκινήσει ο ορισμός των εντολών πρέπει να οριστούν τα ξεχωριστά μέρη του πειράματος, καθώς και ομάδες στοιχείων ή κόμβων, για τα οποία θα ισχύουν οι εντολές που θα οριστούν στην συνέχεια. Αυτό γίνεται μέσω της καρτέλας “Entity creation”, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 5.9. Καρτέλα “Entity Creation” για τον ορισμό των διαφορετικών μερών.

5.6.2 Μοντέλα υλικών

Για την πλάκα αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο «MAT_15», το οποίο είναι το «MAT_JOHNSON_COOK», το οποίο μαζί με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στην Εικόνα 5.10.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

*MAT_JOHNSON_COOK_(TITLE) (015) (1)

TITLE
Aluminum 5754

1	MID	RO	G	E	PR	DTE	VP	RATEOP
	11	2.700e-09	0.0	7.000e-04	0.3300000	0.0	1.0	0.0
2	A	B	N	C	M	TM	TR	EPSO
	103	297	0.4330	-0.0030	1.23	710	300	0.0

Εικόνα 5.10. Μοντέλο «MAT_JOHNSON_COOK» για την πλάκα αλουμινίου.

Αντιστοίχως, για τα ράουλα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο «MAT_001», το οποίο είναι το «MAT_ELASTIC», το οποίο μαζί με τις εντολές του φαίνεται στην Εικόνα 5.11.

*MAT_ELASTIC_(TITLE) (001) (2)

TITLE
Roll

1	MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT USED
	1	7.800e-10	2.000e+05	0.3000000	0.0	0.0	0

Εικόνα 5.11. Μοντέλο «MAT_ELASTIC» για τα ράουλα.

Το θερμικό μοντέλο και οι θερμικές ιδιότητες ορίζονται ξεχωριστά. Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το ιστροπικό θερμικό μοντέλο «MAT_THERMAL_ISOTROPIC» του οποίου η καρτέλα εντολής απεικονίζεται στην Εικόνα 5.12.

*MAT_THERMAL_ISOTROPIC_(TITLE) (T01) (2)

TITLE
Steel

1	TMID	TRO	TGRLC	TGMULT	TLAT	HLAT
	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	HC	TC				
	5.100e+08	43.000000				

Εικόνα 5.12. Θερμικό μοντέλο «MAT_THERMAL_ISOTROPIC».

Για τις προσομοιώσεις, που πραγματοποιήθηκε υπολογισμός θερμικής διαστολής χρησιμοποιήθηκε επιπλέον το μοντέλο «MAT_ADD_THERMAL_EXPANSION», όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.13.

*MAT_ADD_THERMAL_EXPANSION_(TITLE) (000) (1)

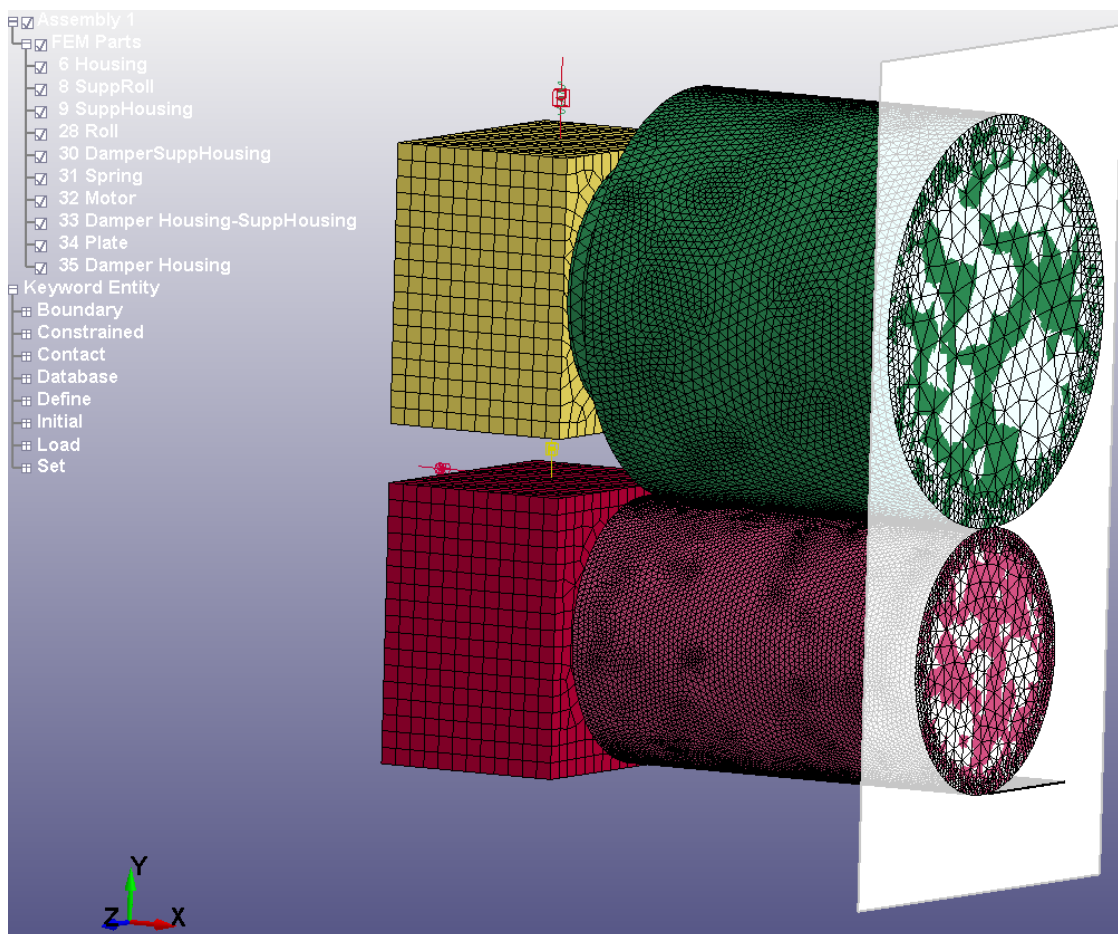
TITLE
ThermalExpansion

1	PID	LCID	MULT	LCID	MULTY	LCID	MULTZ
	5	0	1.260e-05	0	1.0000000	0	1.0000000

Εικόνα 5.13. Μοντέλο θερμικής διαστολής «MAT_ADD_THERMAL_EXPANSION».

5.6.3 Ορισμός οριακών συνθηκών

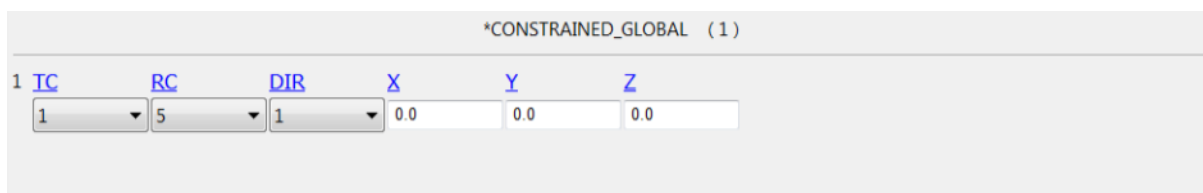
Για να οριστεί διπλό επίπεδο συμμετρίας ως προς τους άξονες X και Y χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές «CONSTRAINED_GLOBAL» και «BOUNDARY_SPC_SET». Η πρώτη δημιουργεί ένα επίπεδο, στο οποίο ισχύουν περιορισμοί στους βαθμούς ελευθερίας (Εικόνα 5.14).



Εικόνα 5.14. Επίπεδο συμμετρίας επιπέδου YZ.

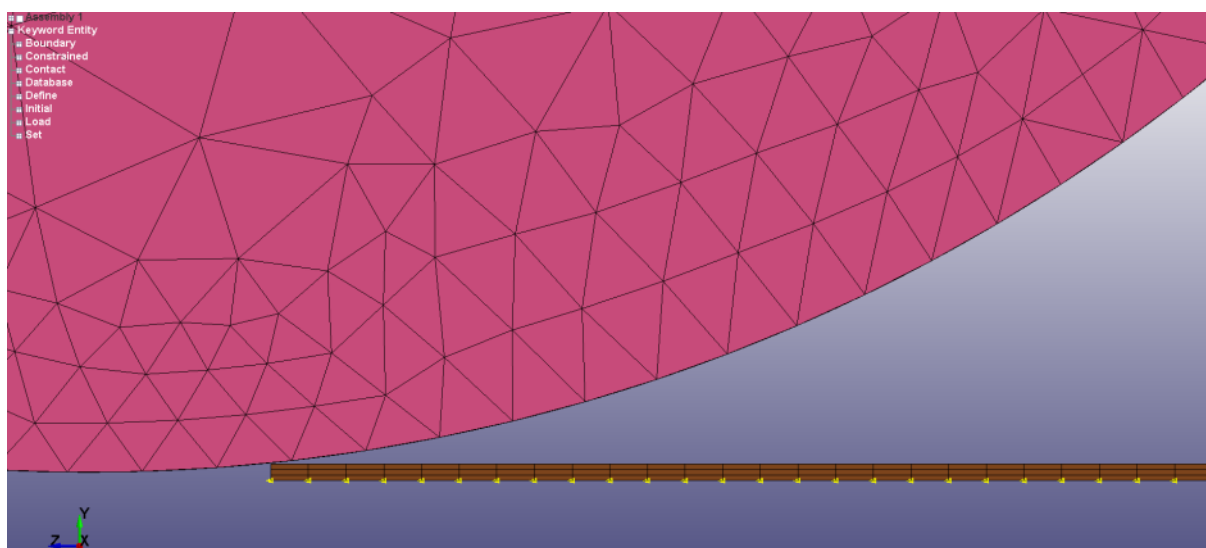
Η καρτέλα της εντολής φαίνεται στην Εικόνα 5.15, όπου ενεργοποιήθηκαν περιορισμοί στους βαθμούς ελευθερίας γραμμικής κίνησης στον άξονα X και περιστροφικής κίνησης γύρω από τον άξονα Y και Z. Το επίπεδο ορίζεται από ένα σημείο και ένα διάνυσμα. Στην προκειμένη περίπτωση το σημείο είναι η αρχή των αξόνων (0, 0, 0) και η διεύθυνση ο άξονας X.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 5.15. Καρτέλα εντολής «CONSTRAINED_GLOBAL» για τον ορισμό επίπεδου συμμετρίας.

Ως προς τον άξονα XZ δεν χρησιμοποιήθηκε η ίδια εντολή, διότι για κάθε αλλαγή πάχους και θέσης της πλάκας υλικού θα έπρεπε να γίνεται υπολογισμός της αρχής του διανύσματος που ορίζει το επίπεδο συμμετρίας. Ευκολότερη λύση προκύπτει με χρήση της εντολής «BOUNDARY_SPC_SET», όπου οι βαθμοί ελευθερίας αφορούν συγκεκριμένους κόμβους και όχι επίπεδο. Οι συγκεκριμένοι κόμβοι φαίνονται σηματοδεδμένοι στην Εικόνα 5.16 και είναι όλοι αυτοί που φαίνονται στο κάτω μέρος της πλάκας αλουμινίου.



Εικόνα 5.16. Κόμβοι για τον ορισμό περιορισμών «BOUNDARY_SPC_SET».

Η καρτέλα της εντολής φαίνεται στην Εικόνα 5.17, όπου ενεργοποιήθηκαν περιορισμοί στους βαθμούς ελευθερίας γραμμικής κίνησης στον άξονα Y και περιστροφικής κίνησης γύρω από τον άξονα X και Z.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

*BOUNDARY_SPC_SET(ID) (3)

ID	TITLE							
1	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
	12	0	1	1	1	0	0	0

Εικόνα 5.17. Καρτέλα εντολής «BOUNDARY_SPC_SET» για τον περιορισμό βαθμών ελευθερίας συγκεκριμένων κόμβων.

Στις οριακές συνθήκες συμπεριλαμβάνεται και η απαγωγή θερμότητας προς το περιβάλλον λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Για λόγους απλοποίησης η ακτινοβολία συμπεριλήφθηκε στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον και, επομένως, χρησιμοποιήθηκε μόνο η εντολή «BOUNDARY_CONVECTION_SET» η καρτέλα της οποίας φαίνεται στην Εικόνα 5.18. Οι οριακή αυτή συνθήκη ισχύει στην επιφάνεια του σώματος.

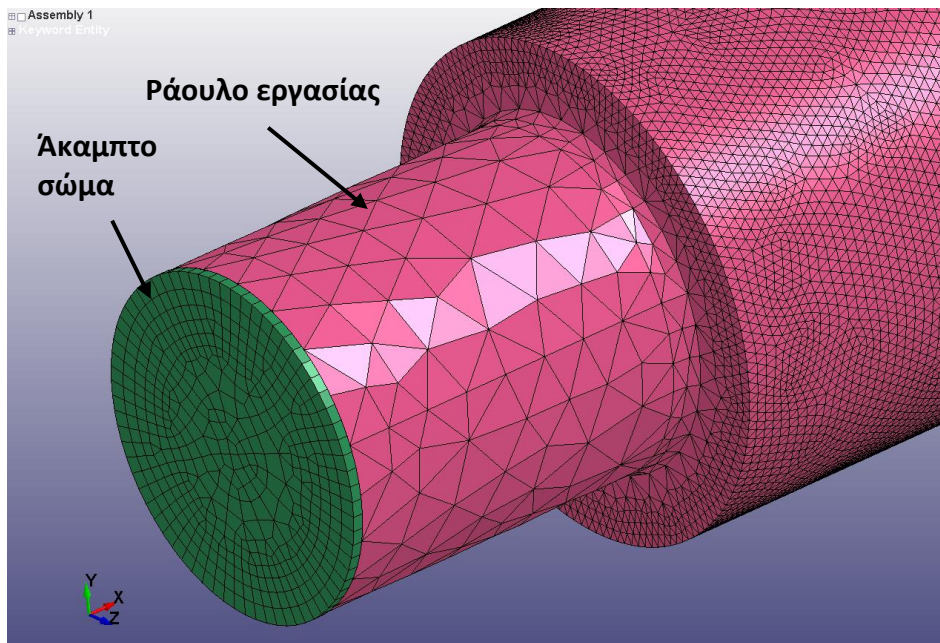
*BOUNDARY_CONVECTION_SET (1)

1	SSID				
	2				
2	HLCID	HMULT	TLCID	TMULT	LOC
	0	25.000000	0	300.00000	0

Εικόνα 5.18. Καρτέλα εντολής «BOUNDARY_CONVECTION_SET» για την απαγωγή θερμότητας από την επιφάνεια της πλάκας προς το περιβάλλον.

Η περιστροφή του ράουλου εργασίας ορίστηκε, επίσης, στην ενότητα των οριακών συνθηκών. Το ελαστικό ράουλο κινείται, αλλά και παραμορφώνεται, κάτι που κάνει δύσκολο τον ορισμό περιστροφής των κόμβων, που συμπεριλαμβάνονται στον όγκο του ράουλου, γύρω από το κέντρο μάζας του, καθώς και τον ορισμό ενός διανύσματος του οποίου οι συντεταγμένες θα χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό του άξονα περιστροφής. Για να μπορέσει να περιστραφεί χωρίς την δημιουργία ανεπιθύμητων μετατοπίσεων ή ταλαντώσεων, σχεδιάστηκε ένα άκαμπτο σώμα στο άκρο του ράουλου εργασίας, συνδεδεμένο με αυτό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.19. Αυτή η προσέγγιση αντικατοπτρίζει και ορθότερα την πραγματική κατεργασία, καθώς ο κινητήρας κινεί το ράουλο εργασίας από την μια του μεριά μέσω σύνδεσης στο ίδιο σημείο, στο οποίο σχεδιάστηκε και το άκαμπτο σώμα που θα παίζει τον ρόλο του κινητήρα.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 5.19. Άκαμπτο σώμα (πράσινο) στην άκρη του ράουλου εργασίας (ροζ) στο οποίο θα εφαρμοστεί η οριακή συνθήκη περιστροφής.

Για τον ορισμό της περιστροφής χρησιμοποιήθηκε η εντολή «BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID», όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.20.

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (1)								
ID	TITLE							
0	MotorRotation							
1	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
	32	5	0	1	1.0000000	0	1.000e+28	0.0

Εικόνα 5.20. Καρτέλα εντολής BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID για την περιστροφή του ράουλου εργασίας.

5.6.4 Αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και ταχύτητας

Οι αρχικές θερμοκρασίες και ταχύτητες ορίζονται σε ξεχωριστές εντολές και ισχύουν μόνο για την έναρξη κάθε πειράματος προσομοίωσης. Για τον ορισμό αυτών χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές «INITIAL_TEMPERATURE_SET» και «INITIAL_VELOCITY», οι οποίες απευθύνονται σε ομάδες κόμβων και σε σώματα αντιστοίχως. Στην Εικόνα 5.21 και στην Εικόνα 5.22 φαίνονται σχηματικά οι εντολές.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

*INITIAL_TEMPERATURE_SET (5)		
1	NSID	TEMP
1	350.00000	0

Εικόνα 5.21. Καρτέλα εντολής «INITIAL_TEMPERATURE_SET» για τον ορισμό αρχικής θερμοκρασίας κόμβων.

*INITIAL_VELOCITY (3)						
1	NSID	NSIDEX	BOXID	IRIGID	ICID	
2	0	0	0	0	0	
2	VX	VY	VZ	VXR	VYR	VZR
0.0	0.0	1500.0000	0.0	0.0	0.0	

Εικόνα 5.22. Καρτέλα εντολής «INITIAL_VELOCITY» για τον ορισμό αρχικής ταχύτητας σωμάτων.

5.6.5 Οριακές συνθήκες επαφής μεταξύ μερών.

Για τον ορισμό των συνθηκών κατά την επαφή δύο μερών χρησιμοποιήθηκε η εντολή «CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_SMOOTH». Η αυτόματη αυτή επαφή καλεί αλγόριθμο αναζήτησης επαφής κάτι που την κάνει καταλληλότερη για την μορφοποίηση μετάλλων όπου συχνά στην αρχή δεν υπάρχει επαφή και στην συνέχεια η επαφή μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη και δύσκολο να οριστεί εξ' αρχής. Η αυτόματη επαφή μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική σε σχέση με παλαιότερους αλγορίθμους που δεν κάνουν αναζήτηση. Η επαφή «SURFACE_TO_SURFACE» υποδηλώνει ότι τα επιφανειακά τμήματα (segments) προβάλλονται κάθετα προκειμένου να προσδιοριστεί η επιφάνεια επαφής. Επίσης, η επαφή «SURFACE_TO_SURFACE» υποδηλώνει ότι είναι διπλής κατεύθυνσης (two-way) κατά την οποία τα φορτία μεταδίδονται μεταξύ των υποτελών κόμβων (slave nodes) και των κύριων επιφανειακών τμημάτων (master segments) αλλά ελέγχεται η διείδυση τόσο των υποτελών κόμβων στην κύρια επιφάνεια όσο και των κύριων κόμβων στην υποτελή επιφάνεια. Τέλος, ενεργοποιώντας την επιλογή «SMOOTH» μειώνεται ο θόρυβος της επαφής, καθώς η τοπολογία της απαλύνεται μέσω γραμμικής παρεμβολής των επιφανειακών τμημάτων και, έτσι, μπορεί και παρέχεται και μια πιο ακριβής γεωμετρία των μερών, που έρχονται σε επαφή. Η εντολή της επαφής, καθώς και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 5.23.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_SMOOTH_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (4)

1	CID	TITLE						
	2	Roll-Plate						
			<input type="checkbox"/> MPP1	<input type="checkbox"/> MPP2				
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMS
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	5	1	2	2	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.4000000	0.4000000	0.0	85.000000	20.000000	1	0.0	1.000e+20
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
	<input checked="" type="checkbox"/> Thermal		<input type="checkbox"/> T_Friction	<input checked="" type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> AB	<input type="checkbox"/> ABC	<input type="checkbox"/> ABCD	<input type="checkbox"/> ABCDE <input type="checkbox"/> ABCDEF
7	CF	FRAD	HTC	LMIN	LMAX	FTOSLV	BC_FLG	ALGO
	0.4000000	0.0	100.000000	0.2000000	1.0000000	0.5000000	0	1

Εικόνα 5.23. Καρτέλα εντολής «CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_SMOOTH» για επαφή μεταξύ σωμάτων.

Το παραπάνω είδος επαφής χρησιμοποιήθηκε για όλες τις επαφή κομματιών εκτός αυτής μεταξύ του κομματιού που χρησιμοποιείται για την περιστροφή του ράουλου εργασίας και του ίδιου του ράουλου εργασίας. Σε αυτή την επαφή χρησιμοποιήθηκε η εντολή «CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_OFFSET» όπου μπορούν να περιοριστούν βαθμοί ελευθερίας μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Η επιλογή «OFFSET» χρησιμοποιεί αλγόριθμο τύπου «penalty-based», ο οποίος είναι πιο αποτελεσματικός μεταξύ απαραμόρφωτων και παραμορφώσιμων σωμάτων.

5.6.6 Έλεγχος μοντέλου προσομοίωσης.

Ο έλεγχος των διαφόρων παραμέτρων επίλυσης του μοντέλου γίνεται μέσω των καρτελών «CONTROL». Αρχικά ο χρόνος ολοκλήρωσης του υπολογισμού γίνεται από την εντολή «CONTROL_TERMINATION» (Εικόνα 5.24).

*CONTROL_TERMINATION (1)

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
	100.000000	0	0.0	0.0	1.000e+08	0

Εικόνα 5.24. Καρτέλα εντολής για τον τερματισμό της προσομοίωσης.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Το μηχανικό χρονικό βήμα στην άμεση επίλυση (explicit) είναι προκαθορισμένο και δεν χρειάζεται να οριστεί μέσω εντολής. Από την άλλη, το θερμικό χρονικό βήμα ορίζεται από την εντολή «CONTROL_THERMAL_TIMESTEP» (Εικόνα 5.25).

*CONTROL_THERMAL_TIMESTEP (1)								
1	IS	TIP	IIS	TMIN	TMAX	DTEMP	TSCP	LCTS
1	1	0.5000000	0.0010000	1.000e-08	0.0010000	1.0000000	0.5000000	0

Εικόνα 5.25. Καρτέλα εντολής για το χρονικό βήμα του θερμικού μοντέλου.

Η συζευγμένη θερμομηχανική προσομοίωση μπορεί να ενεργοποιηθεί μέσω της εντολής «CONTROL_SOLUTION» όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.26.

*CONTROL_SOLUTION (1)				
1	SOLN	NLQ	ISNAN	LCINT
1	2	0	0	100

Εικόνα 5.26. Καρτέλα εντολής για την ενεργοποίηση συζευγμένης θερμομηχανικής προσομοίωσης.

Η επιλογή του επιλύτη, καθώς και παραμέτρων που σχετίζονται με την θερμική ανάλυση όπως το ποσοστό του μηχανικού έργου που μετατρέπεται σε θερμότητα, το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας, τα σημεία αξιολόγησης των μηχανικών ιδιοτήτων ως προς την θερμοκρασία, κτλ., φαίνονται στην Εικόνα 5.27.

*CONTROL_THERMAL_SOLVER (1)								
1	ATYPE	PTYPE	SOLVER	CGTOL	GPT	EQHEAT	FWORK	SBC
1	1	2	3	1.000e-04	8	0.9000000	0.9000000	0.0
2	MSSLVL	MAXITR	ABSTOL	RELTOL	OMEGA	UNUSED	UNUSED	TSE
2	0	500	1.000e-10	1.000e-04	1.0000000	0	0	1.0000000

Εικόνα 5.27. Καρτέλα επιλογής παραμέτρων θερμικής ανάλυσης.

Πολλές σημαντικές παράμετροι για την επαφή μεταξύ μερών, όπως η αντίσταση σε διείσδυση κόμβων ενός μέρους σε ένα άλλο, η ενεργοποίηση της ανάπτυξης θερμότητας λόγω τριβής, κτλ., μπορούν να οριστούν μέσω της καρτέλας «CONTROL_CONTACT», όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.28.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

*CONTROL_CONTACT (1)								
1	SLSFAC	RWPNAL	ISLCHK	SHLTHK	PENOPT	THKCHG	ORIEN	ENMASS
	0.5000000	0.0	1	0	1	0	1	0
2	USRSTR	USRFRG	NSBCS	INTERM	XPENE	SSTHK	ECDT	TIEDPRJ
	0	0	10	0	4.0000000	0	0	0
3	SFRIC	DFRIC	EDC	VFC	TH	TH_SF	PEN_SF	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	IGNORE	FRCENG	SKIPRWG	OUTSEG	SPOTSTP	SPOTDEL	SPOTHIN	
	0	1	0	0	0	0	0.0	

Εικόνα 5.28. Καρτέλα επιλογής παραμέτρων επαφών μεταξύ μερών.

Όταν υπάρχουν περιστρεφόμενα παραμορφώσιμα μέρη είναι απαραίτητη η ενημέρωση του τανυστή των τάσεων δεύτερης τάξης (second order objective stress update). Ο επιλύτης χρησιμοποιεί την ενημέρωση κατά Jaumann και μπορεί να ενεργοποιηθεί μέσω της εντολής «CONTROL_ACCURACY», όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.29.

*CONTROL_ACCURACY (1)				
1	OSU	INN	PIDOSU	IACC
	1	4	7	0

Εικόνα 5.29. Καρτέλα ενεργοποίησης ενημέρωσης τάσεων δεύτερης τάξης.

Μετά το τέλος κάθε προσομοίωσης, οι οριακές συνθήκες και όλα τα στοιχεία κάθε κόμβου και πιο συγκεκριμένα η θέση αυτού, η θερμοκρασία, οι παραμορφώσεις και οι τάσεις μπορούν να αποθηκευτούν σε ένα αρχείο (.dynain), ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα εισόδου σε επόμενο πείραμα. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της εντολής «INTERFACE_SPRINGBACK_LSDYNA», η οποία φαίνεται στην Εικόνα 5.30.

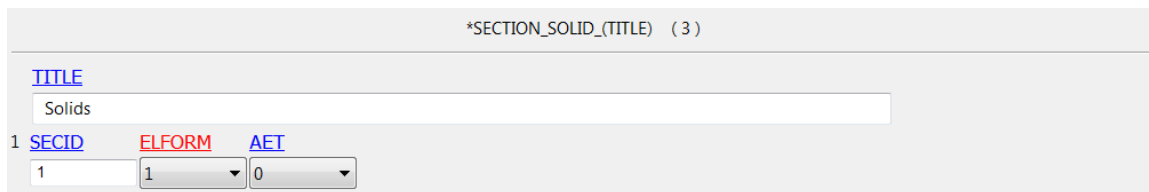
*INTERFACE_SPRINGBACK_LSDYNA (1)							
1	PSID	NSHV	FTYPE	FTENSR	NTHHSV	INTSTRN	
	9	0	12	1	0	0	0

Εικόνα 5.30. Καρτέλα ενεργοποίησης αποθήκευσης αρχείου .dynain.

5.6.7 Ανάθεση ιδιοτήτων στα διαφορετικά μέρη.

Κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου είναι απαραίτητος ο ορισμός των εξισώσεων που θα διέπουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος «constant stress solid», όπως ορίστηκε από την καρτέλα εντολής «SECTION_SOLID» (Εικόνα 5.31).

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



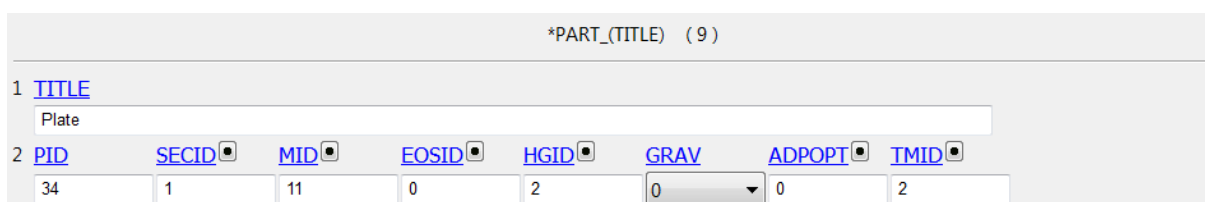
*SECTION_SOLID_(TITLE) (3)

TITLE
Solids

1 SECID ELFORM AET
1 1 0

Εικόνα 5.31. Καρτέλα επιλογής μοντέλου περιγραφής των πεπερασμένων στοιχείων.

Ό,τι έχει προηγουμένως οριστεί σε καρτέλες και αφορά στα διαφορετικά μέρη του μοντέλου όπως το μοντέλο υλικού, οι θερμικές ιδιότητες, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, κτλ., πρέπει να ανατεθεί σε αυτά και αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εντολής «PART_PART», όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.32.



*PART_(TITLE) (9)

1 TITLE
Plate

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
34 1 11 0 2 0 0 2

Εικόνα 5.32. Καρτέλα ανάθεσης ιδιοτήτων στα εκάστοτε μέρη.

5.6.8 Έλεγχος δεδομένων αποθήκευσης.

Πολλά δεδομένα μπορούν να εξαχθούν από ένα πείραμα προσομοίωσης. Ο όγκος αυτών μπορεί να γίνει υπερβολικός αν δεν γίνει σωστός έλεγχος παραγωγής τους και αποθήκευσης τους. Κατά των σχεδιασμό του μοντέλου πρέπει να γίνει επιλογή σχετικά με ποια αποτελέσματα θα πρέπει να καταγράφονται και να αποθηκεύονται και πόσο συχνά, ώστε να μπορούν αργότερα να αναλυθούν. Η επιλογή αυτή γίνεται μέσω της καρτέλας εντολών «DATABASE_ASCII_option». Στην συνέχεια, για την ενεργοποίηση παραγωγής στιγμιότυπων, καθώς και την συχνότητα αυτών, είναι απαραίτητη η εντολή «DATABASE_BINARY_D3PLOT». Τέλος, οι εντολές «DATABASE_HISTORY_NODE_SET» και «DATABASE_HISTORY_SOLID_SET» χρησιμεύουν στην αποθήκευση συγκεκριμένων αποτελεσμάτων για συγκεκριμένους κόμβους ή μέρη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Υπολογισμός της επιπεδότητας της πλάκας αλουμινίου μετά από θερμή έλαση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η κάμψη των ράουλων και η επιπεδότητα της πλάκας έχει απασχολήσει πολύ την επιστημονική κοινότητα. Με το πέρασμα των ετών έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της επιπεδότητας. Η αναλυτική μοντελοποίηση είναι ένα σημαντικό εργαλείο και έχει εξεταστεί διεξοδικά [141,142,143,144,145,146]. Διάφορα μοντέλα, που υπολογίζουν την επίδραση της δύναμης κάμψης στην γεωμετρία των πλακών έχουν προταθεί από πολλούς ερευνητές. Οι Kang et al. [147] ανέπτυξαν ένα μοντέλο, που λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση της επιπεδότητας από την διαφορική ταχύτητα των ακρών και του κέντρου της πλάκας. Ο Guo [61] εφάρμοσε ένα απλό μοντέλο, το οποίο υπολογίζει την κάμψη του ράουλου εργασίας για κάθε μεμονωμένο σχέδιο έλασης. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για να ταξινομηθούν τα σχέδια έλασης με παρόμοιες προδιαγραφές επιπεδότητας. Οι Nandan et al. [3] έδειξαν τις βέλτιστες παραμέτρους της κατεργασίας και του σχεδίου έλασης για βέλτιστη επιπεδότητα στη θερμή έλαση. Οι Lee et al. [148] πρότειναν ένα μοντέλο υπολογισμού επιπεδότητας για ψυχρή έλαση σε έλαστρο με δύο ράουλα εργασίας και τέσσερα αντιστήριξης με βάση τη μέθοδο λόφου τριβής, η οποία λαμβάνει υπόψη την επιπεδότητα εισόδου της πλάκας, καθώς και την τοπική παραμόρφωση του ράουλου εργασίας λόγω επαφής Hertz. Οι Sikdarl et al. [60] παρείχαν το στόχο ρύθμισης της καμπτικής δύναμης για τον έλεγχο της επιπεδότητας με μοντελοποίηση της κάμψης των ράουλων σε θερμό έλαστρο. Οι Steinboeck et al. [149] εφάρμοσαν ένα αναλυτικό μοντέλο που υπολογίζει την κάμψη των ράουλων βασιζόμενο σε μη γραμμικές γεωμετρικές εξισώσεις, παράγωγα υλικού, εξισώσεις ισορροπίας, βασικές εξισώσεις για την ροή του υλικού κατά την παραμόρφωση και μεταβλητό σύστημα συντεταγμένων για να πετύχουν ο υπολογισμός να είναι ανεξάρτητος του χρόνου. Οι Fukushima et al. [150] ανέπτυξαν ένα ακριβές μοντέλο για την πρόβλεψη της επιπεδότητας και το εφάρμοσαν

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

στον ηλεκτρονικό έλεγχο του ελάστρου κατά την παραγωγή. Το μοντέλο συνδυάστηκε με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEM) που υπολογίζει την κατανομή του φορτίου έλασης. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας επέτρεψε την μικτή έλαση προϊόντων με σημαντικές διακυμάνσεις στις μηχανικές ιδιότητες. Το υπολογιστικό κόστος αυτής της μεθόδου είναι χαμηλό, αλλά πολλές υποθέσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο, κάτι που περιορίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων υπολογισμού.

Η άλλη εδραιωμένη μέθοδος μοντελοποίησης βασίζεται σε FEM και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από πολλούς ερευνητές για προσομοιώσεις έλασης λόγω της αυξημένης ποιότητας των αποτελεσμάτων και της δυνατότητας εφαρμογής ρεαλιστικών οριακών συνθηκών και περιορισμών σε περίπλοκα μοντέλα [4,151,6,152,80,25,5,153]. Η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί αποτελεσματικά για την πρόβλεψη της επιτεδότητας τόσο σε ψυχρή όσο και σε θερμή έλαση. Ο Gautam [56] συσχέτισε την παραμόρφωση των ράουλων εργασίας σε έλαστρο χωρίς ράουλα αντιστήριξης με το ποσοστό υποβιβασμού για διαφορετικές ιδιότητες χάλυβα. Οι Wang et al. [59] υπολόγισαν την επιτεδότητα διαμορφώνοντας τη διαδικασία σε δύο στάδια. Το πρώτο βήμα ήταν η πρόβλεψη της κατανομής της δύναμης έλασης και το δεύτερο η χρήση των αποτελεσμάτων ως δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης των ράουλων. Οι Shigaki et al. [57] συνέδεσαν ένα εμπορικώς διαθέσιμο μοντέλο FEM με την μέθοδο Multi-Slab για τον υπολογισμό της κάμψης των ράουλων εργασίας και αντιστήριξης. Οι Sun et al. και Linghu et al. [2,6] χρησιμοποίησαν ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο FEM για τον προσδιορισμό των δυνάμεων κάμψης των ράουλων εργασίας, των δυνάμεων κάμψης των ενδιάμεσων ράουλων και της ενδιάμεσης μετατόπισης των ράουλων σε έλαστρο CVC 6-High υπό ορισμένες συνθήκες έλασης για τον σχεδιασμό του προγράμματος έλασης. Οι Liu et al. [1] χρησιμοποίησαν πεπερασμένα στοιχεία σε συνδυασμό με άπειρα στοιχεία για να αναλύσουν την επιτεδότητα μετά την εισαγωγή υπολειπόμενων τάσεων στην πλάκα.

Στο Κεφάλαιο 7 εφαρμόστηκε το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (3D-FEM) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6 για να μελετηθεί η επίδραση της δύναμης κάμψης στην τελική επιτεδότητα της πλάκας αλουμινίου κατά την θερμή έλαση.

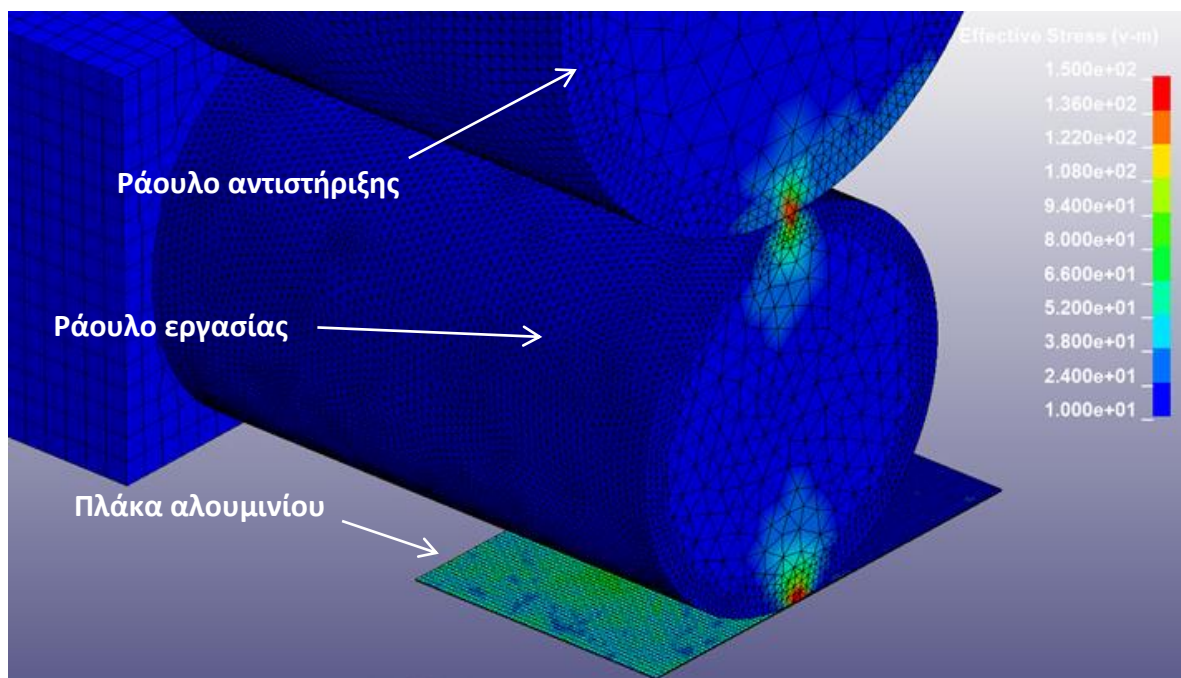
6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης της έλασης

Η πλάκα υποβιβάζεται από τα 660 mm σε λεπτό έλασμα 8.9 mm σε διαδοχικά στάδια. Οι αρχικές συνθήκες (ταχύτητα, θερμοκρασία πλάκας, ποσοστό υποβιβασμού κ.α.) λαμβάνονται ως δεδομένα εισόδου από τα υπάρχοντα σχέδια έλασης. Το θερμοκρασιακό προφίλ της πλάκας και των ραούλων θεωρείται ομοιογενές στην αρχή κάθε σταδίου προσομοίωσης. Υπολογίστηκαν τόσο η δύναμη διαχωρισμού όσο και η εξέλιξη της θερμοκρασίας. Έγιναν αρκετές προσομοιώσεις για το τελευταίο πέρασμα μεταβάλλοντας τη δύναμη κάμψης. Η επιπεδότητα (crown) υπολογίζεται ως εξής:

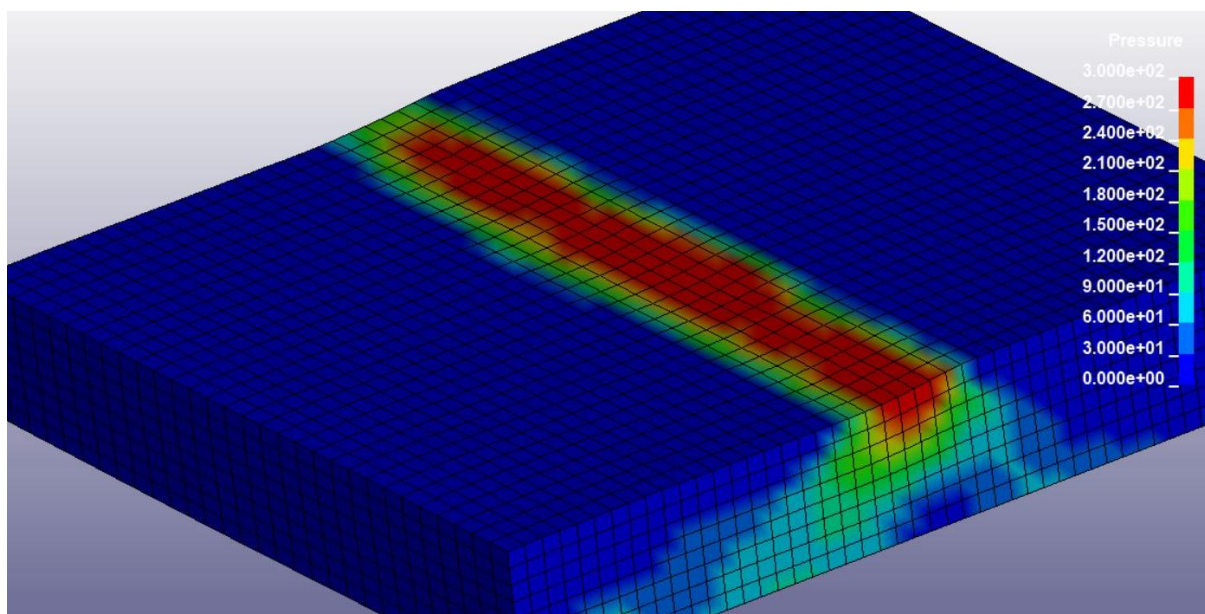
$$\text{Crown (\%)} = \frac{t_{middle} - t_{edge}}{t_{middle}} \times 100 \quad 6.1$$

Όπου t_{middle} είναι το πάχος της πλάκας στο κέντρο κατά πλάτος και t_{edge} το πάχος στις άκρες. Η πρόβλεψη της εξέλιξης της επιπεδότητας απαιτεί ένα επικυρωμένο μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο είναι κρίσιμο για τη βιομηχανία. Η δύναμη διαχωρισμού και η θερμοκρασία είναι οι δύο κύριοι παράγοντες που συγκρίθηκαν και επικυρώθηκαν βάσει πειραματικών δεδομένων. Στην Εικόνα 6.1 φαίνεται ένα στιγμιότυπο της προσομοίωσης σε λεπτή πλάκα, στο οποίο φαίνεται η κατανομή των ενεργών τάσεων. Με σκούρο μπλέ φαίνονται οι περιοχές με μηδενικές τάσεις ενώ με κόκκινο φαίνονται οι περιοχές με τις υψηλότερες τάσεις. Στο απαραμόρφωτο υλικό δεν φαίνεται να συκεντρώνονται τάσεις, ενώ οι μέγιστες τιμές τάσεων βρίσκονται στα σημεία επαφής του ραούλου εργασίας με την πλάκα αλουμινίου, καθώς και στην επιφάνεια ραούλου εργασίας με το ράουλο αντιστήριξης. Εντός της πλάκας υπάρχει κατανομή τάσεων, η οποία διαφέρει στο πάχος και στο πλάτος του υλικού. Στην Εικόνα 6.2 φαίνεται στιγμιότυπο της προσομοίωσης της κατανομής της πίεσης κατά την έλαση χονδρής πλάκας.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

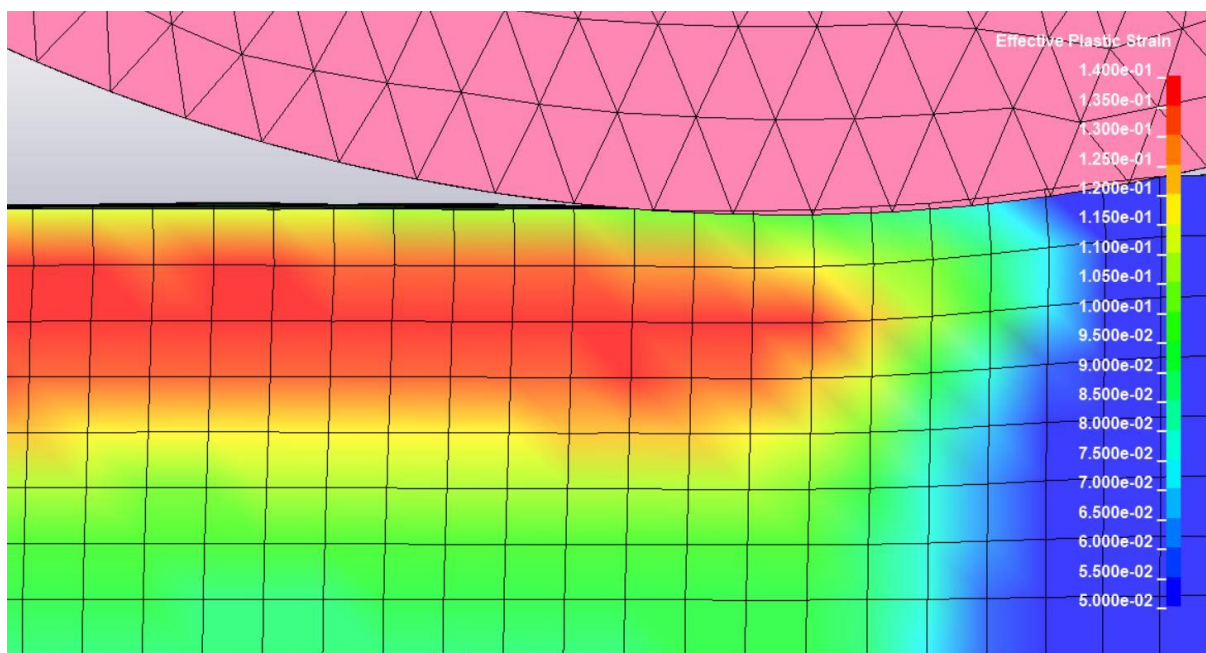


Εικόνα 6.1. Στιγμιότυπο προσομοίωσης υπολογισμού των τάσεων von mises σε λεπτή πλάκα και στα ράουλα εργασίας και αντιστήριξης σε (MPa).

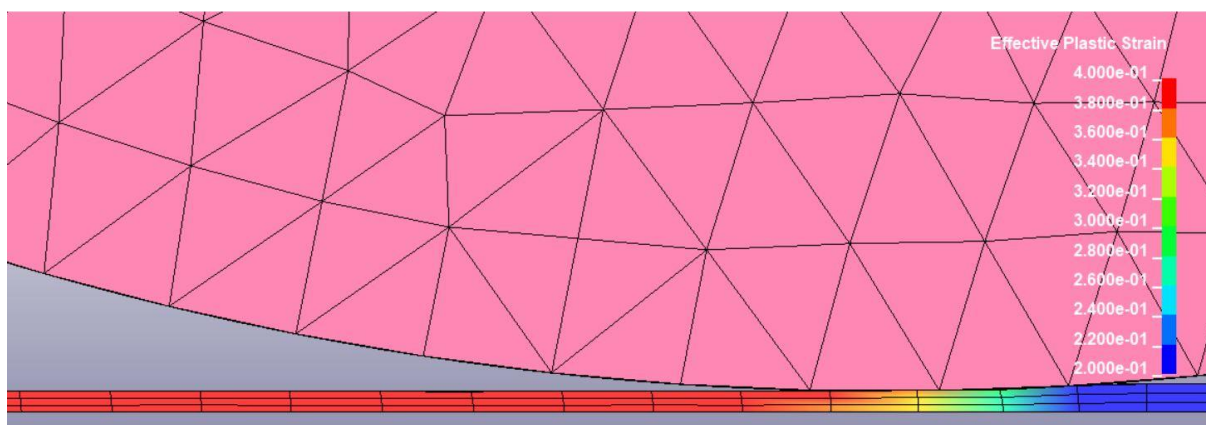


Εικόνα 6.2. Στιγμιότυπο της προσομοίωσης της κατανομής της πίεσης κατά την έλαση σε χονδρή πλάκα σε (N/mm²).

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



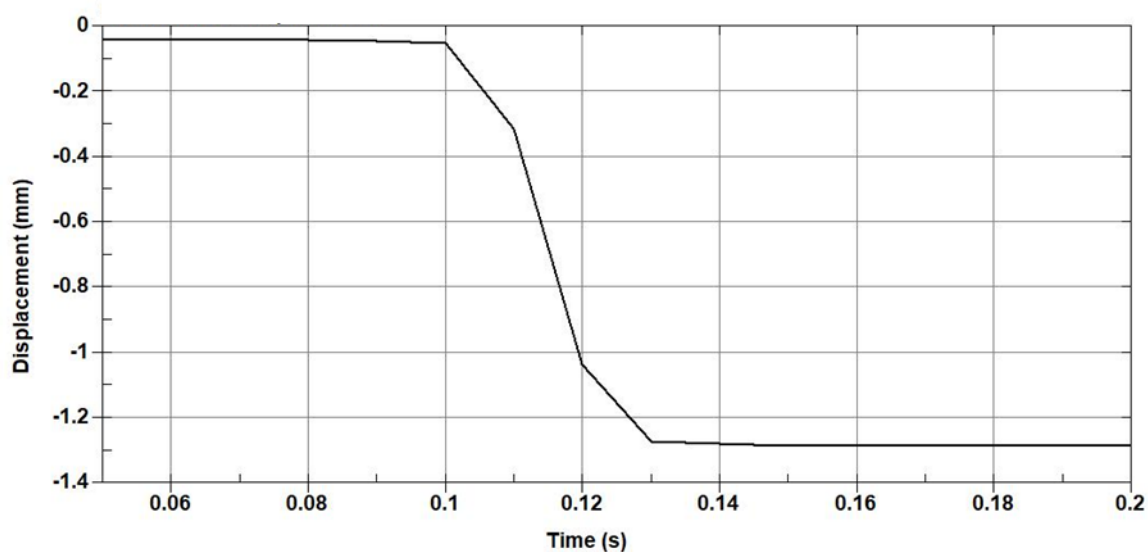
Εικόνα 6.3. Στιγμιότυπο της προσομοίωσης της κατανομής της πλαστικής παραμόρφωσης κατά το πάχος σε χονδρή πλάκα



Εικόνα 6.4. Στιγμιότυπο της προσομοίωσης της κατανομής της πλαστικής παραμόρφωσης κατά το πάχος σε λεπτή πλάκα

Στην Εικόνα 6.3 και στην Εικόνα 6.4 φαίνεται η κατανομή της πλαστικής παραμόρφωσης κατά το πάχος μιας λεπτής και μιας χονδρής πλάκας αντιστοίχως. Η κατανομή στην λεπτή πλάκα είναι πιο ομοιόμορφη κατά το πάχος ενώ στην χονδρή πλάκα η πλαστική παραμόρφωση είναι πιο έντονη κοντά στην επιφάνεια σε σχέση με το κέντρο.

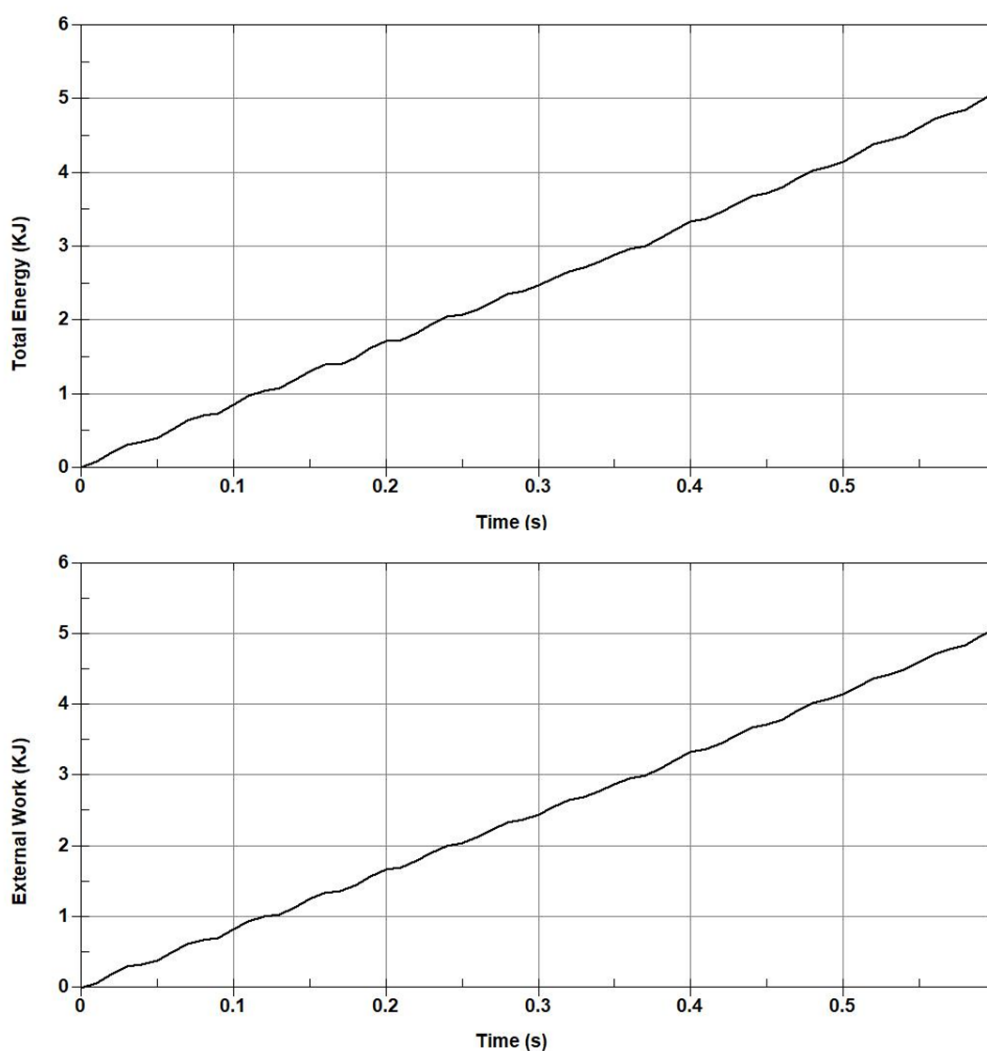
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 6.5. Μετατόπιση της επιφάνειας κατά την έλαση λεπτής πλάκας.

Στην Εικόνα 6.5 φαίνεται η μετατόπιση της επιφάνειας της λεπτής πλάκας όπου ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι μεγάλος (10 έως 20 s^{-1}). Στην Εικόνα 6.6 φαίνονται τα διαγράμματα συνολικής ενέργειας και έργου τα οποία έχουν αντίστοιχες τιμές. Αυτό υποδηλώνει ότι η ανάλυση δεν είχε προβλήματα με αστάθειες καθώς σε αντίθετη περίπτωση οι δύο αυτές καμπύλες θα είχαν απόκλιση μεταξύ τους.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

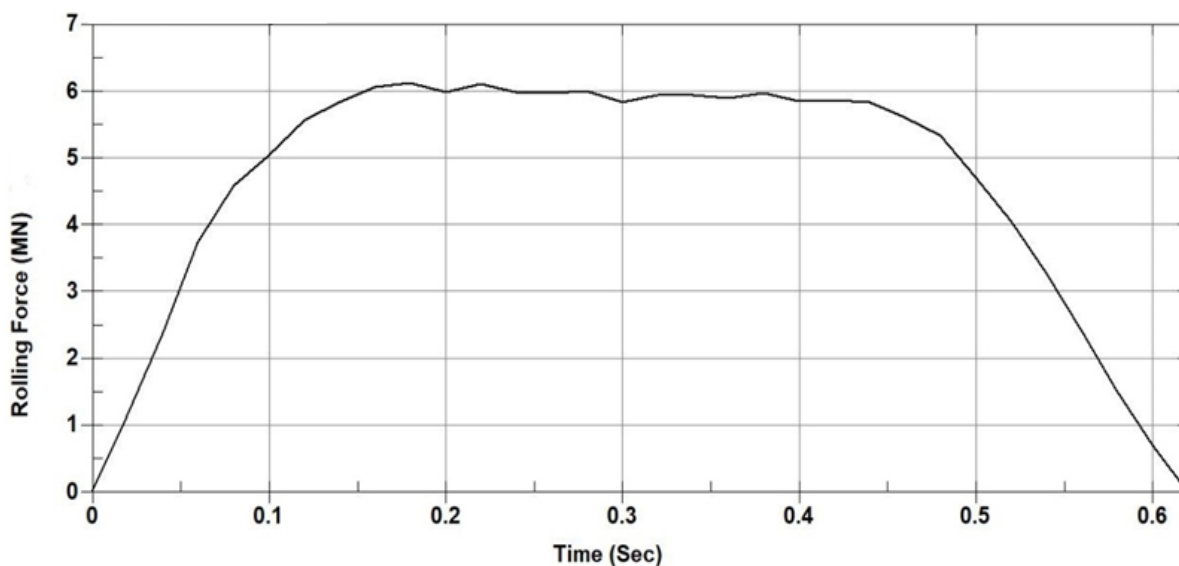


Εικόνα 6.6. Διαγράμματα συνολική ενέργειας (επάνω) και εξωτερικού έργου (κάτω) του συστήματος

6.1.1 Υπολογισμός δύναμης έλασης

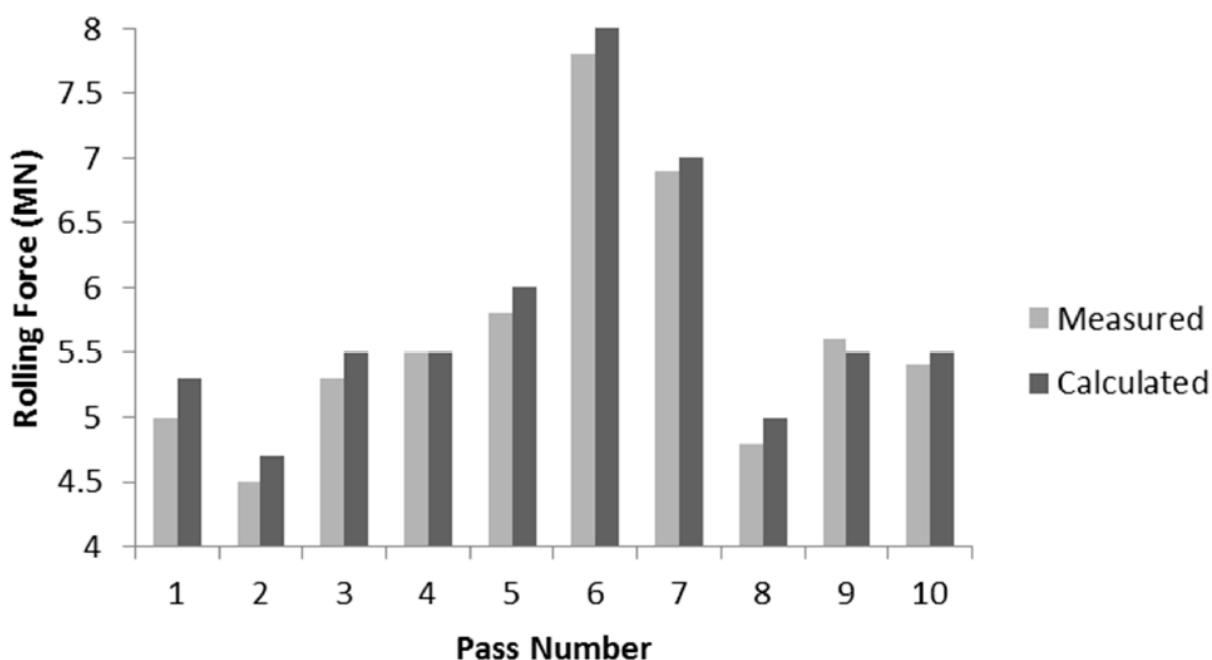
Η ανάπτυξη φορτίου έλασης σύμφωνα με τη προσομοίωση FEM απεικονίζεται στην Εικόνα 6.7. Αφού η πλάκα έρθει σε επαφή με ράουλα εργασίας, η δύναμη ανεβαίνει μέχρι να αγγίξει την τιμή στόχου, όπου παραμένει σχεδόν σταθερή σημειώνοντας ένα πλατώ. Ως φορτίο έλασης ελήφθη υπόψη ο μέσος όρος της υψηλότερης και της χαμηλότερης τιμής της δύναμης έλασης στην σταθερή κατάσταση.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 6.7. Προσομοίωση της δύναμης έλασης.

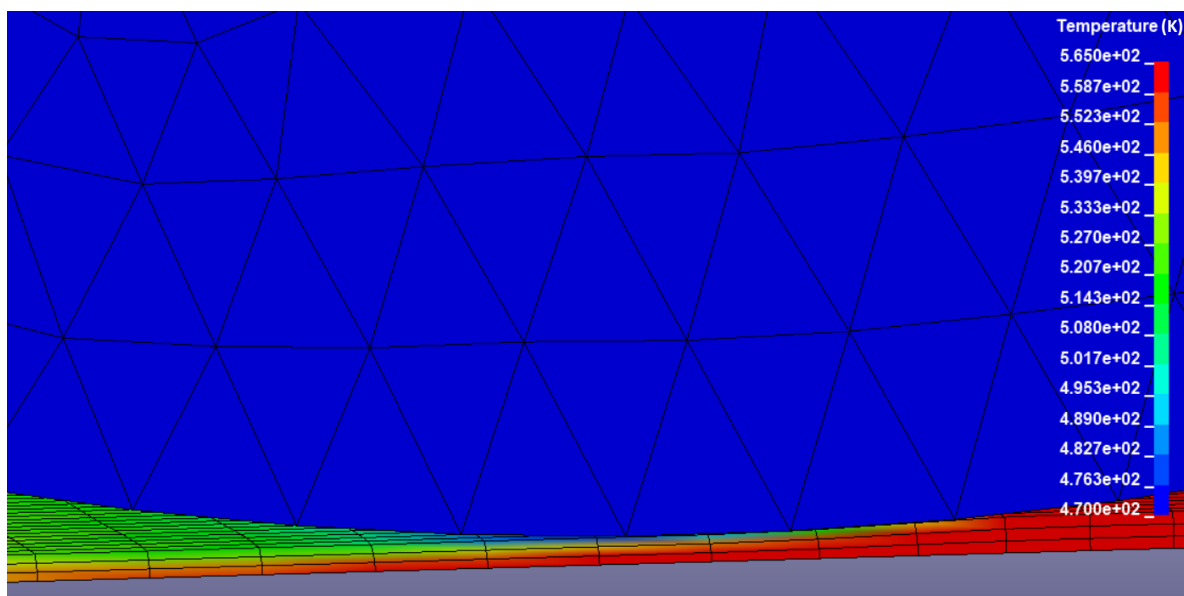
Η σύγκριση της δύναμης έλασης μεταξύ της προσομοιωμένης και της μετρούμενης τιμής παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.8 [58] για 10 διαφορετικούς υποβιβασμούς. Οι υπολογιζόμενες τιμές έρχονται σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα που μετρήθηκαν.



Εικόνα 6.8. Σύγκριση μεταξύ της μετρούμενης στο έλαστρο και της υπολογιζόμενης τιμής του φορτίου της έλασης.

6.1.2 Θερμική ανάλυση

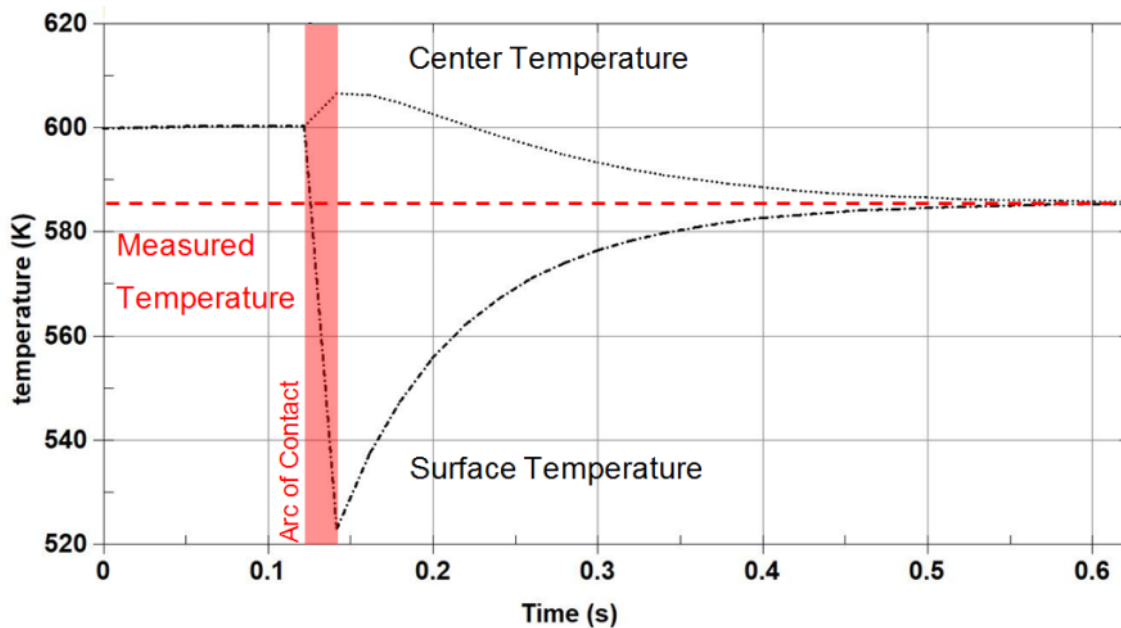
Η θερμοκρασία της επιφάνειας προσομοιώθηκε για τους ίδιους υποβιβασμούς που χρησιμοποιήθηκαν και για την επικύρωση της δύναμης έλασης. Ενδεικτικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης του τελευταίου υποβιβασμού από ένα συγκεκριμένο σχέδιο έλασης απεικονίζεται στην Εικόνα 6.9 και στην Εικόνα 6.10 [58] και είναι σε καλή συμφωνία με τις πραγματικές μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των βιομηχανικών δοκιμών χρησιμοποιώντας μια θερμο-κάμερα IR (Εικόνα 6.11). Η σύγκριση αναφέρεται στην υπολογισμένη και μετρηθείσα επιφανειακή θερμοκρασία μετά τον απαιτούμενο χρόνο, ώστε η λωρίδα να φθάσει στο σημείο μέτρησης αφού η θερμοκάμερα τοποθετείται αρκετά μέτρα μακριά από το έλαστρο.



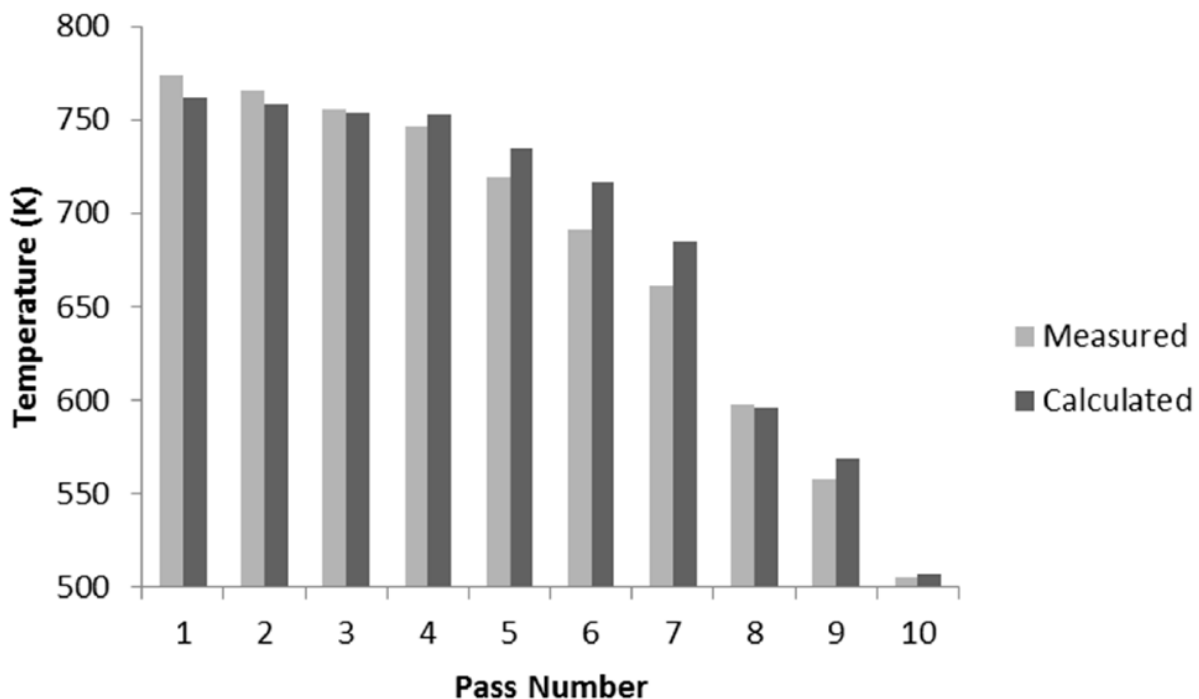
Εικόνα 6.9. Θερμοκρασιακό προφίλ ελάσματος κατά την διαδικασία της θερμής έλασης.

Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά το πάχος της πλάκας απεικονίζεται στην Εικόνα 6.10 [58]. Η ανομοιογένεια της θερμοκρασίας μπορεί να παρατηρηθεί κατά το πάχος της πλάκας, καθώς έρχεται σε επαφή με το ράουλο, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από την επιφάνεια της πλάκας προς το ράουλο. Παρ 'όλα αυτά, η θερμοκρασία καθίσταται ομοιόμορφη πάλι λίγο μετά την απομάκρυνση από το σημείο επαφής της πλάκας με το ράουλο. Η αύξηση της θερμοκρασίας, που παρατηρείται στο κέντρο της πλάκας αποδίδεται στην ενέργεια από την πλαστική παραμόρφωση.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 6.10. Εξέλιξη της θερμοκρασίας στην επιφάνεια και στο κέντρο της πλάκας.



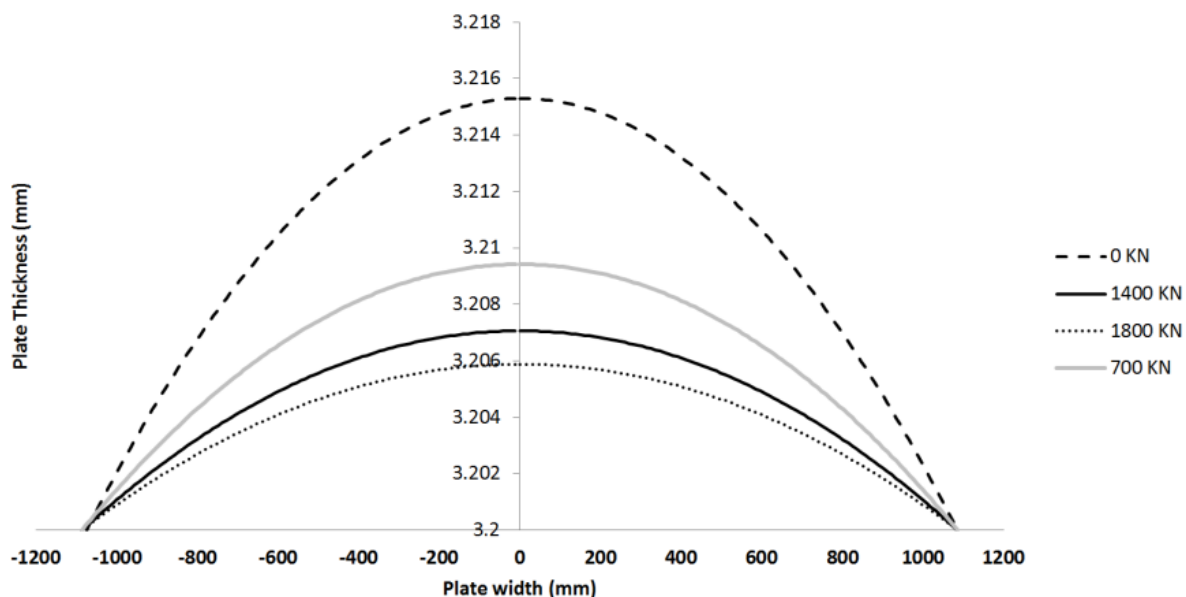
Εικόνα 6.11. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενη και υπολογιζόμενης θερμοκρασία της πλάκας.

6.1.3 Πρόβλεψη επιτεδότητας

Κατά την διάρκεια της έλασης, η κάθετη δύναμη προκαλεί την εκτροπή των κυλίνδρων με αποτέλεσμα η τελική γεωμετρία της πλάκας να μην είναι επίπεδη, αλλά με καμψύλη, όπου το πάχος στο κέντρο είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις άκρες κατά πλάτος. Η Εικόνα 6.12

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

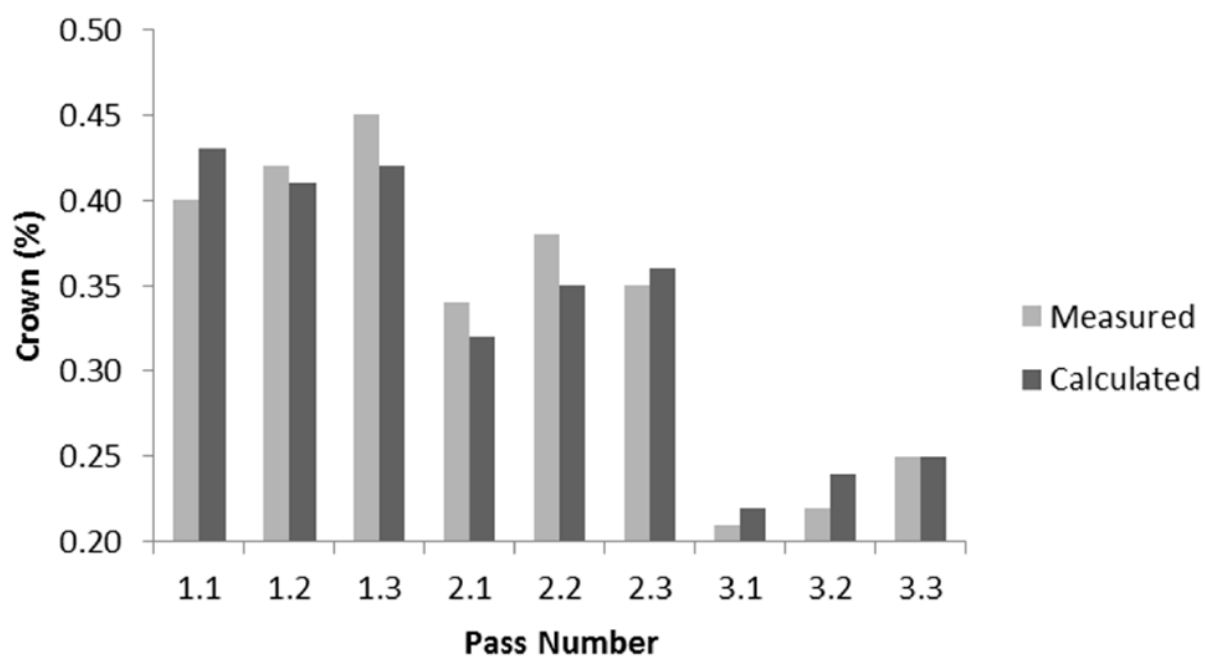
[58] απεικονίζει την επίδραση της δύναμης κάμψης στην επιπεδότητα της πλάκας που προκύπτει μετά το υποβιβασμό. Η αρχική επιπεδότητα της πλάκας πριν από αυτό τον υποβιβασμό ήταν 0.45%.



Εικόνα 6.12. Η επίδραση της καμπτικής δύναμης στην επιπεδότητα της πλάκας.

Η προσομοιωμένη επιπεδότητα συγκρίθηκε με την επιπεδότητα που προέκυψε από το ενσωματωμένο σύστημα μέτρησης του ελάστρου για διαφορετικούς υποβιβασμούς (Εικόνα 6.13) [58]. Το σύστημα μέτρησης της επιπεδότητας του ελάστρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στους τελικούς υποβιβασμούς του σχεδίου έλασης, όπου το πάχος της πλάκας πέφτει κάτω από μια κρίσιμη τιμή (<15 mm) που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της συσκευής. Παρόλο που είναι εφικτή η σύγκριση μόνο στους τελικούς υποβιβασμούς, αυτό είναι αρκετό για να θεωρηθεί το μοντέλο επικυρωμένο, το οποίο συνεπάγεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνολικά κατά την προετοιμασία του σχεδίου έλασης και την πρόβλεψη της επίδρασης των παραμέτρων της έλασης στο φορτίο της έλασης, την εξέλιξη της θερμοκρασίας και την επιπεδότητα.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 6.13. Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης επιπεδότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Εξέλιξη της θερμοκρασίας και της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας

Κατά την κατεργασία της θερμής έλασης, θερμότητα μεταφέρεται από την ζεστή πλάκα στο ράουλο εργασίας κατά την επαφή τους. Αυτό προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας. Η ακτινική διαστολή διαφέρει κατά το πλάτος του ράουλου λόγω της αξονικής ροής της θερμότητας από το μέσο του προς τις άκρες. Το αποτέλεσμα είναι η υψηλότερη διαστολή του ράουλου στο μέσο του σε σχέση με τις άκρες (Thermal Camber) [154]. Η γεωμετρία του ράουλου μεταβάλλεται δυναμικά κατά την παραγωγή και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία του ράουλου, η θερμοκρασία της πλάκας, ο χρόνος μεταξύ των υποβιβασμών, το μήκος του κάθε υποβιβασμού, ο σχεδιασμός των ψυκτικών μονάδων, η στρατηγική ψύξης, κτλ. Αυτή η μεταβολή της γεωμετρίας αποτυπώνεται στην τελική γεωμετρία του ελάσματος.

Πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην πρόβλεψη του πεδίου της θερμοκρασίας και στην μεταβολή της γεωμετρίας του ράουλου λόγω θερμικού φορτίου. Οι Tseng et al. [155] ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο, που προβλέπει την θερμική διαστολή στο μέσο του ράουλου εργασίας και έκαναν εκτίμηση της επιπεδότητας χρησιμοποιώντας την διάμετρο στις άκρες ως σημείο αναφοράς. Οι Stürmer et al. [156] διερεύνησαν την πιθανότητα της αντικατάστασης των αναλυτικών μοντέλων με ένα τρισδιάστατο μοντέλο FEM υπολογισμού της γεωμετρίας του ράουλου, το οποίο θα είναι αρκετά γρήγορο για να μπορεί να συνδεθεί απευθείας με την πραγματική παραγωγή. Οι Jiang et al. [157] κατέληξαν σε ένα απευθείας με την παραγωγή συνδεδεμένο μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιεί διαφορικές εξισώσεις σε συνδυασμό με την μέθοδο των νευρωνικών δικτύων για τον υπολογισμό της γεωμετρίας του ράουλου κατά την θερμή έλαση.

Πολλοί ερευνητές μελέτησαν, επίσης, το φαινόμενο της θερμικής διαστολής στο ράουλο εργασίας χρησιμοποιώντας την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (FDM), η οποία είναι μια κοινώς αποδεκτή μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας. Οι

Ginzburg et al. [138] ανέπτυξαν ένα απλό, αλλά πολύ αποτελεσματικό μοντέλο με το όνομα Coolflex, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές διατάξεις ελαστρων για την ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων της έλασης στο πεδίο θερμοκρασίας του ράουλου. Οι Atack et al. [154] ενσωμάτωσαν ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου, όπου το αποτύπωμα των ψεκασθήρων χρησιμοποιήθηκε σαν ανεξάρτητη μεταβλητή για την βελτιστοποίηση της στρατηγικής ψύξης. Οι Lin et al. [158] θεώρησαν μια ομοιόμορφη πηγή θερμότητας αντίστοιχη με το πλάτος της πλάκας και εφάρμοσαν μοντέλο FDM για τον υπολογισμό του πεδίου της θερμοκρασίας και της θερμικής διαστολής του ράουλου. Οι Abbaspour et al. [139] χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο FDM για την επίλυση του ισοζυγίου της ενέργειας στην ακτινική και την αξονική διεύθυνση του ράουλου εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη το πλάτος της πλάκας, τον υποβιβασμό, την θερμοκρασία της πλάκας και τον χρόνο μεταξύ των υποβιβασμών.

Το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών είναι χαμηλό αλλά πρέπει να γίνουν πολλές υποθέσεις στο μοντέλο περιορίζοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αναγνωρίζεται από την επιστημονική κοινότητα για την θερμο-μηχανική προσομοίωση λόγω της αυξημένης ποιότητας των αποτελεσμάτων, καθώς και της δυνατότητας του ορισμού ρεαλιστικών οριακών συνθηκών και περιορισμών σε πολύπλοκα μοντέλα. Οι Guo et al. (2006) [72] ανέλυσαν το θερμοκρασιακό πεδίο και την εξέλιξη της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας με ένα απλοποιημένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων FEM. Οι Benasciutti et al. [73] και Li et al. [74] πρότειναν μοντέλα για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου, καθώς και των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω ανισοκατανομής της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του ράουλου κατά την θερμή έλαση. Οι Trull et al. [70] ανέπτυξαν ένα μοντέλο FEM που συμπεριλαμβάνει όλα τα βασικά μέρη του ελαστρου, συμπεριλαμβανομένης της μεταβαλλόμενης γεωμετρίας του ράουλου λόγω θερμικού φορτίου, για την προσομοίωση της εξέλιξης της επιπεδότητας της πλάκας. Οι Bao et al. [71] διερεύνησαν την κατανομή της θερμοκρασίας στο ράουλο εργασίας κάνοντας χρήση συζευγμένου θερμο-μηχανικού μοντέλου με ηλεκτρομαγνητική ανάλυση προκειμένου να συμπεριληφθεί το φαινόμενο της επαγωγικής θέρμανσης του ράουλου εργασίας στην ανάπτυξη θερμοκρασίας στην επιφάνεια του. Οι Deng et al. [140] ανέπτυξαν ένα λεπτομερές μοντέλο FEM για την

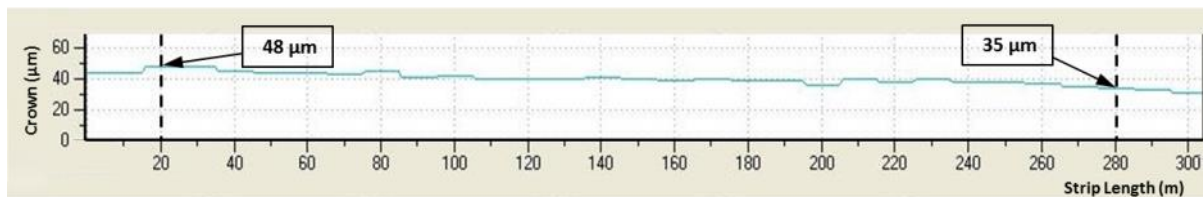
διερεύνηση της ανάπτυξης της θερμοκρασίας στο ρυθμό οξείδωσης ράουλου εργασίας από χάλυβα HSS κατά την διάρκεια της θερμής έλασης.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης και της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας με την χρήση θερμο-μηχανικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων FEM. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας της πλάκας, της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας και η χρήση διαφορετικών ψυκτικών μονάδων στην εξέλιξη της θερμοκρασίας και της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας. Για τις παραμέτρους έλασης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βιομηχανικής παραγωγής και τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για την βελτιστοποίηση της μεθόδου παραγωγής.

7.1 Επικύρωση θερμικού μοντέλου

Το μοντέλο θεωρήθηκε αξιόπιστο αφού επικυρώθηκε χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα. Η επικύρωση είναι συχνά πολύ δύσκολη στο επιθετικό βιομηχανικό περιβάλλον το οποίο έχει και πολλούς περιορισμούς. Ένα παράδειγμα αυτών των περιορισμών είναι η δυναμική μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του ράουλου εργασίας λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, του περιορισμένου χώρου και των ατμών νερού και λιπαντικών που περιορίζουν σημαντικά την ποιότητα της μέτρησης. Επιπλέον, η μέτρηση της αλλαγής της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας κατά την έλαση είναι πρακτικά αδύνατη. Ακόμα και η στατική μέτρηση της γεωμετρίας είναι πολύ δύσκολη καθώς το ράουλο πρέπει να αφαιρεθεί από το έλαστρο για μια τέτοια μέτρηση κάτι το οποίο χρειάζεται τόσο χρόνο που η μέτρηση θα είναι μη ρεαλιστική. Επομένως, η επικύρωση βασίστηκε στην υπόθεση πως η αλλαγή γεωμετρίας του ράουλου αποτυπώνεται στην επιτεδότητα του της πλάκας μετά την έλαση η οποία μπορεί εύκολα να μετρηθεί από το ενσωματωμένο στο έλαστρο σύστημα μέτρησης το πάχους της πλάκας. Συνεπώς, η διαφορά μεταξύ της επιτεδότητας της πλάκας από την αρχή έως το τέλος του μήκους του υποβιβασμού συγκρίθηκε με την εξέλιξη της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας κατά τον ίδιο υποβιβασμό. Το αποτέλεσμα της πρωτότυπης καταγραφής της επιτεδότητας της πλάκας φαίνεται στην Εικόνα 7.1.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 7.1. Καταγραφή της επιπεδότητας της πλάκας κατά το μήκος της από το εγκατεστημένο στο έλαστρο μετρητικό όργανο υψηλής ακρίβειας.

Η μέτρηση αναφέρεται σε τελευταίο υποβιβασμό και συγκεκριμένα από τα 6.6 mm στα 4.4 mm, με θερμοκρασία εισόδου τους 560 K και μέση δύναμη έλασης τα 5.8 MN. Η θερμοκρασία του ράουλου μετρήθηκε πριν από τον υποβιβασμό 340 K. Τα δεδομένα της πραγματικής καταγραφής συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ίδιου υποβιβασμού. Τα πρώτα 20 μέτρα αφαιρέθηκαν από τον υπολογισμό καθότι είναι αυτά που συμβαίνουν αστάθειες και τοπικά φαινόμενα, ωστόσο το θερμικό φορτίο κατά την διάρκεια αυτών λήφθηκε υπόψη στην προσομοίωση.

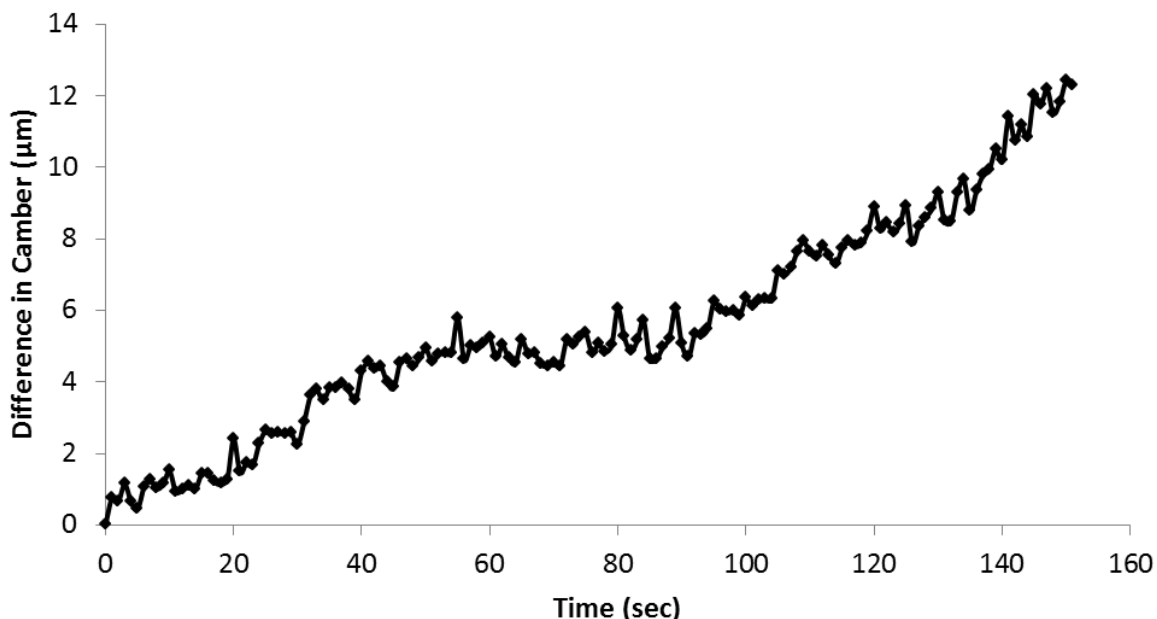
Για τον υπολογισμό της εξέλιξης της καμπυλότητας του ράουλου εργασίας (Camber) χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$\text{Difference in Camber} = \Delta R_t - \Delta R_o \quad 7.1$$

Όπου ΔR_t η διαφορά μεταξύ ακτίνας του ράουλου στο κέντρο και της ακτίνας στην άκρη της πλάκας για t sec και ΔR_o η αρχική διαφορά ακτίνας.

Στην Εικόνα 7.2 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου. Η καμπυλότητα το ράουλου αυξάνεται κατά ~10 μm κατά την διάρκεια 150 sec.

Roll Thermal Camber Evolution



Εικόνα 7.2. Εξέλιξη της καμπυλότητας του ράουλου εργασίας κατά την διάρκεια του υποβιβασμού.

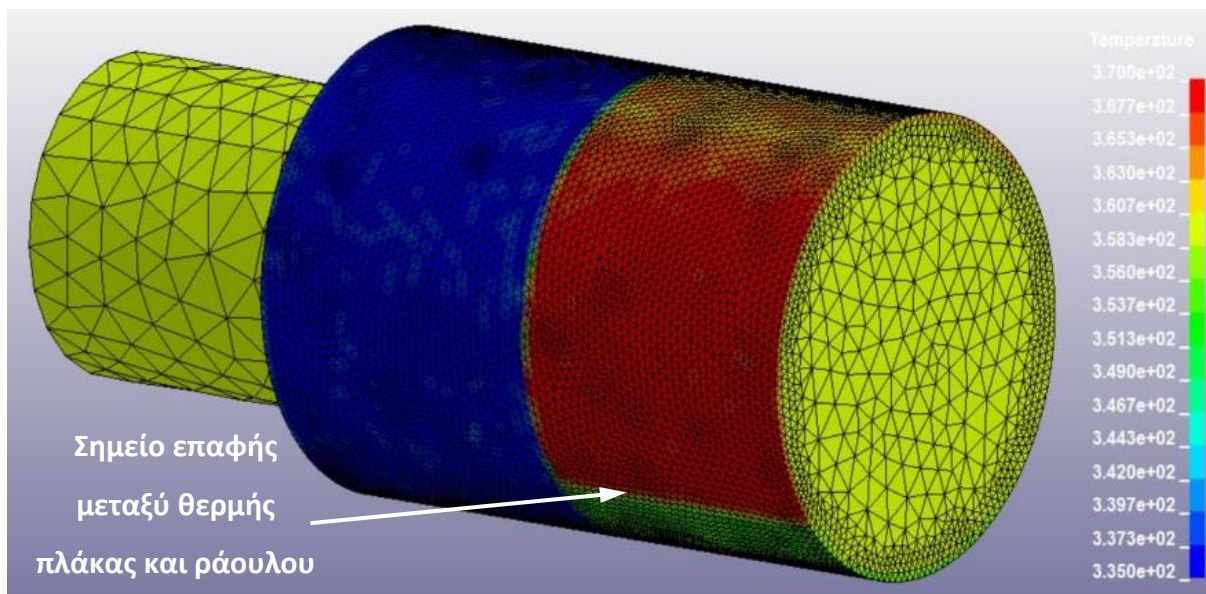
Η αύξηση αυτή της καμπυλότητας του ράουλου εργασίας συγκρίθηκε με την μείωση της επιπεδότητας στην πλάκα. Όπως φαίνεται και από την αντίστοιχη καταγραφή του παχυμέτρου στην έξοδο του θερμού ελάστρου η επιπεδότητα μειώθηκε κατά 13 μm κατά την διάρκεια του υποβιβασμού. Η μεταβολή της καμπυλότητας του ράουλου έρχεται σε καλή συμφωνία με την μεταβολή της επιπεδότητας καθώς όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.2 υπολογίστηκε 12.3 μm για χρόνο που αντιστοιχεί στο μήκος της πλάκας σύμφωνα με την Εικόνα 7.1. Στην συνέχεια το μοντέλο θεωρήθηκε αξιόπιστο για περαιτέρω μελέτη.

7.2 Θερμική ανάλυση

Η Εικόνα 7.3 απεικονίζει ένα χαρακτηριστικό στιγμιότυπο της προσομοίωσης του πεδίου θερμοκρασίας που σχηματίζεται στο ράουλο εργασίας κατά την έλαση. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι περιοχές με την υψηλότερη θερμοκρασία στην επιφάνεια του ράουλου που έχει έρθει σε επαφή με την θερμή πλάκα. Η περιοχή της επιφάνειας του ράουλου που έχει έρθει σε επαφή με την θερμή πλάκα στην συνέχεια κρυνώνει γρήγορα περνώντας από την ψυκτική μονάδα έως ότου επανέλθει στην αρχική του θερμοκρασία που είχε πριν την

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

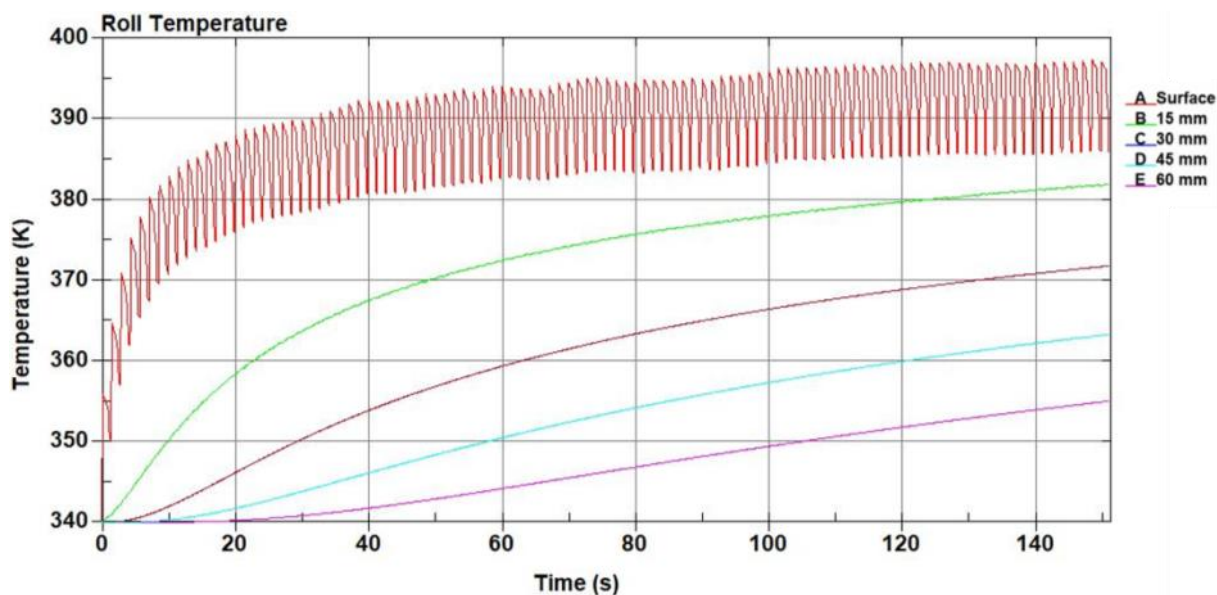
επαφή της με την πλάκα με την προϋπόθεση ότι το ράουλο είναι σε θερμική ισορροπία. Με σκούρο μπλέ φαίνονται οι περιοχές με χαμηλή θερμοκρασία στο σημείο που το ράουλο ψύχεται από την ψυκτική μονάδα στα σημεία πιο έξω από το πλάτος της πλάκας. Το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης είναι αντίστοιχο του πλάτους της θερμής πλάκας.



Εικόνα 7.3. Στιγμιότυπο της θερμικής προσομοίωσης του ράουλου εργασίας.

Στην Εικόνα 7.4 φαίνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στην επιφάνεια, και σε βάθος 15, 30, 45 και 60 mm από την επιφάνεια. Όπως φαίνεται, η θερμοκρασία επιφανείας ισορροπεί μετά από περίπου 60 sec από την έναρξη του υποβιβασμού, ενώ σε οποιοδήποτε από τις υπολογιζόμενες αποστάσεις από την επιφάνεια το ράουλο συνεχίζει να αυξάνει την θερμοκρασία του κάτι που δείχνει πως παρόλο που το ράουλο ισορροπεί επιφανειακά, δεν καταφέρνει να ισορροπίσει συνολικά.

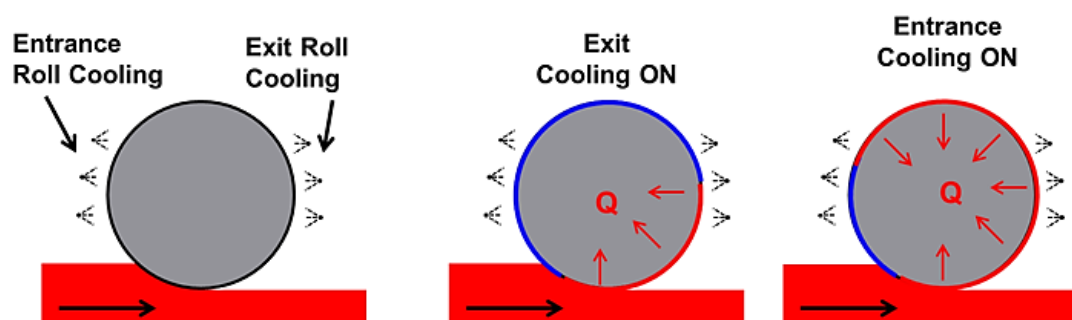
Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 7.4. Εξέλιξη της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας

7.3 Επίδραση της θέσης της ψυκτικής μονάδας

Κατά τους τελευταίους υποβιβασμούς γίνεται χρήση της ψυκτικής μονάδας που βρίσκεται από την μεριά της εισόδου της θερμής πλάκας στο έλαστρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.5. Στην περίπτωση που περιγράφεται κατά την επικύρωση (Κεφάλαιο 7.2) χρησιμοποιήθηκε ψύξη από την μεριά της εισόδου της πλάκας στο έλαστρο που είναι και η συνήθης τεχνική. Το έλαστρο έχει την δυνατότητα για ψύξη του ράουλου εργασίας από την μεριά της εξόδου, το οποίο όμως δεν χρησιμοποιείται λόγω περιορισμών που σχετίζονται με την ποιότητα της επιφάνειας.

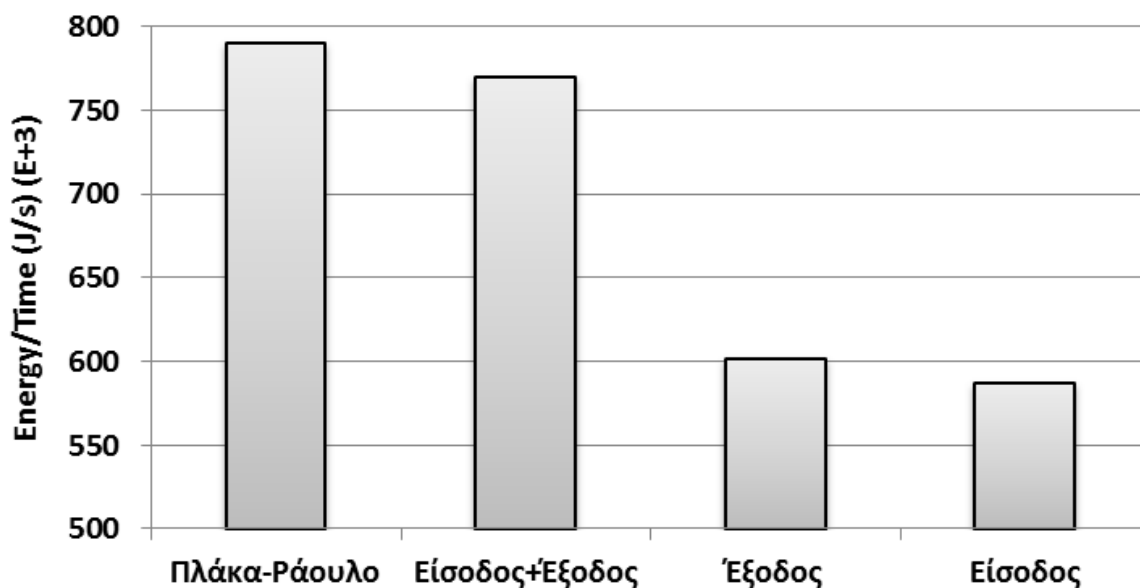


Εικόνα 7.5. Σκαρίφημα της θέσης των ψυκτικών μονάδων και της επίδρασης αυτών στο θερμικό ισοζύγιο.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Συγκριτικά στην Εικόνα 7.6 φαίνεται η διαφορά όταν χρησιμοποιείται η ψυκτική μονάδα εισόδου, εξόδου ή και οι δύο μαζί. Η εφαρμογή ψύξης από την μεριά της εξόδου είναι ~5% πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με αυτή της εισόδου, ενώ η χρήση και των δύο μονάδων βελτιώνει ~30% συνολικά την απόδοση της ψύξης.

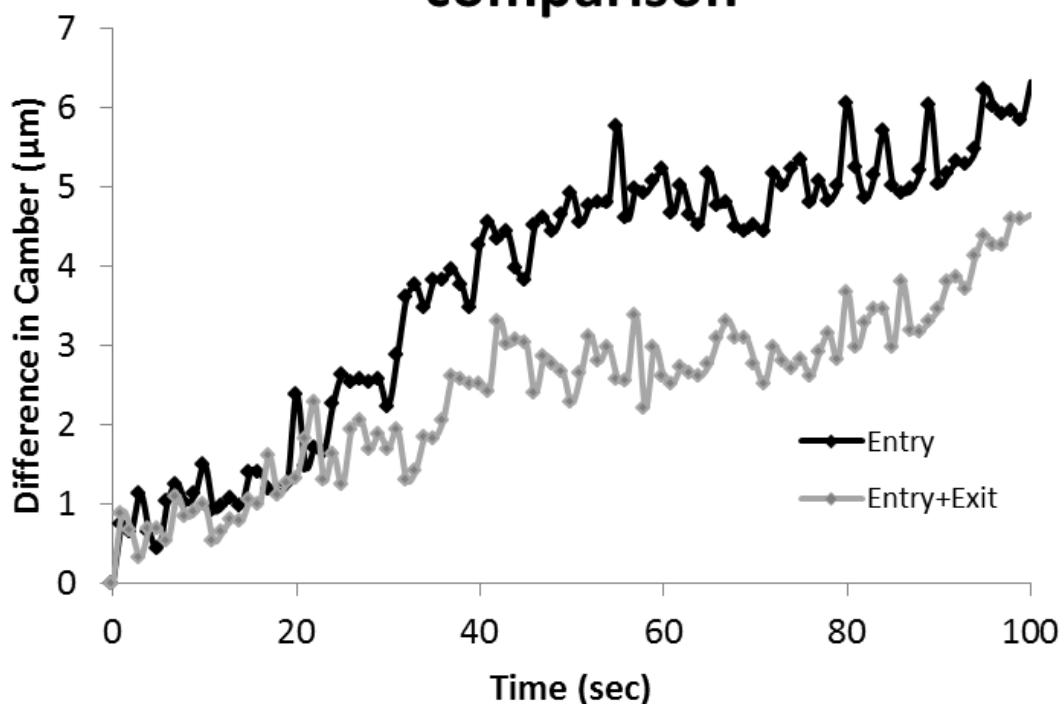
Μεταφορά θερμότητας



Εικόνα 7.6. Συνολική ροή θερμότητας από το ράουλο εργασίας προς τις ψυκτικές μονάδες

Αυτή η διαφορά της αποδοτικότητας της χρήσης και των δύο ψυκτικών μονάδων εισόδου και εξόδου αποτυπώνεται και στην εξέλιξη της καμπυλότητας του ράουλο εργασίας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.7. Μετά από 100 s κατεργασίας το ράουλο στην περίπτωση της χρήσης μόνο της μονάδας εισόδου η καμπυλότητα μεταβάλλεται κατά ~ 6 μm ενώ με την χρήση και των δύο ψυκτικών μονάδων εισόδου και εξόδου μεταβάλλεται κατά ~ 4 μm .

Entry/Both cooling units comparison

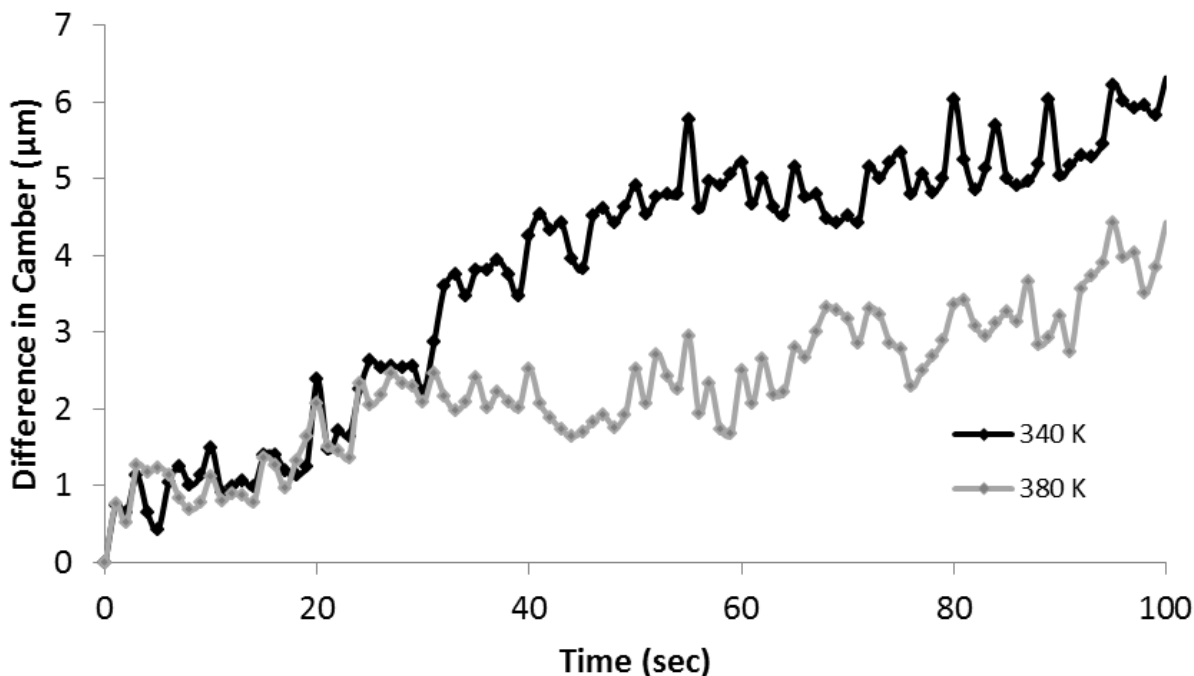


Εικόνα 7.7. Σύγκριση της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας με χρήση μόνο της ψυκτικής μονάδας εισόδου και της χρήσης των ψυκτικών μονάδων εισόδου και εξόδου ταυτόχρονα

7.4 Επίδραση της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας

Σημαντική επίδραση στην εξέλιξη της καμπυλότητας του ράουλου εργασίας έχει και η αρχική θερμοκρασία αυτού όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.8. Η μεταβολή της καμπυλότητας του ράουλου με αρχική θερμοκρασία 340 K είναι ~ 6 μm ενώ του ράουλου με αρχική θερμοκρασία 380 K είναι ~ 4 μm για 100 s κατεργασία.

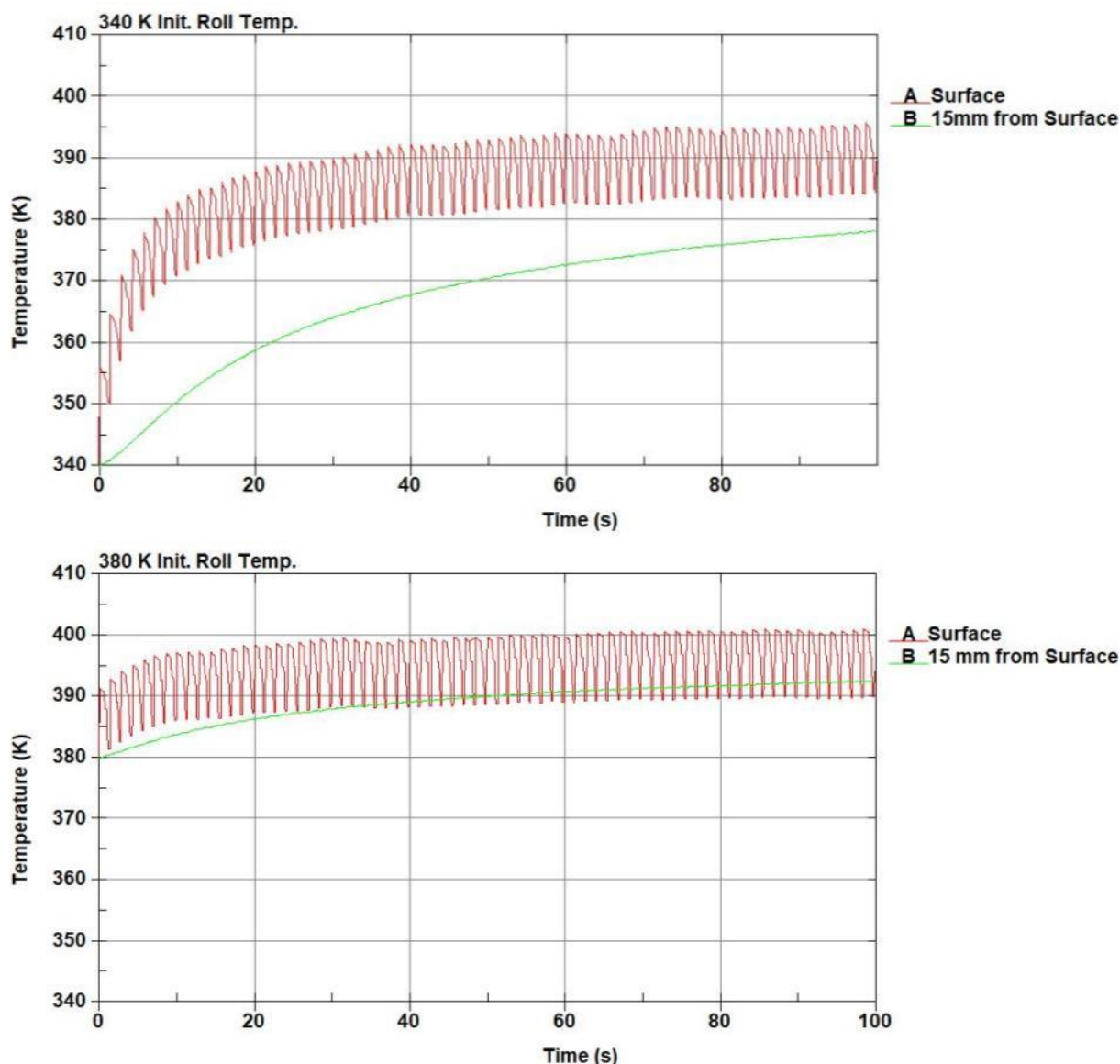
340 K/380 K initial roll temperature comparison



Εικόνα 7.8. Σύγκριση της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας για ράουλο εργασίας με αρχική θερμοκρασία 340 K και 380 K

Το υψηλότερης θερμοκρασίας ράουλο εργασίας εκτός από γεωμετρικά πιο σταθερό είναι και θερμικά πιο σταθερό κατά τον υποβιβασμό. Στην Εικόνα 7.9 φαίνεται διάγραμμα της εξέλιξης της θερμοκρασίας στην επιφάνεια και 15 mm κάτω από αυτή για ράουλα με 340 K και 380 K αρχική θερμοκρασία. Για 100 s κατεργασίας και για το σημείο 15 mm μακριά από την επιφάνεια η διαφορά θερμοκρασίας είναι 38 K ($\Delta T_{340K} = 340 - 378 = 38$ K) για το ράουλο με αρχική θερμοκρασία 340 K και 13 K ($\Delta T_{380K} = 380 - 393 = 13$ K) για το το ράουλο με αρχική θερμοκρασία 380 K. Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας παρόλο που έχει αρχική θερμοκρασιακή διαφορά 40 K μεταξύ των δύο περιπτώσεων ράουλων, σε κατάσταση ισοροπίας είναι αντίστοιχη μέση θερμοκρασία επιφάνειας και για τις δύο περιπτώσεις με τους 390 K να είναι η μέση θερμοκρασία για το ράουλο με αρχική θερμοκρασία 340 K και τους 395 K να είναι η μέση θερμοκρασία για το ράουλο με αρχική θερμοκρασία 380 K.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

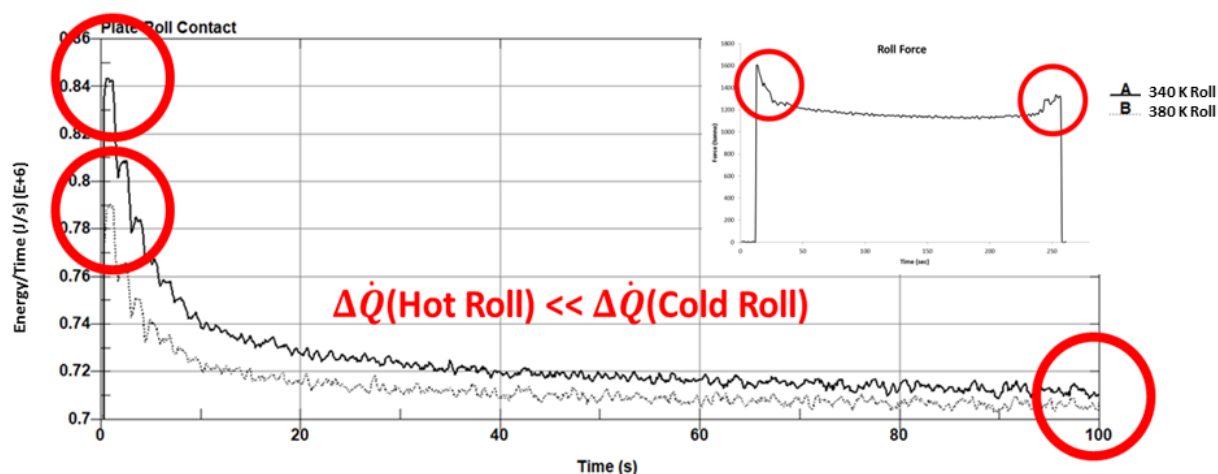


Εικόνα 7.9. Συγκριτικά διαγράμματα της εξέλιξης της θερμοκρασίας για αρχική θερμοκρασία 340 K (επάνω) και 380 K (κάτω)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.10 το πιο θερμό ράουλο εργασίας (380 K) έχει ελαφρώς χαμηλότερη απαγωγή θερμότητας (~1%) σε κατάσταση ισορροπίας, αλλά έχει σημαντικά χαμηλότερη απαγωγή θερμότητας (~7%) στην έναρξη κάθε υποβιβασμού κάτι που καθιστά πιο ομοιόμορφη την συναλλαγή θερμότητας κατά το μήκος του υποβιβασμού. Επιπλέον, η χαμηλότερη απαγωγή θερμότητας στην έναρξη κάθε υποβιβασμού θα μειώσει την διαφορά θερμοκρασίας που υφίσταται μεταξύ το εμπρόσθιου και του οπίσθιου τμήματος της πλάκας (χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το κυρίως μέρος), η οποία είναι και η αιτία για την

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

αυξημένη δύναμη, καθώς και της χαμηλής επιτεδότητας (Crown) στην αρχή και στο τέλος της πλάκας.

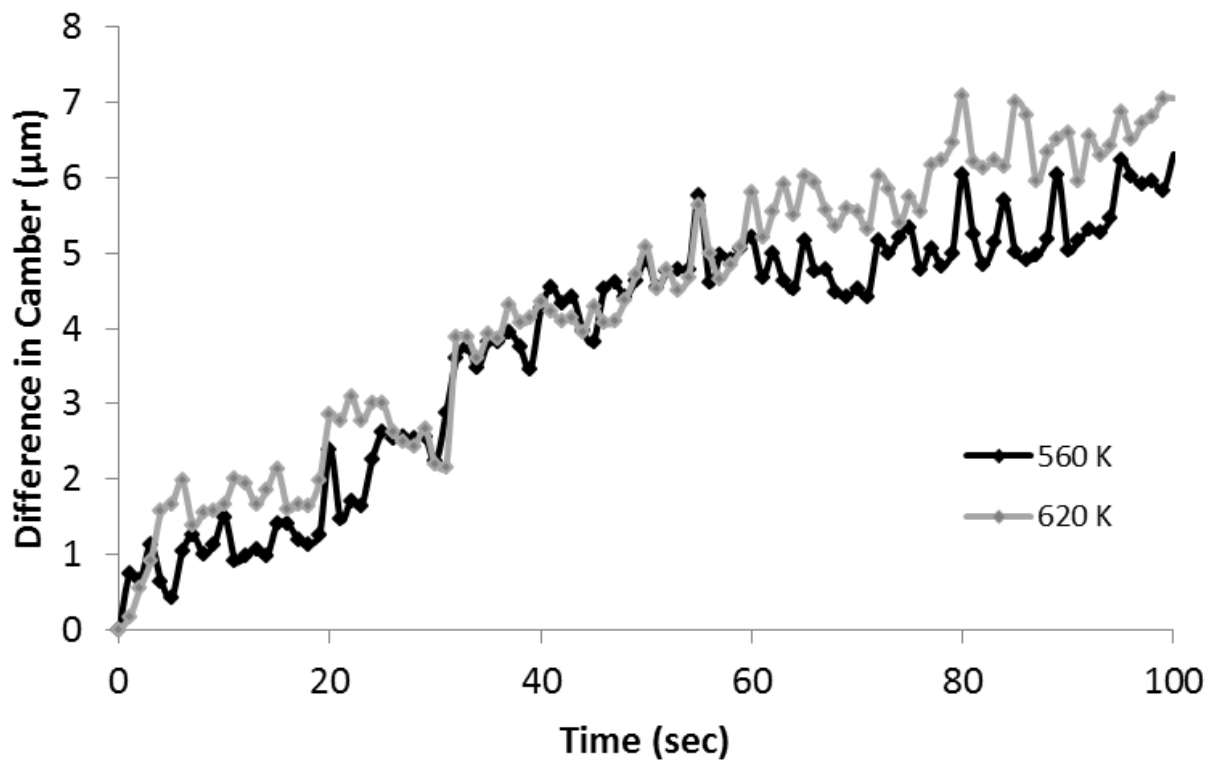


Εικόνα 7.10. Σύγκριση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ράουλων εργασίας με διαφορετική θερμοκρασία (340 K και 380 K).

7.5 Επίδραση της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας

Η θερμοκρασία της πλάκας είναι άλλος ένας παράγοντας που μπορεί να μεταβάλει το αποτέλεσμα της τελικής γεωμετρίας του ράουλου. Στην Εικόνα 7.11 φαίνεται η σύγκριση για διαφορετική θερμοκρασία εισόδου της θερμής πλάκας (560 K και 620 K). Όπως φαίνεται, η διαφορά στην τελική γεωμετρία του ράουλου διαφέρει κατά $< 1 \mu\text{m}$ για τις δύο περιπτώσεις το οποίο δείχνει ότι η θερμοκρασία της πλάκας είναι σημαντική αλλά δεν έχει τόσο ισχυρή επίδραση στην γεωμετρία του ράουλου εργασίας συγκρινόμενη με τις παραμέτρους που παρουσιάστηκαν νωρίτερα.

560 K and 620 K initial plate temperature comparison



Εικόνα 7.11. Σύγκριση της εξέλιξης της γεωμετρίας του ράουλου εργασίας για πλάκα με αρχική θερμοκρασία 560 K και 620 K

Συζήτηση για τα αποτελέσματα και Συμπεράσματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : Συζήτηση για τα αποτελέσματα

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διατριβή είχε ως στόχο να αποτελέσει ψηφιακό δίδυμο ενός πραγματικού ελάστρου και της πραγματικής κατεργασίας που συμβαίνει σε αυτό. Κάτι τέτοιο θα έδινε το πλεονέκτημα της προηγμένης ικανότητας σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων ως προς την χρήση και τον έλεγχο των παραμέτρων της κατεργασίας με φυσικό επακόλουθο την βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος αλλά και συνολικά της ανταγωνιστικότητάς του στις διεθνείς αγορές.

Είναι γνωστό ότι ένα πολύπλοκο μοντέλο εμπεριέχει πολλές υποθέσεις. Έτσι, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του βασίζονται από την μία στο σωστό σχεδιασμό του, την χρήση του βέλτιστου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (Κεφάλαιο 4), τον ακριβή ορισμό των οριακών συνθηκών και την ποιότητα των δεδομένων εισόδου και από την άλλη στα πολλά στάδια επικύρωσης του.

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού, το μοντέλο υλικού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η επιλογή του μοντέλου του υλικού γίνεται βάσει των φαινομένων που είναι απαραίτητο να περιγραφούν, αλλά και από την πολυπλοκότητά του, καθώς και τις διαθέσιμες πληροφορίες, που υπάρχουν για το συγκεκριμένο υλικό υπό προσομοίωση. Η αυξημένη πολυπλοκότητα μπορεί να δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα, αλλά χρειάζεται περισσότερο χρόνο υπολογισμού, περισσότερες πληροφορίες για το υλικό και είναι και πιο δύσκολος ο εντοπισμός σφαλμάτων σε περίπτωση που αυτά προκύψουν. Πιο συγκεκριμένα, για την θερμή έλαση και για την μελέτη της επιτεδότητας της πλάκας είναι απαραίτητο το μοντέλο υλικού να εξαρτάται από την θερμοκρασία, την παραμόρφωση και τον ρυθμό παραμόρφωσης. Το μοντέλο υλικού του Johnson-Cook που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα πολύ αποτελεσματικό μοντέλο βασισμένο στο νόμο σκλήρυνσης, το οποίο λαμβάνει επίσης υπόψη και την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης αλλά και της θερμοκρασίας. Αυτοί οι τύποι μοντέλων λειτουργούν καλά στις κατεργασίες μορφοποίησης μετάλλων όταν έχουν προσαρμοστεί για το εύρος θερμοκρασιών για το οποίο θα χρησιμοποιηθούν, καθώς η συμπεριφορά του εκτός αυτού

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

μπορεί να μην αντιστοιχεί στην πραγματική συμπεριφορά του υλικού. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις αυτό το εύρος θερμοκρασίας είναι πολύ στενό και επηρεάζεται από τα φαινόμενα ανακρυστάλλωσης και απότασης. Όταν η θερμοκρασία είναι πολύ πάνω από το σημείο ανακρυστάλλωσης του υλικού, συχνά τα μοντέλα κορεσμού, όπως το μοντέλο Voce, γίνονται πιο αποτελεσματικά. Επομένως, παρόλο που το μοντέλο Johnson-Cook αποδίδει καλά στις περισσότερες περιπτώσεις στο σχέδιο θερμής έλασης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί προσεκτικά στους πρώτους υποβιβασμούς, όπου η θερμοκρασία είναι υψηλή.

Εκτός από το μοντέλο υλικού, σημαντικά στο στάδιο του σχεδιασμού του μοντέλου είναι και τα δεδομένα εισόδου. Πρώτα αναφέρεται ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου βασίστηκαν στην ακριβή γεωμετρία ελάστρου, όπως λήφθηκαν από τα μηχανολογικά σχέδια του κατασκευαστή. Κατόπιν, χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές των αισθητήρων που είναι εγκατεστημένοι στο έλαστρο με σημαντικότερες αυτών τη μέτρηση της δύναμης έλασης, τη μέτρηση της θερμοκρασίας και τη μέτρηση της επιπεδότητας. Στο πρώτο στάδιο ήταν απαραίτητη η επικύρωση των θερμικών φαινομένων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές της θερμοκρασίας της πλάκας στην είσοδο και την έξοδο του ελάστρου. Έτσι, κατέστη εφικτός ο χαρακτηρισμός των θερμικών συνθηκών επαφής και η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ της θερμής πλάκας και του ράουλου εργασίας. Από τις καταγραφές της δύναμης, και αφού είχαν επιβεβαιωθεί τα θερμικά φαινόμενα, στη συνέχεια, μέσω σύγκρισης της μετρούμενης και υπολογιζόμενης επιπεδότητας, επιβεβαιώθηκε η ακρίβεια του μοντέλου υλικού και των οριακών συνθηκών για διαφορετικούς υποβιβασμούς. Συγκεκριμένα, το σφάλμα για την δύναμη έλασης και την προσομοίωση της θερμοκρασίας είναι $< 10\%$ ενώ το σφάλμα για τον υπολογισμό της επιπεδότητας $< 20\%$ για το εύρος των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν. Το ποσοστιαίο σφάλμα του υπολογισμού της επιπεδότητας δεν εκφράζει την ακρίβεια του υπολογισμού καθότι, όσο πιο επίπεδη είναι η πλάκα, η παραμικρή απόκλιση της μετρούμενης επιπεδότητας από την πραγματική μεταφράζεται σε πολύ μεγάλο ποσοστό σφάλματος. Στην οριακή περίπτωση που η επιπεδότητα είναι 0% τότε το ποσοστιαίο σφάλμα δεν μπορεί να υπολογιστεί καθότι κλάσμα με μηδενικό παρονομαστή δεν ορίζεται. Πιο καλή έκφραση του σφάλματος είναι η απόλυτη διαφορά της μετρούμενης με την υπολογιζόμενη επιπεδότητα όπου στην παρούσα διατριβή είναι $\leq 0.05\%$. κάτι που καθιστά

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

ικανή την χρήση του σε βιομηχανικό περιβάλλον. Τα παραπάνω παρουσιάστηκαν αναλυτικά στα Κεφάλαια 5 και 6.

Η βελτιστοποίηση του σχεδίου έλασης εφαρμόζεται συνήθως σύμφωνα με τη μεθοδολογία «δοκιμή και σφάλμα». Αυτή η προσέγγιση είναι περιοριστική λόγω του υψηλού κόστους κάθε δοκιμής, των περιορισμένων πληροφοριών που αποκτώνται από το έλαστρο και των εμπειρικών μέτρων που λαμβάνονται για τη βελτιστοποίηση. Αλλά το σημαντικότερο είναι ότι δεν βελτιώνεται η κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού και του μηχανήματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό, η προσέγγιση της προσομοίωσης καθίσταται απαραίτητη. Μετά την επικύρωση, το μοντέλο FEM παρέχει σημαντικές πληροφορίες και καθοδήγηση για το σχεδιασμό του σχεδίου έλασης όσον αφορά στη βελτιστοποίηση της επιτεδότητας, στον καλύτερο έλεγχο των παραμέτρων της κατεργασίας και στη βελτίωση της παραγωγικότητας. Επιπλέον, οι περιορισμοί της διαδικασίας και οι δυνατότητες βελτίωσης μπορούν να εντοπιστούν ευκολότερα, αφού μπορούν να πραγματοποιηθούν πολλές διαφορετικές δοκιμές σε υπολογιστικό περιβάλλον χωρίς την ανάγκη βιομηχανικής δοκιμής, η οποία έχει σημαντικά υψηλότερο κόστος και μεγαλύτερο ρίσκο. Κατά τη διάρκεια της θερμής έλασης, ο έλεγχος της δύναμης κάμψης (F_{camber}) μπορεί να είναι ο σημαντικότερος παράγοντας άμεσου επηρεασμού της επιτεδότητας κατά την κατεργασία. Η προβλέψη της επίδραση του F_{camber} στην επιτεδότητα χρησιμοποιώντας ένα επικυρωμένο μοντέλο FEM, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για ένα βελτιστοποιημένο σχέδιο έλασης.

Το μοντέλο μπόρεσε να υπολογίσει με ακρίβεια την επιτεδότητα της υπό διαμόρφωση πλάκας και, επομένως, και να προβλέψει την αντισταθμιστική δύναμη κάμψης μέσω των εγκατεστημένων υδραυλικών συστημάτων. Ωστόσο, σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες παρατηρήθηκε πώς η επιτεδότητα της πλάκας δεν παρέμενε σταθερή κατά το μήκος της, κάτι το οποίο το μοντέλο δεν θα μπορούσε να προβλέψει με τον υπάρχοντα αρχικό σχεδιασμό. Προφανώς, το μοντέλο δεν θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου χωρίς τις απαραίτητες βελτιώσεις. Η υπόθεση που έγινε και στην συνέχεια επιβεβαιώθηκε (Κεφάλαιο 7) βασίστηκε στο γεγονός ότι η επιτεδότητα της πλάκας μεταβάλλεται εξαιτίας της μεταβολής της γεωμετρίας του ράουλου από τα θερμικά φορτία της κατεργασίας. Πραγματοποιήθηκε θερμική ανάλυση στο ράουλο εργασίας χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ψυκτικών

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

μονάδων, που είναι εγκατεστημένες στο έλαστρο για την ψύξη και τα δεδομένα της συναλλαγής θερμότητας μεταξύ ράουλου εργασίας και θερμής πλάκας, όπως προέκυψε από τα προηγούμενα στάδια της μελέτης. Η ανάλυση έδειξε ότι το ράουλο εργασίας δεν φτάνει ποτέ σε θερμική ισορροπία με συνέπεια την μεταβολή της καμπυλότητάς του κατά την διάρκεια του υποβιβασμού και τον σχηματισμό γεωμετρικής και θερμικής ετερογένειας στην πλάκα.

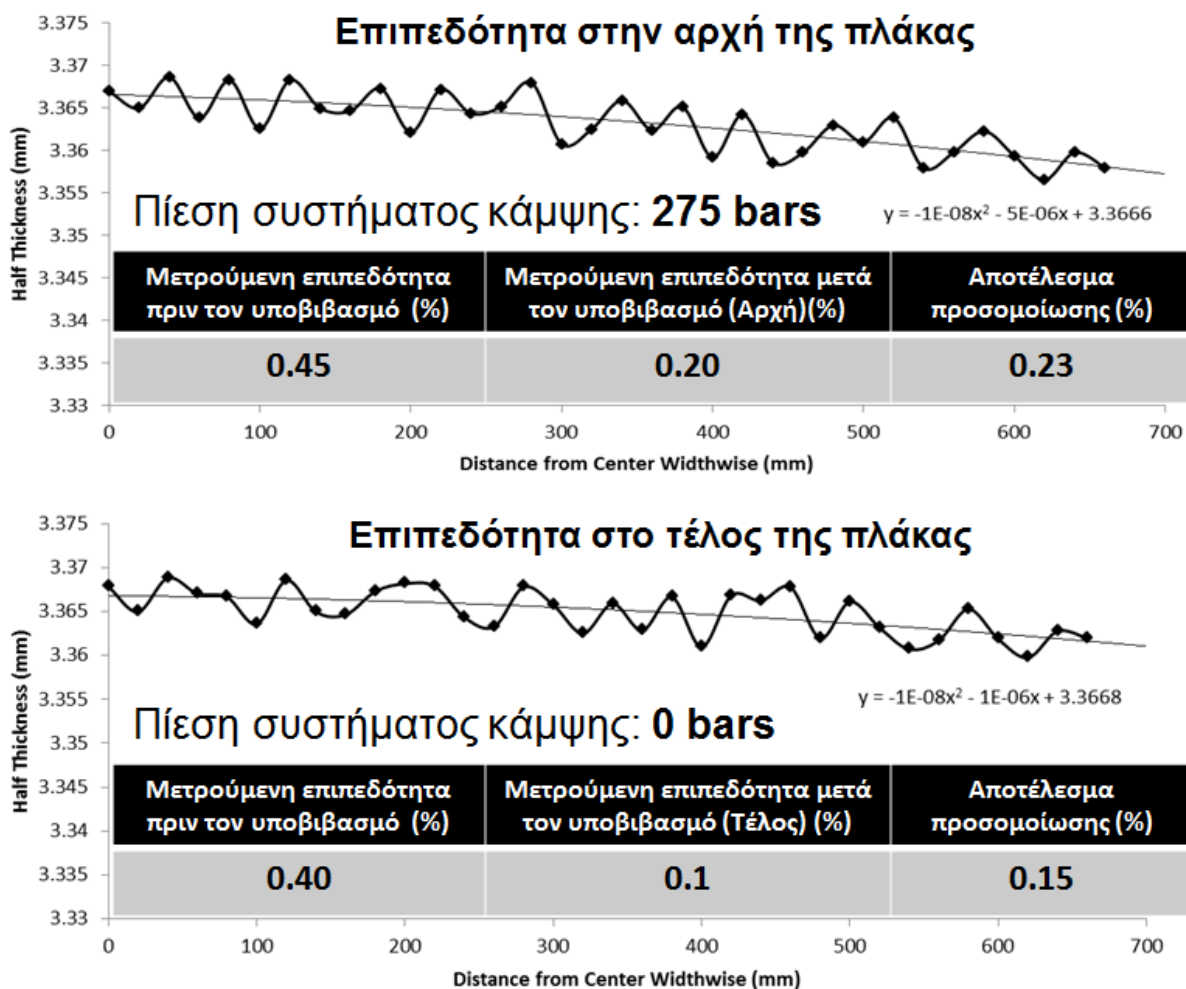
Σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες, η μέτρηση της επιπεδότητας μπορεί να γίνει μόνο κατά τη διάρκεια των τελευταίων 2-4 υποβιβασμών από την ενσωματωμένη συσκευή μέτρησης του ελάστρου. Σε περίπτωση που η επιπεδότητα έχει μεγάλη διακύμανση από την στοχευόμενη τιμή, μπορεί μερικές φορές να είναι αδύνατη η διόρθωσή της στα τελευταία περάσματα ή η διόρθωσή της μπορεί να προκαλέσει ανομοιόμορφες παραμορφώσεις (πχ. «κυματισμούς»), ειδικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων υποβιβασμών, όπως σε πολλά σχέδια έλασης όπου ο ρυθμός της ανακρυστάλλωσης είναι μειωμένος. Έτσι, η επιπεδότητα πρέπει να ελέγχεται καθ' όλη τη κατεργασία, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο μέσω της ακριβούς πρόβλεψης και σχεδιασμού του σχεδίου έλασης.

Επιπλέον, πολλές παράμετροι που επηρεάζουν την επιπεδότητα, π.χ. η στιγμιαία γεωμετρία των ράουλων λόγω της θερμικής διαστολής και της φθοράς, μεταβάλλονται δυναμικά. Συνήθη πρακτική στη βιομηχανία αποτελεί η συχνή αντικατάσταση των ράουλων εργασίας λόγω της φθοράς τους. Ωστόσο, όσον αφορά στην εξέλιξη της επιπεδότητας λόγω της θερμικής διαστολής, οι μηχανικοί προσπαθούν να εκτιμήσουν την εξέλιξη της και να εξασφαλίσουν ότι όλο το μήκος της πλάκας εμπίπτει στις γεωμετρικές προδιαγραφές παρά στην διακύμανση του πάχους. Ακόμα και στην περίπτωση που το έλαστρο είναι εφοδιασμένο με αυτόματο σύστημα διόρθωσης της επιπεδότητας ή ο χειριστής είναι ικανός να την διορθώσει με δικούς του χειρισμούς στο έλαστρο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, είναι πολύ σημαντικό αυτή να ελέγχεται διαρκώς, έτσι ώστε το εύρος λειτουργίας του συστήματος κάμψης να είναι αρκετό για να επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα στην αντιμετώπιση του φαινομένου («crown»).

Μετά την προσομοίωση του θερμικού ισοζυγίου του ράουλου εργασίας, το μοντέλο προσαρμόστηκε κατάλληλα, για να μπορεί να προβλέπει και την εξέλιξη της καμπυλότητας του ράουλου. Χαρακτηριστική περίπτωση φαίνεται στην Εικόνα 8.1, όπου για συγκεκριμένο

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

υποβιβασμό αποδείχθηκε ότι παρά την χρήση μεταβλητής πίεσης στο σύστημα κάμψης δεν είναι εφικτή η πλήρης εξομάλυνση της επιπεδότητας. Ο υποβιβασμός ξεκίνησε με 0 bar πίεση και σταδιακά αυξήθηκε μέχρι τα 275 bar, το οποίο είναι και το άνω όριο του συστήματος. Παρά την χρήση όλου του εύρους του συστήματος, η επιπεδότητα στην αρχή υπολογίστηκε 0.23 μm και στο τέλος 0.15 μm. Πραγματοποιήθηκε και βιομηχανική δοκιμή, η οποία επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Εικόνα 8.1. Σύγκριση της μετρούμενης και της υπολογιζόμενης επιπεδότητας για την αρχή και το τέλος υποβιβασμού με χρήση μεταβλητής πίεσης του υδραυλικού συστήματος κάμψης

Για να εξομαλυνθεί η επιπεδότητα κατά το μήκος της πλάκας είναι απαραίτητα τα αντισταθμιστικά μέτρα για την βελτίωση της θερμικής και της γεωμετρικής ισορροπίας του ράουλου εργασίας. Μέσω της προσομοίωσης προέκυψε πως οι βασικοί παράγοντες που

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

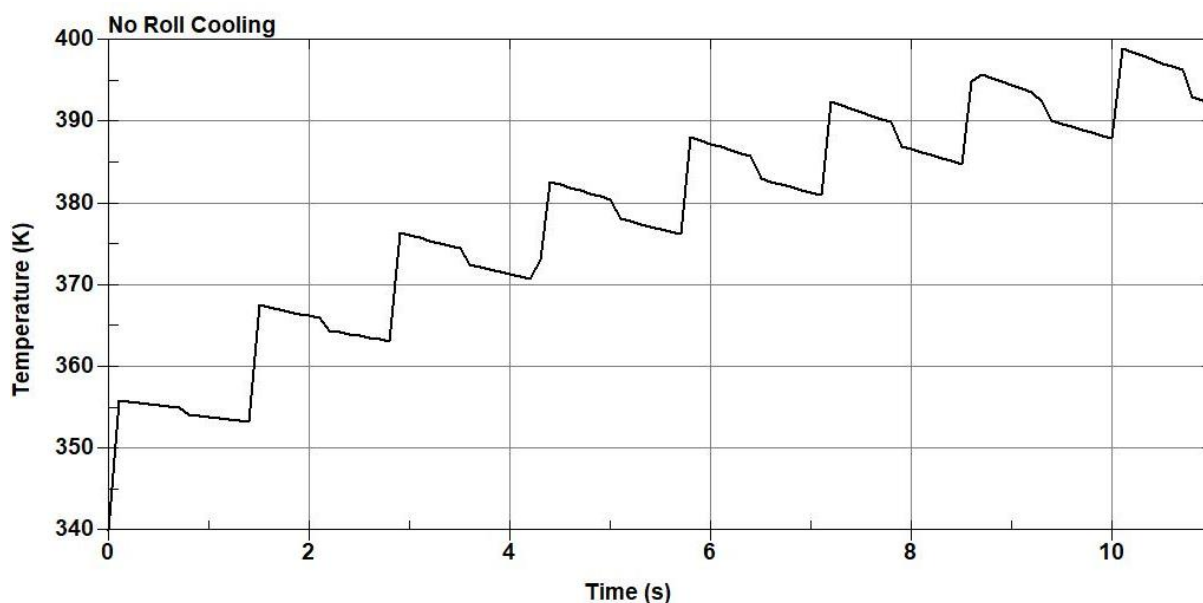
παίζουν ρόλο σε αυτό το φαινόμενο είναι η θερμοκρασία του ράουλου εργασίας, αλλά και η στρατηγική ψύξης του ράουλου.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η χρήση της μονάδας ψύξης στην έξοδο του ελάστρου κατά την κατεργασία της έλασης θα επέφερε βελτίωση στην ψυκτική απόδοση του συστήματος με αποτέλεσμα την γεωμετρική σταθερότητα του ράουλου εργασίας. Είναι γνωστοί οι περιορισμοί της χρήσης της ψυκτικής μονάδας εξόδου, που κυρίως αποφεύγεται λόγω προβλημάτων στην ποιότητα επιφανείας του τελικού προϊόντος όταν το ψυκτικό μέσο πέφτει στην επιφάνεια της πλάκας μετά την επαφή του με το ράουλο. Στην ψυχρά έλαση το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σημαντικό. Στην θερμή έλαση η θερμοκρασία της εξόδου της πλάκας είναι αρκετά πάνω από το σημείο βρασμού του νερού, από το οποίο αποτελείται κατά 98% το ψυκτικό μέσο, με αποτέλεσμα αυτό να βράζει κατά την επαφή του με την πλάκα και να σχηματίζει μια λεπτή ταινία ατμού μεταξύ της θερμής πλάκας και της περίσσειας ψυκτικού μέσου. Έτσι, το ψυκτικό μέσο επιπλέει στην επιφάνεια της πλάκας και απομακρύνεται με την χρήση ειδικών φυσητήρων. Μέσω επανασχεδιασμού του συστήματος των φυσητήρων η απομάκρυνση του ψυκτικού μέσου από την επιφάνεια της πλάκας μπορεί να γίνει αποτελεσματικότερη, πράγμα που θα καταστήσει δυνατή και τη χρήση της ψυκτικής μονάδας εξόδου μετά τον εκάστοτε υποβιβασμό.

Από την άλλη, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Ένας εξ αυτών είναι η παύση της χρήσης της ψύξης του ράουλου καθ' όλη την διάρκεια μεταξύ διαδοχικών υποβιβασμών, κάτι που μπορεί να αντιστοιχεί και σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% του συνολικού χρόνου έλασης. Αποτέλεσμα της συνεχούς ψύξης του ράουλου εργασίας, ακόμα και κατά την διάρκεια μεταξύ των υποβιβασμών, αφενός αυτό είναι να είναι «κρύο» προσεγγίζοντας τους τελευταίους υποβιβασμούς και αφετέρου να μην προλαβαίνει ποτέ να έρθει σε κατάσταση ισορροπίας, ακόμα και μετά από πολλούς υποβιβασμούς. Επιπλέον, ένα κρύο ράουλο εργασίας, λόγω έντονης ψύξης του μεταξύ των υποβιβασμών, επιφέρει εντονότερη ψύξη στο πρώτο μέρος της πλάκας μέχρι η επιφάνειά του να έρθει σε θερμική ισορροπία, κάτι που διευρύνει τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της αρχής/τέλους της πλάκας και του κυρίως σώματός της.

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Το παραπάνω είναι άλλο ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο, στο οποίο αξιοποιήθηκε το μοντέλο με σκοπό την βελτιστοποίηση της κατεργασίας. Στην Εικόνα 8.2 φαίνεται η προσομοίωση της εξέλιξης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του ράουλου εργασίας στην αρχή του υποβιβασμού με απενεργοποιημένη την ψύξη. Η επιφάνεια του ράουλου έρχεται σε 10-12 s στην θερμοκρασία ισορροπίας που με ενεργοποιημένη την ψυκτική μονάδα εισόδου θα χρειαζόταν 80-100 s (Εικόνα 7.4). Το σύστημα ψύξης μπορεί απενεργοποιείται κατά την πρώτη του επαφή με την πλάκα για αυτό τον χρόνο προκειμένου να ζεσταθεί πιο γρήγορα η επιφάνεια του και, τελικά, να κρυώσει λιγότερο η πλάκα στο μπροστινό της μέρος αλλά και να φτάσει νωρίτερα σε θερμική ισορροπία.

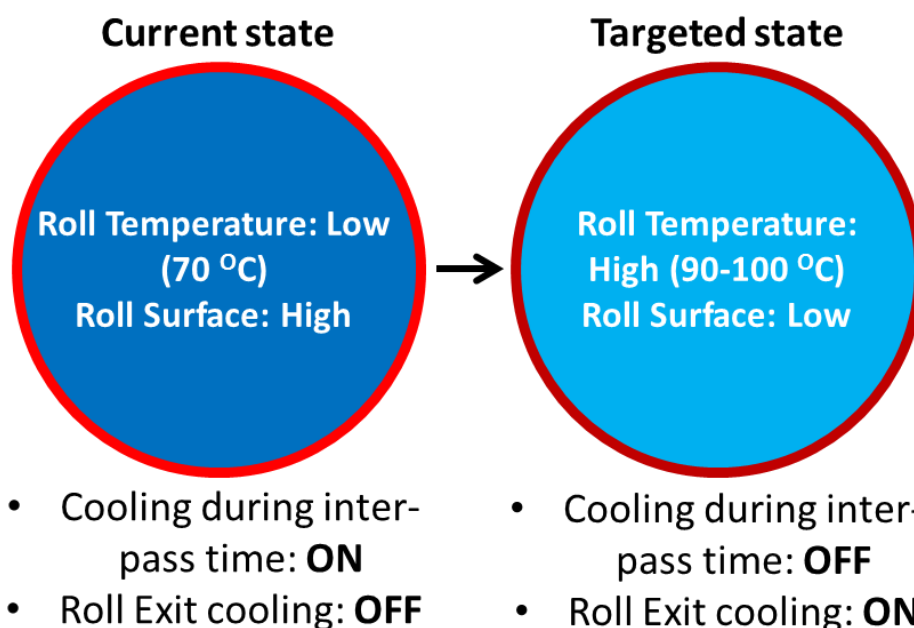


Εικόνα 8.2. Εξέλιξη της θερμοκρασίας της επιφάνειας του ράουλου εργασίας χωρίς ψύξη

Συχνά παρατηρείται το φαινόμενο να κολλάει η θερμή πλάκα στην επιφάνεια του ράουλου. Το ίδιο το ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται και για την λίπανση του ράουλου και της επαφής του ράουλου με την πλάκα. Για να επιτευχθεί καλύτερη εναπόθεση του λιπαντικού το οποίο καταλαμβάνει ένα μικρό ποσοστό του ψυκτικού μέσου (~ 2 %), είναι απαραίτητη η υψηλή θερμοκρασία του ράουλου εργασίας μεταξύ των υποβιβασμών, ώστε να απομακρυνθεί το νερό και να παραμείνει το λιπαντικό (oil plate-out) κάτι που θα βοηθήσει στο εν λόγω πρόβλημα. Επιπλέον, η υπερθέρμανση της επιφάνειας κατά την διάρκεια της κατεργασίας είναι ένας ακόμα λόγος. Η βελτίωση της ψύξης του ράουλου με την ενεργοποίηση της ψύξης εξόδου θα βοηθήσει σημαντικά στην μείωση της θερμοκρασίας επιφανείας κατά τον

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

υποβιβασμό και, επομένως, και στο συγκεκριμένο φαινόμενο. Η μείωση της μέσης θερμοκρασίας του ράουλου μέσω ψύξης στον χρόνο μεταξύ υποβιβασμών δεν θα βοηθήσει στο να παραμείνει χαμηλά η θερμοκρασία της επιφάνειας του ράουλου και, επίσης, ένα ράουλο με υψηλή μέση θερμοκρασία δεν σημαίνει ότι θα έχει πιο υψηλή θερμοκρασία επιφάνειας κατά τον υποβιβασμό. Στην Εικόνα 8.3 συνοψίζεται σχηματικά η θερμική ανάλυση και οι προτάσεις για βελτίωση προς αξιολόγηση και εφαρμογή (από τη βιομηχανία).



Εικόνα 8.3. Πρόταση για βελτίωση της θερμικής ισορροπίας του ράουλου εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : Συμπεράσματα

Το μοντέλο, που αναπτύχθηκε και επιβεβαιώθηκε στο πλαίσιο της Διατριβής αυτής μπορεί να γίνει αντιληπτό και ως ψηφιακό δίδυμο (digital twin) πραγματικού ελάστρου «4 high» κατεργασίας θερμής έλασης αλουμινίου. Η επιβεβαίωση συμπεριέλαβε στοιχεία παραγωγής, μελέτη ευαισθησίας, αναζήτηση της βέλτιστης μεθόδου για την επιστημονική προσέγγιση της προσομοίωσης. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην επιβεβαίωση της κάθετης δύναμης της έλασης, καθώς και στην επίδραση των παραμέτρων του ελάστρου ως προς την επιτεδότητα της υπό διαμόρφωσης πλάκας αλουμινίου. Ιδιαίτερα μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασιακής ανισοκατανομής σε ράουλα εργασίας και υλικό υπό διαμόρφωση κατά τη διάρκεια της έλασης λαμβάνοντας υπόψη όλους τους σχετικούς παράγοντες, που μπορεί να επηρεάσουν το αποτέλεσμα, όπως είναι για παράδειγμα η στρατηγική της ψύξης και το ύψος της κάθετης δύναμης (θέρμανση λόγω έργου έλασης) σε κάθε βήμα υποβιβασμού. Μελετήθηκε το σύνολο της εξέλιξης των υποβιβασμών κατά τη διαμόρφωση ελάσματος αλουμινίου με τελικά πάχη εντός του εύρους της θερμής έλασης (δηλ. από 2mm ως 6mm).

Αναφορικά με την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου επιστημονικής προσέγγισης, η συγκριτική μελέτη των δύο μεθόδων προσομοίωσης κατέληξε στο ότι η explicit μέθοδος είναι η καταλληλότερη για δυναμικές μελέτες, όπως η προσομοίωση της έλασης. Ο χρόνος επίλυσης ήταν αρκετά μικρότερος σε σχέση με την implicit μέθοδο και επηρεάζεται λιγότερο από μη γραμμικότητες του συστήματος.

Περαιτέρω, όπως προκύπτει από ενδελεχή επικύρωση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων προσομοίωσης από βιομηχανικά δεδομένα, το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, που κατασκευάστηκε αποτελεί αξιόπιστο εργαλείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατά την ανάπτυξη σχεδίου έλασης, αλλά και για την βελτιστοποίηση υπαρχόντων σχεδίων κατεργασιών διαμόρφωσης. Μετά την σύγκριση κρίσιμων παραμέτρων της κατεργασίας με αιχμή την κατανομή της θερμοκρασίας, του φορτίου έλασης και του αποτελέσματος της δύναμης κάμψης ως προς την επιτεδότητα της υπό διαμόρφωση πλάκας, προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

1. Η υπολογιζόμενη δύναμη έλασης, η επιπεδότητα και η θερμοκρασία της πλάκας μετά από κάθε υποβιβασμό βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις πραγματικές - βιομηχανικές μετρήσεις. Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις μεταξύ μετρούμενων στο έλαστρο και υπολογιζόμενες από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων δεν ξεπερνά το 10% για την δύναμη και την θερμοκρασία. Για την αξιολόγηση της επιπεδότητας χρησιμοποιήθηκε η απόλυτη διαφορά της μετρούμενης με την υπολογιζόμενη τιμή η οποία δεν ξεπερνά το 0.05%.
2. Η παραμόρφωση των ράουλων στους διαφορετικούς υποβιβασμούς μπορεί να ελεγχθεί εφαρμόζοντας την κατάλληλη αντίρροπη δύναμη κάμψης στα ράουλα. Ωστόσο, σε πολλά σχέδια έλασης η επιπεδότητα δεν μπορεί πλήρως να διορθωθεί μέσω της καμπτικής δύναμης.
3. Σημαντική επίδραση στην εξέλιξη της επιπεδότητας της πλάκας έχει η θερμική διαστολή του ράουλου εργασίας.
4. Η αύξηση της θερμοκρασίας του ράουλου εργασίας θα επιφέρει μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα στο ράουλο με αποτέλεσμα:
 - i. την πιο ομοιόμορφη απαγωγή θερμότητας κατά μήκος της πλάκας
 - ii. την γεωμετρική σταθερότητα του ράουλου
 - iii. την μικρότερη απαγωγή θερμότητας στα πρώτα μέτρα κάθε υποβιβασμού και, επομένως, της μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του μπροστινού και πίσω μέρους της πλάκας σε σχέση με το κυρίως μέρος της.
5. Η χρήση της ψύξης εξόδου θα επιφέρει την βελτίωση των συνθηκών ψύξης του ράουλου εργασίας.

Η χρήση του μοντέλου αποτελεί εργαλείο για τη βελτιστοποίηση σχεδίων έλασης, τροποποίηση ή προσαρμογή νέων σχεδίων έλασης για καινούργια για την παραγωγική μονάδα υλικά ή την εισαγωγή νέων προϊόντων. Η επιλογή των λειτουργικών παραμέτρων του μοντέλου, που λειτουργεί όπως προαναφέρθηκε ως ψηφιακό δίδυμο του ελάστρου, έγινε με γνώμονα και τον χρόνο υπολογισμού ο οποίος ήταν από 10-100 ώρες επίλυσης ανά δευτερόλεπτο πραγματικής κατεργασίας με οκταπύρηνο επεξεργαστή i7 και 16 GB RAM. Ενδεικτικά κάθε προσομοίωση έλασης διαρκούσε 2-4

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

ημέρες ενώ κάθε πείραμα ψύξης του ράουλου εργασίας 40-50 ημέρες, μέρος των οποίων παρουσιάζονται στην Διατριβή. Ωστόσο, με την αναβάθμιση του συστήματος ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι δυνατή η επίσπευση των υπολογισμών και ο περιορισμός τους σε μία εβδομάδα. Πρέπει να τονιστεί ότι κάθε κύκλος υπολογισμών απαιτεί προσεκτική επιλογή παραμέτρων, ενώ επιβάλλεται προσεκτική ανάγνωση των αποτελεσμάτων για την ορθή ανάλυση και επιβεβαίωσή τους. Η μεθοδολογία και η τεχνογνωσία, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της μελέτης αυτής δείχνει τον δρόμο για την συνέργεια μεταξύ Πανεπιστημίου και Βιομηχανίας.

Εν κατακλείδι, το γενικότερο συμπέρασμα της μελέτης στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής είναι ότι η χρήση πρωτοποριακών τεχνικών, η επιλογή κατάλληλης επιστημονικής προσέγγισης και ενδεδειγμένης ανάλυσης οδήγησαν στην αύξηση της στάθμης της γνώσης στο συγκεκριμένο αντικείμενο, το οποίο αφορά σε μια καταξιωμένη διεθνώς κατεργασία παραγωγής. Το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώθηκαν από μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες έλασης αλουμινίου υποστηρίζει emphatically την ακρίβεια και την ποιότητα της παρούσας προσέγγισης. Τέλος, είναι άξιο αναφοράς ότι οι συγκεκριμένες προτάσεις που κατατέθηκαν ως απαύγασμα της ανάλυσης σχετικά με την βελτίωση της παραγωγικής μεθόδου δεν έχουν αναφερθεί προηγουμένως στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι προτάσεις αυτές επικεντρώνονται στην βελτιστοποίηση της κατεργασίας της έλασης σε βιομηχανική κλίμακα και αντανakλούν τον βαθμό καινοτομίας της παρούσας επιστημονικής προσπάθειας ως σύνολο.

VIII. Βιβλιογραφία

- [1] Liu, C.; He, A.; Qiang, Y.; Guo, D.; Shao, J. (2018) Effect of Internal Stress of Incoming Strip on Hot Rolling Deformation Based on Finite Element and Infinite Element Coupling Method, *Metals*, 8, 92; doi:10.3390/met8020092.
- [2] Sun W.Q., Li B., Shao J. (2016) He A.R., Research on crown and flatness allocation strategy of hot rolling mills, *Int. J. simul. Model.* 12 2, 327-340. ISSN 1726-4529.
- [3] Nandan R., Rai R., Jayakanth R., Moitra S., Chakraborti N., Mukhopadhyay A. (2005) Regulating Crown and Flatness during Hot Rolling: A Multiobjective Optimization Study Using Genetic Algorithms, *Materials and Manufacturing Processes*, 20: 459–478.
- [4] Gavalas E., Pressas I., Papaefthymiou S. (2018) Mesh sensitivity analysis on implicit and explicit method for rolling simulation, *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 9, Issue: 4, pp.465-474, <https://doi.org/10.1108/IJSI-07-2017-0046>.
- [5] Kapil S., Eberhard P., Dwivedy S.K. (2016) Dynamic Analysis of Cold-Rolling Process Using the Finite-Element Method, *Journal of Manufacturing. Science and Engineering*, 138(4).
- [6] Linghu K., Jiang Z., Zhao J., Li F., Wei D., Xu J., Zhang X., Zhao X. (2014) 3D FEM analysis of strip shape during multi-pass rolling in a 6-high CVC cold rolling mill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Online first 1-13.
- [7] Gelin, J., Boulmane, L., Boisse, P. (1995) Quasi-static implicit and transient explicit analyses of sheet-metal forming using a C⁰ three-nodes shell element, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 50, pp. 54–69.

- [8] Sun, J., Lee, K., Lee, K. (2000) Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problem, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 105, pp. 110–118.
- [9] Yang, D., Jung, D., Song, I., Yoo, D., Lee, J. (1995) Comparative investigation into implicit, explicit, and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 50, pp. 3.
- [10] Van den Boogaard, A. H., Rietman, A. D., Huétink, J. (1998) Iterative solvers in forming process simulations, *Proceedings of the 6th International conference on Numerical Methods in Industrial forming processes - Numiform '98*, Rotterdam.
- [11] Kacou, S., Parsons, I. D (1993) A parallel multigrid method for history-dependent elastoplasticity computations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.108, pp.1–21.
- [12] Mahnken, R. (1995) A Newton-multigrid algorithm for elasto-plastic/viscoplastic problems. *Computational Mechanics*, Vol. 15, pp. 408–425.
- [13] Pauskar, P. M., Sawamiphakdi, K., Jin, D.Q. (2004) Static Implicit vs. Dynamic Explicit Finite Element Analysis for Ring Rolling Process Modeling, *AIP Conference Proceedings*, 2004, Vol. 721, pp. 412.
- [14] Prior, A. M. (1994) Applications of Implicit and Explicit Finite Element Techniques to Metal Forming, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 45, pp. 649-656.
- [15] Mattiasson, K., Bernspång, L., Honecker, A., Schedin, E., Hamman, T., Melander, A. (1991) On the use of explicit time integration in finite element simulation of industrial sheet metal forming processes. In *Numerical simulations of 3D Sheet Forming Proces.*

- [16] Mercer, C. D., Nagtegaal, J. D., Rebelo, N. (1995) Effective application of different solvers to forming simulations, Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications, Proceedings of International conference on Numerical Methods.
- [17] <https://www.e-education.psu.edu/>.
- [18] Totten G.E., MacKenzie D.S. (2003), Handbook of Aluminum, Volume 1, Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker Inc., ISBN: 0-8247-0494-0.
- [19] Sato M., Kuchi M. (2009) Profile and Flatness Set Up System for Rolling Mill, IHI Engineering Review, Vol. 42 No. 1..
- [20] Jefferson, A. D., Thomas, H. R. (1997) Convergence criteria for iterative solvers applied to nonlinear plasticity problems, 5th International conference on Computational plasticity: fundamentals and applications – COMPLAS '97, Spain, 1997, CIMNI, Barcelon.
- [21] Ferencz, R. M., Hughes, T. J. R. (1998) Iterative finite element solutions in nonlinear solid mechanics, Handbook of numerical analysis, Volume 6, pp. 3-178.
- [22] Demarco, D., Dvorkin, E. N. (2001) Modeling of metal forming processes: implementation of an iterative solver in the flow formulation, Computers and Structures, Vol 79, pp.1933–1942.
- [23] Mocellin, K., Fourment, L., Coupez, T., Chenot, J. L. (2001) Toward large scale F.E. computation of hot forging process using iterative solvers, parallel computation and multigrid algorithms. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.
- [24] Lindgren, L.E., Edberg, J. (1990) Explicit versus Implicit Finite Element Formulation in Simulation of Rolling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 24, pp. 85-94.

- [25] Simon P., Falkinger G., Scheiblhofer S. (2017) Hot Rolling Simulation of Aluminum Alloys using LS-Dyna, 11th European LS-DYNA Conference 2017, Salzburg, Austria.
- [26] Yang L., Ji J., Hu J., Ning L. (2011) Prediction of Process Parameters on Stress and Strain Fields in Hot Rolling Process using Finite Element Method, Information Technology Journal 10 (12):2406-2412.
- [27] Yang L., Ji J., Hu J., Romagos A. (2011) Effect of process parameters on mechanical behavior in hot-slab rolling MECHANIKA, 17(5): 474-479.
- [28] Rath S. (2016) Computer Simulation of Hot Rolling of Flat Products, Software Engineering, 4(6): 75-81.
- [29] Montmitonnet P. (2006) Hot and cold strip rolling processes, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 195 (2006) 6604–6625.
- [30] Parteder E., Kainz A., Hein G., Zeman K. (2007) 3D Modelling Concepts in Hot Strip Rolling, BHM, 152. Jg. (2007), Heft 11.
- [31] Bisadi H., Rezaei Ashtiani H.R., Bagheripoor M., Alimardani M. (2010) Simulation of Temperature Distribution Inhomogeneity in Aluminum Alloy During Hot Rolling, 1st International Conference on Modeling and Simulation (ICOMOS).
- [32] Mansfield C., Gordon A.P. (2015) OPTIMIZATION OF ISOTHERMAL HOT ROLLING PARAMETERS USING ANSYS AND LS-DYNA, TMS (The Minerals, Metals S Materials Society).
- [33] Le Mat N., Beynon J.H., Ponter A.R.S., Yiu H.L. (1994) Thermomechanical Modelling of Aluminium Alloy Rolling, Journal of Materials Processing Technology, 45, 631-636, doi: 0924-0136/94/S07.00.

- [34] Riahifar R., Serajzadeh S. (2007) Three-dimensional model for hot rolling of aluminum alloys, *Materials and Design* 28, 2366–2372, doi:10.1016/j.matdes.2006.08.011.
- [35] Shahani A.R., Setayeshi S., Nodamaie S.A., Asadi M.A., Rezaie S. (2009) Prediction of influence parameters on the hot rolling process using finite element method and neural network, *journal of materials processing technology* 209, 1920–1935.
- [36] Shahani A.R., Nodamaie S.A., Salehinia I. (2009) Parametric Study of Hot Rolling Process by the Finite Element Method, *Transaction B: Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 130
- [37] Ahmed H. , Wells M.A., Maijer D.M., van der Winden M.R. (2006) Application of a mathematical model to simulate multi-pass hot rolling of aluminum alloy AA5083, *Materials Science Forum* Vols 519-521 (2006) pp 1473-1478.
- [38] Motallebi S.R. (2010) Investigation of Influence Parameters on the Hot Rolling Process Using Finite Element Method, 2nd International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, Portugal.
- [39] Duan X., Sheppard T. (2001) Prediction of temperature evolution by FEM during multi-pass hot flat rolling of aluminium alloys, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 9 525–538, <http://dx.doi.org/10.1088/0965-0393/9/6/305>.
- [40] Duan X., Sheppard T. (2002) Three dimensional thermal mechanical coupled simulation during hot rolling of aluminium alloy3003, *International Journal of Mechanical Sciences* 44, 2155–2172, DOI: 10.1016/S0020-7403(02)00164-9.
- [41] Bagheripoor M., Bisadi H. (2011) Effects of rolling parameters on temperature distribution in the hot rolling of aluminum strips, *Applied Thermal Engineering* 31, 1556-1565, doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.01.005.

- [42] Jiang Z.Y., Tieu A.K., Lu C., Sun W.H., Zhang X.M., Liu X.H., Wang G.D., Zhao X.L. (2004) Three-dimensional Thermo-mechanical Finite Element Simulation of Ribbed Strip Rolling with Friction Variation, *Finite Elements in Analysis and Design* 40 1139–1155,.
- [43] Jiang Z.Y., Tieu A.K., Zhang X.M., Lua C., Sun W.H. (2003) Finite element simulation of cold rolling of thin strip, *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003) 542–547, doi:10.1016/S0924-0136(03)00832-X.
- [44] Utsunomiya H., Sutcliffe M.P.F., Shercliff H.R., Bateb P.S., Miller D.B. (2005) Influence of friction on roughening of the matt surface in aluminium pack rolling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 803–809.
- [45] Lin Z.C., Shen C.C. (2001) A coupled finite element method for a three-dimensional analysis of the flat rolling of aluminum with different reductions, *Journal of Materials Processing Technology* 110, 10-18, DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00843-8.
- [46] Tseng A.A. (1999) THERMAL MODELING OF ROLL AND STRIP INTERFACE IN ROLLING PROCESSES: PART 2-SIMULATION, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, 35:2, 135-154, DOI: 10.1080/104077899275290.
- [47] Pesin A., Pustovoytov D. (2016) Heat transfer modeling in asymmetrical sheet rolling of aluminium alloys with ultra-high shear strain, *NUMIFORM 2016, MATEC Web of Conferences* 80, 04005, DOI: 10.1051/matecconf/20168004005.
- [48] Pesin A., Pustovoytov D. (2016) Finite Element Simulation of Heat Transfer during Cryogenic Asymmetric Sheet Rolling of Aluminum Alloys, *Key Engineering Materials*, Vol. 716, pp 692-699, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.716.692.
- [49] Phaniraj M. P., Behera B. B., Lahiri A. K. (2005) Thermo-mechanical modeling of two

phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature, Journal of Materials Processing Techno.

- [50] Tieu A.K., Jiang Z.Y., Lu C. (2002) A 3D finite element analysis of the hot rolling of strip with lubrication, Journal of Materials Processing Technology, 125-126, 638-644, DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00371-0.
- [51] Misovic M., Tadic N., Jacimovic M., Janjic M. (2016) DEFORMATIONS AND VELOCITIES DURING THE COLD ROLLING OF ALUMINIUM ALLOYS, Materials and technology 50, 1, 59–67, doi:10.17222/mit.2014.250.
- [52] Yoon S.J., Shin T.J., Lee J.S., Hwang S.M. (2017) Three-Dimensional Finite Element Analysis of Skin-Pass Rolling and New Models for Process Control, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 139(9), DOI: 10.1115/1.4036910.
- [53] Boldetti C., Pinna C., Howard I., Gutierrez G. (2005) Experimental Measurement of the Deformation in Hot rolling of Aluminium 1% Mn: the Grid Technique, Applied Mechanics and Materials, Vols 3-4 pp 111-116.
- [54] Bagheripoor M., Bisadi H. (2014) An investigation on the roll force and torque fluctuations during hot strip rolling process, Production & Manufacturing Research, 2:1, 128-141.
- [55] Serajzadeh S., Sheikh H. (2008) Investigation into occurring dynamic strain aging in hot rolling of AA5083 using finite elements and stream function method, Materials Science and Engineering A 486, 138–145.
- [56] Gautam V. (2013) Finite element analysis of deflection of rolls and its correction by providing camber on rolls, International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering, Vol.1 Issue.6, 42-47, ISSN (ONLINE): 2321-3051.

- [57] Shigaki Y., Montmitonnet P., Silva J.M. (2017) 3D finite element model for roll stack deformation coupled with a Multi-Slab model for strip deformation for flat rolling simulation, AIP Conference Proceedings 1896, 190018; <https://doi.org/10.1063/1.5008231>.
- [58] Gavalas E., Papaefthymiou S. (2019) Prediction of Plate Crown during Aluminum Hot Flat Rolling by Finite Element Modeling, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3, 95, <https://doi.org/10.3390/jmmp3040095>.
- [59] Wang T., Xiao H., Zhao T.Y., Qi X.D. (2012) Improvement of 3-D FEM Coupled Model on Strip Crown in Hot Rolling, Journal of Iron and Steel Research International, 19(3), 14-19.
- [60] Sikdar S., Shylu J., Pandit A., Dasu R. (2007) Analysis of roll stack deflection in a hot strip mill, J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. vol.29 no.3 Rio de Janeiro, <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782007000300008>.
- [61] Guo R. M., (1989) Determination of Optimal Work Roll Crown for a Hot Strip Mill, Iron and Steel Technology 66(8):52-60.
- [62] Rout M., Pal S.K., Singh S.B. (2018) Prediction of edge profile of plate during hot cross rolling, Journal of Manufacturing Processes 31, 301–309, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.024>.
- [63] Yu H., Liu X. , Chen L. , Li C., Zhi Y., Li X. (2009) Influence of Edge Rolling Reduction on Plate-Edge Stress Distribution During Finish Rolling, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL., 16(1): 22-26, [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)6000](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)6000).
- [64] Zhou L., Huang Z.Y., Wang C.Z., Zhang X.X., Xiao B.L., Ma Z.Y. (2016) Constitutive flow

behavior and finite element simulation of hot rolling of SiCp/2009Al composite, *Mechanics of Materials* 93, 32–42, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.10.010>.

[65] Cao J., Liu S., Zhang J., Song P., Yan T., Zhou Y., ASR work roll shifting strategy for schedule-free rolling in hot wide strip mills, *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 1768– 1775, doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.05.025.

[66] Pesin A. (2015) Finite Element Modeling of Roll Wear during Cold Asymmetric Sheet Rolling of Aluminum Alloy 5083, *MATEC Web of Conferences* 26, 01010, DOI: 10.1051/mateconf/20152601010.

[67] Ognjanovic R., Waterson K. (2003) Finite element analysis modeling of ingot refusal conditions during the rolling process, *Computers and Structures* 81, 871–877, doi:10.1016/S0045-7949(02)00429-7.

[68] Dwivedi S., Ranab R.S., Ranac A., Rajpurohitd S., Purohite R. (2017) *Materials Today: Proceedings* 4, 2360–2372.

[69] Yu H.-L., Tieu K., Lu C., Deng G.-Y., Liu X.-H. (2012) Occurrence of surface defects on strips during hot rolling process by FEM, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-012-4556-7.

[70] Trull M., McDonald D., Richardson A., Farrugia D. (2006) Advanced finite element modelling of plate rolling operations, *Journal of Materials Processing Technology* 177(1):513-516, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.097.

[71] Bao L., Qi X-W., Mei R-B., Zhang X., Li G-L. (2018) Investigation and modelling of work roll temperature in induction heating by finite element method. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(7), 735-743.

- [72] Guo Z.F., Li C.S., Xu J.Z., Liu X.H., Wang G.D. (2006) Analysis of temperature field and thermal crown of roll during hot rolling by simplified FEM, *J. Iron. Steel Res. Int.* 12, 27–30.
- [73] Benasciutti D., Brusa E., Bazzaro G. (2010) Finite element prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills, *Proc. Eng.* 2, 707–716.
- [74] Li C., Yu H., Deng G., Liu X., Wang G. (2007) Numerical Simulation of Temperature Field and Thermal Stress Field of Work Roll During Hot Strip Rolling, *Journal of Iron and Steel Research, International* Volume 14, Issue 5, Pages 18-21, <https://doi.org/10.1>.
- [75] Engler O., Karhausen K., Hirsch J. (2009) Simulation of Microstructure and Texture Evolution in Aluminum Sheet, *ASM Handbook: Fundamentals of Modeling for Metals Processing, Volume 22A*, 510-521, <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v22a.a0005408>.
- [76] Shabaniverki S., Serajzadeh S. (2016) Simulation of softening kinetics and microstructural events in aluminum alloy subjected to single and multi-pass rolling operations, *Applied Mathematical Modelling, Volume 40, Issues 17–18*, Pages 7571-7582, <https://do>.
- [77] Li X.-T., Wang M.-T., Du F.-S. (2008) Coupling Thermomechanical and Microstructural FE Analysis in Plate Rolling Process, *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL*, 15(4) : 42-50, DOI: 10.1016/S1006-706X(08)60142-9.
- [78] Seyed Salehi M., Serajzadeh S. (2013) Simulation of static softening behavior of an aluminum alloy after cold strip rolling, *Computational Materials Science* 69, 53–61, <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.11.028>.
- [79] Falkinger G., Simon P. (2017) Static recovery of an AlMg4.5Mn aluminium alloy during multi-pass hot-rolling, *International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP*

2017, Cambridge, United Kingdom, Procedia Engineering 207, 31–36, doi: 10.1016/j.pr.

- [80] Sherstnev P., Melzer C., Sommitsch C., (2012) Prediction of precipitation kinetics during homogenisation and microstructure evolution during and after hot rolling of AA5083, International Journal of Mechanical Sciences 54 12–19, doi:10.1016/j.ijmecsci.201.
- [81] Wronski M., Wierzbowski K., Bacroix B., Lipinski P. (2015) Asymmetric rolling textures of aluminium studied with crystalline model implemented into FEM, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 82 (2015) 012012.
- [82] WANG Min-ting, ZANG Xin-liang, LI Xue-tong, DU Feng-shan (2007) Finite Element Simulation of Hot Strip Continuous Rolling, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, 14(3): 3@36.
- [83] Seyed Salehi M., Serajzadeh S. (2013) Simulation of static softening behavior of an aluminum alloy after cold strip rolling, Computational Materials Science 69, 53–61.
- [84] Ray S. (2015) Principles and Applications of Metal Rolling, Cambridge University Press, ISBN: 978-1-107-07609-9.
- [85] Bhaduri A. (2018) , Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys, Springer Nature, ISSN 2196-2812.
- [86] Ginzburg V. B., Ballas R. (2000) Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing, CRC Press, ISBN: 9780585381749.
- [87] Lenard J. (2014) Primer on Flat Rolling, Elsevier, ISBN: 978-0-08-099418-5.
- [88] Dieter G.E., Howard A., Lee Semiatin S. (2003) Handbook of Workability and Process

Design, ASM International, ISBN 0-87170-778-0.

- [89] Kalpakjan S., Schmid S.R. (2009) Manufacturing Engineering and Technology, 6th Edition, Prentice Hall,.
- [90] Hosford W.F., Caddell R.M. (2007) Metal Forming Mechanics and Metallurgy, Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, ISBN-3: 978-0-511-35453-3.
- [91] Aluminum Rolling Tehnology Course, Innoval Technology, Banbury, UK.
- [92] Verlinden B., Driver J., Samajdar I., Doherty R.D. (2007) Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials, Elsevier Ltd, ISBN: 978-0-08-044497-0.
- [93] Davis, J.R. (2001) Alloying: Understanding the basics. www.asminternational.org.
- [94] Kaufman, J. G. (2000) Introduction to Aluminum alloys and Tempers. s.l. : ASM International.
- [95] <https://www.european-aluminium.eu/media/1508/aam-design-2-design-with-aluminium.pdf>.
- [96] Polmear I., StJohn D. , Nie J.-F., Qian M. (2017) Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. s.l. : Elsevier Ltd.
- [97] Scotto D'Antuono D., Gaies J., Golumbfskie W., Taheri M.L. (2017) Direct measurement of the effect of cold rolling on β phase precipitation kinetics in 5xxx series aluminum alloys. Acta Materialia. s.l. : Elsevier, Issue 123, pp. 264-271.
- [98] The Aluminium Automotive Manual. s.l. : European Aluminium Association, 2002.

- [99] Hirsch J. (2011) Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design. Materials Transactions. s.l. : The Japan Institute of Light Metals, 52, 5, pp. 818-824.
- [100] Barnes H.R., Niemeyer L., Finck R., Huck P. (1992) Technological Advances in Aluminium Rolling, Product Information of Mannesmann Damag AG, Huttentechnik, MDS Walzwerkstechnik.
- [101] <https://www.sms-group.com/>.
- [102] Hosford W.F. (2010) Solid Mechanics, Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, ISBN-13: 978-0-511-71247-0.
- [103] Lubarda V.A. (2002) Elastoplasticity Theory, CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, ISBN 0-8493-1138-1.
- [104] Chakrabarty J. (2006) Theory of Plasticity, Elsevier Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, ISBN-13: 978-0-7506-6638-2.
- [105] Bower A.F. (2010) Elastoplasticity Theory, CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, ISBN 78-1-4398-0247-2.
- [106] Rees D.W.A. (1997) Basic Solid Mechanics, MacMillan Press LTD Houndmills, Basingstoke, Hampshire RG21 6XS, ISBN 978-1-349-14161-6.
- [107] Lubliner J. (2008) Plasticity Theory, Dover Publications, ISBN: 9780486462905.
- [108] Bertram A., Glüge R. (2015) Solid Mechanics: Theory, Modeling, and Problems, Springer International Publishing Switzerland, ISBN 978-3-319-19566-7.
- [109] Richards, R. (2000) Solid Mechanics, CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca

Raton, Florida 33431, ISBN 0-8493-0114-9.

[110] Parnes R. (2001) Solid Mechanics in Engineering, John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester, West Sussex, PO1 9 1 UD, England, ISBN: 0 471 49300 7.

[111] LS-DYNA Theory manual, Livermore Software Technology Corporation, March 2006.

[112] Lecture notes, Simulation Techniques in Manufacturing Technology, RWTH Aachen.

[113] Perumal L., Mon D.T.T., Finite Elements for Engineering Analysis: A Brief Review, 2011 International Conference on Modeling, Simulation and Control.

[114] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. (2013) The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Elsevier, ISBN: 978-1-85617-633-0.

[115] Pavlou D.G. (2015) Essentials of the Finite Element Method For Mechanical and Structural Engineers, Elsevier, ISBN: 978-0-12-802386-0.

[116] Davim J. P. (2017) Computational Methods and Production Engineering, Woodhead publications, ISBN: 978-0-85709-482-7.

[117] Larson M.G., Bengzon F. (2013) The Finite Element Method: Theory, Implementation, and Applications, Springer, ISBN: 978-3-642-33287-6.

[118] Bathe, K.J. (2006), Finite Element Procedures, K.J. Bathe, Watertown, Massachusetts..

[119] Gockenbach M.S. (2006) Understanding and Implementing the Finite Element Method, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN: 0-89871-614-4.

[120] Fish J., Belytschko T. (2007) A First Course in Finite Elements, JohnWiley & Sons, ISBN:

978-0-470-03580-1.

- [121] Noels, L., Stainier, L., Ponthot, J.-P. (2004), Combined implicit/explicit time-integration algorithms for the numerical simulation of sheet metal forming, *Journal of Computational and Applied Mathematics* Vol. 168, pp. 331–339.
- [122] Oliver, J., Huespe, A.E., Cante, J.C. (2008), An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems, *Computer Methods in Applied Mechanical Engineering*, Vol. 197, pp. 1865–1889.
- [123] Narasimhan, N., Lovell, M. (1999), Predicting springback in sheet metal forming: an explicit to implicit sequential solution procedure, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 33, pp. 29-42.
- [124] Kim, J., Kang, Y.H., Choi, H.-H., Hwang, S.-M., Kang, B.S. (2002), Comparison of Implicit and Explicit Finite-Element Methods for the Hydroforming Process of an Automobile Lower Arm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 20.
- [125] Kugener, S. (1995), Simulation of the Crimping Process by Implicit and Explicit Finite Element Methods, *AMP Journal of Technology*, Vol. 4, pp. 8–15.
- [126] Kutt, L.M., Pifko, A.B., Nardiello, J.A., Papazian, J.M. (1998), Slow-Dynamic Finite Element Simulation of Manufacturing Processes, *Computers & Structures*, Vol. 66 (1), pp. 1–17.
- [127] Rust, W., Schweizerhof, K. (2003), Finite element limit load analysis of thin-walled structures by ANSYS (implicit), LS-DYNA (explicit) and in combination, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41 (2–3), pp. 227–244.
- [128] Taylor, L., Cao, J., Karafillis, A.P., Boyce, M.C. (1995), Numerical simulations of sheet-

- metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50 (1–4), pp. 168–179.
- [129] Soltani, B., Mattiasson, K., Samuelsson, A. (1994), Implicit and Dynamic Explicit Solutions of Blade Forging using Finite Element Method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 45, pp. 69-74.
- [130] Chen, L. (2014), Comparisons of Explicit and Implicit Finite Element Methods for Sheet Metal Forming, *Advanced Materials Research*, Vol. 936, pp. 1836-1839.
- [131] Rebelo, N., Nagtegaal, J.C., Taylor, L.M. (1992), Comparison of implicit and explicit finite element methods in the simulation of metal forming processes, *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, pp. 99-108.
- [132] Hutton, D. (2004), *Fundamentals of Finite Element Analysis*, McGraw Hill, New York.
- [133] Koric, S., Hibbeler, L.C., Thomas B.G. (2009), Explicit Coupled Thermo-Mechanical Finite Element Model of Steel Solidification, *International Journal in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 78, Issue 1, , Pages 1–31.
- [134] Harewood, F.J., McHugh, P.E. (2007), Comparison of the implicit and explicit finite element methods using crystal plasticity, *Computational Materials Science*, Vol. 39, pp. 481–494.
- [135] ASM Specialty Handbook - Carbon and Alloy Steels, edited by J.R. Davis, Davis & Associates, ASM International, 1996, Metals Park, OH. *Metals Handbook*, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10t.
- [136] Acar D., Türköz M., Gedikli H., Halkacı H.S., Cora Ö.N., (2018) Warm Hydromechanical Deep Drawing of AA 5754-O and Optimization of Process Parameters, *Journal of*

Engineering Materials and Technology 140 (1), 011012, doi:10.1115/1.4037524.

- [137] Couch R., Becker R., Rhee M., Li M. (2004) Development of a Rolling Process Design Tool for Use in Improving Hot Roll Slab Recovery, Lawrence Livermore National Laboratory.
- [138] Ginzburg V.B., Bakhtar F.A., Issa R.J. (1997) Application of Coolflex model for analysis of work roll thermal conditions in hot strip mills, Iron and Steel Engineer, 74 , 11 ; 38-45. ISSN: 0021-1559.
- [139] Abbaspour M., Saboonchi A. (2008) Work roll thermal expansion control in hot strip mill, Applied Mathematical Modelling, Volume 32, Issue 12, Pages 2652-2669, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.09.011>.
- [140] Deng G.Y., Zhu H.T., Tieu A.K., Su L.H., Reid M., Zhang L., Wei P.T., Zhao X., Wang H., Zhang J., Li J.T., Ta T.D., Zhu Q., Kong C., Wu Q. (2017) Theoretical and experimental investigation of thermal and oxidation behaviours of a high speed steel work roll.
- [141] Alexander J.M. (1972) On the Theory of Rolling, Proc. R. Soc. Lond. A 326, 535-563, doi: 10.1098/rspa.1972.0025.
- [142] Bland D. R., Ford H. (1948) The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 159: 144, DOI: 10.1243/PIME_PROC_1948_159_015_02.
- [143] Domanti S.A., Edwards W.J., Thomas P.J., Chefneux I.L. (1994) Application of foil rolling models to thin steel strip and temper rolling. In: Proceedings of the International Rolling Conference on Flat Products, Dusseldorf, p. 1-8.
- [144] Hill R. (1950) Relations between roll-force, torque, and the applied tensions in strip-

- rolling. Proceedings Institute of Mechanical Engineers, 163:135-40.
- [145] Cawthorna C.J., Loukaides E.G., Allwood J.M. (2014) Comparison of analytical models for sheet rolling, 11th International Conference on Technology of Plasticity, Nagoya, Japan, Procedia Engineering 81, 2451 – 2456.
- [146] Szűcs M., Krállics G., Lenard J. (2018) A Comparative Evaluation of Predictive Models of the Flat Rolling Process, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 62(2), pp. 165-172, <https://doi.org/10.3311/PPme.11847>.
- [147] Kang Y., Jang Y., Choi Y., Lee D., Won S., (2015) An Improved Model for Camber Generation During Rough Rolling Process, ISIJ Int., 55(9), pp. 1980–1986.
- [148] Lee S.H., Song G.H., Lee S.J., Kim B.M. (2011) Study on the improved accuracy of strip profile using numerical formula model in continuous cold rolling with 6-high mill, Journal of Mechanical Science and Technology 25 (8) 2101~2109, DOI 10.1007/s12206-01.
- [149] Steinboeck A., Ettl A., Kugi A. (2017) Dynamical Models of the Camber and the Lateral Position in Flat Rolling, Applied Mechanics Reviews, 69(4): 040801, <https://doi.org/10.1115/1.4037177>.
- [150] Fukushima S., Washikita Y., Sasaki T., Nakagawa S., Buei Y., Yakita Y., Yanagimoto J. (2016) High-accuracy Profile Prediction Model for Mixed Scheduled Rolling of High Tensile Strength and Mild Steel in Hot Strip Finishing Mill, NIPPON STEEL & SUMITOMO.
- [151] Ghosh S., Li M., Gardiner D., (2004) A Computational and Experimental Study of Cold Rolling of Aluminum Alloys With Edge Cracking, J. Manuf. Sci. Eng 126(1), 74-82, doi:10.1115/1.1645877.

- [152] Nilsson A. (1998) FE simulations of camber in hot strip rolling, *Journal of Materials Processing Technology* 80–81 325–329.
- [153] Nakhoul R., Montmitonnet P., Legrand N. (2015) Manifested flatness defect prediction in cold rolling of thin strips. *International Journal of Material Forming*, Springer Verlag, 8 (2), pp.283-292. [10.1007/s12289-014-1166-y](https://doi.org/10.1007/s12289-014-1166-y).
- [154] Atack P.A., Robinson I.S. (1994) An investigation into the control of thermal camber by spray cooling when hot rolling aluminium, *Journal of Materials Processing Technology* 45, 125-130, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90329-8](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90329-8).
- [155] Tseng A.A., Tong S.X., Chen T.C. (1997) Thermal Expansion and Crown Evaluations in Rolling Processes, *Materials & Design*, Volume 17, Issue 4, Pages 193-204, [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(96\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(96)00061-1).
- [156] Stürmer M., Dagner J., Manstetten P., Köstler H. (2014) Real-time simulation of temperature in hot rolling rolls, *Journal of Computational Science*, Volume 5, Issue 5, Pages 732-742, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2014.04.003>.
- [157] Jiang M., Li X., Wu J., Wang G. (2014) A precision on-line model for the prediction of thermal crown in hot rolling processes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 78, 967–973, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.061>.
- [158] Lin Z.-C., Chen C. -C. (1995) Three-dimensional heat-transfer and thermal-expansion analysis of the work roll during rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 49, Issues 1–2, pp. 125-147, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(93\)01286-V](https://doi.org/10.1016/0924-0136(93)01286-V).

ΙΧ. Σύντομο Βιογραφικό



PERSONAL INFORMATION

- **First name, Family name:** Evangelos Gavalas
- **Birthday:** 18/12/1986 – Athens, GREECE

EDUCATION

- 09/2016 - present Ph.D. Candidate in the Department of Metallurgy and Materials Science
NTUA (National Technical University of Athens), Athens, Greece
Estimated completion: Summer 2020
- 09/2012 - 06/2015 Master of Science (M.Sc.) in Production Systems Engineering (English)
RWTH Aachen University, Aachen, Germany
- 09/2004 - 08/2011 Bachelor of Science (B.Sc.) in Mechanical engineering
TEI (Technological Educational Institute) of Piraeus, Athens, Greece
- 09/1992 - 06/2000 **Arsakeio Tositseio School in Athens, Greece**

PROFESSIONAL EXPERIENCE

- 01/2016 – present **ELKEME S.A. (Hellenic Research Centre for Metals) / VIOHALCO Group**
Mechanical Engineer in Physical metallurgy and Forming department.
- 5/2014 – 11/2014 **SMS Meer GmbH**
Three months in the after Sales Department and seven months in the Technology Department.
Master's thesis: Analysis of the performance of laser clad forging dies
- 11/2013 – 5/2014 **Fraunhofer Institute of Laser Technology (ILT)**
Metamodeling on Laser Cutting applications with a Reduced Model
- 09/2010 – 8/2018 **Poseidon team of the Technological Educational Institute of Piraeus**
Leader of a 50 people team regarding the organization and manufacturing of a low consumption car for the Shell eco marathon International race. Best result the 9th place among 50 Universities from all over Europe, Greek consumption record and Design award.
- 12/2006 – 07/2010 **ELKEME S.A. (Hellenic Research Centre for Metals) / VIOHALCO Group**
Trainee engineer, support engineer.
Bachelor's thesis: Production of lightweight aggregates from byproducts (pelletizing and sintering) of lignite combustion
- 01/2006 – 09/2012 **RAY Motorsport**
Head mechanic, karting team manager and instructor with many successes including 2009 Greek kart championship. Experience in race preparation concerning race engines, chassis and equipment, cooperation with other teams, public relationships and organization of the team.

EXTRA CURRICULAR ACTIVITIES

- Karting: Race driver at European and World championship level
 - Technology and cars
 - Tennis: Northern Athens district Local Champion
 - Wine and wine tourism: Certified Sommelier
-

Σχέση δομής ιδιοτήτων κραμάτων αλουμινίου και προσομοίωσης αυτών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

ACADEMIC ACTIVITIES

Publications in Scientific Journals:

- Gavalas E., Papaefthymiou S. (2020) Brief Overview on the Application of Finite Element Method on Flat Rolling Processes. Mod Concept Material Sci. 2(4). MCMS.MS.ID.000545.
- Gavalas E., Rossbach A., Feuerhack A. (2020) Performance analysis of laser treated hot forging dies with WC-Co-Cr, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi: 10.1007/s00170-019-04710-1
- Gavalas E., Papaefthymiou S. (2019) Prediction of Plate Crown during Aluminum Hot Flat Rolling by Finite Element Modeling, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3, 95; doi: 10.3390/jmmp3040095
- Gavalas E., Pressas I., Papaefthymiou S. (2018) Mesh sensitivity analysis on implicit and explicit method for rolling simulation, International Journal for Structural Integrity Vol. 9, Issue: 4, pp.465-474, doi: 10.1108/IJSI-07-2017-0046
- Papaefthymiou S., Bouzouni M., Gavalas E. (2018) Theoretical study of particle dissolution during homogenization in Cu–Fe–P alloy, Metals, 8, 455; doi: 10.3390/met8060455
- Bouzouni M., Gavalas E., Chatzigeorgiou F., Papaefthymiou S. (2018) Hydrogen Induced Crack Development in Submerged Arc Welded Steel Pipes, MATEC Web of Conferences 188, 04010 doi: 10.1051/mateconf/201818804010
- Athanasopoulos N., Gavalas E., Papaefthymiou S. (2018) Prediction of pipeline collapse due to hydrostatic pressure, International Journal of Structural Integrity Vol. 10 Issue: 1, pp.55-66, doi: 10.1108/IJSI-06-2018-0033
- Papaefthymiou S., Goulas C., Gavalas E. (2015) Micro-Friction Stir Welding of Titan Zinc Sheets, Journal of Materials Processing Technology, Volume 216, Pages 133-139, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.08.029

Publications in Conferences:

- Γαβαλάς E., Παπαευθυμίου Σ. (2019) Πρόβλεψη της επιτεδότητασπλάκας αλουμινίου μετά από θερμή έλαση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών
- Γαβαλάς E., Πρέσσας I., Παπαευθυμίου Σ. (2019) Σύγκριση μεθόδων «implicit» και «explicit» για την προσομοίωση της έλασης, 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών
- Κοντοπούλου Α., Γαβαλάς E., Παπαδοπούλου Σ., Βαζδιρβανίδης Α., Παπαευθυμίου Σ. (2019) Η εξέλιξη του ιστού και της ανισοτροπίαςμέσω θερμής έλασης, ψυχρής έλασης και τελικής ανόπτησης σε κράμα αλουμινίου 5182, 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών
- Ασλάνης Φ., Γαβαλάς E., Μαρινάκης Ν., Παπαευθυμίου Σ. (2019) Βελτιστοποίηση Συνθηκών Ψύξης σε Χύτευση Κράματος Cu-Fe-P με τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών
- Μπουζούνη Μ., Γαβαλάς E., Παπαευθυμίου Σ. (2019) Θεωρητική μελέτη της διαλυτοποίησης σωματιδίων κατά την ομογενοποίηση κράματος Cu-Fe-P, 7^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών
- Αντωνόπουλος Α., Γαβαλάς E., Φλαμπούρη Α., Τζεβελέκου Θ., Παπαευθυμίου Σ. (2016) Τυπικά Σφάλματα Βιομηχανικών Προϊόντων Χάλυβα 353

Teaching procedure and supervisions:

Support in the teaching procedure by preparing the teaching material and presentations for 3 subjects (casting, welding, forming). Supervised more than 20 Diploma and Master Thesis during the last 4 years.