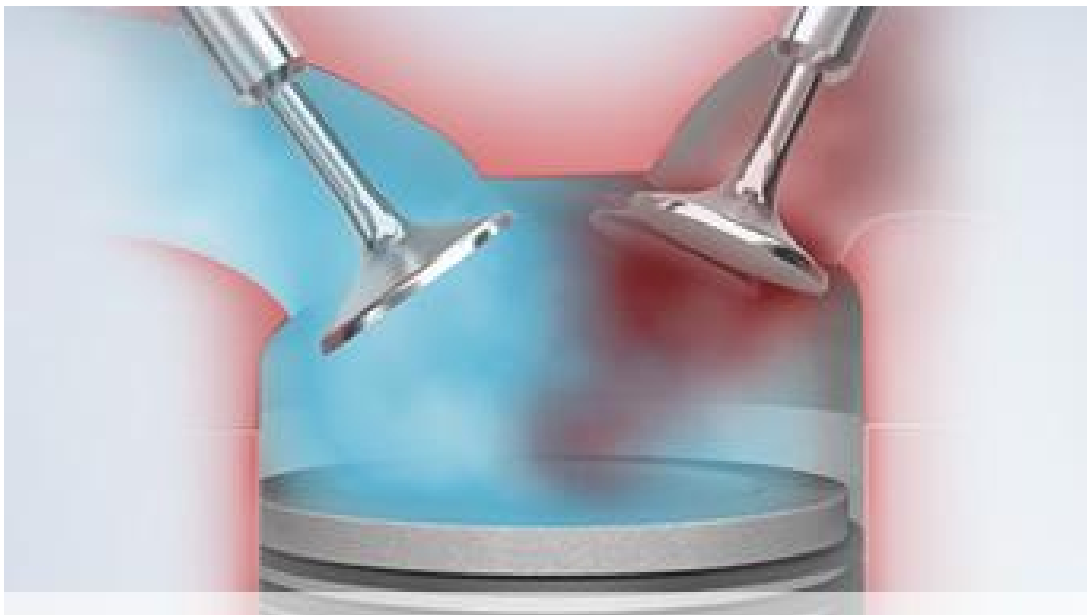


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΠΙΣΤΟΝΙΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:
ΜΠΕΛΣΗΣ ΠΑΡΙΣ
ΑΔΑΜ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Ι. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην αριθμητική πρόβλεψη της θερμομηχανικής δομικής προστασίας που παρέχουν οι κεραμικού τύπου επιστρώσεις (TBCs) σε έμβολα κινητήρων εσωτερικής καύσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ Γιαννόπουλο Γεώργιο, επιστημονικό συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση και ιδέες που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί ραγδαία οι απαιτήσεις για τη κατασκευή κινητήρων υψηλών προδιαγραφών, υψηλών δυνατοτήτων αλλά παράλληλα χαμηλού ενεργειακού κόστους και εκπεμπόμενων ρύπων. Οι διαδικασίες παραγωγής στην κατασκευή κινητήρων έχουν βελτιστοποιηθεί, οι ανοχές παραγωγής και το βάρος των εξαρτημάτων έχει χαμηλώσει, ενώ η ποιότητα των υλικών έχει βελτιωθεί σταθερά. Οι μορφές των θαλάμων καύσης και των διαδρομών που διατρέχουν τα αέρια καύσης έχουν βελτιστοποιηθεί προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση και οι εκπομπές καυσίμων. Παρά αυτές τις σημαντικές εξελίξεις στη τεχνολογία των κινητήρων, οι αστοχίες που παρουσιάζουν τα έμβολα έχουν παραμείνει εντυπωσιακά παρόμοιοι.

Στη παρούσα εργασία προτείνεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την αριθμητική μελέτη της ικανότητας που έχουν ακόμα και μικρού πάχους επιστρώσεις θερμικής προστασίας (TBCs) να ανακουφίζουν το έμβολο από υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις όταν αυτές συγκολληθούν ορθά στο πρόσωπό του. Για την προσομοίωση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς τους χρησιμοποιείται θερμοελαστική ανάλυση. Η ανάλυση αυτή, προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς, βασίζεται στη αποκλειστική χρήση αξονοσυμμετρικών πεπερασμένων στοιχείων θερμικού και μηχανικού πεδίου. Στα μοντέλα που προκύπτουν επιβάλλονται κατάλληλες θερμομηχανικές συνοριακές συνθήκες που ανταποκρίνονται προσεγγιστικά στις συνθήκες λειτουργίας του εμβόλου. Από τις παραμετρικές μελέτες που λαμβάνουν χώρα προκύπτουν ποιοτικά συμπεράσματα που αφορούν το σχεδιασμό των επικαλύψεων.

Η παρούσα πτυχιακή είναι οργανωμένη σε κεφάλαια όπως αναλύεται παρακάτω.

Στην πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική και σύντομη παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας των κινητήρων εσωτερικής καύσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία που αφορούν βασικά εξαρτήματα ενός κινητήρα εσωτερικής καύσεως.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από την καύση και ψύξη των κινητήρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των αστοχιών που παρουσιάζονται συχνά στα έμβολα εσωτερικής καύσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνονται μια σύντομη περιγραφή γύρω από την τεχνολογία των επιστρώσεων θερμικής προστασίας.

Στο έκτο κεφάλαιο εξηγείται η αριθμητική μοντελοποίηση του προβλήματος θερμοελαστικότητας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο έβδομο κεφάλαιο αποσαφηνίζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η προτυποποίηση των συγκεκριμένων προβλημάτων στον υπολογιστή ενώ παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα που αφορούν την θερμική και μηχανική απόκριση εμβόλου που φέρει επικάλυψη διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται τα συνολικά συμπεράσματα αυτής της προσπάθειας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ/ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ</u>	<u>Σελ.</u>
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	1
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	1
1.2 ΠΩΣ ΕΝΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΠΑΡΑΓΕΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	2
1.3 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ.....	4
1.4 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ DIESEL..	6
1.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	9
2. ΒΑΣΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	13
2.2 ΕΛΑΤΗΡΙΑ ΕΜΒΟΛΟΥ.....	15
2.3 ΔΙΩΣΤΗΡΑΣ.....	17
2.4 ΣΤΡΟΦΑΛΟΦΟΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ.....	18
2.5 ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ.....	18
2.6 ΚΥΚΛΟΕΙΔΕΣ ΕΚΚΕΝΤΡΟ (CYCLOIDAL CAM).....	19
2.7 ΒΑΛΒΙΔΕΣ.....	20
2.8 ΩΣΤΗΡΙΑ ΒΑΛΒΙΔΩΝ.....	20
3. ΚΑΥΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ.....	23
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΑΥΣΗΣ.....	23
3.2 ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΥΣΗ.....	23
3.3 ΜΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΥΣΗ.....	28
3.4 ΘΑΛΑΜΟΙ ΚΑΥΣΗΣ.....	29
3.4.1 Συμβατικοί θάλαμοι καύσης.....	29
3.4.2 Θάλαμοι καύσης υψηλού λόγου συμπίεσης και συστήματα ταχείας καύσης.....	33
3.5 ΨΥΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	37
4. ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΕΜΒΟΛΩΝ.....	45
4.1 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ....	45
4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΑΙΤΙΑ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΙΣΤΟΝΙΩΝ.....	46
4.3 ΕΙΔΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΙΣΤΟΝΙΩΝ.....	48
4.4 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΙΣΤΟΝΙΩΝ.....	57

4.4.1 Χρήση σφυρήλατων πιστονίων.....	57
4.4.2 Χρήση επιστρώσεων θερμικής προστασίας (Thermal Barrier Coatings - TBCs).....	58
5. ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (TBCs).....	61
5.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	61
5.2 ΑΠΟΔΟΣΗ / ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	65
5.3 ΤΡΕΧΟΥΣΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	67
5.4 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ / ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	68
5.4.1 Μεταλλουργική συμβατότητα.....	68
5.4.2 Συμβατότητα διεπιφάνειας.....	69
5.4.3 Μηχανική συμβατότητα.....	70
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	72
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	73
6.1.1 Προεπεξεργασία.....	75
6.1.2 Επίλυση του προβλήματος.....	78
6.1.3 Μετεπεξεργασία.....	80
6.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	83
6.2.1 Θερμικό μέρος.....	83
6.2.2 Μηχανικό μέρος.....	85
6.2.3 Μεθοδολογία επίλυσης θερμοελαστικού προβλήματος.....	87
6.3 ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	89
7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	95
7.1 ΥΛΙΚΑ.....	95
7.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	97
7.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	101
7.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	104
7.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ.....	115
7.6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	116
7.6.1 Περιγράμματα.....	116
7.6.2 Διαγράμματα προσώπου AlSi.....	162
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	171
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	173
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	177

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Η ιστορία των μηχανών εσωτερικής καύσης [1], αρχίζει μόλις το 1860, τη χρονιά δηλαδή που ο Ζαν Ετιέν Λενουάρ, ένας Βέλγος εφευρέτης, κατασκεύασε τον πρώτο πρακτικά χρησιμοποιήσιμο κινητήρα, από τον οποίο προέρχονται όλοι οι άλλοι κινητήρες εσωτερικής καύσεως. Εντούτοις η αποδιδόμενη ισχύς ήταν πολύ μικρή, σε αυτόν τον πρώτο κινητήρα, αφού το προς καύση μίγμα γκαζιού-αέρα συμπιεζόταν ελάχιστα πριν την ανάφλεξη.

Ο επόμενος σημαντικός σταθμός ήταν στα 1876 όταν ο Γερμανός κόμης και μηχανικός Νικόλας Όττο, εφάρμοσε στην πράξη, με επιτυχία για πρώτη φορά την αρχή του τετράχρονου κύκλου που είχε προτείνει ο Γάλλος Μπω Ντε Ροσσά. Με τον τετράχρονο κύκλο το μίγμα συμπιεζόταν, πράγμα που βελτίωσε σημαντικά την αποδιδόμενη ισχύ. Την ίδια περίπου εποχή άρχισε να χρησιμοποιείται αντί για το γκαζί η βενζίνη (ένα κλασματικό απόσταγμα του πετρελαίου που αρχικά ονομαζόταν γκαζολίνη).

Κατά την διάρκεια του 1880 η μεγαλύτερη πρόοδος σημειώθηκε στη Γερμανία από τους Γκότλιμπ Νταίμλερ και Κάρλ Μπέντς. Ο Νταίμλερ που δούλευε μαζί με τον Βίλχελμ Μάιμπαχ, κατασκεύασε τον πρώτο κινητήρα του το 1883, προξενώντας αίσθηση μια και ο κινητήρας του περιστρεφόταν τέσσερις φορές γρηγορότερα από τους κινητήρες Όττο - με 900 στροφές το λεπτό. Ο Μπέντς από την άλλη μεριά, είχε σαν αντικειμενικό του σκοπό την κατασκευή ενός δικού του αυτοκινούμενου οχήματος και το 1885 τοποθέτησε τον πρώτο κινητήρα σε ένα τρίκυκλο. Μέσα σε ένα χρόνο περίπου και οι δύο κατασκεύαζαν αυτοκίνητα προς πώληση.

Τότε εμφανίστηκαν στο προσκήνιο οι Γάλλοι μηχανικοί Ρενέ Πανάρ και Εμίλ Λεβασόρ που άρχισαν το 1890 να κατασκευάζουν στη Γαλλία κινητήρες Νταίμλερ, αφού πήραν τα δικαιώματα. Το πρώτο τους αυτοκίνητο είχε τον κινητήρα τοποθετημένο στο κέντρο, αλλά το επόμενο, το 1891 έβαλε τα θεμέλια για τις επερχόμενες γενιές έχοντάς τον κινητήρα τοποθετημένο μπροστά, προστατευμένο από την σκόνη και της λάσπες των δρόμων εκείνου του καιρού.

Ο Λεβασόρ έκανε ένα ακόμα αποφασιστικό βήμα, θεωρώντας το αυτοκίνητο ένα αυτόνομο μηχανικό κατασκεύασμα και όχι μια άμαξα χωρίς άλογα, ή ένα τρίκυκλο με μηχανή. Η θέση του στην ιστορία εξασφαλίστηκε με τις πρακτικές εφαρμογές του π.χ. την αντικατάσταση της κινήσεως με ιμάντες από τον συμπλέκτη και το κιβώτιο ταχυτήτων, ένα τύπο μεταδόσεως που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα.

Με την αλλαγή του αιώνα, οι μηχανικοί προσπαθώντας να βελτιώσουν την ισχύ άρχισαν να αυξάνουν τον αριθμό των κυλίνδρων. Πειραματικοί εξακύλινδροι σε σειρά κινητήρες άρχισαν να εμφανίζονται το 1902, ενώ η αγγλική Napier άρχισε την κανονική παραγωγή τους τον επόμενο χρόνο.

1.2 ΠΩΣ ΕΝΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΠΑΡΑΓΕΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ενέργεια που χρειάζεται για να κινηθεί ένα αυτοκίνητο, παράγεται από τον κινητήρα, με τη μετατροπή της θερμότητας, που εκλύει το καύσιμο κατά τη καύση του, στη μηχανική ενέργεια που απαιτείται για να περιστραφούν οι τροχοί. Το καύσιμο, συνήθως είναι ένα μίγμα βενζίνης και αέρα, καίγεται μέσα σε κλειστούς κυλίνδρους στο εσωτερικό του κινητήρα για αυτό ονομάζεται "κινητήρας εσωτερικής καύσεως".

Η βενζίνη και ο αέρας, αφού αναμειχθούν στο καρμπυρατέρ (εξαερωτήρα), αναρροφώνται από το θάλαμο καύσης στο επάνω μέρος κάθε κυλίνδρου. Τα έμβολα (πιστόνια), στο εσωτερικό των κυλίνδρων, συμπιέζουν το μίγμα το οποίο στη συνέχεια αναφλέγεται από τους αναφλεκτήρες (μπουζί). Η διαστολή του μείγματος κατά την καύση του, ωθεί το έμβολο αναγκάζοντας το να κινηθεί προς τα κάτω αποδίδοντας έργο.

Η παλινδρομική κίνηση των εμβόλων (επάνω-κάτω), μετατρέπεται σε περιστροφική η οποία κινεί τον στροφαλοφόρο, που περιστρεφόμενος μεταδίδει, διαμέσου του συμπλέκτη, του κιβωτίου ταχυτήτων και του διαφορικού, την ενέργεια στους τροχούς. Τα έμβολα συνδέονται με τον στροφαλοφόρο μέσω διωστήρων (Σχήμα 1.1). Ένας εκκεντροφόρος άξονας, που παίρνει κίνηση από τον στροφαλοφόρο, ελέγχει το άνοιγμα και το κλείσιμο των βαλβίδων εισαγωγής του μείγματος, που βρίσκονται στο επάνω μέρος κάθε κυλίνδρου.

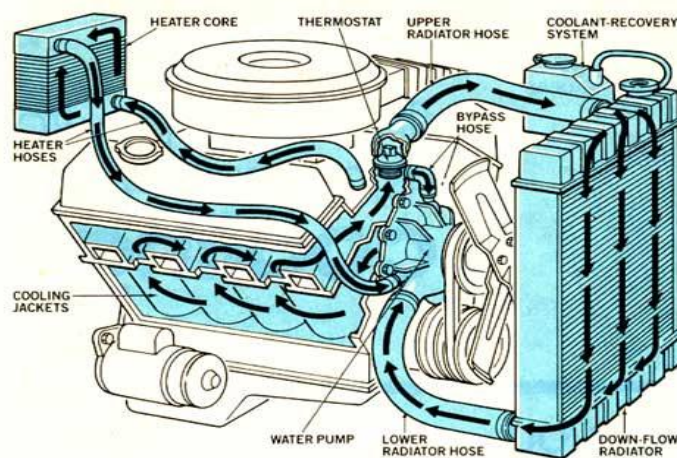


Σχήμα 1.1: Από αριστερά προς τα δεξιά: Εκκεντροφόρος, έμβολο, διωστήρας.

Η αρχική ενέργεια που απαιτείται για να τεθεί σε λειτουργία ο κινητήρας παρέχεται από την μίζα. Η μίζα συνδέεται με μια οδοντωτή στεφάνη (γρανάζι βολάν) προσαρμοσμένη στην περιφέρεια του σφονδύλου (βολάν)-ενός μεγάλου δίσκου βιδωμένου στην άκρη του στροφαλοφόρου.

Η μίζα, που λειτουργεί με ηλεκτρισμό, εμπλέκεται με τον σφόνδυλο αναγκάζοντάς τον να περιστραφεί μαζί με τον στροφαλοφόρο, που υποχρεώνει έτσι τα έμβολα και τις μπίελες να αρχίσουν την παλινδρομική κίνησή τους. Ο σφόνδυλος εξομαλύνει τις ωστικές δονήσεις που προέρχονται από τα έμβολα, προκαλώντας τη σχετικά ομοιόμορφη περιστροφή του στροφαλοφόρου. Λόγω της θερμότητας που παράγεται σε μια μηχανή εσωτερικής καύσεως, τα μεταλλικά εξαρτήματα θα κόλλαγαν χωρίς ένα σύστημα ψύξης.

Στα πιο πολλά αυτοκίνητα, η ψύξη γίνεται με την κυκλοφορία νερού σε αγωγούς μέσα στον κινητήρα, που σε αυτήν την περίπτωση ονομάζεται υδρόψυκτος (Σχήμα 1.2).

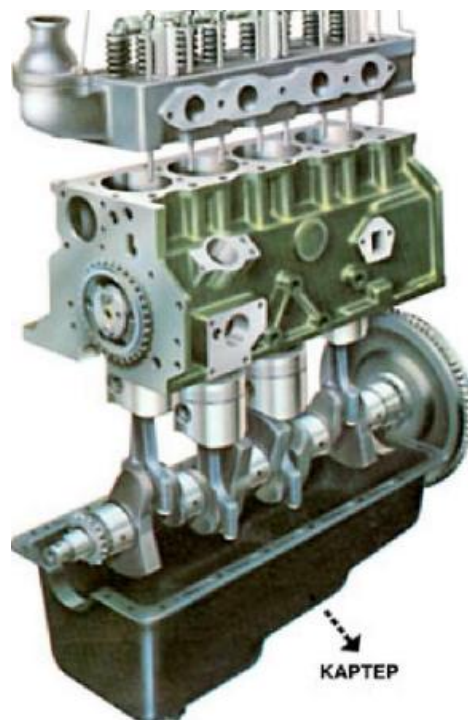


Σχήμα 1.2: Υδρόψυκτο σύστημα

Το νερό, αφού ζεσταθεί, περνά μέσα από ένα ψυγείο από όπου η θερμότητα διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Η διάχυση της θερμότητας επιταχύνεται από έναν ανεμιστήρα, που αναγκάζει τον κρύο αέρα να περάσει μέσα από το ψυγείο. Άλλα αυτοκίνητα, κυρίως αυτά με τον κινητήρα πίσω, ψύχονται με αέρα που κυκλοφορεί γύρω από λεπτά πτερύγια στην κυλινδροκεφαλή. Τα πτερύγια αυτά αυξάνουν την επιφάνεια επαφής του κινητήρα με την ατμόσφαιρα. Για να προληφθούν οι φθορές και η υπερθέρμανση, ο κινητήρας έχει και ένα σύστημα λίπανσης. Το λάδι, που βρίσκεται σε ένα δοχείο (κάρτερ, ελαιολεκάνη) στο κάτω μέρος του κορμού (σώμα, ή μπλοκ κυλίνδρων), αντλείται στο εσωτερικό του κινητήρα.

1.3 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Ο κινητήρας πρέπει να είναι μια γερή κατασκευή για να αντέχει στις μεγάλες δυνάμεις που αναπτύσσονται στα έδρανα του στροφαλοφόρου και τα άλλα εσωτερικά όργανα. Αποτελείται από δυο βασικά τμήματα, βιδωμένα μεταξύ τους: το επάνω είναι η κυλινδροκεφαλή και το κάτω ο κορμός που περιέχει το συγκρότημα του στροφαλοφόρου (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Κορμός κινητήρα με κυλινδροκεφαλή.

Τόσο η κυλινδροκεφαλή, όσο και ο κορμός, κατασκευάζονται συνήθως από χυτοσίδηρο, χωρίς όμως να αποκλείεται και η χρήση αλουμινίου που είναι ένα υλικό με μικρό βάρος και καλή διάχυση θερμότητας. Σήμερα όλοι οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν τις βαλβίδες τους τοποθετημένες στην κυλινδροκεφαλή, για αυτό και λέγονται κινητήρες με βαλβίδες επί κεφαλής. Στην κυλινδροκεφαλή υπάρχει επίσης ένας θάλαμος καύσης, δυο θυρίδες βαλβίδων και δυο βαλβίδες για κάθε κύλινδρο (Σχήμα 1.4). Ο κινητήρας αναρροφά το μίγμα βενζίνης / αέρα από τη μια "σειρά" βαλβίδων (τις βαλβίδες εισαγωγής) και αποβάλλει τα καυσαέρια από την άλλη (τις βαλβίδες εξαγωγής). Στο επάνω μέρος της κυλινδροκεφαλής υπάρχουν τα όργανα τα οποία κινούν τις βαλβίδες. Τα βασικότερα είναι ο/οι εκκεντροφόροι, τα ελατήρια, τα ζύγωθρα και τα ωστήρια. Ο κορμός αποτελεί σήμερα ένα ενιαίο συγκρότημα με την έδρα του στροφαλοφόρου. Περιέχει τους κύλινδρους και στηρίζει (φέρει) τον στροφαλοφόρο στον οποίο συνδέονται οι μπίελες και τα έμβολα. Μπορεί επίσης να φέρει και τον εκκεντροφόρο, μέσω του οποίου ανοίγουν και κλείνουν οι βαλβίδες.



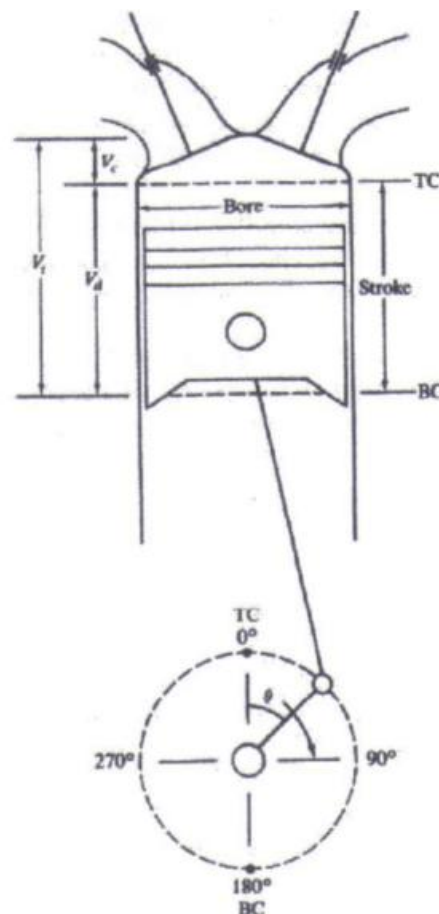
Σχήμα 1.4: Από αριστερά προς τα δεξιά : βαλβίδες, ελατήρια βαλβίδων και γρανάζι.

Μια εναλλακτική λύση είναι η τοποθέτηση του εκκεντροφόρου στην κυλινδροκεφαλή. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε ένα κινητήρα με εκκεντροφόρο επί κεφαλής. Η διάταξη αυτή του μονού ή των διπλών εκκεντροφόρων στην κεφαλή του κινητήρα αλλά και ο τρόπος μετάδοσης της κίνησης στους εκκεντροφόρους παρουσιάζεται στα δυο σχέδια που ακολουθούν. Τόσο ο κορμός, όσο και η κυλινδροκεφαλή, έχουν στο εσωτερικό τους αγωγού, που ονομάζονται υδροχιτώνια ή υδροθάλαμοι, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το νερό που ψύχει τον κινητήρα. Το κάρτερ είναι κατασκευασμένο από λαμαρίνα, ή από κράμα αλουμινίου, ή μαγνησίου και είναι βιδωμένο στο κάτω μέρος του κορμού. Ένα καπάκι, συνήθως από το ίδιο

υλικό με το κάρτερ, καλύπτει τα όργανα που κινούν τις βαλβίδες, και συγκρατώντας το λάδι.

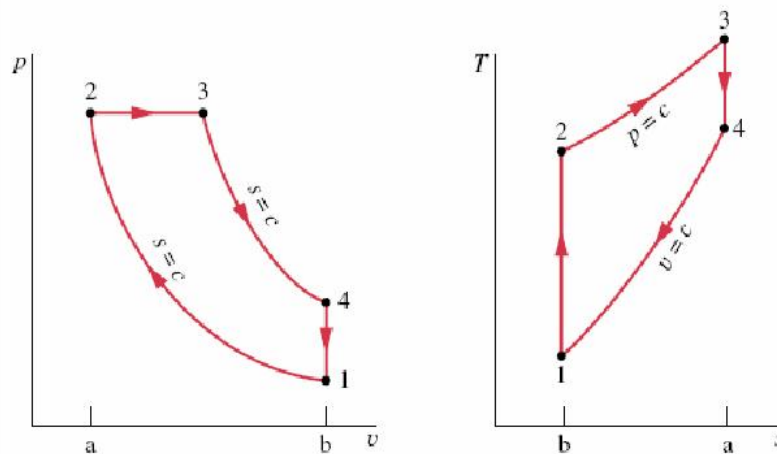
1.4 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ DIESEL

Η θεωρία των παλινδρομικών κινητήρων εσωτερικής καύσης Diesel, όπου το έμβολο κινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω εντός ενός κυλίνδρου και μεταφέρει την ισχύ που παράγεται από την καύση του καυσίμου μίγματος στον τελικό άξονα μέσω μιας συνδετικής ράβδου (διωστήρας) και ενός μηχανισμού στροφάλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5, είναι το αντικείμενο μελέτης της παραγράφου αυτής. Η σταθερή περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα ωθεί το έμβολο της μηχανής σε μια περιοδική παλινδρομική κίνηση.



Σχήμα 1.5: Βασική γεωμετρία παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης.

Το έμβολο σταματά στο Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) και στο Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ), όπου η χωρητικότητα του κυλίνδρου είναι ελάχιστη και μέγιστη αντίστοιχα. Η πλειονότητα των παλινδρομικών κινητήρων λειτουργεί με βάση τον τετράχρονο κύκλο λειτουργίας. Κάθε κύλινδρος απαιτεί τέσσερις πλήρεις διαδρομές από το αντίστοιχο έμβολο ή δύο πλήρεις περιστροφές του στροφαλοφόρου άξονα, ώστε να ολοκληρώσει τη σειρά των γεγονότων που χρειάζονται για να αποδοθεί μία φάση εκτόνωσης (φάση ισχύος). Η ακριβής περιγραφή των φάσεων λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης Diesel αναλύεται σχηματικά στο Σχήμα 1.6.

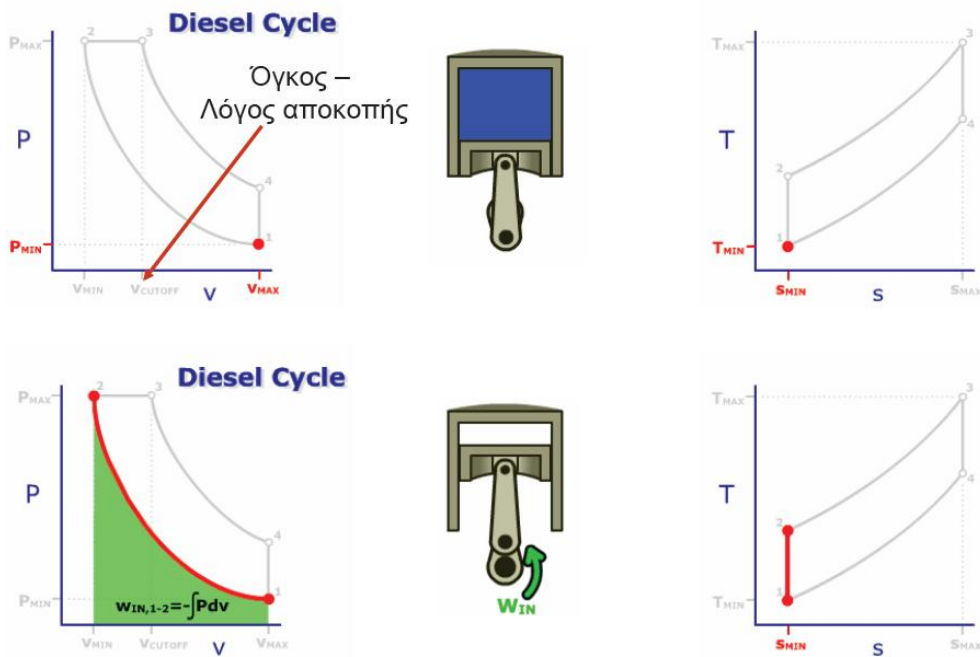


- 1-2: Ισεντροπική συμπίεση**
- 2-3: Ισόθλιπτη προσθήκη θερμότητας**
- 3-4: Ισεντροπική εκτόνωση**
- 4-1: Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας**

Σχήμα 1.6: Θερμοδυναμική ανάλυση κύκλου Diesel.

Αρχικά λαμβάνει χώρα η φάση ισεντροπικής συμπίεσης (φάση εισαγωγής) (Σχήμα 1.7), η οποία αρχίζει με το έμβολο να βρίσκεται στο ΑΝΣ και ολοκληρώνεται με το έμβολο να βρίσκεται στο ΚΝΣ. Κατά τη διάρκεια της κίνησης αυτής το έμβολο αναρροφά φρέσκο μίγμα αέρα-καυσίμου και το οδηγεί εντός του κυλίνδρου.

1-2: Ισεντροπική συμπίεση



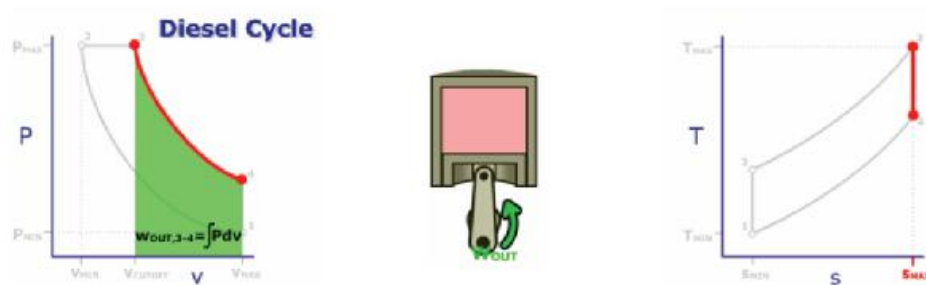
Σχήμα 1.7: Ισεντροπική συμπίεση.

Ακολουθεί η φάση ισόθλιπτης εισαγωγής θερμότητας και έπειτα η φάση ισεντροπικής εκτόνωσης (Σχήμα 1.8), η οποία τελειώνει όταν το έμβολο βρεθεί στο ΚΝΣ, αφού τα υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης αέρια ωθούν το έμβολο προς τα κάτω και αναγκάζουν το στροφαλοφόρο άξονα να εκτελέσει περιστροφική κίνηση.

2-3: Ισόθλιπτη προσθήκη θερμότητας

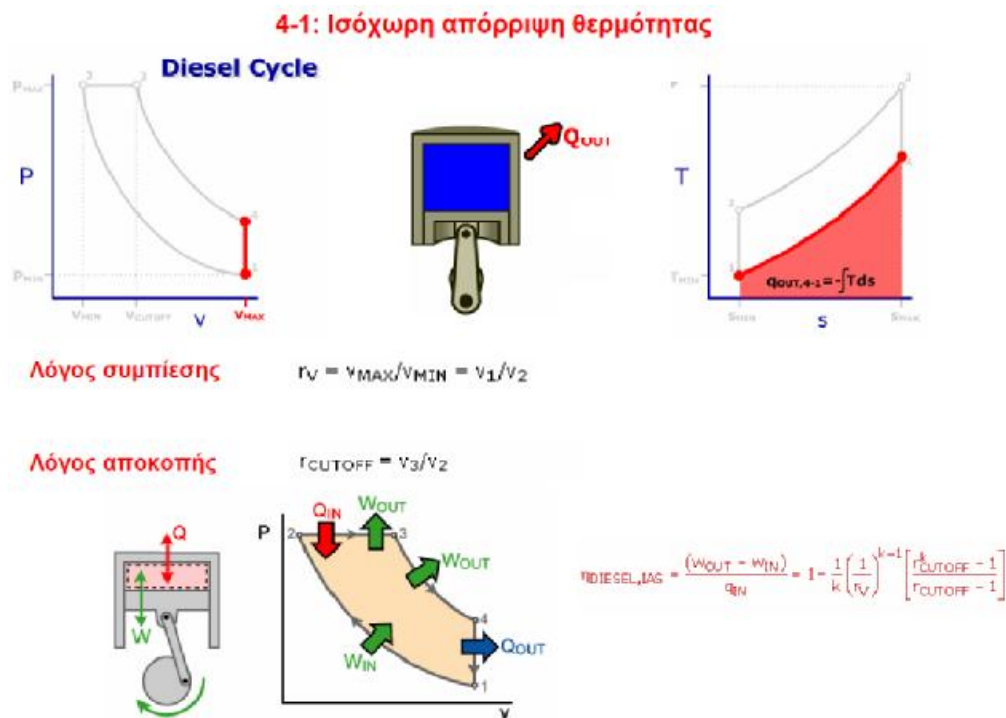


3-4: Ισεντροπική εκτόνωση



Σχήμα 1.8: Ισόθλιπτη προσθήκη θερμότητας και ισεντροπική εκτόνωση.

Τέλος, έχουμε τη φάση ισόχωρης απόρριψης θερμότητας (φάση εξαγωγής), όπου τα εναπομείναντα καυσαέρια βγαίνουν από τον κύλινδρο (Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9: Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας.

Η διαδικασία αυτή γίνεται για δύο λόγους: Επειδή η πίεση του κυλίνδρου είναι υψηλότερη από την πίεση εξαγωγής και επειδή τα καυσαέρια σαρώνονται προς τα έξω καθώς το έμβολο απομακρύνεται από το ΚΝΣ. Όταν το έμβολο πλησιάζει το ΑΝΣ, η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει. Αμέσως μετά το ΑΝΣ η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει και κατόπιν ξεκινά ένας καινούργιος κύκλος λειτουργίας.

1.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Μέγεθος (κυβισμός)

Ο βαθμός απόδοσης ενός κινητήρα δε μεταβάλλεται παρά ελάχιστα από τον κυβισμό του. Συγκεκριμένα, αν ο κυβισμός ενός κινητήρα αυξηθεί κατά 3000 φορές η ειδική κατανάλωση καυσίμου (κατανάλωση καυσίμου σε gr ανά αποδιδόμενη KWh

ενέργειας) θα πέσει κατά 1,6 φορές. Αυτό θα συμβεί κυρίως επειδή μεγαλώνουν οι κύλινδροι οπότε μειώνεται η αναλογία εξωτερική επιφάνεια/όγκο για τον κάθε κύλινδρο. Επειδή οι θερμικές απώλειες εξαρτώνται άμεσα από την εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου (αυτή που έρχεται σε επαφή με το παραφλού), μειώνονται και οι θερμικές απώλειες, οπότε το πλεόνασμα μετουσιώνεται σε έργο επί του εμβόλου.

Προπορεία ανάφλεξης (advance)

Η διαφορά σε απόσταση (και όχι χρόνο) του σπινθήρα πριν από το σημείο που το πιστόνι φτάνει στο ΑΝΣ λέγεται advance. Όταν το avans είναι υψηλό, τότε η πίεση που αναπτύσσεται στον θάλαμο καύσης κατά την διάρκεια της εκτόνωσης είναι μεγάλη. Αυτό γίνεται αφού το φαινόμενο της καύσης ξεκινά την σωστή στιγμή. Υπερβολικό avans θα προκαλέσει αυταναφλέξεις. Χαμηλό avans θα είναι αιτία για την δημιουργία ανεπαρκούς πίεσης στον θάλαμο. Η καύση θα αργήσει να εκδηλωθεί και έτσι η μέγιστη πίεσή της θα λάβει χώρα όταν το έμβολο έχει προλάβει να κατέβει αρκετά κάτω. Το βέλτιστο advance για την απόδοση ροπής (είναι το λεγόμενο M.B.T. avans που σημαίνει maximum brake torque advance, ο όρος brake προέρχεται από την πέδη δυναμομέτρησης) μπορεί να είναι δυσμενές για την εκπομπή NO_x. Συνήθως οι κατασκευαστές επιλέγουν ένα advance το οποίο είναι 4° μακριά από το advance που αντιστοιχεί στην μέγιστη ροπή στρέψης. Όταν υπάρχει υπόλειμμα καυσαερίου μέσα στον θάλαμο την στιγμή της εκτόνωσης, επιβραδύνεται η ταχύτητα της καύσης. Αυτό αναγκάζει τους κατασκευαστές να υιοθετήσουν μεγαλύτερες προπορείες σε τέτοιες περιπτώσεις.

Ταχύτητα κινητήρα - εμβόλου

Η ταχύτητα του εμβόλου μπορεί να καθοριστεί από την διάμετρο και την διαδρομή του. Εδώ διακρίνουμε τον διαχωρισμό των κινητήρων σε υποτετράγωνους, τετράγωνους και υπερτετράγωνους, ανάλογα τον συσχετισμό διαστάσεων διαμέτρου και διαδρομής. Η χαμηλή ταχύτητα εμβόλου μπορεί να μειώσει ελαφρώς το έργο άντλησης του κινητήρα (το έργο που δαπανά ο κινητήρας, δανειζόμενος ενέργεια από τον σφόνδυλο, προκειμένου να διεκπεραιώσει τις διεργασίες της εισαγωγής και

εξαγωγής), αφού οι ροϊκές απώλειες στους αυλούς είναι μικρές . Όσο αυξάνεται η ταχύτητα κίνησης των εμβόλων τόσο μεγαλώνει το έργο άντλησης λοιπόν.

Όμως η υψηλή ταχύτητα εμβόλου έχει θετική επίδραση στην απώλεια θερμότητας κατά την διάρκεια της εκτόνωσης. Όταν το έμβολο κινείται γρήγορα για έναν συγκεκριμένο αριθμό στροφών του κινητήρα, η συνολική θερμότητα που παραλαμβάνεται από το ψυκτικό υγρό ελαττώνεται, παρόλο που ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει αφού ο χρόνος που διατίθεται για την ανταλλαγή θερμότητας είναι μειωμένος. Συνεπώς η θερμότητα που δεν απορρίφθηκε θα διοχετευτεί μερικώς στο έμβολο. Επιπλέον, οι ανάγκες για ψύξη είναι μειωμένες και έτσι δεν απαιτείται να σπαταλά ο κινητήρας μεγάλα ποσά ισχύος για να κινεί την αντλία ψύξης. Βέβαια μιλάμε για πολύ μικρές διαφοροποιήσεις σε κάθε περίπτωση.

Σχέση συμπίεσης

Η σχέση συμπίεσης είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς παράγοντες επιρροής του βαθμού απόδοσης. Με την αύξησή της μειώνεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου, άρα βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσής της μηχανής. Όμως από κάποιο σημείο και μετά, πέρα του ότι ελλοχεύει ο κίνδυνος της κρουστικής καύσης, έχουμε μερικές δυσμενείς επιπτώσεις. Η αύξηση της σχέσης συμπίεσης αυξάνει το έργο που δαπανά ο κινητήρας για την εισαγωγή και εξαγωγή, αφού μεγαλώνει το μήκος της διαδρομής του εμβόλου. Επιπρόσθετα, η υπερβολικά μεγάλη σχέση συμπίεσης εντατικοποιεί τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας προς το τοίχωμα του κυλίνδρου κατά την διάρκεια της εκτόνωσης. Αυτό γίνεται αφού η πίεση (άρα και η θερμοκρασία) μεγαλώνουν πολύ κατά την διάρκεια της εκτόνωσης, αυξάνοντας την θερμοκρασιακή διαφορά με το ψυκτικό υγρό.

Φορτίο κινητήρα

Με την έννοια φορτίο εννοείται το ποσοστό ανοίγματος της πεταλούδας γκαζιού, ή ισοδύναμα, το πόσο πολύ πατάμε το γκάζι. Όσο πιο ανοικτό είναι το γκάζι λοιπόν, τόσο η θερμοδυναμική απόδοση του κινητήρα είναι αυξημένη. Τούτο σημαίνει ότι τότε ο κινητήρας καταναλώνει για την ίδια απόδοση ενέργειας λιγότερο καύσιμο. Αυτό οφείλεται στο ότι έτσι μειώνονται οι αντλητικές απώλειες του κινητήρα.

Αυτές οι απώλειες αντιπροσωπεύουν τον αρνητικό βρόγχο στο δυναμοδεικτικό διάγραμμα (διάγραμμα P-V) και αφορούν την ενέργεια, που καταναλώνει ο κινητήρας ανά κύκλο λειτουργίας, προκειμένου να τραβήξει μέσα στους θαλάμους το καύσιμο μίγμα που θα κάψει στον εν λόγω κύκλο. Στους κινητήρες Diesel δεν υπάρχει πεταλούδα γκαζιού. Το μερικό φορτίο εκεί επιτυγχάνεται με την αύξηση του συντελεστή λ της καύσης. Συντελεστής λ είναι ο λόγος του παρεχόμενου αέρα στον θάλαμο καύσης προς τον στοιχειομετρικά απαιτούμενο για ιδανική καύση. Δηλαδή ενώ οι βενζινοκινητήρες δουλεύουν με σταθερό λ σε όλο το εύρος των φορτίων και απλά αυξομειώνεται η μάζα του καυσίμου μείγματος, στους Diesel έχουμε σταθερή παροχή μάζας αέρα και απλά αυξομειώνουμε την ποσότητα του πετρελαίου που διοχετεύουμε σε αυτόν. Έτσι ένας Diesel μπορεί να δουλεύει χρησιμοποιώντας από πολύ φτωχά έως λίγο φτωχά μείγματα, ανάλογα το φορτίο. Περαιτέρω εμπλουτισμός του αέρα με πετρέλαιο, προκαλεί εκτεταμένες εκπομπές αιθάλης, ακόμα και αν το μέγεθος των σταγόνων του καυσίμου είναι πολύ μικρό (μέσω της τεχνολογίας common rail), κάτι που ευνοεί την πλήρη καύση του. Τα φτωχά μείγματα στους βενζινοκινητήρες δεν ευοδώθηκαν μιας και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) είναι υψηλές.

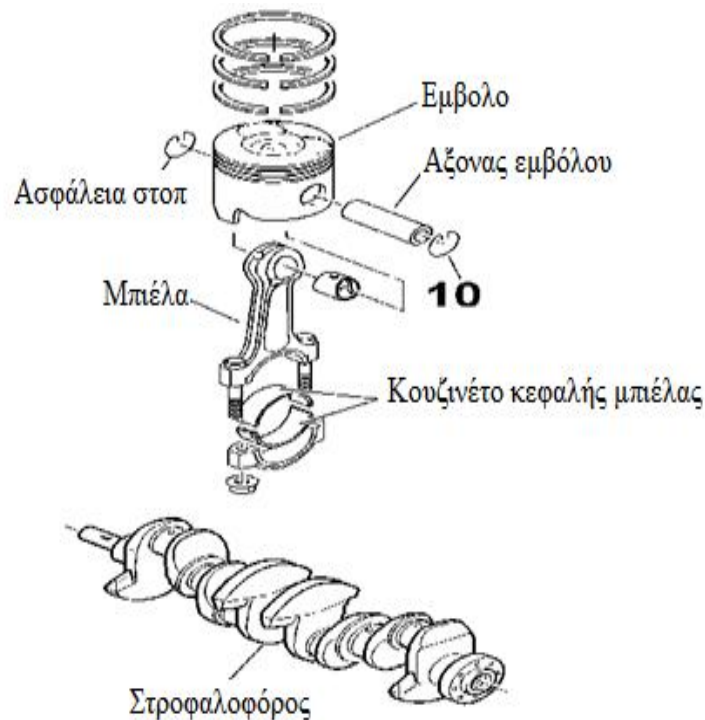
Λόγος λ στην καύση

Σημαίνοντα ρόλο στον βαθμό απόδοσης μιας μηχανής διαδραματίζει και ο λόγος λ του καυσίμου μείγματος. Κατ' αρχήν όταν ένα μίγμα είναι φτωχό, δεν θα προκαλέσει μεγάλη αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας κατά την καύση του, γι' αυτό και η μειωμένη απόδοση ισχύος. Επίσης, τα φτωχά μείγματα δεν ψύχουν τον θάλαμο, οπότε η πλήρωση του θαλάμου υποβαθμίζεται, εφόσον το καύσιμο μίγμα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας την οποία συναντά διαστέλλεται και γίνεται αραιό (πτώση της πυκνότητας). Αυτό όμως επιδρά αρνητικά μόνο στην ισχύ που λαμβάνουμε από τον κινητήρα και όχι στον βαθμό απόδοσης, έτσι όπως αυτός ορίζεται. Από την άλλη, η χαμηλή θερμοκρασία θα προκαλέσει και λιγοστές απώλειες θερμότητας, αφού η διαφοράς θερμοκρασίας με το παραφλού δεν θα είναι το ίδιο μεγάλη. Η ρύθμιση που ευνοεί την απόδοση μέγιστης ισχύος απαιτεί να έχουμε ελαφρά πλούσιο μίγμα.

2. ΒΑΣΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

ΚΑΥΣΗΣ

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται τα βασικά εξαρτήματα σε ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης Diesel.



Σχήμα 2.1: Έμβολο και παρελκόμενα εξαρτήματα ενός κινητήρα Diesel.

2.1 ΕΜΒΟΛΟ

Το έμβολο [1,2] εργάζεται κάτω από πολύ δύσκολες συνθήκες. Υπόκειται σε πολύ ισχυρές μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις. Κάτω από αυτές τις συνθήκες καλείται να φέρει εις πέρας τις παρακάτω λειτουργίες:

Μετατροπή της ενέργειας πίεσης σε μηχανικό έργο.

1. Στεγανοποίηση του χώρου του κυλίνδρου από το στρόφαλο-θάλαμο.
2. Να οδηγεί ευθύγραμμα το άνω άκρο του διωστήρα σε μηχανές βυθιζόμενου εμβόλου.
3. Να ρυθμίζει το άνοιγμα των θυρίδων εισαγωγής και εξαγωγής στους δίχρονους κινητήρες.

Για να μπορεί να αντεπεξέλθει το έμβολο στις απαιτήσεις αυτές, θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Μικρή μάζα, για να παραμένουν επίσης μικρές, σε υψηλές στροφές λειτουργίας, οι παλινδρομούσες δυνάμεις μαζών.
2. Μεγάλη ακαμψία στο επάνω τμήμα του εμβόλου, ευλυγισία στην πλήμνη του και ελαστικότητα στον κορμό.
3. Μεγάλη αντοχή στην περιοχή των ελατηρίων ακόμη και στην περίπτωση πιθανής θραύσης τους.
4. Μεγάλη αντοχή σε θερμότητα.
5. Καλή θερμική αγωγιμότητα για να μην εμφανίζονται μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές στο υλικό του εμβόλου.
6. Μικρή θερμική διαστολή, για να μην υπάρχουν μικρά διάκενα λειτουργίας.

Η μέγιστη τάση στην κεφαλή του εμβόλου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s_{br} = \frac{D_t^2 P_z}{4s^2} \quad (2.1)$$

όπου s_{br} είναι η ακτινική καμπτική τάση, D_t η εσωτερική διάμετρος κεφαλής του εμβόλου, P_z η πίεση ανάφλεξης και s το πάχος κεφαλής εμβόλου.

Τα έμβολα ως επί το πλείστον κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου, ενώ προστίθεται και 10-12% πυρίτιο το οποίο δίνει ένα σχετικά μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής της τάξεως του $19.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Η χαμηλή πυκνότητα μειώνει τις παλινδρομούσες μάζες και η καλή θερμική αγωγιμότητα συντελεί στη μείωση των θερμών περιοχών (hot spots). Η θερμοκρασία του εμβόλου στην υποδοχή του επάνω ελατηρίου θα πρέπει να περιορίζεται στους 200°C, ώστε να αποφευχθεί η καύση του λιπαντικού μέσου και η αύξηση της ελαστικότητας του κράματος.

Η υψηλής θερμοκρασίας αντοχή του εμβόλου μπορεί να αυξηθεί με την επιπλέον προσθήκη χαλκού από 1% έως 3-5%. Τέτοιου είδους κράματα επιτρέπουν τη μετατόπιση του επάνω ελατηρίου προς τα πάνω κάτι που σημαίνει τη μείωση του όγκου εκείνου όπου η φλόγα δεν μπορεί να φθάσει και επομένως τη μείωση των άκαυστων υδρογονανθράκων. Σε υψηλής απόδοσης κινητήρες, επιπρόσθετη ψύξη

των εμβόλων επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό λαδιού στο κάτω μέρος του εμβόλου. Ο πείρος του εμβόλου είναι συνήθως κοίλος, από σκληρυμένο χάλυβα και στηρίζεται πάνω στο έμβολο με κυκλικές ασφάλειες (circlips).

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στο σχεδιασμό των εμβόλων είναι η θερμική διαστολή. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής για το έμβολο είναι μεγαλύτερος από εκείνον του κυλίνδρου, οπότε θα πρέπει στο σχεδιασμό του εμβόλου να προβλέπονται ικανοποιητικές ανοχές έτσι ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος της επαφής του εμβόλου στον κύλινδρο. Επιπρόσθετα, το ασύμμετρο σχήμα του εμβόλου οδηγεί σε μη ομοιόμορφες θερμοκρασιακές κατανομές και σε μη συμμετρικές διαστολές. Για να εξασφαλιστούν οι ελάχιστες αλλά και ομοιόμορφες ανοχές κάτω από συνήθεις συνθήκες λειτουργίας, το έμβολο κατασκευάζεται με μεγάλη ακρίβεια σε ένα μη κυκλικό σχήμα. Οι θάλαμοι καύσης συνήθως μορφοποιούνται στο επάνω μέρος του εμβόλου. Το έμβολο επίσης μπορεί να επηρεάσει τις εκπομπές καυσαερίων μέσω της επιφάνειας ψύξης (quench area).

2.2 ΕΛΑΤΗΡΙΑ ΕΜΒΟΛΟΥ

Τα ελατήρια [3] του εμβόλου καλούνται να φέρουν εις πέρας τις εξής λειτουργίες:

1. Να στεγανοποιήσουν το θάλαμο καύσης
2. Να μεταφέρουν θερμότητα από το έμβολο στα τοιχώματα του κυλίνδρου
3. Να ρυθμίζουν τη ροή του λιπαντικού μέσου.

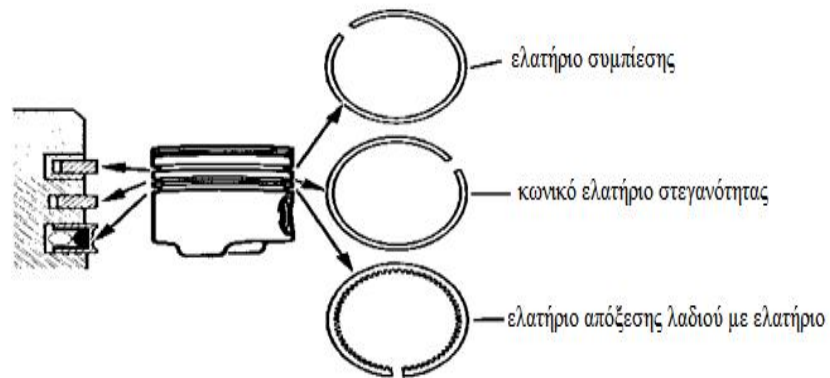
Το υλικό που παραδοσιακά χρησιμοποιείται είναι ο λεπτόκοκκος χυτοσίδηρος, με την εξαιρετική αντοχή σε θερμότητα και φθορές που τον χαρακτηρίζουν. Τα ελατήρια συνήθως κατασκευάζονται στην ανοικτή τους μορφή και όταν αυτά κλείσουν η περιφέρεια τους είναι ένας πραγματικός κύκλος. Λόγω της τάσης που έχουν τα ελατήρια να περιστρέφονται, μια απλή τετραγωνική εγκοπή είναι αρκετά ικανοποιητική, χωρίς τον κίνδυνο να δημιουργήσουν φθορές στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Υπάρχουν διάφορες μορφές ελατήριων (Σχήμα 2.2).

Σήμερα χρησιμοποιούνται στενά ελατήρια εφόσον μειώνουν τις απώλειες λόγω τριβών και έχουν καλύτερη εφαρμογή στην περιφέρεια του κυλίνδρου. Τα ελατήρια αυτά κατασκευάζονται από χρωμιούχο χάλυβα αφού έχουν υποστεί εναζώτωση.



Σχήμα 2.2: Ελατήρια εμβόλου.

Το πάχος τους είναι περίπου 1mm. Η απαίτηση για μείωση της κατανάλωσης λιπαντικού οδηγεί στην ανάγκη μείωσης του πάχους του φιλμ λαδιού που σχηματίζεται μεταξύ ελατηρίου και κυλίνδρου και συνεπώς απαιτείται και μια ειδική επίστρωση στα ελατήρια η οποία θα τους προσδώσει μεγάλη αντοχή σε φθορές. Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές ένθεσης μικροσκοπικών κεραμικών σωματιδίων στο υλικό του ελατηρίου, κάτι το οποίο δίδει στο ελατήριο τη διπλάσια αντοχή σε φθορές.



Σχήμα 2.3: Ελατήρια σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης.

Συνήθης πρακτική είναι η ύπαρξη τριών ελατηρίων εμβόλου, δύο ελατήρια συμπίεσης και ένα ελατήριο στεγανοποίησης ελαίου. Τυπικά ελατήρια που χρησιμοποιούνται σε μηχανή εσωτερικής καύσης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3.

2.3 ΔΙΩΣΤΗΡΑΣ

Ο διωστήρας [2] συνδέει το έμβολο με το στροφαλοφόρο άξονα και σκοπός του είναι να μετατρέπει την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου σε περιστροφική για τον στροφαλοφόρο άξονα (Σχήμα 2.4). Η μορφή της τομής του είναι τύπου 'H' ώστε να προσδίδει υψηλή καμπτική αντοχή. Τιτάνιο, κράματα αλουμινίου και χυτοσίδηρος έχουν χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένες εφαρμογές, ενώ η μέθοδος κατασκευής είναι με σφυρηλάτηση. Το κάτω κυκλικό άκρο είναι χωρισμένο στα δύο για ευκολία συναρμολόγησης στο κομβίο του στροφάλου.

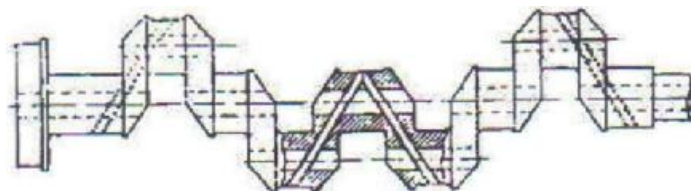


Σχήμα 2.4: Διωστήρας μηχανής εσωτερικής καύσης.

Οι κοχλίες που συνδέουν τα στοιχεία αυτά φορτίζονται σε μεγάλο βαθμό, επομένως το υλικό κατασκευής τους θα πρέπει να έχει ικανοποιητική αντοχή.

2.4 ΣΤΡΟΦΑΛΟΦΟΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ

Ο στροφαλοφόρος άξονας [2] κατασκευάζεται σήμερα από χυτοσίδηρο σφαιρικού γραφίτη SG (spheroidal graphite). Ο χυτοσίδηρος είναι φθηνότερος στην κατεργασία και έχει εξαιρετικές ιδιότητες φθοράς, εφόσον η μικρότερη σκληρότητα κάνει τον άξονα πιο ελαστικό και οι εξαιρετικές εσωτερικές ιδιότητες απόσβεσης που παρουσιάζει μειώνουν τους κινδύνους από στρεπτικές ταλαντώσεις. Στον απλό χυτοσίδηρο, τα σωματίδια γραφίτη είναι με τη μορφή λεπίδας, τα οποία είναι η κύρια πηγή θραύσεων και έτσι αυτά μειώνουν την αντοχή του υλικού. Στον χυτοσίδηρο σφαιρικού γραφίτη, ο χαλκός, το χρώμιο και το πυρίτιο κάνουν τα σωματίδια του γραφίτη να παίρνουν μορφή σφαίρας, τα οποία είναι λιγότερο ευαίσθητα στο να παρουσιάσουν ρωγμές από τα σωματίδια γραφίτη σε μορφή λεπίδας τα οποία έχουν πολύ μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας. Ένας συνηθισμένος στροφαλοφόρος άξονας με 5 έδρανα βάσης φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Οι διαβάσεις λαδιού επιτρέπουν το λιπαντικό να μεταφερθεί από τα κύρια έδρανα (βάσης) προς τα έδρανα κομβίου.



Σχήμα 2.5: Στροφαλοφόρος άξονας 5 εδράνων βάσης για 4-κύλινδρο κινητήρα.

2.5 ΕΚΚΕΝΤΡΟΦΟΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ

Οι εκκεντροφόροι άξονες [3] κατασκευάζονται συνήθως από σκληρυμένο χάλυβα, σκληρυμένο κράμα χυτοσιδήρου ή χυτοσίδηρο σφαιρικού γραφίτη (Σχήμα 2.6). Υπάρχει μια σειρά μεθόδων σκλήρυνσης, όπως σκλήρυνση φλόγας, εναζώτωση και ενανθράκωση.

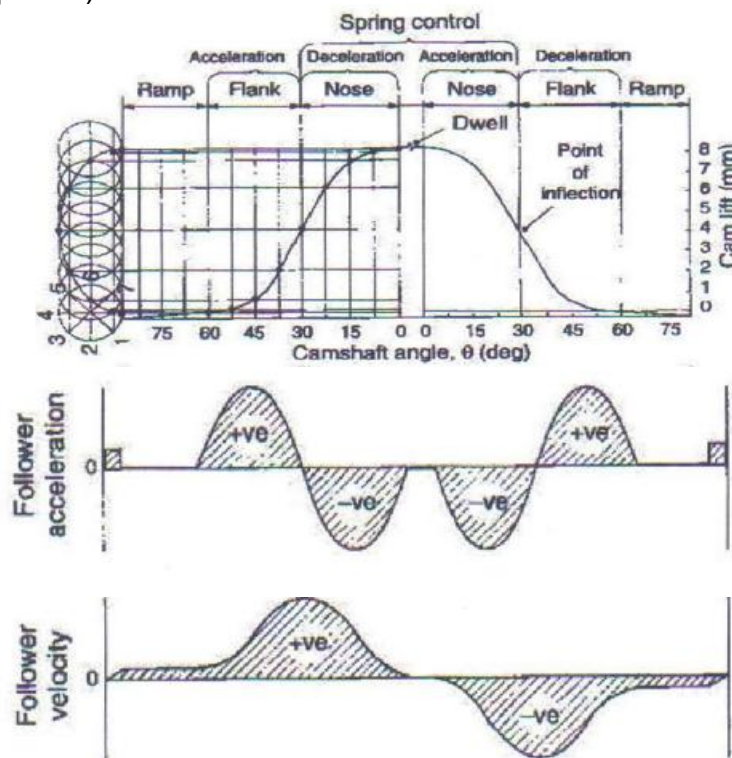


Σχήμα 2.6: Εκκεντροφόρος 4-κύλινδρου κινητήρα.

Υπάρχουν διάφορες μορφές έκκεντρων η καθεμιά από τις οποίες δίδει και διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας στον κινητήρα. Μερικά παραδείγματα είναι το έκκεντρο σταθερής ταχύτητας, έκκεντρο σταθερής επιτάχυνσης, έκκεντρο απλής αρμονικής κίνησης και κυκλοειδές έκκεντρο.

2.6 ΚΥΚΛΟΕΙΔΕΣ ΕΚΚΕΝΤΡΟ (CYCLOIDAL CAM)

Κατά τη διάρκεια της αρχικής κίνησης του έκκεντρου [3], η ταχύτητα της βαλβίδας αυξάνει με αργό ρυθμό, κατόπιν κινείται γρήγορα και στη συνέχεια ο ρυθμός μειώνεται καθώς η ταχύτητα φθάνει στη μέγιστη τιμή της στην κορυφή του έκκεντρου (Σχήμα 2.7)



Σχήμα 2.7: Χαρακτηριστικά κυκλοειδούς έκκεντρου.

Η επιτάχυνση της βαλβίδας αρχικά αυξάνει απότομα, μετά αυξάνει με πιο αργό ρυθμό καθώς πλησιάζει τη μέγιστη τιμή της η οποία βρίσκεται στο σημείο κλίσης του διαγράμματος ταχύτητας. Στη συνέχεια η επιτάχυνση μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί όταν η ταχύτητα γίνεται μέγιστη.

2.7 ΒΑΛΒΙΔΕΣ

Οι βαλβίδες εισαγωγής και ιδιαίτερα οι βαλβίδες εξαγωγής [3] καλούνται να εργαστούν κάτω σκληρές συνθήκες με θερμοκρασίες που φθάνουν τους 500 °C και 800°C αντίστοιχα (Σχήμα 2.8). Μια οικονομική λύση για την κατασκευή των βαλβίδων εξαγωγής είναι η χρήση σύνθετων υλικών (composite materials). Ο οδηγός της βαλβίδας δεν οδηγεί μόνο τη βαλβίδα, αλλά και μεταφέρει θερμότητα από τη βαλβίδα προς την κυλινδροκεφαλή. Σε κύλινδρο κεφαλές χυτοσιδήρου ο οδηγός είναι συνήθως αναπόσπαστο κομμάτι της κυλινδροκεφαλής, αλλά σε κύλινδρο κεφαλές κράματος αλουμινίου ένα μεταλλικό ένθετο εξάρτημα προστίθεται.

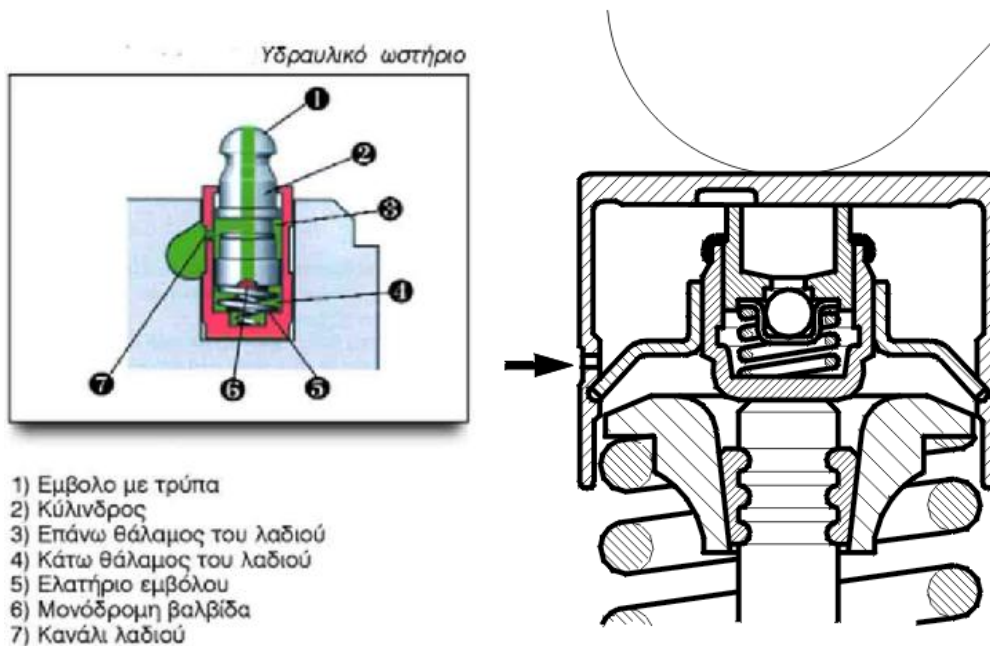


Σχήμα 2.8: Βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής.

2.8 ΩΣΤΗΡΙΑ ΒΑΛΒΙΔΩΝ

Τα ωστήρια [3] καλούνται να μεταφέρουν την κίνηση των έκκεντρων στη βαλβίδα και να μετατρέψουν την κίνηση αυτή από περιστροφική σε παλινδρομική. Η

τελευταία εξέλιξη των εξαρτημάτων αυτών είναι τα υδραυλικά ενεργοποιούμενα ωστήρια.



Σχήμα 2.9: Λειτουργία υδραυλικού ωστηρίου.

Το υδραυλικό ωστήριο αποτελείται από ένα εξωτερικό κύλινδρο και από ένα έμβολο τοποθετημένο εσωτερικά του κυλίνδρου (Σχήμα 2.9). Εσωτερικά του εμβόλου βρίσκεται μια βαλβίδα που αποτελείται από ένα χαλαρό ελατήριο και μια μικρή μεταλλική σφαίρα. Η βαλβίδα αυτή βρίσκεται σε ένα μικρό κύλινδρο εσωτερικά του οποίου κινείται ένα έμβολο. Περιμετρικά του πρώτου εμβόλου υπάρχει μια εγκοπή σε κάποιο σημείο της οποίας υπάρχει μια μικρή οπή που επιτρέπει τη διέλευση του λιπαντικού.

Σκοπός των υδραυλικών ωστηρίων είναι να διατηρούν αυτόματα σταθερό διάκενο μεταξύ της επιφάνειας επαφής τους με το έκκεντρο και της κυκλικής επιφάνειας του έκκεντρο.

3. ΚΑΥΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ

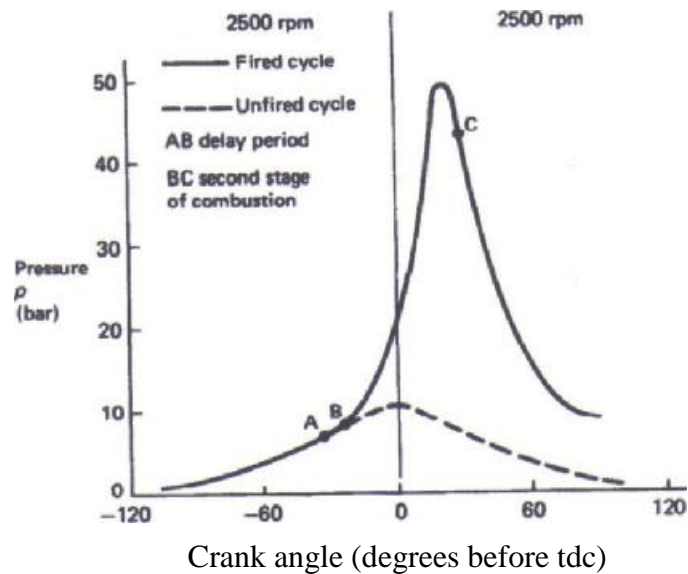
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΚΑΥΣΗΣ

Η καύση μπορεί να συμβαίνει είτε φυσιολογικά - με έναυση από ένα σπινθηριστή και το μέτωπο της φλόγας να εξαπλώνεται σταθερά μέσω του μίγματος - είτε μη φυσιολογικά [1]. Η μη φυσιολογική καύση μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, κυρίως όμως μπορεί να εμφανιστεί ως προανάφλεξη και αυτανάφλεξη. Η προανάφλεξη γίνεται όταν το καύσιμο αναφλέγεται από μια θερμή περιοχή, όπως η βαλβίδα εξαγωγής ή κάποιες επικαθίσεις άνθρακα από την καύση. Η αυτανάφλεξη συμβαίνει όταν η πίεση και θερμοκρασία του μίγματος είναι τέτοιες ώστε το υπόλοιπο άκαυστο μίγμα να αναφλέγεται ακαριαία. Η προανάφλεξη μπορεί να οδηγήσει σε αυτανάφλεξη και αντιστρόφως.

3.2 ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΥΣΗ

Όταν το έμβολο πλησιάζει στο τέλος της φάσης της συμπίεσης, ένας σπινθήρας δημιουργείται μεταξύ των ηλεκτροδίων του σπινθηριστή. Ο σπινθήρας αφήνει ένα μικρό πυρήνα φλόγας ο οποίος εξαπλώνεται μέσα στο άκαυστο μίγμα. Η εξάπλωση της φλόγας δεν μπορεί να εξελιχθεί από την τύρβη, έως ότου ο πυρήνας γίνει της ίδιας τάξης μεγέθους με την κλίμακα της τύρβης.

Η αρχική περίοδος καύσης περιλαμβάνει την αρχική στρωτή καύση και τη μετατροπή της σε πλήρως τυρβώδη, και ορισμένες φορές αναφέρεται ως «περίοδος καθυστέρησης» (delay period). Η περίοδος καθυστέρησης διαρκεί κατά προσέγγιση σταθερό χρόνο. Το Σχήμα 3.1 συγκρίνει τα διαγράμματα πιέσεων για την περίπτωση που το μίγμα αναφλέγεται και για την περίπτωση που αυτό δεν αναφλέγεται. Το σημείο στο οποίο τα ίχνη της πίεσης αποκλίνουν, δεν μπορεί εύκολα να καθοριστεί, αλλά χρησιμοποιείται για να σηματοδοτήσει το τέλος της περιόδου καθυστέρησης της καύσης.



Σχήμα 3.1: Υποθετικό διάγραμμα πιέσεων για κινητήρα Otto.

Η περίοδος αυτή είναι διάρκειας συνήθως 1-2 ms, κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε 15-30° γωνίας στροφάλου στις 2500rpm. Μια πιο αυστηρή προσέγγιση είναι ο υπολογισμός του ποσοστού της μάζας του καιγόμενου μίγματος (mass fraction burn - mfb) από το ιστορικό πιέσεων, όμως υπάρχουν διάφορες ασάφειες με αυτούς τους υπολογισμούς και οι επιλογές του ποσοστού του καιγόμενου μίγματος το οποίο αντιστοιχεί στην περίοδο καθυστέρησης της καύσης, μπορεί να είναι είτε 1%, είτε 5%, είτε 10 %. Η χρονική διάρκεια του 1% mfb αντιστοιχεί σε στρωτή καύση, αλλά ο υπολογισμός της είναι αρκετά ευαίσθητος σε πειραματικές ασάφειες και σφάλματα. Οι χρονικές διάρκειες των 5% και 10% mfb περιλαμβάνουν τη φάση της στρωτής καύσης και τη μετατροπή της σε πλήρως τυρβώδη καύση. Και οι δύο περίοδοι είναι γνωστοί ως η περίοδος της αρχικής καύσης. Η περίοδος αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και τη σύσταση του μίγματος καυσίμου / αέρα, και είναι πολύ μικρή όταν το μίγμα είναι λίγο πιο πλούσιο από το στοιχειομετρικό, με άλλα λόγια όταν η ταχύτητα της στρωτής φλόγας είναι μέγιστη. Η κύρια περίοδος καύσης αποτελείται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από τυρβώδη καύση και χαρακτηρίζεται ως το 10-90% ή 5-95% της διάρκειας mfb.

Το τέλος του δεύτερου σταδίου της καύσης, επίσης δύσκολα καθορίζεται στο διάγραμμα πιέσεων, αλλά είναι γνωστό ότι βρίσκεται λίγο μετά τη μέγιστη τιμή της πίεσεως. Το δεύτερο στάδιο της καύσης επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες όπως και το αρχικό στάδιο, αλλά επιπλέον και από τα επίπεδα της τύρβης.

Αυτό είναι πολύ καλά διότι καθώς η τύρβη αυξάνεται αυξανόμενης της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, και ο χρόνος για το δεύτερο στάδιο της καύσης μειώνεται σχεδόν σε ένα κλάσμα της ολικής διάρκειας της καύσης. Με άλλα λόγια, το δεύτερο στάδιο της καύσης αντιστοιχεί προσεγγιστικά σε ένα σταθερό αριθμό μοιρών γωνίας στροφάλου. Στην πράξη, η μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου ασκείται 5-20° μετά το ΑΝΣ.

Το τελικό στάδιο της καύσης είναι εκείνο κατά το οποίο το μέτωπο της φλόγας έρχεται σε επαφή περισσότερο με το θάλαμο καύσης, με μια μειωμένη επιφάνεια μετώπου φλόγας να είναι σε επαφή με το άκαυστο μίγμα, με αποτέλεσμα το εναπομένον άκαυστο μίγμα που βρίσκεται εντός του θαλάμου καύσης να αναφλέγεται πιο αργά. Η πίεση εντός του κυλίνδρου επίσης μειώνεται. Το τελικό στάδιο της καύσης είναι πολύ αργό και δεν ολοκληρώνεται έως ότου η βαλβίδα εξαγωγής ανοίξει. Ακόμη και αν υπάρχει μια εκτεταμένη οξειδωση στον αυλό εξαγωγής, η καύση δεν θα είναι τέλεια, όπως αποδεικνύεται από τις μετρήσεις των εκπομπών άκαυστων υδρογονανθράκων. Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες δεν θα πρέπει να είναι περισσότεροι από ένα μικρό ποσοστό του συνολικού ποσού καυσίμου.

Καθώς η καύση διαρκεί ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα, το μίγμα αναφλέγεται πριν το ΑΝΣ, στο τέλος της φάσης της συμπίεσης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια αύξηση στην πίεση η οποία σχετίζεται με την καύση πριν το τέλος της φάσης της συμπίεσης και επίσης μια αύξηση του (αρνητικού) έργου συμπίεσεως. Καθυστερώντας το σημείο αναφλέξεως, η πίεση αυξάνεται πριν το ΑΝΣ και επίσης αυξάνεται το έργο συμπίεσεως. Επιπλέον, η υψηλότερη πίεση στο ΑΝΣ οδηγεί σε υψηλότερες πιέσεις κατά τη διάρκεια της φάσης της εκτόνωσης και σε μια αύξηση του (θετικού) έργου εκτονώσεως. Προφανώς οι δύο αυτές ρυθμίσεις είναι αντικρουόμενες μεταξύ τους, επομένως αυτό οδηγεί στην επιλογή ενός ιδανικού χρονισμού εναύσεως.

Καθώς η μέγιστη προπορεία ανάφλεξης είναι ανεπηρέαστη από το χρονισμό εναύσεως, χρησιμοποιείται πρακτικά η ελάχιστη προπορεία. Η ρύθμιση αυτή είναι γνωστή ως «ελάχιστη προπορεία ανάφλεξης για βέλτιστη ροπή» (MBT). Χρησιμοποιώντας της ελάχιστη προπορεία, οι μέγιστες πιέσεις και θερμοκρασίες εντός του κυλίνδρου μειώνονται. Αυτό βοηθά στον περιορισμό της μεταφοράς θερμότητας, του θορύβου, των εκπομπών και της ευαισθησίας στη μη φυσιολογική καύση.

Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της καύσης, καθώς ο πυρήνας της φλόγας είναι ακόμη μικρός, μπορεί να απομακρυνθεί από την περιοχή του σπινθηριστή, λόγω ισχυρών ροών εντός του κυλίνδρου. Αυτό μπορεί να συμβεί με τυχαίο τρόπο και μπορεί να έχει μια σημαντική επίδραση στην εξάπλωση της φλόγας.

Αυτό πρακτικά αποδεικνύεται από τη μη επαναληψιμότητα των ενδεικτικών διαγραμμάτων ενός κινητήρα και ονομάζεται «κυκλική διασπορά» ή «μεταβολή της καύσης από κύκλο σε κύκλο».

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η πορεία της καύσης σε ένα κινητήρα Otto, κάνοντας χρήση μιας διάταξης οπτικής επαφής μέσα από το έμβολο [4,5]. Οι φωτογραφίες έχουν παρθεί από ένα κινητήρα Rover-Oxford K4 (μια μονοκύλινδρη έκδοση του κινητήρα Rover K1 6). Η πρώτη φωτογραφία δείχνει την εικόνα του θαλάμου καύσης ο οποίος φωτίζεται από ένα λαμπάκι νήματος τουνγκστενίου, τοποθετημένου στη θέση του σπινθηριστή. Η οπτική επιφάνεια είναι περίπου το 75% της επιφάνειας του κυλίνδρου. Οι βαλβίδες εξαγωγής βρίσκονται επάνω και οι βαλβίδες εισαγωγής κάτω.

Όλες οι φωτογραφίες πάρθηκαν με τον κινητήρα να λειτουργεί στις 1000 σ.α.λ. (εκτός από την πρώτη), με μέγιστο φορτίο και με σημείο εναύσεως στις 15° πριν το ΑΝΣ. Οι 2 πρώτες φωτογραφίες αφορούν την καύση ισο-οκτανίου με φτωχό (λόγος περίσσειας αέρα, $\lambda=1.2$) και πλούσιο μίγμα (λόγος περίσσειας αέρα, $\lambda=0.7$) αντίστοιχα. Το χαρακτηριστικό μπλε χρώμα της καύσης ενός φτωχού μίγματος οφείλεται στις εκπομπές CO₂ και ριζών CH.

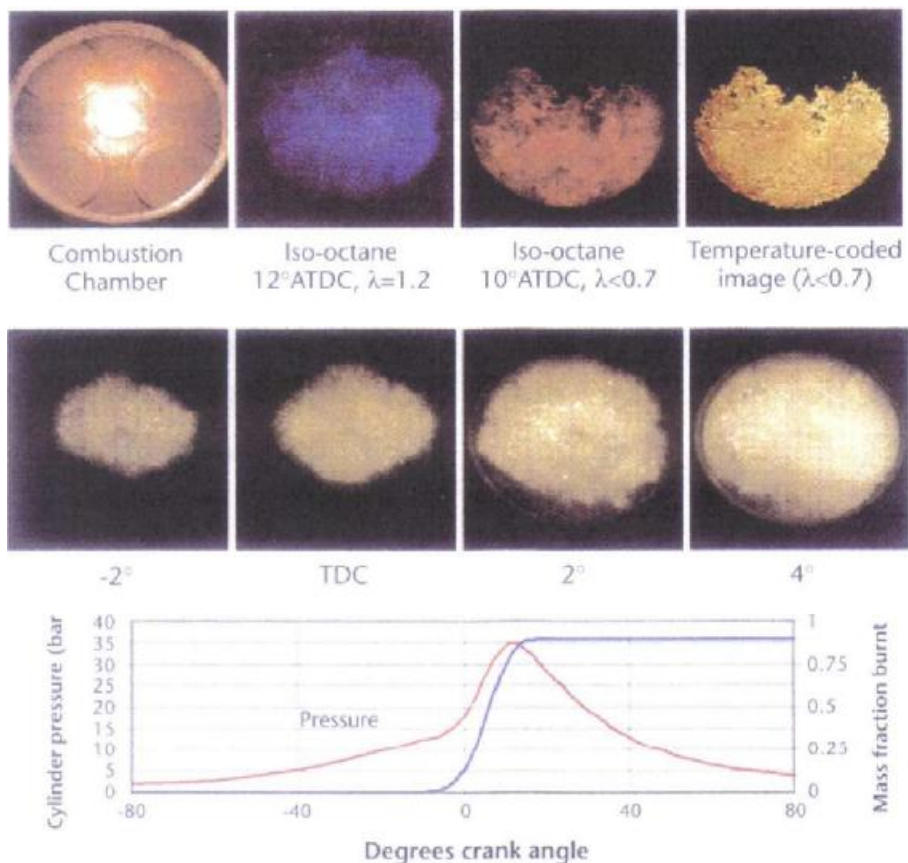
Με το πλούσιο μίγμα, αυτές οι αμυδρές εκπομπές καλύπτονται οπτικά από πολύ ισχυρή ακτινοβολία, η οποία γίνεται αντιληπτή από το κίτρινο χρώμα, λόγω των καιγόμενων σωματιδίων αιθάλης.

Η αιθάλη εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, και μετρώντας την ένταση της ακτινοβολίας σε 2 γνωστά μήκη κύματος, είναι δυνατόν να προσεγγιστεί η θερμοκρασία της αιθάλης. Η επόμενη φωτογραφία έχει δημιουργηθεί με τη μέθοδο αυτή στην οποία είναι χρωματικά κωδικοποιημένη η θερμοκρασία της αιθάλης.

Η σειρά των φωτογραφιών της καύσης της μεθανόλης, επετεύχθη από διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας, με αρκετές φωτογραφίες να έχουν παρθεί σε κάθε γωνία στροφάλου. Η οξειδωση της μεθανόλης εκπέμπει ασήμαντη ακτινοβολία, οπότε κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη στη μεθανόλη μικρής ποσότητας χλωριούχου νατρίου. Οι κίτρινες εκπομπές επομένως αποδίδονται στα ιόντα νατρίου. Οι

στιγμιαίες μετρήσεις της πίεσης κατέστησαν δυνατή μια αντιπροσωπευτική επιλογή φωτογραφιών οι οποίες θα μας έδιναν τη σειρά των εικόνων και οι μετρήσεις πίεσεως αναλύθηκαν ώστε να δώσουν το ιστορικό της μέσης πίεσης και το ποσοστό της καιγόμενης μάζας (κάνοντας χρήση της μεθόδου των Rassweiler και Withrow).

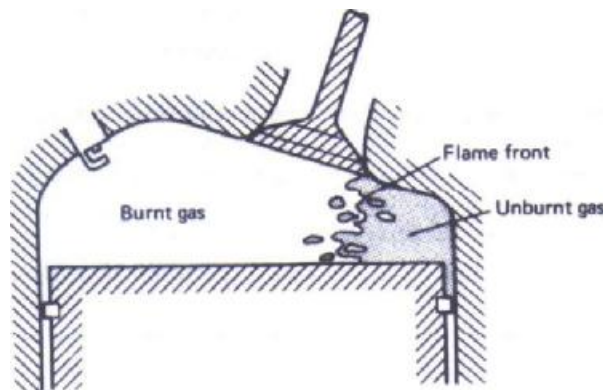
Παρόλο που η έναυση συνέβαινε στις 15° πριν το ΑΝΣ, δεν παρατηρήθηκε κάποια φλόγα έως το σημείο των 10° πριν το ΑΝΣ, στο οποίο το ιστορικό της πίεσεως δεν δίνει απολύτως καμία ένδειξη καύσης. Το «σπασμένο» σχήμα του μετώπου της φλόγας είναι ενδεικτικό της τυρβώδους καύσης. Το οπτικό πεδίο του εμβόλου είναι διαμέτρου 6 cm και από τις 4° μετά το ΑΝΣ, η καύση έχει καλύψει ολοκληρωτικά το οπτικό πεδίο. Στο σημείο αυτό πάνω από τη μισή επιφάνεια του θαλάμου καύσης έχει καλυφθεί από τη φλόγα, αλλά μόνο περίπου το 20% του καυσίμου έχει αναφλεγεί. Αυτό συμβαίνει διότι η πυκνότητα του άκαυστου μείγματος είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του καμένου μείγματος.



Σχήμα 3.2: Καύση σε ένα κινητήρα Otto.

3.3 ΜΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΥΣΗ

Η επιφανειακή ανάφλεξη οφείλεται στην ανάφλεξη του μίγματος ως αποτέλεσμα της επαφής με μια θερμή επιφάνεια, όπως π.χ. μια βαλβίδα εξαγωγής. Η επιφανειακή ανάφλεξη χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο της συνέχισης της λειτουργίας του κινητήρα όταν διακοπεί η λειτουργία του συστήματος ανάφλεξης. Εάν ένας κινητήρας λειτουργεί με τη σωστή αναλογία μίγματος, το σωστό χρονισμό ανάφλεξης και ικανοποιητική ψύξη, ενώ παρατηρείται επιφανειακή ανάφλεξη, τότε η συνηθέστερη εξήγηση στο πρόβλημα είναι η ύπαρξη επικαθίσεων από κατάλοιπα καύσης. Εάν η επιφανειακή ανάφλεξη συμβαίνει πριν την έναυση του σπινθήρα, τότε ονομάζεται προανάφλεξη. Η προανάφλεξη προκαλεί αύξηση του έργου συμπίεσεως κάτι το οποίο οδηγεί σε μείωση ισχύος. Σε ένα πολυκύλινδρο κινητήρα, με προανάφλεξη μόνο σε ένα κύλινδρο, οι συνέπειες μπορεί να είναι εξαιρετικά σοβαρές, καθώς οι υπόλοιποι κύλινδροι συνεχίζουν να λειτουργούν φυσιολογικά. Η προανάφλεξη οδηγεί σε υψηλές τιμές μέγιστων πιέσεων και αυτό ακολούθως προκαλεί την αυτανάφλεξη. Η αυτανάφλεξη δημιουργείται όταν η πίεση και θερμοκρασία του άκαυστου μίγματος είναι τέτοια ώστε να προκαλέσει ακαριαία ανάφλεξη (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Καύση σε ένα κινητήρα Otto.

Το μέτωπο της φλόγας εξαπλώνεται μακριά από τον σπινθηριστή και το άκαυστο μίγμα συμπιέζεται και θερμαίνεται με ακτινοβολία από το μέτωπο της φλόγας, ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της καύσης.

Εάν συμβεί ακαριαία ανάφλεξη του άκαυστου μίγματος, θα υπάρξει δραστική αύξηση πίεσεως η οποία χαρακτηρίζεται ως «πειράκια». Τα «πειράκια» προκαλούν

ένα μεταλλικό ήχο. Το αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού θα μπορούσε να είναι η καταστροφή του θερμικού οριακού στρώματος στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Αυτό προκαλεί αυξημένη μεταφορά θερμότητας. Εάν η προανάφλεξη συμβεί νωρίτερα στη φάση της συμπίεσης, η ακαριαία ανάφλεξη θα συμβεί νωρίτερα και θα οδηγήσει σε πιο έντονα «πειράκια». Αυτό ακολούθως οδηγεί στο να συμβεί η προανάφλεξη ακόμη νωρίτερα και στη συνέχεια συμβαίνει το φαινόμενο της λειτουργίας του κινητήρα ακόμη και με το σύστημα ανάφλεξης απενεργοποιημένο. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί υπερθέρμανση στο έμβολο το οποίο λόγω του χαμηλού του σημείου τήξεως, μπορεί να τρυπήσει ή να εναποτεθεί υλικό του εμβόλου στο χιτώνιο του κυλίνδρου.

3.4 ΘΑΛΑΜΟΙ ΚΑΥΣΗΣ

3.4.1 Συμβατικοί θάλαμοι καύσης

Αρχικά η κυλινδροκεφαλή δεν ήταν τίποτα παραπάνω από ένα απλό κάλυμμα για τον κύλινδρο. Η απλούστερη διάταξη ήταν ο κινητήρας με πλευρικές βαλβίδες, με τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής να βρίσκονται στη μία πλευρά του κυλίνδρου. Ο πιο επιτυχημένος θάλαμος καύσης [6] για τον κινητήρα πλευρικών βαλβίδων ήταν ο «τυρβώδης» θάλαμος καύσης Ricardo. Ο σχεδιασμός του ήταν αποτέλεσμα πολυετών μελετών και εργαστηριακών πειραμάτων για τη βελτίωση της καύσης. Ο μέγιστος λόγος συμπίεσης που μπορούσε να επιτευχθεί με αυτή τη μορφή θαλάμου καύσης ήταν 6:1, αλλά αυτό δεν αποτελούσε περιορισμό, καθώς τα επίπεδα οκτανίων στα καύσιμα των δεκαετιών 1920 και 1930 ήταν της τάξεως του 60-70. Όσον αφορά το σχεδιασμό του θαλάμου καύσης Ricardo, το διάκενο μεταξύ ενός τμήματος της κυλινδροκεφαλής και του εμβόλου όταν αυτό βρίσκεται στο ΑΝΣ (φάση συμπίεσης), είναι πολύ μικρό. Αυτό δημιουργεί μια επιφάνεια συμπίεσης (squish area), από την οποία εγχύεται μίγμα καυσίμου προς τον κύριο όγκο του θαλάμου. Η τύρβη την οποία αυτό το jet δημιουργεί, εξασφαλίζει ταχεία καύση.

Εάν χρησιμοποιείται μια πολύ μεγάλη επιφάνεια συμπίεσης, τότε η καύση είναι υπερβολικά ταχεία και θορυβώδης. Αυτή η σχεδίαση μειώνει την τάση για προανάφλεξη, καθώς το πλέον απομακρυσμένο από τον σπινθηριστή μίγμα βρίσκεται στην επιφάνεια συμπίεσης. Το μίγμα που βρίσκεται στην επιφάνεια

συμπύεσης έχει μικρότερη τάση για προανάφλεξη, καθώς θα είναι ψυχρότερο λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ κυλινδροκεφαλής και εμβόλου. Η υπερβολική τύρβη προκαλεί επίσης και υπερβολική μεταφορά θερμότητας στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης.

Οι κύριοι παράγοντες εξέτασης για το σχεδιασμό ενός θαλάμου καύσης είναι οι ακόλουθοι:

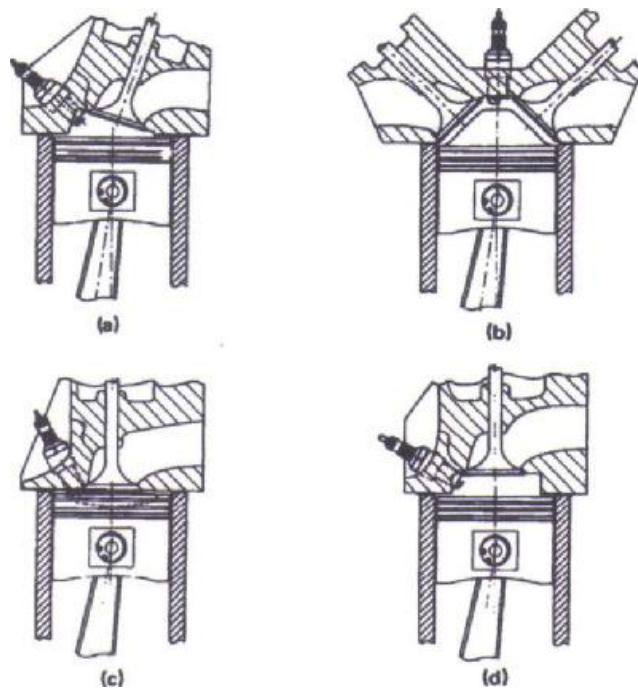
1. Η διαδρομή που διανύεται από το μέτωπο της φλόγας θα πρέπει να ελαχιστοποιείται.
2. Η(Οι) βαλβίδα(ες) εισαγωγής και ο(ι) σπινθηριστής(ές) θα πρέπει να είναι σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους,
3. Θα πρέπει να υπάρχουν ικανοποιητικά επίπεδα τύρβης,
4. Το τελικό μίγμα (το μίγμα που θα συναντήσει τελευταία το μέτωπο της φλόγας) θα πρέπει να βρίσκεται σε μια ψυχρή περιοχή του θαλάμου καύσης.
5. Με την ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταξύ του σπινθηριστή και του τελικού μίγματος, η καύση θα είναι όσο το δυνατόν πιο γρήγορη. Αυτό έχει δύο επιδράσεις. Πρώτον, επιτυγχάνονται υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα, επομένως και μεγαλύτερη ισχύς εξόδου. Δεύτερον, η ταχεία καύση μειώνει το χρόνο στον οποίο οι αλυσιδωτές αντιδράσεις που οδηγούν στην προανάφλεξη δημιουργούνται. Από αυτό συνεπάγεται ότι για γεωμετρικά όμοιους κινητήρες, αυτοί με τους μικτότερης διαμέτρου κυλίνδρους, θα μπορούν να έχουν μεγαλύτερο λόγο συμπύεσης.
6. Η βαλβίδα εξαγωγής θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον σπινθηριστή. Η βαλβίδα εξαγωγής είναι πολύ θερμή, επομένως θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο μακριά από το τελικό μίγμα, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αυτανάφλεξη ή η προανάφλεξη.
7. Θα πρέπει να υπάρχουν ικανοποιητικά επίπεδα τύρβης, ώστε να επιτευχθεί ταχεία καύση. Παρόλα αυτά, υπερβολική τύρβη οδηγεί σε μεγάλα ποσά μεταφερόμενης θερμότητας από τα περιεχόμενα του θαλάμου καύσης και επίσης πολύ γρήγορη καύση.
8. Το μικρό διάκενο μεταξύ της κυλινδροκεφαλής και του εμβόλου στην επιφάνεια συμπύεσης, δημιουργεί μια ψυχρή περιοχή. Εφόσον η βαλβίδα εισαγωγής ψύχεται κατά τη διάρκεια της φάσης της εισαγωγής, αυτή επίσης μπορεί να τοποθετηθεί στην περιοχή του τελικού μίγματος.

Ο θάλαμος καύσης πρέπει να έχει ένα μικρό λόγο επιφάνειας προς όγκο, ώστε να ελαχιστοποιείται η μεταφορά θερμότητας. Για κινητήρες υψηλής απόδοσης, οι μικροί κύλινδροι θα προκαλέσουν γρηγορότερη καύση, επομένως και υψηλές ταχύτητες περιστροφής, όπως και μεγαλύτερη ισχύ εξόδου. Για μια δεδομένη γεωμετρία, μειώνοντας τη χωρητικότητα του κάθε κυλίνδρου από τα 500cm³ στα 200 cm³ μπορεί να προκληθεί αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα από τις 6000rpm στις 8000rpm.

Ο λόγος της διαμέτρου του κυλίνδρου προς τη διαδρομή του εμβόλου είναι επίσης εξαιρετικά σημαντικός. Όταν η διαδρομή του εμβόλου είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κυλίνδρου, τότε ο κινητήρας χαρακτηρίζεται ως «υποτετράγωνος». Στους «υπερτετράγωνους» κινητήρες, η διάμετρος του κυλίνδρου είναι μεγαλύτερη από τη διαδρομή του εμβόλου και αυτό επιτρέπει τη χρήση βαλβίδων μεγαλύτερης διαμέτρου για μια δεδομένη τιμή χωρητικότητας του κυλίνδρου. Αυτό βελτιώνει τις διαδικασίες εισαγωγής και εξαγωγής, ειδικότερα στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Επιπλέον η μικρή διαδρομή μειώνει τη μέγιστη ταχύτητα του εμβόλου για ένα δεδομένο ρυθμό περιστροφής, με αποτέλεσμα τις δυνατότητα για υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής. Το μειονέκτημα με τους «υπερτετράγωνους» κινητήρες είναι ότι ο θάλαμος καύσης έχει πολύ μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο, κάτι το οποίο οδηγεί σε αυξημένη απαγωγή θερμότητας. Τελευταία, έχει γίνει μια επιστροφή στους «υποτετράγωνους» κινητήρες, καθώς οι θάλαμοι καύσης στους κινητήρες αυτούς έχουν καλύτερο λόγο επιφάνειας προς όγκο και έτσι εξασφαλίζουν καλύτερη οικονομία καυσίμου. Γενικά, η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός κινητήρα είναι ανάλογη του εμβαδού της επιφάνειας του εμβόλου, ενώ η μέγιστη ροπή στρέψης είναι ανάλογη της χωρητικότητας του κυλίνδρου.

Οι περισσότεροι κινητήρες έχουν λόγο συμπίεσης της τάξης του 9:1, για τον οποίο η γεωμετρία πλευρικών βαλβίδων είναι ακατάλληλη. Οι κινητήρες με επικεφαλείς βαλβίδες (ohv) έχουν καλύτερα σχεδιασμένο θάλαμο καύσης για αυτούς τους υψηλούς λόγους συμπίεσης. Εάν ο εκκεντροφόρος βρίσκεται στον κορμό του κινητήρα, τότε οι βαλβίδες οδηγούνται από ωστήρια και ζύγωθρα. Μια εναλλακτική λύση σε αυτό είναι η τοποθέτηση του εκκεντροφόρου άξονα στην κυλινδροκεφαλή (ohc). Στην περίπτωση αυτή, ο εκκεντροφόρος μπορεί να τοποθετηθεί ακριβώς επάνω από τις βαλβίδες, ή στη μία πλευρά της κυλινδροκεφαλής, με τις βαλβίδες να οδηγούνται από ζύγωθρα.

Στο Σχήμα 3.4, φαίνονται τέσσερις συνηθισμένες διαμορφώσεις θαλάμων καύσης, όπου μόνο η μια βαλβίδα φαίνεται, με την άλλη να βρίσκεται ακριβώς από πίσω. Πολύ συχνά αυτό που καθορίζει το σχεδιασμό του θαλάμου καύσης είναι η ευκολία κατασκευής του, όπως και η οικονομία που μπορεί να προσφέρει, παρά οι θερμοδυναμικές μελέτες. Εάν οι θάλαμοι καύσης θα πρέπει να κατασκευαστούν σε εργαλειομηχανές, τότε είναι περισσότερο οικονομική η κατασκευή επίπεδων κυλινδροκεφαλών, με το θάλαμο καύσης να διαμορφώνεται από τα έμβολα.



Σχήμα 3.4: Θάλαμοι καύσης για 4-χρονους Otto κινητήρες: (α) σφηνοειδής, (b) ημισφαιρικός, (c) διαμορφωμένος στο έμβολο (bowl in piston), (d) τύπου «μπανιέρας» (bath-tub).

Εάν η ποιότητα της επιφάνειας του θαλάμου καύσης μετά τη χύτευση είναι ικανοποιητική, τότε ο θάλαμος καύσης μπορεί να διαμορφωθεί στην κυλινδροκεφαλή χωρίς πρόβλημα. Το Σχήμα 3.4(a) δείχνει ένα σφηνοειδή θάλαμο καύσης είναι ένας απλός τύπος θαλάμου καύσης ο οποίος παρέχει καλά αποτελέσματα. Το σύστημα βαλβίδων είναι εύκολο να τοποθετηθεί, αλλά οι πολλαπλές εισαγωγής και εξαγωγής θα πρέπει να τοποθετηθούν στην ίδια πλευρά της κυλινδροκεφαλής. Ο ημισφαιρικός θάλαμος καύσης, που φαίνεται στο Σχήμα 3.4(β), ήταν αρκετά διαδεδομένος για αρκετά χρόνια στους κινητήρες υψηλής απόδοσης, καθώς επιτρέπει τη χρήση

βαλβίδων μεγάλης διαμέτρου, σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούνται στην επίπεδη κυλινδροκεφαλή.

Με τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής να βρίσκονται σε απέναντι πλευρές, έχουμε το φαινόμενο της διασταυρωμένης ροής, το οποίο συμβαίνει στο τέλος της φάσης της εξαγωγής και στην αρχή της φάσης της εισαγωγής, όταν και οι 2 βαλβίδες είναι ανοικτές. Το φαινόμενο αυτό είναι θετικό για τη λειτουργία του κινητήρα, καθώς μειώνει τα κατάλοιπα των καυσαερίων. Πιο πρόσφατα οι θάλαμοι καύσης «οροφής» (pent-roof) με 4 βαλβίδες ανά κύλινδρο, είναι περισσότερο δημοφιλείς.

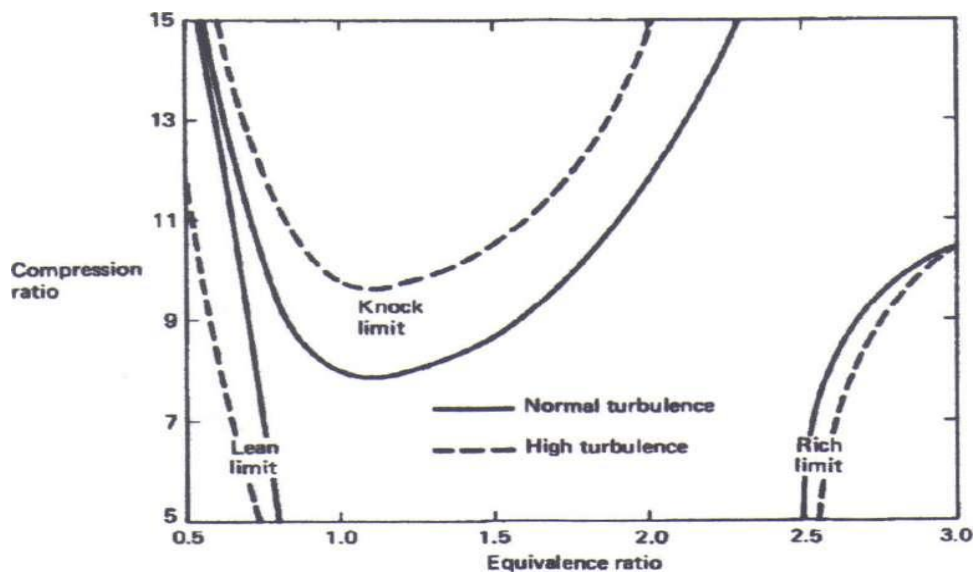
Η χρήση 4 βαλβίδων δίνει μια ακόμη μεγαλύτερη επιφάνεια βαλβίδων από την επιφάνεια των 2 βαλβίδων στους ημισφαιρικούς θαλάμους καύσης. Μια οικονομικότερη εναλλακτική λύση, η οποία εξασφαλίζει καλή απόδοση, είναι ο διαμορφωμένος στο έμβολο θάλαμος καύσης (bowl in piston) (Heron head) που φαίνεται στο Σχήμα 3.4(c).

Αυτή η διαμόρφωση χρησιμοποιούνταν από την Jaguar για τον V12 κινητήρα τους. Ο θάλαμος καύσης τύπου «μπανιέρας» (Σχήμα 3.4(a)), είναι μικρών διαστάσεων, ο οποίος προορίζεται για οικονομική απόδοση. Όλοι αυτοί οι τύποι θαλάμων καύσης χαρακτηρίζονται από:

1. Μικρή μέγιστη διαδρομή φλόγας,
2. Μικρή απόσταση του σπινθηριστή από τη βαλβίδα εξαγωγής,
3. Επιφάνεια συμπίεσης για την παραγωγή τύρβης,
4. Καλά ψυχόμενο τελικό μίγμα.

3.4.2 Θάλαμοι καύσης υψηλού λόγου συμπίεσης και συστήματα ταχείας καύσης

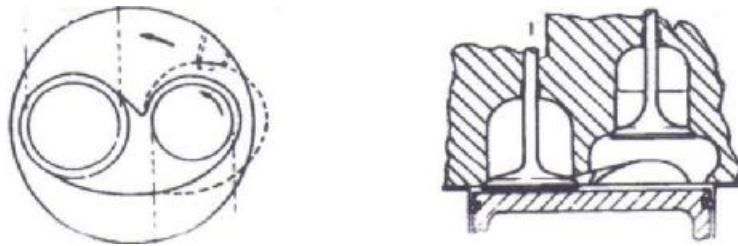
Μια προσέγγιση η οποία επιτρέπει την εφαρμογή υψηλών λόγων συμπίεσης με χρήση συμβατικών καυσίμων, είναι ο θάλαμος καύσης ο οποίος έχει μικρές διαστάσεις, επιτρέπει υψηλές τιμές τύρβης και καύση φτωχού μίγματος [6]. Αυξάνοντας τα επίπεδα της τύρβης, γίνεται δυνατή η καύση μιγμάτων φτωχότερων σε σχέση με το στοιχειομετρικό, τα οποία επιπλέον είναι και λιγότερο ευαίσθητα στην αυτανάφλεξη, καθώς οι θερμοκρασίες καύσης είναι μικρότερες, αλλά και διότι η κανονική καύση διαρκεί λιγότερο χρόνο λόγω των υψηλότερων επιπέδων τύρβης. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Επίδραση της τύρβης στην τιμή του μέγιστης επιτρεπόμενου λόγου.

Ο θάλαμος καύσης είναι «συγκεντρωμένος» γύρω από τη βαλβίδα εξαγωγής σε μικρή απόσταση από τον σπινθηριστή. Αυτό συμβαίνει για να εξασφαλιστεί η γρήγορη καύση του μίγματος αμέσως μετά την έναυση του σπινθηριστή, ειδάλλως η θερμή βαλβίδα εξαγωγής θα προκαλούσε αυτανάφλεξη. Η πρώτη εφαρμογή του τύπου αυτού ήταν ο θάλαμος καύσης «May Fireball», με ένα επίπεδο έμβολο και το θάλαμο καύσης διαμορφωμένο στην κυλινδροκεφαλή (Σχήμα 3.6). Στη συνέχεια σχεδιάστηκε μια διάταξη με το θάλαμο καύσης διαμορφωμένο στο έμβολο και με μια επίπεδη κυλινδροκεφαλή. Υπάρχουν επίσης μειονεκτήματα σχετικά με τον τύπο αυτό των θαλάμων καύσης. Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα μειώνονται, αλλά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα αυξηθούν εξαιτίας των μεγάλων επιφανειών συμπίεσης και των υψηλών λόγων επιφάνειας προς όγκου.

Οι εκπομπές υδρογονανθράκων μπορούν να δεσμευθούν με τη χρήση καταλυτικού μετατροπέα στο σύστημα εξαγωγής. Οι θερμοκρασίες εξαγωγής θα είναι χαμηλές λόγω του φτωχού μίγματος και οι αγωγοί των καυσαερίων θα πρέπει να θερμομονώνονται ώστε να επικρατεί υψηλή θερμοκρασία στον καταλυτικό μετατροπέα. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) θα είναι υψηλότερες για ένα δεδομένο λόγο αέρα / καυσίμου, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου, αλλά καθώς το μίγμα αέρα / καυσίμου θα είναι συνολικά φτωχότερο, τελικά θα υπάρχει μείωση στις εκπομπές NO_x .



Σχήμα 3.6: Ο θάλαμος καύσης May-Fireball για κινητήρες με υψηλό λόγο συμπίεσης και δυνατότητα καύσης φτωχού μίγματος.

Με αυτό τον τύπο θαλάμων καύσης απαιτείται πιο προσεκτικός έλεγχος στην αναλογία του μίγματος και στη διασπορά του εντός του κυλίνδρου, ώστε να διατηρηθεί εντός των ορίων μη καυσίμου μίγματος και αυτανάφλεξης. Επίσης απαιτείται ακριβέστερος έλεγχος στο χρονισμό εναύσεως. Κατά την κατασκευή απαιτείται εξαιρετική προσοχή, καθώς οι ανοχές που γίνονται αποδεκτές όταν ο λόγος συμπίεσης είναι 9:1, δεν γίνονται αποδεκτές για βαθμό συμπίεσης 14:1.

Επίσης τα κατάλοιπα της καύσης έχουν μεγαλύτερη επίδραση με υψηλούς βαθμούς συμπίεσης, διότι στην περίπτωση αυτή ο όγκος των καταλοίπων αυτών αποτελεί ένα μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού όγκου του θαλάμου καύσης σε σχέση με ένα θάλαμο καύσης μικρού λόγου συμπίεσης. Τρία ακόμη συστήματα καύσης τα οποία έχουν χαρακτηριστικά ταχείας καύσης, είναι ο θάλαμος υψηλού λόγου συμπίεσης Ricardo (Ricardo High Ratio Compact chamber - HRCC), ο θάλαμος Nissan NAPS-Z (ή ZAPS) και ο θάλαμος καύσης «οροφής» τεσσάρων βαλβίδων. Ο θάλαμος καύσης Ricardo είναι παρόμοιος σχεδιαστικά με τον May-Fireball, αλλά έχει μια ευθεία δίοδο από τη βαλβίδα εισαγωγής προς το θάλαμο καύσης. Και οι τρεις τύποι θαλάμων καύσης φαίνονται στο Σχήμα 3.7.

Αυτά τα τρία διαφορετικά συστήματα καύσης ήταν το θέμα εκτεταμένων δοκιμών που διεξήχθησαν από τον Ricardo και δημοσιεύθηκαν από τους Collins και Stokes (1983). Το κύριο χαρακτηριστικό του θαλάμου καύσης «οροφής» 4 βαλβίδων είναι η μεγάλη επιφάνεια ροής των βαλβίδων. Επομένως επιτυγχάνεται υψηλή ογκομετρική απόδοση, ακόμη και στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής και σ' αυτό οφείλεται μια σχεδόν σταθερή τιμή b_{mepr} από τις μεσαίες στροφές λειτουργίας και πάνω. Κατά τη διάρκεια της φάσης της εισαγωγής, παράγεται εντός του

κυλίνδρου περιστροφική ροή ως προς τον άξονα του στροφαλοφόρου (barrel swirl). Η μείωση του όγκου κατά τη συμπίεση αρχικά προκαλεί τη μετατροπή της περιστροφικής αυτής ροής σε τύρβη. Το φαινόμενο αυτό καθιστά τα φτωχά μίγματα ικανά για καύση, επομένως βελτιώνεται η οικονομία καυσίμου και μειώνονται οι εκπομπές καυσαερίων.



Σχήμα 3.7: Τρεις αποδοτικοί τύποι θαλάμων καύσης.

Το σύστημα Nissan NAPS-Z έχει 2 σπινθηριστές και ένα σύστημα εισαγωγής το οποίο παράγει υψηλά επίπεδα αξονικής ροής (ροής ως προς τον άξονα του κυλίνδρου). Καθώς η καύση ξεκινά στις άκρες του θαλάμου καύσης, η περιστροφική ροή σε συνδυασμό με την διάταξη των 2 σπινθηριστών εξασφαλίζουν ταχεία καύση. Στην περίπτωση 4 βαλβίδων ανά κύλινδρο η τύρβη που παράγεται από την επιφάνεια συμπίεσης είναι συγκριτικά μικρότερη. Για το λόγο αυτό η διάταξη των 2 βαλβίδων εισαγωγής είναι τέτοια ώστε να δημιουργείται τύρβη από την πολύπλοκη αλληλεπίδρασή τους. Ο θάλαμος καύσης HRCC έχει μια μεγάλη επιφάνεια συμπίεσης, με το θάλαμο καύσης συγκεντρωμένο γύρω από τη βαλβίδα εξαγωγής. Η ταχεία καύση, η οποία είναι αποτέλεσμα του μικρού θαλάμου καύσης και των υψηλών επιπέδων τύρβης, επιτρέπει την εφαρμογή υψηλότερου λόγου συμπίεσης για δεδομένη ποιότητα καυσίμου.

Ένα μειονέκτημα της παραγωγής έντονης περιστροφικής ροής είναι ότι η κινητική ενέργεια που καταναλώνεται για τη δημιουργία της ροής αυτή, προκαλεί μείωση στην ογκομετρική απόδοση. Η περιστροφική ροή είναι χρήσιμη για την εξασφάλιση ταχείας καύσεως σε μέσο φορτίο, κάτι που οδηγεί στη λύση του ελέγχου μεταβλητής περιστροφικής ροής. Με τη χρήση 2 διόδων εισόδου, με μια από τις οποίες να είναι

σχεδιασμένη ώστε να αποδίδει περιστροφική ροή, μπορεί να επιλεγεί έντονη περιστροφική ροή για τη λειτουργία μέσου φορτίου. Σε μέγιστο φορτίο, με τη δεύτερη δίοδο ανοικτή, η περιστροφική ροή μειώνεται και η ογκομετρική απόδοση μεγιστοποιείται.

3.5 ΨΥΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Υπάρχουν τρεις λόγοι που καθιστούν αναγκαία την ψύξη [7-9] ενός κινητήρα:

1. Για την επίτευξη υψηλής ογκομετρικής απόδοσης.
2. Για την εξασφάλιση ικανοποιητικής καύσης.
3. Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας των μηχανικών μερών.

Όσο πιο ψυχρές είναι οι επιφάνειες του θαλάμου καύσης τόσο περισσότερη μάζα αέρα μπορεί να εγκλωβιστεί εντός του κυλίνδρου. Γενικά, όσο αυξάνεται η ογκομετρική απόδοση, τόσο αυξάνεται και η ισχύς εξόδου ενός κινητήρα.

Η ψύξη του θαλάμου καύσης σε ένα κινητήρα Otto εμποδίζει την ακαριαία καύση του μίγματος αέρα / βενζίνης. Καθώς οι κινητήρες Otto έχουν ένα σχεδόν στοιχειομετρικό μίγμα αέρα / βενζίνης, η ακαριαία καύση μπορεί να επιδράσει σε ένα σημαντικό ποσοστό του μίγματος και η μεγάλη αύξηση πίεσης που θα επακολουθήσει θα δημιουργήσει το χαρακτηριστικό θόρυβο της αυτανάφλεξης (knocking). Η διαδικασία αυτή καταστρέφει το θερμικό οριακό στρώμα και μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση των μηχανικών εξαρτημάτων.

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους η υπερθέρμανση μπορεί να επηρεάσει τη μηχανική απόδοση ενός κινητήρα:

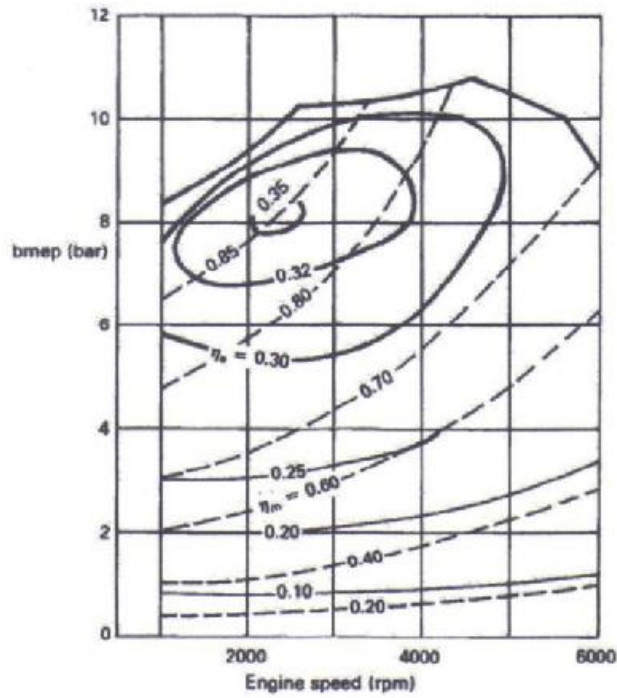
1. Η υπερθέρμανση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντοχής των υλικών. Για παράδειγμα, τα κράματα αλουμινίου μαλακώνουν σε θερμοκρασίες πάνω από 200°C και επίσης οι αυλακώσεις των ελατηρίων πάνω στο έμβολο μπορεί να παραμορφωθούν λόγω ερπυσμού. Επίσης, εάν η ανάφλεξη είναι έντονη εκτός από ακαριαία, τότε το έμβολο μπορεί να διαβρωθεί στην επάνω επιφάνεια του η οποία είναι συνήθως και η θερμότερη περιοχή ενός εμβόλου.
2. Η θερμοκρασία της επάνω αυλάκωσης του ελατηρίου του εμβόλου, θα πρέπει να περιορίζεται στους 200°C ούτως ώστε η λίπανση να παραμείνει ικανοποιητική. Εάν η θερμοκρασία αυτή ξεπεραστεί, τότε η

ποιότητα του λιπαντικού θα υποβιβαστεί, με αποτέλεσμα τη μη επαρκή λίπανση και την εναπόθεση σωματιδίων του κατεστραμμένου λιπαντικού στην αυλάκωση του ελατηρίου του εμβόλου.

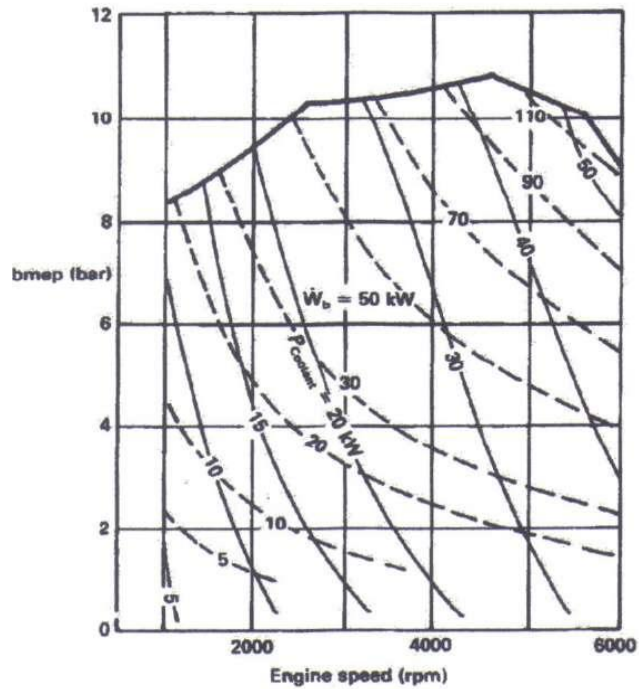
Η θερμότητα που αποβάλλεται στο ψυκτικό μέσο στους κινητήρες Otto είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, του φορτίου, του χρονισμού ανάφλεξης και του λόγου αέρα / βενζίνης. Ο μεγάλος αριθμός των εξαρτώμενων μεταβλητών σημαίνει ότι είναι πολύ δύσκολη η εκτεταμένη και συστηματική μελέτη όλων αυτών των μεταβλητών.

Οι Gruden και Kuper παρουσίασαν μια σειρά από διαγράμματα περιφερειών για τις διάφορες ροές θερμότητας ως συναρτήσεις του b_{mep} και της ταχύτητας περιστροφής ενός κινητήρα χωρητικότητας 2.5 λίτρων. Παρουσίασαν επίσης διαγράμματα περιφερειών για τον ωφέλιμο, μηχανικό και ενδεικτικό βαθμό απόδοσης. Το Σχήμα 3.8 δείχνει τον ωφέλιμο και μηχανικό βαθμό απόδοσης ως συνάρτηση του φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Ο κινητήρας ήταν ρυθμισμένος για καύση στοιχειομετρικού μίγματος σε λειτουργία μερικού φορτίου, ενώ σε λειτουργία μέγιστου φορτίου το μίγμα γινόταν πλούσιο, ώστε να αποδοθεί η μέγιστη απόδοση. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης επηρεάζεται άμεσα από το φορτίο. Το Σχήμα 3.8 επίσης δείχνει ότι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης σε λειτουργία μέγιστου φορτίου, πέφτει από περίπου 90% στις 1000rpm. στο 70% στις 6000rpm. Στις 6000rpm. οι απώλειες τριβής αντιπροσωπεύουν ισχύ περίπου 34 kW. Η τριβή μετατρέπει ένα μέρος της ωφέλιμης ισχύος σε θερμότητα, η οποία μεταδίδεται τόσο στο λιπαντικό όσο και στο ψυκτικό μέσο.

Το Σχήμα 3.9 δείχνει τα διαγράμματα της ροής θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο ως συνάρτηση του φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής. Για $b_{\text{mep}}=1\text{bar}$, η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο είναι περίπου διπλάσια της ωφέλιμης ισχύος εξόδου, ενώ για $b_{\text{mep}} = 3\text{bar}$ η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο είναι συγκρίσιμη με την ωφέλιμη ισχύ εξόδου. Στην περιοχή 8-10 bar, η ροή θερμότητας είναι περίπου η μισή της ισχύος εξόδου.

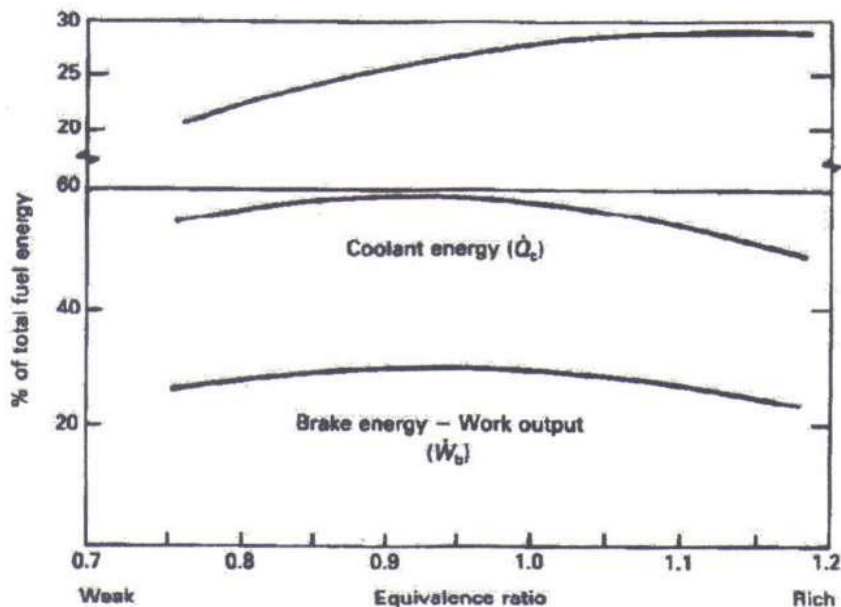


Σχήμα 3.8: Οι καμπύλες ωφέλιμου και μηχανικού βαθμού απόδοσης ενός τετρακύλινδρου κινητήρα Otto 2.5 λίτρων.



Σχήμα 3.9: Η υπερβολή της ισχύος εξόδου και οι καμπύλες της ροής θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο για τον κινητήρα που περιγράφηκε στο προηγούμενο σχήμα.

Παρόλα αυτά, μεγαλύτερη σημασία για το σύστημα ψύξης ενός κινητήρα έχουν οι απόλυτες τιμές αποβολής θερμότητας και το Σχήμα 3.10 δείχνει ότι η μεταδιδόμενη θερμότητα προς το ψυκτικό μέσο εξαρτάται περισσότερο από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα παρά από το φορτίο. Η επίδραση του λόγου αέρα / καυσίμου ή του λόγου ισοδυναμίας μίγματος (equivalence ratio) στη ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο έχει μελετηθεί από τον Brown, με πηγή πληροφοριών ένα κινητήρα αερίου καυσίμου. Ο κινητήρας αερίου καυσίμου έχει ένα σχεδόν τέλεια ομοιογενές μίγμα αέρα/καυσίμου, καθιστώντας έτσι δυνατή τη λειτουργία του με ένα μεγάλο εύρος λόγων ισοδυναμίας. Λόγος ισοδυναμίας 0.75, αντιστοιχεί σε λόγο αέρα / καυσίμου της τάξης του 20:1 σε ένα βενζινοκινητήρα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι έκφρασης της ροής θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο ως συνάρτηση του λόγου ισοδυναμίας μίγματος, οι οποίοι φαίνονται στο Σχήμα 3.10. Πρώτον, ως προς τη συνολική ενέργεια του παρεχόμενου καυσίμου, η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο είναι σχεδόν σταθερή όταν η παρεχόμενη ενέργεια καυσίμου είναι το 28% της συνολικής, με μια μικρή πτώση για πλούσια μίγματα έως το 25% της συνολικής ενέργειας και για λόγο ισοδυναμίας περίπου ίσο με 1.2. Επίσης η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο μπορεί να θεωρηθεί ως ποσοστό της ωφέλιμης ισχύος εξόδου, αλλά καθώς αυτό είναι σχεδόν ίσο με τη μονάδα, δεν φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



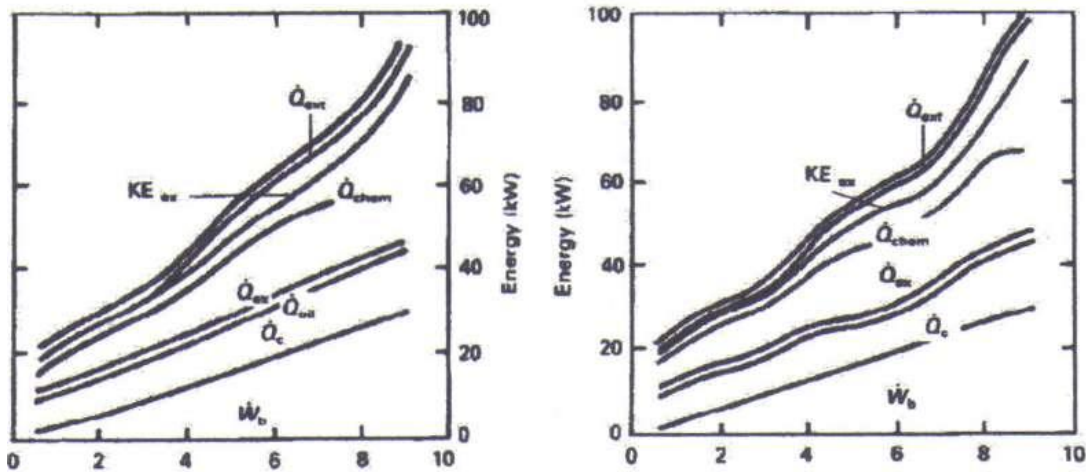
Σχήμα 3.10: Μια σύγκριση της ροής θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο με της ισχύ εξόδου για τον κινητήρα αερίου Waukesha VRG220, ο οποίος λειτουργεί στις 1500rpm και με μεταβαλλόμενο λόγο αέρα / καυσίμου και χρονισμό ανάφλεξης MBT.

Τέλος στο Σχήμα 3.10 φαίνονται οι απόλυτες τιμές της ροής της θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο. Από τα προηγούμενα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο αντανακλά τον τρόπο με τον οποίο η ισχύς εξόδου ενός κινητήρα αποκρίνεται στην ποικιλία των λόγων ισοδυναμίας μίγματος. Η εξήγηση σε αυτό είναι ότι τόσο η ισχύς εξόδου όσο και η αποβαλλόμενη θερμότητα εξαρτώνται από τη θερμοκρασία καύσης.

Η αύξηση της προπορείας της ανάφλεξης οδηγεί σε αύξηση της απόλυτης τιμής της μεταδιδόμενης θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο, εάν η θέση της πεταλούδας του γκαζιού, η ταχύτητα περιστροφής και το μίγμα αέρα/καυσίμου είναι σταθερά. Η ανάφλεξη με μεγάλη προπορεία οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες τόσο για το καμένο όσο και για το άκαυστο μίγμα, κάτι το οποίο οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα αποβολής θερμότητας από το θάλαμο καύσης.

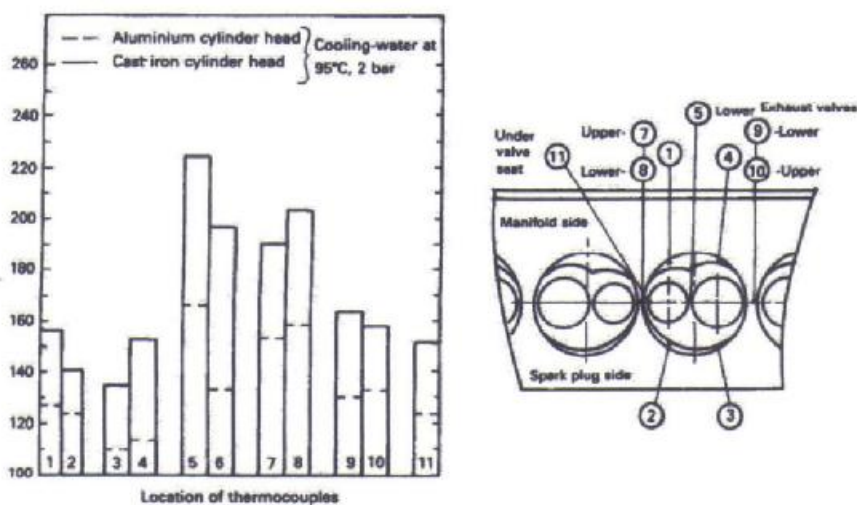
Η αύξηση του λόγου συμπίεσης επίσης οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου, όμως αυτό δεν συνεπάγεται απαραίτητως την υψηλότερη ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο. Ο υψηλότερος λόγος συμπίεσης συντελεί στην αύξηση της ισχύος εξόδου από κάθε ποσό καιγόμενου μίγματος και επομένως η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνεται. Επομένως η θερμότητα που μεταδίδεται προς την βαλβίδα και τον αυλό εξαγωγής είναι μειωμένη και το γεγονός αυτό αντισταθμίζει την αύξηση της μετάδοσης της θερμότητας από το θάλαμο καύσης. Καθώς ο λόγος συμπίεσης συνεχίζει να αυξάνεται, τα κέρδη στην ισχύ εξόδου μειώνονται και ο λόγος επιφάνειας προς όγκο του θαλάμου καύσης επιδεινώνεται, επομένως θα πρέπει να υπάρχει ένας λόγος συμπίεσης πάνω από τον οποίο η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο θα αυξάνεται.

Το υλικό κατασκευής του κινητήρα και ειδικότερα της κυλινδροκεφαλής μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του κινητήρα. Διάφορες δοκιμές των Gruden και Kuper έχουν δημοσιευθεί, συμπεριλαμβάνοντας συγκρίσεις των ενεργειακών ισοζυγίων μεταξύ χυτοσιδηρών και αλουμινένιων κυλινδροκεφαλών οι οποίες σχεδιαστικά ήταν πανομοιότυπες. Μερικά αποτελέσματα για την ταχύτητα των 2000 σ.α.λ φαίνονται στο Σχήμα 3.11 τα οποία δείχνουν την ισχύ εξόδου (W_b) τη ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο Q_c , προς το λιπαντικό μέσο Q_{oil} , και προς τα καυσαέρια Q_{ex} , τη ροή της χημικής ενέργειας στα καυσαέρια Q_{chem} και την κινητική ή δυναμική ροή θερμότητας προς τα καυσαέρια KE_{ex} .



Σχήμα 3.11: Σύγκριση μεταξύ κυλινδροκεφαλών κατασκευασμένων από κράμα αλουμινίου και από χυτοσίδηρο, η οποία δείχνει την επίδραση του φορτίου στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός 2-λίτρου κινητήρα Otto για ταχύτητα περιστροφής 2000rpm.

Οι Gruden και Kuper κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ροές ενέργειας ήταν πανομοιότυπες για ένα μεγάλο εύρος φορτίων. Παρόλα αυτά, σε λειτουργία μέγιστου φορτίου, η αλουμινένια κυλινδροκεφαλή είναι λιγότερο ευαίσθητη στην αυτανάφλεξη, έτσι ο χρονισμός ανάφλεξης είναι λιγότερο περιορισμένος. Η εξήγηση αυτού δίδεται από τον Finlay, ο οποίος έκανε άμεσες συγκρίσεις μεταξύ χυτοσιδηρών και αλουμινένιων κυλινδροκεφαλών. Το Σχήμα 3.12 δείχνει ότι για πανομοιότυπη λειτουργία στις 2000rpm και υπό μέγιστο φορτίο, η κυλινδροκεφαλή από κράμα αλουμινίου είχε θερμοκρασίες 17-60K χαμηλότερες από αυτές της χυτοσιδηρής κυλινδροκεφαλής.



Σχήμα 3.12: Οι ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας μετάλλου σε μία κυλινδροκεφαλή από κράμα αλουμινίου για λειτουργία μέγιστου φορτίου στις 2000rpm.

Τα κράματα αλουμινίου έχουν θερμική αγωγιμότητα σχεδόν τριπλάσια αυτής του χυτοσιδήρου και οι χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες μειώνουν την τάση του μίγματος στην προανάφλεξη.

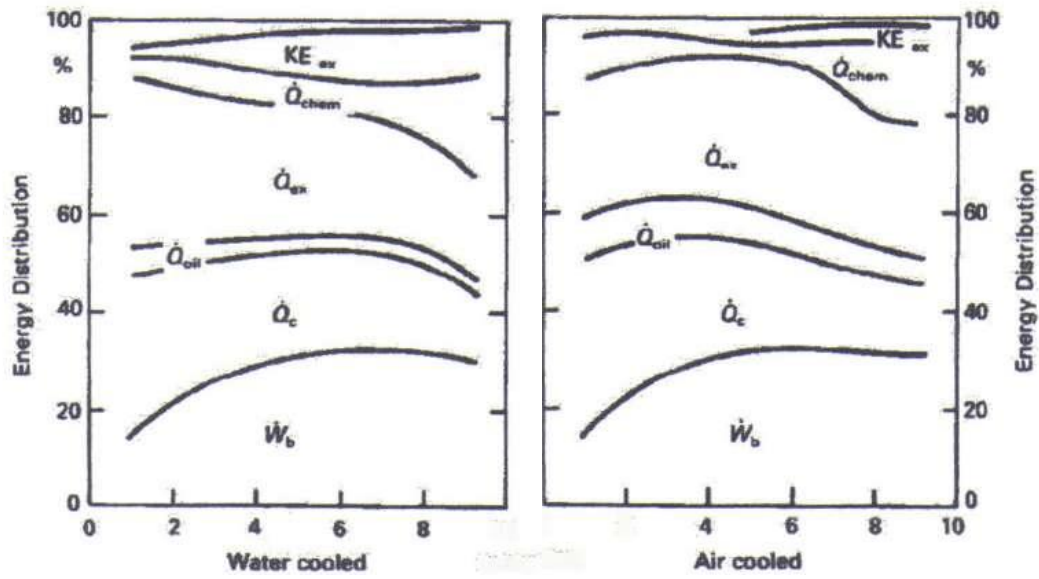
Τα συστήματα ψύξης με αέρα είναι περισσότερο διαδεδομένα σε κινητήρες με χαμηλή ισχύ εξόδου, όπου η απλότητα της κατασκευής είναι πλεονέκτημα. Οι αερόψυκτοι κινητήρες είναι συχνά περισσότερο θορυβώδεις από τους υγρόψυκτους για τους παρακάτω λόγους:

1. Τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης μπορούν να μεταδώσουν ηχητικά σήματα.
2. Η κατασκευή του κινητήρα τείνει να είναι λιγότερο συμπαγής, καθώς οι διαδρομές του υγρού ψυκτικού μέσου συντελούν στην αύξηση της ακαμψίας της κατασκευής.
3. Ο ανεμιστήρας ψύξης παράγει σημαντικά επίπεδα θορύβου.

Η χαμηλή αποδοτικότητα των απλών ανεμιστήρων σημαίνει ότι οι απαιτήσεις σε ψυκτική ισχύ των αερόψυκτων κινητήρων είναι μεγαλύτερες από αυτές των υδρόψυκτων. Μια άμεση σύγκριση μεταξύ υδρόψυκτων και αερόψυκτων κινητήρων έγινε από τους Gruden και Krups. Το συμπέρασμα τους ήταν ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές.

Το Σχήμα 3.13 δείχνει ένα ενεργειακό ισοζύγιο για ταχύτητα περιστροφής 2000rpm, στο οποίο ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθες ροές θερμότητας: Η ισχύς εξόδου (W_b), η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο Q_c , προς το λιπαντικό μέσο Q_{oil} , προς τα καυσαέρια Q_{ex} , η ροή χημικής ενέργειας στα καυσαέρια Q_{chem} και η κινητική ή δυναμική ροή θερμότητας προς τα καυσαέρια KE_{ex} .

Και οι δύο κινητήρες έχουν ένα μέγιστο ωφέλιμο βαθμό απόδοσης 32% στο εύρος των 6-7 bar bmer. Με τον αερόψυκτο κινητήρα παρατηρήθηκε μια εντονότερη ροή θερμότητας προς το λιπαντικό μέσο και επίσης εντονότερη ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο (αέρας). Το Σχήμα 3.13 δείχνει πώς η χημική ενέργεια στα καυσαέρια αυξάνει ραγδαία για bmer μεγαλύτερο των 7 bar. Στο σημείο αυτό ο κινητήρας υποτίθεται ότι λειτουργεί με εντελώς ανοικτή την πεταλούδα γκαζιού και η ισχύς εξόδου αυξάνεται με την εμπλουτισμό του μίγματος με καύσιμο. Για τον υδρόψυκτο κινητήρα η λειτουργία κοντά στο μέγιστο φορτίο (8-9 bar bmer) το ποσοστό της ενέργειας που διοχετεύεται στο ψυκτικό μέσο μειώνεται και με απόλυτα κριτήρια η ροή θερμότητας προς το ψυκτικό μέσο είναι σχεδόν σταθερή.



Σχήμα 3.13: Σύγκριση μεταξύ αερόψυκτων και υγρόψυκτων κινητήρων, παρουσιάζοντας και την επίδραση του φορτίου στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός κινητήρα Otto 2 λίτρων που λειτουργεί στις 2000rpm.

4. ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΕΜΒΟΛΩΝ

4.1 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Οι απαιτήσεις γύρω από την τεχνολογία κινητήρων εσωτερικής καύσης αλλάζουν συνεχώς σε όλη την ιστορία της ανάπτυξής τους. Αν και οι σύγχρονοι κατασκευαστές αυτοκινήτων προσπαθούν να προσελκύσουν τους αγοραστές με τις πιο πρόσφατες βελτιώσεις από την άποψη της παραγωγής ιπποδύναμης ανά το λίτρο, τη ροπή, τη μικρή κατανάλωση καυσίμου και την εκπομπή ρύπων, η σημαντικότερη ανησυχία των κατασκευαστών είναι πάντα η διάρκεια ζωής και η συντήρηση ενός κινητήρα.

Από την κρίση καυσίμου στη δεκαετία του '70, η έχει αυξηθεί η ανάγκη για οικονομία στα καύσιμα, γεγονός που οδηγεί τις εξελίξεις για τη μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Κατά συνέπεια, τα πρώτα οχήματα με σύστημα ψεκασμού βενζίνης εισήχθησαν στη γραμμή παραγωγής, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και άρα την απόδοση του κινητήρα.

Οι ανησυχίες για το περιβάλλον έγιναν κυρίαρχες στη δεκαετία του '80. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου έγιναν οι πιο θεμελιώδεις αλλαγές στη διαδικασία σχηματισμού μιγμάτων και την επεξεργασία εκπομπής στο σύστημα της εξαγωγής των καυσαερίων. Η χρήση των καταλυτικών μετατροπών για την επεξεργασία ελέγχου εκπομπής και η χρήση ελέγχου εκπομπής στο σύστημα εξάτμισης στις μηχανές βενζίνης οδήγησε σε ακριβέστερη και πιο ελέγξιμη διαδικασία σχηματισμού μιγμάτων. Τα υπάρχοντα συστήματα ψεκασμού του καυσίμου τροποποιήθηκαν προκειμένου να συμμορφωθούν με τους όλο και περισσότερο ακριβείς κανονισμούς εκπομπών, και επεκτάθηκαν έπειτα για να περιλάβουν τα συστήματα ελέγχου λάμδα. Αυτό σήμανε το τέλος για τα συστήματα ανάμειξης καυσίμου/αέρα (carburetor), δεδομένου ότι δεν ήταν δυνατό να εκπληρώσουν τους πιο αυστηρούς κανονισμούς. Αν και στο παρελθόν κατά τη διαδικασία σχηματισμού μιγμάτων στις μηχανές Diesel χρησιμοποιούνταν έμμεσες τεχνικές εγχύσεων με μηχανικές αντλίες ψεκασμού, οι σημερινές μηχανές Diesel είναι εξοπλισμένες με σύστημα άμεσων εγχύσεων με την ηλεκτρονικά ελεγχόμενη μονάδα υψηλής πίεσης έγχυσης καυσίμου και τους στροβιλοφόρους υπερσυμπιεστές.

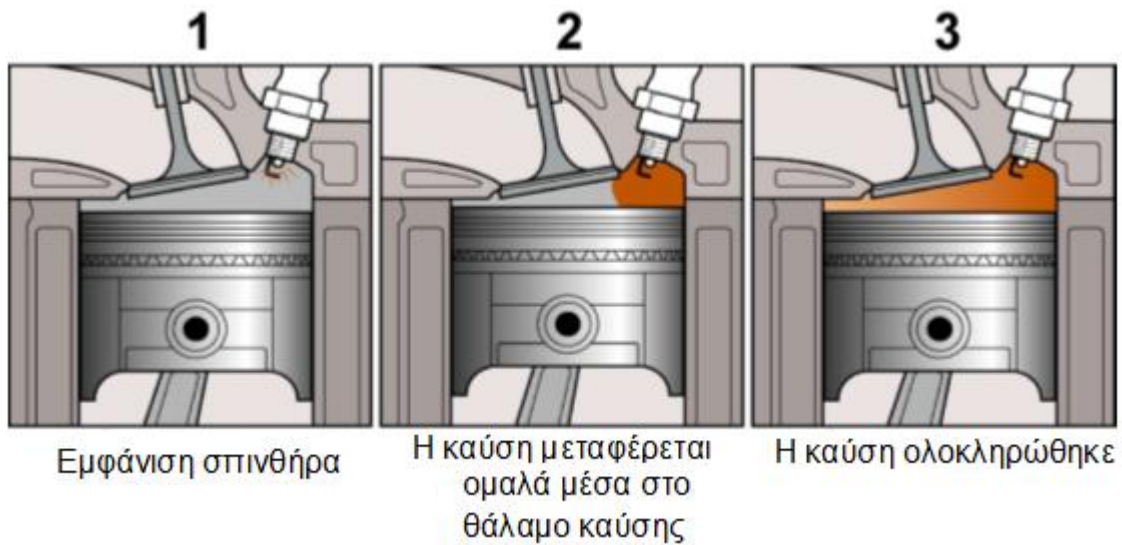
Μια άλλη σημαντική εξέλιξη χρονολογείται επίσης από τη δεκαετία του '80. Με την αύξηση της ετήσιας χιλιομετρικής χρήσης των οχημάτων υπήρχε μεγάλη απαίτηση για μεγαλύτερα διαστήματα μεταξύ της συντήρησης του οχήματος. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι οι κινητήρες των οχημάτων θα συνέχιζαν να λειτουργούν ακίνδυνα μεταξύ των διαστημάτων της συντήρησης και να προστατευθούν οι ευαίσθητοι καταλυτικοί μετατροπείς, ήταν απαραίτητο να μειωθεί η κατανάλωση λαδιού του κινητήρα και να προσαρμοστεί η ποιότητα του για να καλύψει τις αυξανόμενες απαιτήσεις.

Ως τμήμα αυτών των εξελίξεων, οι εσωτερικές διεργασίες που γίνονται στους κινητήρες έχουν επίσης αναπτυχθεί περαιτέρω και τροποποιούνται σε συνεχή βάση. Οι διαδικασίες παραγωγής στην κατασκευή κινητήρων έχουν βελτιστοποιηθεί, οι ανοχές παραγωγής και το βάρος των εξαρτημάτων έχει χαμηλώσει, ενώ η ποιότητα των υλικών έχει βελτιωθεί σταθερά. Οι μορφές των θαλάμων καύσης και των διαδρομών που διατρέχουν τα αέρια καύσης έχουν βελτιστοποιηθεί προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση και οι εκπομπές καυσίμων. Παρά αυτές τις ουσιαστικές αλλαγές στη κατασκευή ενός κινητήρα, οι τύποι ζημιών που μπορούν να παρατηρηθούν στα έμβολα και τους κυλίνδρους έχουν μείνει εντυπωσιακά παρόμοιοι, αν όχι ίδιοι. Ισχύει ακόμα το γεγονός ότι οι κύριες αιτίες για τη ζημία των κινητήρων είναι δυσλειτουργίες, παρατυπίες ή υπερβολικά φορτία θερμικής ή μηχανικής φύσης. Τα αποτελέσματα είναι ζημιές σε εκείνα τα μέρη της μηχανής που υπόκεινται σε αυξανόμενα φορτία, ειδικά στα πιστόνια.

Η αναγνώριση της ζημίας δεν είναι πάντα ένας απλός στόχος. Σε πολλές περιπτώσεις η ζημία μπορεί δύσκολα να παρατηρηθεί και να προσδιορισθεί από τις φωτογραφίες.

4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΑΙΤΙΑ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΙΣΤΟΝΙΩΝ

Οι αστοχίες στα πιστόνια [10] προέρχονται κυρίως από τα μετωπικά θερμικά κρουστικά φορτία που προσπίπτουν στα πρόσωπά τους. Έτσι, αστοχίες στα πιστόνια δύναται να εμφανισθούν κατά την απλή καύση (Σχήμα 4.1) η οποία είναι ομαλή και λαμβάνει χώρα από το μπουζί ανάφλεξης διαμέσου της κορυφής του θαλάμου καύσης.



Σχήμα 4.1: Απλή καύση.

Ζημιές στα μηχανικά μέρη του κινητήρα δύναται επίσης να εμφανισθούν κατά την προανάφλεξη (Σχήμα 4.2) η οποία εμφανίζεται όταν το μίγμα αέρα-καυσίμου αναφλέγεται νωρίς από θερμά ιζήματα άνθρακα.



Σχήμα 4.2: Προανάφλεξη.

Ιδιαίτερος κίνδυνος υφίσταται όταν λαμβάνουν χώρα εκρήξεις (Σχήμα 4.3). Η έκρηξη εμφανίζεται όταν ένα δεύτερο μέτωπο φλόγας μετακινείται κατά μήκος του κυλίνδρου. Αυτό γενικότερα συμβαίνει όταν το έμβολο δεν είναι στη σωστή θέση κατά την ανάφλεξη του μπουζί.



Σχήμα 4.3: Έκρηξη.

Άλλα αίτια για τη φθορά των πιστονιών είναι βλάβη στο σύστημα ψύξης, η κακή λίπανση, η κακή συντήρηση και φθορά των παρελκόμενων μηχανικών μερών, η ύπαρξη ξένων μικροαντικειμένων στο θάλαμο καύσης, η κακής ποιότητας καύσιμα, η κακή χρήση του κινητήρα κ.λ.π..

4.3 ΕΙΔΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΙΣΤΟΝΙΩΝ

Διαγώνια επαφή στην περιφέρεια (Σχήμα 4.4).

Εμφάνιση: Ασυμμετρία και φθορά στη περιφέρεια του εμβόλου.

Αιτία: Στρεβλωμένος διωστήρας. Υπερβολική ταλάντωση άκρων στροφαλοφόρου άξονα.

Συμπτώματα: Φθίση λαδιού / θόρυβος.

Αποκατάσταση: Έλεγχος διωστήρα για κακή ευθυγράμμιση και λάθος αποκατάσταση. Έλεγχος ταλάντωσης στροφαλοφόρου άξονα και αποκατάσταση.



Σχήμα 4.4: Έμβολο περιφερειακά φθαρμένο.

Κόλλημα πείρου περιστροφής (Σχήμα 4.5).

Εμφάνιση: Καμένο χρώμα στην επιφάνεια του πείρου και την επιφάνεια τρύπας του πείρου.

Αιτία: Έλλειψη λίπανσης, πιθανότατα κατά τη διάρκεια πρώτου ξεκινήματος (μετά από ανακατασκευή).

Συμπτώματα: Θόρυβος κινητήρα

Αποκατάσταση: Αντικατάσταση χαλασμένων μηχανικών μερών. Εξασφάλιση εκκαθάρισης πείρου περιστροφής, και ορθής τοποθέτησης του πείρου στον διωστήρα. Εξασφάλιση επαρκής λίπανσης εμβόλου και πείρου ώστε να υπάρχει άρθρωση μεταξύ τους. Αποφυγή μεγάλων σε διάρκεια περιόδων λειτουργίας του κινητήρα σε χαμηλή ταχύτητα.



Σχήμα 4.5: Κολημένος πείρος περιστροφής.

Οι επιπτώσεις της συγκεκριμένης βλάβης στο έμβολο φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Φθαρμένος πείρος διωστήρα και οι επιπτώσεις του στο έμβολο

Οπή στο πρόσωπο του εμβόλου (Σχήμα 4.7).

Εμφάνιση: Οπή στη κορώνα του εμβόλου. Η άκρη της κορώνας είναι τοπικά λιωμένη ή καμένη.

Αίτια : Έκρηξη. Προ-ανάφλεξη. Λανθασμένη καύση .

Συμπτώματα : Θόρυβος κινητήρα. Πυράκια. Απώλεια ιπποδύναμης.

Αποκατάσταση : Έλεγχος στα μπουζί και καθορισμός ανάφλεξης. Εξασφάλιση σωστού συστήματος ψεκασμού (μικρό καρμπυρατέρ ή μεγάλο, σωστό Injection). Βεβαίωση ότι ο αέρας δεν διαφεύγει καθόλου από κάπου αλλού εκτός από το σύστημα εισαγωγής. Χρήση σωστού καυσίμου όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 4.7: Έμβολο με οπή στο πρόσωπο.

Κοιλώματα και οδόντωση στο πρόσωπο του εμβόλου (Σχήμα 4.8).

Εμφάνιση: Οδοντώσεις στο πρόσωπο του εμβόλου. Πιθανή θραύση και/ή παραμόρφωση και 'κόλλημα'.

Αίτια: Ξένο υλικό έχει εισβάλλει στο θάλαμο καύσης και έχει παγιδευτεί ανάμεσα στο πιστόνι και στη κεφαλή του κυλίνδρου.

Συμπτώματα: Θόρυβος κινητήρα.

Αποκατάσταση: Εξασφάλιση ότι κανένα είδους υλικό δεν έχει εισχωρήσει η παγιδευτεί στο σύστημα εισαγωγής. Έλεγχος και διόρθωση οποιασδήποτε ζημιάς στη κυλινδροκεφαλή, βαλβίδες, μπιέλα και οδηγούς. Έλεγχος εισαγωγής και συστήματος φίλτρου του αέρα για απώλειες. Αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων.



Σχήμα 4.8 : Έμβολο με κοιλώματα και οδόντωση.

Φθορά από τραχιά μικροσωματίδια (Σχήμα 4.9).

Εμφάνιση: Κατακόρυφες αμυχές ή σημάδια από γδάρισμα στην περιφέρεια του εμβόλου. Επίσης είναι πιθανό τα ελατήρια του εμβόλου και η εσωτερική διαδρομή του κυλίνδρου να έχουν αμυχές.

Αίτια: Τραχύ ξένο υλικό στο κινητήρα.

Συμπτώματα: Φθίση λαδιού.

Αποκατάσταση: Καθαρισμός και επιθεώρηση όλων των μηχανικών μερών. Καθαρισμός όλων των διαδρόμων λαδιού. Εξασφάλιση ότι τα φίλτρα αέρα και λαδιού είναι καθαρά και τοποθετημένα σύμφωνα με τα σωστά στοιχεία. Έλεγχος ακεραιότητας όλων των συνδέσεων. Τα μηχανικά εξαρτήματα τα οποία είναι χαλασμένα θα πρέπει να αντικατασταθούν.



Σχήμα 4.9: Φθαρμένο πιστόνι λόγω ύπαρξης μικροσωματιδίων

Θραύση στη περιοχή ελατηρίων πιστονιού (Σχήμα 4.10).

Αίτια – κινητήρες βενζίνης: Προοδευτική μείωση πίεσης στο θάλαμο καύσης. Αυξημένος λόγος συμπίεσης. Έκρηξη.

Αίτια – κινητήρες πετρελαίου: Ανώμαλη πίεση στο θάλαμο καύσης εξαιτίας: Έναρξης μεταφοράς πολύ νωρίς, ελαττωματικών μπεκ, καθυστέρησης ανάφλεξης. πολύ υψηλού λόγους συμπίεσης, ύπαρξης στερεών σωματιδίων.

Συμπτώματα: Φθίση λαδιού, απώλεια ιπποδύναμης, θόρυβος κινητήρα, υπερβολική σχάση μετώπου φλόγας.



Σχήμα 4.10: Έμβολο με θραύση στην περιοχή των ελατηρίων.

Διάβρωση στη περιφέρεια του πείρου περιστροφής (Σχήμα 4.11).

Εμφάνιση: Διάβρωση περιφέρειας εμβόλου συνορεύων με τη τρύπα του πείρου. Το υλικό συνήθως εμφανίζεται λιωμένο. Ζημιά επίσης παρατηρείται και στη διαδρομή του κυλίνδρου.

Αίτια: Ξένο αντικείμενο έρχεται σε επαφή με το πείρο του πιστονιού και το τοίχωμα του κυλίνδρου. Λανθασμένη προσαρμογή των κλιπ. Μη ευθυγραμμισμένη μπιέλα η ταλάντευση στροφαλοφόρου άξονα.

Συμπτώματα: Θόρυβος κινητήρα. Φθίση λαδιού

Αποκατάσταση: Διόρθωση ζημιάς κυλίνδρου. Έλεγχος και διόρθωση σε περίπτωση κακής ευθυγραμμισμένης μπιέλας και στροφαλοφόρου άξονα. Αντικατάσταση εμβόλου και κλιπ με σωστό εντοπισμό και φυσικά τοποθέτηση.



Σχήμα 4.11: Διαβρωμένο έμβολο στην περιοχή του πείρου.

Σπασμένο πρόσωπο πιστονιού (Σχήμα 4.12).

Εμφάνιση : Μεγάλες ρωγμές ή σπασίματα στο πρόσωπο του εμβόλου.

Αίτια: Ενσφήνωση μετά την εγκατάσταση. Επαφή με τον εξισοροπιστή στροφάλου. Ξένο αντικείμενο στον οδηγό του στροφαλοφόρου.

Συμπτώματα: Θόρυβος κινητήρα.

Αποκατάσταση: Έλεγχος μήκους λειτουργικότητας μπιέλας. Έλεγχος διαστάσεων στροφαλοφόρου. Έλεγχος διαμέτρου εμβόλου. Έλεγχος διαδρομής κυλίνδρου. Επιθεώρηση κινητήρα για ξένα αντικείμενα. Αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων.



Σχήμα 4.12: Έμβολο με σπασμένη πρόσωπο.

Καμένη κορώνα εμβόλου (Σχήμα 4.13).

Εμφάνιση: Η κορυφή του εμβόλου έχει πολλές αμυχές και ίχνη από εμπλοκή. Συμπερασματικά οι αμυχές πιθανότατα να έχουν συνεχιστεί έως τη περιφέρειά του. Κατεστραμμένα δαχτυλίδια εμβόλου, και κομμάτια παγιδευμένα μέσα στα αυλάκια.

Αίτια: Υπερθέρμανση κορώνας εξαιτίας εξαιρετικά μεγάλες θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης. Βλάβη στο σύστημα ψύξης εμβόλου.

Συμπτώματα: Φθίση λαδιού, Θόρυβος κινητήρα, απώλεια ιπποδύναμης.

Αποκατάσταση: Έλεγχος ρύθμισης εξοπλισμού ψεκασμού του καυσίμου και διόρθωση αν θεωρείται απαραίτητο. Έλεγχος συστήματος ψύξης εμβόλου. Επαναδιόρθωση ή αντικατάσταση όλων των μηχανικών μερών.



Σχήμα 4.13: Πυρωμένο πρόσωπο εμβόλου.

Αμυχές στη περιφέρεια του πιστονιού (Πλευρά ώθησης) (Σχήμα 4.14).

Εμφάνιση: Βαθιές αμυχές στη περιφέρεια του εμβόλου από τις πλευρές όπου δέχεται τη μεγαλύτερη ώθηση. Οι άλλες περιοχές σχετικά δεν επηρεάζονται.

Αίτια: Απώλεια λίπανσης, πιθανότατα κατά τη διάρκεια αρχικής χρήσης. Διάλυση λαδιού από καύσιμο ή νερό. Πρόβλημα στη λίπανση των ρουλεμάν.

Συμπτώματα: Θόρυβος κινητήρα, μερική απώλεια ιπποδύναμης

Αποκατάσταση: Έλεγχος συστήματος λίπανσης και διαδρομής κυλίνδρου και διόρθωση αν θεωρείται απαραίτητο. Αντικατάσταση χαλασμένων εξαρτημάτων. Έλεγχος λειτουργίας σημείων όπου διέρχεται το λάδι από τα ρουλεμάν της μπιέλας. Έλεγχος κινητήρα για εσωτερική διαρροή από εσωτερικό σύστημα ψύξης. Έλεγχος ψεκασμού και χρονισμού. Εξασφάλιση ότι όλα τα μηχανικά μέρη του κινητήρα ότι λιπαίνονται ορθά πριν την έναρξη της λειτουργίας του.



Σχήμα 4.14: Έμβολο με αμυχές στην περιφέρειά του.

Αμυχές σε όλη την περιφέρεια του εμβόλου συμπεριλαμβανομένου και της πλευράς όπου βρίσκεται ο πείρος (Σχήμα 4.15).

Εμφάνιση: Σπασμένη κορώνα και φθαρμένες κυρτές επιφάνειες στο εσωτερικό της κορώνας.

Αίτια: Πυράκια κατά την καύση εξαιτίας χαλασμένων ή βουλωμένων μπεκ έγχυσης καυσίμου. Χαμηλή συμπίεση.

Συμπτώματα: Θόρυβος κινητήρα, πυράκια υπό φορτίο, απώλεια ιπποδύναμης.

Αποκατάσταση: Έλεγχος στο σύστημα ψεκασμού. Επιθεώρηση στα μπεκ. Αντικατάσταση στα μηχανικά μέρη. Χρήση μόνο καυσίμου εγκεκριμένη από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 4.15: Αμυχές στην περιφέρεια του εμβόλου και ιδιαίτερα στη περιοχή του πείρου.

Ελατήρια εμβόλου σφηνωμένα στις αυλακώσεις (Σχήμα 4.16).

Εμφάνιση: Τα ελατήρια του εμβόλου έχουν σφηνωθεί στις αυλακώσεις όπου είναι τοποθετημένα εξαιτίας της υπερθέρμανσης και δημιουργίας άνθρακα. Γδάρσιμο παρατηρείται στις εξωτερικές επιφάνειες των ελατηρίων και επίσης στις περιοχές έξω από αυτά

Συμπτώματα: Φθίση λαδιού, απώλεια ιπποδύναμης, Κόλλημα πιστονιού και εμβόλου.

Αίτια: Υψηλές θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης, λάδι στον θάλαμο καύσης.

Αποκατάσταση: Εξασφάλιση ότι οι βαλβίδες, οδηγοί βαλβίδων και καπάκια τα οποία εμποδίζουν το λάδι να εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, είναι σωστά τοποθετημένα. Έλεγχος ποιότητας λαδιού και ποσότητας και αντικατάσταση σε φθαρμένα μηχανικά μέρη.



Σχήμα 4.16: Έμβολο με σφηνωμένα τα ελατήρια.

Κατεστραμμένη περιοχή ελατηρίων (Σχήμα 4.17).

Εμφάνιση: Οι επιφάνειες ανάμεσα στα δαχτυλίδια έχουν υποστεί θραύση ή είναι καμένες. Επίσης αυτό παρατηρείται και στα ίδια τα δαχτυλίδια.

Αίτια: Έλλειψη λίπανσης ανάμεσα στις επιφάνειες των δαχτυλιδιών. Το λάδι του κινητήρα είναι αρκετά χαμηλό. Οδηγοί μεταφοράς λαδιού μπλοκαρισμένοι, μη ευθυγραμμισμένοι ή δεν υπάρχουν καθόλου. Χαλασμένο μπεκ έγχυσης. Μεταφορά καυσίμου πολύ νωρίς ή πολύ αργά.

Συμπτώματα: Απώλεια ιπποδύναμης, Φθίση λαδιού.

Αποκατάσταση: Έλεγχος λίπανσης στη γραμμή του ελατηρίου που ελέγχει τη λίπανση. Εξασφάλιση της σωστής ποσότητας λαδιού στο κινητήρα. Έλεγχος

ορθότητας των σετ δακτυλιδιών και της ορθότητας τοποθέτησης του κάθε δακτυλιδιού ανεξάρτητα. Έλεγχος χαρακτηριστικών συστήματος ψεκασμού των μπεκ. Αντικατάσταση φθαρμένων μηχανικών εξαρτημάτων.



Σχήμα 4.17: Έμβολο με κατεστραμμένη περιοχή ελατηρίων.

4.4 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΠΙΣΤΟΝΙΩΝ

4.4.1 Χρήση σφυρήλατων πιστονιών

Όταν ένας κινητήρας βελτιωθεί και φτάσει σε υψηλά επίπεδα ιπποδύναμης τότε δέχεται και υψηλές καταπονήσεις στο εσωτερικό του. Για να αυξήσουμε τη διάρκεια ζωής του αλλά και την απόδοσή του, η λύση των σφυρήλατων εμβόλων είναι μονόδρομος [11]. Όλα τα έμβολα (πιστόνια), χυτά ή σφυρήλατα, είναι κατασκευασμένα από δύο συστατικά, από αλουμίνιο και πυρίτιο. Οι κινητήρες των περισσότερων αυτοκινήτων παραγωγής εφοδιάζονται με χυτά πιστόνια. Αυτό συμβαίνει διότι είναι φθηνότερα στην παραγωγή τους και έχουν καλύτερες ιδιότητες θερμικής διαστολής. Όταν όμως το ποσοστό βελτίωσης ενός κινητήρα φτάσει σε υψηλά επίπεδα, το μέλλον των εμβόλων είναι κρίσιμο. Με ένα σετ σφυρήλατων εμβόλων μπορούμε να αυξήσουμε την ιπποδύναμη με πολλούς τρόπους. Αν επιλέξουμε έμβολα με μεγαλύτερη διάμετρο, αυξάνουμε τη χωρητικότητα του κινητήρα, με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση ιπποδύναμης και ροπής. Ένα υψηλής ποιότητας έμβολο με ειδικές επικαλύψεις, σε συνδυασμό με λεπτότερα δακτυλίδια,

μπορεί να μειώσει την τριβή που προκαλείται στο θάλαμο. Γενικότερα, τα σφυρήλατα έμβολα έχουν μεγαλύτερη αντοχή, διότι το υλικό κατά την παραγωγή τους δε λιώνει (όπως στα χυτά), ώστε να αποκτήσει σχήμα σε καλούπι, αλλά συμπιέζεται με κατάλληλες πρέσες, έχοντας ως αποτέλεσμα η δομή τους να είναι πιο πυκνή και στιβαρή. Η κατασκευή τους γίνεται μέσω εξελιγμένων υπολογιστικών προγραμμάτων, ώστε να υπολογιστούν κάποιες βασικές παράμετροι με λεπτομέρεια. Σε πιο εξειδικευμένες βελτιωτικές κατασκευές μπορούν να επιλεγούν σφυρήλατα έμβολα, των οποίων η κεφαλή θα έχει ειδική επικάλυψη, η οποία θα περιορίσει τη θερμική ροή μέσα από το έμβολο.

Το βασικό εμπόδιο που έχουν να αντιμετωπίσουν οι περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες και δε χρησιμοποιούν σφυρήλατα έμβολα, είναι το κόστος. Αυτό το εμπόδιο εμφανίζεται όταν και εμείς θελήσουμε να αγοράσουμε aftermarket σφυρήλατα έμβολα, μιας και η τιμή τους είναι αρκετά υψηλότερη από τα εργοστασιακά, τα οποία είναι χυτά. Βέβαια, ο παράγοντας βελτίωση προϋποθέτει και ένα μεγάλο κόστος, ώστε να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα σε αξιοπιστία αλλά και σε απόδοση.

Τα πλεονεκτήματα των σφυρήλατων εμβόλων είναι τα εξής:

1. Αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες.
2. Αντοχή στις μεγάλες καταπονήσεις.
3. Μειωμένο βάρος σε σχέση με τα χυτά έμβολα.
4. Αύξηση στροφών κινητήρα.
5. Αντοχή στα λεγόμενα πειράκια.

4.4.2 Χρήση επιστρώσεων θερμικής προστασίας (Thermal Barrier Coatings - TBCs)

Οι επιστρώσεις θερμικής προστασίας [12] είναι υψηλού επιπέδου συστήματα υλικών τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε μεταλλικές επιφάνειες, σε κινητήρες τουρμπίνας αερίων ή σε κομμάτια της αεροναυπηγικής, λειτουργώντας σε υπέρ-αυξημένες θερμοκρασίες. Αυτές οι επιστρώσεις εξυπηρετούν τη θερμομόνωση στοιχείων από τα μεγάλα και παρατεταμένα φορτία θερμότητας με τη χρήση θερμικών μονωτικών υλικών που μπορούν να διατηρήσουν μια αισθητή διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα κράματα που φέρουν φορτίο και την επιφάνεια του

υποστρώματος. Με αυτό τον τρόπο, αυτά τα επικαλυπτικά υποστρώματα μπορούν να επιτρέψουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας όπου ταυτοχρόνως περιορίζει τη θερμική έκθεση των δομικών στοιχείων, παρατείνοντας το μέσο όρο ζωής ελαττώνοντας την οξείδωση και την θερμική κόπωση. Σε συνδυασμό με ένα είδους ενεργό υγρό φιλμ, οι επικαλύψεις αυτές επιτρέπουν την λειτουργία σε θερμοκρασιών ρευστού υψηλότερων από το σημείο τήξης της μεταλλικής επιφάνειας ανύψωσης σε κάποιες εφαρμογές στροβίλων.

Οι επιστρώσεις θερμικής προστασίας γίνονται όλο και πιο γνώριμες σε εφαρμογές της αυτοκίνησης. Είναι ιδιαίτερες σχεδιασμένες ώστε να ελαχιστοποιούν τη θερμότητα σε μηχανικά μέρη όπου διέρχονται τα καυσαέρια συμπεριλαμβανομένου της πολλαπλής εξαγωγής, περιβλήματα υπερσυμπιεστών, downpipes και τελικά καζανάκια εξάτμισης. Αυτή η διεργασία είναι επίσης γνώστη ως Διαχείριση Θερμότητας Καυσαερίων. Όταν χρησιμοποιηθούν αυτές έχουν το πλεονέκτημα της ελάττωσης των θερμοκρασιών στο χώρο του κινητήρα, ως εκ τούτου και την μείωση της θερμοκρασίας του αναρροφούμενου αέρα στο σύστημα εισαγωγής.

Μολονότι οι περισσότερες κεραμικές επικαλύψεις βρίσκουν εφαρμογή σε μεταλλικά μηχανικά μέρη, μια νέα τεχνολογία παρουσιάστηκε όπου επιτρέπει τις επιστρώσεις θερμικής προστασίας να εφαρμοστούν με ψεκασμό πλάσματος επάνω σε σύνθετα υλικά. Αυτό είναι τώρα κοινότοπος στο να εφαρμοστεί σε μεγάλων επιδόσεων αυτοκίνητα και σε διάφορων ειδών αγώνων αυτοκινήτων όπως Formula 1. Καθώς παρέχοντας θερμική προστασία, αυτές οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται επίσης στο να αποτρέψουν την φυσική υποβάθμιση του συνθετικού εξαιτίας της τριβής.

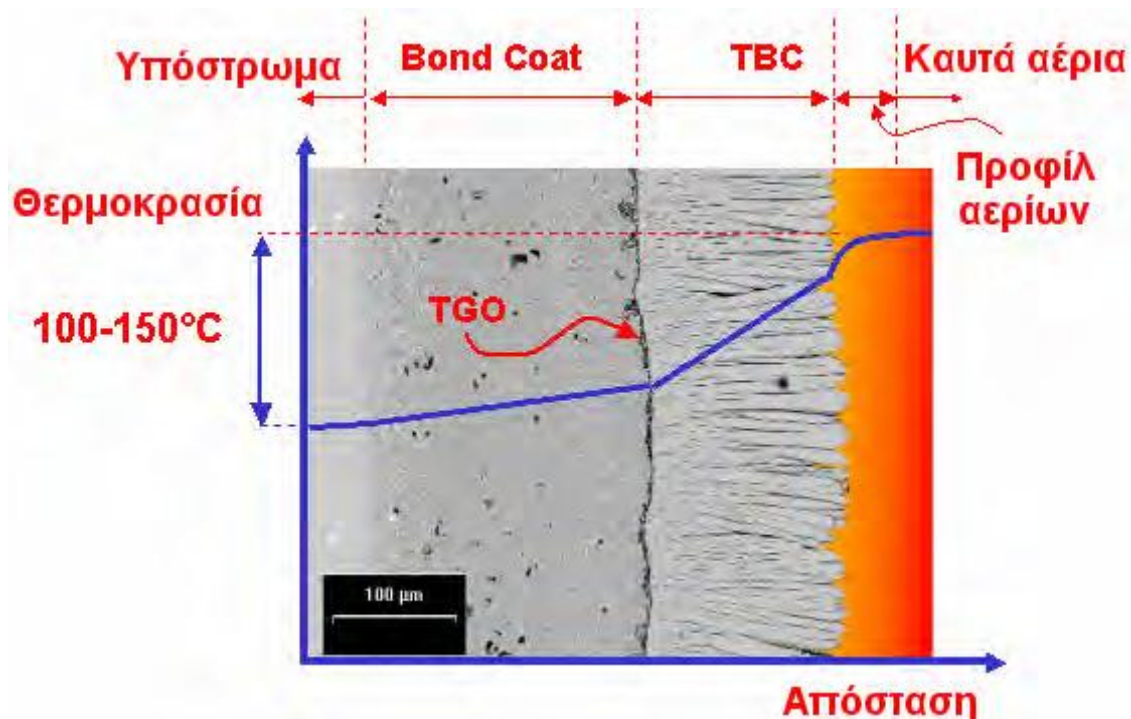
5. ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (TBCs)

5.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Μια ξεχωριστή κατηγορία επικαλύψεων είναι αυτή που προσφέρει κυρίως θερμική προστασία. Η απαίτηση και ανάγκη της βιομηχανίας για υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας στους κινητήρες, αποτέλεσε και την κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη των επιστρώσεων θερμικής προστασίας (TBCs) [12]. Έτσι λοιπόν, η περαιτέρω αύξηση στη θερμοκρασία λειτουργίας των συστατικών μερών των κινητήρων μπορεί να επιτευχθεί με τις επικαλύψεις θερμικής προστασίας. Οι επικαλύψεις θερμικής προστασίας, που άρχισαν να εμφανίζονται τα τελευταία χρόνια σε βιομηχανικές εφαρμογές, αντιπροσωπεύουν ίσως την πιο πολλά υποσχόμενη αναπτυσσόμενη τεχνολογία στην έρευνα για την επικάλυψη υπερκραμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αύξηση της απόδοσης των κινητήρων (που σημαίνει αναπόφευκτα αύξηση στη θερμοκρασία λειτουργίας) συσχετίζεται απόλυτα με τα ανώτερα όρια θερμοκρασιακής αντοχής, τότε γίνεται κατανοητό ότι οποιοσδήποτε μηχανισμός διευρύνει τα όρια θερμοκρασίας λειτουργίας είναι σημαντικό ενδιαφέροντος. Οι επικαλύψεις θερμικής προστασίας προσφέρουν ακριβώς αυτήν τη δυνατότητα. Μια επίστρωση θερμικής προστασίας, ή TBC, είναι ένα πολυστρωματικό σύστημα επικάλυψης που αποτελείται από ένα κεραμικό εξωτερικό στρώμα μόνωσης (topcoat) και ένα μεταλλικό εσωτερικό στρώμα (bondcoat) που βρίσκεται μεταξύ του κεραμικού στρώματος και του υποστρώματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις τόσο το topcoat όσο και το bondcoat εναποτίθενται με τη μέθοδο του ψεκασμού πλάσματος. Η επιμετάλλωση και η EBPVD τεχνική έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί. Χαρακτηριστικά, το κεραμικό topcoat είναι πάχους 0.127-0.381mm ενώ το bondcoat είναι αντίστοιχα 0.076-0.127mm. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο επικαλύψεις, αναπτύσσεται λόγω της θερμικής επεξεργασίας και ένα οξειδίο (TGO), συνήθως αλουμίνα, το οποίο και έχει βασικό ρόλο στην απόδοση και αντοχή της επικάλυψης συνολικά [13].

Η τυπική λειτουργία του κεραμικού στρώματος είναι να προσφέρει θερμική μόνωση στο μεταλλικό υπόστρωμα από τις υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες λόγω της επαφής με τα αέρια καύσιμα που το υπόστρωμα δεν είναι σε θέση να αντέξει.

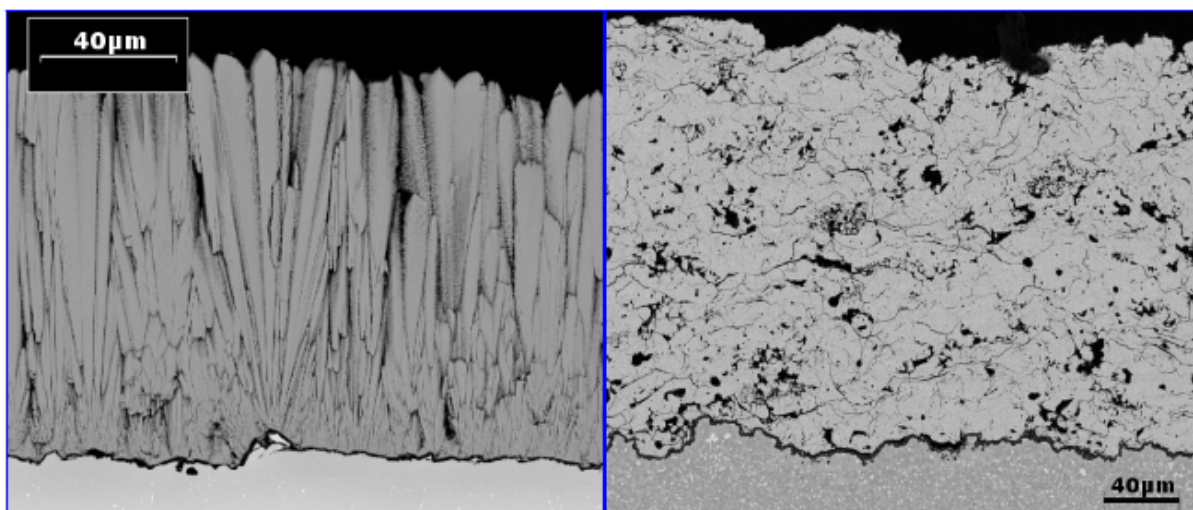
Ανάλογα με τη θερμική αγωγιμότητα του κεραμικού, το πάχος της επικάλυψης, και τη ροή θερμότητας που δημιουργείται από τη γεωμετρία και τον τύπο ψύξης του συγκεκριμένου τμήματος, μπορεί να δημιουργηθεί θερμοκρασιακή διαφορά αρκετών βαθμών κατά το πάχος της επικάλυψης (Σχήμα 5.1). Το οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2) αποτελεί το κυρίαρχο υλικό επιλογής για το topcoat λόγω της πολύ χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς του και της σχετικά υψηλής (για κεραμικό) σταθεράς θερμικής διαστολής. Εντούτοις, όταν θερμαίνεται πάνω από τους $1170\text{ }^\circ\text{C}$ η δομή του ZrO_2 αλλάζει και από μονοκλινής γίνεται τετραγωνική. Η αλλαγή όγκου που συνοδεύει αυτή την αλλαγή είναι της τάξης του 4-6% και μπορεί να οδηγήσει σε ακραία και ολική απολέπιση του κεραμικού στρώματος. Σταθεροποίηση της τετραγωνικής φάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσθήκη MgO , CaO , ή Y_2O_3 στο ZrO_2 [14]. Τα πιο προηγμένα TBCs που χρησιμοποιούν ZrO_2 χρησιμοποιούν και ως σταθεροποιητή το Y_2O_3 σε ποσοστό 6-8%.



Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση των στρωμάτων μιας επικάλυψης θερμικής προστασίας και των θερμοκρασιακών της διαβαθμίσεων

Ενώ το zirconia topcoat λειτουργεί ως άριστο φράγμα στη θερμότητα, λειτουργεί ως διαμπερές σε ότι αφορά τη μεταφορά οξυγόνου. Μια σημαντική λειτουργία του bondcoat αφορά την ολοκληρωμένη προστασία του υποστρώματος

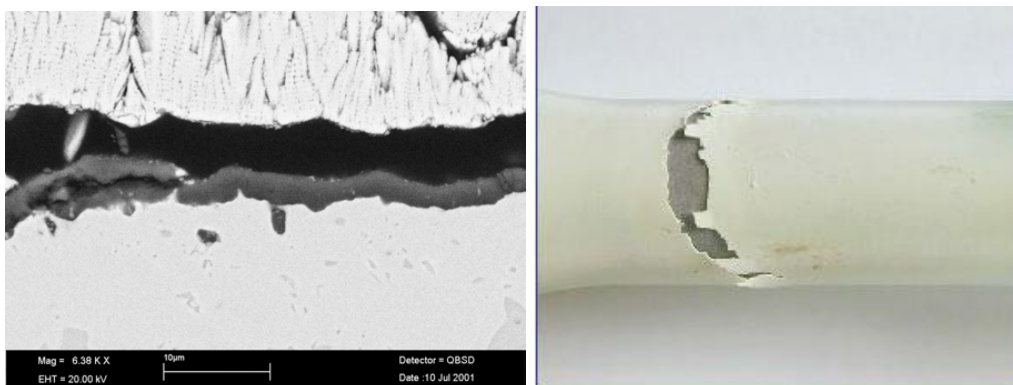
από τις περιβαλλοντικές επιθέσεις που αδυνατεί να αντιμετωπίσει το torcoat. Η τραχύτητα της επιφάνειας του bondcoat που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο του ψεκασμού πλάσματος ευνοεί την προσκόλληση του με το torcoat καθώς αναπτύσσεται ένα είδος μηχανικής ενδασφάλισης. Αρχικά, για τα περισσότερα TBCs, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ψεκασμού πλάσματος σε αέρα για τα MCrAlY's (bond coat), στις μέρες μας χρησιμοποιείται ο ψεκασμός πλάσματος σε χαμηλή πίεση [15]. Το πάχος των επιμέρους στρώσεων των επικαλύψεων θερμικής προστασίας δεν περιορίζεται από τη μέθοδο της εναπόθεσης και η πορώδης φύση που διαμορφώνεται είναι ένα συμπληρωματικό πλεονέκτημα. Εντούτοις το υψηλό επίπεδο εναπομένουσων τάσεων που αναπτύσσονται στην επικάλυψη, η μικροδομή που δεν μπορεί να ελεγχθεί εύκολα και το ότι η διαδικασία δεν προσφέρει συνολική οπτική επαφή στην ενιαία επικάλυψη είναι σοβαρά μειονεκτήματα. Η φυσική εναπόθεση ατμών με δέσμη ηλεκτρονίων (EBPVD), προσφέρει ιδιαίτερος χαμηλά επίπεδα μόλυνσης. Επιπλέον, με τη ρύθμιση των παραμέτρων επεξεργασίας μπορεί εύκολα να ελεγχθεί η μικροδομή και μπορούν να διαμορφωθούν διαδοχικές και ελεγχόμενες επικαλύψεις [16]. Παρ' όλα αυτά, η EBPVD είναι μια ακριβή διαδικασία με χαμηλούς ρυθμούς εναπόθεσης. Τα TBCs που διαμορφώνονται με ψεκασμό πλάσματος παρουσιάζουν, γενικά, κατώτερη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία έναντι των αντιστοίχων TBCs που προκύπτουν με τη μέθοδο της EBPVD. Η μικροδομή του torcoat είναι χαρακτηριστική της μεθόδου επικάλυψης και χαρακτηριστικές μικροδομές παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Τυπικές μικροδομές torcoat: αριστερά EB-PVD μέθοδος και δεξιά PS μέθοδος.

Το θερμικά αναπτυσσόμενο οξείδιο, το οποίο και δημιουργείται στη διεπιφάνεια των δύο επιμέρους επικαλύψεων, διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην αντοχή του TBC. Το οξείδιο που σχηματίζεται είναι η αλουμίνα καθώς το οξυγόνο που διαπερνά το torcoat αντιδρά με το αλουμίνιο που υπάρχει σε αφθονία στο bond coat. Το οξείδιο αυτό καθώς αναπτύσσεται ευνοεί τη δημιουργία θλιπτικών τάσεων [17]. Το πάχος του θερμικά αναπτυσσόμενου οξειδίου δεν ξεπερνά συνήθως τα 10μm.

Ο τελικός στόχος είναι η πλήρης εκμετάλλευση της θερμοκρασιακής αντοχής των TBCs και η αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του επικαλυμμένου υποστρώματος μέχρι και 150 K. Λαμβάνοντας, όμως, υπόψη την καταστροφική επίδραση στη ζωή του φέροντος υπερκράματος σε περίπτωση αστοχίας του TBC, η χρήση TBCs σε "πρωταρχική μορφή" απαιτεί να προηγηθεί μια πλήρης κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος TBC προτού οδηγηθούμε σε εφαρμογές τέτοιας μορφής. Οι διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας που εκδηλώνονται στα TBC συστήματα είναι εξαρτώμενοι και από το είδος των συστημάτων αλλά και από το είδος της φόρτισης. Εκτός από τους μηχανισμούς αστοχίας των bondcoat, τα τμήματα που προστατεύονται από TBC συστήματα μπορούν επίσης να οδηγηθούν σε αστοχία ως αποτέλεσμα της, σε μεγάλη κλίμακα, διαστρωματικής αποκόλλησης της επικάλυψης που προκαλείται στο κεραμικό torcoat καθώς αποσπάται από το υποκείμενο στρώμα του bondcoat (Σχήμα 5.3) [17].



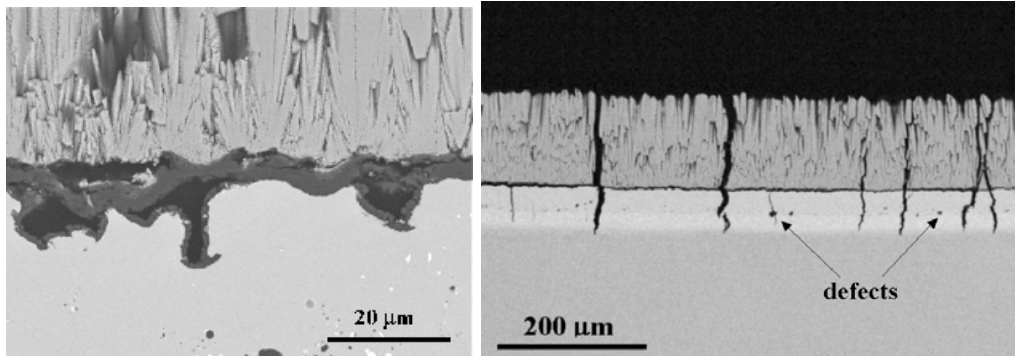
Σχήμα 5.3: Αποκόλληση του torcoat έπειτα από θερμομηχανική κόπωση.

5.2 ΑΠΟΔΟΣΗ / ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

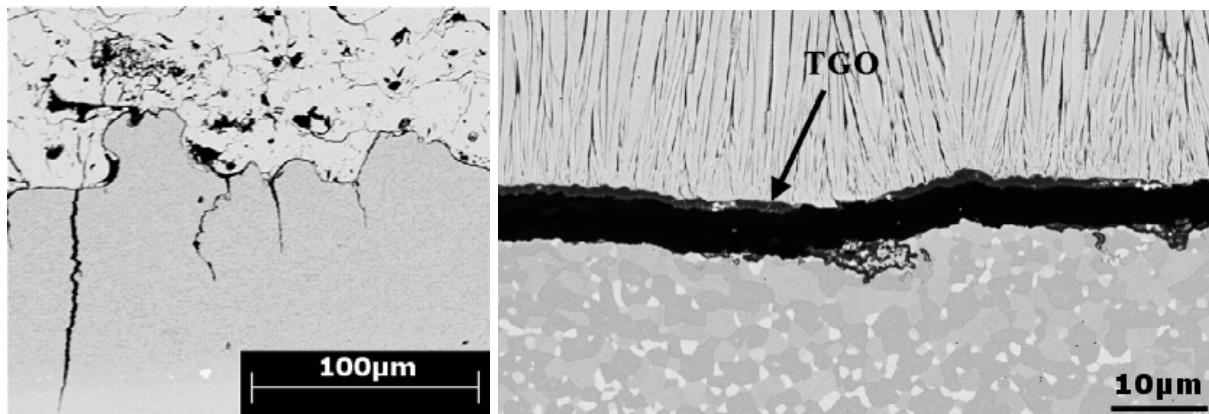
Από τη φύση τους, τα μεταλλικά οξειδία είναι σχετικά μη ανθεκτικά στην παραμόρφωση. Δυστυχώς, πηγές ανάπτυξης παραμορφώσεων αφθονούν στα TBCs, καθώς αυτές είναι αποτελέσματα των εναπομένουσων τάσεων από τη διαδικασία επικάλυψης [14], του διαφορετικού συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ των κεραμικών και των μεταλλικών στρώσεων της επικάλυψης, της οξειδωσης και της διάβρωσης του bondcoat [18], των μετασχηματισμών των φάσεων στο κεραμικό στρώμα που προκαλείται από την κυκλική θερμική φόρτιση, και τέλος του θερμοκρασιακού προφίλ που είναι χαρακτηριστικό των τμημάτων των κινητήρων κατά τη λειτουργία τους. Μερικά συστατικά μέρη δέχονται, επίσης, και παραμορφώσεις που έχουν προκληθεί από μηχανικές φορτίσεις [99]. Συνεπώς, το κεραμικό στρώμα είναι επιρρεπές σε απολέπιση που πολύ συχνά εμφανίζεται ακριβώς δίπλα στη διεπιφάνειά του με το bondcoat, στη περιοχή που αναπτύσσεται και το θερμικά εξαρτώμενο οξείδιο (TGO) (εικόνα 1-25).

Η έρευνά έχει δείξει ότι [12] οι επικρατούντες μηχανισμοί που οδηγούν στην αστοχία των συστημάτων TBC προκαλούνται από:

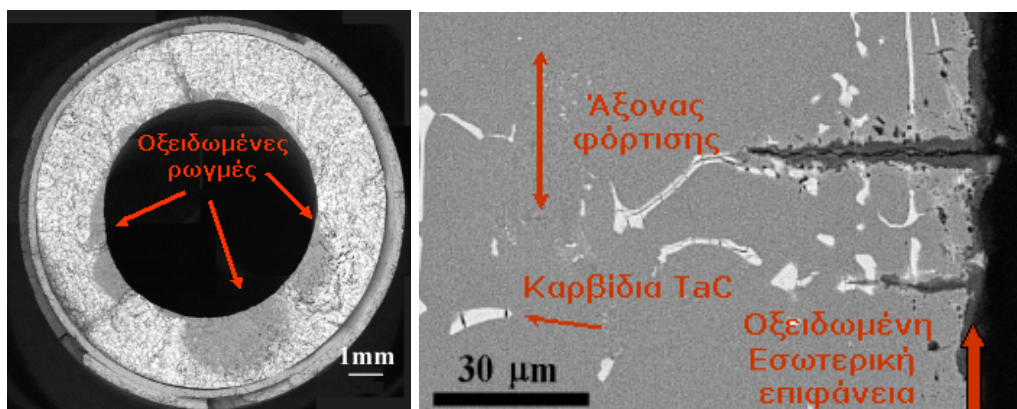
1. Τη διαφορά φάσης μεταξύ της θερμικής φόρτισης και της μηχανικής φόρτισης: κατά τη διάρκεια της φόρτισης χωρίς διαφορά φάσης (in-phase), η οξειδωση καθορίζει και ελέγχει τη διάρκεια ζωής, ενώ στην φόρτιση με διαφορά φάσης (out-of-phase), η συσσώρευση της μη ελαστικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης οδηγεί στη ρηγμάτωση του bondcoat (Σχήμα 5.4).
2. Τις συνθήκες φόρτισης: υψηλές τιμές μηχανικής φόρτισης οδηγούν στην αστοχία του bondcoat, κάτι που ενδεχομένως οφείλεται στη συγκέντρωση υψηλής ενέργειας παραμόρφωσης στο TGO, ενώ οι "ηπιότεροι" όροι φόρτισης οδηγούν στην απολέπιση του topcoat (Σχήμα 5.5).
3. Τη μικροδομή του υποστρώματος: η χρήση μιας επικάλυψης που είναι ευαίσθητη σε συνθήκες θερμο-μηχανικής κόπωσης μπορεί να βάλει σε κίνδυνο την ακεραιότητα του επικαλυμμένου συστήματος, ανεξάρτητα από την απόδοση της προστατευτικής επικάλυψης (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.4: Μηχανισμοί αστοχίας σε ένα TBC σύστημα που αποτελείται από ένα CMSX-4 υπερκράμα και μια Pt-τροποποιημένη επικάλυψη διάχυσης, υπό συνθήκες θερμομηχανικής κόπωσης.



Σχήμα 5.5: Μηχανισμοί αστοχίας σε ένα σύστημα με TBC που αποτελείται από τρίτης γενιάς υπερκράμα νικελίου και από επιστρωματική επικάλυψη τύπου NiCoCrAlY, υπό συνθήκες θερμομηχανικής κόπωσης.



Σχήμα 5.6: Επιφάνεια θραύσης ενός TBC συστήματος που αποτελείται από το MAR-M-509, υπόστρωμα κοβαλτίου, και μια επιστρωματική επικάλυψη. Η αστοχία αυτού του συστήματος υλικών οφείλεται στην αστοχία του υποστρώματος που είναι ευάλωτο σε ρωγμές κόπωσης.

Σε απάντηση, η έρευνα έχει εστιάσει σε τεχνικές επεξεργασίας που παράγουν μια κεραμική δομή πιο ανθεκτική σε παραμορφώσεις και στην ανάπτυξη bondcoat με βελτιωμένη περιβαλλοντική αντίσταση, μηχανικές ιδιότητες και μεταλλουργική σταθερότητα.

5.3 ΤΡΕΧΟΥΣΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η τεχνολογία θερμικών κεραμικών επιστρώσεων, αρχικά χρησιμοποιήθηκε στην αεροναυπηγική βιομηχανία σε εφαρμογές κατά της φθοράς και σε εφαρμογές θερμικών φραγμάτων. Στη συνέχεια η χρήση της επεκτάθηκε ταχύτατα στους περισσότερους τομείς της βιομηχανίας. Τα τμήματα συντήρησης των βιομηχανιών σε όλο το κόσμο εξοικονομούν ετησίως εκατομμύρια δολάρια εφαρμόζοντας επικαλύψεις κατά της φθοράς και της διάβρωσης. Επίσης κάνουν εκτεταμένη χρήση τεχνολογιών θερμικού ψεκασμού για την επιδιόρθωση και την αναδόμωση φθαρμένων ανταλλακτικών.

Οι βιομηχανικοί τομείς στους οποίους βρίσκουν και μπορούν να βρουν ακόμη περισσότερες εφαρμογές οι θερμικές επικαλύψεις είναι:

- αυτοκινητοβιομηχανία
- αεροναυπηγική
- στροβιλομηχανές, ντιζελομηχανές
- ναυπηγεία
- χημική, πετροχημική βιομηχανία
- παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος
- αντλίες-υδραυλικά συστήματα
- γεωργικά μηχανήματα-εργαλεία
- εργαλεία μεταλλείων, ορυχείων
- μεταφορά και επεξεργασία βιομηχανικών ορυκτών και μεταλλευμάτων (σωλήνες, χοάνες, μύλοι λειοτρίβησης, κυκλώνες, μεταφορικές ταινίες)
- εξοπλισμός αμμοβολής
- κλωστοϋφαντουργία (οδηγοί νημάτων, καρούλια, βελόνες)
- χαρτοβιομηχανία (φτερωτές, χιτώνια αναλυτή)

- μηχανές τυπογραφείων
- τσιμεντοβιομηχανία (αλεστικά συστήματα, φτερωτές αερισμού, συστήματα μεταφοράς υλικού)
- πλακίδια, είδη υγιεινής, είδη εστίασεως
- τούβλα, κεραμίδια (ανάμιξη, εξώθηση, κοπή πηλού)
- ιατρικά εμφυτεύματα
- ηλεκτρονική

Τα σημαντικότερα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή κεραμικών επικαλύψεων είναι:

- αύξηση χρόνου ζωής των μηχανικών εξαρτημάτων
- μείωση εξόδων για ανταλλακτικά
- μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών συντηρήσεων
- καλύτερη χρήση των μηχανών και υψηλότερη παραγωγικότητα
- υψηλότερη ποιότητα των παραγομένων προϊόντων

5.4 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ / ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η σωστή επιλογή της σύνθεσης, δομής και μεθόδου εναπόθεσης μιας επίστρωση για να ανταποκριθεί στις συγκεκριμένες απαιτήσεις μιας εφαρμογής είναι, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, ιδιαίτερα κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία ολόκληρου του συστήματος των υλικών. Ωστόσο, βασική παράμετρος για την ικανή και σωστή λειτουργία, ενός τέτοιου συστήματος υλικών (επίστρωση και υπόστρωμα), διαδραματίζει η ύπαρξη μηχανικής, μεταλλουργικής και διεπιφανειακής συμβατότητας ώστε το σύστημα αυτό να είναι τελικά σε θέση να αντιμετωπίσει τις περιβαλλοντικές επιθέσεις χωρίς να υποβαθμίζονται οι υπόλοιπες ιδιότητές του, απαραίτητες για τη σωστή του λειτουργία [19]. Οι αρχές που πρέπει να διέπουν τις σχέσεις αυτών των επιμέρους υλικών περιγράφονται ακολούθως.

5.4.1 Μεταλλουργική συμβατότητα

Οι επιστρώσεις απαιτούν γενικά την ύπαρξη μιας ζώνης/περιοχής διάχυσης με το υπόστρωμα ώστε να εξασφαλίσουν την απαραίτητη πρόσφυση. Ωστόσο, η

ανάπτυξη μιας μεγάλης ζώνης διάχυσης καθώς και η ανάπτυξη χημικών αντιδράσεων μεγάλης κλίμακας, ως γενικότερος κανόνας, πρέπει να αποφευχθούν. Αξίζει να αναφέρουμε ότι ακόμη και μια απλής μορφής διάχυση μπορεί να διαβρώσει κρίσιμα στοιχεία, όπως το Al, που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της στιβάδας επιφανειακής προστασίας [20], και με αυτόν τον τρόπο να υποβιβαστεί η αρχική λειτουργία της προστατευτικής επίστρωσης. Ο σχηματισμός της προστατευτικής στιβάδας οξειδίων αφ' ετέρου μπορεί να διαταραχτεί και από τα στοιχεία που διαχέονται από το υπόστρωμα, μέσω της επίστρωσης, προς την εξωτερική επιφάνεια [21]. Υπερκράματα όπως το IN738 και το IN100 που συνήθως καλύπτονται με επικαλύψεις τύπου CoCrAlY, εμφανίζουν διαταραχές στο σχηματισμό της προστατευτικής στιβάδας αλουμίνας η οποία και οφείλεται στη διάχυση του Ti από το υπόστρωμα στην επιφάνεια. Η μεγάλης κλίμακας, επίσης, διάχυση του κράματος του υποστρώματος μπορεί να δημιουργήσει ζώνες με επιβλαβείς αντιδράσεις κοντά στη διεπιφάνεια του με την επικάλυψη. Σε αυτές τις ζώνες αναπτύσσονται συχνά εύθραυστες ενδομεταλλικές ενώσεις και άλλες φάσεις, και είναι εκείνες που οδηγούν στην ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών στη διεπιφάνεια και τελικά στην απολέπιση της επικάλυψης. Η ύπαρξη τέτοιων ζωνών μπορεί επίσης να μειώσει την ολκιμότητα του συστήματος καθώς και την αντίσταση σε κόπωση, οδηγώντας πολύ συχνά και σε μείωση της διάρκειας ζωής του συστήματος των υλικών αυτών. Τα αποτελέσματα αυτά, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με μια προσεκτική επιλογή της σύνθεσης της επικάλυψης ώστε να είναι συμβατή με αυτήν του υποστρώματος [22]. Από αυτή την άποψη, οι επικαλύψεις τύπου MCrAlY προσφέρουν ευελιξία, ειδικά όσο αφορά τη διαδικασία εναπόθεσης και τη σχέση της τελευταίας με τη χημική σύνθεση των επικαλύψεων.

5.4.2 Συμβατότητα διεπιφάνειας

Η μη ύπαρξη συμβατότητας στη διεπιφάνεια ουσιαστικά μεταφράζεται σε προβλήματα που ανακύπτουν λόγω της διαδικασίας επίστρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες ή από ειδικές επεξεργασίες της επιφάνειας που πρέπει να προηγηθούν ώστε να επιτευχθεί η συγκεκριμένη επίστρωση, οι οποίες όμως και αλλάζουν τις ιδιότητες του δομικού υλικού. Ασυμβατότητα, επίσης, προκύπτει εάν η διαδικασία εναπόθεσης δεν προσαρμόζεται κατάλληλα ώστε να εφαρμοστεί μια

επίστρωση στην επιλεγμένη γεωμετρική μορφή με τέτοιο τρόπο που θα φθάσει σε όλες τις περιοχές του συστατικού μέρους, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν ιδιάζουσες περιπτώσεις όπου απαιτείται ακόμη και μη επίστρωση. Παραδείγματος χάριν, η χημική εναπόθεση ατμών με δέσμη ηλεκτρονίων και η αντίστοιχη φυσική εναπόθεση ατμών απαιτούν την ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών ώστε να αναπτυχθούν οι σωστές μικροδομές της επίστρωσης και να εξασφαλιστεί ότι η τελευταία θα μείνει προσκολλημένη στο υπόστρωμα. Αυτές οι θερμοκρασίες, όμως, μπορούν να εξασθενίσουν το δομικό υλικό ή να προκαλέσουν μη αποδεκτές αλλαγές στη γεωμετρία του προς επίστρωση τμήματος, όπως π.χ. στρέβλωση. Εφαρμογή θερμότητας ή μηχανική αποκατάσταση μετά από την επίστρωση μπορεί να αποκαταστήσουν τις επιθυμητές ιδιότητες και τις διαστάσεις. Ωστόσο αποκατάσταση αυτού του είδους μπορεί να μην είναι δυνατή σε μερικές περιπτώσεις.

Μερικές επιστρώσεις απαιτούν μια ιδιαίτερη επιφανειακή επεξεργασία προτού να εφαρμοστούν. Δυστυχώς, μερικές προγενέστερες επεξεργασίες μπορούν να βλάψουν σημαντικά το υπόστρωμα. Παραδείγματος χάριν, ο θερμικός ψεκασμός απαιτεί συνήθως την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας ώστε να βελτιωθεί η προσκόλληση της επίστρωσης. Η δημιουργία ανωμαλιών στα σταθερά (vane) ή στα κινητά (blades) μέρη των μονοκρυστάλλων πρέπει γενικά να αποφεύγεται δεδομένου ότι προκαλεί την ανάπτυξη σημαντικών εναπομένουσων τάσεων που μπορούν να λειτουργήσουν ως περιοχές επανακρυσταλλοποίησης κατά τη διάρκεια της διαδοχικής λειτουργίας της μηχανής. Η ανάπτυξη εναπομενουσών τάσεων κατά το στάδιο της εναπόθεσης είναι μέγιστης σημασίας καθώς μπορεί να οδηγήσει στην πρόωρη αστοχία του συστήματος των υλικών [19].

5.4.3 Μηχανική συμβατότητα

Η επίτευξη της βασικής λειτουργίας της επίστρωσης, δηλαδή η προστασία του υποστρώματος, μπορεί να εκπληρωθεί μόνο εάν ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης επίστρωσης εξασφαλίζει τη συμβατότητα των μηχανικών ιδιοτήτων της επίστρωσης με τις αντίστοιχες του υποστρώματος. Παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στη μηχανική συμβατότητα είναι μεταξύ των άλλων ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η ολκιμότητα της επίστρωσης, η τραχύτητα της επιφάνειας καθώς και η ποιότητα της επιφάνειας προσκόλλησης [23]. Η πρόσθετη μάζα της επίστρωσης αυξάνει την τάση

στα περιστρεφόμενα μέρη. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της ζωής σε ερπυσμό και προσθέτει στην ανάπτυξη τάσεων που προκύπτουν από τις θερμοκρασιακές διαφορές στο σύστημα. Επομένως, ολόκληρο το περιστρεφόμενο σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να διαχειριστεί κατάλληλα το πρόσθετο βάρος των επιστρώσεων. Οι επιστρώσεις έχουν επιπτώσεις άμεσα και στη λειτουργία των τμημάτων που εφαρμόζονται και μπορεί να επιφέρουν φυσικά πολύ καθοριστικές αλλαγές στην απόδοσή τους. Η επένδυση των μερών αυτών, που είναι σημαντικά στην αεροδυναμική απόδοση, αποτελεί μια ιδιαίτερη πρόκληση λόγω του συνδυασμού μηχανικών και θερμικών τάσεων που συνδέονται με τη διάβρωση που μπορεί να εμφανιστεί σε αυτές τις θέσεις [24]. Επίσης, οι επιστρώσεις αλλάζουν την ποιότητα επιφάνειας του τμήματος που εναποτίθενται. Αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις στην αεροδυναμική απόδοση και στη μεταφορά θερμότητας στην περιοχή αυτή.

Η διαφορά στους συντελεστές θερμικής διαστολής του υποστρώματος και της επίστρωσης καθορίζει το επίπεδο των τάσεων που αναπτύσσονται στο σύστημα των υλικών ως αποτέλεσμα της διαδικασίας ψύξης που ακολουθεί την επίστρωση και τη διαδοχική κυκλική θερμική φόρτιση. Εάν υπάρχει μεγάλη διαφορά στους συντελεστές αυτούς, ακόμη και μια εξαιρετικά όλκιμη επίστρωση μπορεί να ρηγματωθεί ή να αποκολληθεί λόγω των μεγάλων τάσεων και παραμορφώσεων που υφίσταται κατά τη διάρκεια της θερμικής κυκλικής φόρτισης. Επειδή οι περισσότερες επιστρώσεις παρουσιάζουν χαμηλότερη ολκιμότητα από τα υποστρώματά τους τα επικαλυμμένα τμήματα έχουν χαμηλότερη αντοχή σε παραμορφώσεις. Κατά συνέπεια, το ποσοστό παραμόρφωσης που απαιτείται για να αρχίσει μια ρωγμή στη δομή μπορεί να αποδειχθεί μικρότερο από το αντίστοιχο σε ένα δείγμα χωρίς επίστρωση. Για να εξασφαλιστεί μηχανική συμβατότητα, η επίστρωση πρέπει να έχει κάποια αντοχή σε παραμορφώσεις ώστε να συμβιβάσει, την ύπαρξη διαφορών στους προαναφερθέντες συντελεστές θερμικής διαστολής και τις τάσεις που αναπτύσσονται λόγω ερπυσμού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος των υλικών.

Η επίδραση του κύκλου της θερμικής επεξεργασίας μετά την επίστρωση, ή των ιδιοτήτων της ίδιας της επίστρωσης στη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος υπόστρωμα-επίστρωση έχει αναλυθεί μάλλον εκτενώς τα τελευταία χρόνια όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες σε ισοθερμικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα της εναπόθεσης επιστρώσεων όσο αφορά στις εφελκυστικές ιδιότητες των συστημάτων των υλικών που σχηματίζονται με βάση διάφορα υπερκράματα έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές [25]. Στοιχεία σχετικά με τις επιπτώσεις της εναπόθεσης

επιστρώσεων στον ερπυσμό και στην τάση αστοχίας των υπερκραμάτων έχουν επίσης αναφερθεί. Στη σύγκριση που γίνεται μεταξύ επιστρωμένων και μη υπερκραμάτων είναι καθοριστικό και τα δύο συστήματα υλικών να εξετάζονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες θερμικής και μηχανικής φόρτισης, καθώς και να δέχονται την ίδια μετα-επιστρωματική θερμική διαδικασία [26].

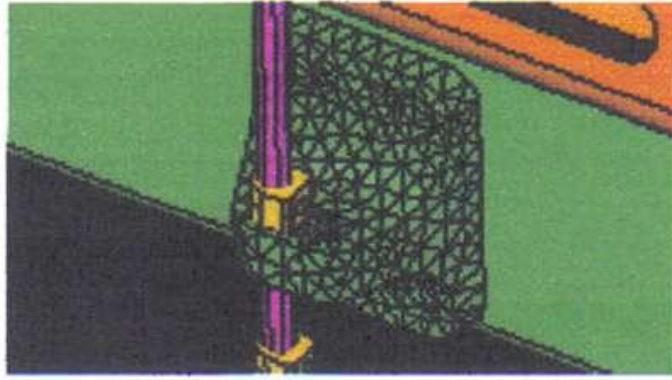
Συμπερασματικά, φαίνεται δικαιολογημένο το επιχείρημα ότι η παρουσία επιστρώσεων από μόνη της δεν έχει επιπτώσεις στη συμπεριφορά σε ερπυσμό και δεν επηρεάζει απαραίτητα την τάση αστοχίας των υπερκραμάτων, υπό τον όρο ότι έχει προηγηθεί μια κατάλληλη θερμική επεξεργασία που λαμβάνει υπόψη της την αλληλεπίδραση επίστρωσης/υποστρώματος σε συνάρτηση με τη διαδικασία εναπόθεσης της επίστρωσης.

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία σαράντα περίπου χρόνια η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEA) [27], με την χρήση των μαθηματικών, της φυσικής, της εφαρμοσμένης μηχανικής και της πληροφορικής έχει ευρέως εφαρμοστεί στην οικοδομική, σε θερμικά προβλήματα καθώς και στη μελέτη διάδοσης ροής σε ρευστά και προβλήματα διάχυσης. Η διαδικασία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων συνίσταται σε τρεις σημαντικές φάσεις: (1) την *προεπεξεργασία (pre-processing)*, στην οποία ορίζεται η γεωμετρία του προς επίλυση προβλήματος καθώς οι ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται η υπό ανάλυση κατασκευή, επίσης δημιουργείται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος (2) το στάδιο *επίλυσης (solution)*, κατά τη διάρκεια του οποίου το πρόγραμμα επιλύει τις εξισώσεις του πεδίου των πεπερασμένων στοιχείων, και (3) την *μετεπεξεργασία (post-processing)*, στην οποία ο αναλυτής έχει την δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια διαγραμμάτων και/ή ισοεπιφανειών και επιπλέον ελέγχει την ακρίβεια της λύσης με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης, μελετάει τις τιμές των αρχικών ποσοτήτων (όπως οι μετατοπίσεις και οι τάσεις), και παράγει και εξετάζει τις πρόσθετες ποσότητες (όπως τις εξειδικευμένες τάσεις και τους δείκτες σφαλμάτων). Το Σχήμα 6.1 δείχνει τυπικά παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε μηχανολογικά εξαρτήματα. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολυάριθμα και σημαντικά. Με τη βοήθεια της μεθόδου αυτής καθορίζεται η πραγματική συμπεριφορά ενός μηχανολογικού εξαρτήματος υπό την επίδραση διαφόρων συνθηκών φόρτισης, και μπορεί επομένως να βελτιωθεί κατασκευαστικά πριν από την κατασκευή του τελικού εξαρτήματος.





Σχήμα 6.1. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση μηχανολογικών κατασκευών.

Μετά την ανάπτυξη ενός λεπτομερειακού πρότυπου σχεδίου CAD το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να διαχωρίσει το πρότυπο σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Μια υπάρχουσα κατασκευή η οποία απαιτείται να βελτιωθεί κατασκευαστικά, μπορεί να αναλυθεί με τη μέθοδο αυτή, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία εξέλιξης της και να επέλθει βελτίωση των μηχανικών της ιδιοτήτων με σύγχρονη μείωση του κόστους παραγωγής. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEA εφαρμόζεται σήμερα με επιτυχία σε μεγάλους τερματικούς σταθμούς υπολογιστών για την επίλυση πολύπλοκων κατασκευαστικών προβλημάτων.

Επίσης σημαντικό είναι να αναφερθούν οι περιορισμοί εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε πρακτικά προβλήματα. Παρόλο που η τιμή των εμπορικών πακέτων λογισμικού και του απαραίτητου υλικού (hardware) μειώνεται, αποτελούν ακόμη μια σημαντική επένδυση για την αριθμητική επίλυση μεγάλων κατασκευαστικών προβλημάτων π.χ. εφαρμογές στην αεροναυπηγική, οικοδομική κ.λ.π. Η μέθοδος μπορεί να μειώσει την ανάγκη πειραματικής δοκιμής των προϊόντων, αλλά δεν μπορεί να την αντικαταστήσει εντελώς. Πιθανώς το σπουδαιότερο είναι ότι ένας άπειρος χρήστης μπορεί να καταλήξει σε ανακριβή αποτελέσματα, στα οποία και θα βασιστούν οι τελικές αποφάσεις ανάπτυξης της τελικής μορφής ενός προϊόντος. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων είναι απαιτητικά εργαλεία, δεδομένου ότι ο αναλυτής που χρησιμοποιεί τέτοια προγράμματα πρέπει να είναι γνώστης όχι μόνο της θεωρίας ελαστικότητας ή της μηχανικής ρευστών, αλλά επίσης να χειρίζεται με ευελιξία τα εφαρμοσμένα

μαθηματικά, την πληροφορική, και να έχει πλήρη γνώση της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων.

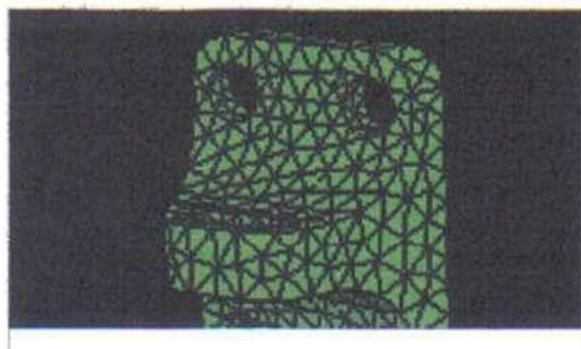
Ποιο όμως λογισμικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να χρησιμοποιήσει ο αναλυτής λεπτομερώς για την επίλυση ενός καθορισμένου προβλήματος; Η απάντηση του ερωτήματος έγκειται στον τύπο επίλυσης του υπό επίλυση προβλήματος και όχι στην προσωπική προτίμηση του, καθ' όσον τα υπάρχοντα εμπορικά λογιστικά προγράμματα είναι προορισμένα για την επίλυση ορισμένης κατηγορίας προβλημάτων, δηλαδή κάθε πρόγραμμα επιλύει με ακρίβεια μια ορισμένη ομάδα προβλημάτων π.χ. μερικά προγράμματα λύνουν προβλήματα ρευστομηχανικής, άλλα δε επιτυγχάνουν με ακρίβεια την στατική μελέτη των κτιρίων. Ο υπολογιστής ο οποίος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον τύπο της ανάλυσης. Ένα τυπικό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί ένα γρήγορο, σύγχρονο υποσύστημα δίσκων για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης. Οι απαιτήσεις μνήμης εξαρτώνται από το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται κατά περίπτωση, αλλά προκειμένου να επιτευχθεί επαρκής απόδοση, ένας υπολογιστής με 128 έως 512 Mbytes μνήμης ανά χρήστη είναι μια αποδεκτή λύση. Καθ' όσον η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει ένα πολύ μεγάλο αριθμό γραμμικών εξισώσεων πρέπει ο υπολογιστής να διαθέτει μεγάλη χωρητικότητα μνήμης για να μπορεί να αποθηκεύσει όλα τα δεδομένα του προβλήματος κατά το στάδιο της επεξεργασίας και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Εφ' όσον οι αριθμητικές αναλύσεις προβλημάτων με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να διαρκούν αρκετές ώρες στα γρηγορότερα συστήματα, έτσι η υπολογιστική ισχύς είναι παράγοντας ουσιαστικής σημασίας.

6.1.1 Προεπεξεργασία

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελείται από τις φάσεις της προεπεξεργασίας, της επίλυσης και της μετεπεξεργασίας. Οι στόχοι είναι να αναπτυχθεί ένα κατάλληλο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, να οριστούν οι κατάλληλες ιδιότητες υλικού, και να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες υπό μορφή περιορισμών και φορτίων.

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων υποδιαιρεί τη γεωμετρία σε στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους στους κόμβους. Οι κόμβοι που είναι στην

πραγματικότητα σημειακές θέσεις στο χώρο, βρίσκονται γενικά στα κορυφές των στοιχείων. Για μια δισδιάστατη (2D) ανάλυση, ή μια τρισδιάστατη (3D) ανάλυση λεπτού κελύφους, τα στοιχεία είναι ουσιαστικά 2D, αλλά μπορούν “να στρεβλωθούν” ελαφρώς για να προσαρμοστούν σε μια τρισδιάστατη επιφάνεια. Ένα παράδειγμα είναι το -γραμμικό τετράπλευρο στοιχείο επίπεδου λεπτού κελύφους. Ο όρος επίπεδο λεπτό κέλυφος αναφέρεται ουσιαστικά στην κλασική θεωρία των επίπεδων κελυφών, ο όρος γραμμικός καθορίζει την παρεμβολή των μαθηματικών ποσοτήτων δηλαδή γεωμετρικών συνιστωσών, μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και τάσεων, κατά μήκος του στοιχείου, και ο όρος τετράπλευρος περιγράφει τη γεωμετρία του στοιχείου. Το Σχήμα 6.2 δείχνει τον διαχωρισμό ενός προτύπου σε πλέγμα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.



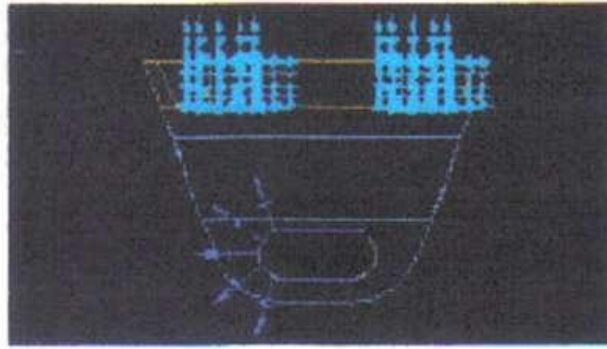
Σχήμα 6.2: πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Για μια τρισδιάστατη στερεά ανάλυση, τα στοιχεία έχουν φυσικό πάχος στις τρεις διαστάσεις τους. Τα κοινά παραδείγματα περιλαμβάνουν το στερεό γραμμικό παραλληλεπίπεδο και τα στερεά παραβολικά τετραεδρικά στοιχεία. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά ειδικά στοιχεία, όπως τα άξονο-συμμετρικά για τις περιπτώσεις όπου η γεωμετρία, οι ιδιότητες του υλικού και οι οριακές συνθήκες είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα. Οι βαθμοί ελευθερίας του προτύπου ορίζονται στους κόμβους. Τα στερεά στοιχεία έχουν γενικά τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (δηλ. τρεις μετατοπίσεις). Οι περιστροφές ολοκληρώνονται μέσω των μετατοπίσεων ομάδων κόμβων σχετικά με άλλους κόμβους. Τα στοιχεία κελυφών, έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: τρεις μετατοπίσεις και τρεις περιστροφές. Η προσθήκη περιστροφικού βαθμού ελευθερίας επιτρέπει την αξιολόγηση των ποσοτήτων μέσω του επίπεδου κελύφους, όπως οι καμπτικές τάσεις λόγω της περιστροφής ενός κόμβου σχετικά με άλλο. Κατά συνέπεια, για τις δομές στις οποίες η κλασική θεωρία λεπτών κελυφών είναι μια έγκυρη προσέγγιση, η πρόσθεση ενός επιπλέον βαθμού

ελευθερίας σε κάθε κόμβο, παρακάμπτει την ανάγκη της προτυποποίησης του φυσικού πάχους. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας σε κάθε κόμβο εξαρτάται επίσης από τον τύπο της ανάλυσης. Για μια θερμική ανάλυση, παραδείγματος χάριν, μόνο η θερμοκρασία υπάρχει σε κάθε κόμβο, επομένως έχουμε ένα και μοναδικό βαθμό ελευθερίας για κάθε κόμβο.

Η ανάπτυξη του πλέγματος είναι συνήθως η πιο χρονοβόρα διαδικασία στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Στο παρελθόν, οι θέσεις των κόμβων καθορίζονταν χειροκίνητα ώστε να προσεγγιστεί η γεωμετρία. Η πιο σύγχρονη προσέγγιση είναι να αναπτυχθεί το πλέγμα άμεσα στη γεωμετρία CAD, η οποία μπορεί να είναι (1) δικτύωμα, με σημεία και καμπύλες να αντιπροσωπεύουν τα όρια της γεωμετρίας, (2) επιφανειακή, με επιφάνειες οι οποίες καθορίζουν τα όρια της γεωμετρίας, ή (3) στερεά, καθορίζοντας έναν όγκο ο οποίος συνθέτει τη γεωμετρία. Η στερεά γεωμετρία προτιμάται, αλλά συχνά η επιφανειακή γεωμετρία μπορεί να δημιουργήσει ένα σύνθετο μίγμα το οποίο δεν θα μπορέσει να αποδοθεί από τη στερεά γεωμετρία. Συγχρόνως με την ακριβή απόδοση της γεωμετρίας, θα πρέπει να εφαρμοστεί και μια απλούστευση της σε σημεία μη σημαντικά για τα τελικά αποτελέσματα, ώστε να εξοικονομηθεί χρόνος κατά την επίλυση του προβλήματος. Η εμπειρία των αναλυτών εδώ είναι ουσιαστική.

Η γεωμετρία διαχωρίζεται με έναν αλγόριθμο ταξινόμησης ή έναν αυτόματο αλγόριθμο ελεύθερου διαχωρισμού. Ο πρώτος ταξινομεί ένα ορθογώνιο πλέγμα επάνω σε μια γεωμετρική περιοχή, η οποία πρέπει να έχει το σωστό αριθμό πλευρών. Τα ταξινομημένα πλέγματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ακριβές στερεό γραμμικό τρισδιάστατο στοιχείο παραλληλεπίπεδου, αλλά μπορούν να είναι πολύ χρονοβόρο, εάν όχι αδύνατο, να εφαρμοστούν για μια σύνθετη γεωμετρία. Ο ελεύθερος διαχωρισμός υποδιαιρεί αυτόματα τις περιοχές σε επιμέρους στοιχεία, με τα πλεονεκτήματα του γρήγορου διαχωρισμού, της εύκολης μεταβίβασης του μεγέθους του πλέγματος (για ένα πυκνότερο πλέγμα στις περιοχές μεγάλης κλίσης), και των προσαρμοστικών ικανοτήτων. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την παραγωγή τεράστιων προτύπων και την παραγωγή διαστρεβλωμένων στοιχείων. Είναι πάντα σημαντικό να ελεγχθεί η στοιχειώδης διαστρέβλωση πριν από την επίλυση. Τα αποδεκτά επίπεδα διαστρέβλωσης εξαρτώνται από τον επιλυτή που χρησιμοποιείται. Μια από τις πολλές εφαρμογές των οριακών συνθηκών σε πρακτικά προβλήματα δείχνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Εφαρμογή των οριακών συνθηκών.

Οι ιδιότητες των υλικών που απαιτούνται ποικίλλουν με τον τύπο επίλυσης. Μια γραμμική στατική ανάλυση, παραδείγματος χάριν, θα απαιτήσει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, το λόγο Poisson και ίσως και την πυκνότητα υλικού. Κάποια παραδείγματα των περιορισμών δηλώνουν μια κομβική μετατόπιση ή μια θερμοκρασία. Τα φορτία περιλαμβάνουν τις δυνάμεις, τις πιέσεις και τη ροή θερμότητας. Είναι προτιμητέο να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων να τις μεταφέρει στο πρότυπο, για να επιτρέψει την απλούστερη εφαρμογή των προσαρμοστικών αλγορίθμων και των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

6.1.2 Επίλυση του προβλήματος

Ενώ οι φάσεις προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι χρονοβόρες για τον αναλυτή, η λύση είναι συνήθως μια μαζική επεξεργασία, και είναι απαιτητική σε υπολογιστικούς πόρους. Οι κύριες εξισώσεις συγκεντρώνονται και λύνονται αριθμητικά π.χ. με την μέθοδο (Gauss, Seidel, Jacobi κτλ) Η διαδικασία εξαρτάται όχι μόνο από τον τύπο ανάλυσης (π.χ. στατική ή δυναμική), αλλά και από τον τύπο και τις ιδιότητες των στοιχείων του προτύπου, τις ιδιότητες του υλικού και τις οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση μιας γραμμικής στατικής δομικής ανάλυσης, οι εξισώσεις των πεπερασμένων στοιχείων είναι της μορφής:

$$\mathbf{K} * \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (6.1)$$

όπου το \mathbf{K} είναι το μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος, \mathbf{u} το διάνυσμα επικόμβιων μετατοπίσεων/, και το διάνυσμα \mathbf{f} περιέχει επικόμβιες δυνάμεις. Η σχέση παραμόρφωσης-μετατόπισης μπορεί να εισαχθεί στην σχέση τάσης-παραμόρφωσης για να εκφράσει την τάση σαν συνάρτηση των μετατοπίσεων. Στις περιπτώσεις συμβατότητας των τάσεων και παραμορφώσεων, οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες, καθορίζουν την μοναδική λύση των άγνωστων μετατοπίσεων, η οποία καθορίζει τις παραμορφώσεις και τάσεις μέσα στο υλικό. Οι πιθανότητες της αναλυτικής επίλυσης των εξισώσεων της μηχανικής είναι μικρές ακόμη και για την πιο απλή γεωμετρία της κατασκευής, ως εκ τούτου παρουσιάζεται η ανάγκη της κατά προσέγγιση αριθμητικής επίλυσης των.

Ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχέση μετατόπισης-κομβικής μετατόπισης, η οποία, μέσω της μεθόδου της παρεμβολής καθορίζει τη μετατόπιση οπουδήποτε σε ένα στοιχείο όταν δίδονται οι τιμές των κομβικών βαθμών ελευθερίας. Εισάγοντας αυτήν την σχέση στη σχέση παραμορφώσεων-μετατοπίσεων, μπορούμε να εκφράσουμε την παραμόρφωση σα συνάρτηση των κομβικών μετατοπίσεων, με βάση τη μέθοδο της παρεμβολής. Υπενθυμίζοντας ότι η έκφραση για την δυναμική ενέργεια ενός ελαστικού σώματος περιλαμβάνει ένα ολοκλήρωμα για την αποθηκευμένη ενέργεια παραμόρφωσης (εξαρτώμενη από το πεδίο των παραμορφώσεων) και τα ολοκληρώματα για το έργο που παράγεται από τις εξωτερικές δυνάμεις (εξαρτώμενα από τα πεδία των μετατοπίσεων), μπορούμε επομένως να εκφράσουμε τη δυναμική ενέργεια του συστήματος σα συνάρτηση των κομβικών μετατοπίσεων.

Εφαρμόζοντας την αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας, θέτουμε με το μηδέν τη μερική παράγωγο της δυναμικής ενέργειας, αναφορικά με το διάνυσμα των κομβικών βαθμών ελευθερίας, οπότε προκύπτει ένα άθροισμα ολοκληρωμάτων ακαμψίας για κάθε στοιχείο, που πολλαπλασιάζεται με το κομβικό διάνυσμα μετατοπίσεων, είναι ίσο με το άθροισμα των ολοκληρωμάτων φόρτισης. Το κάθε ολοκλήρωμα ακαμψίας αποδίδει ένα μητρώο ακαμψίας κάθε στοιχείου, που αθροίζονται για να παραγάγουν το μητρώο ακαμψίας του συστήματος, και το άθροισμα των ολοκληρωμάτων των φορτίων παράγουν το εφαρμοσμένο διάνυσμα φόρτισης με αποτέλεσμα την σχέση (6.1). Στην πράξη, οι κανόνες ολοκλήρωσης εφαρμόζονται στα στοιχεία, τα φορτία εμφανίζονται στο διάνυσμα \mathbf{f} , και οι κομβικοί βαθμοί ελευθερίας εμφανίζονται στο διάνυσμα \mathbf{u} .

Οι μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι άφθονες. Στην περίπτωση του γραμμικής στατικής εξίσωσης, η αντιστροφή του \mathbf{K} είναι υπολογιστικά δαπανηρή και αριθμητικά ασταθής. Μια καλύτερη τεχνική είναι η απαλοιφή Cholesky, μια μορφή της τεχνικής Gauss, και μια δευτερεύουσα παραλλαγή της απαλοιφής LDU. Το μητρώο δυσκαμψίας \mathbf{K} μπορεί να παραγοντοποιηθεί αποτελεσματικά σε LDU, όπου το μητρώο \mathbf{L} είναι κάτω τριγωνικό, το \mathbf{D} διαγώνιο, και το \mathbf{U} άνω τριγωνικό, με αποτέλεσμα να ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{L} * \mathbf{D} * \mathbf{U} * \mathbf{u} = \mathbf{f}$$

(6.2)

Δεδομένου ότι τα μητρώα \mathbf{L} και \mathbf{D} αντιστρέφονται με ευκολία, και το \mathbf{U} είναι άνω τριγωνικό, το διάνυσμα \mathbf{u} μπορεί να καθοριστεί από την μέθοδο αντικατάστασης προς τα πίσω. Μια άλλη δημοφιλής προσέγγιση είναι η μέθοδος κυματομορφής, η οποία συγκεντρώνει και συγχρόνως μειώνει τις εξισώσεις. Μερικές από τις καλύτερες σύγχρονες μεθόδους λύσης υιοθετούν τις τεχνικές αραιών μητρώων (δηλ. Μητρώων) που έχουν πολλά μηδενικά στοιχεία). Επειδή οι ακαμψίες μεταξύ κόμβων είναι διάφορες του μηδενός μόνο για τα κοντινά ζευγάρια κόμβων, το μητρώο δυσκαμψίας έχει έναν μεγάλο αριθμό μηδενικών καταχωρήσεων. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης όπως και τον απαιτούμενο αποθηκευτικό χώρο κατά ένα παράγοντα ακόμη και μεγαλύτερο του 9. Το βασικό σημείο είναι ότι ο αναλυτής πρέπει να κατανοήσει την τεχνική επίλυσης η οποία εφαρμόζεται κάθε φορά.

Η δυναμική ανάλυση για πάρα πολλούς αναλυτές σημαίνει φασματική ανάλυση. Η γνώση των φυσικών συχνοτήτων και των μορφών φάσματος μιας κατασκευής μπορεί να είναι αρκετή στην περίπτωση μιας απλής δόνησης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για να ερευνήσει τις επιδράσεις της μάζας, ακαμψίας και απόσβεσης. Όταν ερευνάται ένα μελλοντικό προϊόν, ή ένα υπάρχον σχεδιασμένο υλικό με πολλαπλούς τρόπους διέγερσης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση μιας εξαναγκασμένης ταλάντωσης ώστε να εφαρμόσει την προσδοκούμενη μεταφορά ή την συχνότητα για να υπολογίσει τη μετατόπιση και ακόμη και τη δυναμική ενέργεια σε κάθε βήμα.

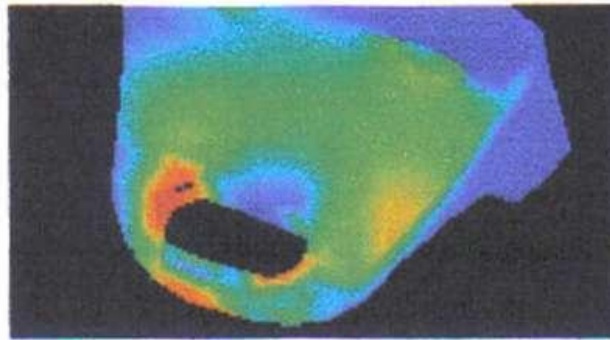
6.1.3 Μετεπεξεργασία

Αφότου έχει προετοιμαστεί ένα πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων και έχει ελεγχθεί, αφότου έχουν εφαρμοστεί οι φορτίσεις και οι οριακές συνθήκες, και το πρόβλημα έχει επιλυθεί, το επόμενο βήμα είναι να ερευνηθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Αυτή η δραστηριότητα είναι γνωστή ως φάση μετεπεξεργασία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μετεπεξεργασία αρχίζει με έναν λεπτομερή έλεγχο για τα προβλήματα που μπορεί να είχαν εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της λύσης. Τα περισσότερα προγράμματα επίλυσης (solvers) παρέχουν ένα αρχείο το γνωστό log file, στο οποίο πρέπει να αναζητηθούν προειδοποιήσεις ή λάθη, και το οποίο θα παράσχει επίσης ένα ποσοτικό μέτρο για το πόσο σωστά έγιναν οι διαδικασίες κατά τη διάρκεια της λύσης. Έπειτα, τα φορτία αντίδρασης στους περιορισμένους κόμβους πρέπει να αθροιστούν και να εξεταστούν ως "έλεγχος λογικότητας". Τα φορτία αντίδρασης που δεν ισορροπούν την συνισταμένη των εφαρμοσμένων φορτίων για μια γραμμική στατική ανάλυση πρέπει να δημιουργήσουν αμφιβολία για την ισχύ άλλων αποτελεσμάτων.

Μόλις ελεγχθεί η λύση ώστε να εξαλειφθούν τα αριθμητικά προβλήματα, μπορούν πλέον να εξεταστούν οι ποσότητες που παρέχουν ενδιαφέρον. Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές επιλογές απεικόνισης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από τη μαθηματική μορφή της ποσότητας καθώς επίσης και φυσικής έννοιάς της. Παραδείγματος χάριν, η μετατόπιση του κόμβου ενός στερεού γραμμικού παραλληλεπιπέδου στοιχείου είναι ένα χωρικό διάνυσμα 3-συνιστωσών, και η ολική μετατόπιση του προτύπου απεικονίζεται συχνά με την ταυτόχρονη επίδειξη του παραμορφωμένου προτύπου πάνω στο αρχικό πρότυπο. Ένα παράδειγμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων μιας ανάλυσης, φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Οι δυναμικές ικανότητες απεικόνισης και οι ικανότητες απεικόνισης με κίνηση βοηθούν πολύ στην κατανόηση του σχεδίου παραμόρφωσης. Τα κύρια διανύσματα τάσεων μπορούν να απεικονιστούν ως χρωματικά κωδικοποιημένα βέλη, απεικονίζοντας τόσο την κατεύθυνση όσο και το μέγεθος. Το μέγεθος της κύριων τάσεων ή το μέγεθος μιας τάσεως αστοχίας, όπως η τάση Von Mises, μπορεί να απεικονιστεί στο πρότυπο ως χρωματικές ζώνες. Όταν αυτός ο τύπος επίδειξης αντιμετωπίζεται ως τρισδιάστατο αντικείμενο που υποβάλλεται σε πηγές φωτός, η προκύπτουσα εικόνα είναι γνωστή ως σκιασμένη απεικόνιση τάσεων. Το μέγεθος μετατοπίσεων μπορεί

επίσης να απεικονιστεί από τις χρωματικές ζώνες, αλλά αυτό ενδεχομένως να οδηγήσει στην παρερμηνεία του ως απεικόνιση τάσεων.



Σχήμα 6.4: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Ένας τομέας της μετεπεξεργασίας που κερδίζει γρήγορα έδαφος είναι αυτός της προσαρμοστικής ανακατανομής του πλέγματος. Οι κανόνες λάθους όπως η ενεργειακή πυκνότητα παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται ώστε να ανακαταλείμουν το πλέγμα του προτύπου, τοποθετώντας ένα πυκνότερο πλέγμα στις περιοχές που χρειάζονται τη βελτίωση και ένα *πιο* αραιό πλέγμα στους τομείς όπου δεν χρειάζεται. Η προσαρμοστικότητα απαιτεί μια συνειρμική σύνδεση μεταξύ του προτύπου και της γεωμετρίας CAD, και λειτουργεί καλύτερα εάν οι οριακές συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα στη γεωμετρία.

Η βελτιστοποίηση είναι ένας άλλος τομέας ο οποίος απολαμβάνει την πρόσφατη πρόοδο. Με βάση τις τιμές των διάφορων αποτελεσμάτων, το πρότυπο τροποποιείται αυτόματα σε μία προσπάθεια να ικανοποιηθούν ορισμένα κριτήρια απόδοσης και επιλύεται πάλι. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιείται κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Η βελτιστοποίηση μορφής είναι πιο σύνθετη, με τα όρια της γεωμετρίας του προτύπου να τροποποιούνται. Αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα με τη χρησιμοποίηση των οδηγών διαστάσεων ως παραμέτρους βελτιστοποίησης, αλλά η ποιότητα πλέγματος σε κάθε επανάληψη μπορεί να μην είναι η ενδεικνυόμενη.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά πρόσφατη μέθοδος η οποία στις μέρες μας έχει εξελιχθεί αρκετά, ειδικά για τη δομική και θερμική ανάλυση. Οι δαπάνες για την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής στις καθημερινές μελέτες των εταιριών έχουν μειωθεί, ενώ οι ικανότητες των προγραμμάτων αυτών επεκτείνονται συνεχώς. Η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα παραγωγής προϊόντων

υψηλότερης ποιότητας σε μικρότερο χρονικό διάστημα και με μικρότερη πιθανότητα αστοχίας.

6.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

6.2.1 Θερμικό μέρος

Για τη θερμική ανάλυση [27] του προβλήματος, οι αρχικές συνοριακές συνθήκες είναι οι θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα μπορούν να ληφθούν υπόψη και συνθήκες μεταφοράς θερμότητας. Η εξίσωση που διέπει το θερμικό μέρος του προβλήματος είναι η εξής:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = -q_n \quad (6.3)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, T είναι η θερμοκρασία, n είναι το μέτρο του κάθετου στο σύνορο μοναδιαίου διανύσματος και q_n είναι η θερμική ροή προς το σώμα.

Πιθανές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη μέσω της εξίσωσης:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_e) \quad (6.4)$$

όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και T_e η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία θεωρείται γνωστή.

Η ανάλυση των παραπάνω εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί στην παρακάτω εξίσωση ισορροπίας για το πρόβλημα μόνιμης θερμικής ροής:

$$\mathbf{K}^{th} * \mathbf{T} = \mathbf{q} \quad (6.5)$$

όπου \mathbf{K}^{th} είναι το θερμικό μητρώο «δυσκαμψίας» και περιέχει συνεισφορές από τα υπομητρώα θερμική ροής των στοιχείων καθώς και συντελεστές του διανύσματος θερμοκρασίας \mathbf{T} οι οποίοι προκύπτουν από τις συνοριακές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας (βλέπε εξίσωση 6.4). Τέλος \mathbf{q} είναι το διάνυσμα θερμικών ροών.

Η παραπάνω εξίσωση δύναται να επιλυθεί με χρήση ισοπαραμετρικών στοιχείων. Για ισότροπο υλικό, το θερμικό μητρώο «δυσκαμψίας» \mathbf{K}^{th} αποτελείται από συνεισφορές του μητρώου θερμικής αγωγιμότητας \mathbf{k}^{th} :

$$\mathbf{k}^{th} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^{th\top} \mathbf{k} \mathbf{B}^{th} |\mathbf{J}| d\Omega \quad (6.6)$$

όπου Ω είναι το πεδίο ορισμού του πεπερασμένου στοιχείου εκφρασμένο καμπυλόγραμμα, σε αδιάστατες ξ - n συντεταγμένες, \mathbf{B}^{th} είναι ένα μητρώο που προκύπτει από κατάλληλη μερική διαφορίση των συναρτήσεων σχήματος N_i του στοιχείου και $|\mathbf{J}|$ είναι η ορίζουσα του Ιακωβιανού μητρώου \mathbf{J} . Το μητρώο \mathbf{B}^{th} δίδεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{B}^{th} = [\mathbf{b}_1^{th} \quad \mathbf{b}_2^{th} \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{b}_i^{th} \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{b}_n^{th}] \quad (6.7)$$

όπου το υπομητρώο \mathbf{b}_i^{th} αντιστοιχεί στο κομβικό σημείο $i = 1, \dots, n$ του πεπερασμένου στοιχείου και έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{b}_i^{th} = \begin{bmatrix} N_{i,x} \\ N_{i,y} \end{bmatrix}, i = 1, \mathbf{K} n \quad (6.8)$$

Στη περίπτωση όπου υφίστανται και φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας (Σχέση 6.4) το θερμικό μητρώο «δυσκαμψίας» \mathbf{K}^{th} λαμβάνει επιπρόσθετες συνεισφορές που προκύπτουν από το παρακάτω μητρώο \mathbf{h} :

$$\mathbf{h} = \int_{c_2} \mathbf{N}^\top h \mathbf{N} |\mathbf{J}| dc \quad (6.9)$$

όπου c_2 είναι το σύνορο του πεπερασμένου στοιχείου, το οποίο υφίσταται μεταφορά θερμότητας, εκφρασμένο καμπυλόγραμμα, σε αδιάστατες ξ - n συντεταγμένες, το μητρώο \mathbf{N} περιλαμβάνει συναρτήσεις σχήματος N_i , h είναι ο συντελεστής θερμότητας και $|\mathbf{J}|$ είναι η ορίζουσα του Ιακωβιανού μητρώου \mathbf{J} για το σύνορο c_2 . Για την αξονοσυμμετρική περίπτωση είναι ισχύει $dc_2 = 2prdc$ όπου r είναι η ακτίνα.

Η θερμική ροή του στοιχείου δίδεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{q} = \int_{c_1} \mathbf{N}^T q_n \mathbf{N} |\mathbf{J}| dc + \int_{c_2} \mathbf{N}^T h T_e |\mathbf{J}| dc \quad (6.10)$$

όπου ο πρώτος όρος προκύπτει από τη θερμική ροή στο σύνορο c_1 και ο επόμενος όρος από τη συνοριακή συνθήκη θερμικής ροής στο σύνορο c_2 . Τα σύνορα c_1 , και c_2 είναι εκφρασμένα καμπυλόγραμμα, σε αδιάστατες ξ - n συντεταγμένες. Τα βαθμωτά μεγέθη q_n και T_e δηλώνουν τη θερμική ροή κάθετη στο σύνορο c_1 και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που έχει ορισθεί για τη συνοριακή συνθήκη μεταφοράς θερμότητας, αντίστοιχα.

6.2.2 Μηχανικό μέρος

Για να επιλυθεί συνολικά το πρόβλημα της θερμοελαστικότητας [27], δηλαδή και το μηχανικό μέρος προβλήματος, θα πρέπει να επιλυθεί αρχικά η εξίσωση (6.5) με μια τυπική μέθοδο απαλοιφής και να υπολογιστεί έτσι η θερμοκρασιακή κατανομή. Έπειτα, η θερμοκρασία T σε ένα συγκεκριμένο σημείο οδηγεί σε ανάπτυξη θερμικής παραμόρφωσης $\boldsymbol{\varepsilon}^{th}$ η οποία δίδεται στη γενική τρισδιάστατη περίπτωση από την παρακάτω εξίσωση:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \begin{Bmatrix} e_x^{th} \\ e_y^{th} \\ e_z^{th} \\ g_x^{th} \\ g_y^{th} \\ g_z^{th} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta T \\ \Delta T \\ \Delta T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \boldsymbol{\alpha} \quad (6.11)$$

με

$$\Delta T = T - T_0 \quad (6.12)$$

όπου α είναι ένα μητρώο που περιέχει τους συντελεστές θερμικής διαστολής, T η θερμοκρασία του συγκεκριμένου σημείου και T_0 η αρχική θερμοκρασία στη οποία η κατασκευή είναι ελεύθερη από θερμικά προκαλούμενες παραμορφώσεις.

Αυτές οι θερμικά προκαλούμενες παραμορφώσεις δεν είναι δυνατό να προστεθούν απευθείας στις μηχανικές παραμορφώσεις για να υπολογισθεί το τασικό πεδίο. Αυτό οφείλεται στην αναγκαιότητα να ληφθούν υπόψη οι μηχανικές συνοριακές συνθήκες. Έτσι οι θερμικές παραμορφώσεις ϵ^{th} χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του διανύσματος θερμικών δυνάμεων-φορτίων \mathbf{f}^{th} εξαιτίας του θερμικού πεδίου βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\mathbf{f}^{th} = \sum_{n_e} \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \epsilon^{th} d\Omega \quad (6.13)$$

όπου Ω είναι το πεδίο ορισμού του στοιχείου, n_e είναι ο αριθμός των στοιχείων, \mathbf{B} είναι το μητρώο παραμόρφωσης-μετατόπισης που προκύπτει από μερική παραγωγή των συναρτήσεων σχήματος του αντίστοιχου πεπερασμένου στοιχείου, και \mathbf{E} το μητρώο ενδοτικότητας. Το συγκεκριμένο διάνυσμα καθορίζει την απόκριση εξαιτίας της θέρμανσης για το αστήριχτο-αφόρτιστο σώμα.

Η εξίσωση ισορροπίας για το μηχανικό μέρος του προβλήματος είναι (Εξίσωση 6.1):

$$\mathbf{K} * \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (6.14)$$

Για την επίλυση της εξίσωσης ισορροπίας, διάνυσμα επικόμβιων δυνάμεων εξαιτίας των θερμικών παραμορφώσεων \mathbf{f}^{th} προστίθεται στο διάνυσμα επικόμβιων δυνάμεων εξαιτίας των μηχανικών παραμορφώσεων \mathbf{f}^{mech} :

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^{th} + \mathbf{f}^{mech} \quad (6.15)$$

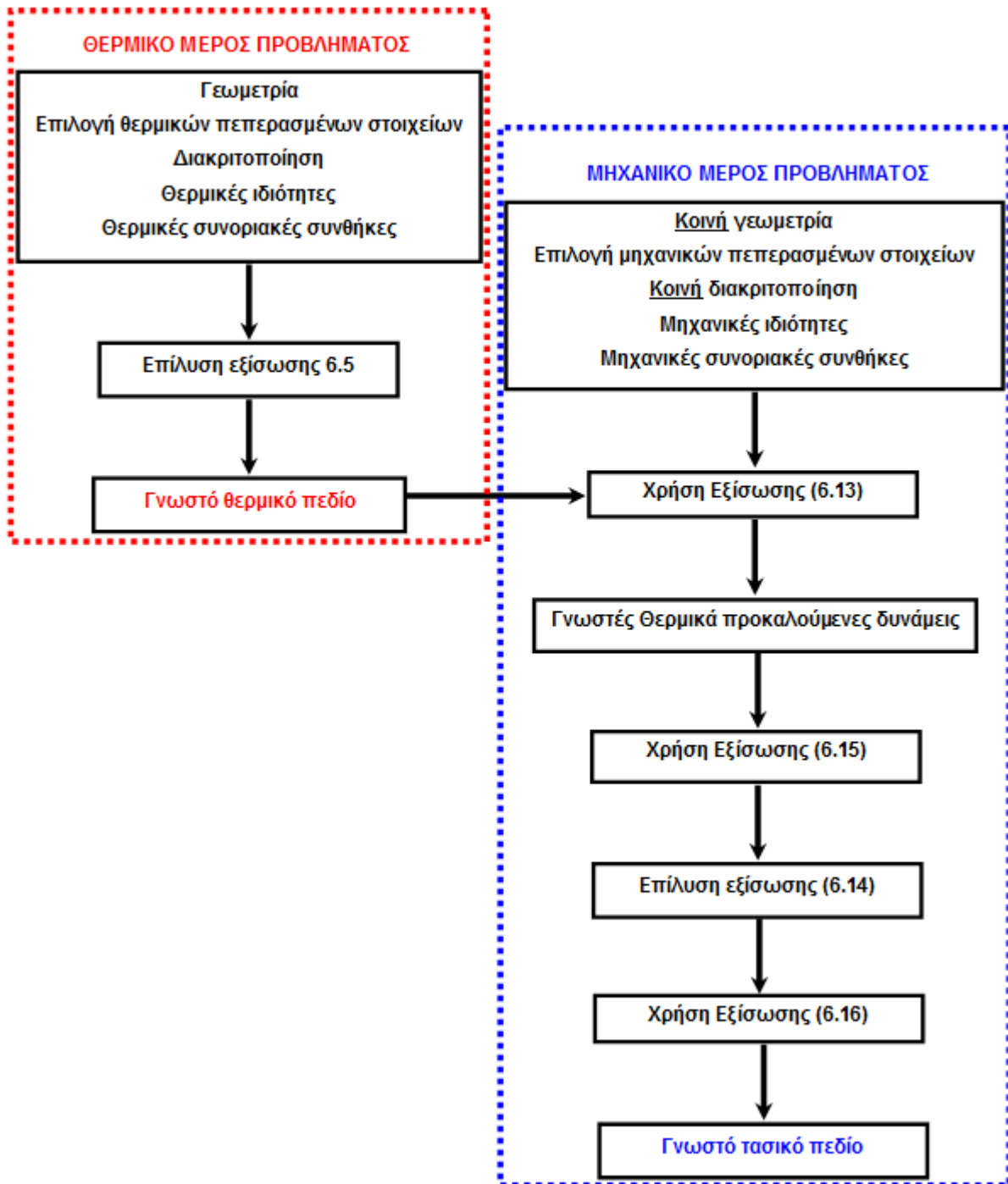
Με την επίλυση της εξίσωσης (6.14) το διάνυσμα μετατοπίσεων \mathbf{u} χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων $\boldsymbol{\varepsilon}$ και τάσεων $\boldsymbol{\sigma}$ εξαιτίας τη θερμομηχανικής φόρτισης βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}(\mathbf{B}\mathbf{u} - \boldsymbol{\varepsilon}^{th}) \quad (6.16)$$

Με τον τρόπο αυτό οι μηχανικές συνοριακές συνθήκες λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό των θερμικών τάσεων.

6.2.3 Μεθοδολογία επίλυσης θερμοελαστικού προβλήματος

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η μοντελοποίηση του προβλήματος, η επίλυση των ανωτέρων εξισώσεων αλλά και η μετεπεξεργασία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του επαγγελματικού λογισμικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Lusas FEA [28]. Στο Σχήμα 6.5 απεικονίζεται το ροϊκό διάγραμμα επίλυσης ενός προβλήματος μόνιμης θερμοελαστικότητας με τη μέθοδο των περασμένων στοιχείων.



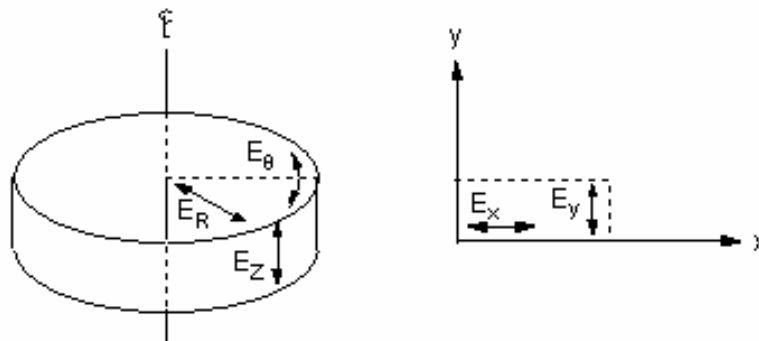
Σχήμα 6.5: Μεθοδολογία επίλυσης θερμοελαστικότητας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

6.3 ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για την ανάλυση του προβλήματος της παρούσας πτυχιακής έγινε χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και μοντελοποίηση με αξονοσυμμετρικά πεπερασμένα στοιχεία.

Παρακάτω ακολουθεί περιγραφή των αξονοσυμμετρικών πεπερασμένων στοιχείων και αναφέρονται τα πλεονεκτήματά τους, βάση των οποίων προτιμήθηκαν για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Μία αξονοσυμμετρική κατασκευή μπορεί να παρασταθεί από ένα επίπεδο (x,y) μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο αντιστοιχεί σε οριζόντια τομή ολόκληρου του μοντέλου με άξονα συμμετρίας τον κατακόρυφο (Σχήμα 6.6). Στον άξονα συμμετρίας πρέπει το μοντέλο να μπορεί να κυλιθεί και η φόρτιση πρέπει να είναι επίσης αξονοσυμμετρική. Η χρήση αξονοσυμμετρικών μοντέλων μειώνει δραστικά τον χρόνο μοντελοποίησης και ανάλυσης σε σχέση με ένα ισοδύναμο τρισδιάστατο μοντέλο. Η μείωση των πεπερασμένων στοιχείων και συνεπώς, των βαθμών ελευθερίας ελαττώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα 6.6: Τρισδιάστατο μοντέλο σε κυλινδρικές συντεταγμένες (E_R , E_θ , E_Z) και αντίστοιχο αξονοσυμμετρικό σε καρτεσιανές συντεταγμένες (E_x , E_y).

Η μοντελοποίηση όλων των αξονοσυμμετρικών μοντέλων γίνεται με βάση τις 360° . Συνεπώς, όλα τα δεδομένα, όπως για παράδειγμα ροή θερμότητας, ηλεκτρικές δυνάμεις, ροές ρευστών και μαγνητικά πεδία, πρέπει να εισαχθούν κατά αυτόν τον τρόπο. Ακόμα, οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται αντιπροσωπεύοντας όγκους, θερμικές χωρητικότητες, ιδιότητες υλικών κτλ. ,πρέπει επίσης κατά την εισαγωγή τους, να ληφθεί υπ' όψιν ότι αναφέρονται σε αξονοσυμμετρικό μοντέλο.

Στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων το μοντέλο δημιουργείται στο επίπεδο για $z=0$. Ο καρτεσιανός άξονας y θεωρείται ως άξονας συμμετρίας. Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη του μοντέλου γίνεται μόνο στο τεταρτοκύκλιο του $x+$. Συνεπώς, η ακτινική κατεύθυνση συμπίπτει με την κατεύθυνση $x+$.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου. Οι δυνάμεις (f_x, f_y) και οι μετατοπίσεις (u_x, u_y) αντιπροσωπεύουν για πεπερασμένα στοιχεία τα δεδομένα και τα αποτελέσματα αντίστοιχα στο κομβικό σύστημα συντεταγμένων. Στο αξονοσυμμετρικό μοντέλο έχουμε δύο βαθμούς ελευθερίας. Όλοι οι κόμβοι που τοποθετούνται πάνω στον άξονα y (δηλαδή για $x=0$) πρέπει να έχουν ακτινική μετατόπιση (u_x) , εκτός εάν υπάρχει στρέψη του μοντέλου γεγονός που οδηγεί στην απόρριψη του αξονοσυμμετρικού μοντέλου) ίση με μηδέν εκτός εάν επιθυμείται η δημιουργία κεντρικής τρύπας. Τουλάχιστον μία τιμή της u_y πρέπει να περιορισθεί ή να καθορισθεί για να αποφευχθούν κινήσεις του απαραμόρφωτου σώματος. Αξονοσυμμετρική συστροφή μπορεί να μοντελοποιηθεί με ελάχιστα είδη πεπερασμένων στοιχείων. Εφόσον το είδος του πεπερασμένου στοιχείου επιτρέπει τη συστροφή, όλοι οι u_y βαθμοί ελευθερίας πρέπει να τεθούν ίσοι με το μηδέν πάνω στην κεντρική γραμμή και επίσης ένας κόμβος με θετική x συντεταγμένη πρέπει επίσης να έχει καθορισμένη ή περιορισμένη τιμή μετατόπισης u_z . Πιέσεις και θερμοκρασίες πρέπει να εφαρμοσθούν απευθείας. Επιτάχυνση, εάν υπάρχει, συνήθως τοποθετείται στην αξονική (y) κατεύθυνση. Παρομοίως, η γωνιακή ταχύτητα υπάρχει μόνο κατά τον άξονα y .

Για την επίλυση του μηχανικού μέρους του θερμοελαστικού προβλήματος θεωρούμε αξονοσυμμετρικά στοιχεία με τη παρακάτω συμπεριφορά τάσης παραμόρφωσης. Η συσχέτιση παραμορφώσεων τάσεων γίνεται με χρήση κυλινδρικών συντεταγμένων (r, z) όπου η γωνιακή κατεύθυνση (θ) δεν συμμετέχει στον μετασχηματισμό. Για τα στοιχεία αυτά οι παραμορφώσεις εκφράζονται συναρτήσει του ακτινικού (u_r) και του αξονικού (u_z) μέρους του διανύσματος μετατόπισης, $\mathbf{u} = [u_r \ u_z]^T$, και δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$e_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (6.17)$$

$$e_q = \frac{u_r}{r} \quad (6.18)$$

$$e_z = \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (6.19)$$

$$g_{zr} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (6.20)$$

ή σε μητρική μορφή με:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} e_r \\ e_q \\ e_z \\ g_{zr} \end{Bmatrix} = \mathbf{L}\mathbf{u} \quad (6.21)$$

όπου

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \partial/\partial r & 0 \\ 1/r & 0 \\ 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial z & \partial/\partial r \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Επίσης, οι τάσεις σχετίζονται με τις παραμορφώσεις από τον νόμο του Hooke:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} s_r \\ s_q \\ s_z \\ s_{zr} \end{Bmatrix} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_r \\ e_q \\ e_z \\ g_{zr} \end{Bmatrix} = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (6.23)$$

όπου ν και E είναι ο λόγος του Poisson και το μέτρο ελαστικότητας του Young, αντίστοιχα ενώ:

$$m = \frac{n}{1-n} \quad (6.24)$$

$$l = \frac{1-2n}{2(1-n)} \quad (6.25)$$

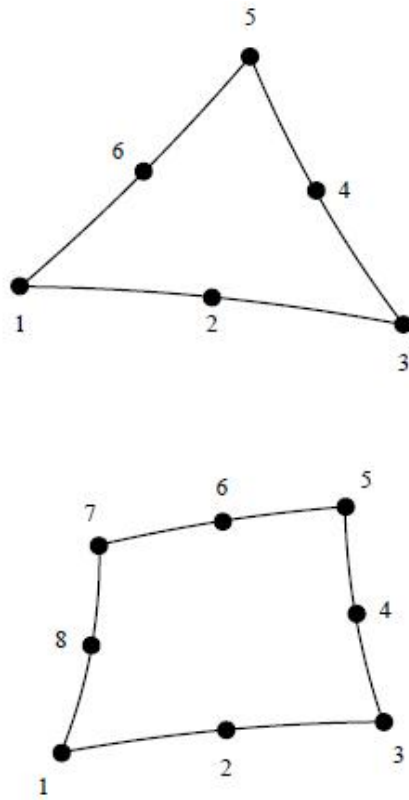
Για την περίπτωση όπου υφίστανται και θερμικές παραμορφώσεις αυτές δίδονται από την εξής σχέση:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \begin{Bmatrix} a \\ a \\ a \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (6.26)$$

Για την επίλυση του θερμικού μέρους του θερμοελαστικού προβλήματος θεωρούμε αξονοσυμμετρικά στοιχεία με τη παρακάτω συμπεριφορά θερμικής ροής θερμοκρασίας:

$$\begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T_r}{\partial r} \\ \frac{\partial T_z}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_r \\ q_z \end{Bmatrix} \quad (6.27)$$

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη παρούσα πτυχιακή για την αντιμετώπιση των θερμοελαστικών προβλημάτων είναι αξονοσυμμετρικά, δευτεροβάθμια, ισοπαραμετρικά, τρίπλευρα με έξι κόμβους ή τετράπλευρα με οκτώ κόμβους (Σχήμα 6.7):. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν ένα και δύο βαθμούς ελευθερίας για το θερμικό και το μηχανικό πεδίο αντίστοιχα.



Σχήμα 6.7: Χρησιμοποιούμενα αξονοσυμμετρικά ισοπαραμετρικά στοιχεία δευτέρου βαθμού.

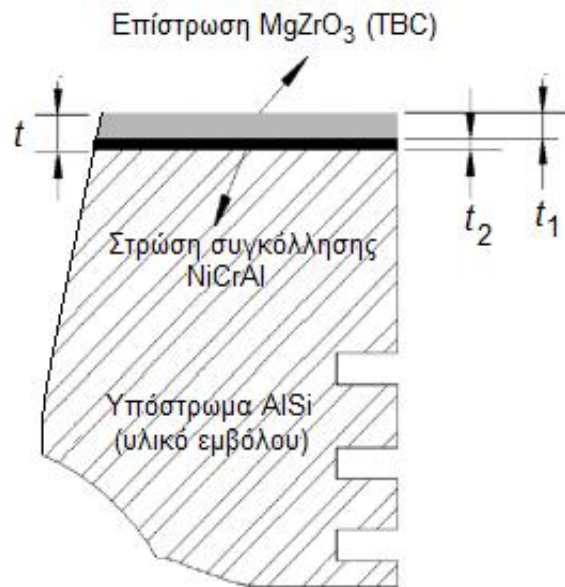
7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θερμοελαστική απόκριση συγκεκριμένου εμβόλου ντιζελομηχανής [29] με ή χωρίς επιστρώσεις θερμικής προστασίας, από μαγνησιούχο οξειδίο του ζirkονίου $MgZrO_3$, προκειμένου να εξαχθούν κρίσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την αποτελεσματικότητά τους. Για την επίλυση του προβλήματος θεωρήθηκε αξονοσυμμετρία του εμβόλου για να μειωθούν οι υπολογιστικοί χρόνοι. Έχει αποδειχθεί άλλωστε ότι η αξονοσυμμετρική ανάλυση ενός εμβόλου με περασμένα στοιχεία είτε μέσω τρισδιάστατης μοντελοποίησης είτε με αξονοσυμμετρικής οδηγεί σε παρεμφερή αποτελέσματα [30]. Μια άλλη απλοποίηση που ακολουθήθηκε είναι ότι θεωρήθηκε μόνιμη θερμοελαστικότητα και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν χρονικά αμετάβλητες θερμικές συνοριακές συνθήκες βάσει αντίστοιχων μέσων τιμών θερμικού φορτίου οι οποίες παρέχονται στη βιβλιογραφία [31]. Για την θερμοελαστική ανάλυση του εμβόλου χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό πρόγραμμα πεπερασμένων Στοιχείων Lusas FEA (Finite element analysis) [28]. Η ανάλυση έδωσε τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η θερμική συμπεριφορά του εξαρτήματος του κινητήρα κάτω από πραγματικές συνθήκες, καθώς και να εξαχθεί η μηχανική απόκριση του εξαρτήματος αυτού.

7.1 ΥΛΙΚΑ

Το σύστημα επικάλυψης που υιοθετήθηκε στη παρούσα πτυχιακή απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Στη μελέτη που έγινε χρησιμοποιήθηκε έμβολο το οποίο είναι κατασκευασμένο από κράμα. Το κράμα αυτό (AlSi) ουσιαστικά είναι κράμα αλουμινίου (Al) και πυριτίου (Si). Χρησιμοποιείται δε για την κατασκευή εμβόλων με σκοπό την εφαρμογή τους στην αυτοκίνητο-βιομηχανία. Στο εμπόριο η κωδική ονομασία του είναι 2618A(RR58). Ως επίστρωση θερμικής προστασίας (TBC) επιλέχθηκε μαγνησιούχο οξειδίο του ζirkονίου $MgZrO_3$, διαφορετικών τιμών πάχους $t_1 = 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200 \mu m$, εξαιτίας της εξαιρετικών θερμομονωτικών ιδιοτήτων του. Ως στρώση συγκόλλησης μεταξύ επίστρωσης ($MgZrO / TBC$) και

υποστρώματος (AlSi / έμβολο) επιλέχθηκε κράμα νικελίου χρωμίου και αλουμινίου NiCrAl, σταθερού πάχους $t_2 = 150\mu\text{m}$, εξαιτίας της εξαιρετικής συνάφειας που παρέχει και με τα δύο παραπάνω υλικά. Το συνολικό πάχος της επικάλυψης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1, είναι ίσο με $t = t_2 + t_2$.



Σχήμα 7.1: Σύστημα επικάλυψης και εμπλεκόμενα υλικά.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες όλων των χρησιμοποιούμενων υλικών.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΥΛΙΚΑ		
	Υπόστρωμα (AlSi / Έμβολο)	Στρώση συγκόλλησης (NiCrAl)	Επίστρωση (MgZrO ₃ / TBC)
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κ (W/m °C)	155	16.1	0.8
Συντελεστής θερμικής διαστολής α (1/°C)	21×10^{-6}	12×10^{-6}	8×10^{-6}
Πυκνότητα ρ (Kg/m ³)	2700	7870	5600
Ειδική θερμότητα c (J/Kg °C)	960	764	650
Λόγος Poisson ν (-)	0.33	0.27	0.20
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	69	90	46

Πίνακας 7.1: Ιδιότητες εμπλεκόμενων υλικών.

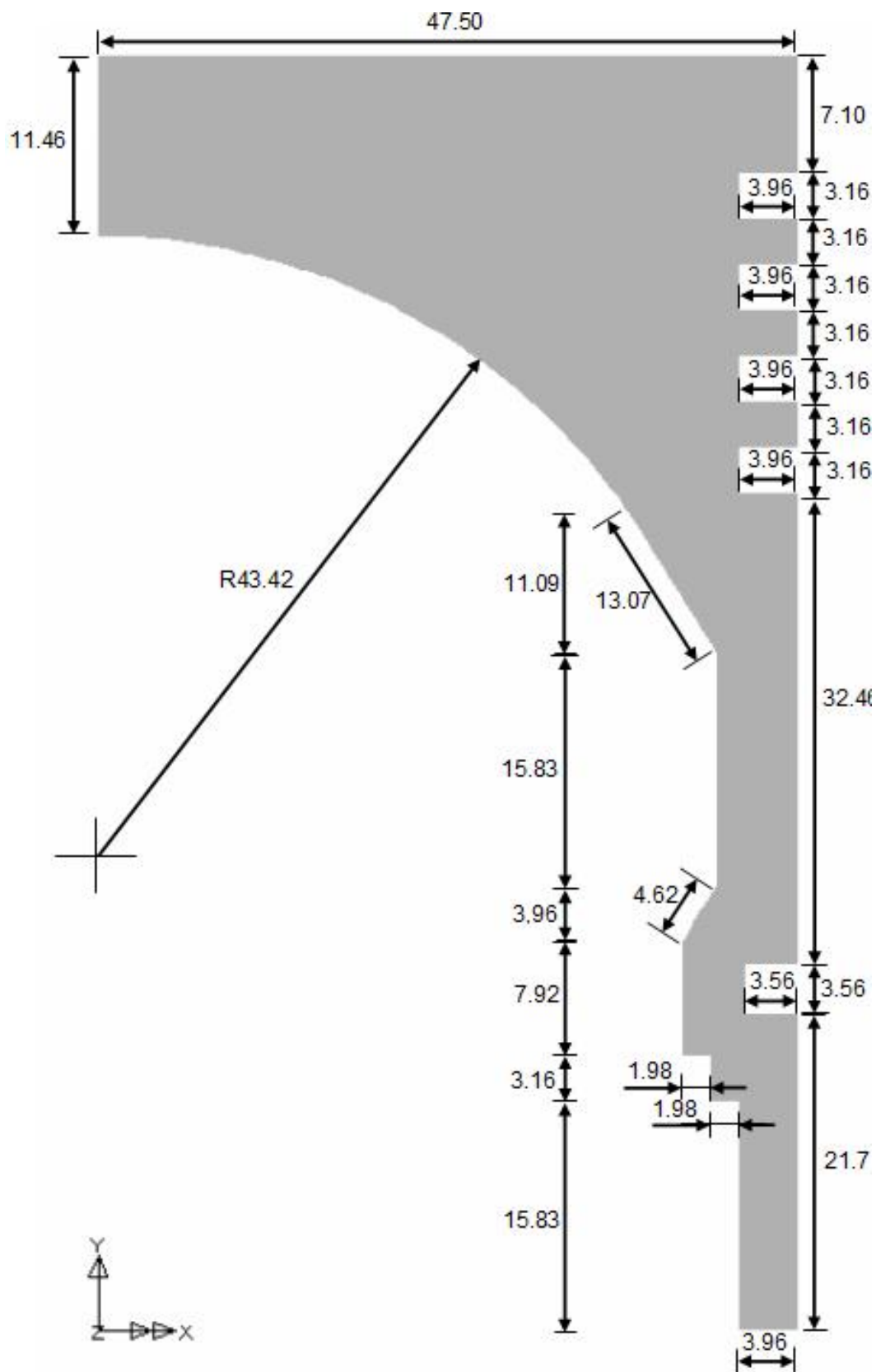
7.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η μελέτη αφορά ένα έμβολο ενός τετράχρονου μονοκύλινδρου πετρελαιοκινητήρα με την ονομασία ER 17 [29]. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στον Πίνακα 7.2.

Cylinder number	1
Stroke	95 mm
Bore	110 mm
Connecting rod length	168 0.125 mm
Displacement	902 c.c.
Compression ratio	20.5
Injection timing	19 BTDC
Inlet valve opening	20 BTDC
Inlet valve closing	45 ABDC
Exhaust valve opening	50 ABDC
Exhaust valve closing	15 ATDC
Cooling system	Water
Rated horsepower and speed	9.43 KW and 2000 RPM
Intake system	Naturally aspirated

Πίνακας 7.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

Επίσης λόγω της σχεδόν αξονοσυμμετρικής συμμετρίας του προς εξέταση εμβόλου δεν ήταν αναγκαίο να εισαχθεί η τρισδιάστατη γεωμετρία του παρά μόνο η μια τομή ως προς το πρόσωπο του. Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται η γεωμετρία του εμβόλου σε αξονοσυμμετρική τομή με τις ακριβείς διαστάσεις του.



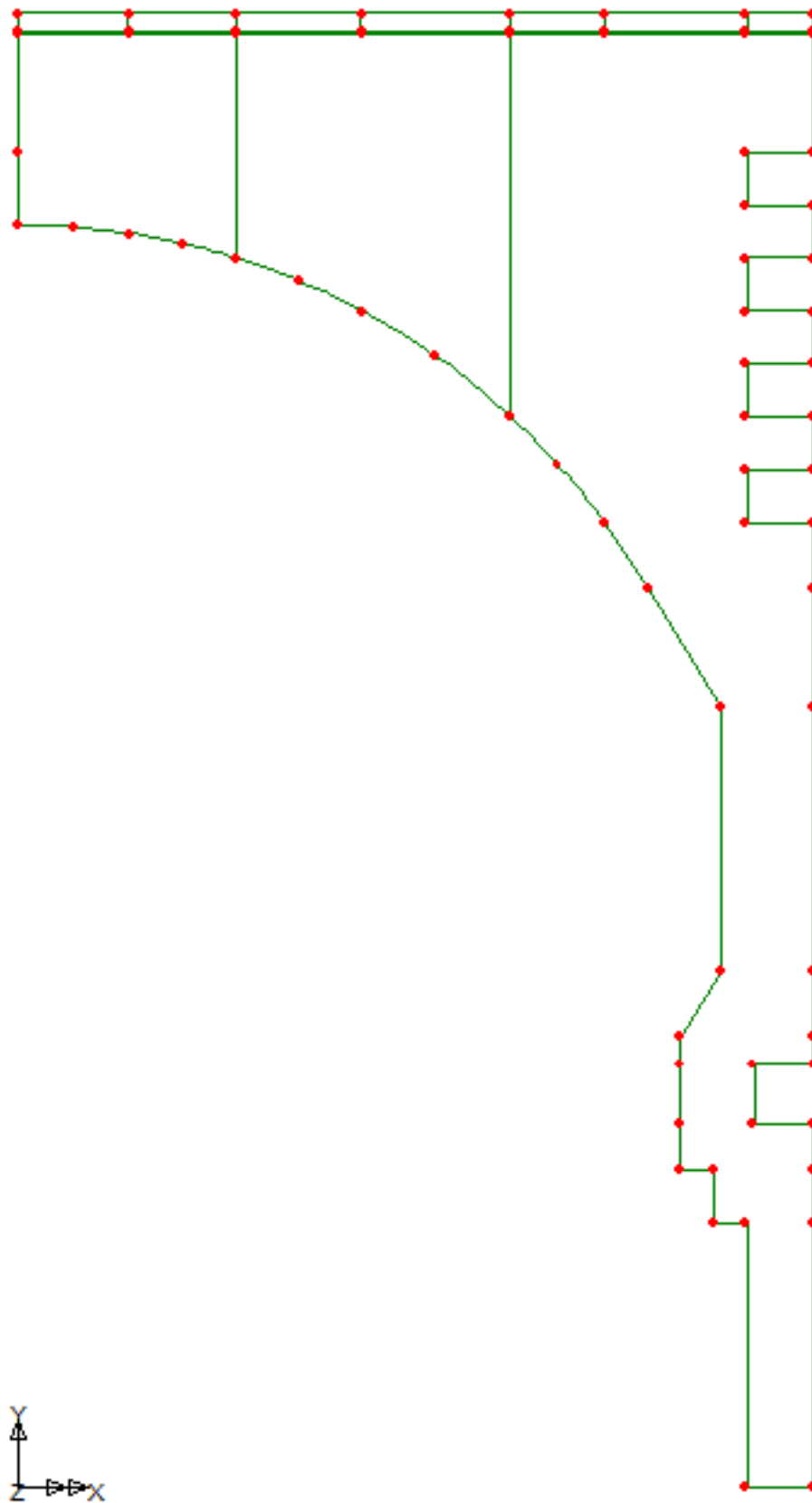
Σχήμα 7.2: Γεωμετρία εμβόλου.

Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι δέκα στον αριθμό γεωμετρικές περιπτώσεις επικάλυψης οι οποίες διερευνώνται στη παρούσα πτυχιακή. Η πρώτη δοκιμή αναφέρεται σε τελείως γυμνό πρόσωπο εμβόλου ενώ η τελευταία δοκιμή αναφέρεται σε μια επικάλυψη (επίστρωση και συγκολλητική στρώση) η οποία έχει υποστεί αποφλοιώση στο 30% του μήκους της γύρω από τον άξονα συμμετρίας.

Πάχος επικάλυψης t (μm)	Πάχος επίστρωσης (MgZrO_3 / TBC) t_1 (μm)	Πάχος στρώσης συγκόλλησης (NiCrAl) t_2 (μm)
0	0	0
300	150	150
450	300	150
600	450	150
750	600	150
900	750	150
1050	900	150
1200	1050	150
1200 (αποφλοιωμένη)	1200	150

Πίνακας 7.3: Προς μελέτη γεωμετρικές επικάλυψης.

Αρχικά, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Lusas), εισάγονται τα ακριβή σημεία του σχεδίου. Του δίδονται δηλαδή τις ακριβείς συντεταγμένες. Επειδή πρόκειται για δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό σχέδιο εισάγονται αποκλειστικά συντεταγμένες x , y για κάθε σημείο. Αφού εισαχθούν οι συντεταγμένες δημιουργούνται τα λεγόμενα σημεία. Αν ενωθούν αυτά τα σημεία σε γραμμές και οι γραμμές σε επιφάνειες δημιουργείται ουσιαστικά το πεδίο ορισμού του προβλήματος, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 7.3. Στο σχήμα αυτό έχει προστεθεί και σύστημα επικάλυψης συνολικού πάχους $t = 1200\mu\text{m}$ με (πάχος επίστρωσης $t_1 = 1050\mu\text{m}$ και πάχος συγκολλητικής στρώσης $t_2 = 150\mu\text{m}$). Όπως φαίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, οι επιμέρους επιφάνειες υποδιαιρούνται σε υποεπιφάνειες για να καταστεί πιο εύκολη και αποτελεσματική η διακριτοποίηση.



Σχήμα 7.3: Πεδίο ορισμού εμβόλου.

7.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

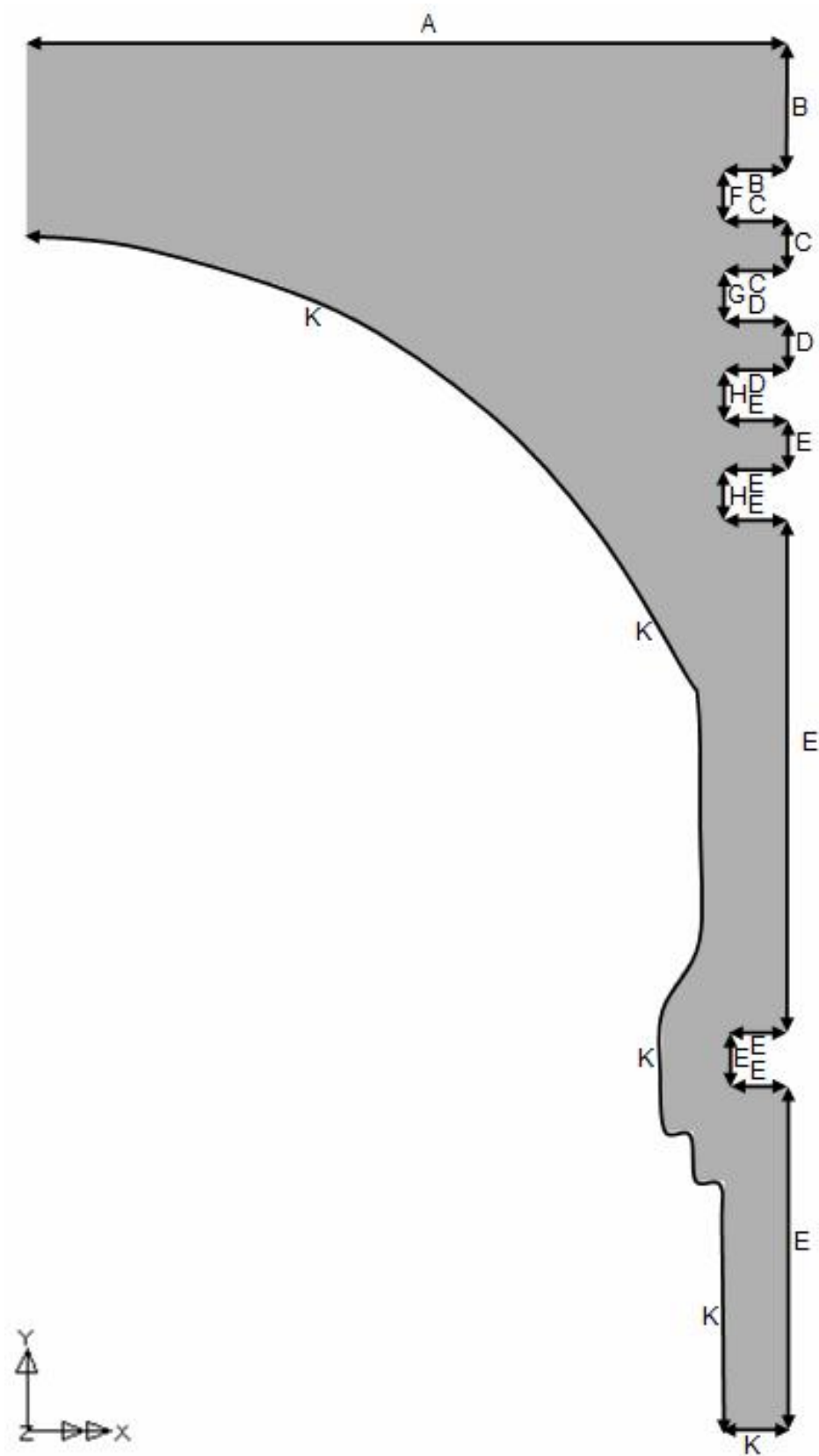
Αφού καταχωρηθούν οι αντίστοιχες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες σε κάθε επιφάνεια το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών. Οι θερμικές συνοριακές συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη είναι αντιπροσωπευτικές μέσες τιμές των συνθηκών λειτουργίας ενός εμβόλου Diesel κινητήρα [31] ενώ ονοματίζονται και καθορίζονται στον Πίνακα 7.4.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΗΣ ΣΥΝΘΗΚΗΣ	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Θερμοκρασία T ($^\circ C$)
A	600	650
B	350	500
C	300	180
D	400	170
E	400	110
F	–	200
G	–	180
H	–	170
G	1500	95

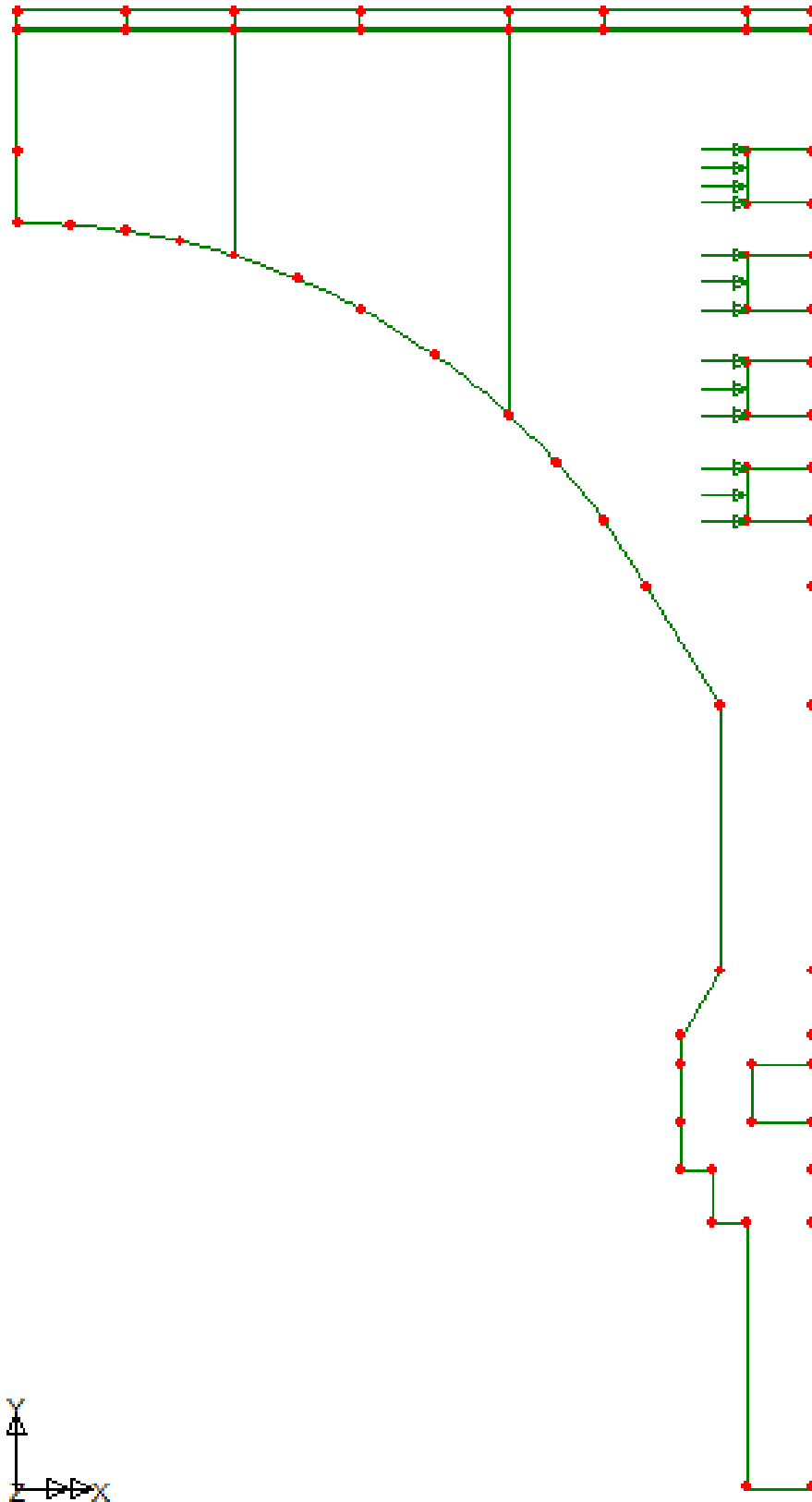
Πίνακας 7.4: Ονομασία και καθορισμός θερμικών συνοριακών συνθηκών.

Για να καταστεί πιο εύκολη η κατανόηση των θερμικών συνοριακών συνθηκών παρατίθεται το Σχήμα 7.4 στο οποίο ονοματίζεται η επιβαλλόμενη συνοριακή συνθήκη έκαστη γραμμής του συνόρου του προβλήματος. Να τονισθεί ότι στον άξονα συμμετρίας ($x = 0$) δεν απαιτείται ο καθορισμός κάποιας ιδιαίτερης συνθήκης.

Όσον αφορά το μηχανικό μέρος του προβλήματος επιβλήθηκε ο απλός περιορισμός της μηδενικής οριζόντιας μετατόπισης ($u_x = 0$), στις κατακόρυφες πλευρές του εμβόλου οι οποίες έρχονται σε επαφή με τα δαχτυλίδια, προκειμένου να εξαχθούν κάποια ποιοτικά συμπεράσματα όσον αφορά το τασικό πεδίο του θερμικά φορτιζόμενου εμβόλου. Αυτοί οι μηχανικού τύπου περιορισμοί στη μετατόπιση του εμβόλου απεικονίζονται στο Σχήμα 7.5. Να τονισθεί ότι σ και εδώ, δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος περιορισμός στον άξονα συμμετρίας ($x = 0$) λόγω της αξονοσυμμετρικότητας του υιοθετημένου μοντέλου.



Σχήμα 7.4: Επιβαλλόμενες θερμικές συνοριακές συνθήκες.

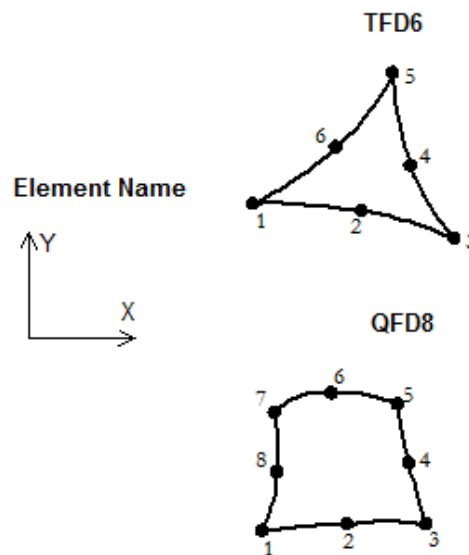


Σχήμα 7.5: Επιβαλλόμενες μηχανικές συνοριακές συνθήκες.

7.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

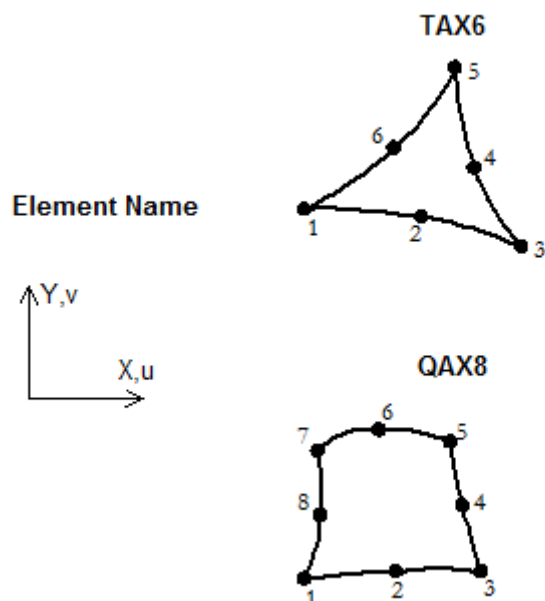
Στο αυτή τη παράγραφο παρατίθενται κάποιες πληροφορίες σχετικά με το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για κάθε μοντέλο.

Το πεδίο ορισμού του Σχήματος 7.3 διαχωρίζεται σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από πολυάριθμα τριεδρικά και τετραεδρικά, ισοπαραμετρικά, δευτεροβάθμια, αξονοσυμμετρικά στοιχεία. Για το θερμικό μέρος του προβλήματος χρησιμοποιούνται στοιχεία θερμικού πεδίου ενός βαθμού ελευθερίας (θερμοκρασία T) ανά κόμβο τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 7.6.



Σχήμα 7.6: Υιοθετούμενα πεπερασμένα στοιχεία θερμικού πεδίου.

Για το μηχανικό χρησιμοποιούνται παρόμοια πεπερασμένα στοιχεία με τη διαφορά ότι είναι μηχανικού πεδίου δύο βαθμών ελευθερίας (μετατοπίσεις u_x , u_y) ανά κόμβο τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 7.7.



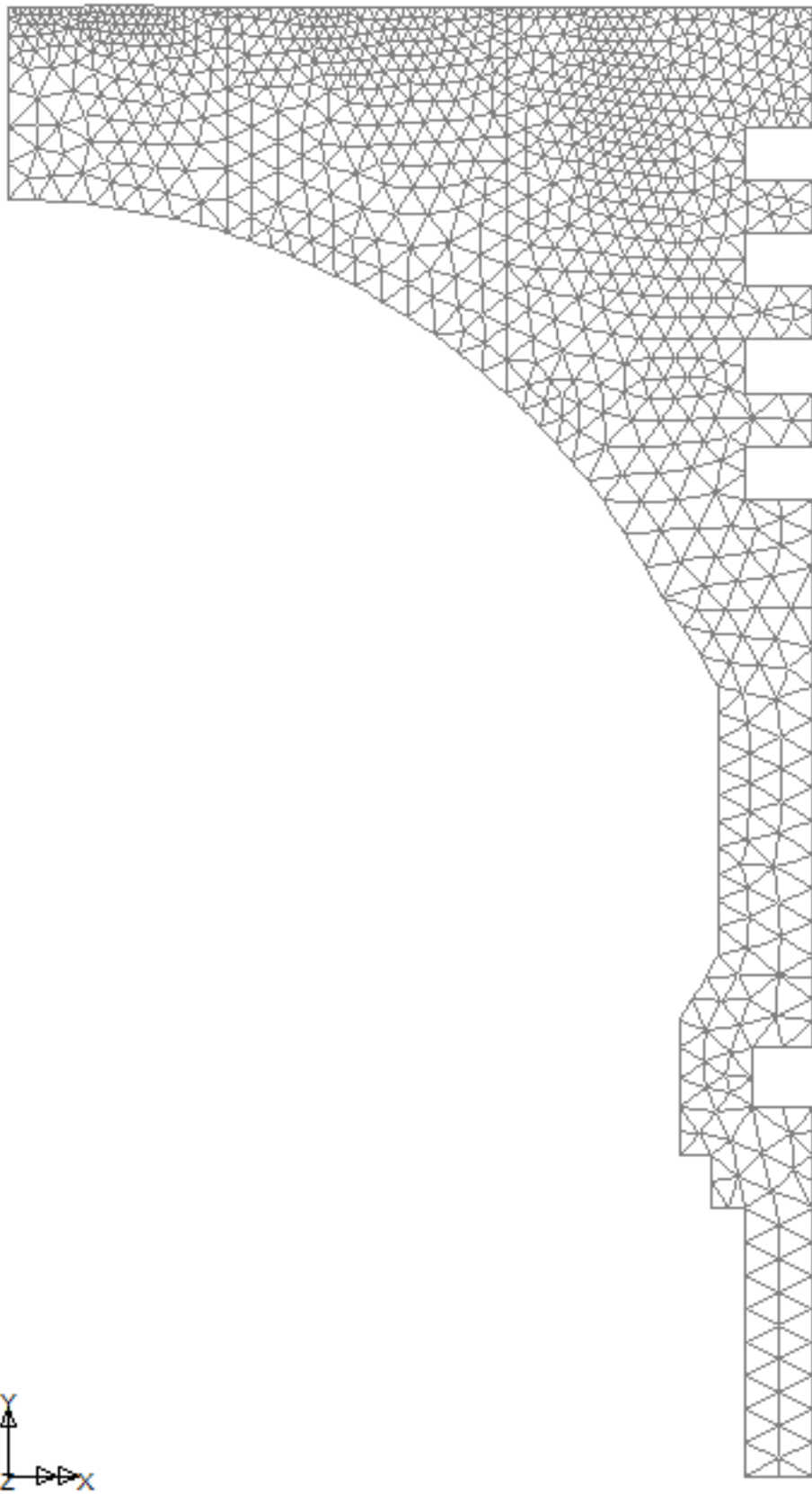
Σχήμα 7.7: Υιοθετούμενα πεπερασμένα στοιχεία μηχανικού πεδίου.

Στον Πίνακα 7.5 παρατίθενται λεπτομέρειες που έχουν να κάνουν με τον αριθμό χρησιμοποιούμενων στοιχείων για κάθε περίπτωση επικάλυψης που εξετάζεται χωριστά. Οι τελικές επιλογές όσων αφορά τη διακριτοποίηση των μοντέλων έγιναν κατόπιν δοκιμών σύγκλισης σε σχέση με τη πυκνότητα του κανάβου στοιχείων.

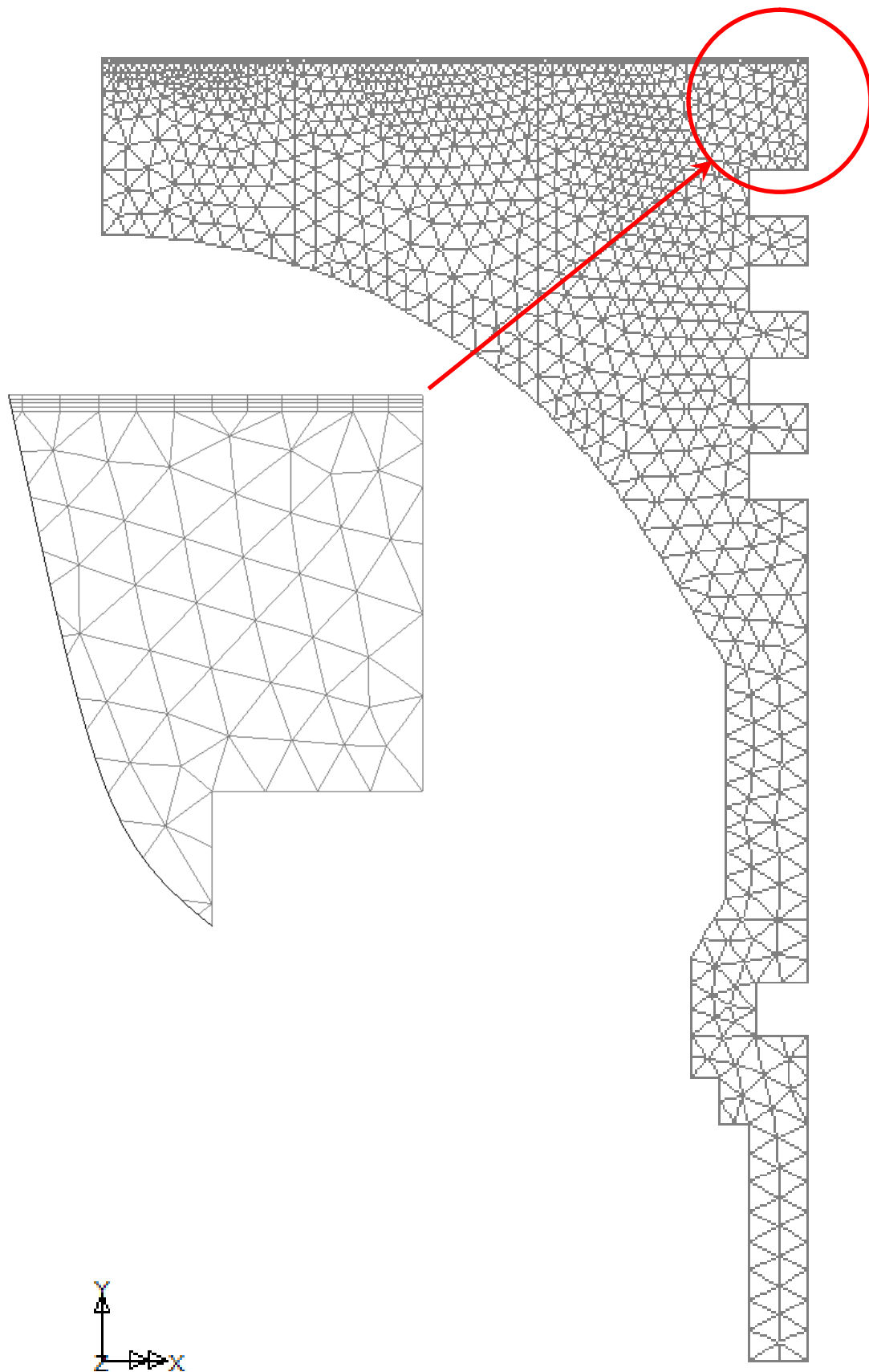
Πάχος επικάλυψης t (μm)	Αριθμός τρίπλευρων στοιχείων			Αριθμός τετράπλευρων στοιχείων		
	AlSi	NiCrAl	MgZrO ₃	AlSi	NiCrAl	MgZrO ₃
0	1614	0	0	0	156	156
300	1614	0	0	0	156	312
450	1614	0	0	0	156	468
600	1614	0	0	0	156	624
750	1614	0	0	0	156	780
900	1614	0	0	0	156	936
1050	1614	0	0	0	156	1092
1200	1614	0	0	0	156	1248
1200 (αποφλοιωμένη)	1614	0	0	0	108	864

Πίνακας 7.5: Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων κατά εξεταζόμενη περίπτωση επικάλυψης.

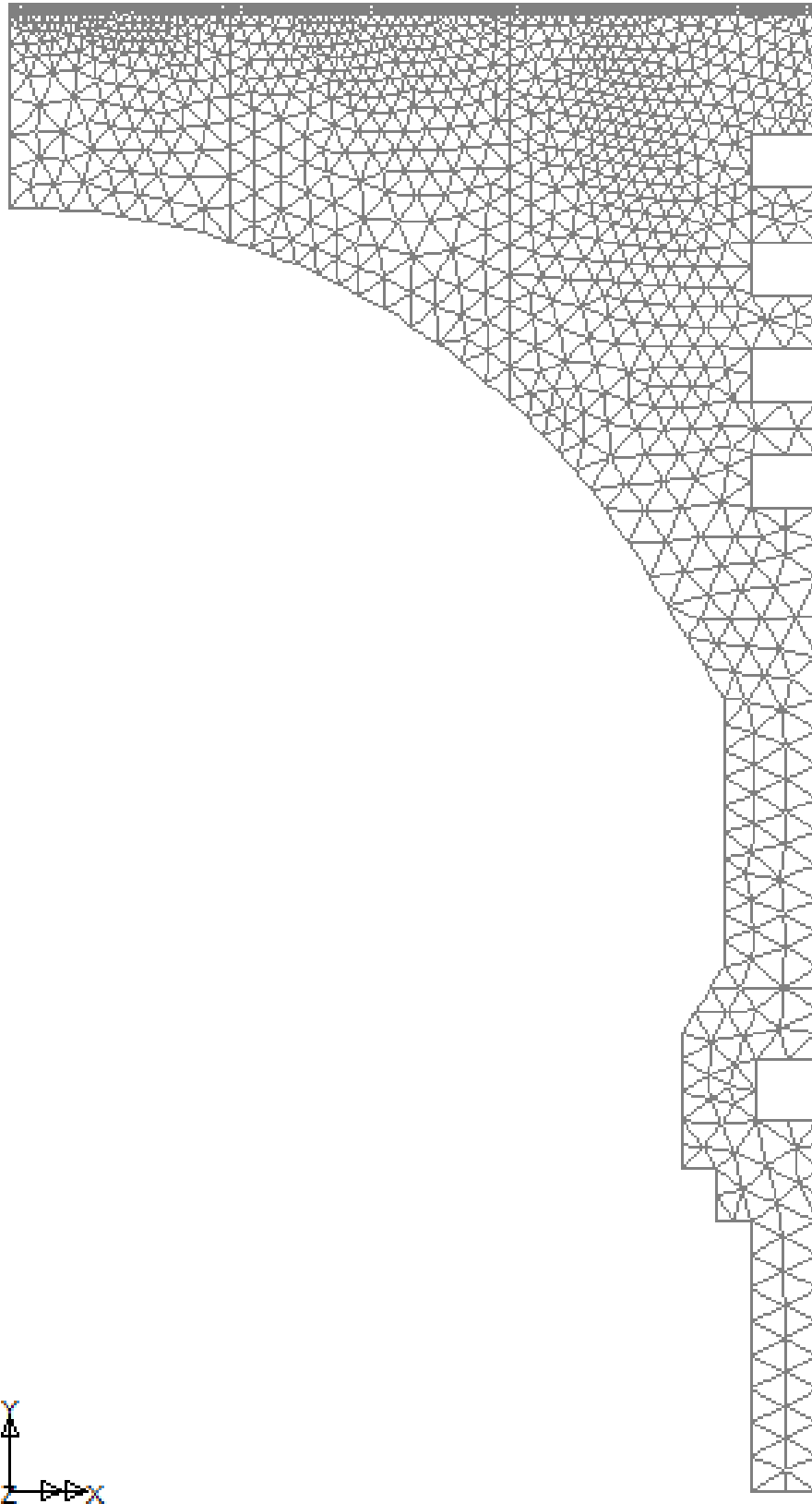
Τα Σχήματα 7.8a, b, c, d, e, f, g, h και i απεικονίζουν τα πλέγματα στοιχείων για την περίπτωση επικάλυψης πάχους 0μm, 300μm, 450μm, 600μm, 750μm, 900μm, 1050μm, 1200μm και 1200μm με αποφλοίωση, αντίστοιχα.



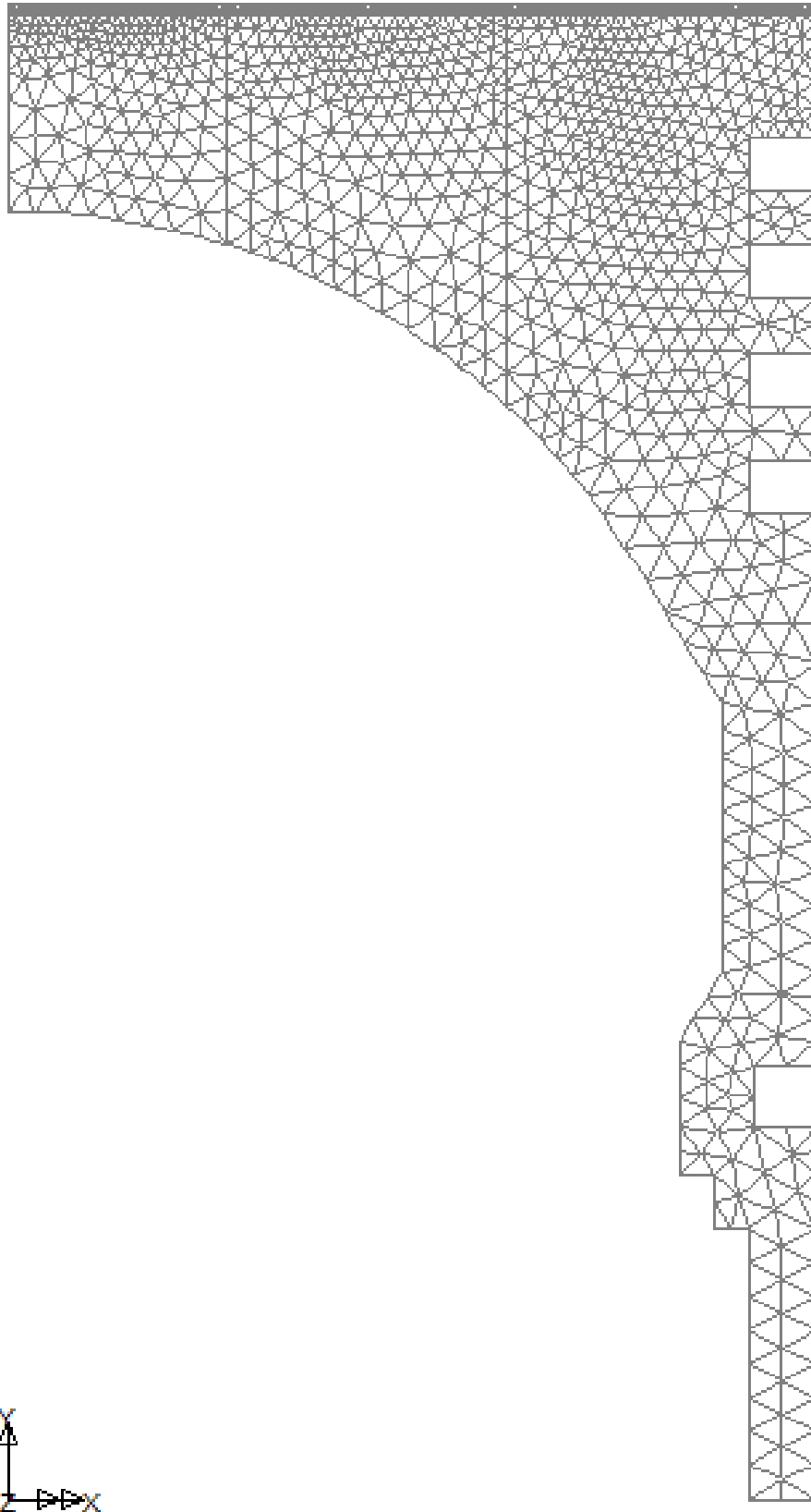
Σχήμα 7.8a : Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 0$.



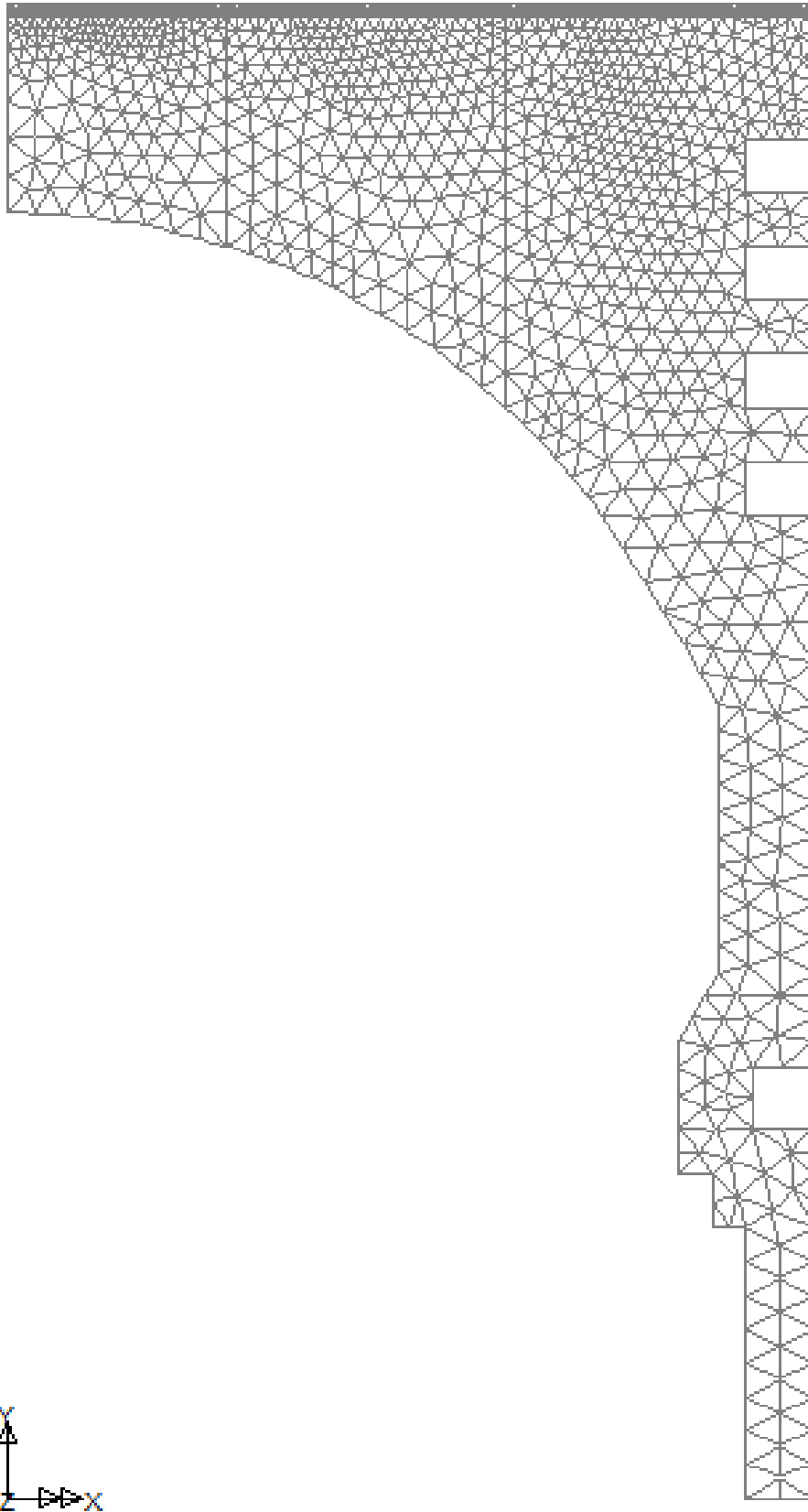
Σχήμα 7.8b : Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 300\mu\text{m}$.



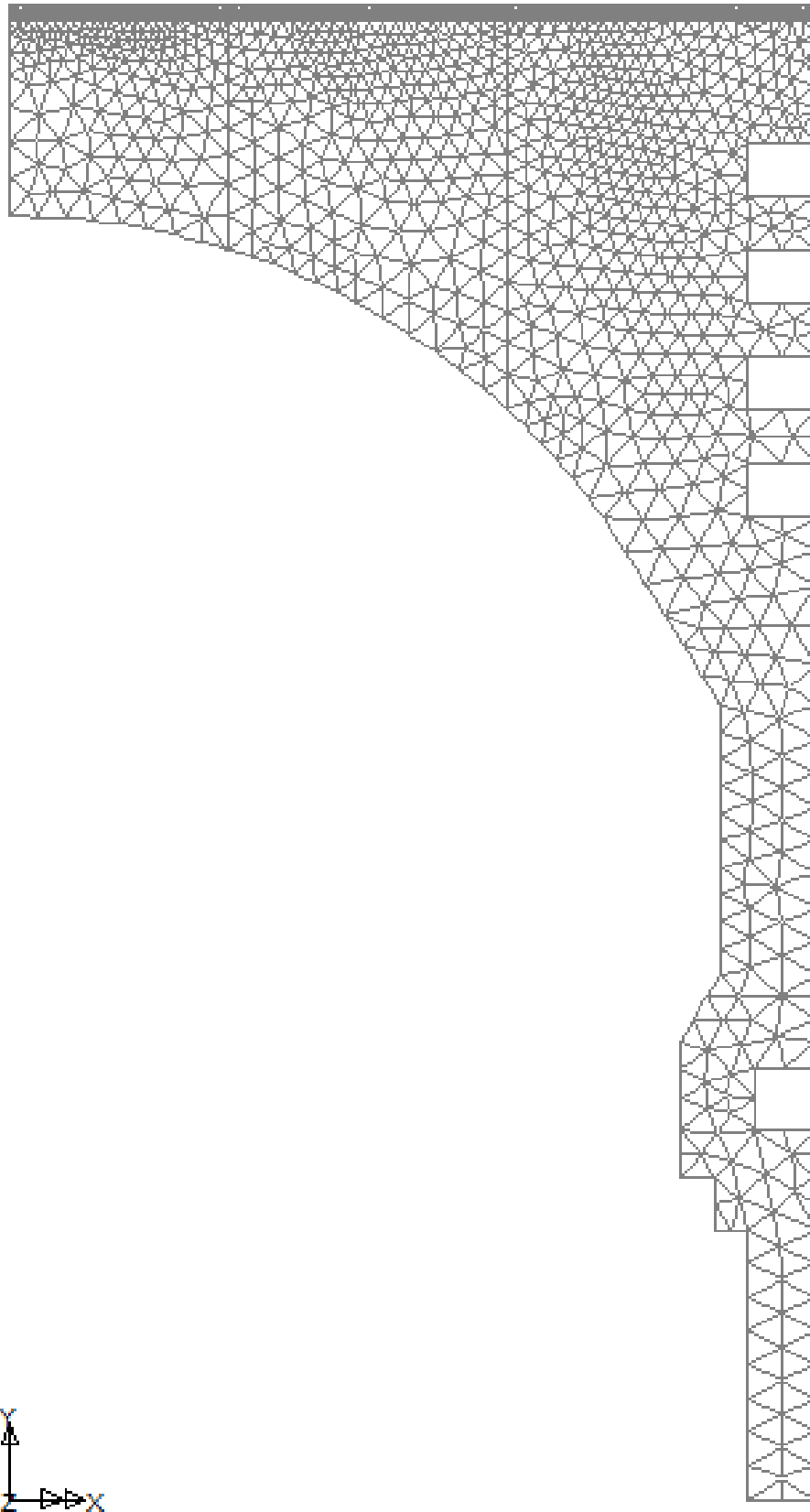
Σχήμα 7.8c: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 450\mu\text{m}$.



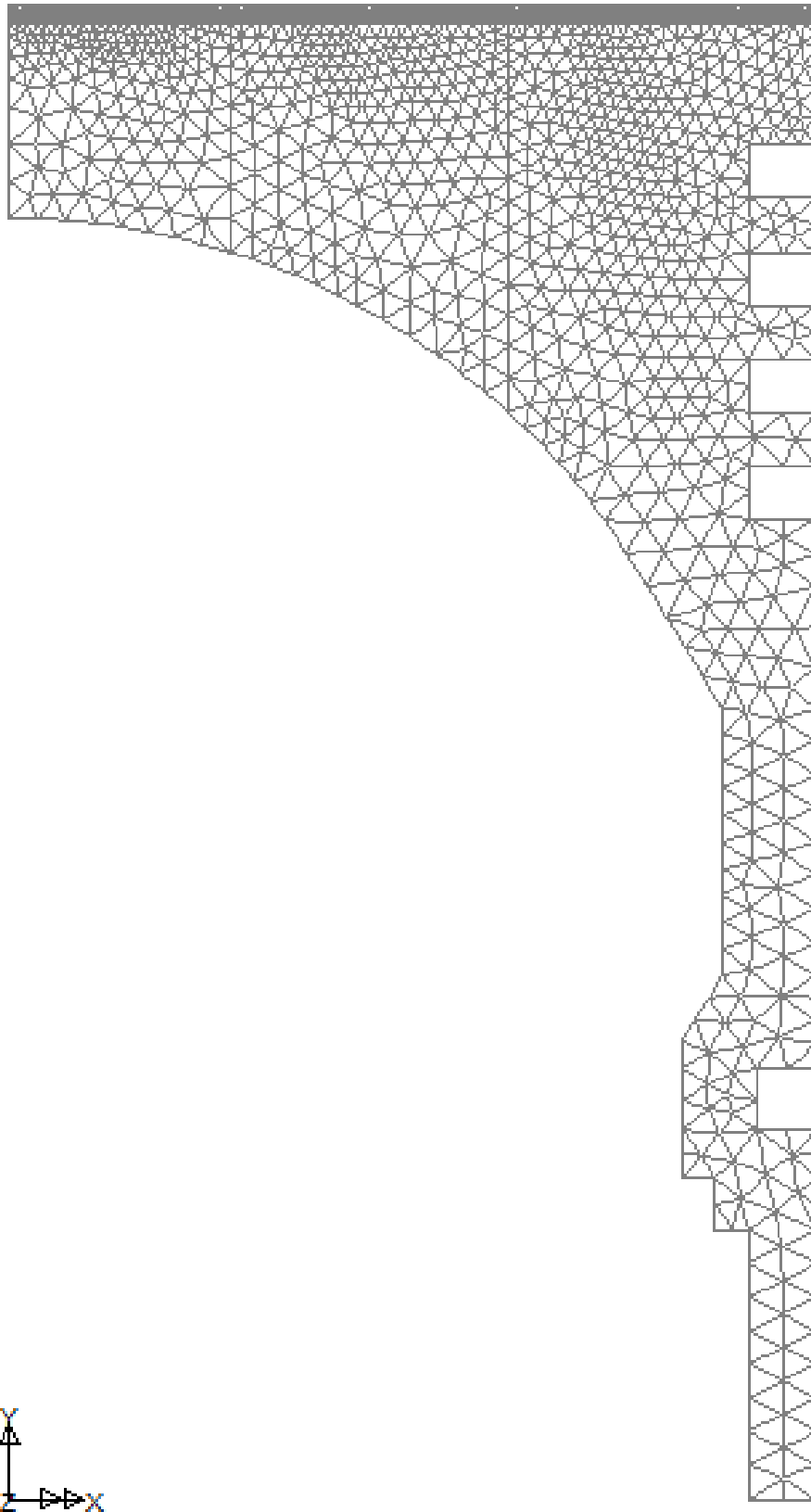
Σχήμα 7.8d: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 600\mu\text{m}$.



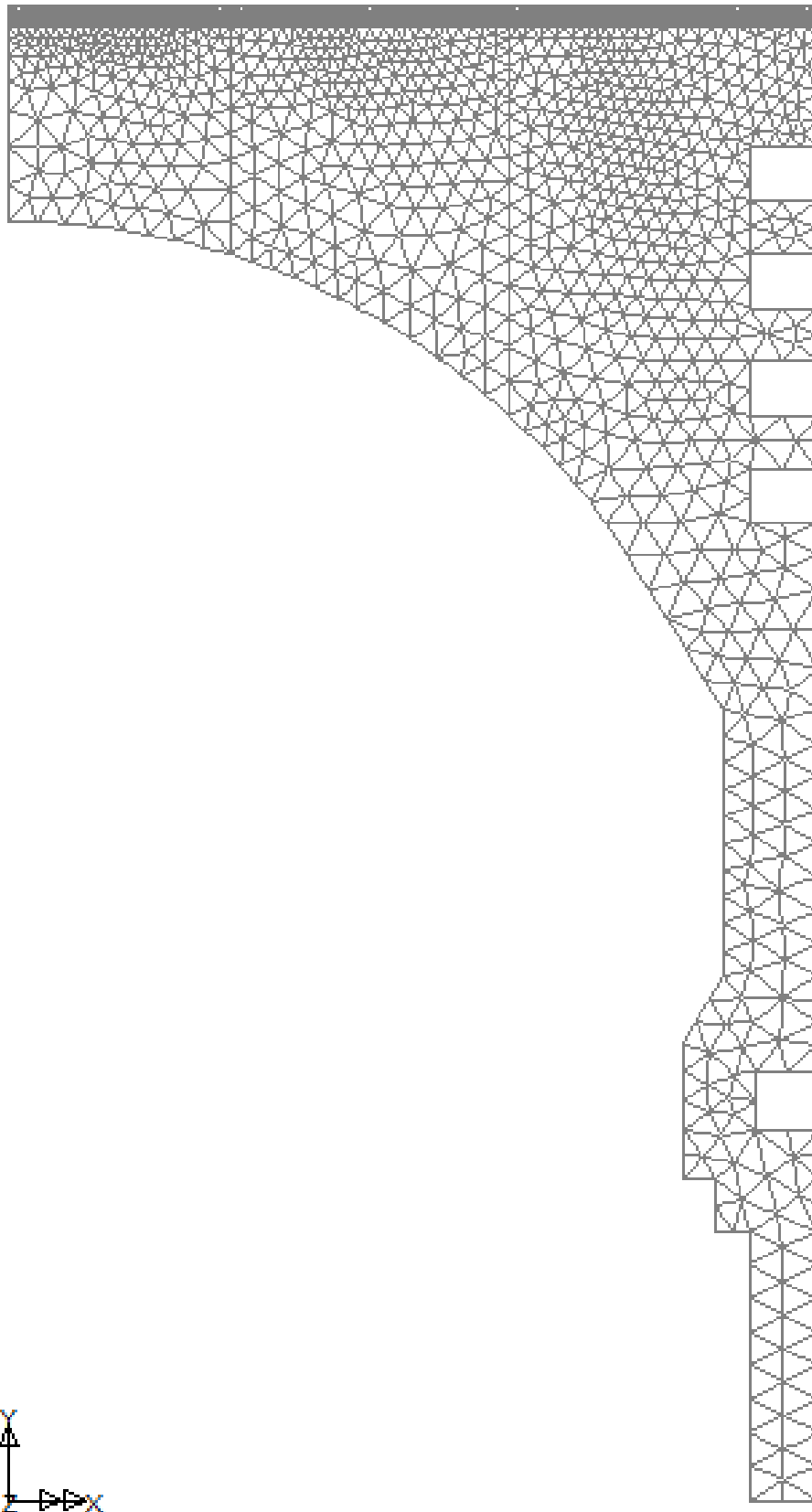
Σχήμα 7.8e: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 750\mu\text{m}$.



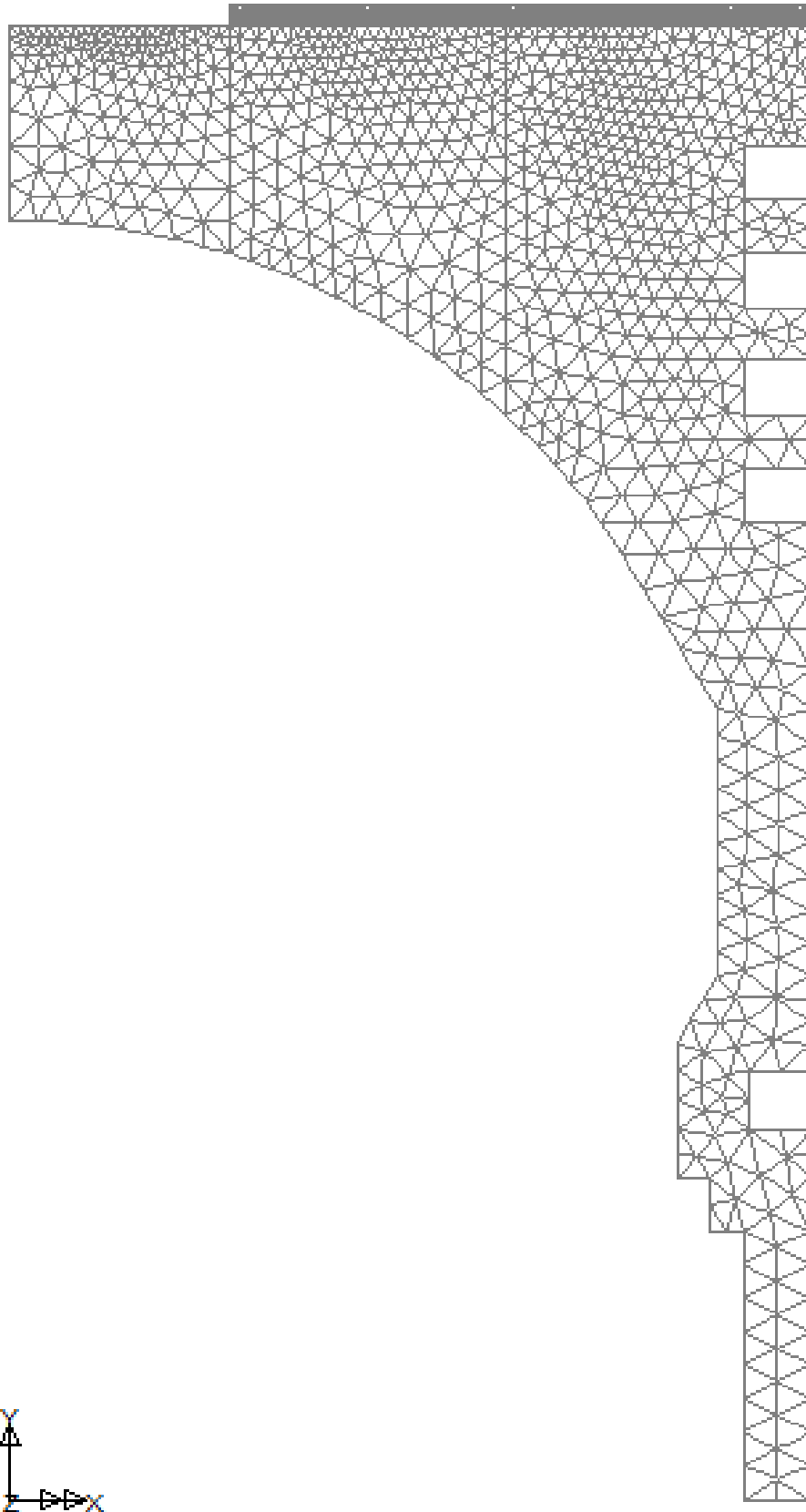
Σχήμα 7.8f: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 900\mu\text{m}$.



Σχήμα 7.8g: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 1050\mu\text{m}$.



Σχήμα 7.8h: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$.

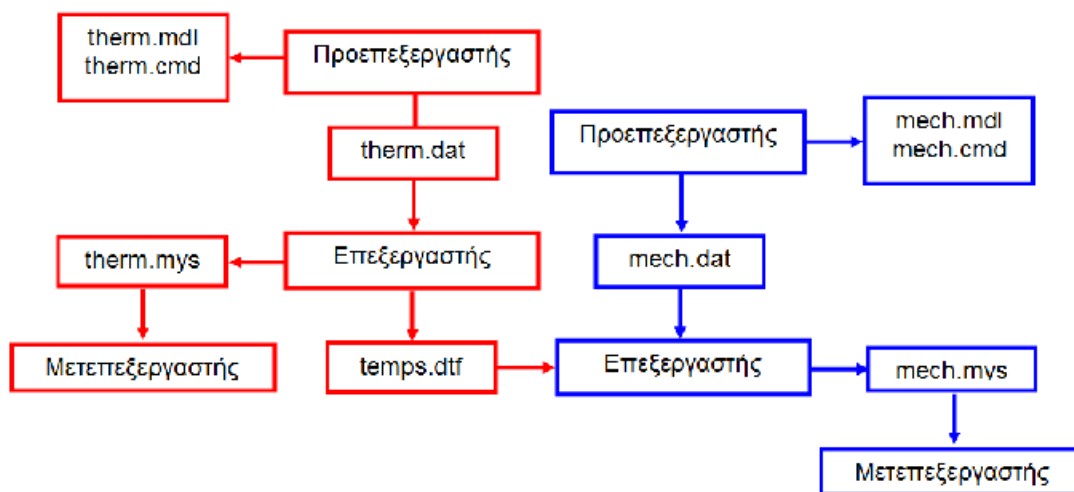


Σχήμα 7.8i: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$ και αποφλοίωση.

7.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

Αρχικά δημιουργείται το θερμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του προεπεξεργαστή βάσει των θερμικών ιδιοτήτων, της γεωμετρίας, και των θερμικών συνοριακών συνθηκών του προβλήματος. Χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα θερμικά πεπερασμένα στοιχεία και κατάλληλη διακριτοποίηση. Η όλη πληροφορία αποθηκεύεται σε τρία διαφορετικού τύπου αρχεία: therm.mdl, therm.cmd και therm.dat. Το αρχείο μορφής dat οδηγείται στον επεξεργαστή ο οποίος επιλύει το θερμικό μέρος (θερμοκρασίες και ροές). Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε δύο αρχεία το therm.mys και το temps.dtf. Το πρώτο αρχείο δύναται να τροφοδοτηθεί στον μετεπεξεργαστή και να απεικονισθούν εκεί τα αποτελέσματα υπό τη μορφή διαγραμμάτων, περιγραμμάτων κλπ.

Έπειτα δημιουργείται το μηχανικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια και πάλι του προεπεξεργαστή βάσει των μηχανικών ιδιοτήτων της, της γεωμετρίας και των μηχανικών συνοριακών συνθηκών. Χρησιμοποιούνται κατάλληλα μηχανικά πεπερασμένα στοιχεία και διακριτοποίηση με το ίδιο σχήμα και αριθμό κόμβων που υιοθετήθηκε στο θερμικό μέρος. Η πληροφορία αποθηκεύεται παρόμοια σε τρία διαφορετικού τύπου αρχεία mech.mdl, mech .cmd, mech.dat. Το αρχείο μορφής mech.dat μαζί και το αρχείο temps.dtf (που δημιουργήθηκε από τη επίλυση του θερμικού μέρους) εισάγονται στον επεξεργαστή ο οποίος επιλύει το μηχανικό μέρος (παραμορφώσεις και τάσεις). Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στο αρχείο mech.mys. Το αρχείο αυτό δύναται να εισαχθεί στον μετεπεξεργαστή για θέαση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 7.9 εκφράζονται σχηματικά όλα τα προαναφερθέντα.



Σχήμα 7.9: Επίλυση προβλήματος με το επαγγελματικό λογισμικό πακέτο Lusas.

Στο Παράρτημα παρατίθεται ένα αρχείο therm.cmd και ένα αρχείο mech.cmd για λόγους πληρότητας της παρούσας πτυχιακής.

7.6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.6.1 Περιγράμματα

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται εικονοποιημένα τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για όλες τις περιπτώσεις επικάλυψης.

Τα Σχήματα 7.10a, b, c, d, e, f, g, h και i απεικονίζουν το περίγραμμα θερμοκρασίας για την περίπτωση επικάλυψης πάχους 0μm, 300μm, 450μm, 600μm, 750μm, 900μm, 1050μm, 1200μm και 1200μm με αποφλοίωση, αντίστοιχα.

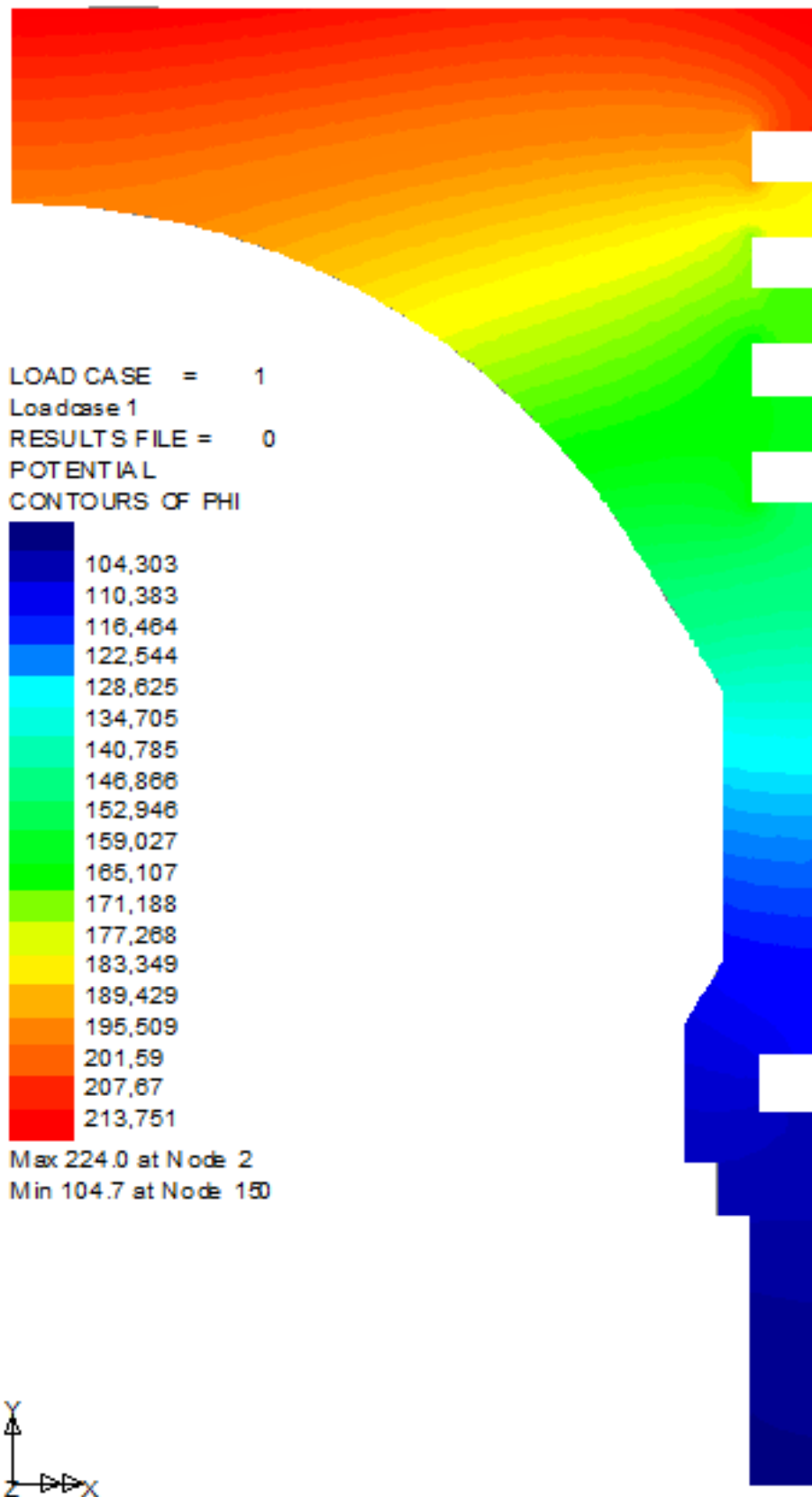
Τα Σχήματα 7.11a, b, c, d, e, f, g και h απεικονίζουν το περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για την περίπτωση επικάλυψης πάχους 0μm, 300μm, 450μm, 600μm, 750μm, 900μm, 1050μm, 1200μm και 1200μm με αποφλοίωση, αντίστοιχα.

Τα Σχήματα 7.12a, b, c, d, e, f, g, h και i απεικονίζουν το περίγραμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για την περίπτωση επικάλυψης πάχους 0μm, 300μm, 450μm, 600μm, 750μm, 900μm, 1050μm, 1200μm και 1200μm με αποφλοίωση, αντίστοιχα.

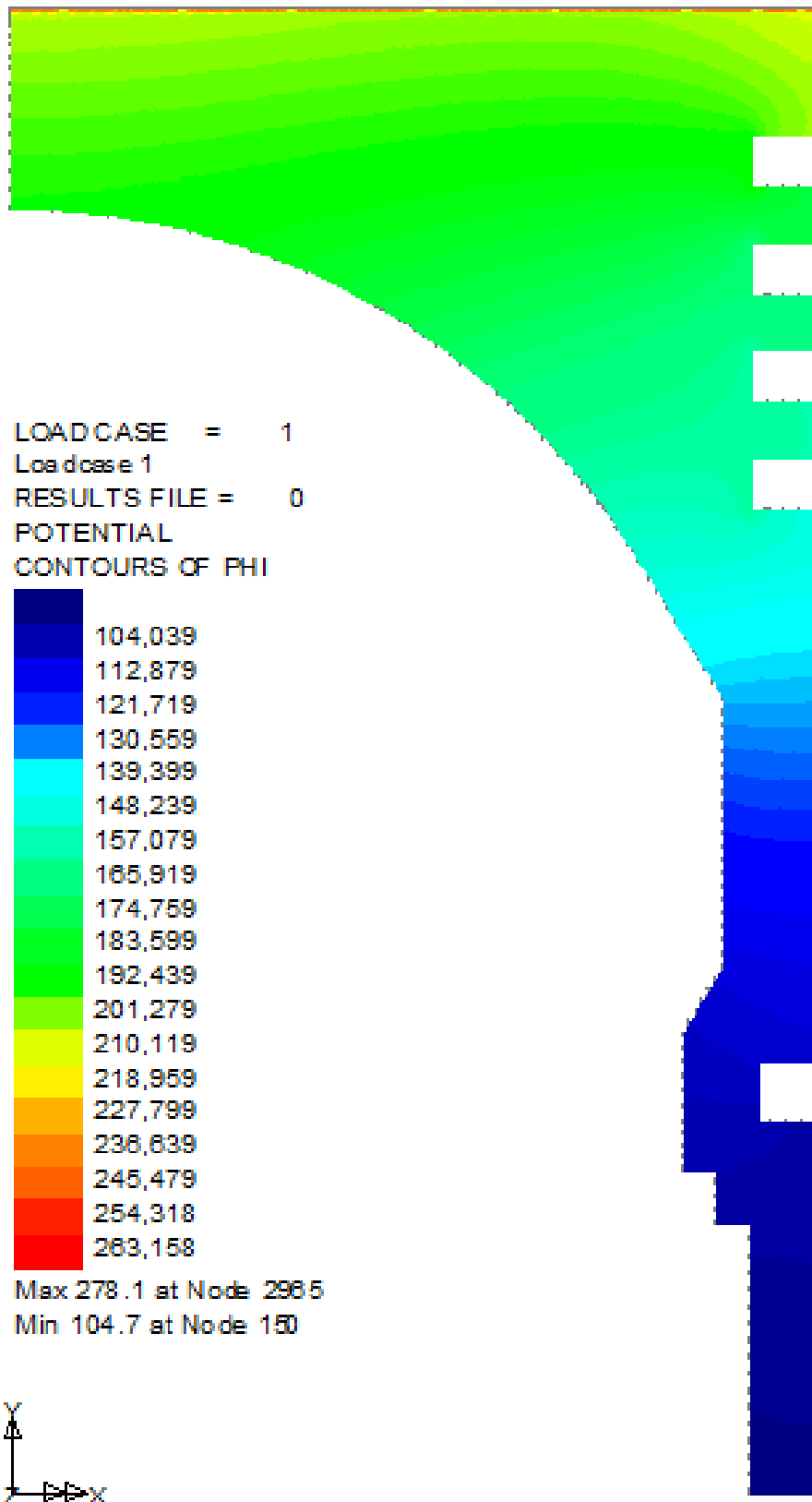
Τα Σχήματα 7.13a, b, c, d, e, f, g, h και i απεικονίζουν το περίγραμμα της συνισταμένης μετατόπισης για την περίπτωση επικάλυψης πάχους 0μm, 300μm, 450μm, 600μm, 750μm, 900μm, 1050μm, 1200μm και 1200μm με αποφλοίωση, αντίστοιχα.

Τα Σχήματα 7.14a, b, c, d, e, f, g, h και i απεικονίζουν το περίγραμμα της τάσης Von Mises για την περίπτωση επικάλυψης πάχους 0μm, 300μm, 450μm, 600μm, 750μm, 900μm, 1050μm, 1200μm και 1200μm με αποφλοίωση, αντίστοιχα.

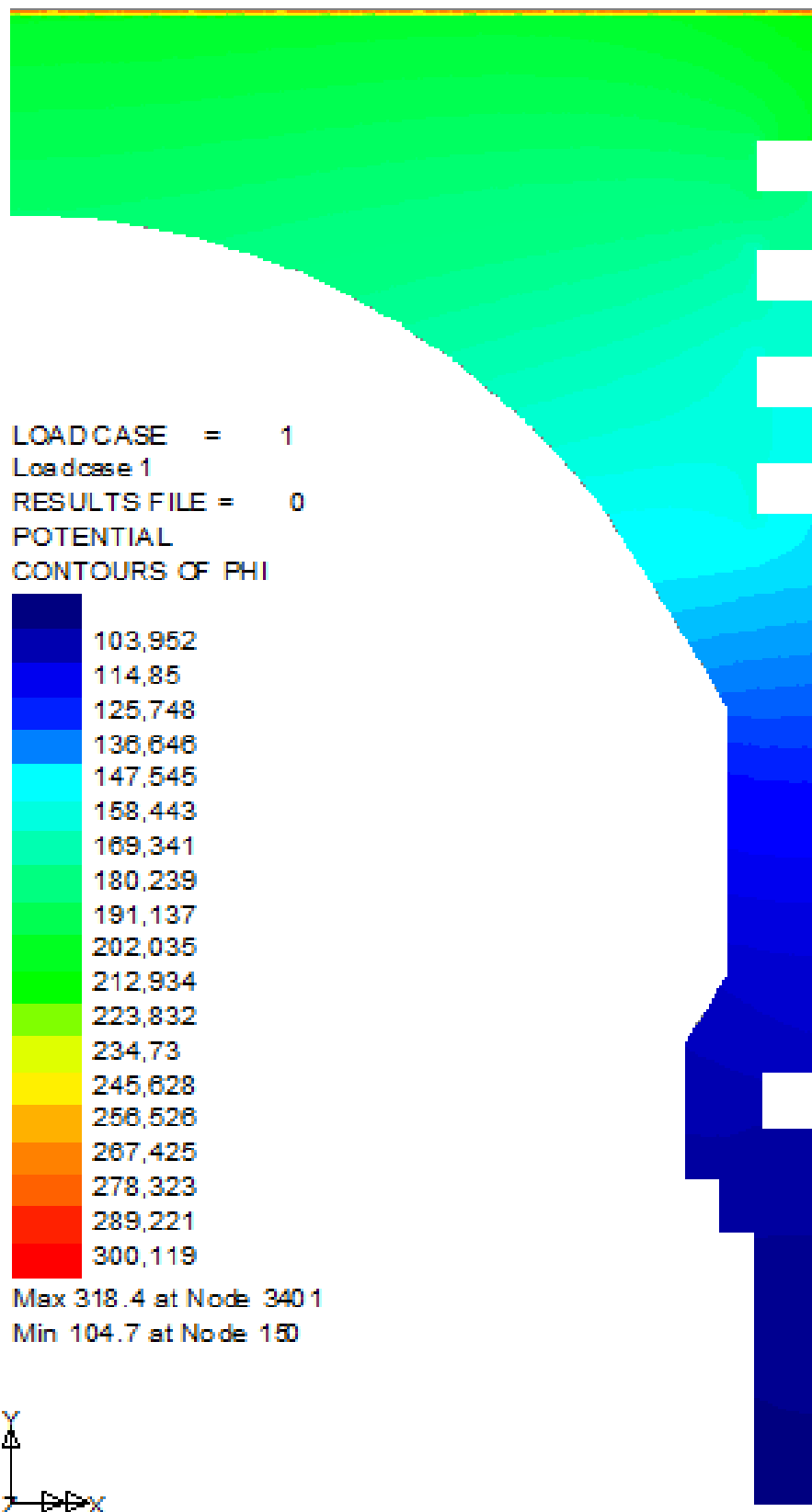
Να τονισθεί στο σημείο αυτό ότι τα περιγράμματα των Σχημάτων 7.13 και 7.14 είναι αποτυπωμένα πάνω στα παραμορφωμένα σώματα. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι μεγεθυμένες 10 φορές για να βοηθηθεί στην αντίληψη ο αναγνώστης.



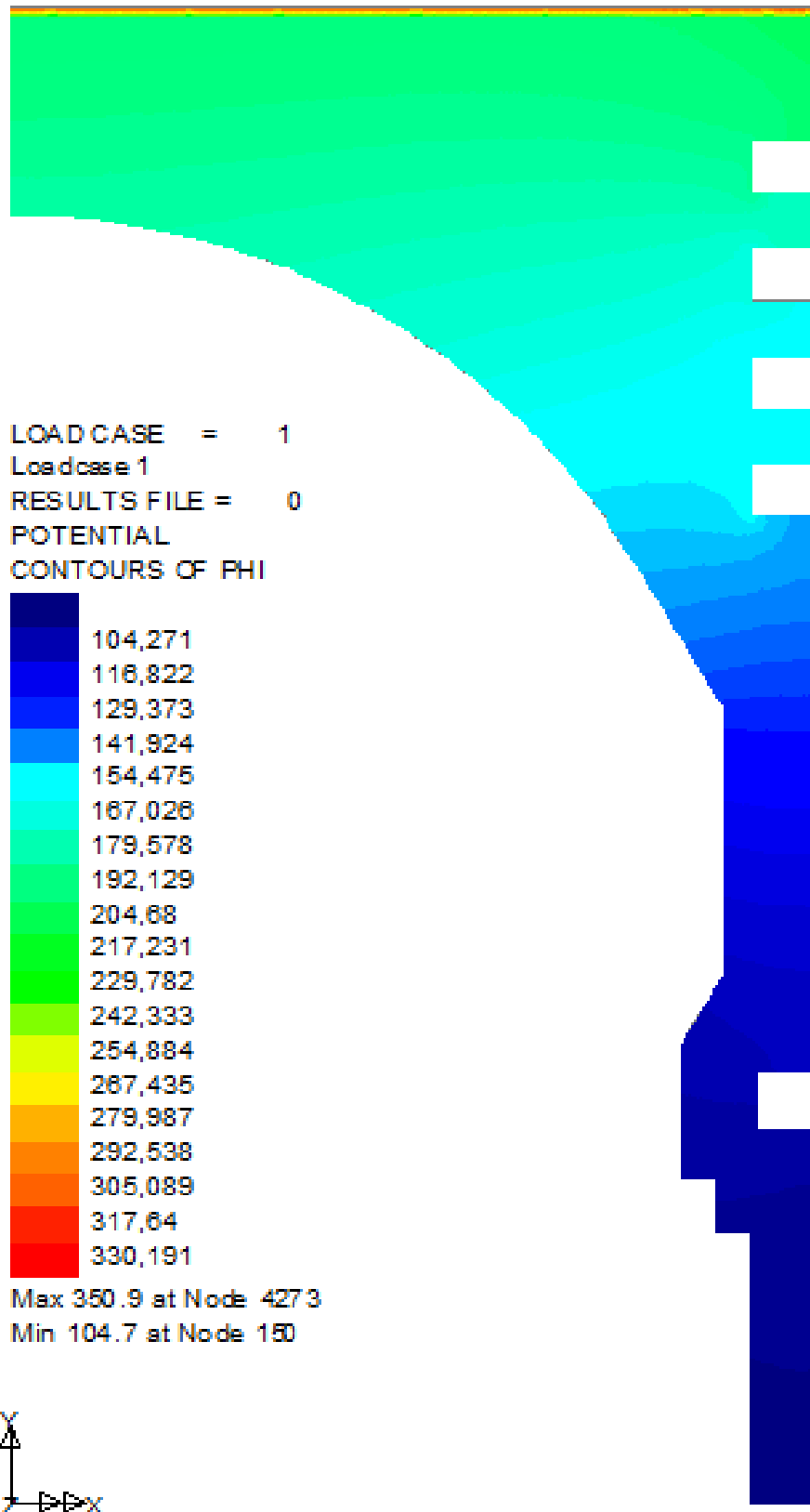
Σχήμα 7.10α: Περιγραφή θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 0$.



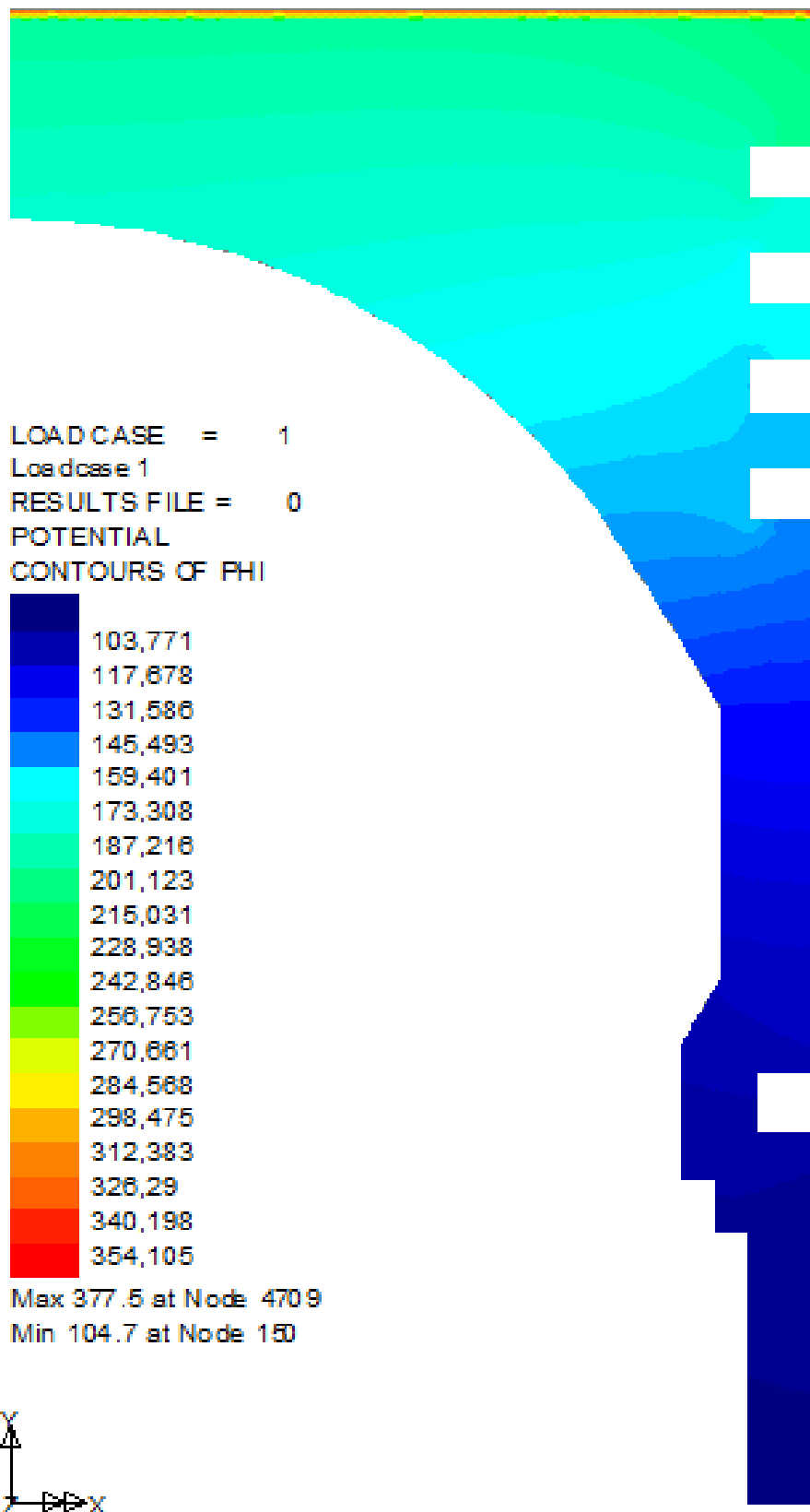
Σχήμα 7.10b: Περίγραμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 300\mu\text{m}$.



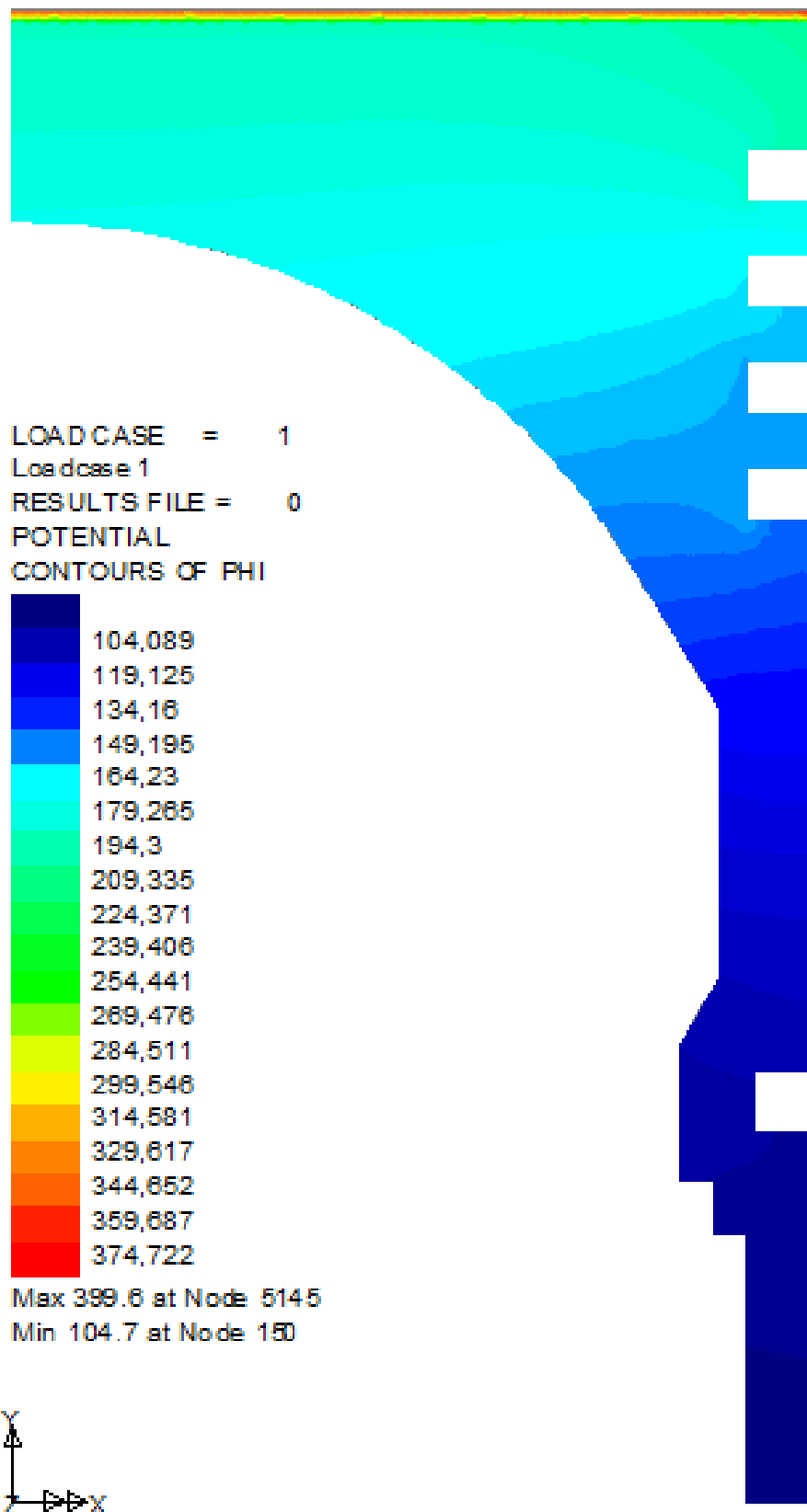
Σχήμα 7.11c: Περίγραμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 450\mu\text{m}$.



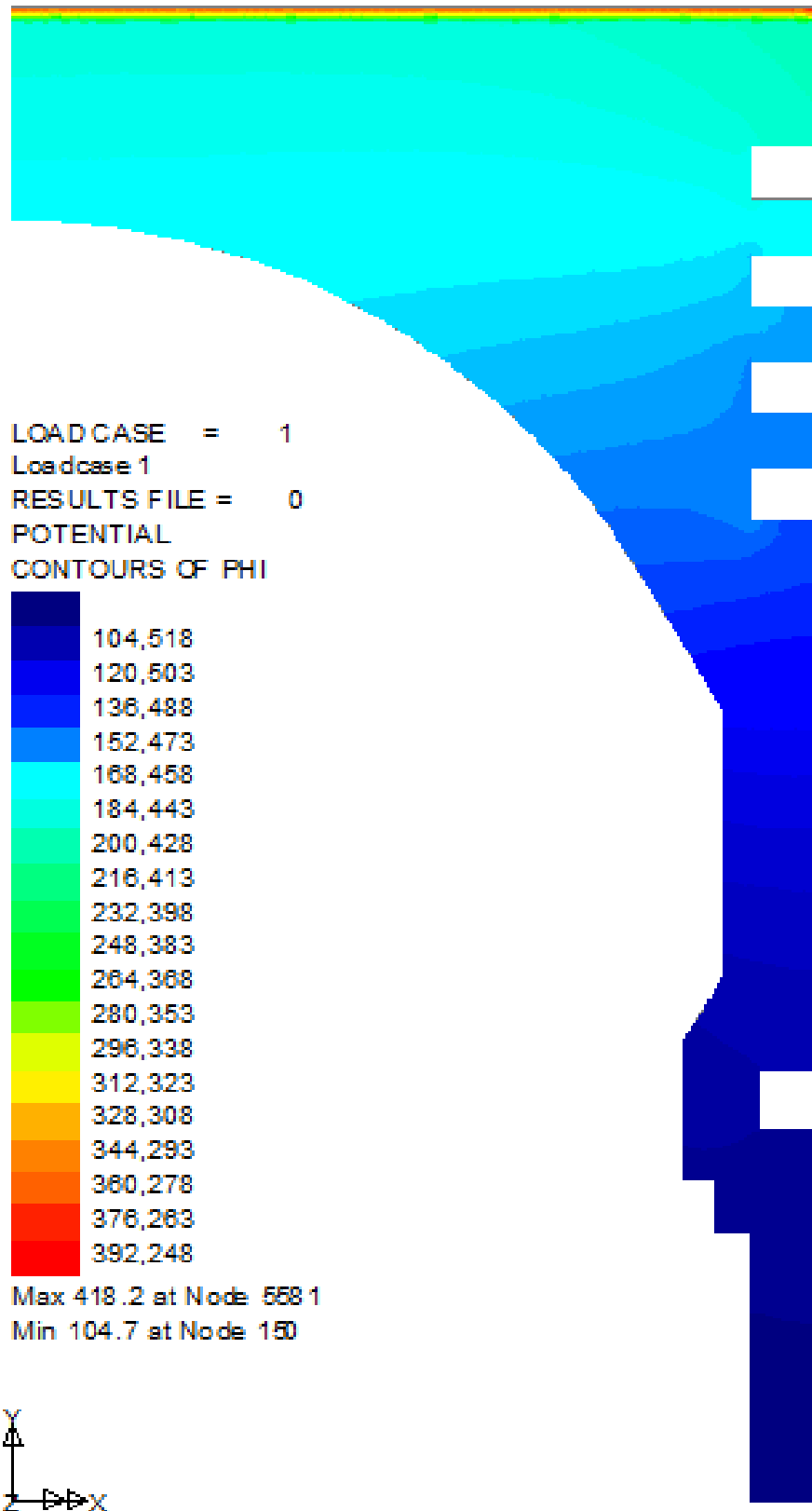
Σχήμα 7.10d: Περίγραμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 600\mu\text{m}$.



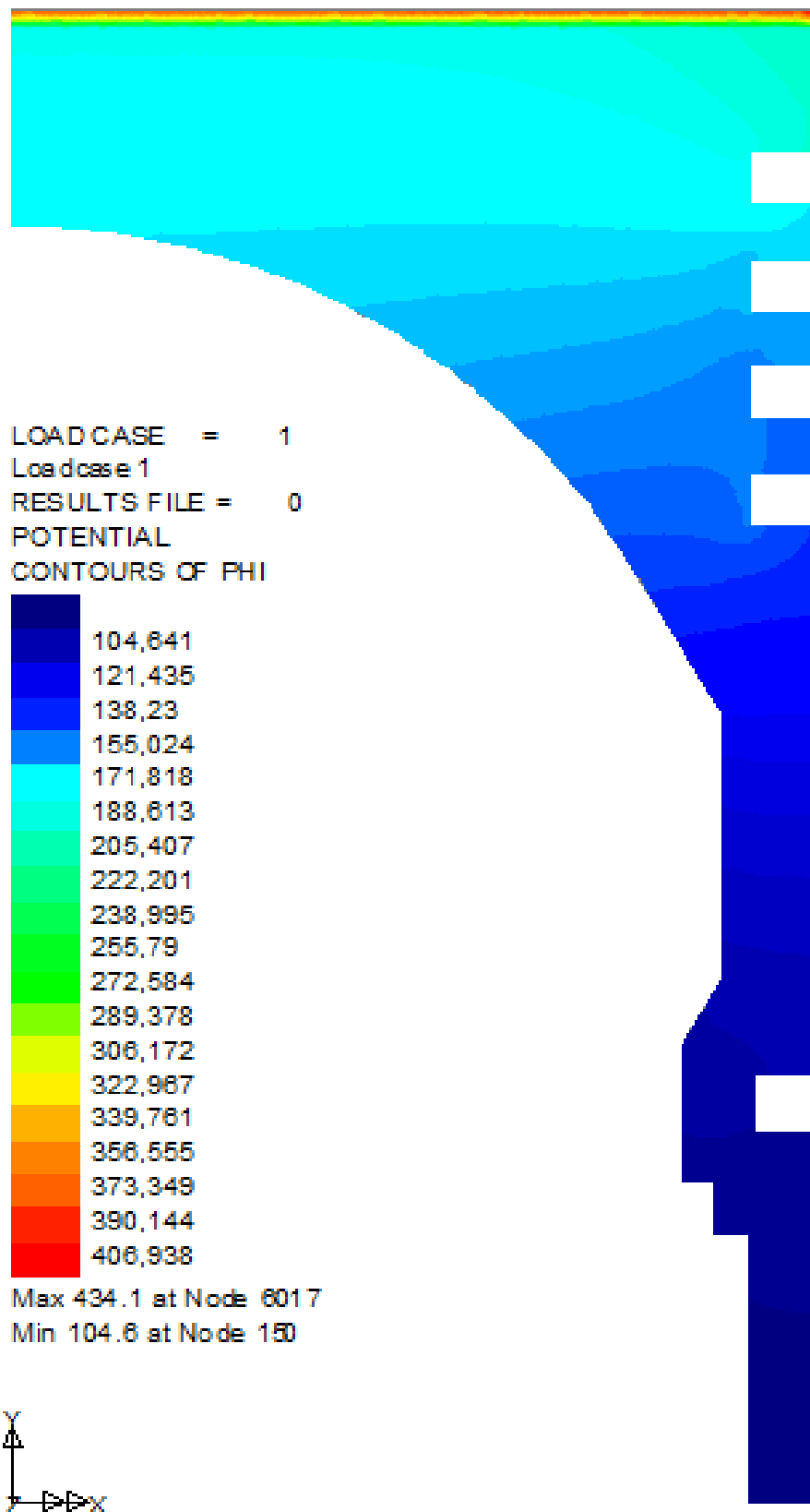
Σχήμα 7.10ε: Περίγραμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 750\mu\text{m}$.



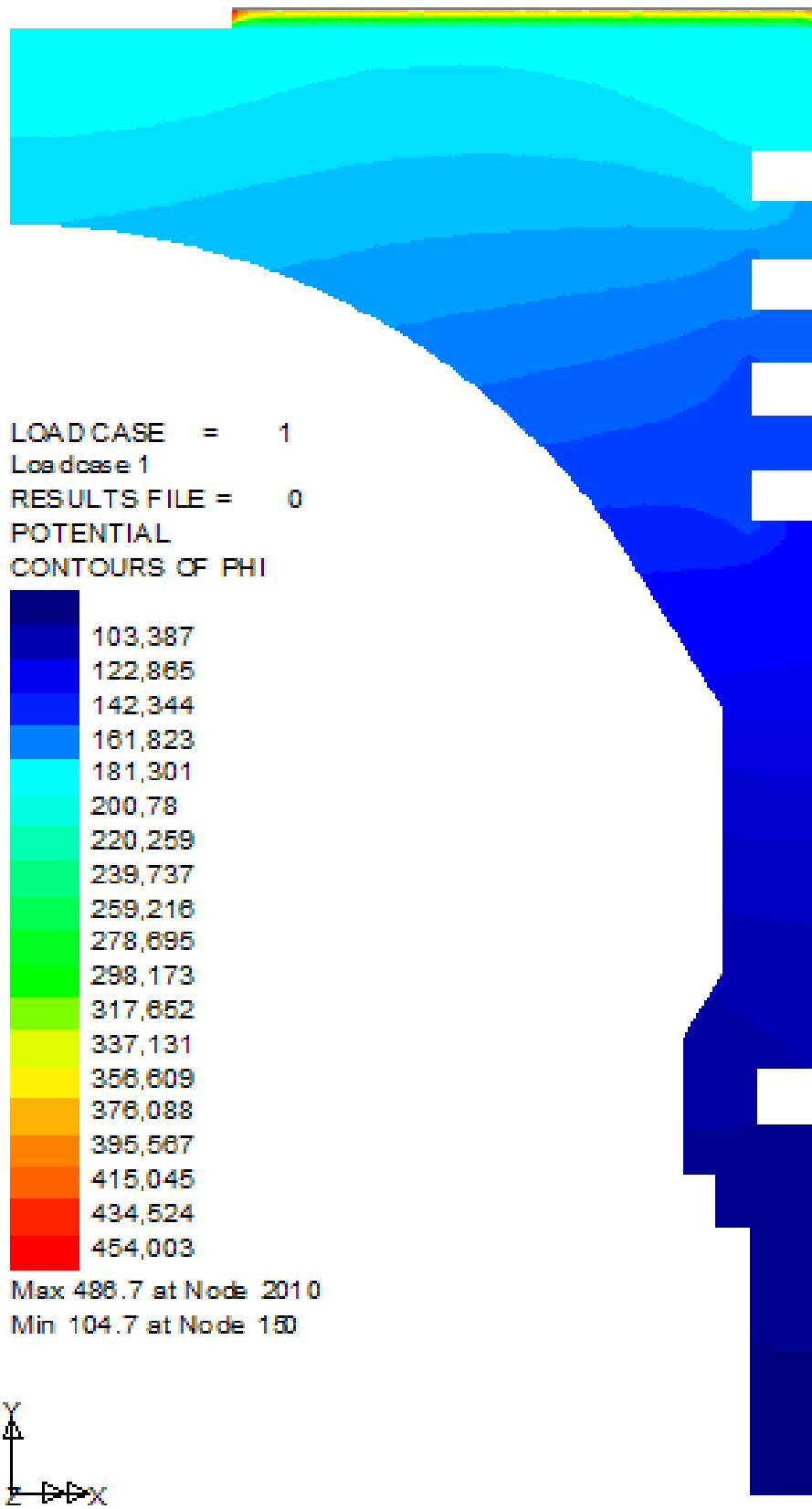
Σχήμα 7.10f: Περιγράμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 900\mu\text{m}$.



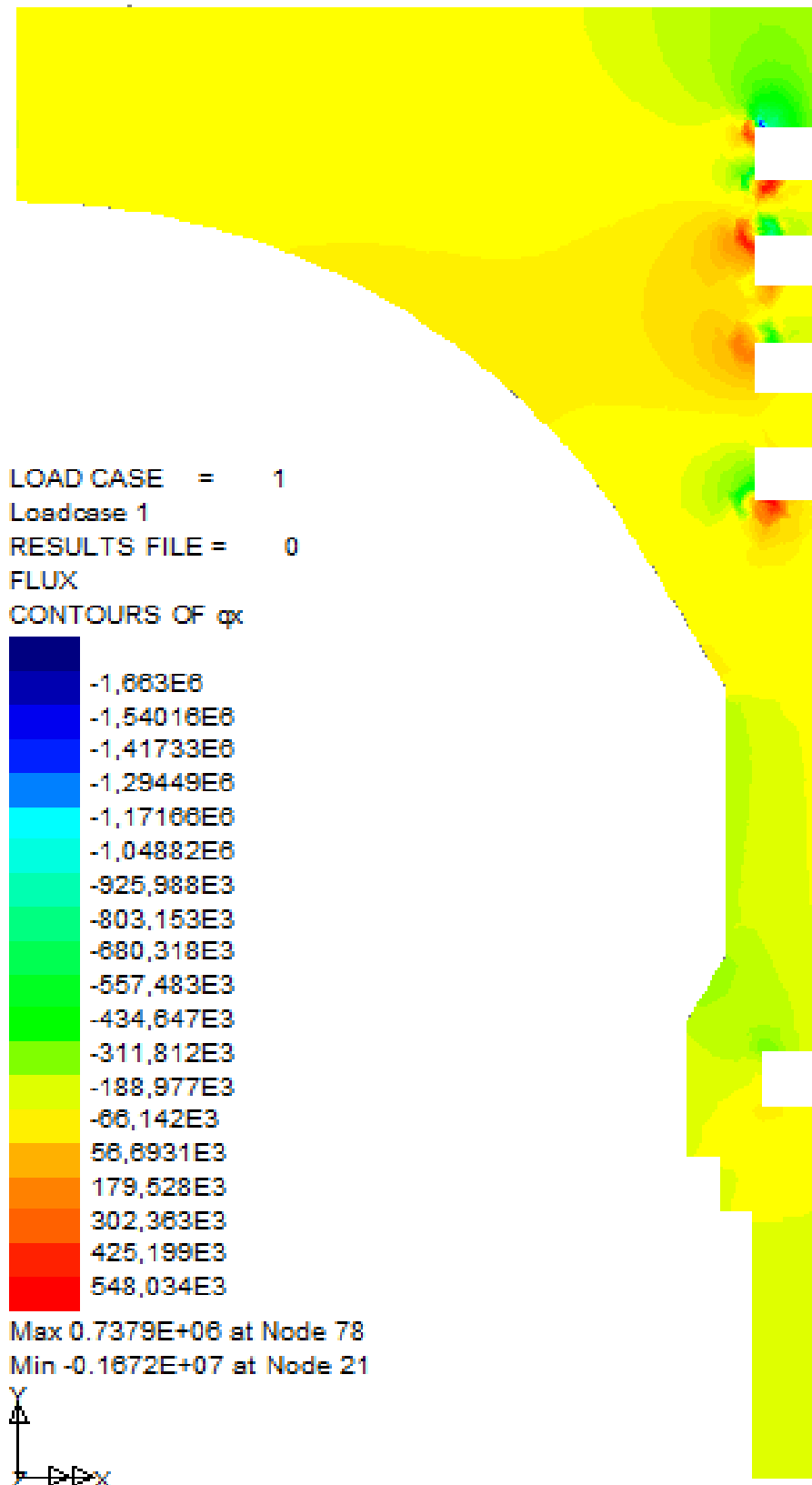
Σχήμα 7.10g: Περίγραμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 1050\mu\text{m}$.



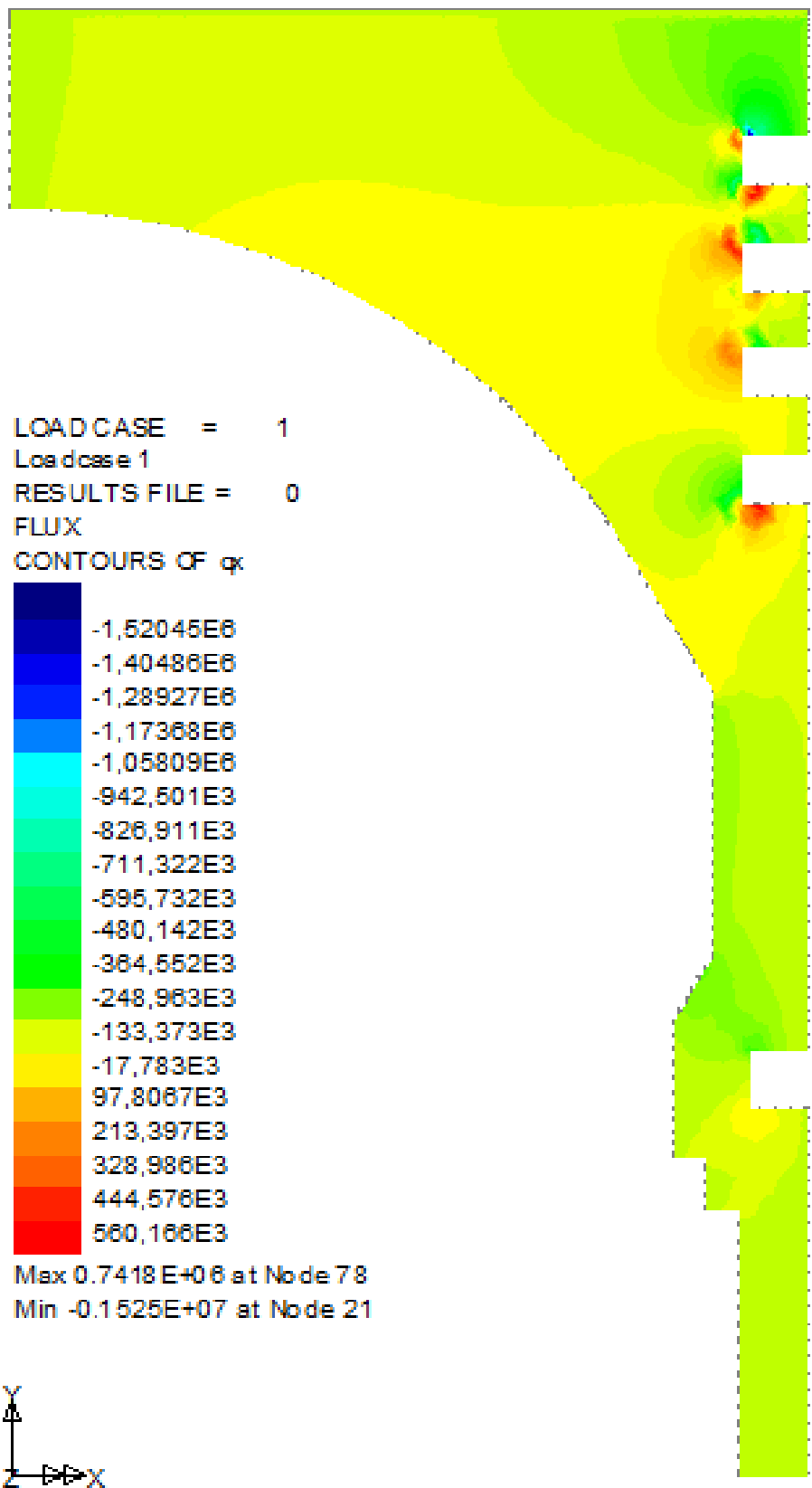
Σχήμα 7.10h: Περίγραμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 1200$.



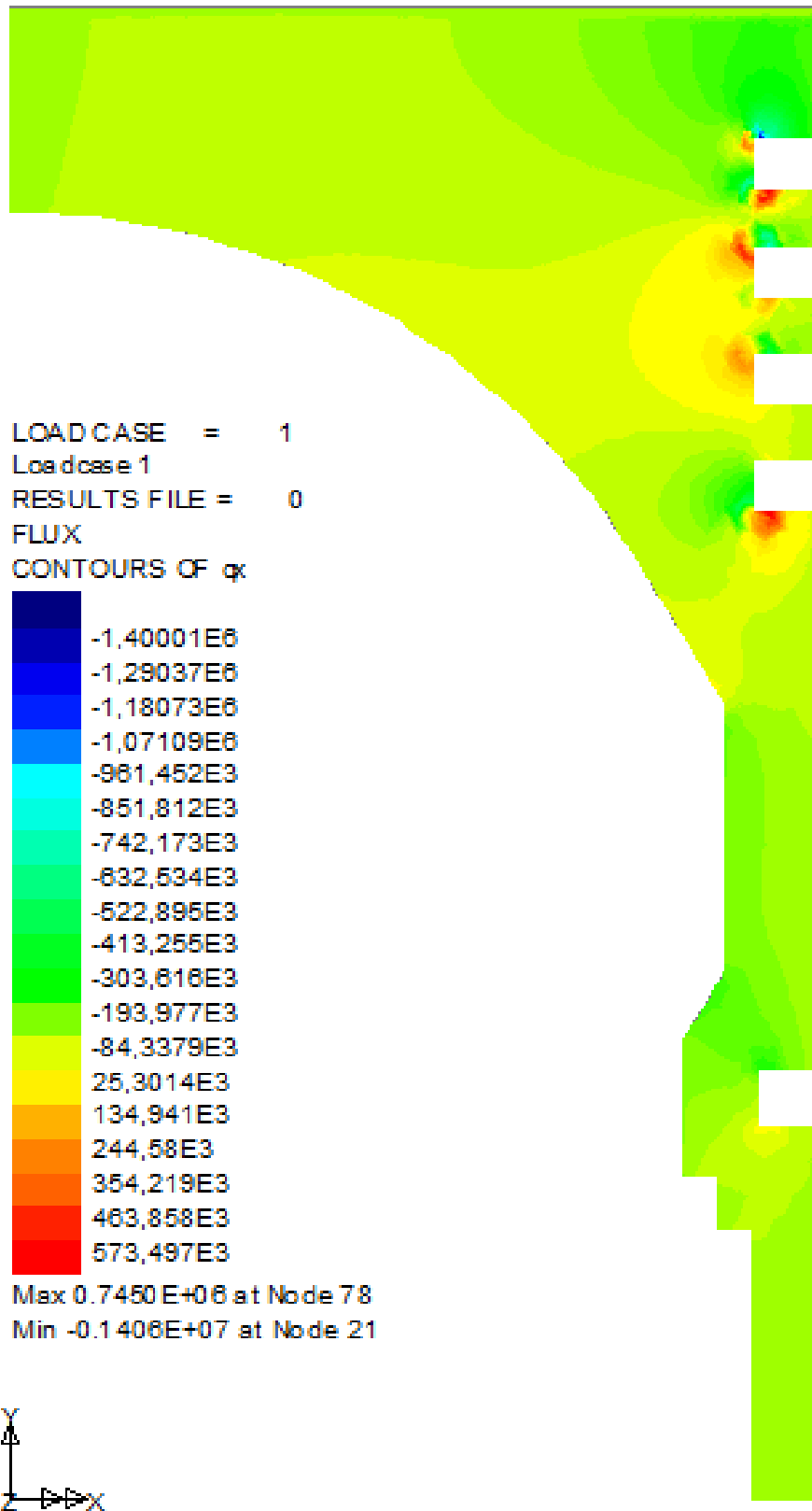
Σχήμα 7.10i: Περίγραμμα θερμοκρασίας για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$ και αποφλοίωση.



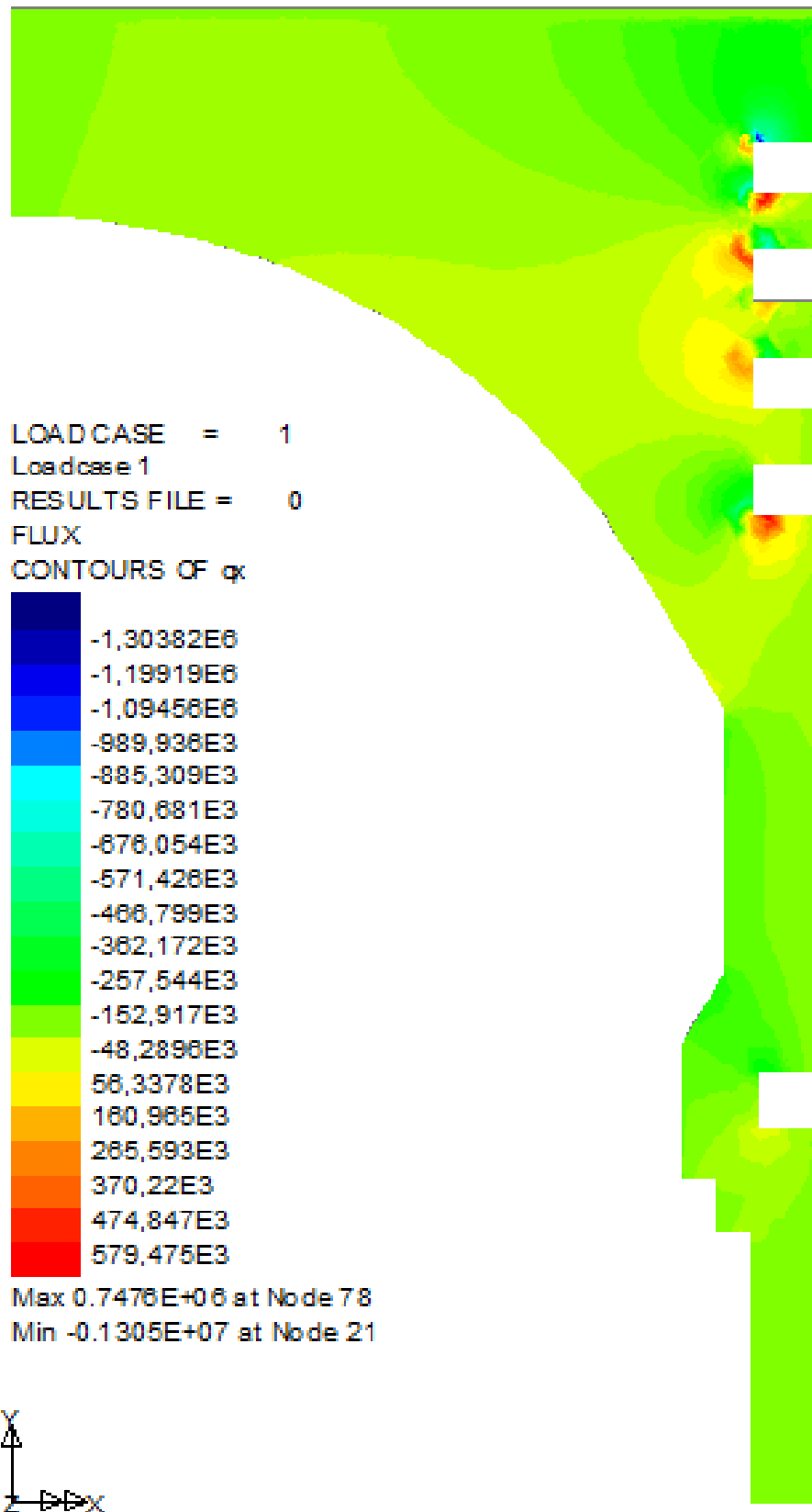
Σχήμα 7.11a: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 0$.



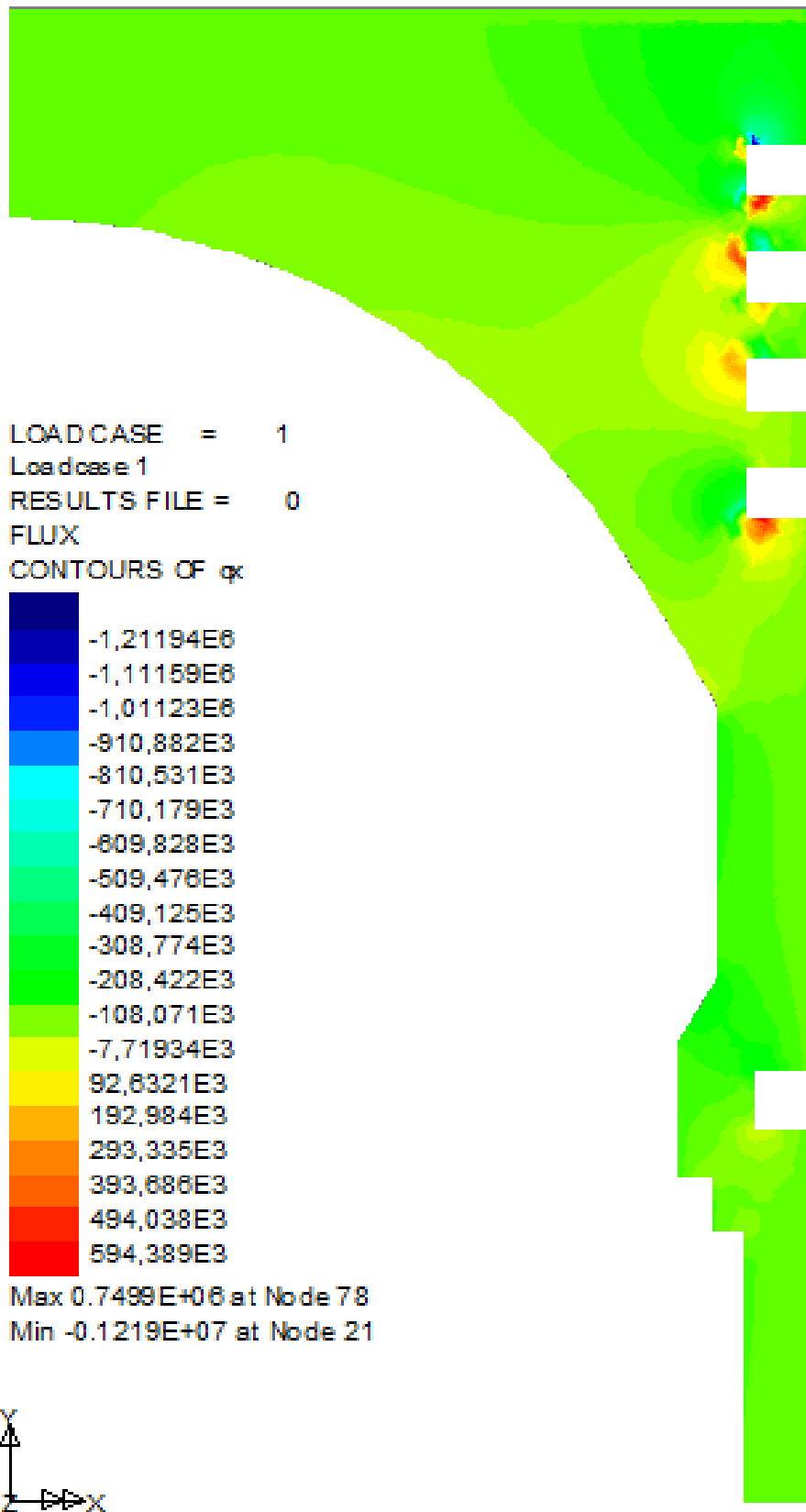
Σχήμα 7.11b: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 300\mu\text{m}$.



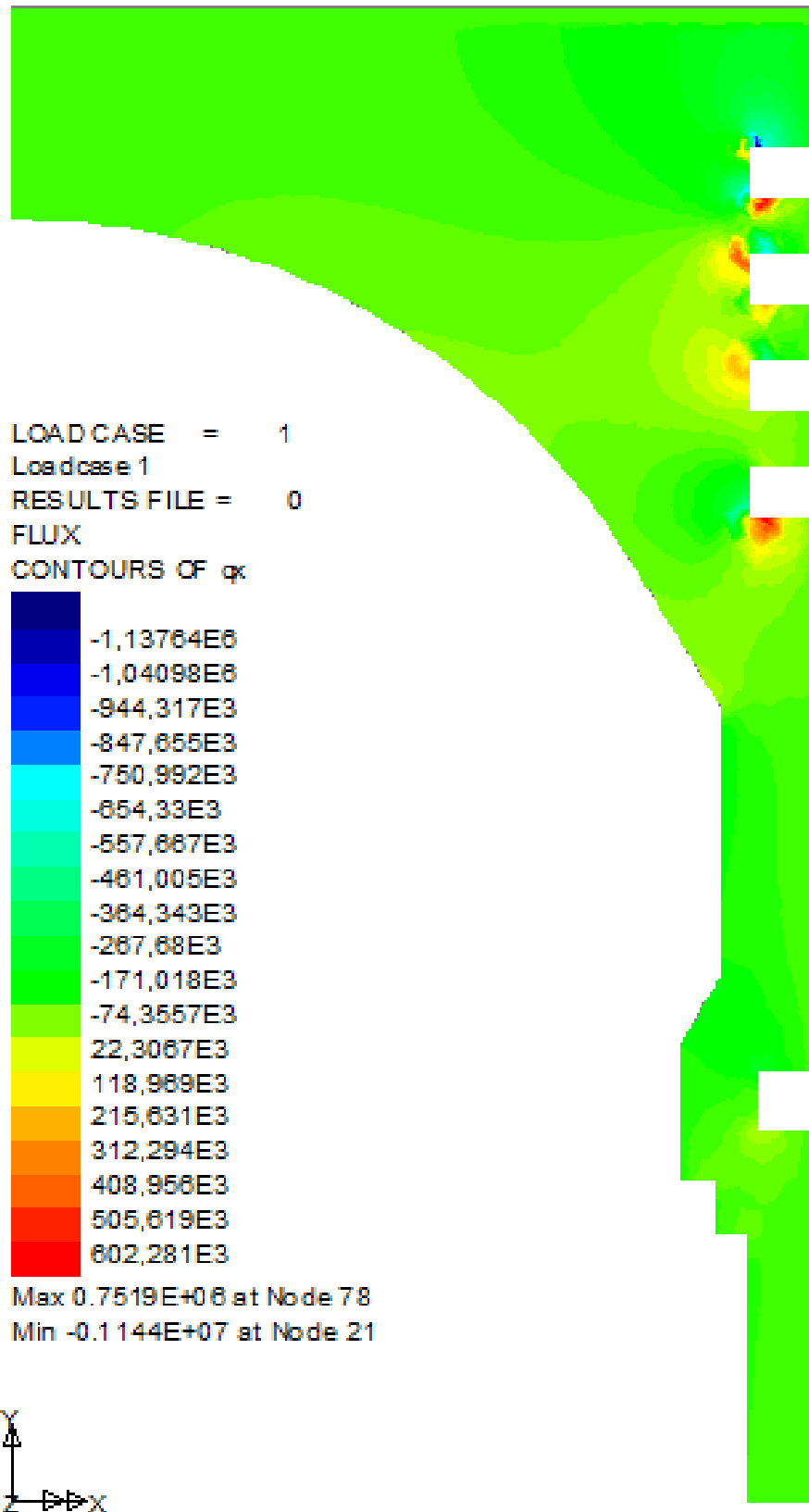
Σχήμα 7.11c: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 450\mu\text{m}$.



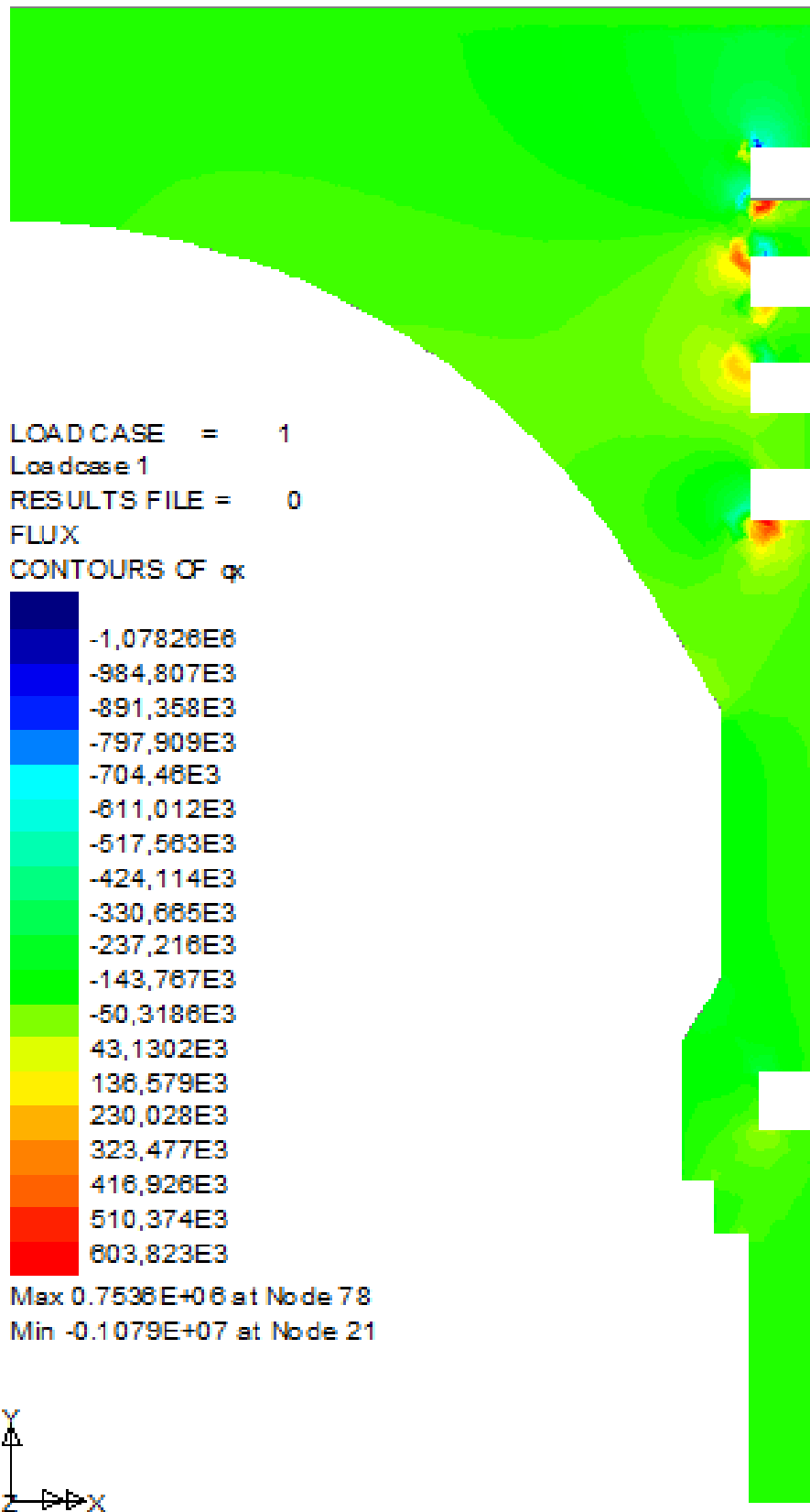
Σχήμα 7.11d: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 600\mu\text{m}$.



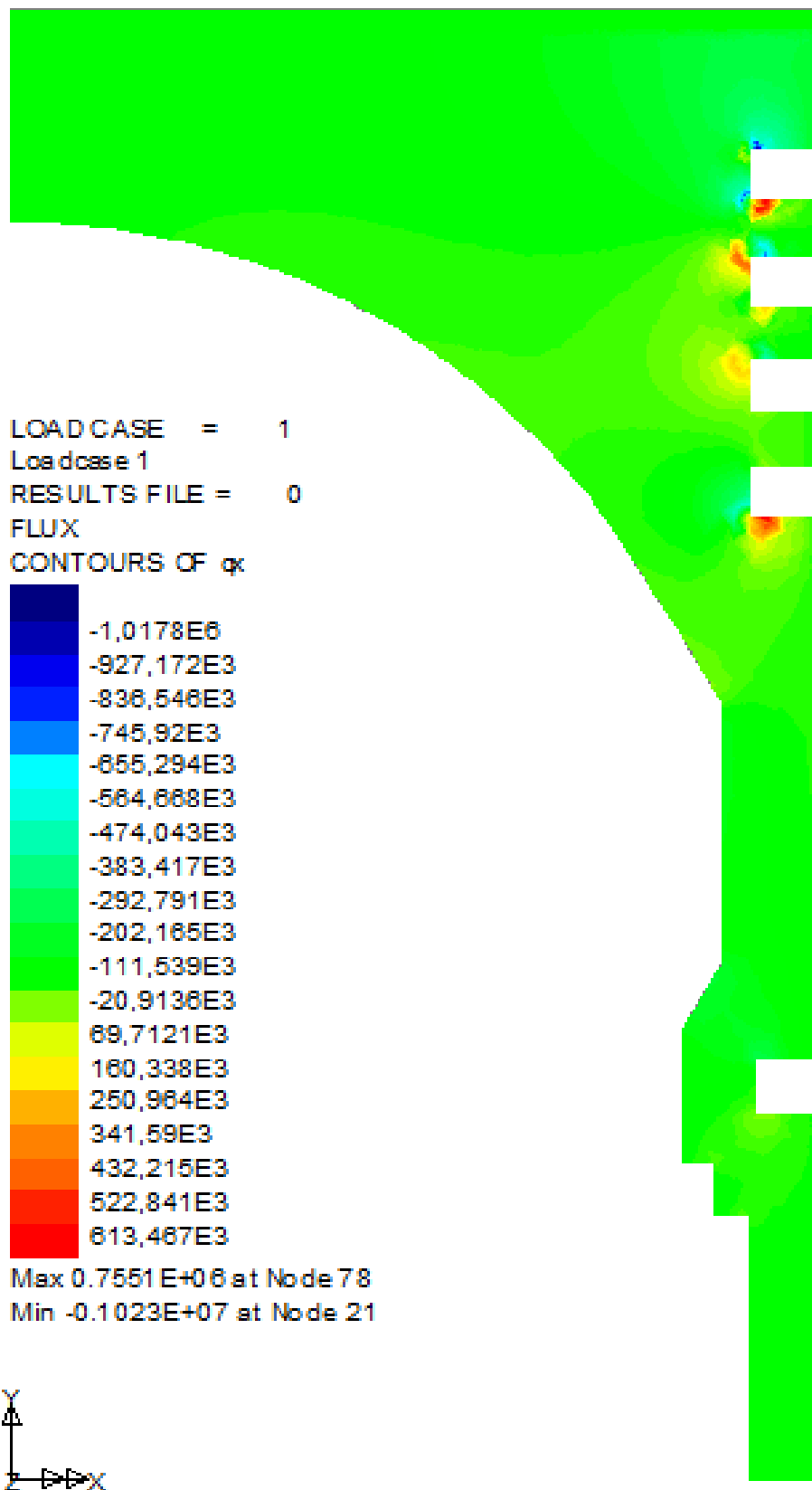
Σχήμα 7.11e: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 750\mu\text{m}$.



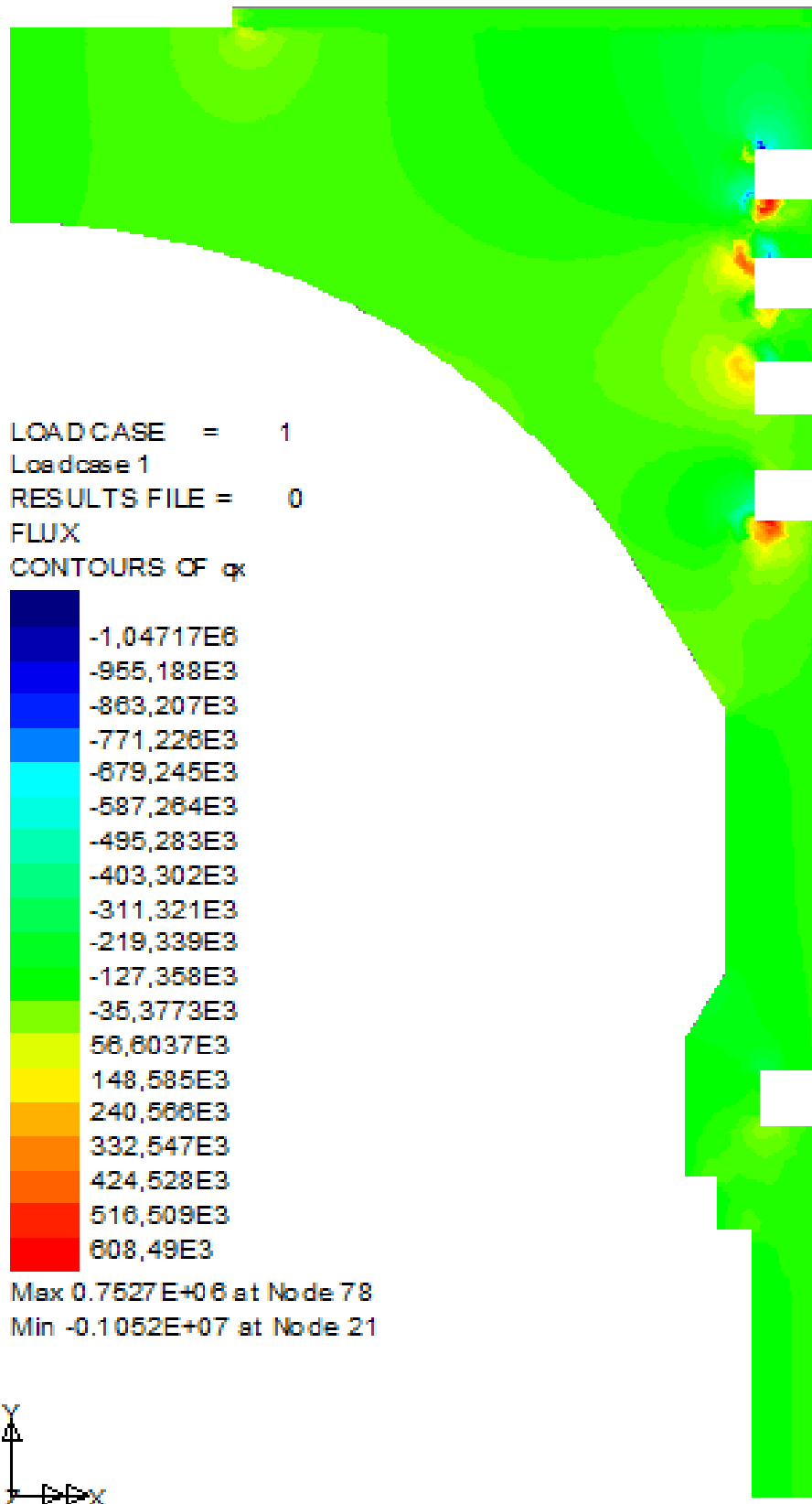
Σχήμα 7.11f: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 900\mu\text{m}$.



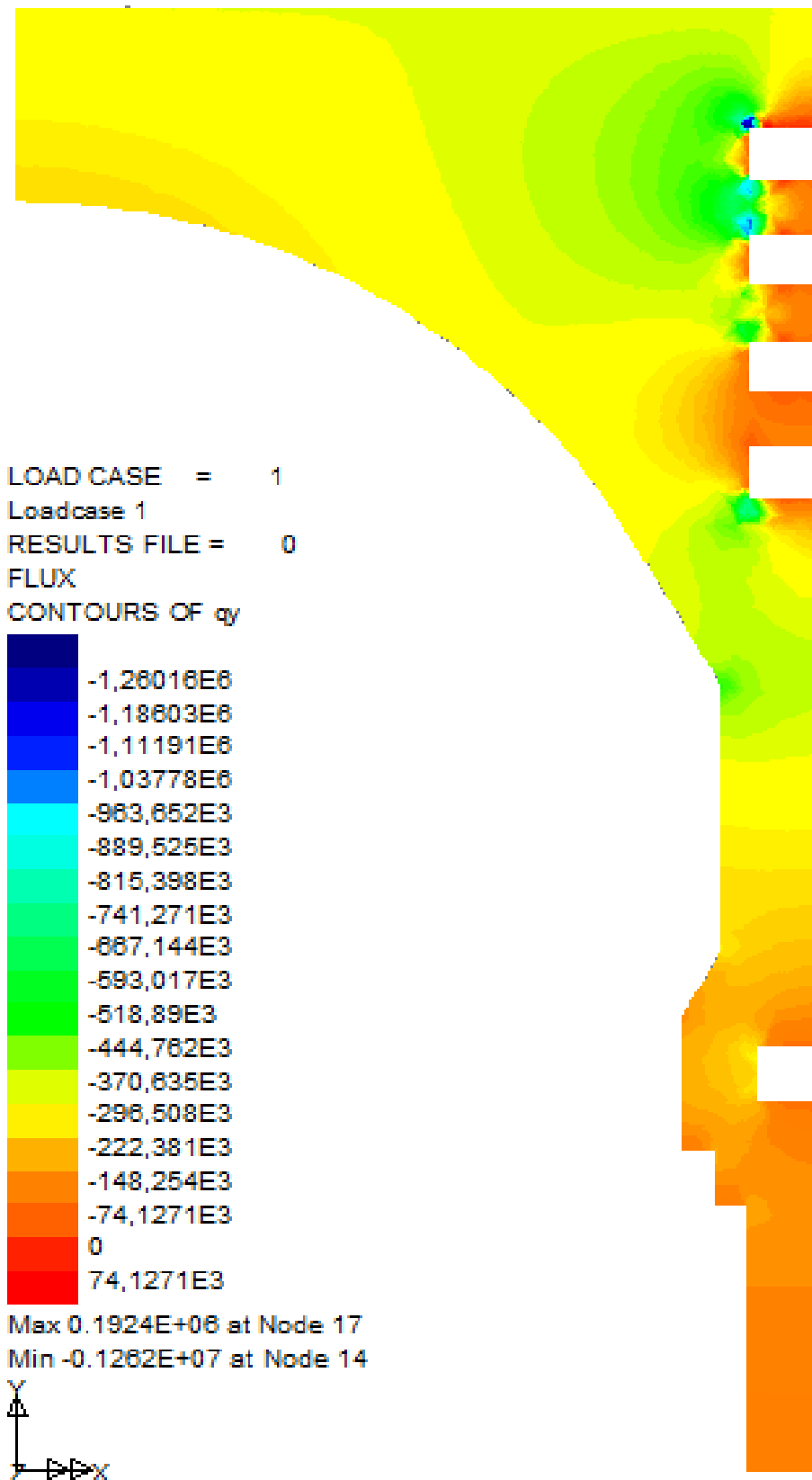
Σχήμα 7.11g: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 1050\mu\text{m}$.



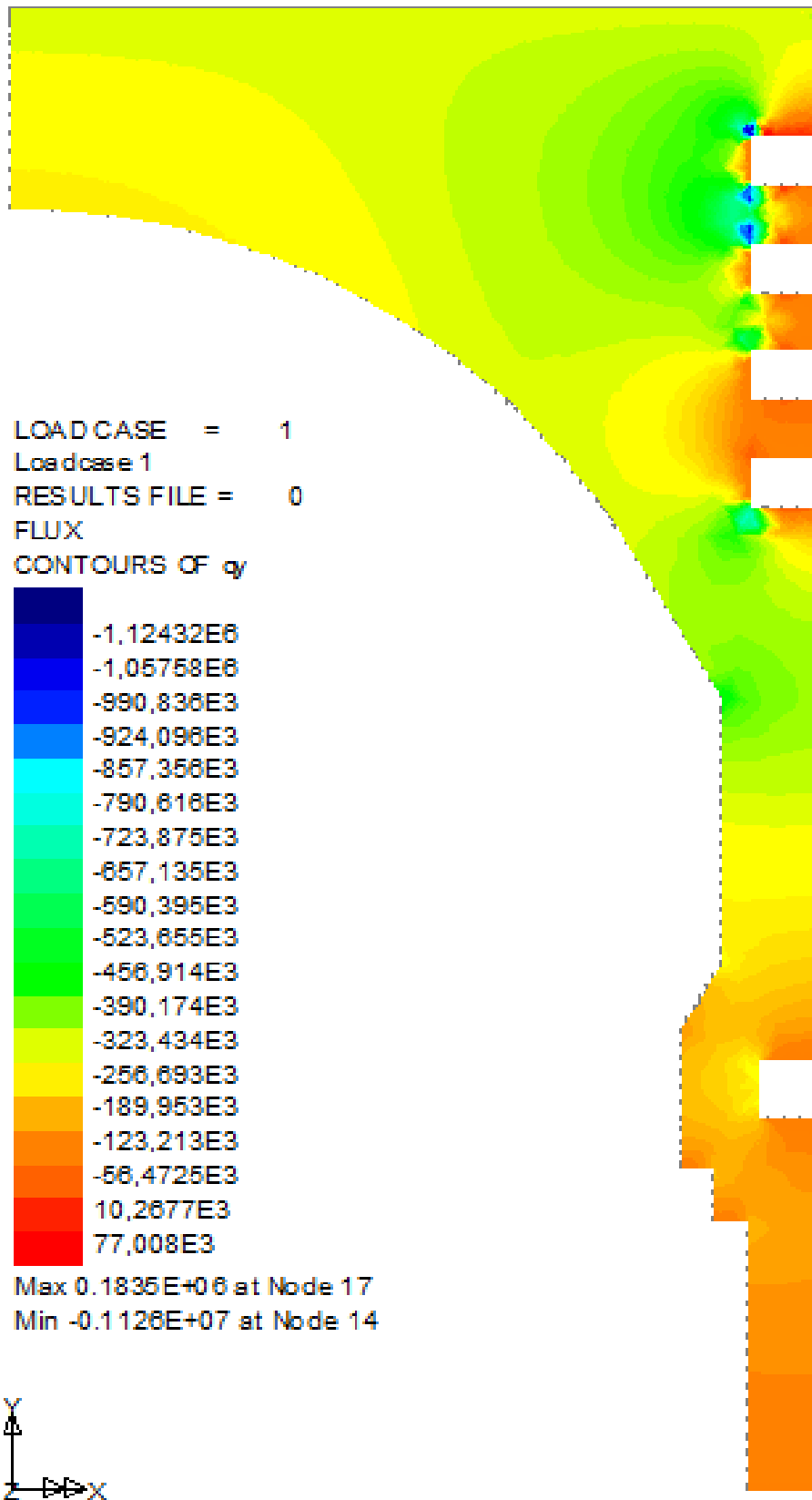
Σχήμα 7.11h: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$.



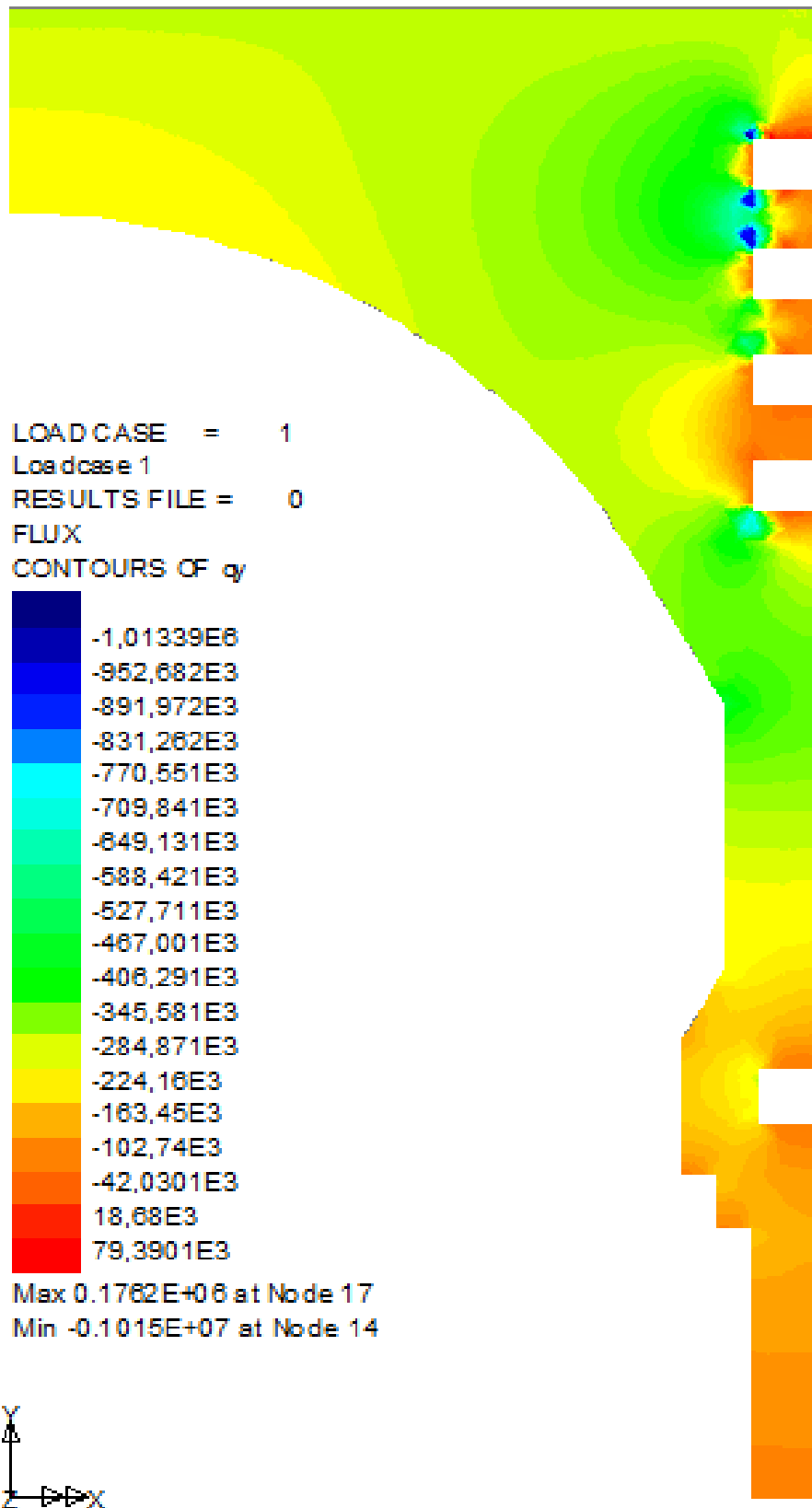
Σχήμα 7.11i: Περίγραμμα οριζόντιας θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$ και αποφλοίωση



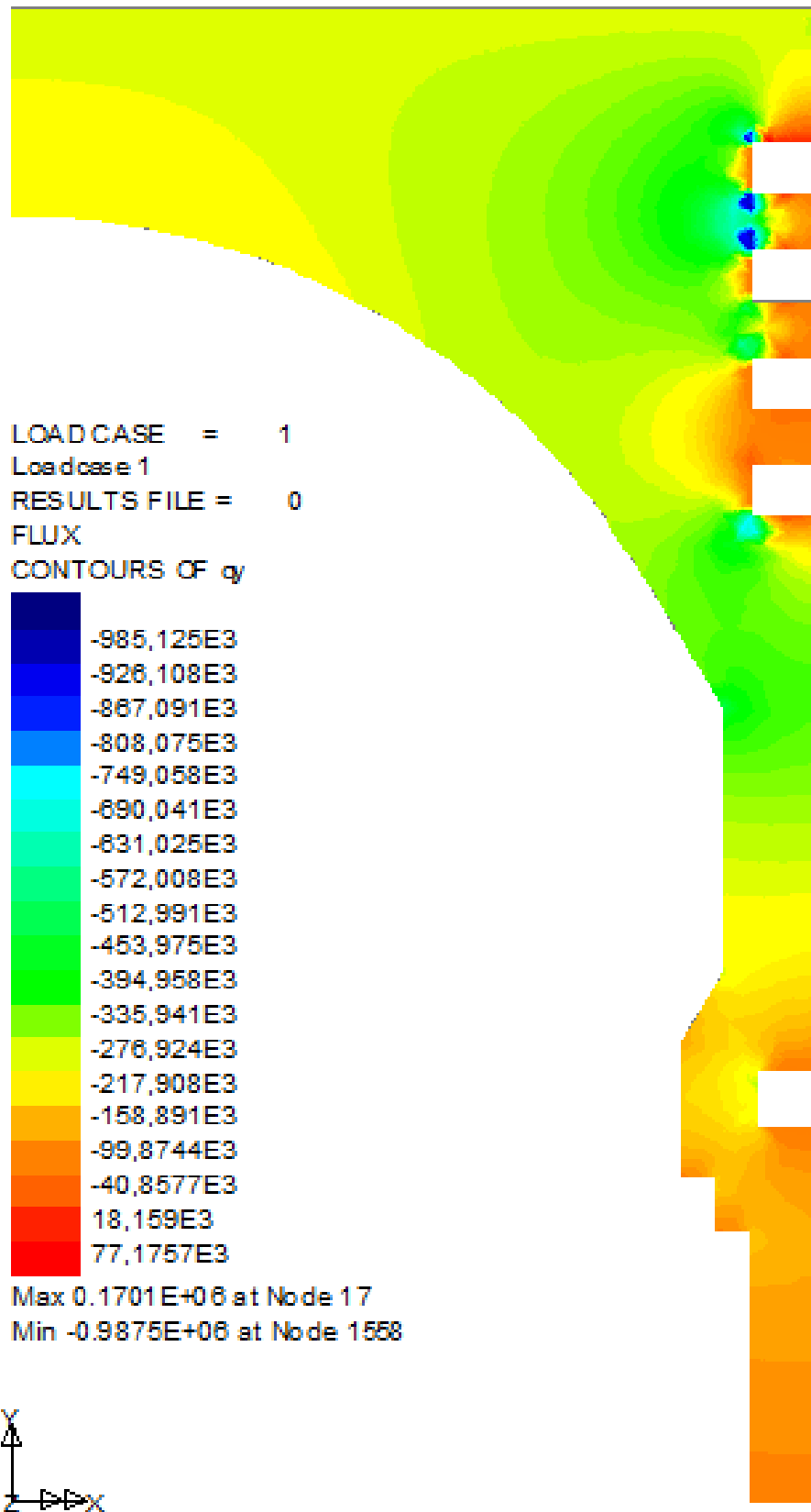
Σχήμα 7.12a: Περιγράμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 0$.



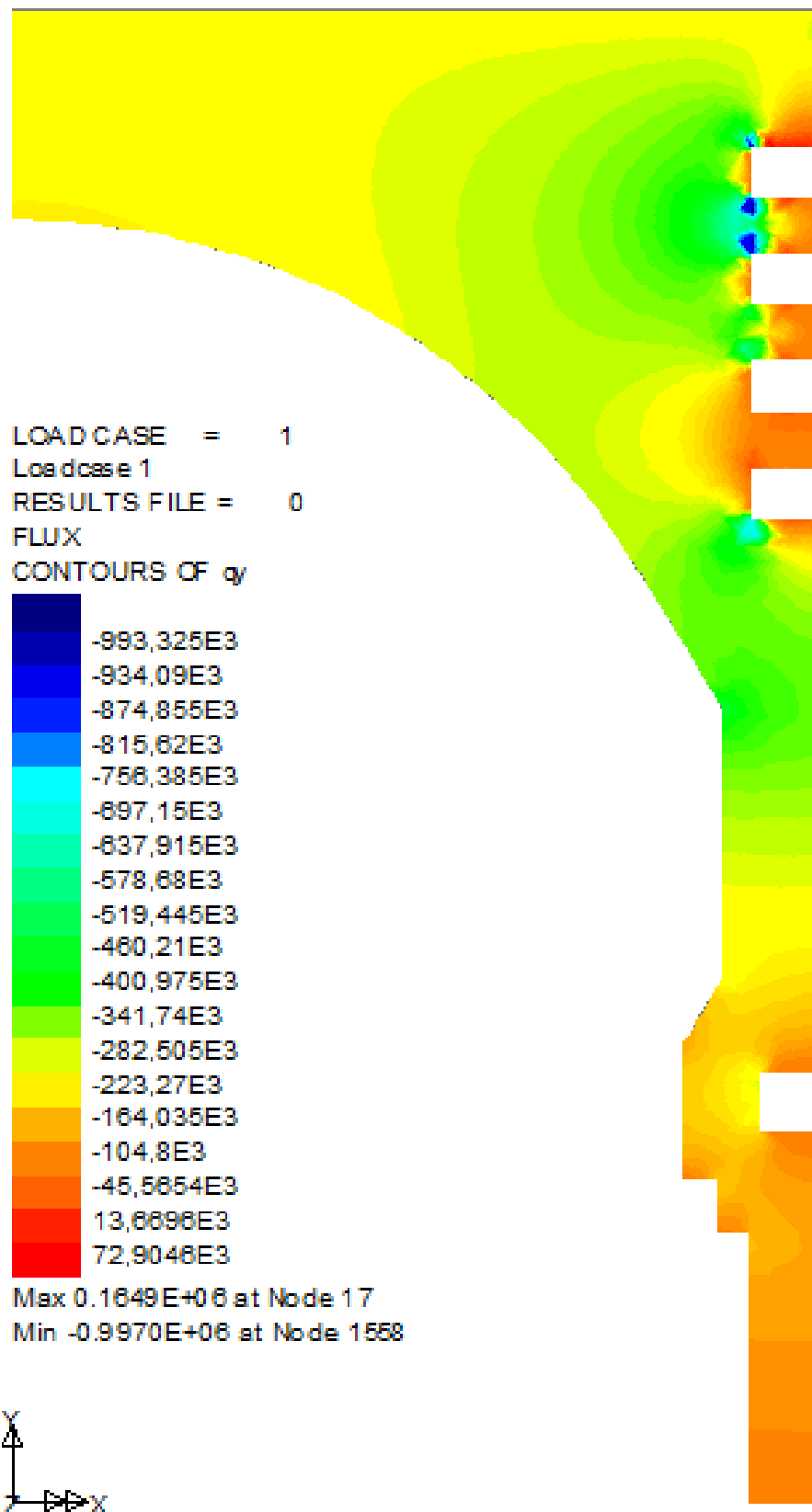
Σχήμα 7.12b: Περίγραμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 300\mu\text{m}$.



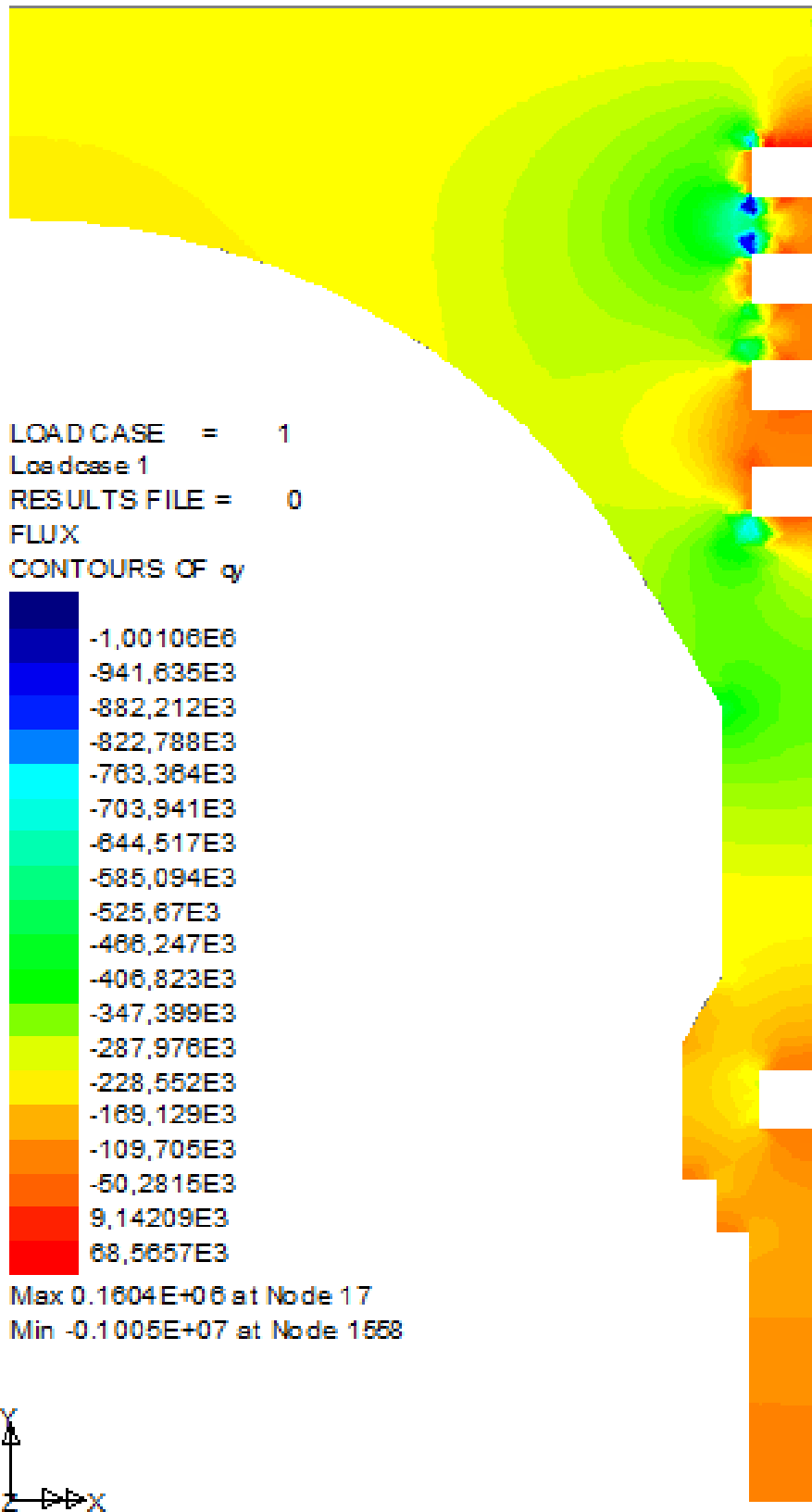
Σχήμα 7.12c: Περιγράμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 450\mu\text{m}$.



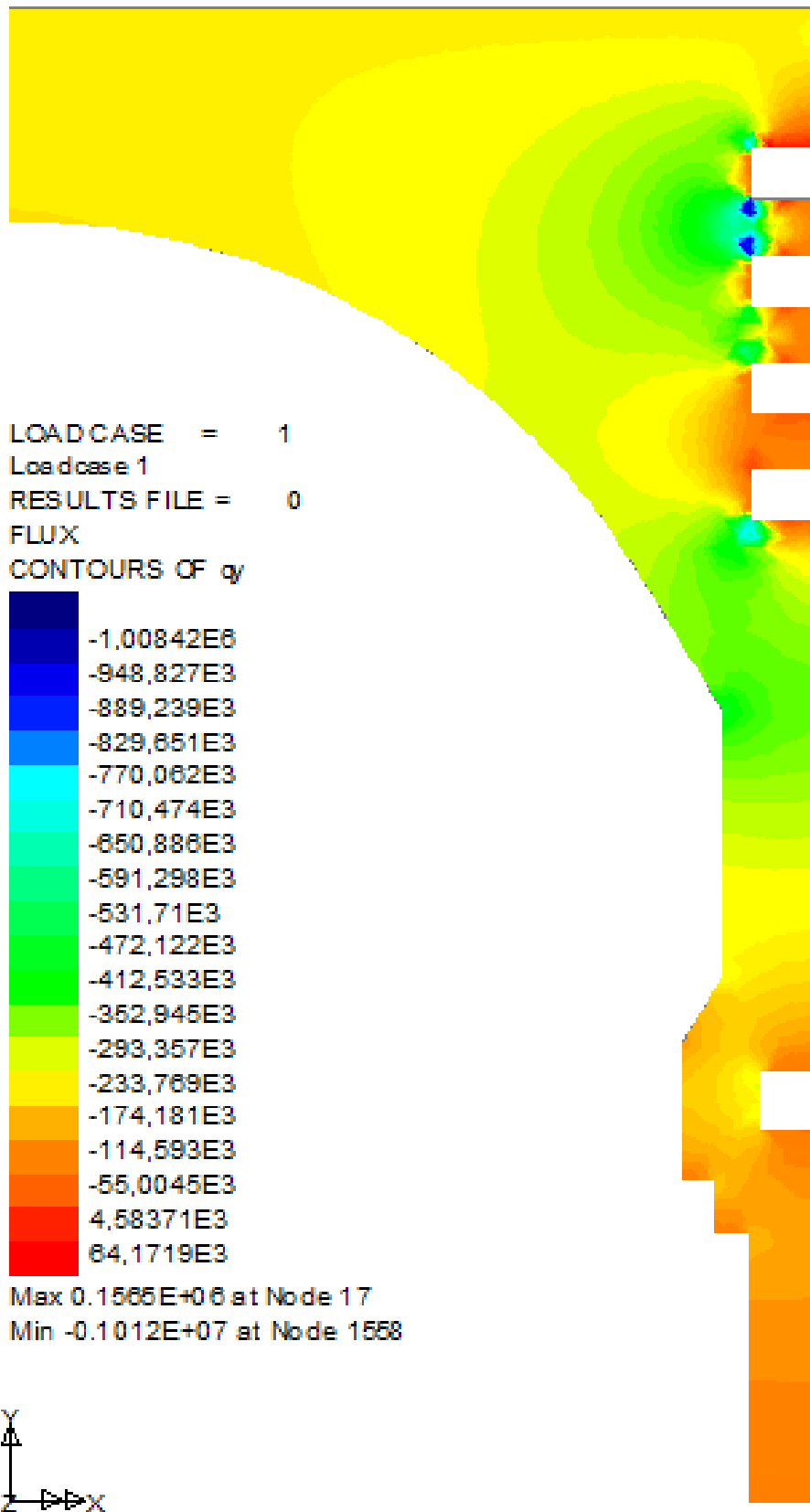
Σχήμα 7.12d: Περιγραφή κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 600\mu\text{m}$.



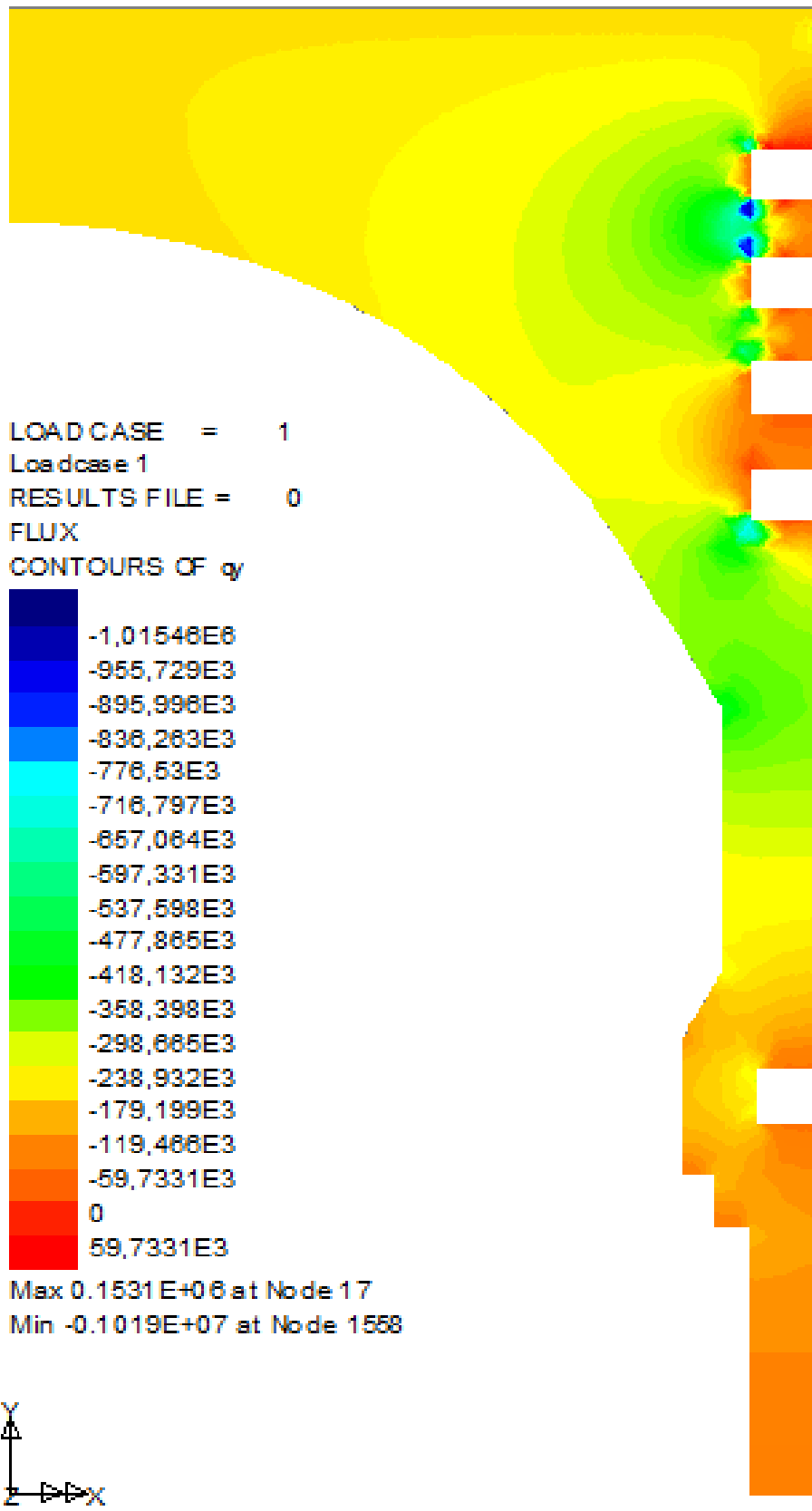
Σχήμα 7.12e: Περιγράμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 750\mu\text{m}$.



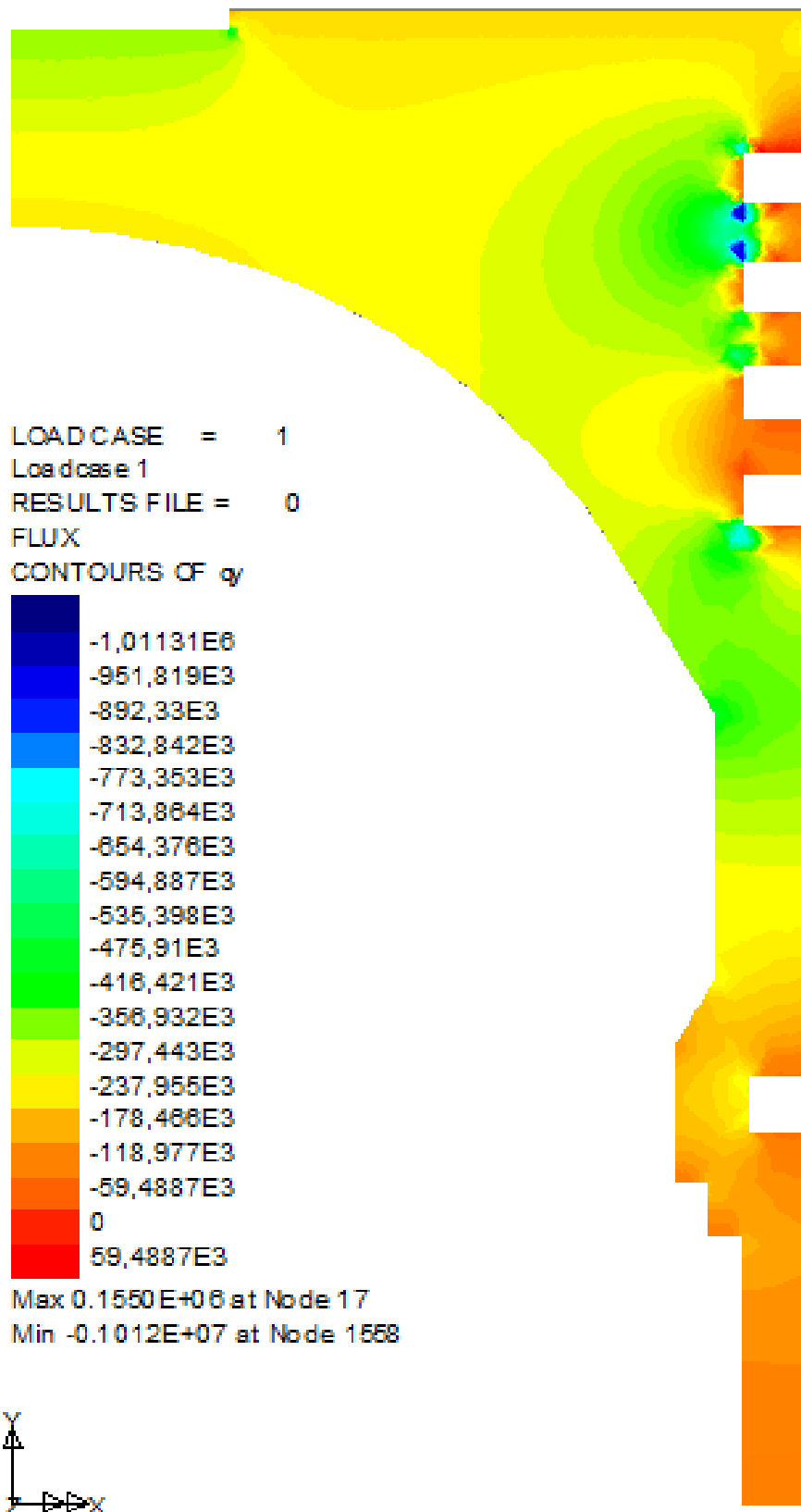
Σχήμα 7.12f: Περίγραμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 900\mu\text{m}$.



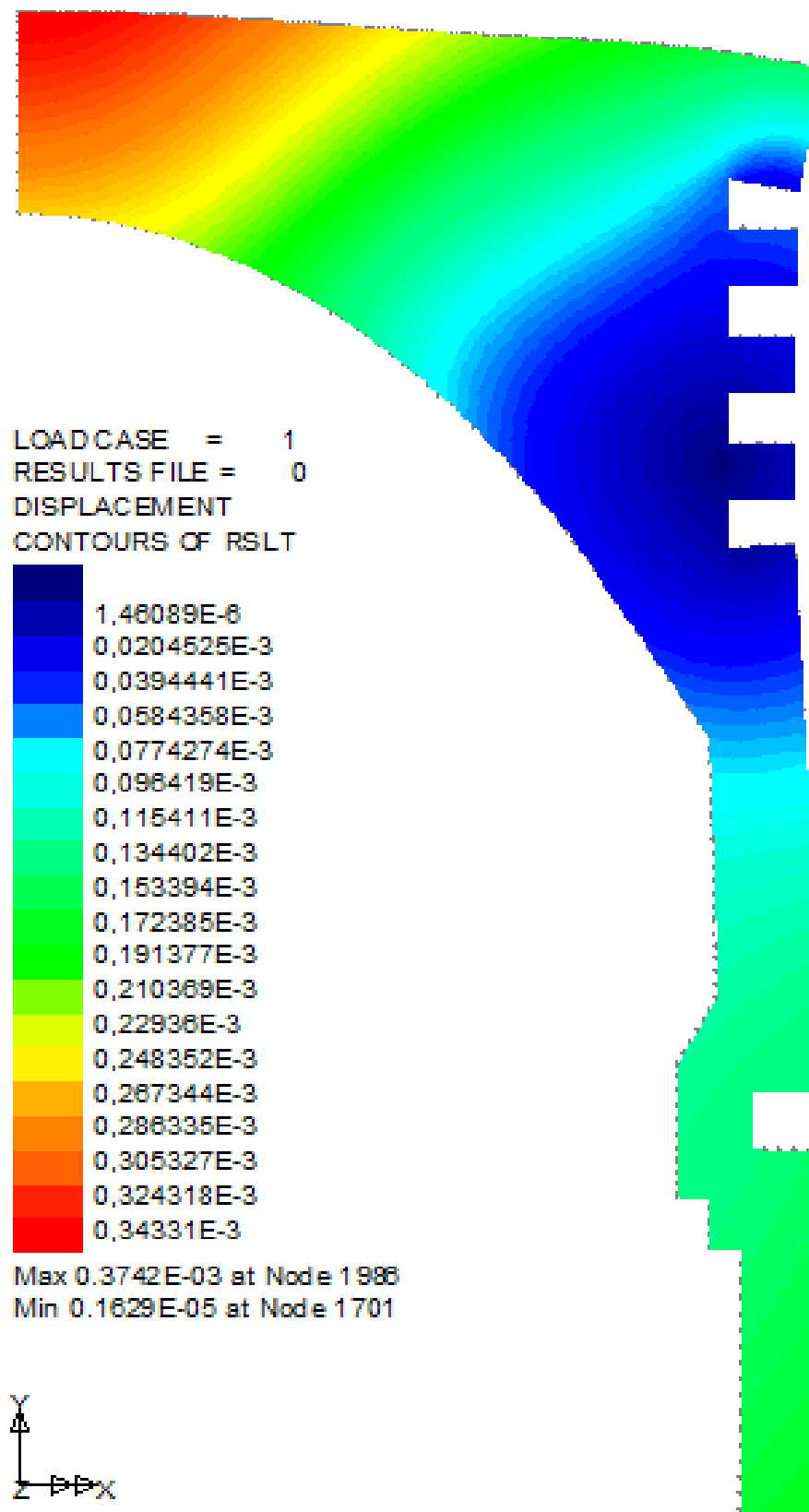
Σχήμα 7.12g: Περίγραμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 1050\mu\text{m}$.



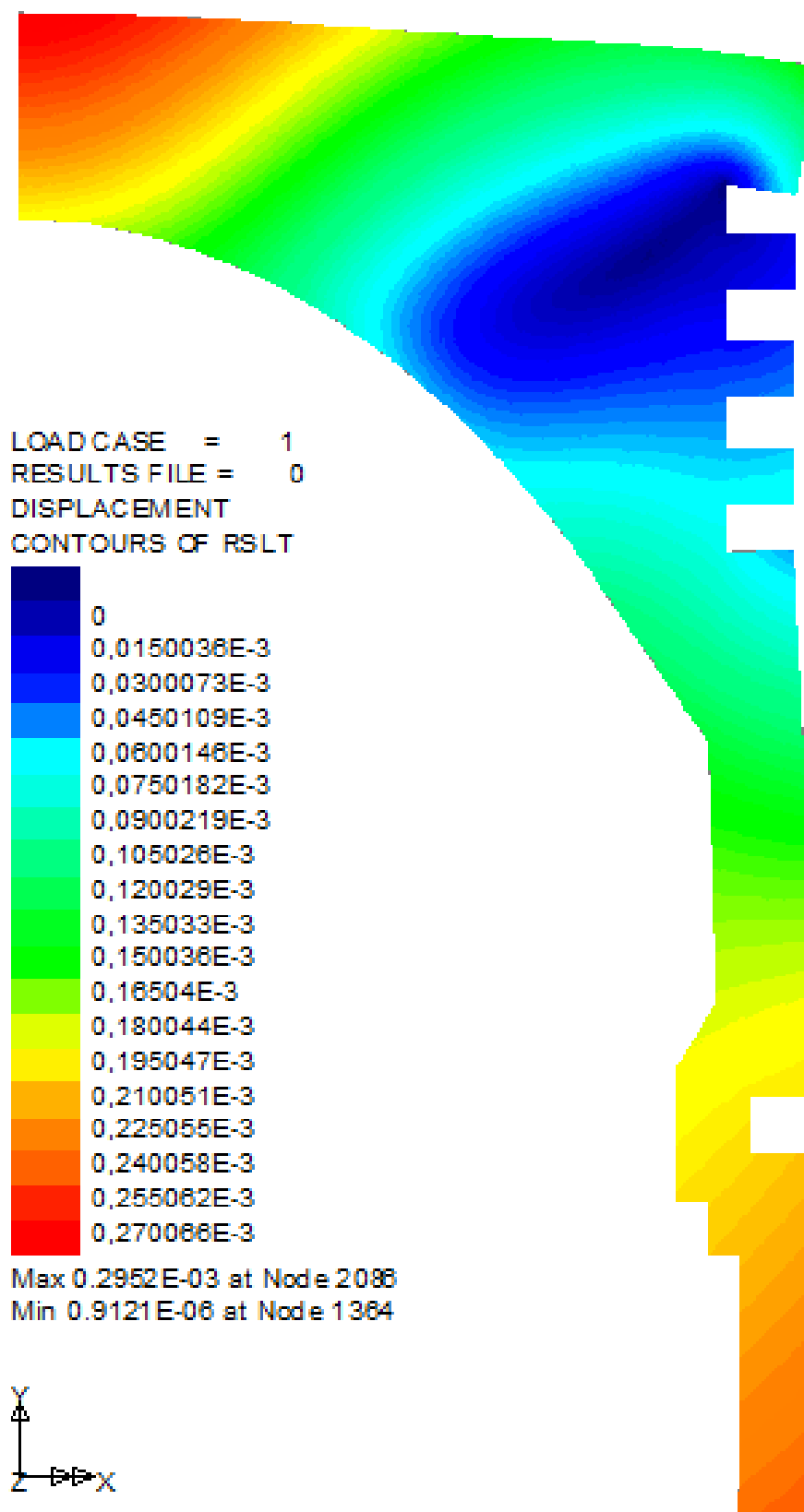
Σχήμα 7.12h: Περίγραμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$.



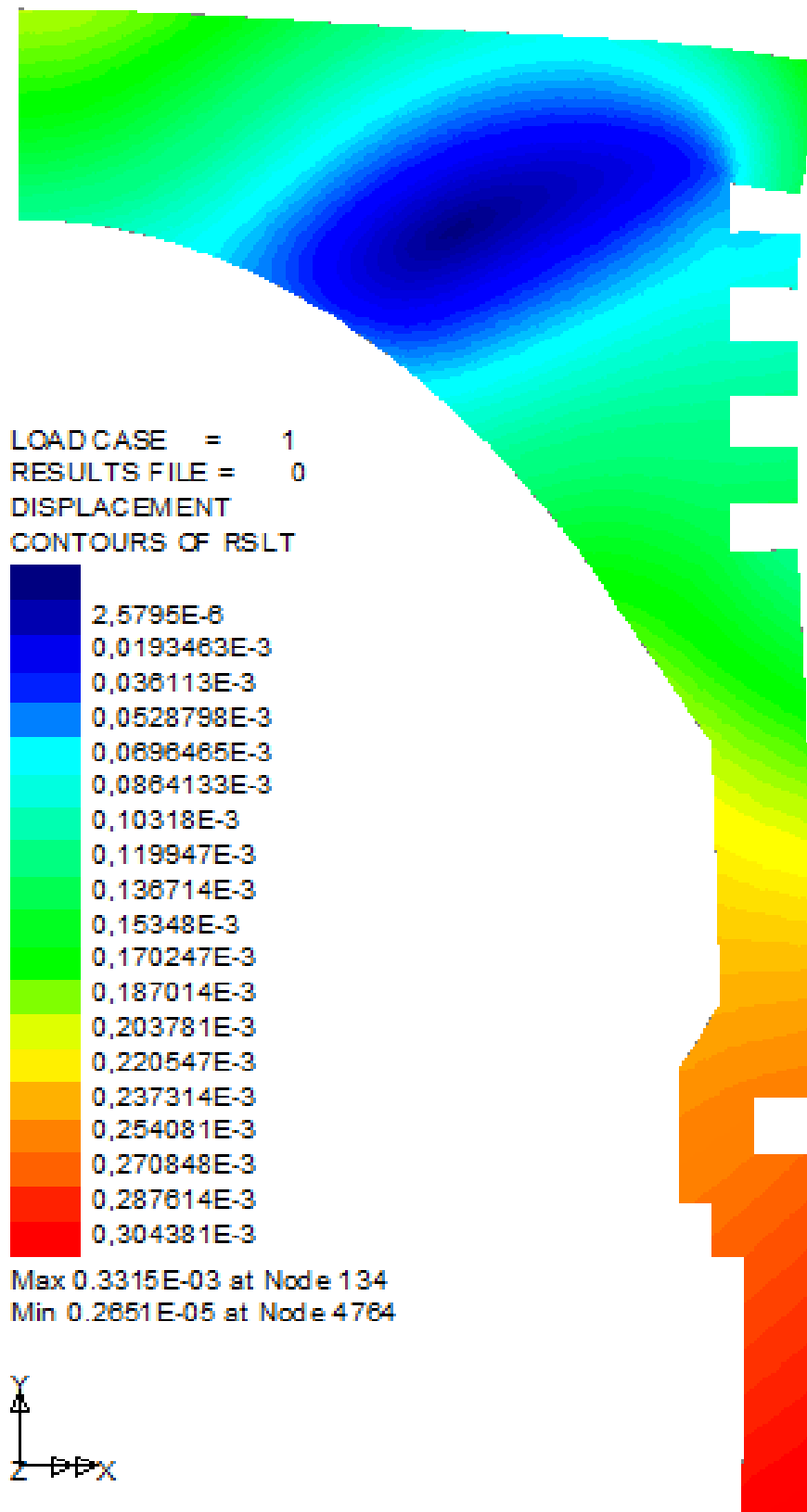
Σχήμα 7.12i: Περίγραμμα κατακόρυφης θερμικής ροής για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$ και αποφλοιώση.



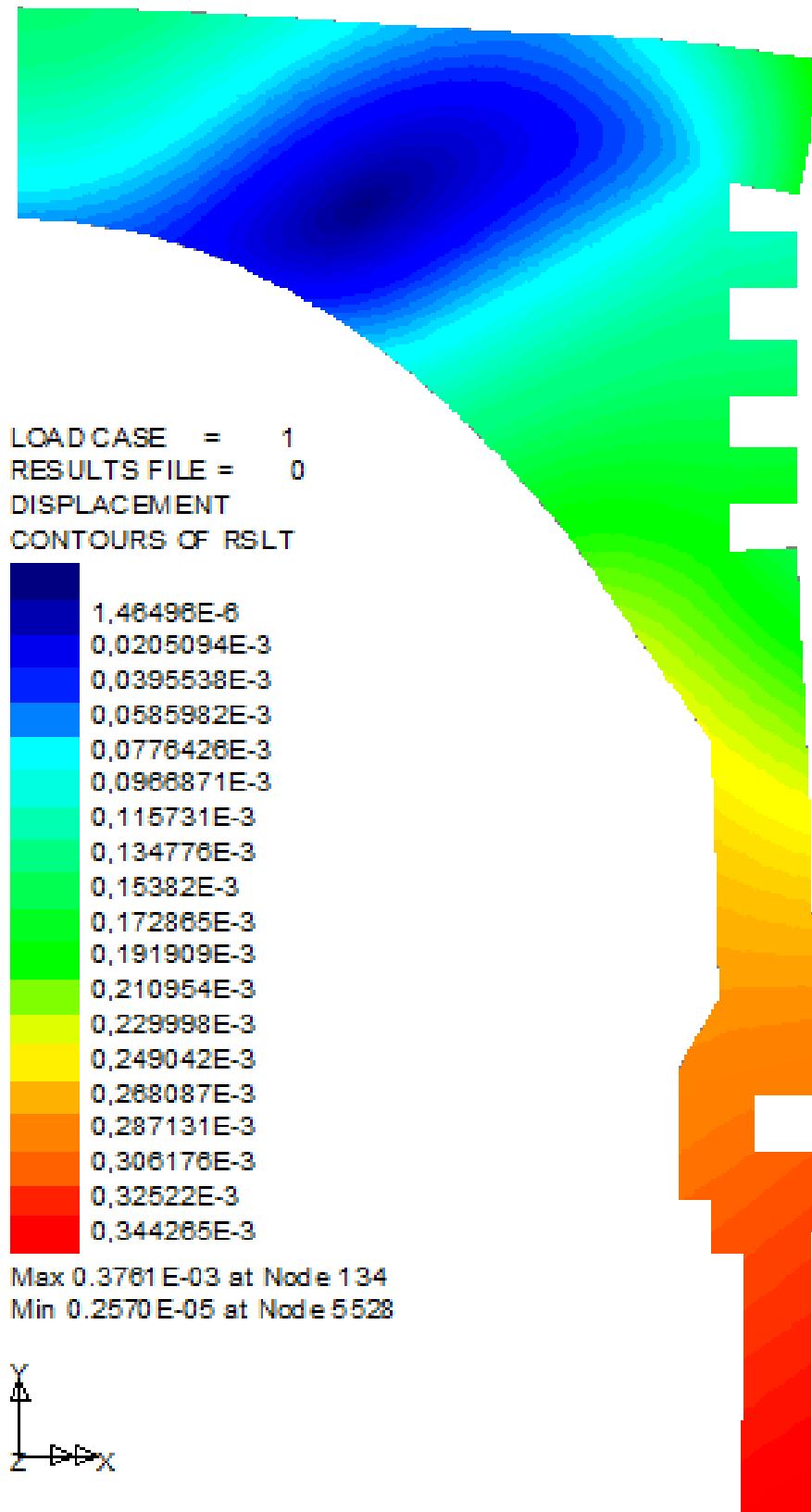
Σχήμα 7.13a: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 0$.



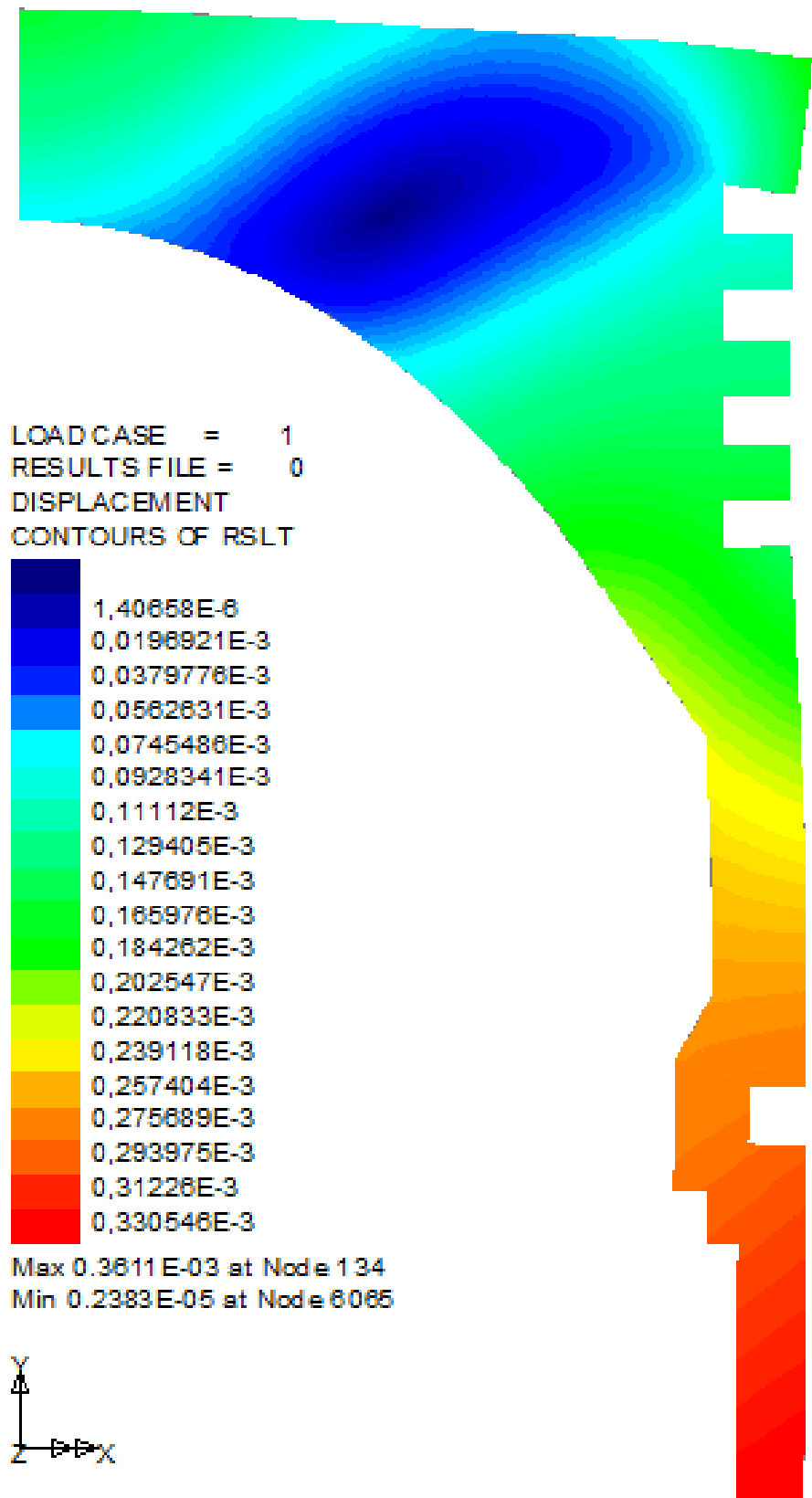
Σχήμα 7.13b: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 300\mu\text{m}$.



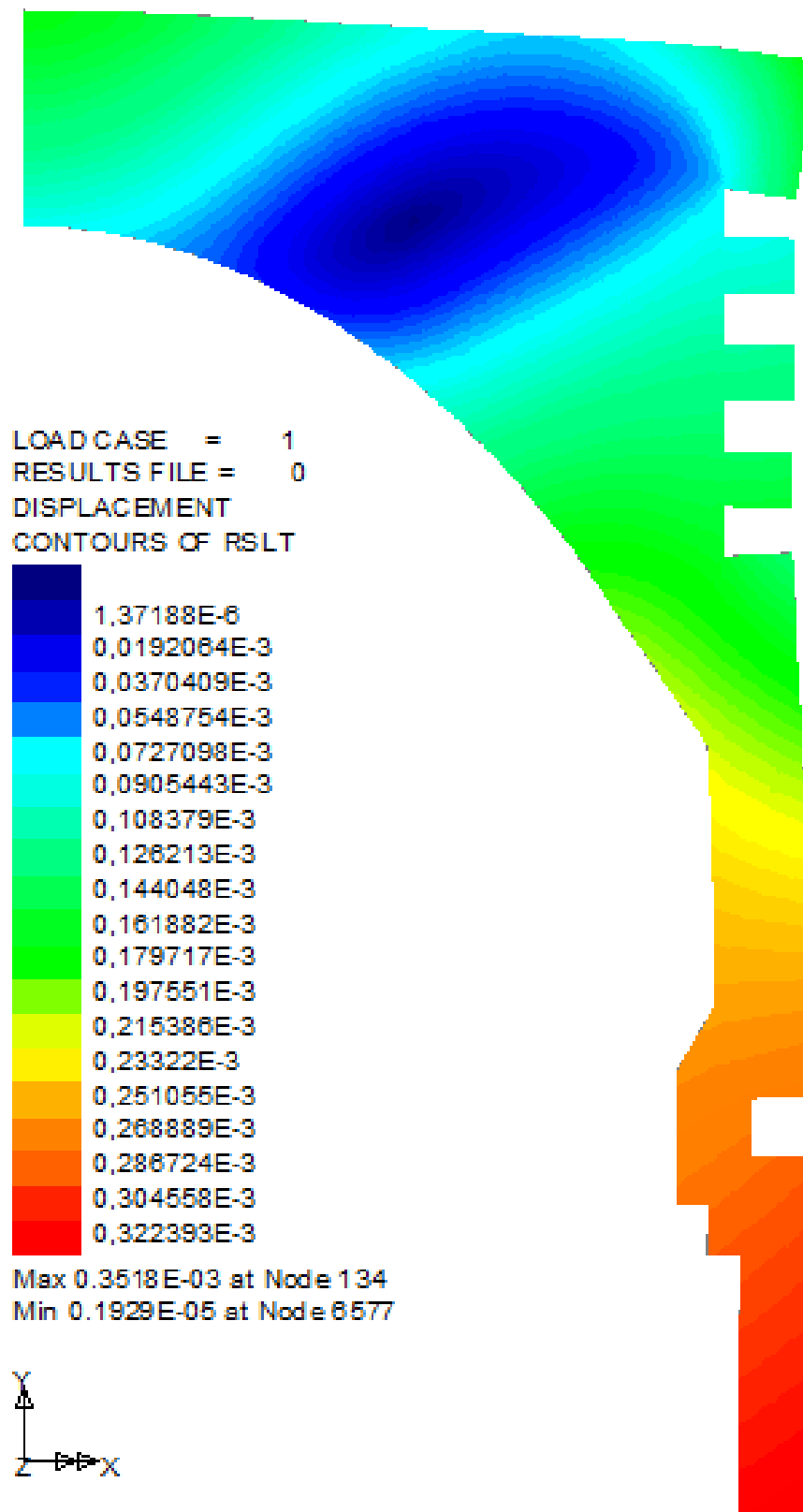
Σχήμα 7.13c: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 450\mu\text{m}$.



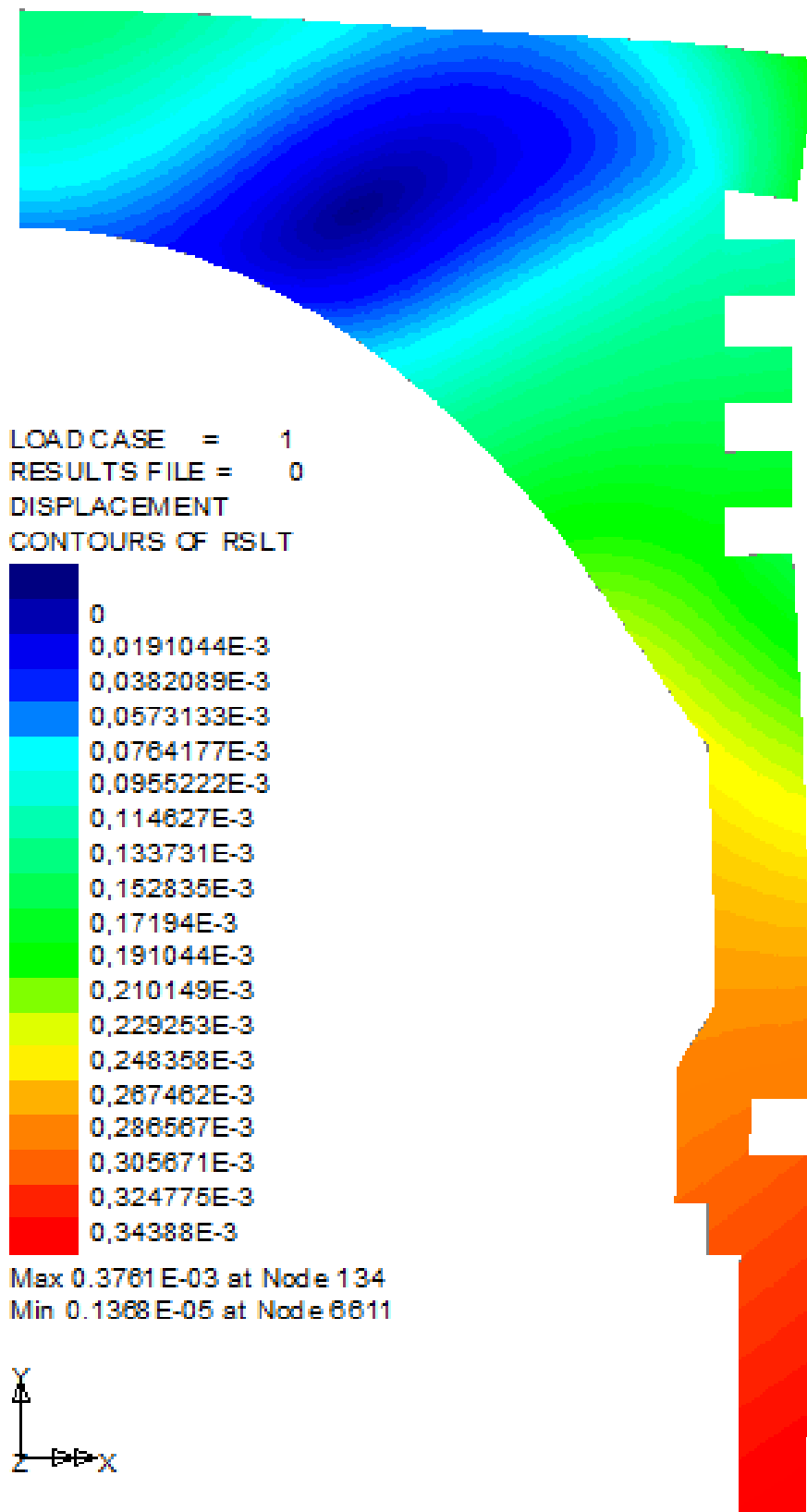
Σχήμα 7.13d: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 600\mu\text{m}$.



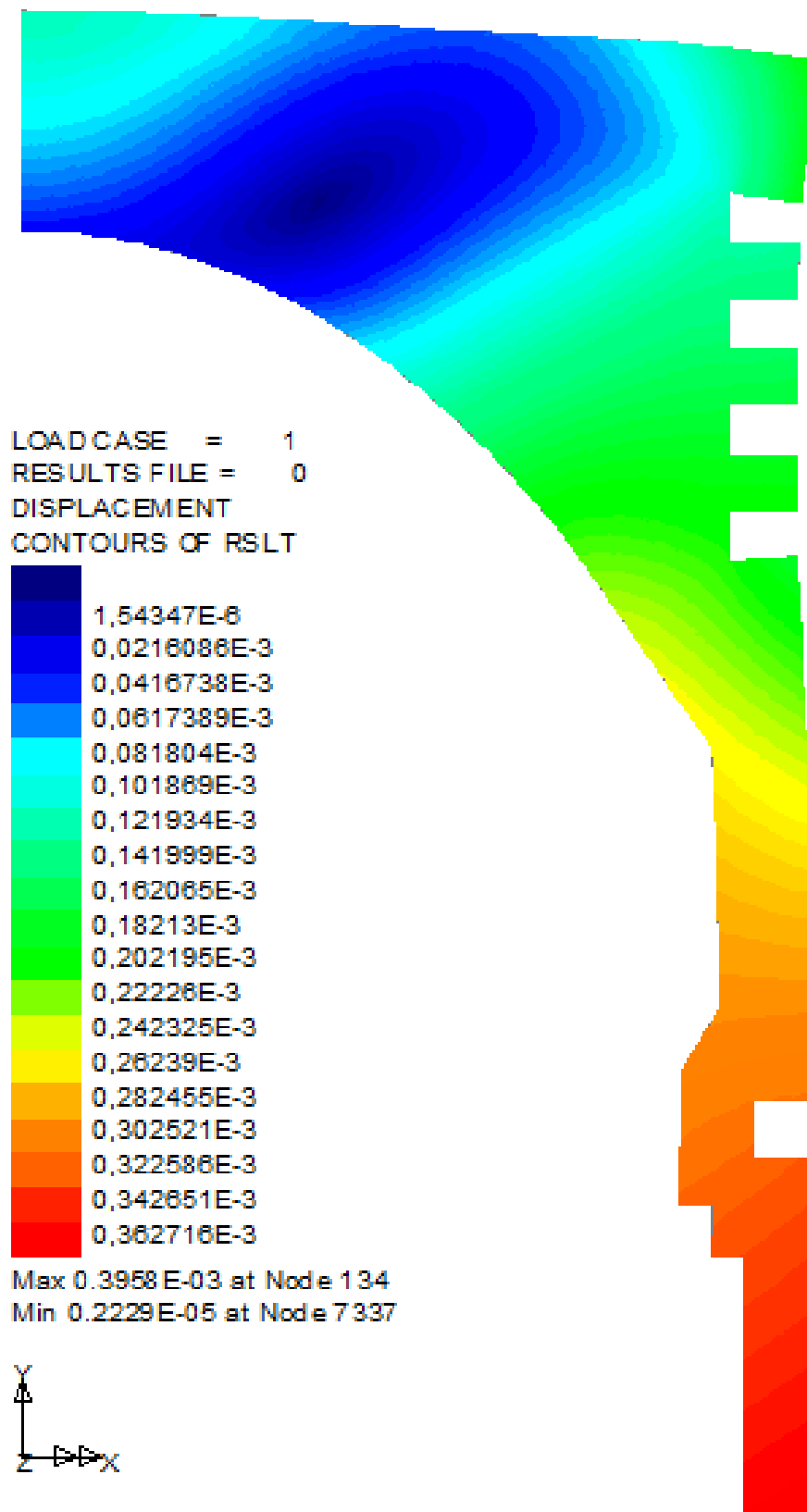
Σχήμα 7.13ε: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 750\mu\text{m}$.



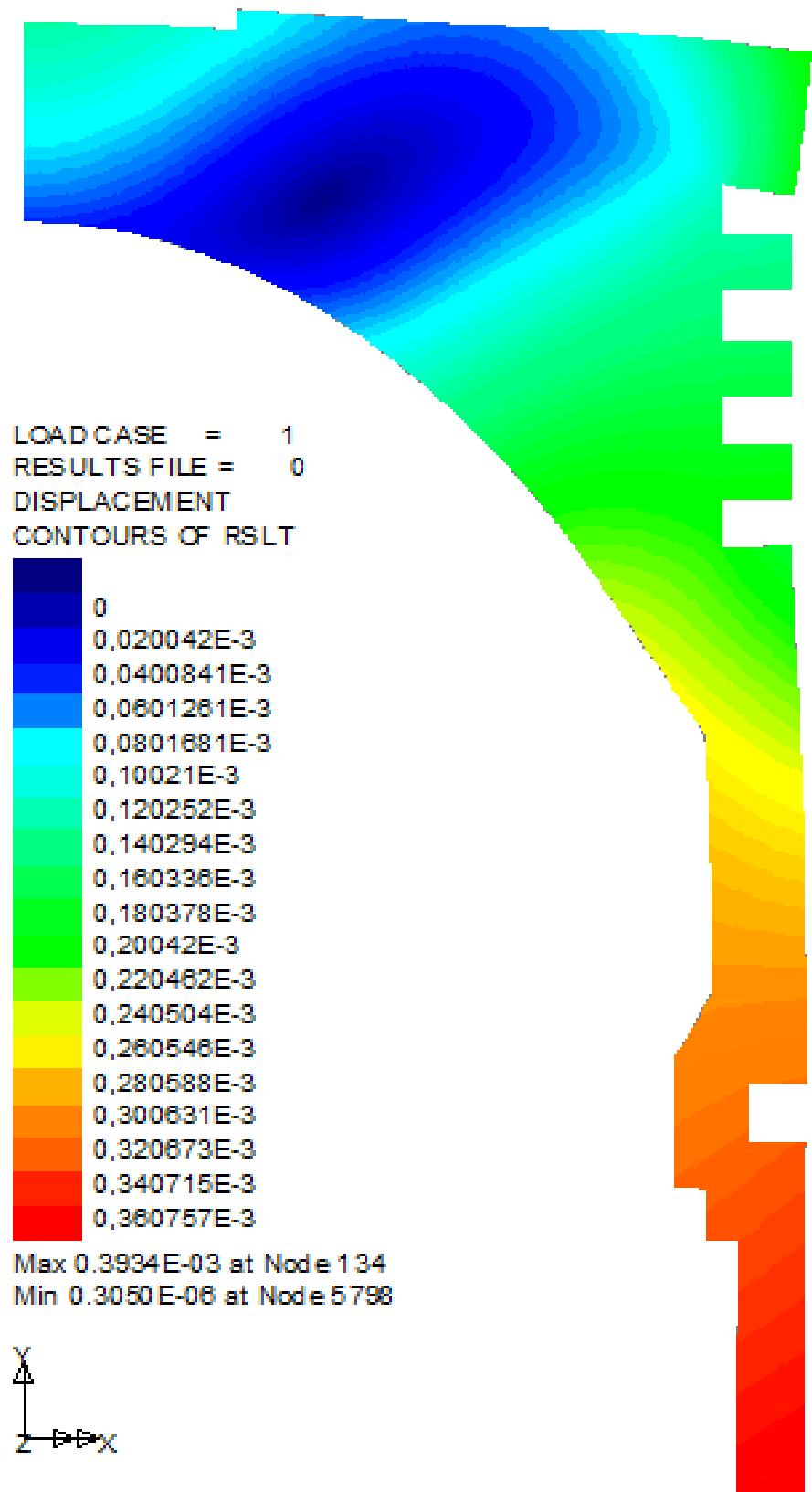
Σχήμα 7.13f: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 900\mu\text{m}$.



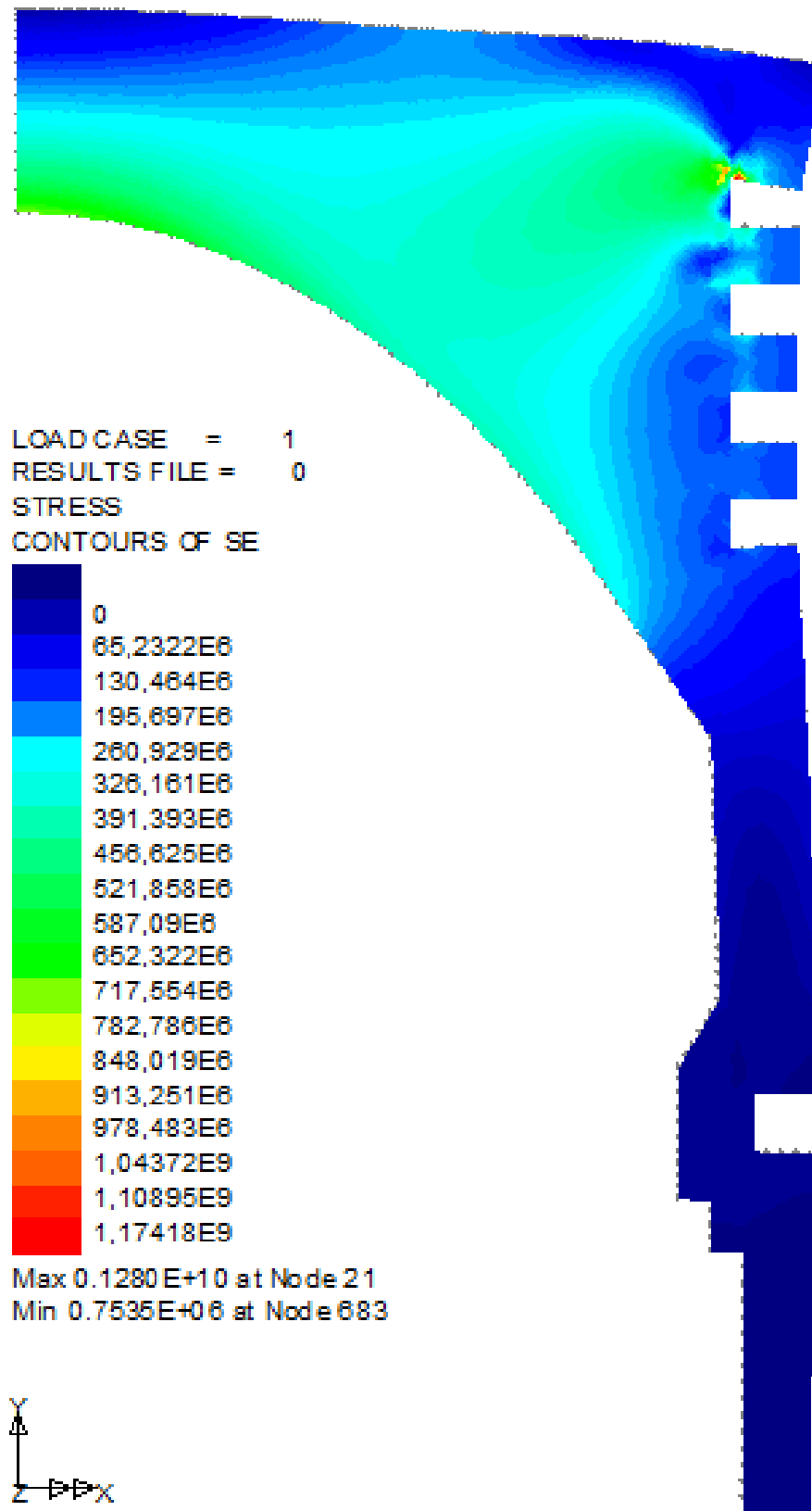
Σχήμα 7.13g: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 1050$.



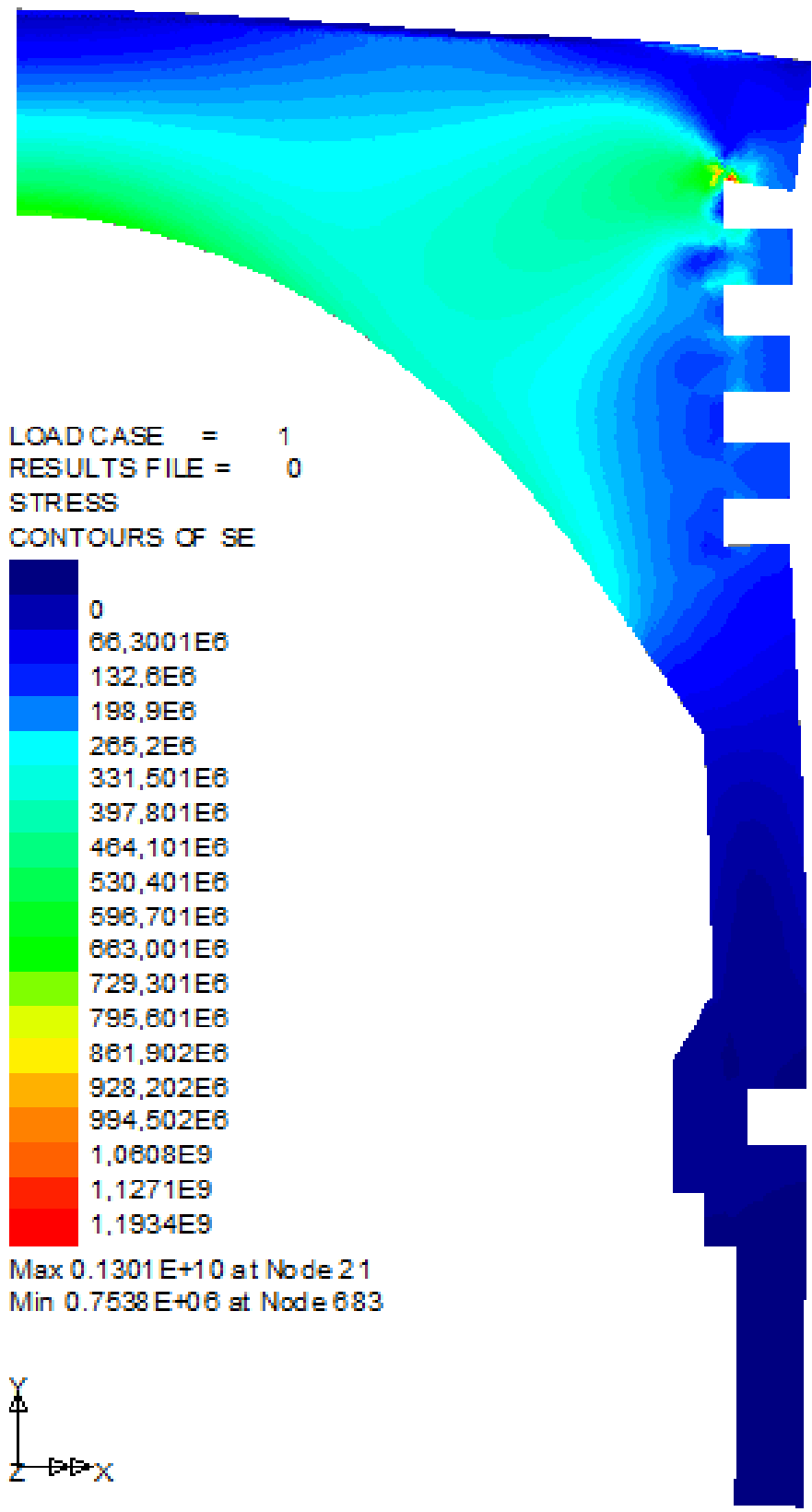
Σχήμα 7.13h: Περιγραφή συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$.



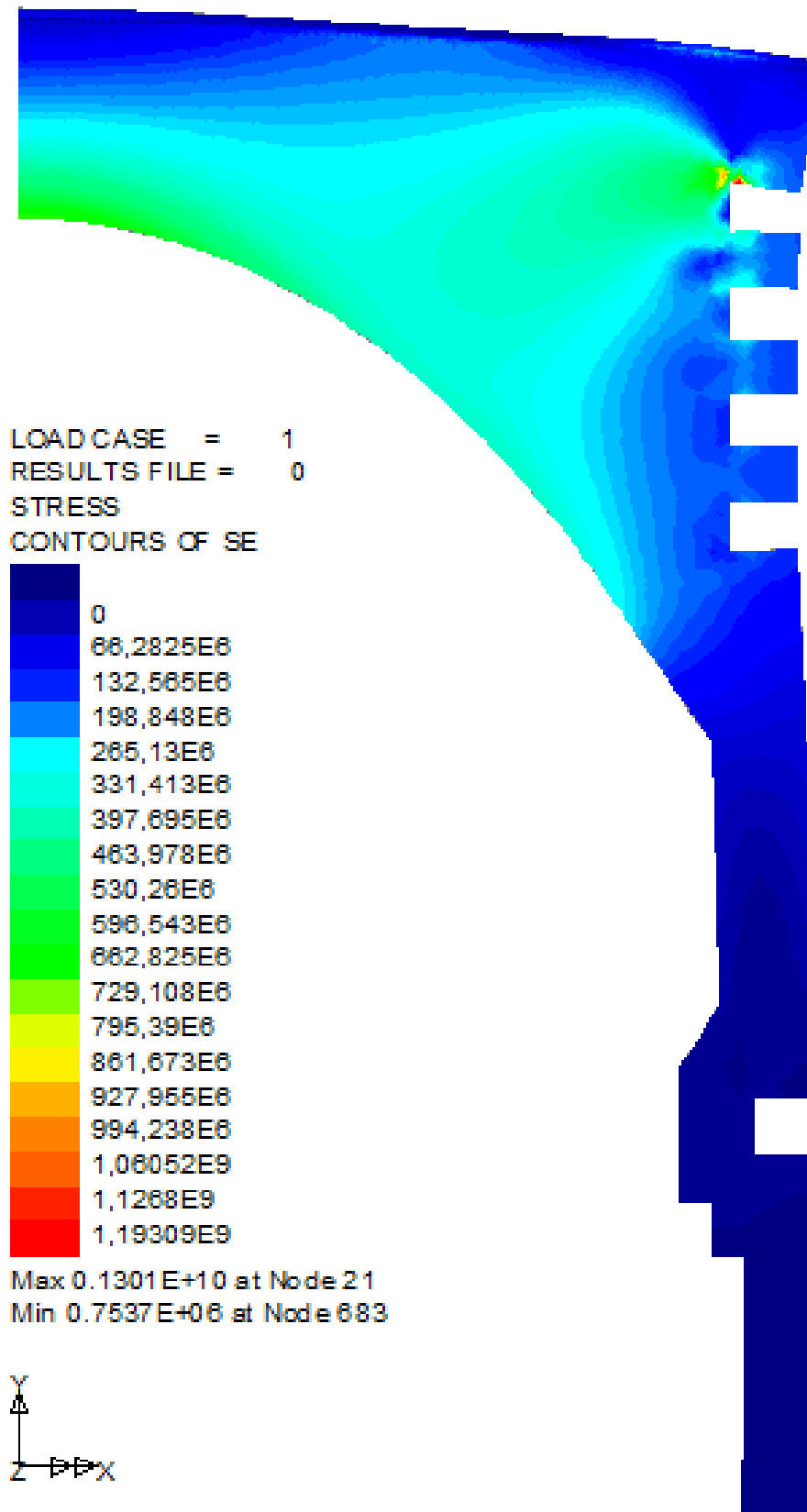
Σχήμα 7.13i: Περίγραμμα συνισταμένης μετατόπισης για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$ και αποφλοίωση.



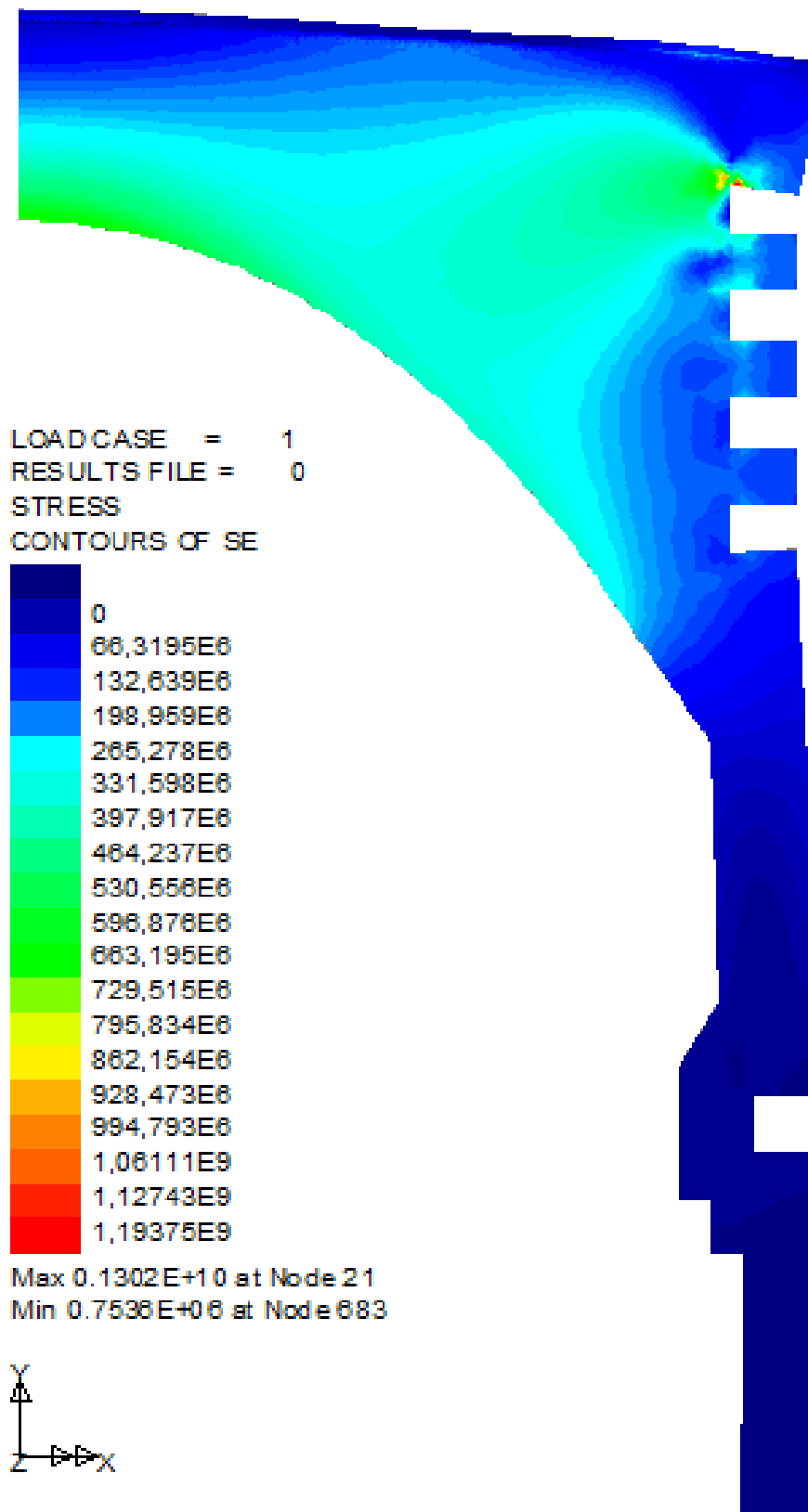
Σχήμα 7.14a: Περίγραμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 0$.



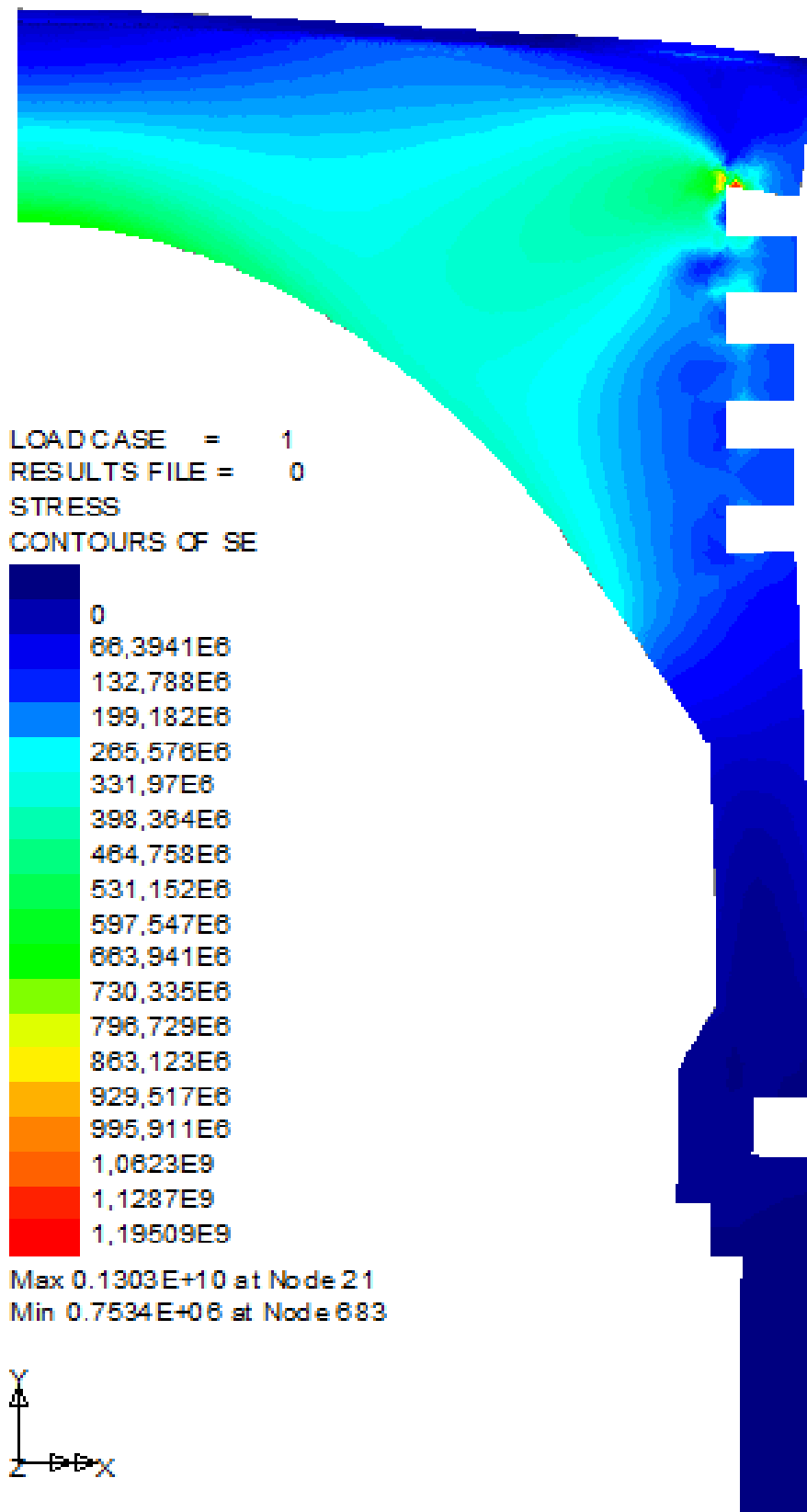
Σχήμα 7.14b: Περίγραμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 300\mu\text{m}$.



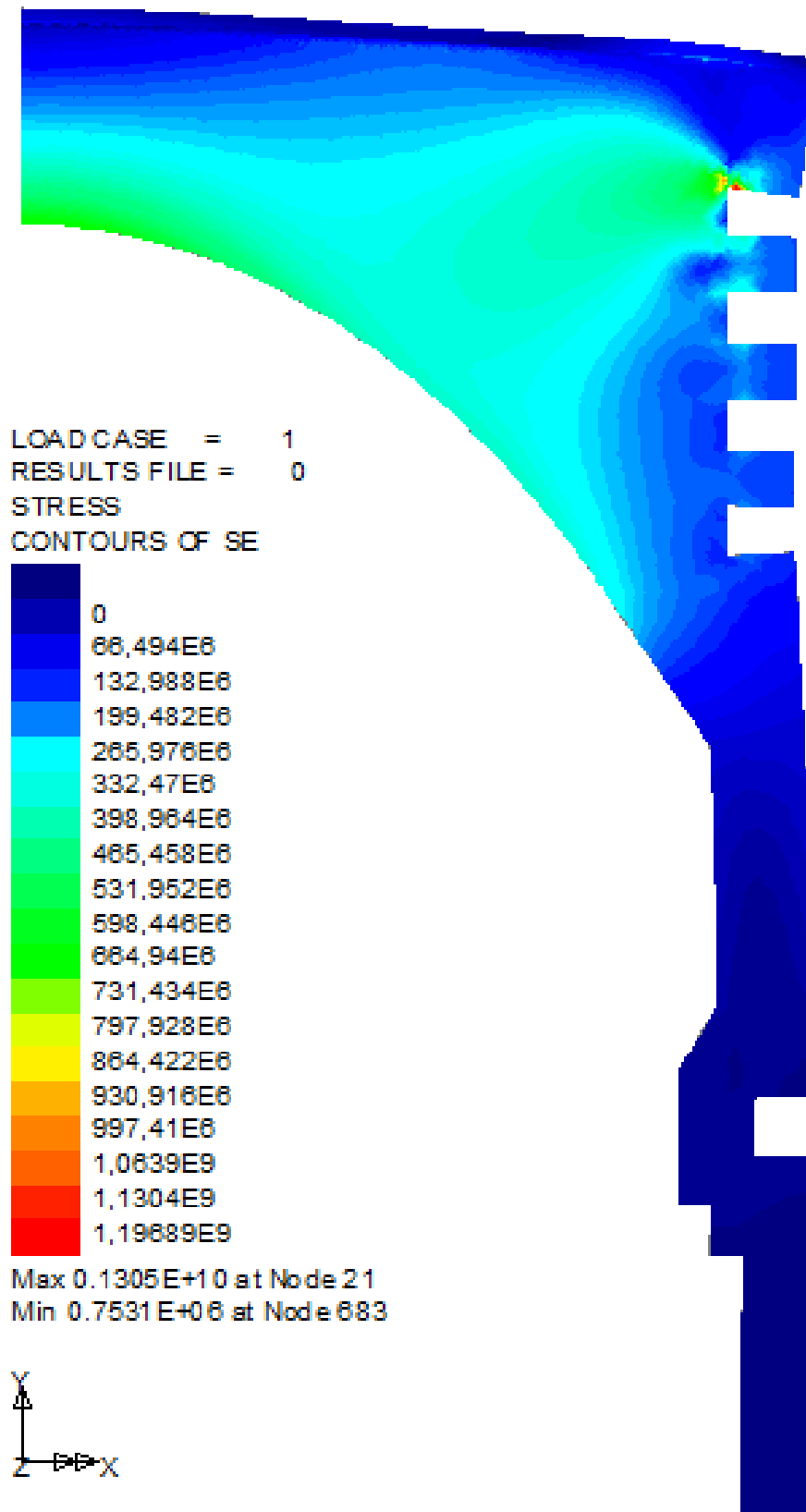
Σχήμα 7.14c: Περίγραμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 450\mu\text{m}$.



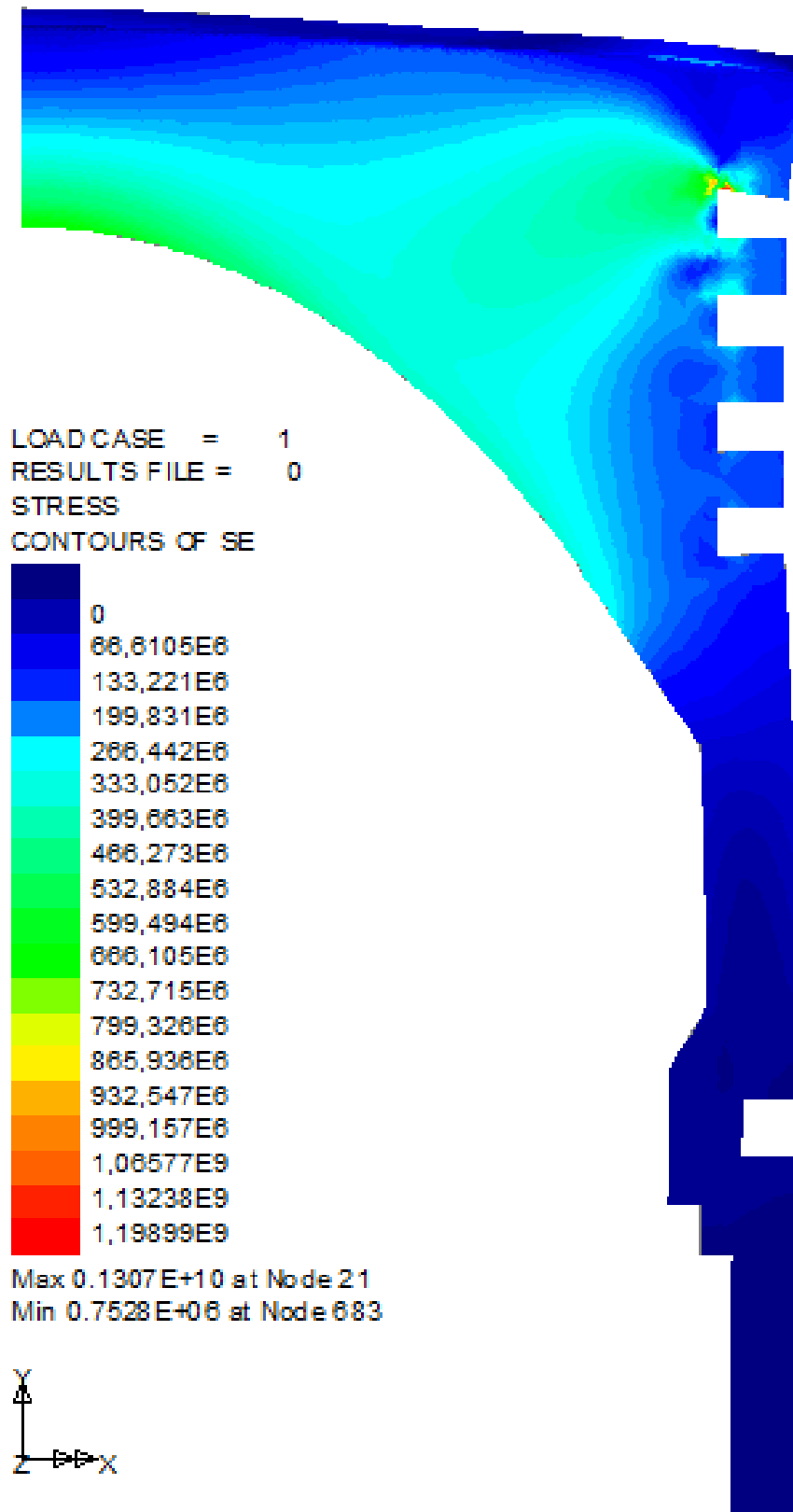
Σχήμα 7.14d: Περίγραμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 600\mu\text{m}$.



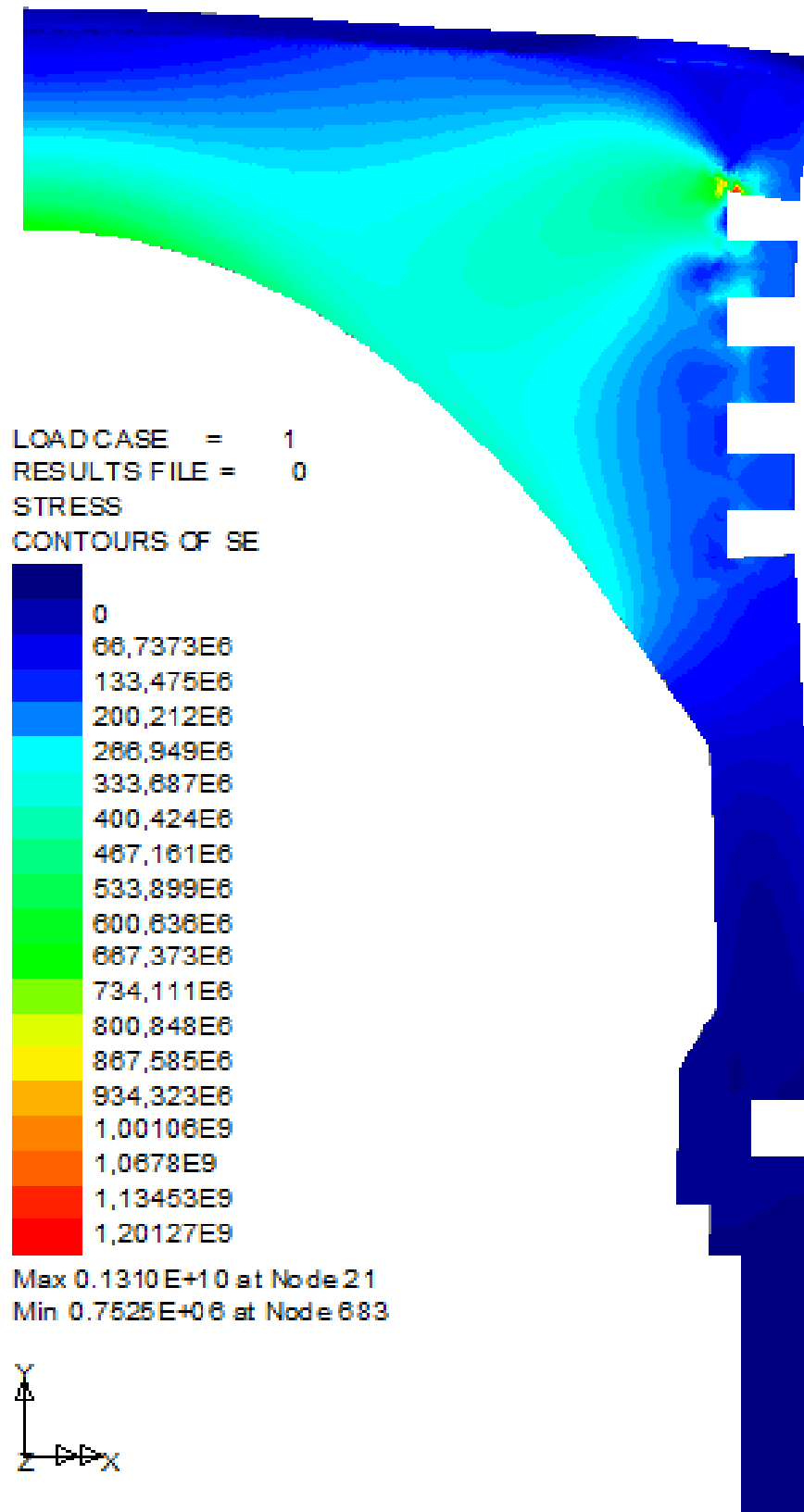
Σχήμα 7.14e: Περίγραμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 750\mu\text{m}$.



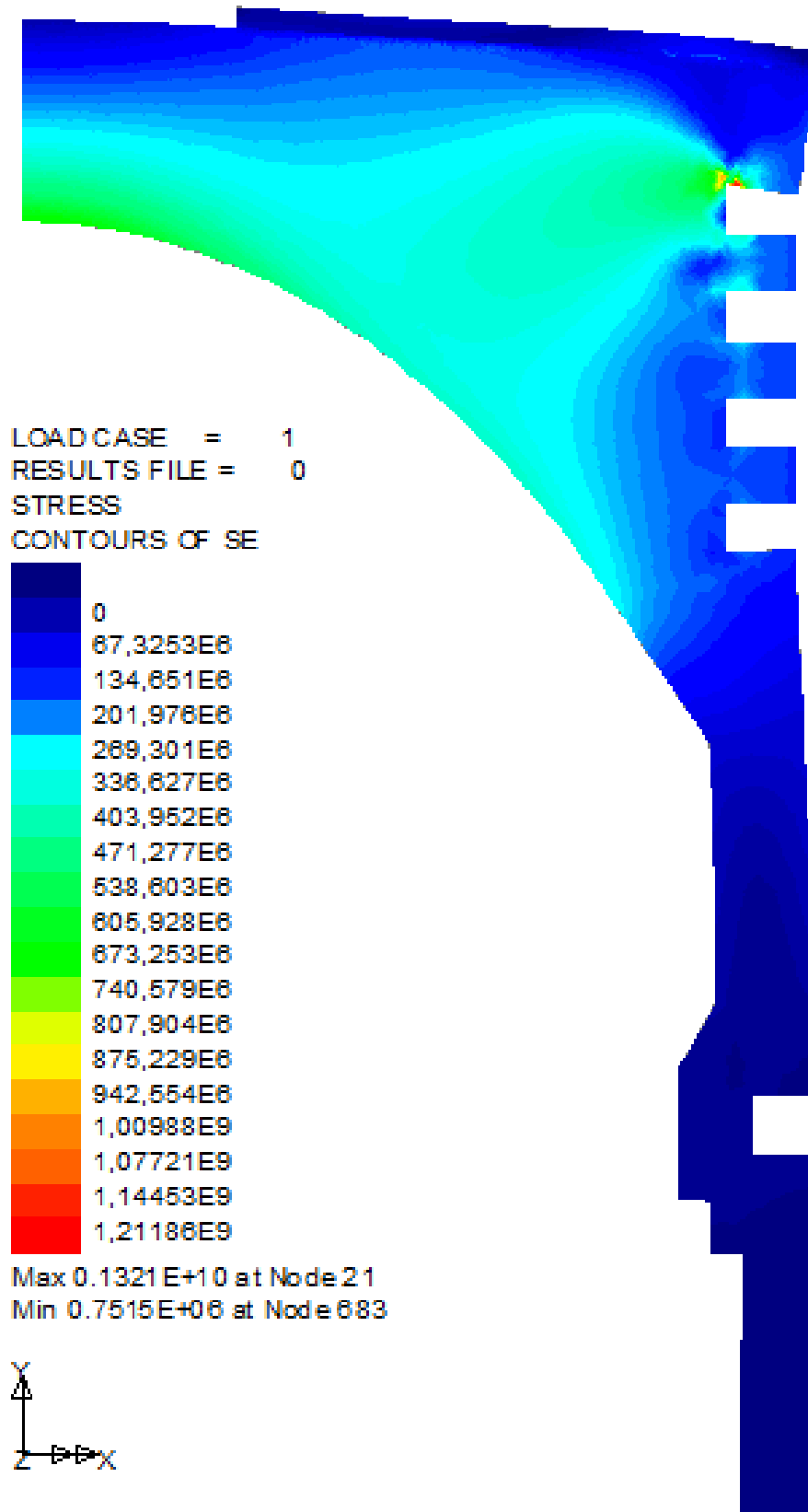
Σχήμα 7.14f: Περιγράμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 900\mu\text{m}$.



Σχήμα 7.14g: Περιγραφή τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 1050\mu\text{m}$.



Σχήμα 7.14h: Περιγράμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$.



Σχήμα 7.14i: Περίγραμμα τάσης Von Mises για πάχος επικάλυψης $t = 1200\mu\text{m}$ και αποφλοίωση.

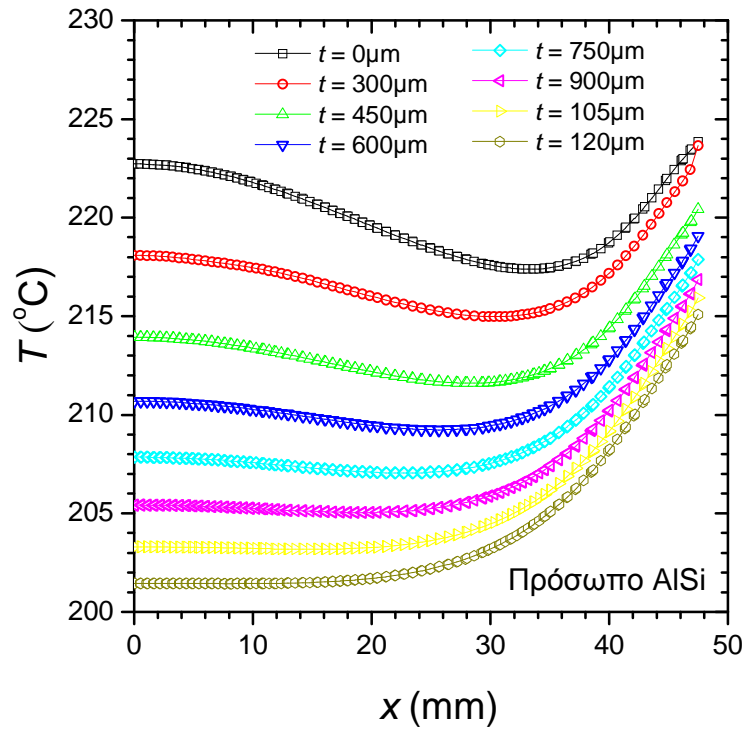
Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Από τα περιγράμματα θερμοκρασίας προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται το πάχος της επίστρωσης θερμικής προστασίας, οι μέγιστες θερμοκρασίες παραλαμβάνονται από την επίστρωση ενώ το κάτω τμήμα του εμβόλου παρουσιάζεται ψυχρότερο.
- Από τα περιγράμματα θερμικής ροής προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται το πάχος της επίστρωσης θερμικής προστασίας η μεταφορά θερμότητα μειώνεται τόσο κατά την αξονική διεύθυνση όσο και κατά την ακτινική στο σύνολο του πεδίου ορισμού.
- Από τα περιγράμματα συνισταμένης μετατόπισης παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το πάχος της επίστρωσης θερμικής προστασίας, οι μέγιστες μετατοπίσεις του εμβόλου μετατοπίζονται από κεντρικό τμήμα της κεφαλής στο κάτω τμήμα του.
- Από τα περιγράμματα τάσης Von Mises εξάγεται το συμπέρασμα ότι καθώς αυξάνεται το πάχος της επίστρωσης θερμικής προστασίας, η κεφαλή του εμβόλου ανακουφίζεται από τάσεις.
- Οι μέγιστες τάσεις παρουσιάζονται στη περιοχή επαφής των ελατηρίων εκεί άλλωστε που άλλωστε εμπειρικά υφίστανται και συχνότερες αστοχίες.
- Σε κάθε περίπτωση όταν η επίστρωση αποφλοιωθεί η προστατευτική ικανότητα της υποβαθμίζεται.

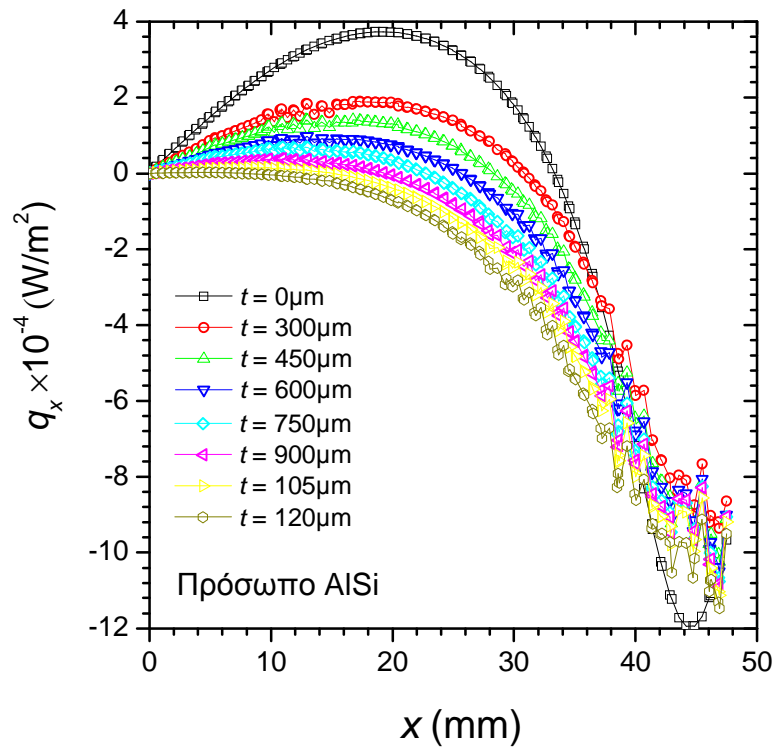
7.6.2 Διαγράμματα προσώπου AISi

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μείζονος σημασίας μεταβολές των θερμομηχανικών μεγεθών στην επιφάνεια του προσώπου του υποστρώματος AISi, για τη προστασία της οποίας χρησιμοποιούνται άλλωστε και οι επικαλύψεις.

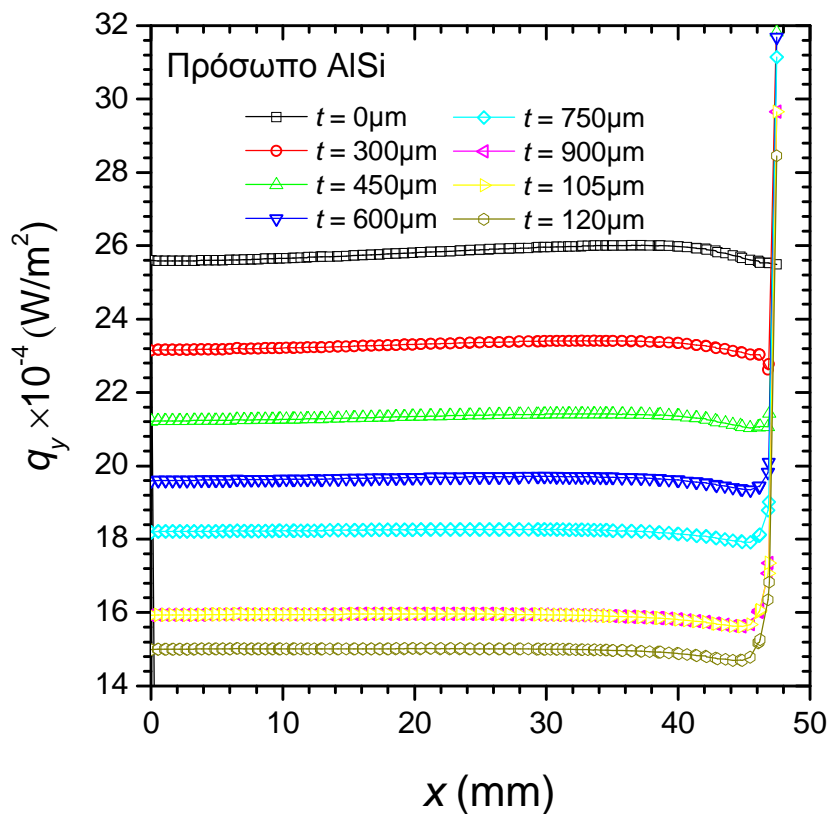
Τα Σχήματα 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 και 7.19 παρουσιάζουν τη διακύμανση της θερμοκρασίας, της οριζόντιας θερμικής ροής, της κατακόρυφης θερμικής ροής, της συνισταμένης μετατόπισης και της τάσης Von Mises σε σχέση με την ακτινική απόσταση και για όλα τα υπό μελέτη πάχη επικάλυψης.



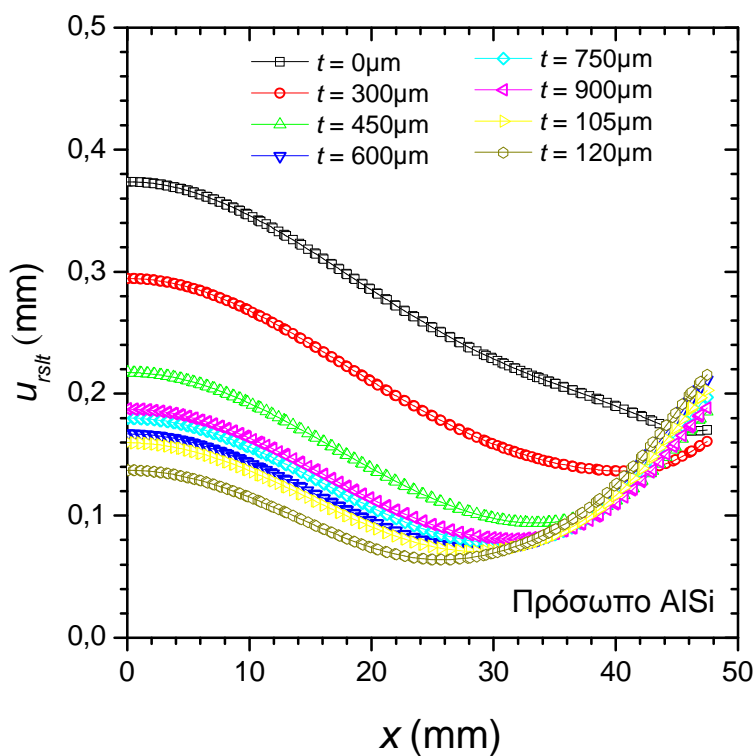
Σχήμα 7.15: Μεταβολή θερμοκρασίας προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση.



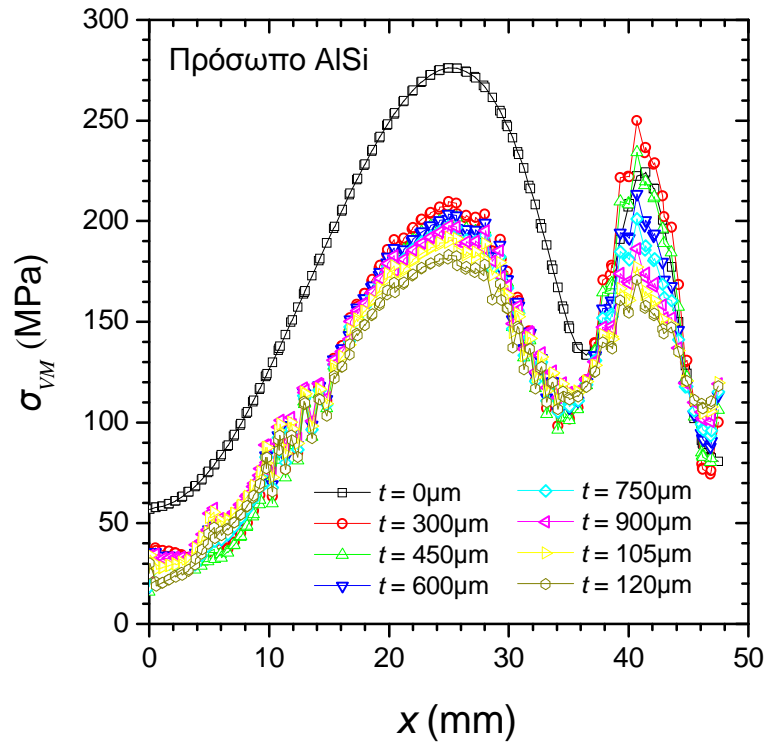
Σχήμα 7.16: Μεταβολή οριζόντιας θερμικής ροής προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση.



Σχήμα 7.17: Μεταβολή κατακόρυφης θερμικής ροής προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση.



Σχήμα 7.18: Μεταβολή συνισταμένης μετατόπισης προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση.

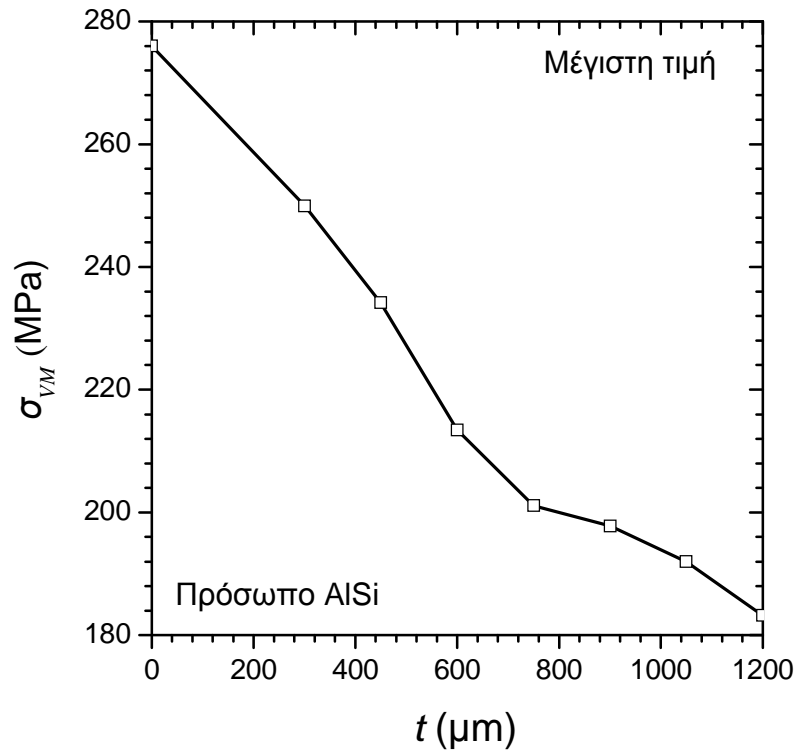


Σχήμα 7.19: Μεταβολή τάσης Von Mises προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση.

Οι παρατηρήσεις που εξάγονται για την επιφάνεια του προσώπου AISi από τα παραπάνω διαγράμματα είναι οι εξής:

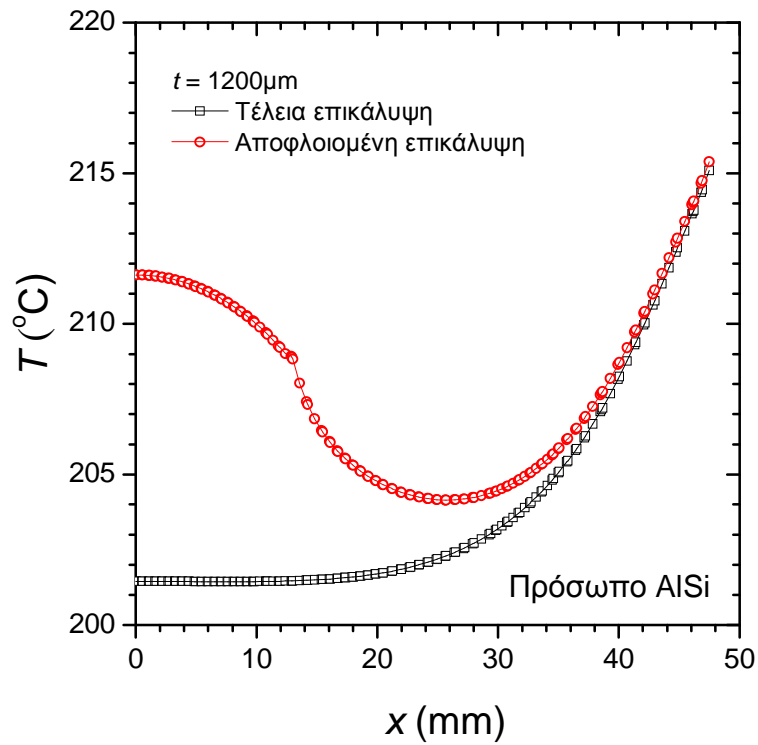
- Η θερμοκρασία μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους επίστρωσης ειδικά στη κεντρική επιφάνεια του προσώπου.
- Η οριζόντια θερμική ροή μειώνεται με την αύξηση του πάχους της επίστρωσης ειδικά στη κεντρική επιφάνεια του προσώπου.
- Η κατακόρυφη θερμική ροή μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους της επίστρωσης σε όλη την επιφάνεια του προσώπου.
- Η συνισταμένη μετατόπιση μειώνεται με την αύξηση του πάχους της επίστρωσης σημαντικά. Το φαινόμενο αυτό είναι λιγότερο έντονο στα άκρα. Από ένα αρκετά μεγάλο πάχος επίστρωσης και άνω η επίδραση της δεν αλλάζει σημαντικά.
- Η τάση Von Mises μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους της επίστρωσης.

Το τελευταίο πόρισμα μπορεί να γίνει ακόμα πιο σαφές από το Σχήμα 7.20 το οποίο απεικονίζει τη μείωση της μέγιστης παρατηρούμενης τάσης Von Mises με την αύξηση της επικάλυψης. Όπως φαίνεται μια επικάλυψη μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της συγκέντρωσης τάσεων στο πρόσωπο του εμβόλου έως και 100MPa.

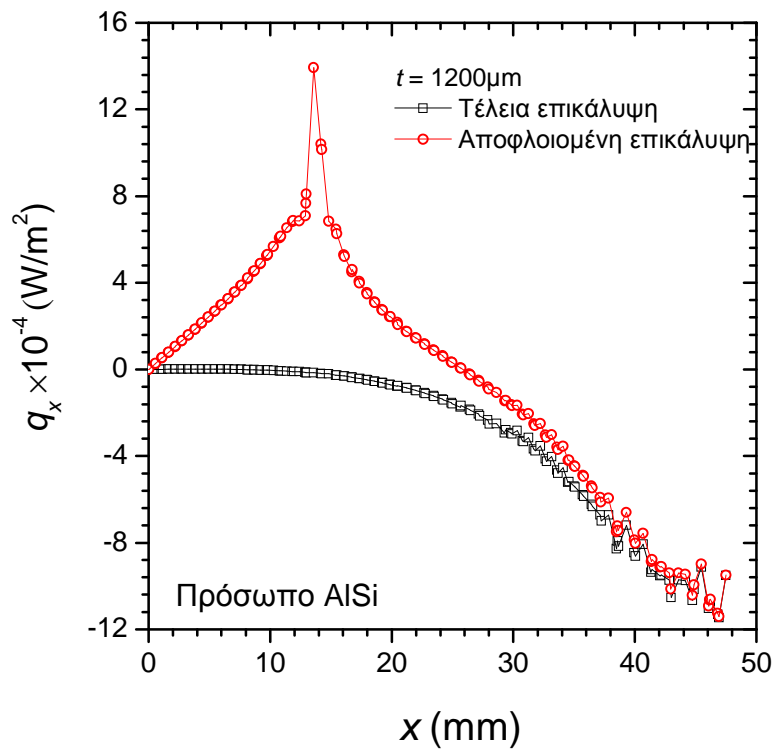


Σχήμα 7.20: Μεταβολή μέγιστης τάσης Von Mises προσώπου AlSi με το πάχος της επικάλυψης.

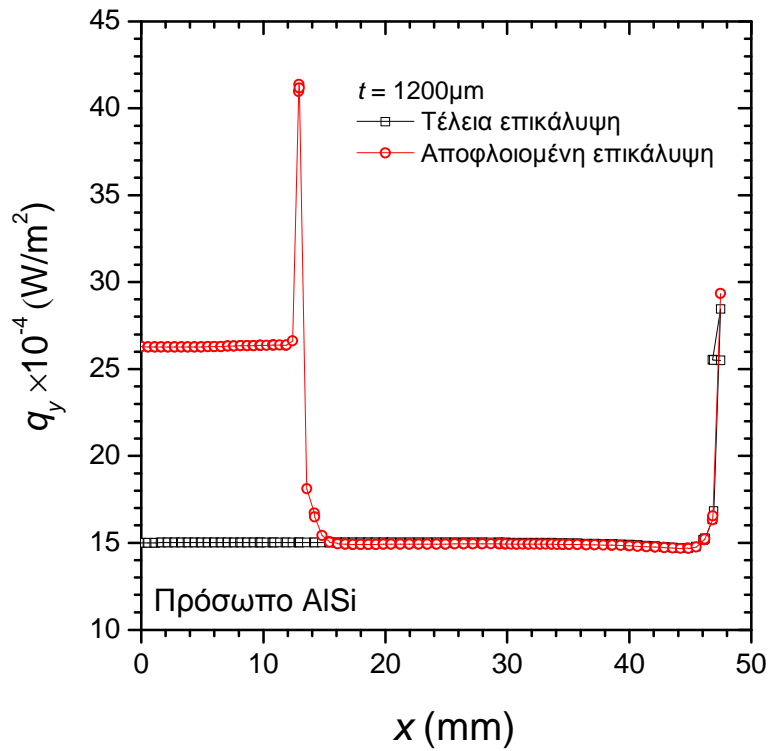
Τα Σχήματα 7.21, 7.22, 7.23, 7.24 και 7.25 παρουσιάζουν τη διακύμανση της θερμοκρασίας, της οριζόντιας θερμικής ροής, της κατακόρυφης θερμικής ροής, της συνισταμένης μετατόπισης και της τάσης Von Mises σε σχέση με την ακτινική απόσταση για αποφλοιωμένη ή μη επικάλυψη πάχους 1200 μm .



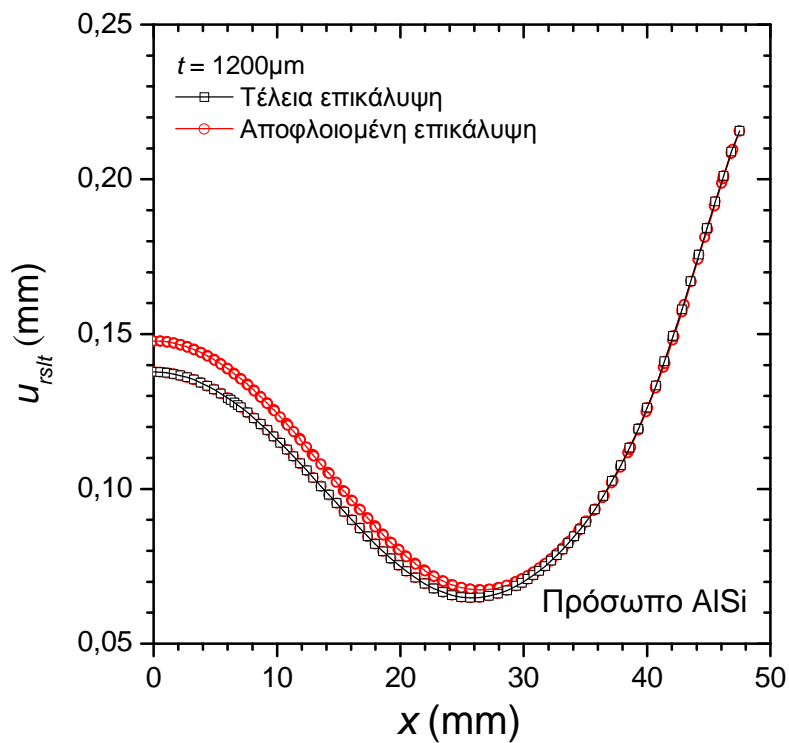
Σχήμα 7.21: Μεταβολή θερμοκρασίας προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση για αποφλοιωμένη ή μη επικάλυψη.



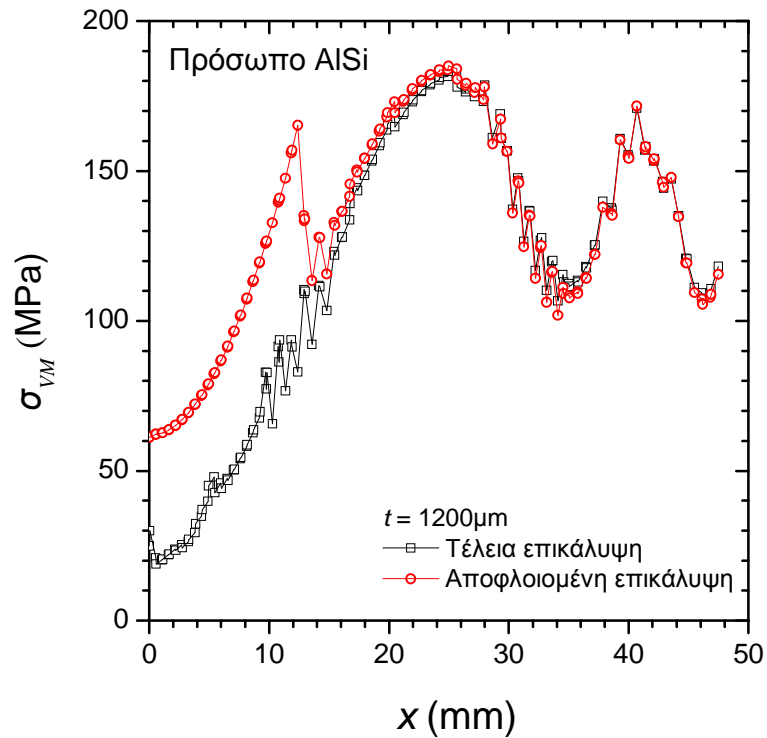
Σχήμα 7.22: Μεταβολή οριζόντιας θερμικής ροής προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση για αποφλοιωμένη ή μη επικάλυψη.



Σχήμα 7.23: Μεταβολή κατακόρυφης θερμικής ροής προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση για αποφλοιωμένη ή μη επικάλυψη.



Σχήμα 7.24: Μεταβολή συνισταμένης μετατόπισης προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση για αποφλοιωμένη ή μη επικάλυψη.



Σχήμα 7.25: Μεταβολή τάσης Von Mises προσώπου AISi με την ακτινική απόσταση για αποφλοιωμένη ή μη επικάλυψη.

Από τα τελευταία πέντε διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι μια πιθανή αποφλοίωση της επικάλυψης επιβαρύνει ιδιαίτερα την αποδοτικότητα της στη μείωση των θερμοκρασιών και των τάσεων του υποστρώματος ιδίως στην περιοχή της αποφλοίωσης.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα πτυχιακή υιοθετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που βασίζεται στη χρήση αποκλειστικά, χαμηλού υπολογιστικού κόστους, αξονοσυμμετρικών στοιχείων για την προσομοίωση της θερμοελαστικής συμπεριφοράς ενός εμβόλου κινητήρα εσωτερικής καύση Diesel συγκεκριμένων προδιαγραφών. Στόχος ήταν η εξαγωγή καίριων συμπερασμάτων όσον αφορά τη προστασία του εμβόλου με τις λεγόμενες επιστρώσεις θερμικής προστασίας (TBCs), από τις θερμικά προκαλούμενες τάσεις που υφίσταται κατά την ώρα της λειτουργίας του. Για το σκοπό αυτό το πρόσωπο του εμβόλου θεωρήθηκε ότι επικαλύπτεται με μαγνησιούχο οξειδίο του ζirkονίου. Μεταξύ υποστρώματος και επίστρωσης θεωρήθηκε στρώση συγκόλλησης από κράμα νικελίου-χρωμίου-αλουμινίου για να προσδοθεί η κατάλληλη διεπιφανειακή αντοχή και συνάφεια στο σύστημα επικάλυψης. Η μελέτη είχε παραμετρικό χαρακτήρα, με την έννοια ότι δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές πάχους επίστρωσης για να μελετηθεί η επίδραση του τελευταίου στην αποδοτικότητα της επικάλυψης. Τέλος, εξετάσθηκε και το πιθανό σενάριο κατά το οποίο τμήμα της επικάλυψης έχει αποφλοιωθεί. Στόχος της εργασίας ήταν να δοθούν οι κατευθύνσεις για την επίτευξη μια ικανοποιητικής σχεδιαστικής λύσης θερμικής προστασίας του εμβόλου χωρίς τη πραγματοποίηση εργαστηριακής μελέτης, μέτρησης και παρατήρησης η οποία θα ήταν χρονοβόρα και θα είχε πιθανότατα υψηλό κόστος.

Από τα εισαγόμενα αριθμητικά αποτελέσματα εξάχθηκαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα: Η θερμοκρασία και η θερμική ροή μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους επίστρωσης ειδικά στη κεντρική επιφάνεια του προσώπου. Η συνισταμένη μετατόπιση και η τάση Von Mises μειώνεται με την αύξηση του πάχους της επίστρωσης σημαντικά. Από ένα πάχος επίστρωσης και έπειτα η συνεισφορά της μειώνεται αρκετά. Πιθανή αποφλοίωση της επίστρωσης μειώνει εξαιρετικά τη προστασία που παρέχει.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι η εμπειρία που έλαβαν οι συγγραφείς γύρω από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πιθανώς στο μέλλον να τους δώσει την ευκαιρία να ασχοληθούν στον τομέα υπολογιστικού σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Richard S., *Introduction to Internal Combustion Engines* (3rd edition), SAE International, 1999.
- [2] Μαυρίδης Κ.Π., *Μηχανές Εσωτερικής Καύσης*, Εκδόσεις Τ.Ε.Ι. Πάτρας, 1998.
- [3] Heisler H., *Advanced Engine Technology*, Edward Arnold, 1995.
- [4] Ball J., Raine R., Stone R., *Combustion Analysis and Cycle-by-Cycle Variations in Spark Ignition Engine Combustion, Part II: A New Parameter for Completeness of Combustion and its Use in Modelling Cycle-by-Cycle Variations in Combustion*, Proceedings of International Mechanical Engineering Part D, Vol. 212, pp. 507-524, *Journal of Automotive Engineering*, London, 1998.
- [5] Ball J., Raine R., Stone R., *Combustion Analysis and Cycle-by-Cycle Variations in Spark Ignition Engine Combustion, Part I: An Evaluation of Combustion Analysis Routines by Reference to Model Data*, Proceedings of International Mechanical Engineering Part D, pp. 381-399, *Journal of Automotive Engineering*, London, 1998.
- [6] Collins D., Stokes J., *Gasoline combustion chambers-compact or open*, SAE paper 830866, 1983.
- [7] Gruden D., Kuper P.F., *Heat balance of modern passenger car SI engines*, XIXth International Symposium, International Centre for Heat and Mass Transfer, Heat and Mass Transfer in Gasoline and Diesel Engines, Dubrovnik, August, 1987.
- [8] Brown C.N., 'An investigation into the performance of a Waukesha VRG220 SI engine, fuelled by CH₄ – CO₂ mixtures', Final Year Project Report, Brunel University, London, 1988.
- [9] Finlay I.C., Harris D., Boam D.J., Parks B.I., Factors influencing combustion chamber wall temperatures in a liquid - cooled automotive, spark - ignition engine, Proceedings of International Mechanical Engineering, Vol. 199, pp. 207-14, 1985.
- [10] Waldhauer B., Schilling U., Schnaibel S., Szopa J., *Piston Damages, Recognizing and Rectifying*, MSI Motor Service International GmbH, Germany, 2009.

- [11] Πεχλιβάνογλου Γ, Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, 2009.
- [12] Agard report, *Thermal Barrier Coatings*, 823 Report, 1998.
- [13] Wang J.S., Evans A.G., *Effects of strain cycling on buckling, cracking and spalling of a thermally grown alumina on a nickel-based bond coat*, Acta Materialia, vol. 47(2), pp. 699-710, 1999.
- [14] Schulz U., Fritcher K., Peters M., *EB-PVD Y_2O_3 and CeO_2/Y_2O_3 stabilized zirconia thermal barrier coatings- crystal habit and phase composition*, Surface and Coatings Technology, vol. 82, pp. 259-269, 1996.
- [15] Thurn G., Schneider G. A., Aldinger F., *High-temperature deformation of plasma sprayed ZrO_2 thermal barrier coatings*, Materials Science and Engineering A, Vol. 233, pp. 176-182, 1997.
- [16] Wright P.K., Influence of cyclic strain on life of a PVD TBC, Materials Science and Engineering, Vol. A245, , pp.191-200, 1998.
- [17] Wang J.S., Evans A.G, *Effects of strain cycling on buckling, cracking and spalling of a thermally grown alumina on a nickel-based bond coat*, Acta Materialia, vol. 47(2), pp. 699-710, 1999.
- [18] Tsui Y.C., Clyne T.W., *Adhesion of thermal barrier coating systems and incorporation of an oxidation barrier layer*, ASM: Thermal Spray, Practical solutions for engineering problems, pp.275-284, 1996.
- [19] Evans A.G., Hutchinson J.W., H.E. M.Y., Micromechanics model for the detachment of residually compressed brittle films and coatings, Acta Materialia, vol. 47(5), pp.1513-1531, 1999.
- [20] Schweitzer K.K., Track W., Conference on Alloys for Gas Turbines, Liege, October 1982.
- [21] Smialek J.L., Jayne D.T., Schaeffer J.C., Murphy W.H., Effects of hydrogen annealing, sulfur segregation and diffusion on the cyclic oxidation resistance of superalloys: a review, Thin Solid Films, Vol. 253, pp. 285-292, 1994.
- [22] Jeutter A., M. Schutze, "The role of HCl-impurities in the environment and Y for the high temperature corrosion of CoNiCrAlY-coatings on a Ni-base superalloy under complex oading conditions, Materials at Hight Temperatures, Vol. 16, pp. 71-86, 1999.
- [23] Wood M.I., *The mechanical properties of coatings and coated systems*, Materials Science and Engineering, Vol. A121, pp.633-643, 1989.

- [24] Boudot A., Grabos F., Fournier D., *Thermo-mechanical characterizations of coatings for HP turbines*, ASME, 98-GT-324.
- [25] Hancock P., Chien H.H., Nichllis J.R., Stephenson D.J., *In-situ measurements of the mechanical properties of aluminide coatings*, Surface and Coating Technology, Vol. 43/44, p.p. 359-370, 1990.
- [26] Woodford D.A., *Environmental Damage of a Cast Nickel-Base Superalloy*, Metallurgical Transactions ASME, Vol. 12A, pp. 299-308, 1981.
- [27] Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th Edition, John Wiley & Sons 2002.
- [28] *LUSAS user's manual*, FEA Ltd, Forge House, 66 High Street, Kingston upon Thames, Surrey KT1 1HN, UK, 1999.
- [29] Wu H.W., Chiu C.P., *Computer diagnosis system for thermal analysis of engine piston*, Heat and Mass Transfer, 30(2),p.p. 203-2010 (1995).
- [30] Saugerud O.T., Saudsmark N., *Strength analysis of thermal loaded engine components by two-diminensional and three-dimensional finite element model*, SAE, paper No. 790820,1979.
- [31] Cerit M, *Thermo mechanical analysis of a partially ceramic coated piston used in an SI engine*, Surface & Coatings Technology, Vol. 205, p.p. 3499–3505, 2011.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κάτωθι παρατίθενται αρχεία therm.cmd και mech cmd για τα οποία έγινε λόγος στη Παράγραφο 7.5 και τα οποία περιέχουν όλες τις πληροφορίες των αντίστοιχων μοντέλων. Τα αρχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της περίπτωση πάχους επικάλυψης $t = 300\mu\text{m}$ με τη βοήθεια του επαγγελματικού λογισμικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Lusas Fea.

Αρχείο therm.cmd:

```
! Version 13.5-7      Date 01-05-11 Time 03:57
SET OPTION          2   48   61  117  118  123  146  157  235  250 ...
                   253  278  319  324  380

SET MERGE OFF
SET MERGE ALWAYS
SET UNMERGABLE OFF
SET UNITS LFORCE="N"  LLENGT="m"  LMASS="t"  LTIME="s"  LTEMP="C"
SET JOINT_TOTAL OFF
SET MESH            4
SET TOLERANCE EQUIVALENCE                0.100000E-05
SET TOLERANCE INTERSECT                  0.100000E-07
SET TOLERANCE MERGE                      0.100000E-05
SET TOLERANCE PLANAR_SURFACE             0.100000E-05
SET TOLERANCE TANGENT_MERGE              0.100000E-05
SET TOLERANCE TWIST_MERGE                0.100000E-03
SET TOLERANCE SURFACE_INTERSECT         0.100000E-03
SET TOLERANCE INTERSECT_CONVERGENCE_LIMIT 0.100000E-09
SET TOLERANCE FILLET                     0.100000E-03
SET TOLERANCE SPLIT                      0.100000E-02
SET TOLERANCE CHORD                      0.100000E-03
SET TOLERANCE THERMAL_SYMMETRY          0.100000E-02
SET TOLERANCE ENVIRONMENT_VIEW           0.100000E-01
SET TOLERANCE ARC_CURVATURE              5.000000
SET TOLERANCE STRAIGHT_LINE              0.100000E-03
SET TOLERANCE VARIATION_DISCONTINUITY    0.100000E-05
SET TOLERANCE INTERSECT_EXTENSION        0.000000E+00
SET OPTIMISER OPTYPE="OFF" NITOPT=30 CMCTYP="MAXIMUM_BANDWIDTH"
SET SOLVER_TYPE CGTYPE="Default" CGTOL=0.000000E+00 CGMAX=0
SET LOADCASE TITLE LCID1=1 ...
    TITLE1="Loadcase 1"
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MESH VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT LOADING VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SUPPORT VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SLIDE_TABLE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT ACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT DEACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT TS_DEFINITION VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MATERIAL VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT COMPOSITE VALUES OFF
DEFINE POINT PN=1 X=0.000000000000E+00 Y=8.701000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=2 X=4.7500059918891E-02 Y=8.7010024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=4 X=4.7500059918891E-02 Y=7.9910024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=6 X=4.3540059918891E-02 Y=7.9910024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=8 X=4.3540059918891E-02 Y=7.6750024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=10 X=4.7500059918891E-02 Y=7.6750024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=12 X=4.7500059918891E-02 Y=7.3590024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=14 X=4.3540059918891E-02 Y=7.3590024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=16 X=4.3540059918891E-02 Y=7.0430024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=18 X=4.7500059918891E-02 Y=7.0430024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=20 X=4.7500059918891E-02 Y=6.7270024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=22 X=4.3540059918891E-02 Y=6.7270024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=24 X=4.3540059918891E-02 Y=6.4110024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
```

```

DEFINE POINT PN=26 X=4.7500059918891E-02 Y=6.4110024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=28 X=4.7500059918891E-02 Y=6.0950024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=30 X=4.3540059918891E-02 Y=6.0950024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=32 X=4.3540059918891E-02 Y=5.7790024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=34 X=4.7500059918891E-02 Y=5.7790024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=36 X=4.7500059918891E-02 Y=2.5330024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=38 X=4.3940059918891E-02 Y=2.5330024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=40 X=4.3940059918891E-02 Y=2.1770024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=44 X=4.7500100000000E-02 Y=0.0000000000000E+00 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=46 X=4.3540100000000E-02 Y=0.0000000000000E+00 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=48 X=4.3540059918891E-02 Y=1.5830024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=50 X=4.1560059918891E-02 Y=1.5830024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=52 X=4.1560059918891E-02 Y=1.8990024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=54 X=3.9580059918891E-02 Y=1.8990024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=56 X=3.9580059918891E-02 Y=2.6910024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=58 X=4.1960059918891E-02 Y=3.0870024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=60 X=4.1960059918891E-02 Y=4.6700024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=61 X=3.7610059918891E-02 Y=5.3850024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=65 X=0.0000000000000E+00 Y=7.5564200000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=66 X=4.3540059918891E-02 Y=8.7010024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=67 X=0.0000000000000E+00 Y=7.9910000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=71 X=1.2944947315688E-02 Y=7.3590024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=73 X=6.5473370774662E-03 Y=7.5067795672262E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=83 X=2.9388327524025E-02 Y=6.4110024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=84 X=2.0483582502197E-02 Y=7.0430024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=86 X=3.5041193579792E-02 Y=5.7790024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=87 X=3.5041193579792E-02 Y=8.7010024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=89 X=2.9388327524025E-02 Y=8.7010024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=91 X=2.0483582502197E-02 Y=8.7010024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=92 X=1.2944947315688E-02 Y=8.7010024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=93 X=6.5473370774662E-03 Y=8.7017795672262E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=95 X=4.7500059918891E-02 Y=5.3850024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=97 X=4.7500059918891E-02 Y=4.6700024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=99 X=4.7500059918891E-02 Y=3.0870024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=108 X=4.7500059918891E-02 Y=1.5830024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=112 X=4.7500059918891E-02 Y=2.6910024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=114 X=4.7500059918891E-02 Y=1.8990024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=119 X=3.2499599188911E-03 Y=7.5442396510111E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=122 X=9.7473370774662E-03 Y=7.4456168375902E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=125 X=1.6714947315688E-02 Y=7.2218653793039E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=128 X=2.4933582502197E-02 Y=6.7693377914335E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=131 X=3.2218327524025E-02 Y=6.1256309695448E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=132 X=3.9580059918891E-02 Y=2.5330024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=133 X=3.9580100000000E-02 Y=2.1770000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=134 X=4.7500059918891E-02 Y=2.1770024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=135 X=6.5473400000000E-03 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=136 X=1.2944900000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=137 X=0.0000000000000E+00 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=139 X=4.7500100000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=140 X=4.3540100000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=142 X=2.0483600000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=143 X=2.9388300000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=144 X=3.5041200000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=145 X=1.2944900000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=146 X=2.0483600000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=147 X=0.0000000000000E+00 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=148 X=6.5473400000000E-03 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=151 X=4.7500100000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=152 X=4.3540100000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=154 X=2.9388300000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=156 X=3.5041200000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
SET UNMERGABLE POINT 1;2;4;6;8;10;12;14;16;18;20;22 OFF
SET UNMERGABLE POINT 24;26;28;30;32;34;36;38;40;44;46;48 OFF
SET UNMERGABLE POINT 50;52;54;56;58;60;61;65;66;67;71;73 OFF
SET UNMERGABLE POINT 83;84;86;87;89;91;92;93;95;97;99;108 OFF
SET UNMERGABLE POINT 112;114;119;122;125;128;131;132;133;134;135;136 OFF
SET UNMERGABLE POINT 137;139;140;142;143;144;145;146;147;148;151;152 OFF
SET UNMERGABLE POINT 154;156 OFF
DEFINE LINE LN=2 ...
  PN=4 ...
  PN=2
DEFINE LINE LN=3 ...
  PN=4 ...
  PN=6
DEFINE LINE LN=4 ...
  PN=6 ...
  PN=8

```

```
DEFINE LINE LN=5 ...
  PN=8 ...
  PN=10
DEFINE LINE LN=6 ...
  PN=10 ...
  PN=12
DEFINE LINE LN=7 ...
  PN=12 ...
  PN=14
DEFINE LINE LN=8 ...
  PN=14 ...
  PN=16
DEFINE LINE LN=9 ...
  PN=16 ...
  PN=18
DEFINE LINE LN=10 ...
  PN=18 ...
  PN=20
DEFINE LINE LN=11 ...
  PN=20 ...
  PN=22
DEFINE LINE LN=12 ...
  PN=22 ...
  PN=24
DEFINE LINE LN=13 ...
  PN=24 ...
  PN=26
DEFINE LINE LN=14 ...
  PN=26 ...
  PN=28
DEFINE LINE LN=15 ...
  PN=28 ...
  PN=30
DEFINE LINE LN=16 ...
  PN=30 ...
  PN=32
DEFINE LINE LN=17 ...
  PN=32 ...
  PN=34
DEFINE LINE LN=23 ...
  PN=44 ...
  PN=46
DEFINE LINE LN=24 ...
  PN=46 ...
  PN=48
DEFINE LINE LN=25 ...
  PN=48 ...
  PN=50
DEFINE LINE LN=26 ...
  PN=50 ...
  PN=52
DEFINE LINE LN=27 ...
  PN=52 ...
  PN=54
DEFINE LINE LN=29 ...
  PN=56 ...
  PN=58
DEFINE LINE LN=30 ...
  PN=58 ...
  PN=60
DEFINE LINE LN=31 ...
  PN=61 ...
  PN=60
DEFINE LINE LN=35 ...
  PN=2 ...
  PN=66
DEFINE LINE LN=37 ...
  PN=67 ...
  PN=1
DEFINE LINE LN=78 ...
  PN=67 ...
  PN=65
DEFINE LINE LN=88 ...
  PN=1 ...
  PN=93
DEFINE LINE LN=92 ...
  PN=92 ...
```

```

PN=91
DEFINE LINE LN=93 ...
PN=93 ...
PN=92
DEFINE LINE LN=94 ...
PN=91 ...
PN=89
DEFINE LINE LN=97 ...
PN=89 ...
PN=87
DEFINE LINE LN=99 ...
PN=87 ...
PN=66
DEFINE LINE LN=111 ...
PN=34 ...
PN=95
DEFINE LINE LN=112 ...
PN=95 ...
PN=97
DEFINE LINE LN=113 ...
PN=97 ...
PN=99
DEFINE LINE LN=114 ...
PN=99 ...
PN=112
DEFINE LINE LN=119 ...
PN=114 ...
PN=108
DEFINE LINE LN=120 ...
PN=108 ...
PN=44
DEFINE LINE LN=121 ...
PN=112 ...
PN=36
DEFINE LINE ARC_POINT LN=126 ...
PNS=65 ...
PNM=119 ...
PNE=73
DEFINE LINE ARC_POINT LN=127 ...
PNS=73 ...
PNM=122 ...
PNE=71
DEFINE LINE ARC_POINT LN=128 ...
PNS=71 ...
PNM=125 ...
PNE=84
DEFINE LINE ARC_POINT LN=129 ...
PNS=84 ...
PNM=128 ...
PNE=83
DEFINE LINE ARC_POINT LN=130 ...
PNS=83 ...
PNM=131 ...
PNE=86
DEFINE LINE LN=131 ...
PN=86 ...
PN=61
DEFINE LINE LN=138 ...
PN=36 ...
PN=38
DEFINE LINE LN=140 ...
PN=40 ...
PN=134
DEFINE LINE LN=141 ...
PN=38 ...
PN=40
DEFINE LINE LN=142 ...
PN=134 ...
PN=114
DEFINE LINE LN=143 ...
PN=56 ...
PN=132
DEFINE LINE LN=144 ...
PN=132 ...
PN=133
DEFINE LINE LN=145 ...
PN=133 ...

```

```

PN=54
DEFINE LINE LN=146 ...
PN=135 ...
PN=136
DEFINE LINE LN=147 ...
PN=93 ...
PN=135
DEFINE LINE LN=148 ...
PN=92 ...
PN=136
DEFINE LINE LN=149 ...
PN=137 ...
PN=135
DEFINE LINE LN=150 ...
PN=1 ...
PN=137
DEFINE LINE LN=152 ...
PN=139 ...
PN=140
DEFINE LINE LN=153 ...
PN=2 ...
PN=139
DEFINE LINE LN=154 ...
PN=66 ...
PN=140
DEFINE LINE LN=155 ...
PN=136 ...
PN=142
DEFINE LINE LN=157 ...
PN=91 ...
PN=142
DEFINE LINE LN=158 ...
PN=143 ...
PN=144
DEFINE LINE LN=159 ...
PN=89 ...
PN=143
DEFINE LINE LN=160 ...
PN=87 ...
PN=144
DEFINE LINE LN=161 ...
PN=142 ...
PN=143
DEFINE LINE LN=164 ...
PN=144 ...
PN=140
DEFINE LINE LN=165 ...
PN=145 ...
PN=146
DEFINE LINE LN=166 ...
PN=136 ...
PN=145
DEFINE LINE LN=167 ...
PN=142 ...
PN=146
DEFINE LINE LN=168 ...
PN=147 ...
PN=148
DEFINE LINE LN=169 ...
PN=137 ...
PN=147
DEFINE LINE LN=170 ...
PN=135 ...
PN=148
DEFINE LINE LN=171 ...
PN=148 ...
PN=145
DEFINE LINE LN=174 ...
PN=151 ...
PN=152
DEFINE LINE LN=175 ...
PN=139 ...
PN=151
DEFINE LINE LN=176 ...
PN=140 ...
PN=152
DEFINE LINE LN=177 ...

```

```

PN=146 ...
PN=154
DEFINE LINE LN=179 ...
PN=143 ...
PN=154
DEFINE LINE LN=180 ...
PN=154 ...
PN=156
DEFINE LINE LN=182 ...
PN=144 ...
PN=156
DEFINE LINE LN=183 ...
PN=156 ...
PN=152
DEFINE LINE LN=184 ...
PN=83 ...
PN=89
DEFINE LINE LN=185 ...
PN=71 ...
PN=92
DEFINE LINE LN=186 ...
PN=1 ...
PN=2
SET UNMURGABLE LINE 2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13 OFF
SET UNMURGABLE LINE 14;15;16;17;23;24;25;26;27;29;30;31 OFF
SET UNMURGABLE LINE 35;37;78;88;92;93;94;97;99;111;112;113 OFF
SET UNMURGABLE LINE 114;119;120;121;126;127;128;129;130;131;138;140 OFF
SET UNMURGABLE LINE 141;142;143;144;145;146;147;148;149;150;152;153 OFF
SET UNMURGABLE LINE 154;155;157;158;159;160;161;164;165;166;167;168 OFF
SET UNMURGABLE LINE 169;170;171;174;175;176;177;179;180;182;183;184 OFF
SET UNMURGABLE LINE 185;186 OFF
DEFINE SURFACE SN=2 ...
LN=2 ...
LN=3 ...
LN=4 ...
LN=5 ...
LN=6 ...
LN=7 ...
LN=8 ...
LN=9 ...
LN=10 ...
LN=11 ...
LN=12 ...
LN=13 ...
LN=14 ...
LN=15 ...
LN=16 ...
LN=17 ...
LN=111 ...
LN=112 ...
LN=113 ...
LN=114 ...
LN=121 ...
LN=138 ...
LN=141 ...
LN=140 ...
LN=142 ...
LN=119 ...
LN=120 ...
LN=23 ...
LN=24 ...
LN=25 ...
LN=26 ...
LN=27 ...
LN=145 ...
LN=144 ...
LN=143 ...
LN=29 ...
LN=30 ...
LN=31 ...
LN=131 ...
LN=130 ...
LN=184 ...
LN=97 ...
LN=99 ...
LN=35
DEFINE SURFACE SN=3 ...

```



```

LN=88 ...
LN=147 ...
LN=149 ...
LN=150
DEFINE SURFACE SN=4 ...
LN=149 ...
LN=169 ...
LN=168 ...
LN=170
DEFINE SURFACE SN=5 ...
LN=146 ...
LN=166 ...
LN=171 ...
LN=170
DEFINE SURFACE SN=6 ...
LN=93 ...
LN=147 ...
LN=146 ...
LN=148
DEFINE SURFACE SN=7 ...
LN=155 ...
LN=166 ...
LN=165 ...
LN=167
DEFINE SURFACE SN=8 ...
LN=92 ...
LN=148 ...
LN=155 ...
LN=157
DEFINE SURFACE SN=9 ...
LN=161 ...
LN=167 ...
LN=177 ...
LN=179
DEFINE SURFACE SN=10 ...
LN=94 ...
LN=157 ...
LN=161 ...
LN=159
DEFINE SURFACE SN=11 ...
LN=158 ...
LN=179 ...
LN=180 ...
LN=182
DEFINE SURFACE SN=12 ...
LN=97 ...
LN=159 ...
LN=158 ...
LN=160
DEFINE SURFACE SN=13 ...
LN=164 ...
LN=176 ...
LN=183 ...
LN=182
DEFINE SURFACE SN=14 ...
LN=99 ...
LN=154 ...
LN=164 ...
LN=160
DEFINE SURFACE SN=15 ...
LN=152 ...
LN=175 ...
LN=174 ...
LN=176
DEFINE SURFACE SN=16 ...
LN=35 ...
LN=153 ...
LN=152 ...
LN=154
DEFINE SURFACE SN=17 ...
LN=37 ...
LN=78 ...
LN=126 ...
LN=127 ...
LN=185 ...
LN=93 ...
LN=88

```

```

DEFINE SURFACE SN=18 ...
LN=92 ...
LN=94 ...
LN=184 ...
LN=129 ...
LN=128 ...
LN=185
SET UNMERGABLE SURFACE 2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17 OFF
SET UNMERGABLE SURFACE 18 OFF
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=26 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=2 ...
RATIO=2@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE2"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=28 FEATYP=SURFACE LNAME=TXF6 ...
MSHTYP=2 RMULTI=1.400000 DELTA=0.0000000E+00 ...
ANGQUD=0.0000000E+00 ...
TITLE="AlSi"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=29 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=4 ...
RATIO=4@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE4"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=30 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=8 ...
RATIO=8@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE8"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=33 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=3 ...
RATIO=3@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=34 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=1 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE1"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=36 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=6 ...
RATIO=6@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE6"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=37 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=12 ...
RATIO=12@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE12"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=39 FEATYP=SURFACE LNAME=QXF8 ...
MSHTYP=3 RMULTI=1.500000 DELTA=0.0000000E+00 ...
ANGQUD=0.0000000E+00 ...
TITLE="NiCrAl"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=41 FEATYP=SURFACE LNAME=QXF8 ...
MSHTYP=3 RMULTI=1.500000 DELTA=0.0000000E+00 ...
ANGQUD=0.0000000E+00 ...
TITLE="MgZrO3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=42 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=5 ...
RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.8333333 ...
RATIO=1@0.6666667 ...
RATIO=1@0.5000000 ...
RATIO=1@0.3333333 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE5,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=43 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=17 ...
RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.9583333 ...
RATIO=1@0.9166667 ...
RATIO=1@0.8750000 ...
RATIO=1@0.8333333 ...
RATIO=1@0.7916667 ...
RATIO=1@0.7500000 ...
RATIO=1@0.7083333 ...
RATIO=1@0.6666667 ...
RATIO=1@0.6250000 ...
RATIO=1@0.5833333 ...
RATIO=1@0.5416667 ...
RATIO=1@0.5000000 ...
RATIO=1@0.4583333 ...
RATIO=1@0.4166667 ...
RATIO=1@0.3750000 ...
RATIO=1@0.3333333 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE17,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=44 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=6 ...

```

```

RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.8666667 ...
RATIO=1@0.7333333 ...
RATIO=1@0.6000000 ...
RATIO=1@0.4666667 ...
RATIO=1@0.3333333 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE6,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=45 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=10 ...
RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.9259259 ...
RATIO=1@0.8518519 ...
RATIO=1@0.7777778 ...
RATIO=1@0.7037037 ...
RATIO=1@0.6296296 ...
RATIO=1@0.5555556 ...
RATIO=1@0.4814815 ...
RATIO=1@0.4074074 ...
RATIO=1@0.3333333 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE10,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=46 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=10 ...
RATIO=10@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE10"
DEFINE MATERIAL IMAT=4 MATTPF=7 LPTPF=5 ...
K=1.5500000000000000E+02 ...
T=0.0000000000000000E+00 ...
C=9.6000000000000000E+02 ...
H=0.0000000000000000E+00 ...
PHASE=0 ...
TITLE="AlSi"
DEFINE MATERIAL IMAT=5 MATTPF=7 LPTPF=5 ...
K=1.6100000000000000E+01 ...
T=0.0000000000000000E+00 ...
C=7.6400000000000000E+02 ...
H=0.0000000000000000E+00 ...
PHASE=0 ...
TITLE="NiCrAl"
DEFINE MATERIAL IMAT=6 MATTPF=7 LPTPF=5 ...
K=8.0000000000000000E-01 ...
T=0.0000000000000000E+00 ...
C=6.5000000000000000E+02 ...
H=0.0000000000000000E+00 ...
PHASE=0 ...
TITLE="MgZrO3"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=1 LTPF=ENVT ...
T=6.5000000000000000E+02 ...
HC=6.0000000000000000E+02 ...
HR=0.0000000000000000E+00 ...
TITLE="A"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=2 LTPF=ENVT ...
T=5.0000000000000000E+02 ...
HC=3.5000000000000000E+02 ...
HR=0.0000000000000000E+00 ...
TITLE="B"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=3 LTPF=ENVT ...
T=1.8000000000000000E+02 ...
HC=3.0000000000000000E+02 ...
HR=0.0000000000000000E+00 ...
TITLE="C"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=4 LTPF=ENVT ...
T=1.7000000000000000E+02 ...
HC=4.0000000000000000E+02 ...
HR=0.0000000000000000E+00 ...
TITLE="D"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=5 LTPF=ENVT ...
T=1.1000000000000000E+02 ...
HC=4.0000000000000000E+02 ...
HR=0.0000000000000000E+00 ...
TITLE="E"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=6 LTPF=TPDPS ...
PHI=2.0000000000000000E+02 ...
TITLE="F"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=7 LTPF=TPDPS ...
PHI=1.8000000000000000E+02 ...
TITLE="G"

```

```

DEFINE LOAD FIELD ILDG=8 LTPF=TPDPS ...
  PHI=1.70000000000000E+02 ...
  TITLE="H"
DEFINE LOAD FIELD ILDG=9 LTPF=ENVT ...
  T=9.50000000000000E+01 ...
  HC=1.50000000000000E+03 ...
  HR=0.00000000000000E+00 ...
  TITLE="K"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=1 ...
VALUES=0.000000E+00;8.572659E-04;1.904048E-03;2.779778E-03;3.778283E-03; ...
VALUES=4.658113E-03;5.633317E-03;6.519546E-03;7.515752E-03;8.714606E-03; ...
VALUES=9.366420E-03 ...
TITLE="Coordinates (0,000847725,0,0858056,0) to (0,00142028,-0,002056,0)(1)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=2 ...
VALUES=2.056667E+02;2.055476E+02;2.054115E+02;2.053059E+02;2.051951E+02; ...
VALUES=2.051064E+02;2.050185E+02;2.049489E+02;2.048827E+02;2.048226E+02; ...
VALUES=2.047991E+02 ...
TITLE="PHI - 1:Loadcase 1(2)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=3 ...
VALUES=9.134863E-03;8.068172E-03;7.481363E-03;5.832565E-03;5.805776E-03; ...
VALUES=4.165668E-03;3.916168E-03;2.198593E-03;1.988045E-03;1.443372E-04; ...
VALUES=0.000000E+00 ...
TITLE="Coordinates (0,00152438,0,0848167,0) to (0,00100388,-0,00481469,0)(3)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=4 ...
VALUES=-4.804640E+03;-7.358905E+03;-8.854319E+03;-1.224639E+04; ...
VALUES=-1.230287E+04;-1.532832E+04;-1.578747E+04;-1.856149E+04; ...
VALUES=-1.890934E+04;-2.160908E+04;-2.183070E+04 ...
TITLE="qy - 1:Loadcase 1(4)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=5 ...
VALUES=9.469317E-03;9.095649E-03;7.486738E-03;6.897452E-03;5.494928E-03; ...
VALUES=4.903490E-03;3.680583E-03;3.057623E-03;1.851637E-03;1.179237E-03; ...
VALUES=0.000000E+00 ...
TITLE="Coordinates (0,000560586,0,0852985,0) to (0,000194161,-0,00677886,0)(5)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=6 ...
VALUES=2.012515E+02;2.012638E+02;2.013334E+02;2.013669E+02;2.014594E+02; ...
VALUES=2.015038E+02;2.016060E+02;2.016627E+02;2.017812E+02;2.018521E+02; ...
VALUES=2.019839E+02 ...
TITLE="PHI - 1:Loadcase 1(6)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=7 ...
VALUES=9.268158E-03;8.481002E-03;7.485181E-03;6.261395E-03;5.682346E-03; ...
VALUES=4.463551E-03;3.822225E-03;2.545915E-03;1.933417E-03;5.635890E-04; ...
VALUES=0.000000E+00 ...
TITLE="Coordinates (0,0011364,0,0855602,0) to (0,000717625,-0,00829691,0)(7)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=8 ...
VALUES=-4.551458E+03;-5.999051E+03;-7.952449E+03;-9.827183E+03; ...
VALUES=-1.076349E+04;-1.244083E+04;-1.334153E+04;-1.487551E+04; ...
VALUES=-1.564402E+04;-1.713217E+04;-1.778623E+04 ...
TITLE="qy - 1:Loadcase 1(8)"
ASSIGN MESH LINE LN=2 IMSH=44
ASSIGN LOADING LINE LN=2 ILDG=2 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=3 IMSH=29
ASSIGN LOADING LINE LN=3 ILDG=2 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=4 IMSH=33
ASSIGN LOADING LINE LN=4 ILDG=6 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=5 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=5 ILDG=3 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=6 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=6 ILDG=3 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=7 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=7 ILDG=3 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=8 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=8 ILDG=7 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=9 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=9 ILDG=4 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=10 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=10 ILDG=4 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=11 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=11 ILDG=4 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=12 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=12 ILDG=8 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=13 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=13 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=14 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=14 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=15 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=15 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=16 IMSH=26

```

ASSIGN LOADING LINE LN=16 ILDG=8 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=17 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=17 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=23 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=23 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=24 IMSH=30
ASSIGN LOADING LINE LN=24 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=25 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=25 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=26 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=26 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=27 IMSH=34
ASSIGN LOADING LINE LN=27 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=29 IMSH=33
ASSIGN LOADING LINE LN=29 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=30 IMSH=46
ASSIGN LOADING LINE LN=30 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=31 IMSH=29
ASSIGN LOADING LINE LN=31 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=35 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=37 IMSH=42
ASSIGN MESH LINE LN=78 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=88 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=92 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=93 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=94 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=97 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=99 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=111 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=111 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=112 IMSH=33
ASSIGN LOADING LINE LN=112 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=113 IMSH=30
ASSIGN LOADING LINE LN=113 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=114 IMSH=33
ASSIGN LOADING LINE LN=114 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=119 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=119 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=120 IMSH=30
ASSIGN LOADING LINE LN=120 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=121 IMSH=34
ASSIGN LOADING LINE LN=121 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN LOADING LINE LN=126 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=127 IMSH=29
ASSIGN LOADING LINE LN=127 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=128 IMSH=36
ASSIGN LOADING LINE LN=128 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=129 IMSH=36
ASSIGN LOADING LINE LN=129 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=130 IMSH=36
ASSIGN LOADING LINE LN=130 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=131 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=131 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=138 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=138 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=140 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=140 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=141 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=141 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=142 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=142 ILDG=5 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=143 IMSH=34
ASSIGN LOADING LINE LN=143 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=144 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=144 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=145 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=145 ILDG=9 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=146 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=147 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=148 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=149 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=150 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=152 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=153 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=153 ILDG=2 LCID=1 FACTOR=1.00000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=154 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=155 IMSH=37

```

ASSIGN MESH LINE LN=157 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=158 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=159 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=160 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=161 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=164 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=165 IMSH=37
ASSIGN LOADING LINE LN=165 ILDG=1 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=166 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=167 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=168 IMSH=37
ASSIGN LOADING LINE LN=168 ILDG=1 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=169 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=170 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=171 IMSH=37
ASSIGN LOADING LINE LN=171 ILDG=1 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=174 IMSH=36
ASSIGN LOADING LINE LN=174 ILDG=1 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=175 IMSH=26
ASSIGN LOADING LINE LN=175 ILDG=2 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=176 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=177 IMSH=37
ASSIGN LOADING LINE LN=177 ILDG=1 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=179 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=180 IMSH=37
ASSIGN LOADING LINE LN=180 ILDG=1 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=182 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=183 IMSH=37
ASSIGN LOADING LINE LN=183 ILDG=1 LCID=1 FACTOR=1.000000000000000E+00
ASSIGN MESH LINE LN=184 IMSH=43
ASSIGN MESH LINE LN=185 IMSH=45
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=2 IMAT=4
ASSIGN MESH SURFACE SN=2 IMSH=28
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=3 IMAT=5
ASSIGN MESH SURFACE SN=3 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=4 IMAT=6
ASSIGN MESH SURFACE SN=4 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=5 IMAT=6
ASSIGN MESH SURFACE SN=5 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=6 IMAT=5
ASSIGN MESH SURFACE SN=6 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=7 IMAT=6
ASSIGN MESH SURFACE SN=7 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=8 IMAT=5
ASSIGN MESH SURFACE SN=8 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=9 IMAT=6
ASSIGN MESH SURFACE SN=9 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=10 IMAT=5
ASSIGN MESH SURFACE SN=10 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=11 IMAT=6
ASSIGN MESH SURFACE SN=11 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=12 IMAT=5
ASSIGN MESH SURFACE SN=12 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=13 IMAT=6
ASSIGN MESH SURFACE SN=13 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=14 IMAT=5
ASSIGN MESH SURFACE SN=14 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=15 IMAT=6
ASSIGN MESH SURFACE SN=15 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=16 IMAT=5
ASSIGN MESH SURFACE SN=16 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=17 IMAT=4
ASSIGN MESH SURFACE SN=17 IMSH=28
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=18 IMAT=4
ASSIGN MESH SURFACE SN=18 IMSH=28
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MESH VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT LOADING VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SUPPORT VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SLIDE_TABLE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT ACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT DEACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT TS_DEFINITION VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MATERIAL VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT COMPOSITE VALUES OFF
SET MERGE EXACT

```

Αρχείο mech.cmd

```
! Version 13.5-7      Date 01-05-11 Time 03:57
SET OPTION          2   48   61  117  118  123  146  157  235  250 ...
                   253  278  319  324  380

SET MERGE OFF
SET MERGE ALWAYS
SET UNMERGABLE OFF
SET UNITS LFORCE="N"  LLENGT="m"  LMASS="t"  LTIME="s"  LTEMP="C"
SET JOINT_TOTAL OFF
SET MESH           4
SET TOLERANCE EQUIVALENCE                0.100000E-05
SET TOLERANCE INTERSECT                  0.100000E-07
SET TOLERANCE MERGE                      0.100000E-05
SET TOLERANCE PLANAR_SURFACE             0.100000E-05
SET TOLERANCE TANGENT_MERGE              0.100000E-05
SET TOLERANCE TWIST_MERGE                0.100000E-03
SET TOLERANCE SURFACE_INTERSECT         0.100000E-03
SET TOLERANCE INTERSECT_CONVERGENCE_LIMIT 0.100000E-09
SET TOLERANCE FILLET                     0.100000E-03
SET TOLERANCE SPLIT                      0.100000E-02
SET TOLERANCE CHORD                      0.100000E-03
SET TOLERANCE THERMAL_SYMMETRY          0.100000E-02
SET TOLERANCE ENVIRONMENT_VIEW           0.100000E-01
SET TOLERANCE ARC_CURVATURE              5.00000
SET TOLERANCE STRAIGHT_LINE              0.100000E-03
SET TOLERANCE VARIATION_DISCONTINUITY    0.100000E-05
SET TOLERANCE INTERSECT_EXTENSION        0.000000E+00
SET OPTIMISER OPTYPE="OFF" NITOPT=30 CMCTYP="MAXIMUM_BANDWIDTH"
SET SOLVER_TYPE CGTYPE="Default" CGTOL=0.000000E+00 CGMAX=0
SET LOADCASE TITLE LCID1=1 ...
  TITLE1="Loadcase 1"
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MESH VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT LOADING VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SUPPORT VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SLIDE_TABLE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT ACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT DEACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT TS_DEFINITION VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MATERIAL VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT COMPOSITE VALUES OFF
DEFINE POINT PN=1 X=0.000000000000E+00 Y=8.70100000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=2 X=4.7500059918891E-02 Y=8.7010024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=4 X=4.7500059918891E-02 Y=7.9910024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=6 X=4.3540059918891E-02 Y=7.9910024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=8 X=4.3540059918891E-02 Y=7.6750024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=10 X=4.7500059918891E-02 Y=7.6750024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=12 X=4.7500059918891E-02 Y=7.3590024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=14 X=4.3540059918891E-02 Y=7.3590024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=16 X=4.3540059918891E-02 Y=7.0430024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=18 X=4.7500059918891E-02 Y=7.0430024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=20 X=4.7500059918891E-02 Y=6.7270024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=22 X=4.3540059918891E-02 Y=6.7270024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=24 X=4.3540059918891E-02 Y=6.4110024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=26 X=4.7500059918891E-02 Y=6.4110024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=28 X=4.7500059918891E-02 Y=6.0950024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=30 X=4.3540059918891E-02 Y=6.0950024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=32 X=4.3540059918891E-02 Y=5.7790024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=34 X=4.7500059918891E-02 Y=5.7790024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=36 X=4.7500059918891E-02 Y=2.5330024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=38 X=4.3940059918891E-02 Y=2.5330024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=40 X=4.3940059918891E-02 Y=2.1770024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=44 X=4.7500100000000E-02 Y=0.000000000000E+00 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=46 X=4.3540100000000E-02 Y=0.000000000000E+00 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=48 X=4.3540059918891E-02 Y=1.5830024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=50 X=4.1560059918891E-02 Y=1.5830024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=52 X=4.1560059918891E-02 Y=1.8990024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=54 X=3.9580059918891E-02 Y=1.8990024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=56 X=3.9580059918891E-02 Y=2.6910024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=58 X=4.1960059918891E-02 Y=3.0870024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=60 X=4.1960059918891E-02 Y=4.6700024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=61 X=3.7610059918891E-02 Y=5.3850024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
```

```

DEFINE POINT PN=65 X=0.000000000000E+00 Y=7.556420000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=66 X=4.3540059918891E-02 Y=8.7010024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=67 X=0.000000000000E+00 Y=7.991000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=71 X=1.2944947315688E-02 Y=7.3590024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=73 X=6.5473370774662E-03 Y=7.5067795672262E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=83 X=2.9388327524025E-02 Y=6.4110024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=84 X=2.0483582502197E-02 Y=7.0430024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=86 X=3.5041193579792E-02 Y=5.7790024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=87 X=3.5041193579792E-02 Y=8.7010024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=89 X=2.9388327524025E-02 Y=8.7010024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=91 X=2.0483582502197E-02 Y=8.7010024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=92 X=1.2944947315688E-02 Y=8.7010024650824E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=93 X=6.5473370774662E-03 Y=8.7017795672262E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=95 X=4.7500059918891E-02 Y=5.3850024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=97 X=4.7500059918891E-02 Y=6.700024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=99 X=4.7500059918891E-02 Y=3.0870024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=108 X=4.7500059918891E-02 Y=1.5830024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=112 X=4.7500059918891E-02 Y=2.6910024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=114 X=4.7500059918891E-02 Y=1.8990024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=119 X=3.2499599188911E-03 Y=7.5442396510111E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=122 X=9.7473370774662E-03 Y=7.4456168375902E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=125 X=1.6714947315688E-02 Y=7.2218653793039E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=128 X=2.4933582502197E-02 Y=6.7693377914335E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=131 X=3.2218327524025E-02 Y=6.1256309695448E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=132 X=3.9580059918891E-02 Y=2.5330024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=133 X=3.9580100000000E-02 Y=2.1770000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=134 X=4.7500059918891E-02 Y=2.1770024650825E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=135 X=6.5473400000000E-03 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=136 X=1.2944900000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=137 X=0.0000000000000E+00 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=139 X=4.7500100000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=140 X=4.3540100000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=142 X=2.0483600000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=143 X=2.9388300000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=144 X=3.5041200000000E-02 Y=8.7160000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=145 X=1.2944900000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=146 X=2.0483600000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=147 X=0.0000000000000E+00 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=148 X=6.5473400000000E-03 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=151 X=4.7500100000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=152 X=4.3540100000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=154 X=2.9388300000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
DEFINE POINT PN=156 X=3.5041200000000E-02 Y=8.7310000000000E-02 Z=0.000000000000E+00
SET UNMURGABLE POINT 1;2;4;6;8;10;12;14;16;18;20;22 OFF
SET UNMURGABLE POINT 24;26;28;30;32;34;36;38;40;44;46;48 OFF
SET UNMURGABLE POINT 50;52;54;56;58;60;61;65;66;67;71;73 OFF
SET UNMURGABLE POINT 83;84;86;87;89;91;92;93;95;97;99;108 OFF
SET UNMURGABLE POINT 112;114;119;122;125;128;131;132;133;134;135;136 OFF
SET UNMURGABLE POINT 137;139;140;142;143;144;145;146;147;148;151;152 OFF
SET UNMURGABLE POINT 154;156 OFF
DEFINE LINE LN=2 ...
  PN=4 ...
  PN=2
DEFINE LINE LN=3 ...
  PN=4 ...
  PN=6
DEFINE LINE LN=4 ...
  PN=6 ...
  PN=8
DEFINE LINE LN=5 ...
  PN=8 ...
  PN=10
DEFINE LINE LN=6 ...
  PN=10 ...
  PN=12
DEFINE LINE LN=7 ...
  PN=12 ...
  PN=14
DEFINE LINE LN=8 ...
  PN=14 ...
  PN=16
DEFINE LINE LN=9 ...
  PN=16 ...
  PN=18
DEFINE LINE LN=10 ...
  PN=18 ...
  PN=20

```



```
DEFINE LINE LN=11 ...
  PN=20 ...
  PN=22
DEFINE LINE LN=12 ...
  PN=22 ...
  PN=24
DEFINE LINE LN=13 ...
  PN=24 ...
  PN=26
DEFINE LINE LN=14 ...
  PN=26 ...
  PN=28
DEFINE LINE LN=15 ...
  PN=28 ...
  PN=30
DEFINE LINE LN=16 ...
  PN=30 ...
  PN=32
DEFINE LINE LN=17 ...
  PN=32 ...
  PN=34
DEFINE LINE LN=23 ...
  PN=44 ...
  PN=46
DEFINE LINE LN=24 ...
  PN=46 ...
  PN=48
DEFINE LINE LN=25 ...
  PN=48 ...
  PN=50
DEFINE LINE LN=26 ...
  PN=50 ...
  PN=52
DEFINE LINE LN=27 ...
  PN=52 ...
  PN=54
DEFINE LINE LN=29 ...
  PN=56 ...
  PN=58
DEFINE LINE LN=30 ...
  PN=58 ...
  PN=60
DEFINE LINE LN=31 ...
  PN=61 ...
  PN=60
DEFINE LINE LN=35 ...
  PN=2 ...
  PN=66
DEFINE LINE LN=37 ...
  PN=67 ...
  PN=1
DEFINE LINE LN=78 ...
  PN=67 ...
  PN=65
DEFINE LINE LN=88 ...
  PN=1 ...
  PN=93
DEFINE LINE LN=92 ...
  PN=92 ...
  PN=91
DEFINE LINE LN=93 ...
  PN=93 ...
  PN=92
DEFINE LINE LN=94 ...
  PN=91 ...
  PN=89
DEFINE LINE LN=97 ...
  PN=89 ...
  PN=87
DEFINE LINE LN=99 ...
  PN=87 ...
  PN=66
DEFINE LINE LN=111 ...
  PN=34 ...
  PN=95
DEFINE LINE LN=112 ...
  PN=95 ...
```

```

PN=97
DEFINE LINE LN=113 ...
PN=97 ...
PN=99
DEFINE LINE LN=114 ...
PN=99 ...
PN=112
DEFINE LINE LN=119 ...
PN=114 ...
PN=108
DEFINE LINE LN=120 ...
PN=108 ...
PN=44
DEFINE LINE LN=121 ...
PN=112 ...
PN=36
DEFINE LINE ARC_POINT LN=126 ...
PNS=65 ...
PNM=119 ...
PNE=73
DEFINE LINE ARC_POINT LN=127 ...
PNS=73 ...
PNM=122 ...
PNE=71
DEFINE LINE ARC_POINT LN=128 ...
PNS=71 ...
PNM=125 ...
PNE=84
DEFINE LINE ARC_POINT LN=129 ...
PNS=84 ...
PNM=128 ...
PNE=83
DEFINE LINE ARC_POINT LN=130 ...
PNS=83 ...
PNM=131 ...
PNE=86
DEFINE LINE LN=131 ...
PN=86 ...
PN=61
DEFINE LINE LN=138 ...
PN=36 ...
PN=38
DEFINE LINE LN=140 ...
PN=40 ...
PN=134
DEFINE LINE LN=141 ...
PN=38 ...
PN=40
DEFINE LINE LN=142 ...
PN=134 ...
PN=114
DEFINE LINE LN=143 ...
PN=56 ...
PN=132
DEFINE LINE LN=144 ...
PN=132 ...
PN=133
DEFINE LINE LN=145 ...
PN=133 ...
PN=54
DEFINE LINE LN=146 ...
PN=135 ...
PN=136
DEFINE LINE LN=147 ...
PN=93 ...
PN=135
DEFINE LINE LN=148 ...
PN=92 ...
PN=136
DEFINE LINE LN=149 ...
PN=137 ...
PN=135
DEFINE LINE LN=150 ...
PN=1 ...
PN=137
DEFINE LINE LN=152 ...
PN=139 ...

```

PN=140
DEFINE LINE LN=153 ...
PN=2 ...
PN=139
DEFINE LINE LN=154 ...
PN=66 ...
PN=140
DEFINE LINE LN=155 ...
PN=136 ...
PN=142
DEFINE LINE LN=157 ...
PN=91 ...
PN=142
DEFINE LINE LN=158 ...
PN=143 ...
PN=144
DEFINE LINE LN=159 ...
PN=89 ...
PN=143
DEFINE LINE LN=160 ...
PN=87 ...
PN=144
DEFINE LINE LN=161 ...
PN=142 ...
PN=143
DEFINE LINE LN=164 ...
PN=144 ...
PN=140
DEFINE LINE LN=165 ...
PN=145 ...
PN=146
DEFINE LINE LN=166 ...
PN=136 ...
PN=145
DEFINE LINE LN=167 ...
PN=142 ...
PN=146
DEFINE LINE LN=168 ...
PN=147 ...
PN=148
DEFINE LINE LN=169 ...
PN=137 ...
PN=147
DEFINE LINE LN=170 ...
PN=135 ...
PN=148
DEFINE LINE LN=171 ...
PN=148 ...
PN=145
DEFINE LINE LN=174 ...
PN=151 ...
PN=152
DEFINE LINE LN=175 ...
PN=139 ...
PN=151
DEFINE LINE LN=176 ...
PN=140 ...
PN=152
DEFINE LINE LN=177 ...
PN=146 ...
PN=154
DEFINE LINE LN=179 ...
PN=143 ...
PN=154
DEFINE LINE LN=180 ...
PN=154 ...
PN=156
DEFINE LINE LN=182 ...
PN=144 ...
PN=156
DEFINE LINE LN=183 ...
PN=156 ...
PN=152
DEFINE LINE LN=184 ...
PN=83 ...
PN=89
DEFINE LINE LN=185 ...

```

PN=71 ...
PN=92
DEFINE LINE LN=186 ...
PN=1 ...
PN=2
SET UNMURGABLE LINE 2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13 OFF
SET UNMURGABLE LINE 14;15;16;17;23;24;25;26;27;29;30;31 OFF
SET UNMURGABLE LINE 35;37;78;88;92;93;94;97;99;111;112;113 OFF
SET UNMURGABLE LINE 114;119;120;121;126;127;128;129;130;131;138;140 OFF
SET UNMURGABLE LINE 141;142;143;144;145;146;147;148;149;150;152;153 OFF
SET UNMURGABLE LINE 154;155;157;158;159;160;161;164;165;166;167;168 OFF
SET UNMURGABLE LINE 169;170;171;174;175;176;177;179;180;182;183;184 OFF
SET UNMURGABLE LINE 185;186 OFF
DEFINE SURFACE SN=2 ...
LN=2 ...
LN=3 ...
LN=4 ...
LN=5 ...
LN=6 ...
LN=7 ...
LN=8 ...
LN=9 ...
LN=10 ...
LN=11 ...
LN=12 ...
LN=13 ...
LN=14 ...
LN=15 ...
LN=16 ...
LN=17 ...
LN=111 ...
LN=112 ...
LN=113 ...
LN=114 ...
LN=121 ...
LN=138 ...
LN=141 ...
LN=140 ...
LN=142 ...
LN=119 ...
LN=120 ...
LN=23 ...
LN=24 ...
LN=25 ...
LN=26 ...
LN=27 ...
LN=145 ...
LN=144 ...
LN=143 ...
LN=29 ...
LN=30 ...
LN=31 ...
LN=131 ...
LN=130 ...
LN=184 ...
LN=97 ...
LN=99 ...
LN=35
DEFINE SURFACE SN=3 ...
LN=88 ...
LN=147 ...
LN=149 ...
LN=150
DEFINE SURFACE SN=4 ...
LN=149 ...
LN=169 ...
LN=168 ...
LN=170
DEFINE SURFACE SN=5 ...
LN=146 ...
LN=166 ...
LN=171 ...
LN=170
DEFINE SURFACE SN=6 ...
LN=93 ...
LN=147 ...
LN=146 ...

```

```

LN=148
DEFINE SURFACE SN=7 ...
LN=155 ...
LN=166 ...
LN=165 ...
LN=167
DEFINE SURFACE SN=8 ...
LN=92 ...
LN=148 ...
LN=155 ...
LN=157
DEFINE SURFACE SN=9 ...
LN=161 ...
LN=167 ...
LN=177 ...
LN=179
DEFINE SURFACE SN=10 ...
LN=94 ...
LN=157 ...
LN=161 ...
LN=159
DEFINE SURFACE SN=11 ...
LN=158 ...
LN=179 ...
LN=180 ...
LN=182
DEFINE SURFACE SN=12 ...
LN=97 ...
LN=159 ...
LN=158 ...
LN=160
DEFINE SURFACE SN=13 ...
LN=164 ...
LN=176 ...
LN=183 ...
LN=182
DEFINE SURFACE SN=14 ...
LN=99 ...
LN=154 ...
LN=164 ...
LN=160
DEFINE SURFACE SN=15 ...
LN=152 ...
LN=175 ...
LN=174 ...
LN=176
DEFINE SURFACE SN=16 ...
LN=35 ...
LN=153 ...
LN=152 ...
LN=154
DEFINE SURFACE SN=17 ...
LN=37 ...
LN=78 ...
LN=126 ...
LN=127 ...
LN=185 ...
LN=93 ...
LN=88
DEFINE SURFACE SN=18 ...
LN=92 ...
LN=94 ...
LN=184 ...
LN=129 ...
LN=128 ...
LN=185
SET UNMERGABLE SURFACE 2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17 OFF
SET UNMERGABLE SURFACE 18 OFF
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=26 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=2 ...
RATIO=2@1.000000 ...
DELTA=0.0000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE2"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=28 FEATYP=SURFACE LNAME=TAX6 ...
MSHTYP=2 RMULTI=1.400000 DELTA=0.0000000E+00 ...
ANGQUD=0.0000000E+00 ...
TITLE="AlSi"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=29 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=4 ...

```

```

RATIO=4@1.000000 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE4"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=30 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=8 ...
RATIO=8@1.000000 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE8"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=33 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=3 ...
RATIO=3@1.000000 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=34 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=1 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE1"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=36 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=6 ...
RATIO=6@1.000000 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE6"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=37 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=12 ...
RATIO=12@1.000000 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE12"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=39 FEATYP=SURFACE LNAME=QAX8 ...
MSHTYP=3 RMULTI=1.500000 DELTA=0.000000E+00 ...
ANGQUD=0.000000E+00 ...
TITLE="NiCrAl"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=41 FEATYP=SURFACE LNAME=QAX8 ...
MSHTYP=3 RMULTI=1.500000 DELTA=0.000000E+00 ...
ANGQUD=0.000000E+00 ...
TITLE="MgZrO3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=42 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=5 ...
RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.8333333 ...
RATIO=1@0.6666667 ...
RATIO=1@0.5000000 ...
RATIO=1@0.3333333 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE5,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=43 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=17 ...
RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.9583333 ...
RATIO=1@0.9166667 ...
RATIO=1@0.8750000 ...
RATIO=1@0.8333333 ...
RATIO=1@0.7916667 ...
RATIO=1@0.7500000 ...
RATIO=1@0.7083333 ...
RATIO=1@0.6666667 ...
RATIO=1@0.6250000 ...
RATIO=1@0.5833333 ...
RATIO=1@0.5416667 ...
RATIO=1@0.5000000 ...
RATIO=1@0.4583333 ...
RATIO=1@0.4166667 ...
RATIO=1@0.3750000 ...
RATIO=1@0.3333333 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE17,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=44 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=6 ...
RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.8666667 ...
RATIO=1@0.7333333 ...
RATIO=1@0.6000000 ...
RATIO=1@0.4666667 ...
RATIO=1@0.3333333 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE6,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=45 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=10 ...
RATIO=1@1.000000 ...
RATIO=1@0.9259259 ...
RATIO=1@0.8518519 ...
RATIO=1@0.7777778 ...
RATIO=1@0.7037037 ...
RATIO=1@0.6296296 ...
RATIO=1@0.5555556 ...
RATIO=1@0.4814815 ...
RATIO=1@0.4074074 ...

```

```

RATIO=1@0.333333 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE10,3"
DEFINE MESH BY_NAME TITLE IMSH=46 FEATYP=LINE LNAME=NULL NMBELM=10 ...
RATIO=10@1.000000 ...
DELTA=0.000000E+00 THYS=0 THYE=0 THZS=0 THZE=0 ...
TITLE="LINE10"
DEFINE MATERIAL IMAT=7 MATTYP=1 LPTPF=1 ...
E=6.900000000000000E+10 ...
NU=3.300000000000000E-01 ...
RHO=0.000000000000000E+00 ...
ALPA=0.000000000000000E+00 ...
AR=0.000000000000000E+00 ...
BR=0.000000000000000E+00 ...
T=0.000000000000000E+00 ...
TITLE="AlSi (elastic)"
DEFINE MATERIAL IMAT=9 MATTYP=1 LPTPF=1 ...
E=6.900000000000000E+10 ...
NU=3.300000000000000E-01 ...
RHO=0.000000000000000E+00 ...
ALPA=2.100000000000000E-05 ...
AR=0.000000000000000E+00 ...
BR=0.000000000000000E+00 ...
T=0.000000000000000E+00 ...
TITLE="AlSi_1 (elastic)"
DEFINE MATERIAL IMAT=11 MATTYP=1 LPTPF=1 ...
E=9.000000000000000E+10 ...
NU=2.700000000000000E-01 ...
RHO=0.000000000000000E+00 ...
ALPA=1.200000000000000E-05 ...
AR=0.000000000000000E+00 ...
BR=0.000000000000000E+00 ...
T=0.000000000000000E+00 ...
TITLE="NiCrAl_1 (elastic)"
DEFINE MATERIAL IMAT=13 MATTYP=1 LPTPF=1 ...
E=4.600000000000000E+10 ...
NU=2.000000000000000E-01 ...
RHO=0.000000000000000E+00 ...
ALPA=8.000000000000000E-06 ...
AR=0.000000000000000E+00 ...
BR=0.000000000000000E+00 ...
T=0.000000000000000E+00 ...
TITLE="MgZrO3_1 (elastic)"
DEFINE MATERIAL SET IMAT=8 LPTPF=801 ...
TITLE="AlSi" ...
ELSDTS=9 ...
PLSDTS=0 ...
USEPLS=N ...
CRPDTS=0 ...
USECRP=N ...
DAMDTS=0 ...
USEDAM=N ...
VISDTS=0 ...
USEVIS=N ...
TPHDTS=0 ...
SETPH=N
DEFINE MATERIAL SET IMAT=10 LPTPF=801 ...
TITLE="NiCrAl" ...
ELSDTS=11 ...
PLSDTS=0 ...
USEPLS=N ...
CRPDTS=0 ...
USECRP=N ...
DAMDTS=0 ...
USEDAM=N ...
VISDTS=0 ...
USEVIS=N ...
TPHDTS=0 ...
SETPH=N
DEFINE MATERIAL SET IMAT=12 LPTPF=801 ...
TITLE="MgZrO3" ...
ELSDTS=13 ...
PLSDTS=0 ...
USEPLS=N ...
CRPDTS=0 ...
USECRP=N ...
DAMDTS=0 ...

```

```

USEDAM=N ...
VISDTS=0 ...
USEVIS=N ...
TPHDTS=0 ...
USETPH=N
DEFINE SUPPORT STRUCTURAL ISUP=2 ...
U=R ...
V=F ...
W=F ...
THX=F ...
THY=F ...
THZ=F ...
THL1=F ...
THL2=F ...
PHI=F ...
PRES=F ...
IFTYPE="ALL" ...
TITLE="ux=0"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=1 ...
VALUES=0.000000E+00;8.572659E-04;1.904048E-03;2.779778E-03;3.778283E-03; ...
VALUES=4.658113E-03;5.633317E-03;6.519546E-03;7.515752E-03;8.714606E-03; ...
VALUES=9.366420E-03 ...
TITLE="Coordinates (0,000847725,0,0858056,0) to (0,00142028,-0,002056,0)(1)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=2 ...
VALUES=2.056667E+02;2.055476E+02;2.054115E+02;2.053059E+02;2.051951E+02; ...
VALUES=2.051064E+02;2.050185E+02;2.049489E+02;2.048827E+02;2.048226E+02; ...
VALUES=2.047991E+02 ...
TITLE="PHI - 1:Loadcase 1(2)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=3 ...
VALUES=9.134863E-03;8.068172E-03;7.481363E-03;5.832565E-03;5.805776E-03; ...
VALUES=4.165668E-03;3.916168E-03;2.198593E-03;1.988045E-03;1.443372E-04; ...
VALUES=0.000000E+00 ...
TITLE="Coordinates (0,00152438,0,0848167,0) to (0,00100388,-0,00481469,0)(3)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=4 ...
VALUES=-4.804640E+03;-7.358905E+03;-8.854319E+03;-1.224639E+04; ...
VALUES=-1.230287E+04;-1.532832E+04;-1.578747E+04;-1.856149E+04; ...
VALUES=-1.890934E+04;-2.160908E+04;-2.183070E+04 ...
TITLE="qy - 1:Loadcase 1(4)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=5 ...
VALUES=9.469317E-03;9.095649E-03;7.486738E-03;6.897452E-03;5.494928E-03; ...
VALUES=4.903490E-03;3.680583E-03;3.057623E-03;1.851637E-03;1.179237E-03; ...
VALUES=0.000000E+00 ...
TITLE="Coordinates (0,000560586,0,0852985,0) to (0,000194161,-0,00677886,0)(5)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=6 ...
VALUES=2.012515E+02;2.012638E+02;2.013334E+02;2.013669E+02;2.014594E+02; ...
VALUES=2.015038E+02;2.016060E+02;2.016627E+02;2.017812E+02;2.018521E+02; ...
VALUES=2.019839E+02 ...
TITLE="PHI - 1:Loadcase 1(6)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=7 ...
VALUES=9.268158E-03;8.481002E-03;7.485181E-03;6.261395E-03;5.682346E-03; ...
VALUES=4.463551E-03;3.822225E-03;2.545915E-03;1.933417E-03;5.635890E-04; ...
VALUES=0.000000E+00 ...
TITLE="Coordinates (0,0011364,0,0855602,0) to (0,000717625,-0,00829691,0)(7)"
DEFINE DATASET TITLE IDAT=8 ...
VALUES=-4.551458E+03;-5.999051E+03;-7.952449E+03;-9.827183E+03; ...
VALUES=-1.076349E+04;-1.244083E+04;-1.334153E+04;-1.487551E+04; ...
VALUES=-1.564402E+04;-1.713217E+04;-1.778623E+04 ...
TITLE="qy - 1:Loadcase 1(8)"
ASSIGN MESH LINE LN=2 IMSH=44
ASSIGN MESH LINE LN=3 IMSH=29
ASSIGN MESH LINE LN=4 IMSH=33
ASSIGN SUPPORT LINE LN=4 ISUP=2 LCID=1
ASSIGN MESH LINE LN=5 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=6 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=7 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=8 IMSH=26
ASSIGN SUPPORT LINE LN=8 ISUP=2 LCID=1
ASSIGN MESH LINE LN=9 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=10 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=11 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=12 IMSH=26
ASSIGN SUPPORT LINE LN=12 ISUP=2 LCID=1
ASSIGN MESH LINE LN=13 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=14 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=15 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=16 IMSH=26
ASSIGN SUPPORT LINE LN=16 ISUP=2 LCID=1

```


ASSIGN MESH LINE LN=17 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=23 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=24 IMSH=30
ASSIGN MESH LINE LN=25 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=26 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=27 IMSH=34
ASSIGN MESH LINE LN=29 IMSH=33
ASSIGN MESH LINE LN=30 IMSH=46
ASSIGN MESH LINE LN=31 IMSH=29
ASSIGN MESH LINE LN=35 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=37 IMSH=42
ASSIGN MESH LINE LN=78 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=88 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=92 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=93 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=94 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=97 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=99 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=111 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=112 IMSH=33
ASSIGN MESH LINE LN=113 IMSH=30
ASSIGN MESH LINE LN=114 IMSH=33
ASSIGN MESH LINE LN=119 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=120 IMSH=30
ASSIGN MESH LINE LN=121 IMSH=34
ASSIGN MESH LINE LN=127 IMSH=29
ASSIGN MESH LINE LN=128 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=129 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=130 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=131 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=138 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=140 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=141 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=142 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=143 IMSH=34
ASSIGN MESH LINE LN=144 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=145 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=146 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=147 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=148 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=149 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=150 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=152 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=153 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=154 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=155 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=157 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=158 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=159 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=160 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=161 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=164 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=165 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=166 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=167 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=168 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=169 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=170 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=171 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=174 IMSH=36
ASSIGN MESH LINE LN=175 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=176 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=177 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=179 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=180 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=182 IMSH=26
ASSIGN MESH LINE LN=183 IMSH=37
ASSIGN MESH LINE LN=184 IMSH=43
ASSIGN MESH LINE LN=185 IMSH=45
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=2 IMAT=8
ASSIGN MESH SURFACE SN=2 IMSH=28
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=3 IMAT=10
ASSIGN MESH SURFACE SN=3 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=4 IMAT=12
ASSIGN MESH SURFACE SN=4 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=5 IMAT=12
ASSIGN MESH SURFACE SN=5 IMSH=41

```
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=6 IMAT=10
ASSIGN MESH SURFACE SN=6 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=7 IMAT=12
ASSIGN MESH SURFACE SN=7 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=8 IMAT=10
ASSIGN MESH SURFACE SN=8 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=9 IMAT=12
ASSIGN MESH SURFACE SN=9 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=10 IMAT=10
ASSIGN MESH SURFACE SN=10 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=11 IMAT=12
ASSIGN MESH SURFACE SN=11 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=12 IMAT=10
ASSIGN MESH SURFACE SN=12 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=13 IMAT=12
ASSIGN MESH SURFACE SN=13 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=14 IMAT=10
ASSIGN MESH SURFACE SN=14 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=15 IMAT=12
ASSIGN MESH SURFACE SN=15 IMSH=41
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=16 IMAT=10
ASSIGN MESH SURFACE SN=16 IMSH=39
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=17 IMAT=8
ASSIGN MESH SURFACE SN=17 IMSH=28
ASSIGN MATERIAL SURFACE SN=18 IMAT=8
ASSIGN MESH SURFACE SN=18 IMSH=28
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MESH VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT LOADING VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SUPPORT VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT SLIDE_TABLE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT ACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT DEACTIVATE VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT TS_DEFINITION VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT MATERIAL VALUES OFF
SET DEFAULT_ASSIGNMENT COMPOSITE VALUES OFF
SET MERGE EXACT
```