

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΡΟΧΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Διπλωματική εργασία

Μπίτζας Γεώργιος
Α.Μ.: 2009010031

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά 2015

“Να προσπαθείς να γίνεις όχι επιτυχημένος, αλλά άνθρωπος με αξίες”

Albert Einstein

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα:

τον καθηγητή, κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, που μου έδωσε τα ερεθίσματα και την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Για την πολύτιμη βοήθεια του και τη στήριξη του, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, αλλά και πέρα από αυτή.

τους καθηγητές της σχολής, που όλα αυτά τα χρόνια συνέβαλλαν, ο καθένας ξεχωριστά, στη δημιουργία ισχυρών βάσεων για μια επιτυχημένη πορεία στην μετέπειτα επαγγελματική πλέον ζωή των μαθητών τους.

τους συμφοιτητές μου με τους οποίους υπήρξαμε συνοδοιπόροι και στο μέλλον θα προσφωνώ συναδέλφους, γνωρίζοντας και αναγνωρίζοντας τους κόπους και τις προσπάθειες τους.

τους φίλους μου, για όλες τις όμορφες στιγμές που έχω την χαρά να μοιράζομαι μαζί τους

Τέλος, την οικογένεια μου, που είναι τα πάντα για μένα και την αγαπώ.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, ο ανταγωνισμός στην αγορά του αυτοκινήτου ολοένα και αυξάνεται όσον αφορά την οικονομία καυσίμου, ειδικά για την κατηγορία των ελαφρών εμπορικών οχημάτων. Αυτό έχει δημιουργήσει για τις αυτοκινητοβιομηχανίες την αναγκαιότητα μείωσης του επιπέδου κατανάλωσης καυσίμου. Το βάρος του οχήματος είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου.

Η ελαχιστοποίηση του βάρους των τροχών ενός αυτοκινήτου είναι πολύ πιο αποτελεσματική σε σχέση με την ελαχιστοποίηση άλλων σημείων του αυτοκινήτου. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός του τροχού θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη θεμελιώδη χαρακτηριστικά, όπως η αντοχή και το βάρος.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός τροχού αλουμινίου χαμηλού βάρους, με τη χρήση του πακέτου τοπολογικής βελτιστοποίησης που παρέχει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Η διαδικασία διαμορφώνει το προφίλ στην περιοχή των ακτινών του τροχού, για την επίτευξη μέγιστης αντοχής, με το χαμηλότερο δυνατό συνολικό βάρος. Η ανάλυση βασίζεται σε συγκεκριμένες πρότυπες δοκιμές που υπάρχουν και οι οποίες εξετάζουν την αντοχή του τροχού σε περιπτώσεις πρόσκρουσης ή ακραίων συνθηκών οδήγησης. Μελετάται η κατανομή των τάσεων Von Mises τόσο πριν όσο και μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, επαληθεύοντας τα αποτελέσματα για τον τελικό σχεδιασμό.

Περιεχόμενα

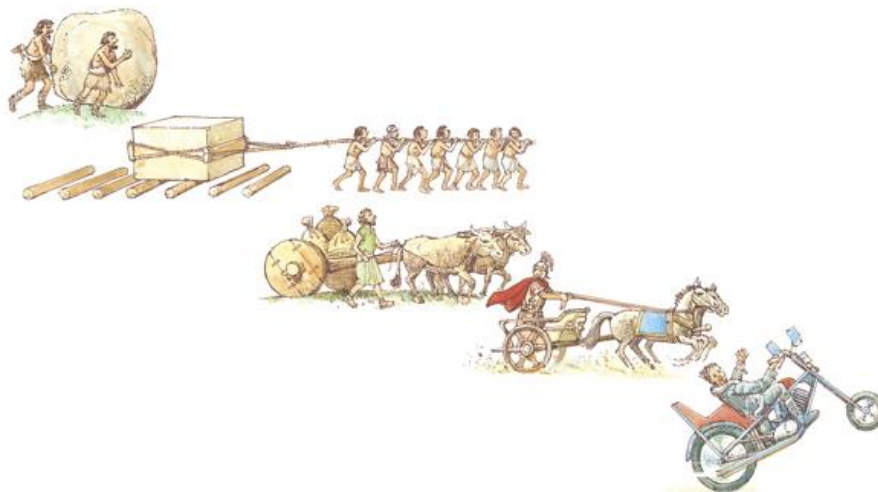
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	8
1.1: Ιστορική εξέλιξη του τροχού.....	8
1.2: Ο τροχός στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	12
1.3: Απαιτήσεις.....	13
1.4: Χυτοί τροχοί αλουμινίου.....	14
1.4.1: Διαδικασίες χύτευσης.....	14
1.4.2: Τεχνολογία μορφοποίησης με ροή (flow forming technology)	16
1.4.3: Επιθεώρηση.....	18
1.4.4: Κράματα χύτευσης και θερμική επεξεργασία.....	18
1.4.5: Μηχανικές ιδιότητες θερμικά επεξεργασμένων τροχών	19
1.5: Σφυρήλατοι τροχοί.....	20
1.5.1: Κράματα σφυρήλατων τροχών.....	21
1.5.2: Διαδικασία παραγωγής.....	21
Κεφάλαιο 2: Σχεδιασμός τροχού	23
2.1: Το πρόγραμμα Pro/Engineer	23
2.2: Μοντελοποίηση τροχού	24
Κεφάλαιο 3: Βελτιστοποίηση.....	28
3.1: Εισαγωγή	28
3.2: Το λογισμικό Abaqus/CAE	30
3.3: Το πακέτο τοπολογικής βελτιστοποίησης του Abaqus (Abaqus Topology Optimization Module - ATOM)	31
3.4: Ανάλυση τροχού και ρυθμίσεις βελτιστοποίησης.....	32
3.5: Αποτελέσματα	37
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση δοκιμής κρούσης	40
4.1: Δοκιμή κρούσης	40
4.2: Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων	41
4.3: Διαδικασία ανάλυσης	42
4.4: Δυναμική ανάλυση στο Abaqus	43
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	46
Βιβλιογραφία	48

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Οι αρχαιολόγοι και οι ιστορικοί θεωρούν τον τροχό ως το μεγαλύτερο δείγμα εξέλιξης οποιουδήποτε αρχαίου πολιτισμού. Γι' αυτό και πρόκειται ίσως για την μεγαλύτερη μηχανική ανακάλυψη όλων των εποχών. Μάλιστα δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι ο τροχός πρέπει να αξιολογηθεί σαν ο μεγαλύτερος τεχνικός θρίαμβος του ανθρώπου. Δεν υπήρχε τίποτα παρόμοιο στη φύση για να το αντιγράψει ή να το προσαρμόσει. Έπρεπε να τον δημιουργήσει ολόκληρο με ένα γιγαντιαίο άλμα της φαντασίας του. Η Βιομηχανική Επανάσταση, σημείο αναφοράς στην παγκόσμια ιστορία, θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί εάν δεν υπήρχε ο τροχός. Μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε πώς η ανακάλυψη του τροχού οδήγησε στη διαμόρφωση του σύγχρονου κόσμου όπως τον γνωρίζουμε.

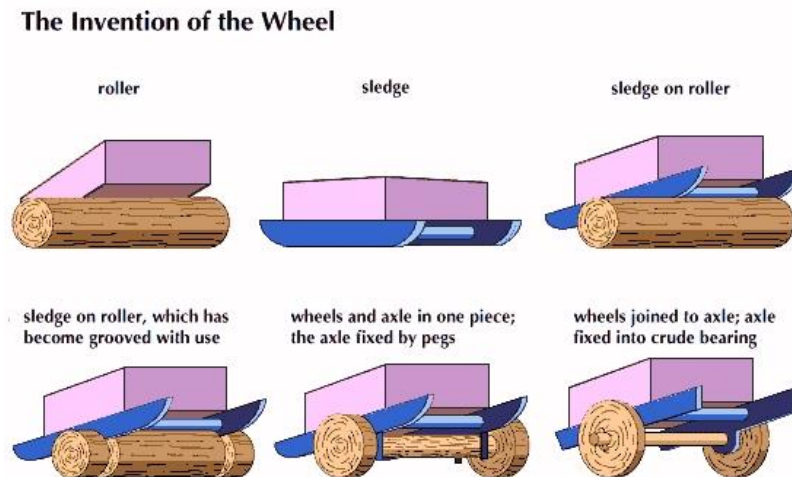
Οι τροχοί αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα δομικά μέρη ενός αυτοκινήτου, καθώς χάρη στην περιστροφή τους επιτυγχάνεται η κίνηση του οχήματος. Ακόμη οι τροχοί, σε συνδυασμό με το σύστημα ανάρτησης, υποστηρίζουν τα στατικά και δυναμικά φορτία που προκαλούνται κατά την κίνηση του οχήματος.

1.1: Ιστορική εξέλιξη του τροχού



Η αρχαιότερη μορφή των τροχών ήταν από πέτρα ή ξύλο. Οι κυκλικού σχήματος πέτρες ή οι κορμοί των δένδρων χρησιμοποιήθηκαν ως κύλινδροι για τη μετακίνηση βαρέων αντικειμένων από το ένα μέρος στο άλλο. Στη συνέχεια, οι άνθρωποι τοποθετούσαν δρομείς κάτω από ένα βαρύ αντικείμενο και αυτό ξεκινούσε να σύρεται σαν ένα έλκηθρο. Μετέπειτα ήρθε η ιδέα του συνδυασμού του έλκηθρου και τον κύλινδρο. Από τη μεταφορά αντικειμένων με τη διαρρύθμιση αυτή, παρατηρήθηκε ότι σχηματίζονται κοιλότητες επί των κυλίνδρων, όπου οι δρομείς έρχονταν σε επαφή με αυτούς. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα

στο έλκηθρο να καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις. Έτσι οι κύλινδροι στη συνέχεια μετατράπηκαν σε τροχούς κόβοντας το ξύλο μεταξύ των δύο αυλακών των κυλίνδρων. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε ο άξονας. Ειδικοί ξύλινοι γόμφοι χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο πλευρές, στερεώνοντας τον άξονα. Έτσι, καθώς ο τροχός στρέφεται, ο άξονας θα μπορούσε επίσης να περιστραφεί με αυτόν (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1

Αρχαιολογικές ενδείξεις δείχνουν ότι η εφεύρεση του τροχού πραγματοποιήθηκε στη Μεσοποταμία, στη Μέση Ανατολή, κατά τη διάρκεια της περιόδου μεταξύ της πέμπτης και τρίτης χιλιετίας π.Χ. . Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι ένα μυστήριο για το ποιος έκανε πραγματικά τον πρώτο τροχό. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ο πρώτος τροχός που έγινε ποτέ δεν είχε χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε είδος μεταφοράς. Αντί αυτού, χρησιμοποιήθηκε από κεραμείς για την κατασκευή αγγείων και άλλων χρήσιμων προϊόντων. Τα αγγεία αυτά στη συνέχεια χρησιμοποιούνταν για την αποθήκευση τροφίμων και νερού. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι αρχικά ο τροχός χρησιμοποιήθηκε για σκοπούς παραγωγής και όχι για τη μεταφορά.



Εικόνα 1.2: Η πρώτη χρήση του τροχού στην αγγειοπλαστική

Μεσοποτάμιοι άρχισαν να χρησιμοποιούν τον τροχό για τη μεταφορά εμπορευμάτων σε πολύ μεταγενέστερη περίοδο, η οποία ήταν μεταξύ 3700 και 3200 π.Χ.. Οι Αιγύπτιοι αυτοσχέδιασαν τον τροχό περαιτέρω και έδωσαν ακτίνες σε αυτόν. Οι τροχοί αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στα αιγυπτιακά άρματα γύρω στο 2000 π.Χ.. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ο τροχός έφτασε και στην Ευρώπη, όπου οι Έλληνες έδωσαν τις δικές τους ιδέες για τη βελτίωση του τροχού. Στον αρχαίο ινδικό πολιτισμό, τροχοί με ακτίνες χρησιμοποιήθηκαν σε άρματα γύρω στο 1500 π.Χ.. Κατά τη διάρκεια της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, οι Ρωμαίοι άρχισαν να παράγουν μια μεγάλη ποικιλία τροχών για διάφορους σκοπούς.



Εικόνα 1.3: Μεταφορά εξοπλισμού στη Μεσοποταμία



Εικόνα 1.4: Σκηνή από κυνήγι στην αρχαία Αίγυπτο

Οι πρώτες ζάντες από σίδηρο γύρω από τον τροχό εμφανίστηκαν σε Κέλτικα άρματα περίπου το 1000 π.Χ.. Ο ακτινικός τροχός παρέμεινε σχεδόν ίδιος μέχρι το 1802, όταν ο G.F. Bauer πρότεινε την αντικατάσταση των μέχρι τότε ξύλινων ακτίνων με ακτίνες τεντωμένου σύρματος. Τα επόμενα χρόνια ο ακτινικός τροχός εξελίχθηκε σε αυτόν που συναντάμε στα σημερινά ποδήλατα.

Μια εξίσου σημαντική ανακάλυψη που ήρθε μαζί με τον ακτινικό τροχό τεντωμένου σύρματος ήταν το πνευματικό λάστιχο, το οποίο παρουσιάστηκε ως πατέντα το 1845 από τον R.W. Thompson. Η ιδέα του βελτιώθηκε περαιτέρω το 1888 από τον John Dunlop, έναν Σκωτσέζο κτηνίατρο, ο οποίος επίσης εξασφάλισε την πατέντα. Χάρη στην ομαλή οδήγηση, το λάστιχο που πρότεινε ο Dunlop αντικατέστησε το σκληρό λάστιχο που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε.

Με την τεχνογνωσία να αυξάνεται και τις μεθόδους συνεχώς να εξελίσσονται, ο τροχός άρχισε να αναδιαμορφώνεται στο πέρασμα των χρόνων, φτάνοντας στη κατασκευή που γνωρίζουμε στις μέρες μας. Οι δυνατότητες που προσφέρει η αλματώδης τεχνολογική εξέλιξη έχει καταστήσει την κατασκευή τροχών πεδίο ευρείας έρευνας, αναδεικνύοντας την σε μια ιδιαίτερη δραστηριότητα στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας.



1.2: Ο τροχός στην αυτοκινητοβιομηχανία

Τα τρία βασικά στοιχεία ενός τροχού είναι το κέντρο του τροχού, οι ακτίνες και η ζάντα. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να είναι είτε ένα κομμάτι, είτε δύο, είτε τρία. Το κέντρο του τροχού είναι το σημείο στο οποίο ο τροχός προσδένεται στο σύστημα ανάρτησης. Οι ακτίνες επεκτείνονται από το κέντρο, συνδέοντας το με τη ζάντα. Η ζάντα είναι το εξωτερικό μέρος του τροχού στο οποίο συγκρατείται το λάστιχο.

Οι τροχοί από χάλυβα συνήθως πρεσάρονται από λαμαρίνα και στη συνέχεια συγκολλούνται. Ακόμα συναντάμε τέτοιους τροχούς σε πολλά αυτοκίνητα καθώς είναι φθηνοί, ανθεκτικοί και ευέλικτοι στην κατεργασία. Όσον αφορά τους τροχούς αλουμινίου, στις αρχές προορίζονταν ως προαιρετικές προσθήκες ή ήταν κομμάτι ακριβότερων πακέτων. Σήμερα ωστόσο οι τροχοί αλουμινίου συναντώνται σε όλο και περισσότερα μοντέλα αυτοκινήτων, αφού έχει καθιερωθεί πλέον ως βασικός εξοπλισμός.

Η χρήση τροχών αλουμινίου σε επιβατικά οχήματα δεν ξεκίνησε κατά κύριο λόγο ως ένα μέτρο μείωσης του βάρους. Οι τροχοί αλουμινίου εισήχθησαν για στιλιστικούς λόγους, για να δώσουν στα ανώτερης κλάσης μοντέλα μια διακριτική προσωπική πινελιά. Ο σφυρήλατος τροχός αλουμινίου εφευρέθηκε από την ALCOA το 1948. Στην Ευρώπη, η επιτυχία του τροχού αλουμινίου ξεκίνησε με την εξέλιξη της Porsche 911 το 1962. Η Porsche έψαχνε για ένα ξεχωριστό τροχό, ο οποίος θα είχε εξαιρετική ποιότητα, προσφέροντας παράλληλα και ελκυστική εμφάνιση. Ο σφυρήλατος τροχός αλουμινίου της εταιρίας OTTO FUCHS ικανοποιούσε το παραπάνω πακέτο. Τη δεκαετία του 1970, χυτές ζάντες αλουμινίου άρχισαν να κατασκευάζονται για μαζικής παραγωγής αυτοκίνητα.

Η διείσδυση του τροχού αλουμινίου στα ευρωπαϊκά οχήματα κατά το έτος 2000 έφτασε το 30% με 35%, την ίδια στιγμή που στην Αμερική και την Ιαπωνία το αντίστοιχο ποσοστό ξεπερνούσε το 50%. Σήμερα, περίπου το 50% των οχημάτων που παράγονται παγκοσμίως χρησιμοποιούν τροχούς αλουμινίου. Μερικές αυτοκινητοβιομηχανίες εξοπλίζουν με τροχούς αλουμινίου πάνω από το 80% της παραγωγής τους. Το μέγεθος της αγοράς των τροχών αλουμινίου συνεχίζει να αυξάνεται, με χαμηλότερο ωστόσο ρυθμό απ' ότι παλαιότερα. Η ανάπτυξη καινούριων, εξελιγμένων μεθόδων στην παραγωγή τροχών χάλυβα επέτρεψαν σημαντική μείωση του βάρους τους, καθώς και περίτεχνους στιλιστικούς σχεδιασμούς, εφάμιλλους αυτών των τροχών αλουμινίου.

Όλοι σχεδόν οι σύγχρονοι τροχοί αλουμινίου παράγονται με μία εκ των παρακάτω μεθόδων: χύτευση ή σφυρηλάτηση. Η απόδοση των τροχών είναι άμεσο αποτέλεσμα της κατασκευαστικής μεθόδου. Έτσι, ενώ η εμφάνιση και το στυλ είναι κίνητρα για επιλογή χυτού τροχού, οι τροχοί που προέρχονται από σφυρηλάτηση είναι συνήθως ελαφρύτεροι και ανθεκτικότεροι, αλλά επίσης και πιο ακριβοί από τους χυτούς τροχούς. Παρόλα αυτά, με την δέουσα προσοχή στην ποιότητα των υλικών και τον έλεγχο της διαδικασίας, οι χυτοί τροχοί αλουμινίου μπορούν να γίνονται με υψηλές προδιαγραφές και να προσφέρουν αξιόπιστη χρήση για πολλά χρόνια.

1.3: Απαιτήσεις

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες ζητούν από τους προμηθευτές τροχών υψηλής ποιότητας προϊόντα, που είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις σε συνθήκες οδήγησης, αλλά είναι επίσης ικανά να αντέχουν και σε ακραίες χρήσεις. Σημαντικά χαρακτηριστικά των τροχών αλουμινίου είναι η σχεδιαστική ευελιξία και η αισθητική εμφάνιση, ακόμα και μετά από μακροχρόνια χρήση. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το μειωμένο βάρος, αν και υπάρχουν συγκεκριμένοι τύποι τροχών αλουμινίου που δεν είναι σημαντικά ελαφρύτεροι από τους τροχούς χάλυβα. Οι ελαφρύτεροι τροχοί βελτιώνουν το χειρισμό του αυτοκινήτου και την οδηγική άνεση, επιτρέποντας στο σύστημα ανάρτησης να ακολουθεί καλύτερα τις μεταβολές κατά τη διάρκεια της οδήγησης. Η μείωση της συνολικής μάζας του οχήματος βοηθάει επιπλέον και στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Επιπλέον, η καλύτερη θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου οδηγεί σε ταχύτερη διάχυση της θερμότητας από τα φρένα, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του φρεναρίσματος σε ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες οδήγησης, και μειώνει την πιθανότητα αστοχίας των φρένων λόγω υπερθέρμανσης.

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός τροχού αλουμινίου πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **Δυσκαμψία**
Η δομική δυσκαμψία είναι η βασική μηχανική παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί κατά τον σχεδιασμό ενός τροχού αλουμινίου, ώστε να προσφέρει την ίδια απόδοση με έναν τροχό από χάλυβα. Η δομική δυσκαμψία καθορίζεται από το τελικό σχέδιο του τροχού · η μηχανική δυσκαμψία του υλικού (μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young) είναι λίγο πολύ γνωστή.
- **Στατική απόδοση**
Με σκοπό να αποφευχθεί οποιαδήποτε παραμόρφωση, είτε από αξονικές (επιταχύνσεις οχήματος, φρενάρισμα), είτε από ακτινικές καταπονήσεις (κατά το στρίψιμο), η απόδοση του υλικού πρέπει να ληφθεί υπόψη. Για αυτό το λόγο διεξάγονται έλεγχοι με την εφαρμογή πίεσης, ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά του υλικού.
- **Συμπεριφορά σε κόπωση**
Η απόδοση στην κόπωση είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την διαστασιολόγηση του τροχού. Αριθμητικές μέθοδοι προσομοιώνουν την συμπεριφορά του τροχού κατά την λειτουργία του, περιλαμβάνοντας δυνάμεις σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Δοκιμές κάμψης και δοκιμές κύλισης χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση αυτών των υπολογισμών.
- **Αντοχή σε συγκρούσεις**
Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τον σχεδιασμό τροχών για αντοχή σε κρούση. Ωστόσο, δοκιμές κρούσης

πραγματοποιούνται ακόμα για να ελεγχθεί η αντίσταση σε τυχαίες συγκρούσεις, όπως η πρόσκρουση σε ένα πεζοδρόμιο.

Εκτός από τα μηχανικά χαρακτηριστικά, υπάρχουν και άλλες σημαντικές σχεδιαστικές παράμετροι:

- **Θερμικές ιδιότητες**
Ανεξάρτητα από το είδος τροχού (χυτός, σφυρήλατος) που χρησιμοποιείται, το αλουμίνιο διαχέει τη θερμότητα πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με το χάλυβα. Επιπλέον, οι τροχοί αλουμινίου δρουν αποτελεσματικά ως θερμοδοχεία, βελτιώνοντας σημαντικά την απόδοση κατά το φρενάρισμα και μειώνοντας τον κίνδυνο για υπερθέρμανση στα λάστιχα.
- **Στιλ και εξοικονόμηση βάρους**
Η μείωση του βάρους αποτελεί τη βασική προτεραιότητα σε οποιαδήποτε σκέψη για το σχεδιασμό ενός τροχού. Από την άλλη πλευρά, οι στιλιστικές παράμετροι είναι γενικά ένας αποφασιστικός παράγοντας για την επιλογή ενός τροχού. Έτσι πρέπει να υπάρξει ένας συμβιβασμός εάν οι απαιτήσεις στο στιλ υποδεικνύουν συγκεκριμένες τεχνολογίες παραγωγής και ως εκ τούτου την επίτευξη χαμηλότερης από το εφικτό μείωση βάρους.
- **Αντοχή στη διάβρωση**
Υπάρχουν διάφορες επιλογές επεξεργασίας επιφάνειας για τους τροχούς αλουμινίου που προσφέρουν διαφορετικές ποιότητες και οφέλη. Η εμφάνιση του τροχού, η αντοχή και οι απαιτήσεις συντήρησης πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή της επιφάνειας του τροχού. Η επιπτώσεις της γαλβανικής διάβρωσης γενικά δεν παρουσιάζουν ποτέ σημαντικά προβλήματα.

1.4: Χυτοί τροχοί αλουμινίου

Το κύριο πλεονέκτημα των χυτών τροχών αλουμινίου είναι η υψηλή σχεδιαστική ευελιξία. Οι χυτοί τροχοί επιπλέον προσφέρουν μεγάλη διαστατική ακρίβεια (λόγω ομογενοποιημένης κατανομής μάζας) και πολύ καλές στατικές και δυναμικές μηχανικές ιδιότητες. Ένας σημαντικός λόγος που επιλέγονται χυτοί τροχοί είναι η ελκυστική οπτική τους εμφάνιση. Η δυνατότητα μείωσης του βάρους σε σχέση με τους τροχούς χάλυβα είναι ένα πλεονέκτημα, αλλά όχι απαραίτητα και ο κύριος στόχος. Σε μερικές περιπτώσεις το βάρος ενός χυτού τροχού αλουμινίου είναι ίδιο ή ελαφρώς μικρότερο σε σχέση με έναν τυπικό τροχό χάλυβα.

1.4.1: Διαδικασίες χύτευσης

Διαφορετικές τεχνολογίες χύτευσης αλουμινίου είναι κατάλληλες για την παραγωγή τροχών. Υψηλής παραγωγικότητας μέθοδοι εφαρμόζονται κυρίως για την παραγωγή

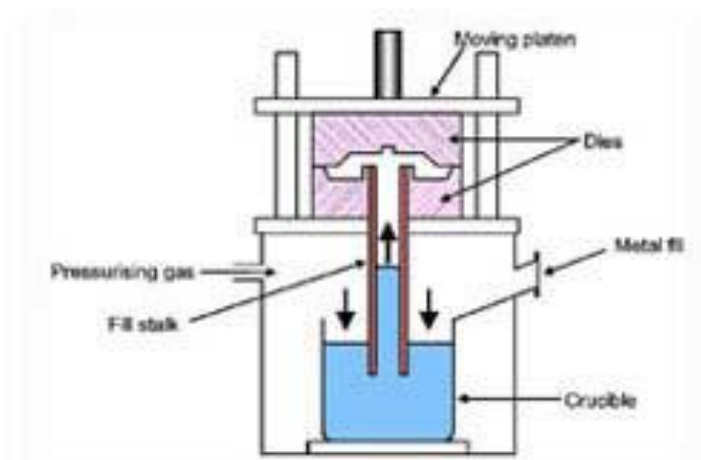
τροχών αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα εργοστασιακής παραγωγής. Απ' την άλλη πλευρά, η αγορά ανταλλακτικών ψάχνει για πιο ευέλικτα σχέδια, μικρότερης παραγωγής, όπου πιο εξειδικευμένες μέθοδοι χύτευσης είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν.

Ωστόσο, ανάλογα με τη διαδικασία χύτευσης που εφαρμόζεται, η ποιότητα του χυτού τροχού ποικίλει. Η επιλογή συγκεκριμένων μεθόδων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της μικροδομής και επηρεάζει την επιλογή των κραμάτων που θα χρησιμοποιηθούν και τη θερμική μεταχείριση. Έτσι καθορίζει όχι μόνο την αντοχή του τροχού, αλλά και το επίπεδο ποιότητας επιφάνειας που μπορεί να επιτευχθεί, και άρα τον τελικό σχεδιασμό. Συνεπώς, η επιλογή της βέλτιστης διαδικασίας χύτευσης εξαρτάται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες.

Οι κύριες μέθοδοι χύτευσης που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τροχών αλουμινίου είναι:

- Χύτευση χαμηλής πίεσης (κυρίως)
- Χύτευση με βαρύτητα σε μόνιμο καλούπι
- Διαδικασία συμπίεσης - χύτευσης (squeeze-casting process)

Γενικά, η χύτευση υπό πίεση, όπου το μέταλλο πιέζεται μέσα στο καλούπι, είναι προτιμότερη από την απλή χύτευση με βαρύτητα. Ωστόσο, η χύτευση σε μόνιμο καλούπι με βαρύτητα προσφέρει σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής και είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την χύτευση σχεδίων που επικεντρώνονται στο οπτικό αποτέλεσμα ή όταν η μείωση του βάρους του τροχού δεν αποτελεί το βασικό στόχο. Από τη στιγμή που η μέθοδος στηρίζεται μόνο στην βαρύτητα για να γεμίσει το καλούπι, το χυτό συνήθως εμφανίζει περισσότερες αστοχίες (εμφάνιση πορώδους) από ότι όταν παράγεται με κάποια άλλη διαδικασία χύτευσης.



Εικόνα 1.5: Διάταξη χύτευσης υπό χαμηλή πίεση

Οι περισσότεροι χυτοί τροχοί αλουμινίου παράγονται με χύτευση χαμηλής πίεσης. Κατά τη διαδικασία της χύτευσης εφαρμόζεται σχετικά μικρή πίεση (περίπου 2 bar) για την επίτευξη γρήγορου γεμίσματος του καλουπιού και την δημιουργία πυκνής μικροδομής, που έχει σαν αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να έχει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με έναν χυτό τροχό με βαρύτητα. Όπως είναι βέβαια λογικό, το κόστος παραγωγής είναι σαφώς μεγαλύτερο σε σχέση με την χύτευση με βαρύτητα.



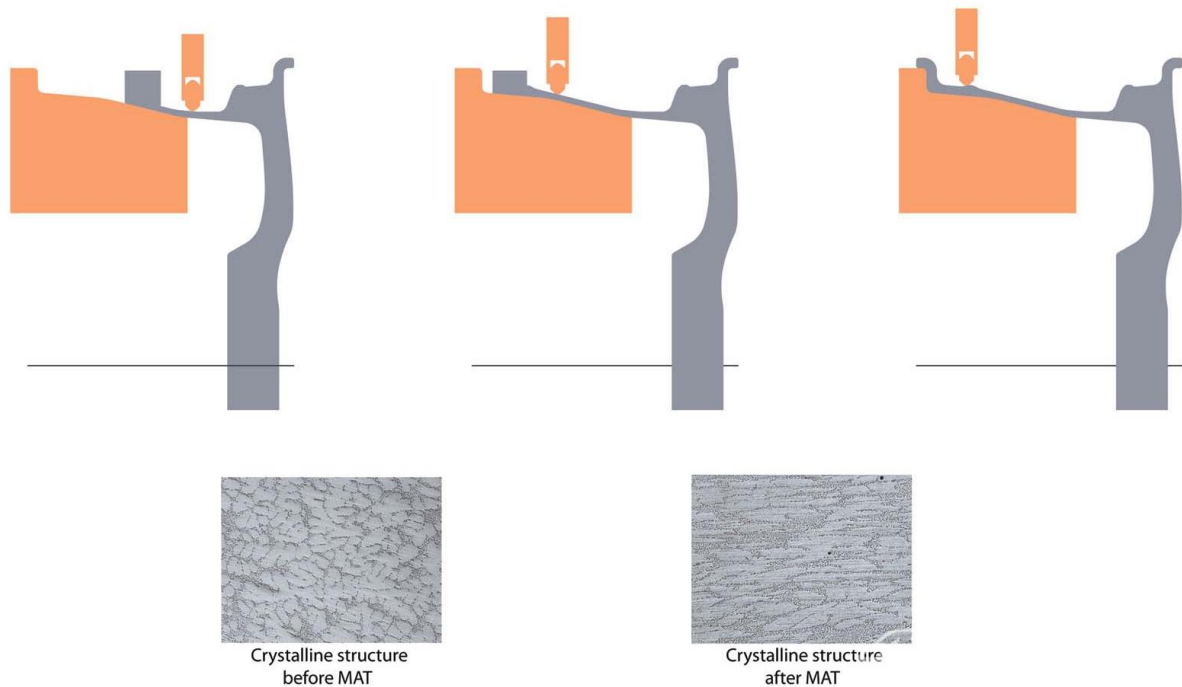
Εικόνα 1.6: Τροχός προϊόν χύτευσης χαμηλής πίεσης

Πέρα από την συμβατική μέθοδο χύτευσης υπό πίεση, υπάρχουν πολλές ακόμα βελτιστοποιημένες παραλλαγές ειδικά για την παραγωγή τροχών με ιδιαίτερο σχεδιασμό ή βελτιωμένη απόδοση. Έτσι, ακόμα ελαφρύτεροι και πιο ανθεκτικοί τροχοί παράγονται όταν χρησιμοποιείται πιο εξειδικευμένος εξοπλισμός. Άλλες παραλλαγές παραγωγής οδηγούν σε χυτούς τροχούς με σημαντικά περιθώρια μείωσης του βάρους τους. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται τροποποίηση στο σχεδιασμό του καλουπιού και οι συνθήκες στερεοποίησης πρέπει να είναι ειδικά ελεγχμένες.

1.4.2: Τεχνολογία μορφοποίησης με ροή (flow forming technology)

Η τεχνολογία μορφοποίησης με ροή είναι μια από τις πιο εξειδικευμένες τεχνολογίες στη βιομηχανία παραγωγής τροχών. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εφαρμογή πίεσης στην εσωτερική επιφάνεια του τροχού, καθώς αυτός περιστρέφεται και αφότου έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της χύτευσης. Με τον τρόπο αυτό το αλουμίνιο τεντώνεται και συμπιέζεται,

αυξάνοντας έτσι την αντοχή του τροχού. Το τελικό προϊόν είναι ελαφρύτερο, επιμηκυμένο και με μεγαλύτερη αντίσταση σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις, σε σχέση με του τυπικούς χυτούς τροχούς.



Εικόνα 1.7: Τεχνολογία μορφοποίησης με ροή



Εικόνα 1.8: Τροχός προϊόν χύτευσης χαμηλής πίεσης με τεχνολογία μορφοποίησης ροής

1.4.3: Επιθεώρηση

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της χύτευσης, οι τροχοί ελέγχονται μέσω συστήματος ακτινών χ και στη συνέχεια υφίστανται θερμική επεξεργασία, προτού οδηγηθούν για την μηχανική κατεργασία (διάτρηση οπών).

Μετά από πρόσθετο οπτικό έλεγχο, οι τροχοί ολοκληρώνονται επιφανειακά (βάψιμο, βερνίκωμα) (Εικόνα 1.8α). Επίσης εκτελούνται τρισδιάστατοι έλεγχοι (Εικόνα 1.8β), έλεγχος δυναμικής ισορροπίας, δοκιμές κάμψης (Εικόνα 1.8γ), καθώς και δοκιμές κρούσης (Εικόνα 1.8δ).



(α)

(β)

(γ)

(δ)

Εικόνα 1.9

1.4.4: Κράματα χύτευσης και θερμική επεξεργασία

Τα κράματα που χρησιμοποιούνται πρέπει να πληρούν μια σειρά από συχνά αντικρουόμενες απαιτήσεις:

- Καλά χαρακτηριστικά χύτευσης με τη χρήση μεταλλικών καλουπιών (άριστη πλήρωση του καλουπιού, καμία προσκόλληση στο καλούπι)
- Ισχυρή ικανότητα να αντέχουν σε φυσικές κρούσεις (αντοχή σε σύγκρουση, ολκιμότητα)
- Εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση
- Υψηλή αντίσταση στην κόπωση

Οι παραπάνω απαιτήσεις έχουν οδηγήσει στην ευρεία χρήση των υποευθηκτικών κραμάτων χύτευσης Al-Si με περιεκτικότητα σε πυρίτιο από 7 έως 12%, διάφορα επίπεδα μαγνησίου, καθώς και χαμηλές συγκεντρώσεις σιδήρου και άλλων στοιχείων.

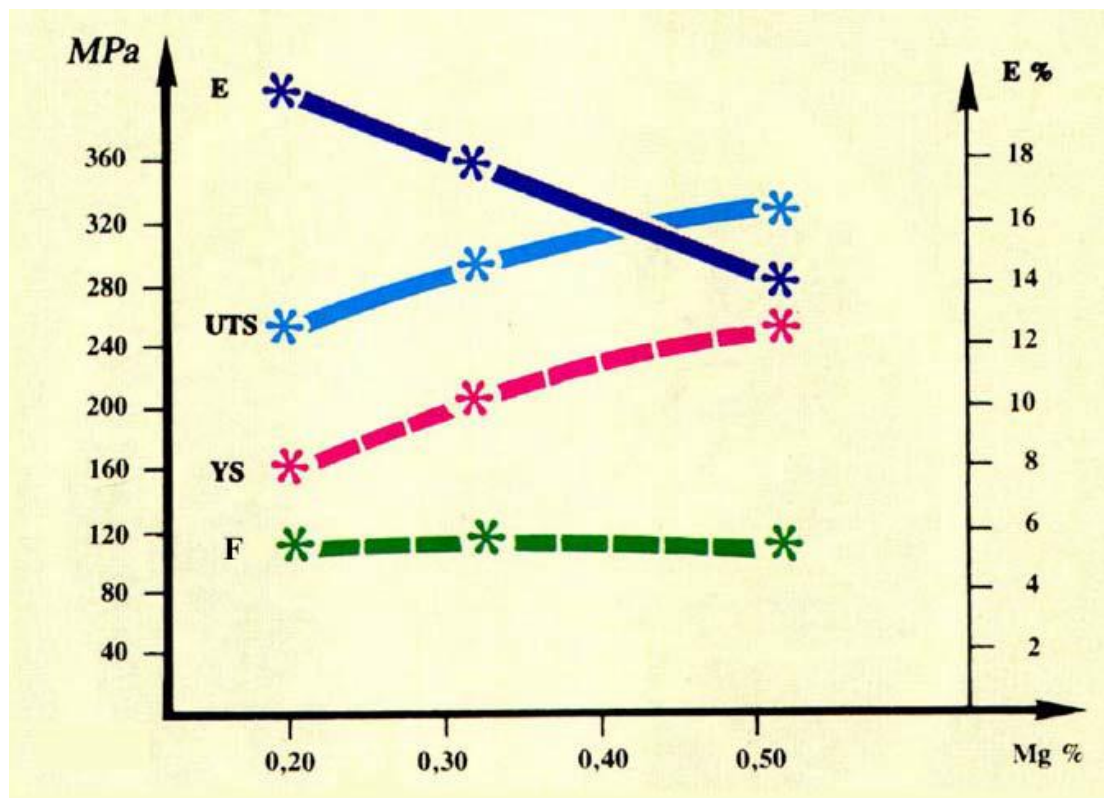
Μέχρι τη δεκαετία του '80, μη θερμικά επεξεργασμένα, σχεδόν εύτηκτα κράματα AlSi11Mg, με περιεκτικότητα σε πυρίτιο 11-12%, χρησιμοποιούνταν κυρίως στην

Γερμανία και στην Ιταλία. Τα κράματα αυτά εμφανίζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά χύτευσης, ειδικά σε σχέση με την πλήρωση του καλουπιού. Από την άλλη πλευρά, είναι ένα κράμα που είναι λιγότερο προτιμητέο από άποψη αντοχής.

Σήμερα, το κράμα AlSi7Mg0.3 , τροποποιημένο με Στρόντιο (Sr) είναι το βασικό κράμα χύτευσης αλουμινίου που χρησιμοποιείται για τροχούς. Στην αρχή, μη θερμικά επεξεργασμένοι τροχοί παράγονταν με αυτό το κράμα στη Γαλλία. Το πλεονέκτημα ωστόσο του κράματος AlSi7Mg0.3 είναι η θερμική του επεξεργασιμότητα, και ως εκ τούτου η δυνατότητα να εκπληρώσει τις αυξανόμενες τεχνικές απαιτήσεις στους τροχούς. Στη Βόρεια Αμερική και στην Ιαπωνία, αυτό το κράμα χρησιμοποιήθηκε από την αρχή με θερμική επεξεργασία. Επίσης στην Ευρώπη, οι χυτοί τροχοί αλουμινίου που παράγονται είναι όλο και περισσότερο θερμικά επεξεργασμένοι.

1.4.5: Μηχανικές ιδιότητες θερμικά επεξεργασμένων τροχών

Το ακόλουθο γράφημα δείχνει τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή σε κόπωση για το κράμα AlSi7Mg , για διαφορετικές περιεκτικότητες μαγνησίου. Όπως φαίνεται, το κράμα AlSi7Mg0.3 δίνει την καλύτερη σχέση μεταξύ αντοχής σε κόπωση και παραμόρφωσης. Αύξηση της περιεκτικότητας σε μαγνήσιο βελτιώνει σημαντικά την παραμόρφωση, χωρίς όμως να συμβαίνει το ίδιο και με την αντοχή. Επίσης έχει διαπιστωθεί από μελέτες ότι η αύξηση της περιεκτικότητας του πυριτίου έχει δυσμενή επίδραση στην ολκιμότητα. Παρ' όλα αυτά, κράματα με περιεκτικότητα σε πυρίτιο 9-11% είναι ακόμα αποδεκτά.



Σχήμα 1: Μηχανικές ιδιότητες και αντοχή σε κόπωση για το κράμα AlSi7Mg, για διαφορετικές περιεκτικότητες μαγνησίου

1.5: Σφυρήλατοι τροχοί

Οι σφυρήλατοι τροχοί αλουμινίου είναι τροχοί ενός κομματιού (one-piece) που σχηματίζονται από ένα ενιαίο κομμάτι μετάλλου με σφυρηλάτηση εν θερμώ, που ακολουθείται από τις απαραίτητες διαδικασίες επεξεργασίας. Η διαδικασία της σφυρηλάτησης επιτρέπει ευελιξία στον σχεδιασμό, σχεδόν ανάλογη με τις χυτές ζάντες. Η σφυρηλάτηση ενός κομματιού (one-piece forging) υπερέρχει των άλλων μεθόδων κατασκευής τροχών στο γεγονός ότι παρέχει αυξημένη αντοχή, με ταυτόχρονη μείωση του βάρους, σε σύγκριση με τους χυτούς τροχούς αλουμινίου.

- Οι σφυρήλατοι τροχοί είναι συνήθως περίπου 25% ελαφρύτεροι σε σχέση με τους χυτούς τροχούς (και ενδεχομένως και ακόμη περισσότεροι).
- Ενώ η χύτευση είναι μια λιγότερο δαπανηρή διαδικασία, οι χυτοί τροχοί εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους σφυρήλατους τροχούς.

Οι σφυρήλατοι τροχοί υπερτερούν των χυτών τροχών ιδίως όσον αφορά την απόδοση σε κρούση και την αντοχή σε κόπωση. Γενικά οι σφυρήλατοι τροχοί δεν αποτυγχάνουν στις δοκιμές κρούσης (impact tests), τη στιγμή που η ανταπόκριση στις απαιτήσεις των δοκιμών κρούσης μπορεί να είναι ένα δυσκολότερο πρόβλημα για τους σχεδιαστές

χυτών τροχών. Η δομική κρούσης είναι αντιπροσωπευτική μιας περίπτωσης πρόσκρουσης σε ένα κράσπεδο, αλλά και για την περίπτωση ακραίων συνθηκών οδήγησης. Αναλυτική παρουσίαση της δοκιμής κρούσης θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 1.10 : Σφυρήλατοι τροχοί σε μεγάλη ποικιλία σχεδίων

1.5.1: Κράματα σφυρήλατων τροχών

Τα βασικά κράματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σφυρήλατων τροχών είναι τα θερμικά μεταχειρίσιμα κράματα του συστήματος AlSiMg και ιδίως:

- EN AW-AlSiMgMn (6082) στην Ευρώπη
- AA 6061-AlSiMgCu στη Βόρεια Αμερική

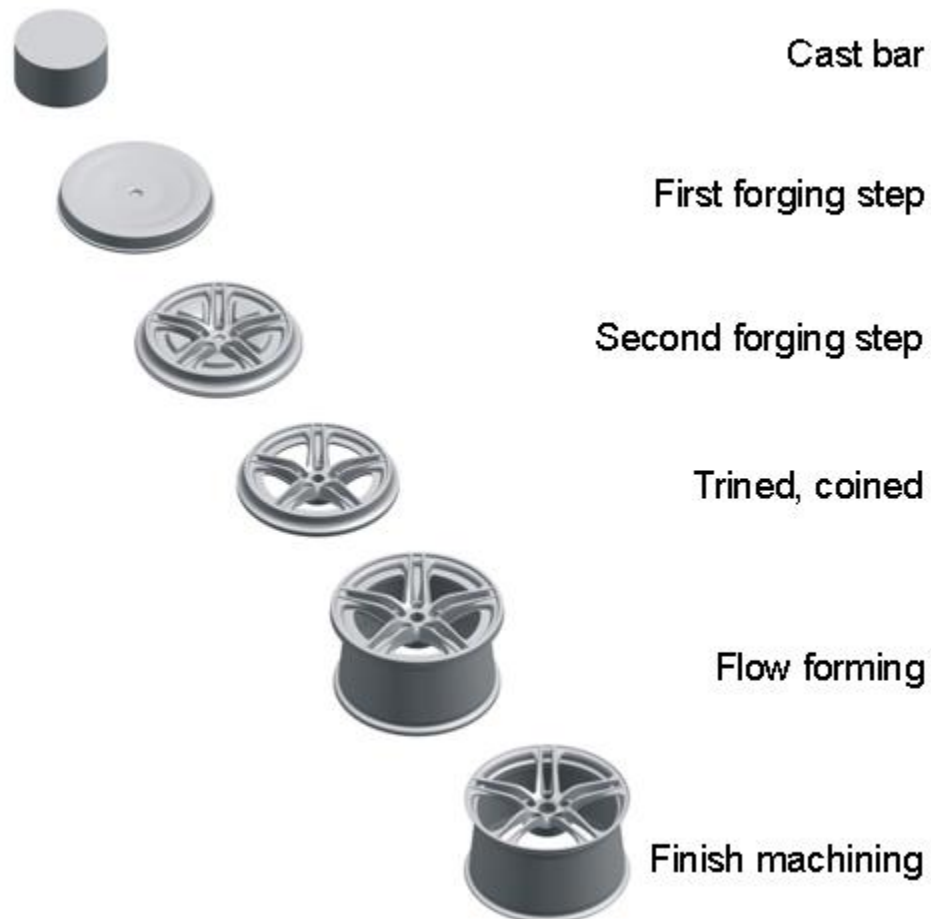
Η σφυρηλάτηση κατευθύνει την μικροδομή του μετάλλου, επιτρέποντας την πλήρη αξιοποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του κράματος. Σε σύγκριση με τους χυτούς τροχούς αλουμινίου, οι σφυρήλατοι τροχοί εμφανίζουν επίσης αυξημένη αντοχή σε κόπωση λόγω της έλλειψης πορώδους και την παρουσία λεπτής, ομοιογενούς μικροδομής.

1.5.2: Διαδικασία παραγωγής

Η παραδοσιακή διαδικασία σφυρηλάτησης περιελάμβανε διαδοχικές κατεργασίες σφυρηλάτησης, κατεργασίες κοπής, θερμική επεξεργασία, τελική κατεργασία και πολλά βήματα φινιρίσματος, ανάλογα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Έτσι, το στίλ υπερερουσε του βάρους, ενώ και τα κόστη ήταν αξιοσημείωτα. Από την άλλη πλευρά, εάν το χαμηλό βάρος και το χαμηλό κόστος είναι οι βασικοί στόχοι, τότε οι τεχνολογίες παραγωγής πρέπει να περιορίζουν τα σχεδιαστικά όρια.

Το σχέδιο παραγωγής που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε από την Otto Fuchs το 1995, για την παραγωγή χαμηλού βάρους σφυρήλατων τροχών, περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Χύτευση
- Πρώτο στάδιο σφυρηλάτησης
- Δεύτερο στάδιο σφυρηλάτησης
- Κοπή
- Μορφοποίηση ροής
- Τελική κατεργασία



Εικόνα 1.11: Βήματα παραγωγής σφυρήλατων τροχών αλουμινίου

Κεφάλαιο 2: Σχεδιασμός τροχού

2.1: Το πρόγραμμα Pro/Engineer

Το Pro/ENGINEER είναι το λογισμικό προϊόν της εταιρίας PTC (Parametric Technology Corporation). Πρόκειται για πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης που χρησιμοποιεί τον τρισδιάστατο πυρήνα παραμετρικής στερεάς μοντελοποίησης, ο οποίος δίνει ακριβείς αναπαραστάσεις της γεωμετρίας και της μάζας. Έχει τη δυνατότητα πλήρους ανάλυσης του προϊόντος με ακριβή αποτελέσματα, όσον αφορά την κατεργασία, τις μηχανικές αντοχές και πολλούς ακόμη υπολογισμούς.

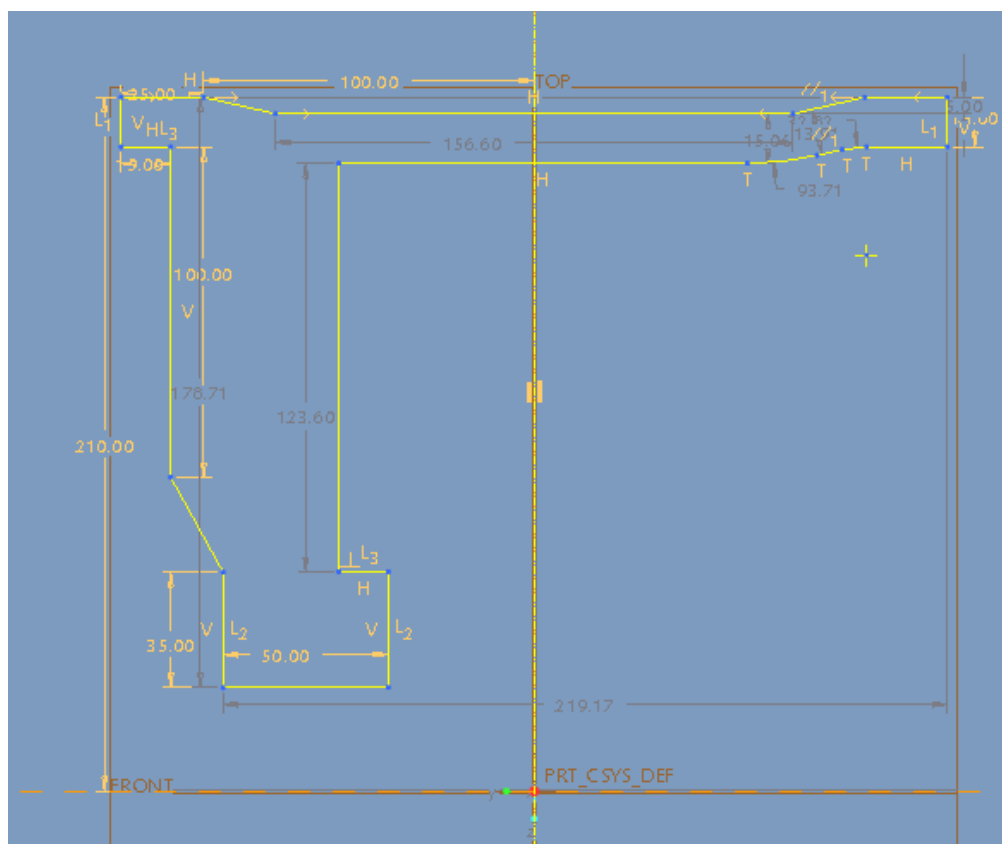
Δημιουργήθηκε από τον Δρ Samuel P. Geisberg στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Το Pro /ENGINEER ήταν η πρώτη επιτυχία του κλάδου η οποία βασίζεται σε κανόνες περιορισμού. Η παραμετρική μοντελοποίηση είναι προσέγγιση που χρησιμοποιεί παραμέτρους τις διαστάσεις, χαρακτηριστικά, και τις μαθηματικές σχέσεις για να συλλάβει τη συμπεριφορά των προϊόντων που προορίζεται και να δημιουργήσει ένα μέσο που επιτρέπει την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και των διαδικασιών ανάπτυξης των προϊόντων.

Το Pro /ENGINEER παρέχει ένα πλήρες σύνολο δυνατοτήτων για σχεδιασμό, ανάλυση και κατασκευή σε μία, ενσωματωμένη, επεκτάσιμη πλατφόρμα. Αυτές περιλαμβάνουν στερεά μοντελοποίηση (Solid Modeling), μοντελοποίηση επιφανειών (Surface Modeling), αναπαραγωγή μοντέλων με στοιχεία φωτορεαλισμού, διαλειτουργικότητα δεδομένων, σχεδιασμό δρομολογημένων συστημάτων, προσομοίωση, ανάλυση αντοχής και σχεδιασμό με προγραμματισμό αριθμητικού ελέγχου.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Pro/Engineer Wildfire 5.0.

2.2: Μοντελοποίηση τροχού

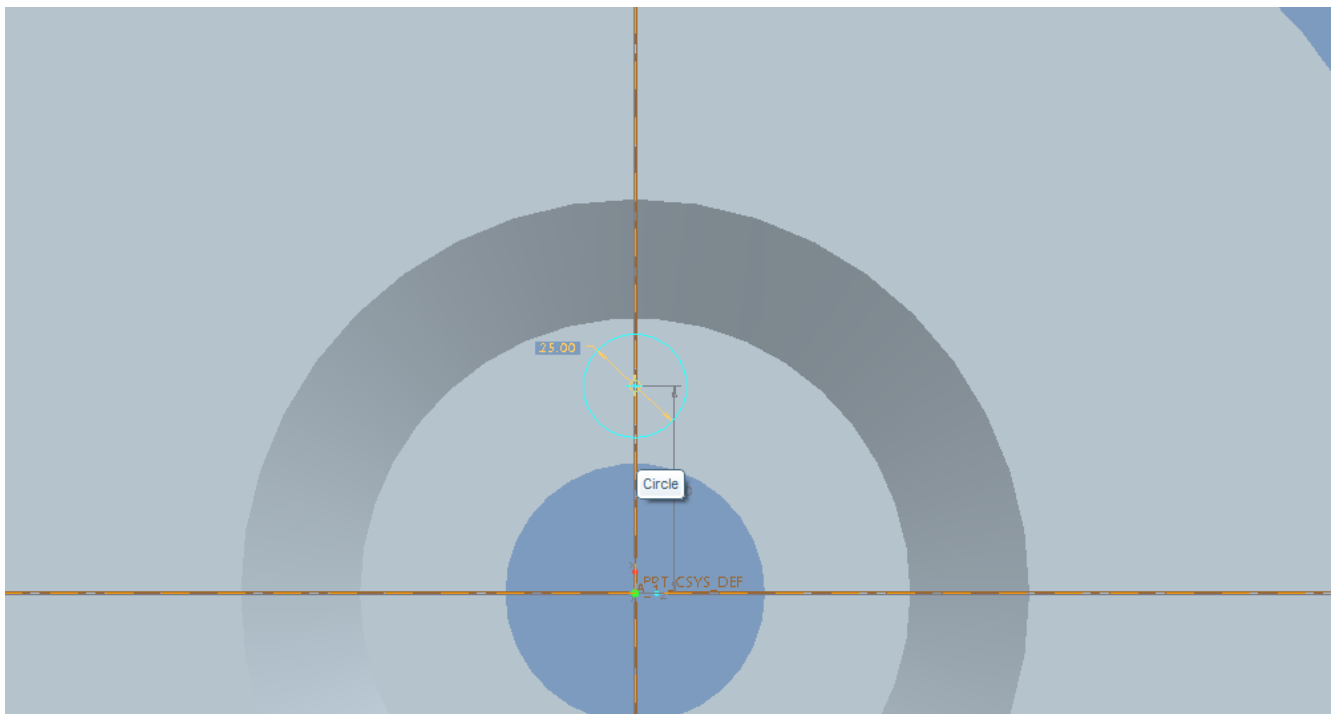
Για την δημιουργία του τροχού σχεδιάζεται το προφίλ της τομής σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο, όπως φαίνεται παρακάτω.



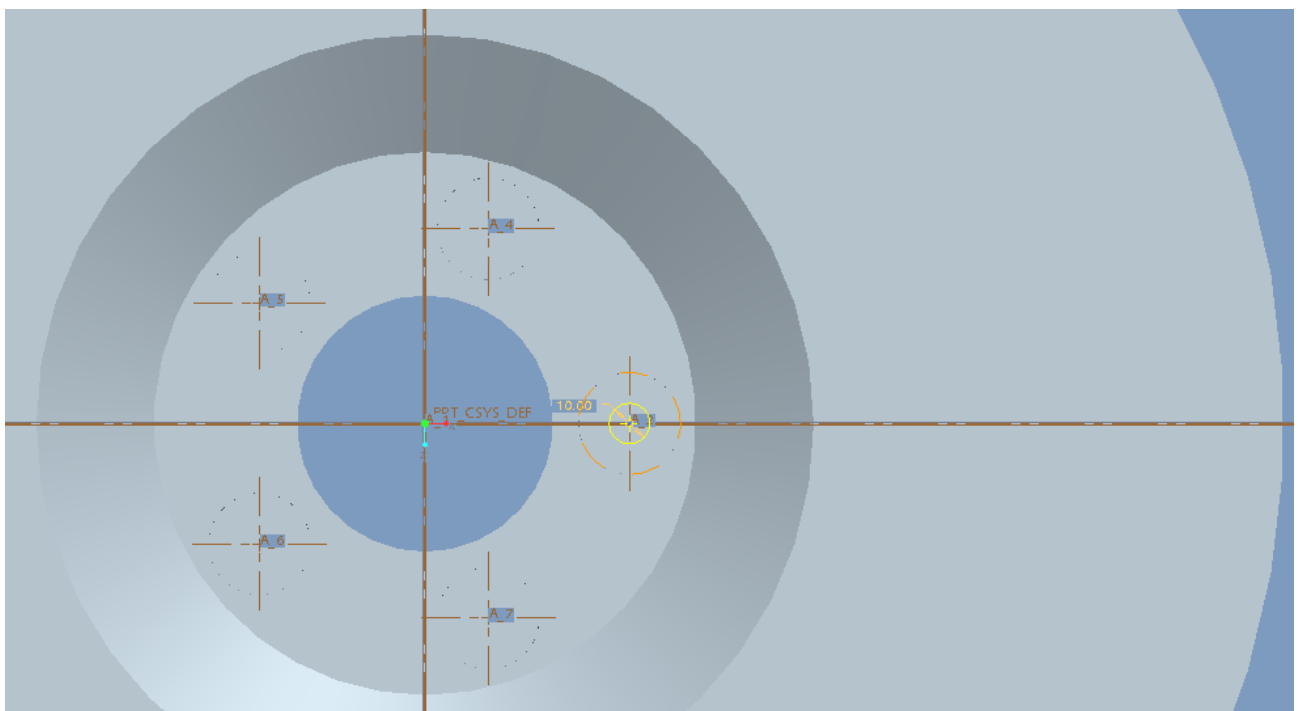
Εικόνα 2.1: Προφίλ σχεδιαζόμενου τροχού

Στη συνέχεια, με την εντολή Revolve, το εικονιζόμενο προφίλ περιστρέφεται γύρω από κατάλληλο άξονα, δίνοντας την μορφή του τροχού. Εδώ αξίζει να τονίσουμε ότι δεν μας αφορά το αρχικό πάχος του τροχού, καθώς αυτό είναι κάτι που πρόκειται να διαμορφωθεί μέσα από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Για την δημιουργία των οπών στην περιοχή πρόσδεσης του τροχού με τον άξονα του αυτοκινήτου σχεδιάζονται δύο κυκλικά προφίλ, σε διαφορετικά sketches, διαφορετικών διαμέτρων, στην επίπεδη επιφάνεια κοντά στον άξονα του τροχού. Για το σχέδιο με τη μεγάλη διάμετρο (εικόνα) και χρησιμοποιώντας την εντολή extrude, επιλέγοντας αφαίρεση υλικού (remove material), δημιουργούμε μια οπή μέχρι το κέντρο περίπου της επιφάνειας. Για το σχέδιο με τη μικρή διάμετρο (εικόνα) ακολουθούμε την ίδια διαδικασία, μόνο που σε αυτή την περίπτωση θέλουμε η οπή να είναι διαμπερής.



Εικόνα 2.2: Δημιουργία μεγάλης οπής



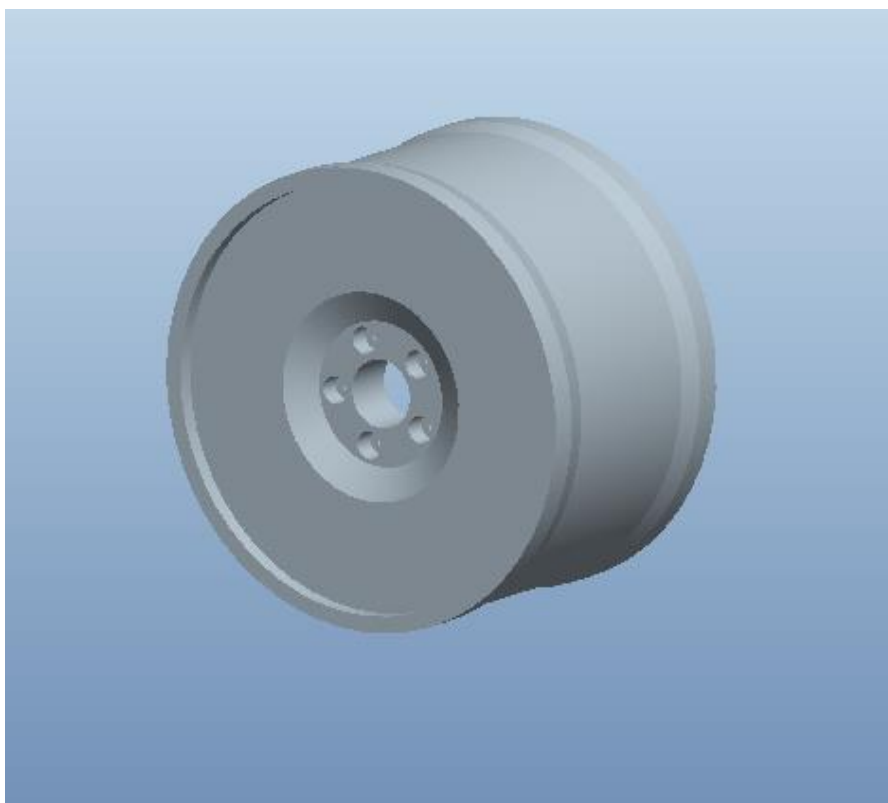
Εικόνα 2.3: Δημιουργία μικρής οπής

Με την εντολή Pattern επιλέγουμε την δημιουργία 4 επιπλέον οπών, όμοιων με αυτή που σχεδιάστηκε, γύρω από τον άξονα του τροχού.



Εικόνα 2.4: Εφαρμογή εντολής Pattern

Έτσι ο τροχός παίρνει την αρχική, απλή μορφή, που θα χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.



Εικόνα 2.5: Σχέδιο απλού τροχού

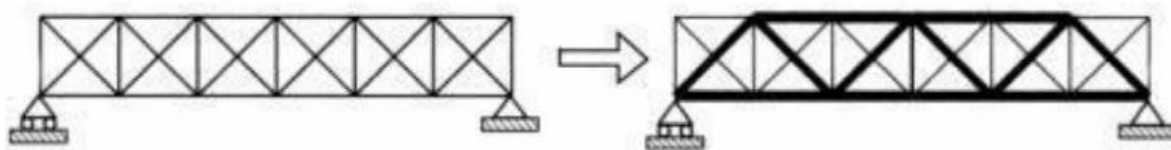
Το παραπάνω σχέδιο αποθηκεύεται σε αρχείο .stp, το οποίο θα γίνει εισαγωγή στο λογισμικό Abaqus για να γίνει η ανάλυση του τροχού και η διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Κεφάλαιο 3: Βελτιστοποίηση

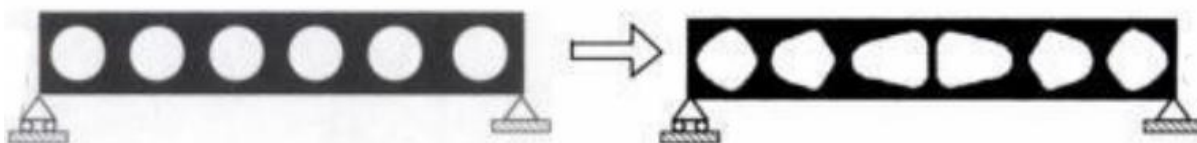
3.1: Εισαγωγή

Κατά το παρελθόν, οι τεχνικές βελτιστοποίησης βασιζόνταν αποκλειστικά στην εμπειρία και την διαίσθηση του μηχανικού. Πλέον, βέλτιστα σχέδια μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Οι πρώτες τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίστηκαν στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκαν από τον καθηγητή του UCLA, Lucien Schmit, τη δεκαετία του '60. Ο Schmit αναγνώρισε τις δυνατότητες από το συνδυασμό τεχνικών βελτιστοποίησης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, για δομικό και κατασκευαστικό σχεδιασμό.

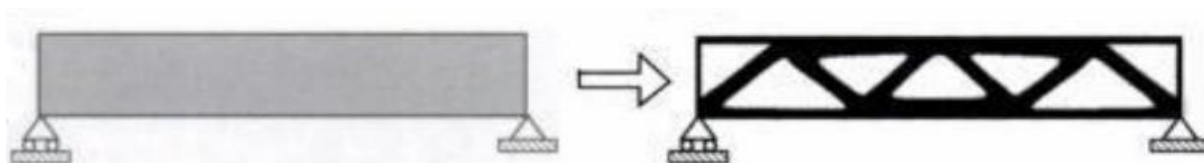
Σήμερα, υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις που αφορούν την βασισμένη σε πεπερασμένα στοιχεία βελτιστοποίηση και υποστηρίζονται από τα εμπορικά λογισμικά ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων : η βελτιστοποίηση μεγέθους, η βελτιστοποίηση σχήματος και η βελτιστοποίηση τοπολογίας.



Εικόνα 3.1: Βελτιστοποίηση μεγέθους



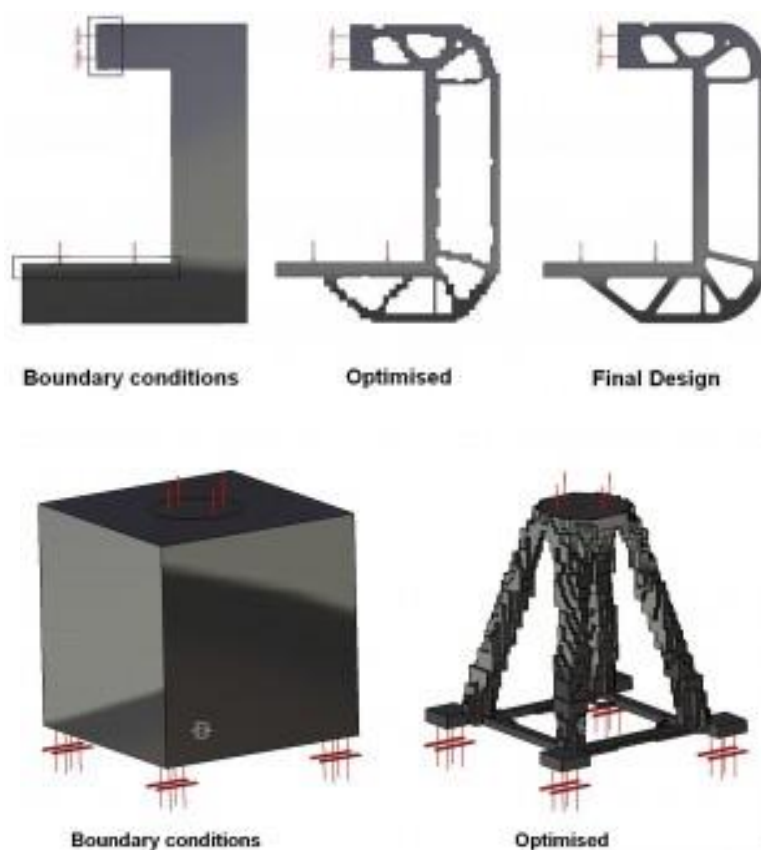
Εικόνα 3.2: Βελτιστοποίηση σχήματος



Εικόνα 3.3: Βελτιστοποίηση τοπολογίας

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο σε σύγχρονες μελέτες για την εύρεση προκαταρκτικών, και πολλές φορές εντελώς καινοτόμων, κατασκευαστικών σχεδίων, ώστε αυτά να ικανοποιούν συγκεκριμένες συνθήκες.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Bendsøe και Kikuchi (1988). Πρόκειται για μια μαθηματική μέθοδο που αφορά την βέλτιστη κατανομή υλικού εντός της σχεδιαστικής περιοχής. Αρχικά, η περιοχή σχεδιασμού περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, απομακρύνονται επιλεκτικά από την περιοχή τα μη χρήσιμα στοιχεία, διατηρώντας τα όρια της σχεδιαστικής περιοχής, καθώς και τα σημεία φορτίσεων και οριακών συνθηκών.



Εικόνα 3.4: Παραδείγματα εφαρμογών τοπολογικής βελτιστοποίησης

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι λύσεις που προκύπτουν από μια διαδικασία βελτιστοποίησης δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμες. Για περίπλοκες εφαρμογές, είναι λογικό να προκύπτουν εξίσου περίπλοκες γεωμετρίες. Η διαδικασία παραγωγής σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτεί μεγάλη προσπάθεια και υψηλό κόστος. Προκειμένου η απόφαση για την υλοποίηση μιας πιο σύνθετης σχεδίασης να μην απορριφθεί, απαιτείται η προσαρμογή του σχεδιασμού με περεταίρω διαδικασίες βελτιστοποίησης, ώστε να καθίσταται δυνατή η παραγωγή του.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση έχει γίνει δημοφιλές πεδίο έρευνας, τόσο σε ερευνητικό επίπεδο, όσο και στη βιομηχανία. Σήμερα, η μέθοδος εφαρμόζεται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική, αλλά και σε εφαρμογές που αφορούν διάφορους μηχανισμούς, στη μηχανική υλικών και στο σχεδιασμό μικροηλεκτρομηχανικών

συστημάτων (MicroElectroMechanical Systems- MEMS). Η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε διάφορους τομείς της μηχανικής μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το κόστος σχεδιασμού και την ποιότητα, παράγοντες πολύ σημαντικοί για τον παγκόσμιο ανταγωνισμό.

3.2: Το λογισμικό Abaqus/CAE

Το Abaqus είναι μια οικογένεια λογισμικών για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και μηχανικής ανάλυσης με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Είναι ένα λογισμικό της SIMULIA, με την πρώτη έκδοση να παρουσιάζεται το 1978. Το λογότυπο και το όνομα του λογισμικού προέρχονται από το όνομα του υπολογιστικού εργαλείου “άβαξ”.

Η σειρά των προϊόντων του Abaqus αποτελείται από πέντε βασικά πακέτα λογισμικού:

- Abaqus/CAE: Είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση μηχανικών εξαρτημάτων και συναρμολογήσεων (pre-processing), καθώς και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.
- Abaqus/Standard: Αποτελεί ένα λογισμικό γενικής χρήσης για ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.
- Abaqus/Explicit: Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο λογισμικό που χρησιμοποιείται για μη γραμμική δυναμική ανάλυση.
- Abaqus/CFD: Είναι ένα λογισμικό ανάλυσης για τη δυναμική ρευστών, το οποίο παρέχει εξειδικευμένες δυνατότητες, με την υποστήριξη για τις λειτουργίες preprocessing και postprocessing που παρέχει το πακέτο Abaqus/CAE.
- Abaqus/Electromagnetic: Είναι ένα λογισμικό για την επίλυση εξειδικευμένων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

Το λογισμικό Abaqus χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική και σε βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων. Είναι επίσης δημοφιλές σε ακαδημαϊκό και ερευνητικό επίπεδο. Είναι ένα λογισμικό που παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης πολλών φυσικών φαινομένων, όπως:

- Στατική και δυναμική ανάλυση κατασκευών (Static/Dynamic Structure Analysis)
- Ακουστική (Acoustics)
- Εδαφομηχανική (Soil Mechanics)
- Μεταφορά θερμότητας και μάζας (Heat Transfer and Mass Diffusion)
- Σύζευξη διαφόρων φυσικών φαινομένων (Thermal-Stress Analysis, Coupled Thermal-Electrical Analysis), κ.α.

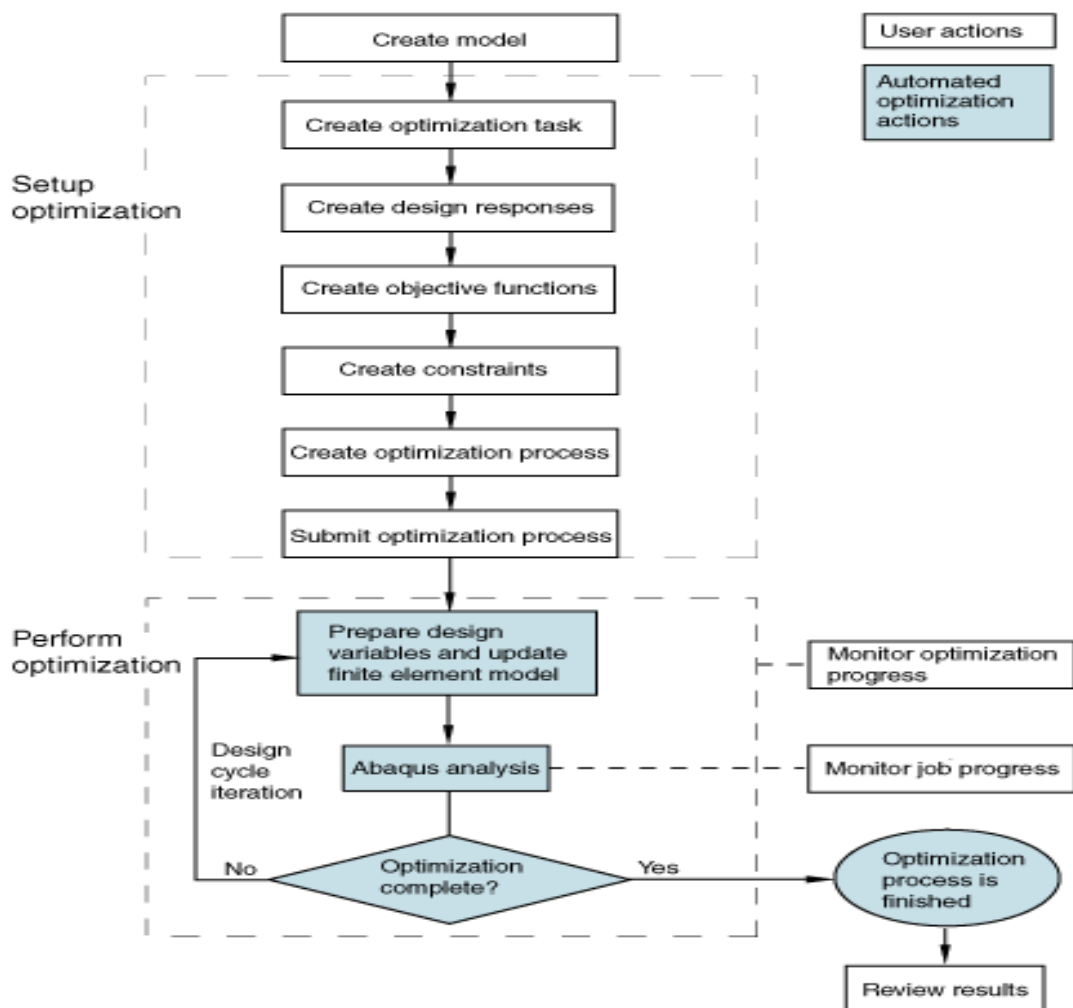
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Abaqus/CAE 6.13.

3.3: Το πακέτο τοπολογικής βελτιστοποίησης του Abaqus (Abaqus Topology Optimization Module - ATOM)

Το πακέτο τοπολογικής βελτιστοποίησης του Abaqus παρέχει προχωρημένες δυνατότητες για μη γραμμική βελτιστοποίηση, δίνοντας στους μηχανικούς σχέδια που είναι σύμφωνα με τις δομικές ανάγκες του εξαρτήματος, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η απόδοση του και μειώνονται τα κόστη που αφορούν το βάρος.

Η λειτουργία ATOM δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να εφαρμόσουν βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization) ή βελτιστοποίηση σχήματος (shape optimization) για εξαρτήματα και συναρμολογήσεις, λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα μεγάλης παραμόρφωσης, τη μη γραμμική συμπεριφοράς υλικών και περιπτώσεις επαφής.

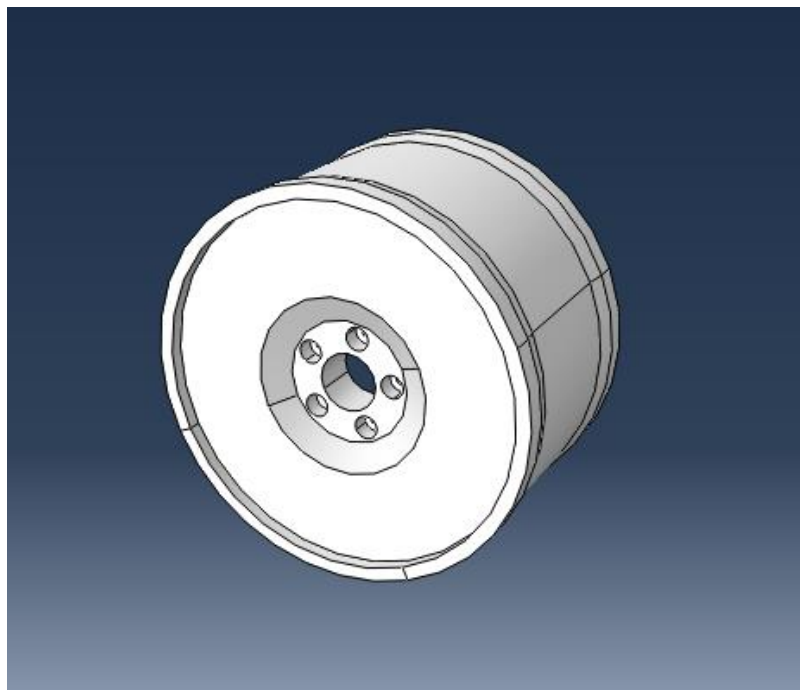
Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη βελτιστοποίηση παρουσιάζεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Εικόνα 3.5: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

3.4: Ανάλυση τροχού και ρυθμίσεις βελτιστοποίησης

Από το μενού στο γραφικό περιβάλλον του Abaqus επιλέγουμε File → Import → Part, για να εισάγουμε το αποθηκευμένο stl αρχείο. Έτσι δημιουργείται το μοναδικό part που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση.



Εικόνα 3.6: Ο τροχός στο περιβάλλον του Abaqus

Αρχικά πρέπει να ορίσουμε το υλικό που χρησιμοποιείται (κράμα αλουμινίου 6061-T6) και να καθορίσουμε τις απαιτούμενες για την ανάλυση ιδιότητες του.

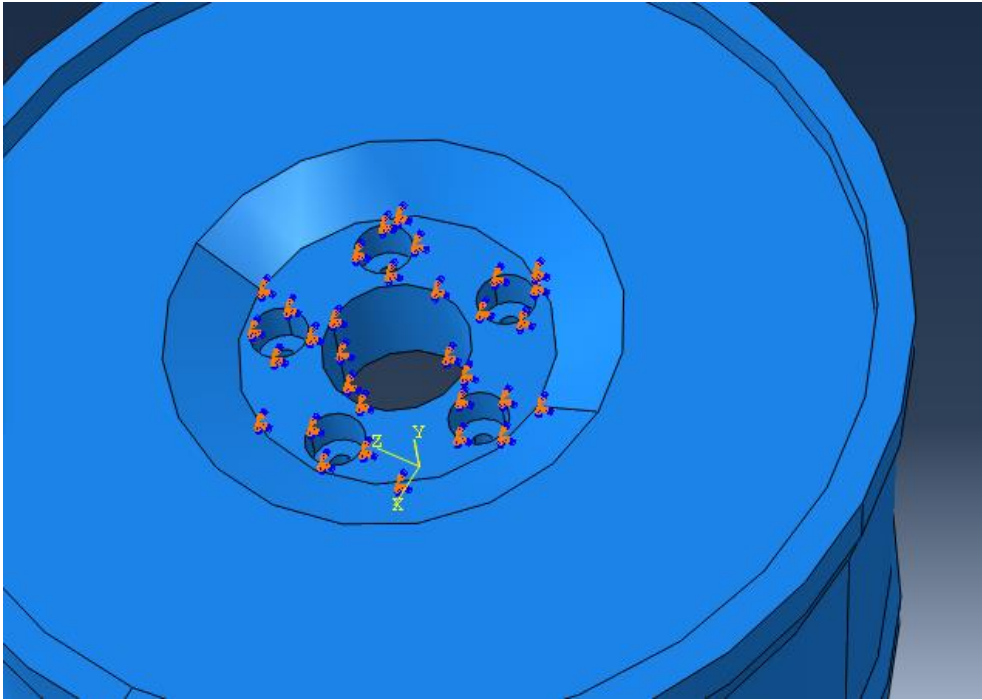
Πυκνότητα	Μέτρο ελαστικότητας	Λόγος Poisson	Όριο διαρροής	Μέγιστη αντοχή
2700 Kg/m ³	70 GPa	0.33	241 MPa	300 MPa

Πίνακας 1: Ιδιότητες κράματος αλουμινίου 6061-T6

Στη συνέχεια θα καθορίσουμε το είδος της ανάλυσης. Αυτό γίνεται επιλέγοντας Step → Create Step → Static General, για τη δημιουργία μιας απλής στατικής ανάλυσης.

Ακολουθεί ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών και των φορτίσεων. Σκοπός της εργασίας είναι να εξεταστεί η αντοχή του τροχού κάτω από ακραίες συνθήκες οδήγησης, προσομοιώνοντας όσο καλύτερα γίνεται τις πρότυπες δοκιμές αντοχής που υφίστανται για τους τροχούς.

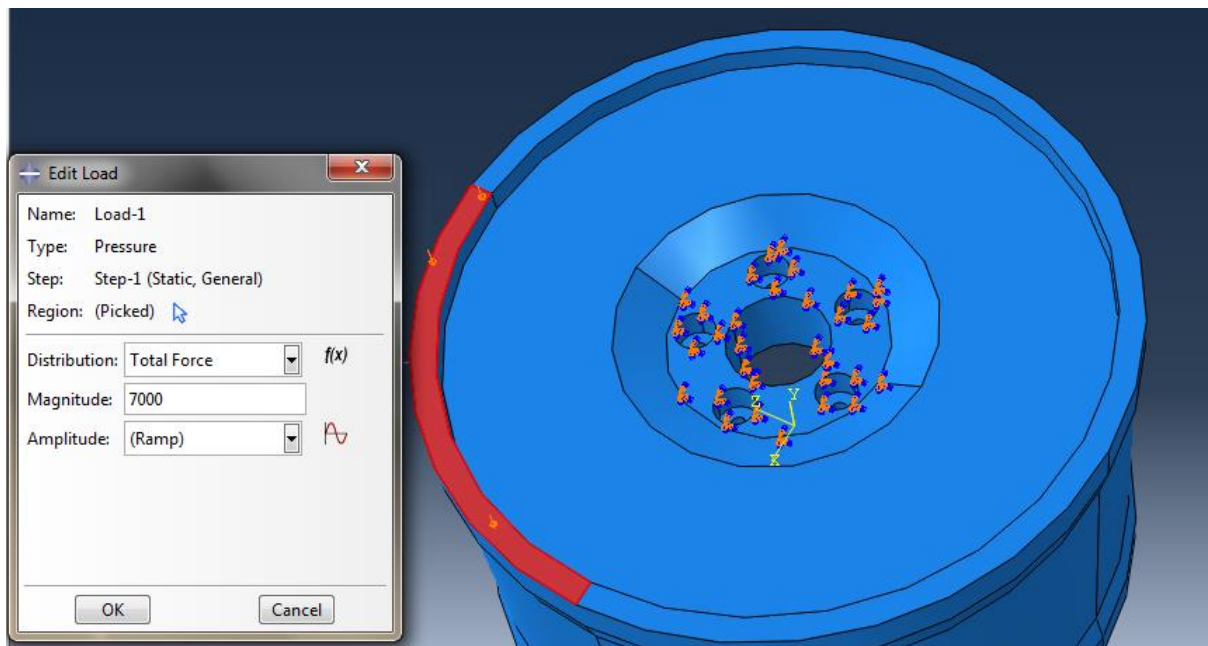
Σαν περιοχή στήριξης επιλέγεται ο άξονας του τροχού, όπου επιλέγουμε πάκτωση.



Εικόνα 3.7: Σημεία στήριξης

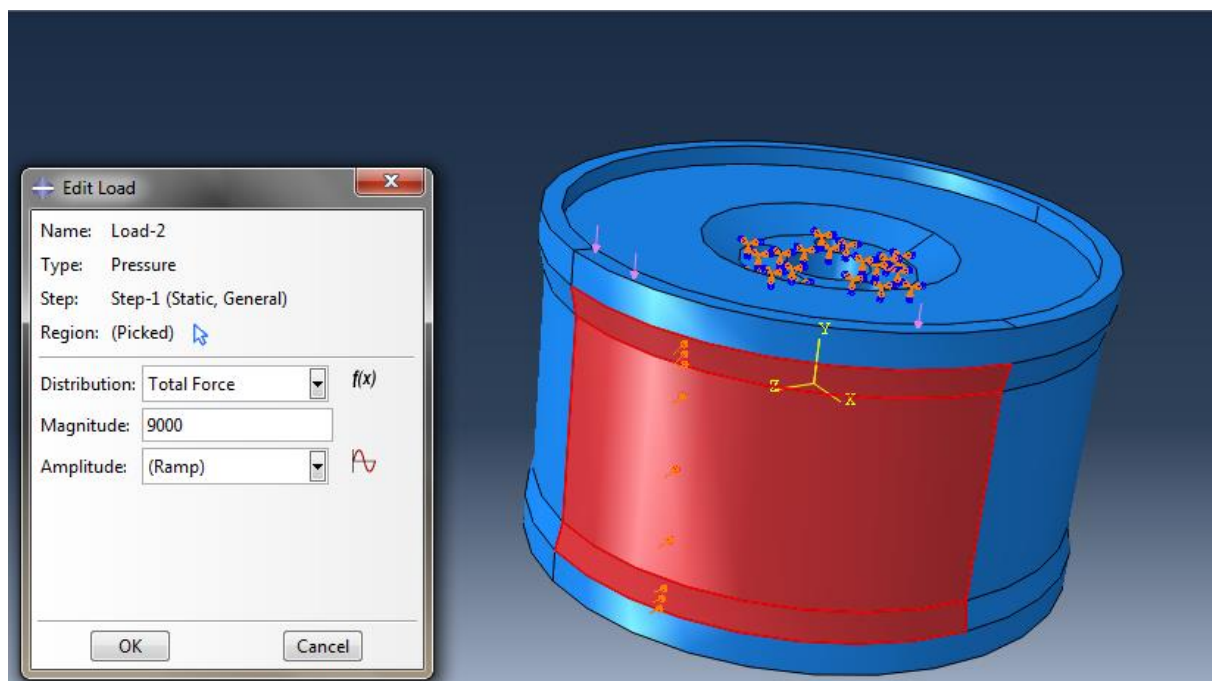
Στη συνέχεια δημιουργούμε τις δυνάμεις, με τη λογική που αναφέρθηκε προηγουμένως:

- Δύναμη 7000 N ομοιόμορφη, παράλληλη στον άξονα του τροχού, κοντά στη ζάντα. Αντιπροσωπεύει τη δύναμη κατά την πρόσκρουση του τροχού σε ένα εμπόδιο ή ένα κράσπεδο.



Εικόνα 3.8: Πρώτη περίπτωση φόρτισης

- Δύναμη 9000 N ομοιόμορφη, κάθετη στη ζάντα του τροχού. Αντιστοιχεί στη δύναμη που ασκείται στον τροχό κατά την οδήγηση σε ανομοιόμορφο ή κατεστραμμένο σε διάφορα σημεία οδόστρωμα.

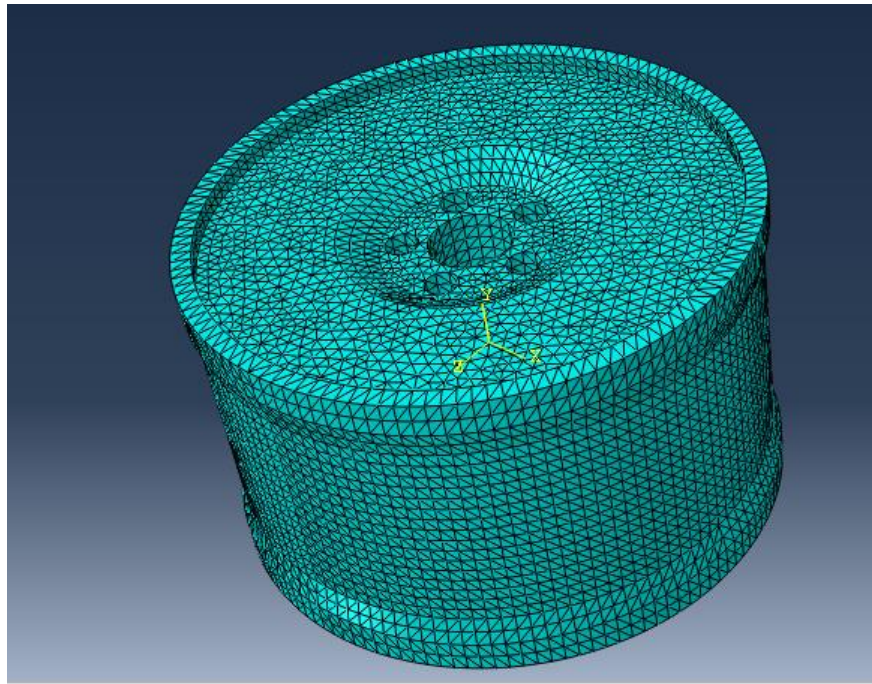


Εικόνα 3.9: Δεύτερη περίπτωση φόρτισης

Η συνδυαστική επίδραση των παραπάνω δυνάμεων αποτυπώνει τη συμπεριφορά του τροχού σε ακραίες συνθήκες οδήγησης, ακόμη και σε περιπτώσεις βίαιης πρόσκρουσης του οχήματος.

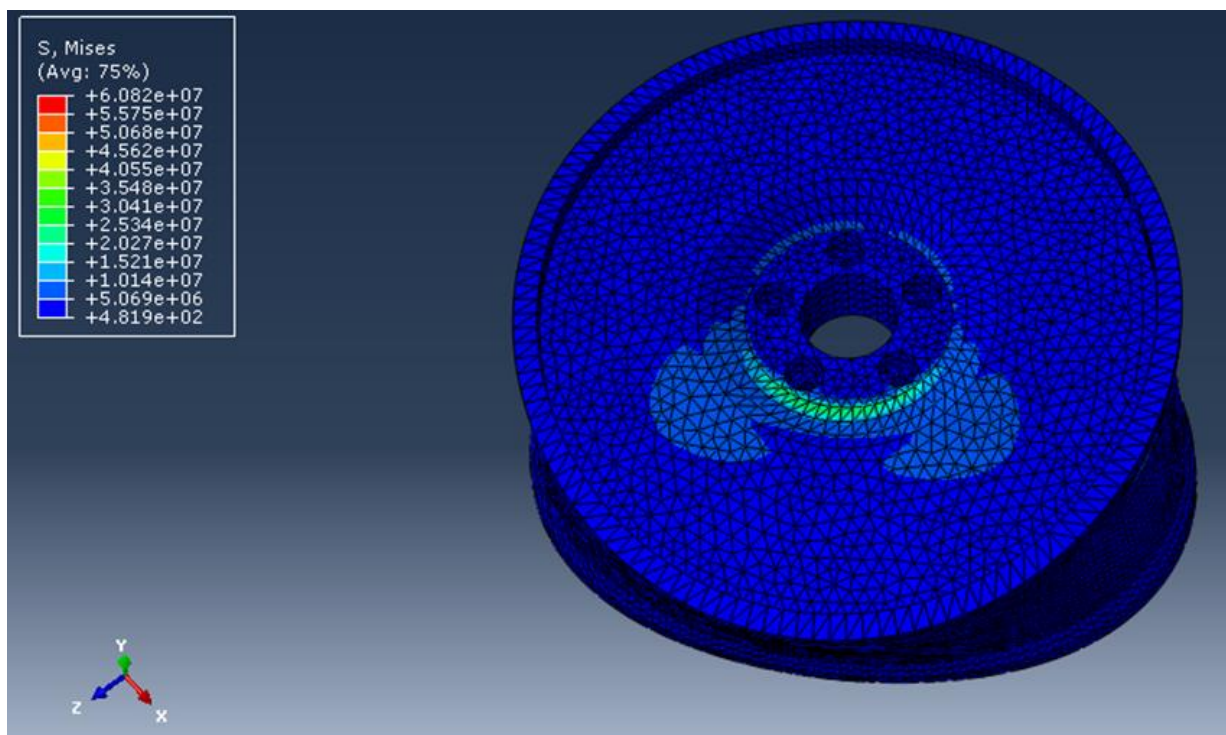
Στη συνέχεια, δημιουργούμε το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Επιλέγουμε την ελεύθερη τεχνική πλεγματοποίησης με τετράεδρα στοιχεία. Για την διακριτοποίηση του πλέγματος επιλέγουμε global size 0.01. Με αυτές τις ρυθμίσεις είμαστε έτοιμοι να δημιουργήσουμε το πλέγμα.

Από τη διαδικασία πλεγματοποίησης δημιουργήθηκαν 79162 τετράεδρα στοιχεία, όπως φαίνεται και παρακάτω (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10: Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Από τα αποτελέσματα μιας απλής στατικής ανάλυσης μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τα σημεία πάνω στον τροχό όπου υπάρχουν οι μεγαλύτερες καταπονήσεις και ο σχεδιασμός τους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.



Εικόνα 3.11: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

Από την ανάλυση φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται γύρω από τον άξονα, καθώς και στην περιοχή των ακτινών του τροχού. Δεδομένων των παραπάνω αποτελεσμάτων, είμαστε σε θέση να καθορίσουμε ανάλογα και τις παραμέτρους της βελτιστοποίησης.

Για τη δημιουργία μιας εργασίας τοπολογικής βελτιστοποίησης επιλέγουμε στο Optimization Module την εντολή “Create optimization task” με επιλογή για “Topology Optimization”. Σαν περιοχή βελτιστοποίησης επιλέγουμε την περιοχή σύνδεσης του άξονα του τροχού με τη ζάντα (περιοχή των ακτινών).

Στη συνέχεια πρέπει να οριστούν οι μεταβλητές του σχεδιασμού (Design Responses). Για την συγκεκριμένη ανάλυση οι βασικές μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν είναι η ενέργεια παραμόρφωσης (Strain energy) και ο όγκος (Volume). Με την εντολή “Create Design Response” ορίζουμε τις δύο σχεδιαστικές μεταβλητές.

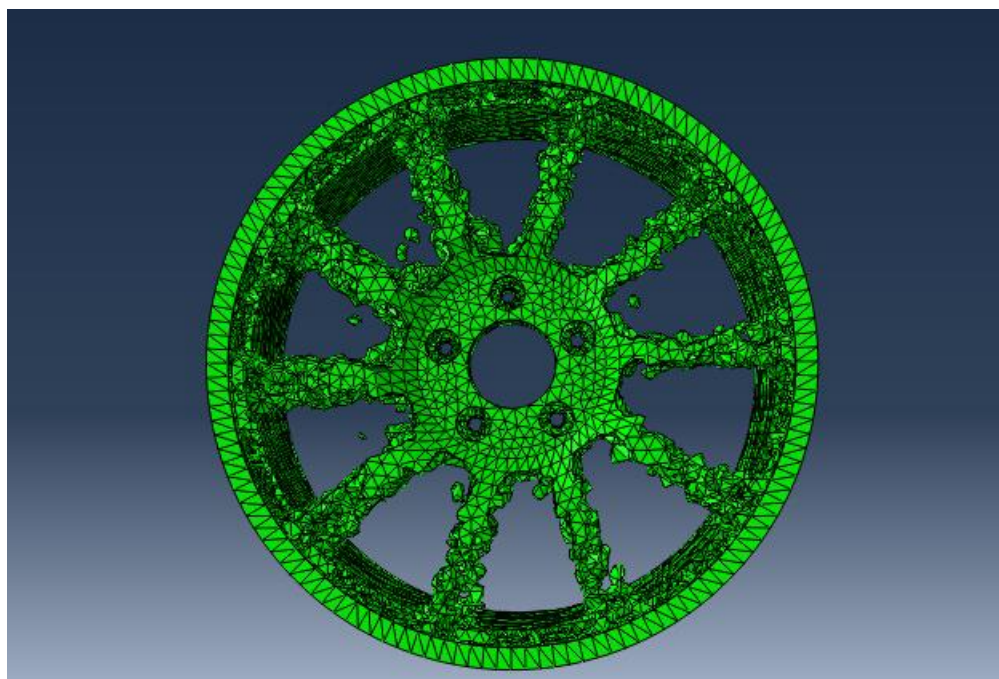
Η διαδικασία της βελτιστοποίησης έχει σαν στόχο την επίτευξη μέγιστης αντοχής, με το μικρότερο δυνατό συνολικό βάρος. Άρα γίνεται λόγος για μια αντικειμενική συνάρτηση, που αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας παραμόρφωσης, υπό κάποιες συνθήκες – περιορισμούς, που είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους. Έτσι, στο περιβάλλον του Abaqus, στο Optimization Module, ορίζουμε σαν αντικειμενική συνάρτηση (Objective Function) την ελαχιστοποίηση της ενέργειας παραμόρφωσης, επιλέγοντας “Design Response: Strain Energy” και “Target: Minimize”. Για τον περιορισμό του βάρους (Constrain) επιλέγουμε “Design Response: Volume” και “Target: <25%”, θέλοντας να μειώσουμε τον όγκο τουλάχιστον στο 25% του αρχικού (“Constrain the response to a fraction of the initial value ≤ 0.25 ”). Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι όταν θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε το βάρος, στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται γενικά ως μεταβλητή ο όγκος, παρόλο που το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα επιλογής και για βάρος.

Ακολουθεί ο προσδιορισμός των γεωμετρικών περιορισμών του βέλτιστου σχεδιασμού. Ο μοναδικός περιορισμός που υπάρχει έχει να κάνει με τον σχηματισμό και τον αριθμό των ακτινών του τροχού. Επιλέγοντας ως άξονα συμμετρίας τον άξονα του τροχού, μπορούμε να καθορίσουμε τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων τμημάτων ανά μοίρες, έχοντας τη δυνατότητα πολλών επιλογών (π.χ. 36°, 45°, 60° κλπ). Έτσι, με την εισαγωγή του περιορισμού “Rotational Symmetry” και επιλέγοντας “Repeating Segment Size: 36”, περιμένουμε ένα σχεδιασμό με 10 ακτίνες.

Αυτό που μένει είναι να ορίσουμε την εργασία βελτιστοποίησης. Επιλέγουμε “Job→ Create Optimization Process”, ορίζοντας τον μέγιστο αριθμό των κύκλων που θα εκτελεστούν από τη λειτουργία ATOM σε 50.

3.5: Αποτελέσματα

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ολοκληρώθηκε μετά από 40 επαναλήψεις και υπολογιστικό χρόνο 10 ωρών, δίνοντας το σχεδιασμό που φαίνεται παρακάτω.



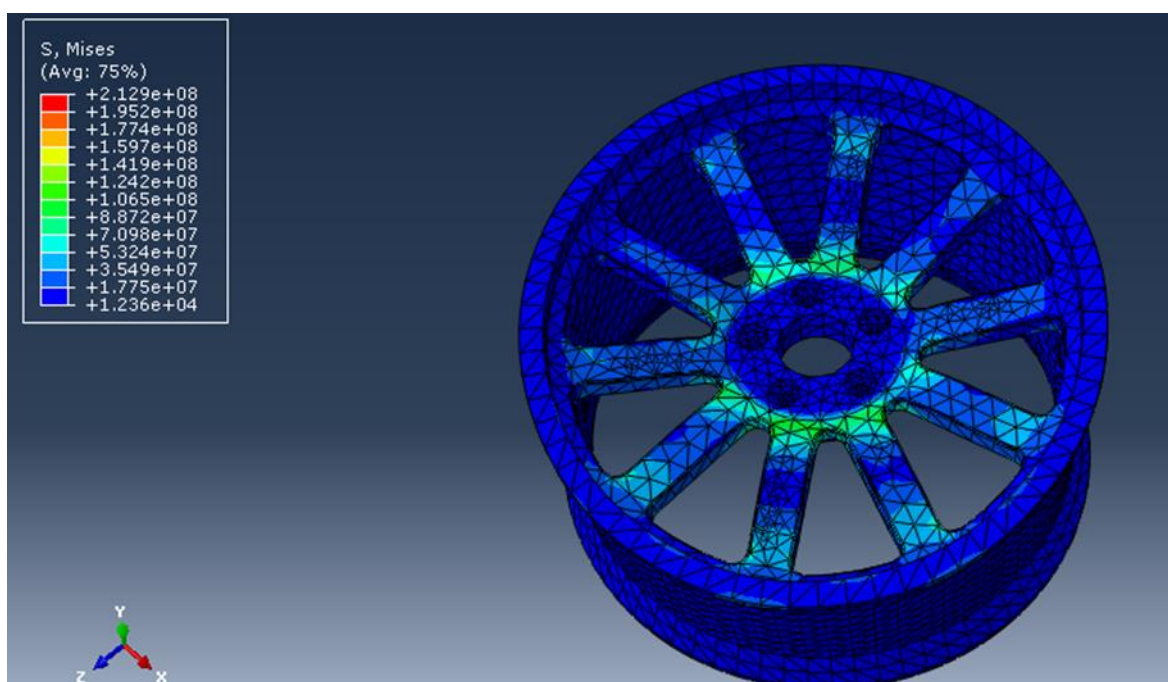
Εικόνα 3.12: Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης

Όπως είχε αναφερθεί και προηγουμένως, η διαδικασία μας δίνει μια εικόνα για τον βέλτιστο σχεδιασμό, χωρίς πάντα αυτός να είναι εφικτός. Ειδικότερα σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει και το στιλιστικό αποτέλεσμα, η παρέμβαση του μηχανικού κρίνεται απαραίτητη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και με βάση την εμπειρία του μηχανικού, το παραπάνω σχέδιο θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί σε ένα πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.13: Βέλτιστο σχέδιο τροχού

Αυτό που μένει είναι να ελέγξουμε αν το τελικό αποτέλεσμα είναι αποδεκτό με βάση τις απαιτήσεις που θέσαμε. Για να το διαπιστώσουμε, εφαρμόζουμε την ίδια στατική ανάλυση για το τελικό μοντέλο, όπως αυτή ορίστηκε για τον αρχικό απλό τροχό.



Εικόνα 3.14: Στατική ανάλυση βέλτιστου σχεδιασμού

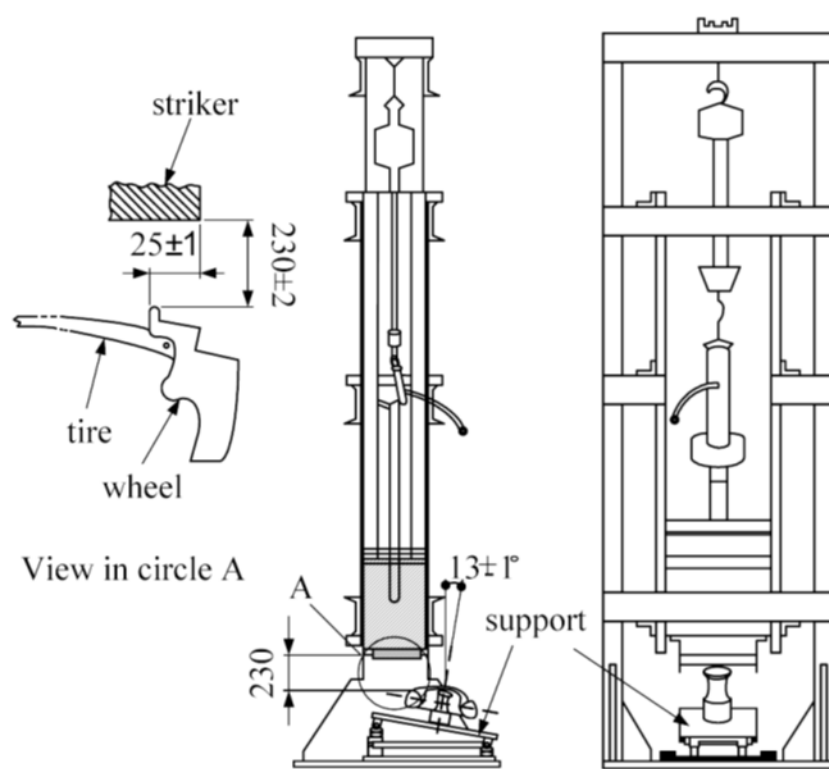
Τα αποτελέσματα δικαιώνουν το σχεδιασμό, αφού όπως φαίνεται η μέγιστη τάση που παρατηρείται (212,9 MPa) είναι κάτω από το όριο διαρροής (241 MPa) για το κράμα αλουμινίου. Επομένως, το παραπάνω σχέδιο κρίνεται αξιόπιστο από άποψη ασφάλειας και ως εκ τούτου μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία υλοποίησης του.

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση δοκιμής κρούσης

4.1: Δοκιμή κρούσης

Η μηχανική απόδοση των τροχών δρόμου υπό κανονικές ή και ακραίες συνθήκες οδήγησης αξιολογείται χρησιμοποιώντας τρεις πρότυπες μεθόδους: τη δοκιμή δυναμικής επαφής-κρούσης (impact test), τη δοκιμή ακτινικής κόπωσης (radial fatigue test) και τη δοκιμή περιστροφικής κάμψης (rotating bending test). Η δοκιμή περιστροφικής κάμψης προσομοιώνει τις δυνάμεις που προκαλούνται από την περιστροφή του τροχού με την εφαρμογή ανάλογης ροπής στρέψης. Στη δοκιμή ακτινικής κόπωσης ο τροχός, με προσαρμοσμένο το λάστιχο, φορτίζεται ακτινικά κόντρα σε έναν περιστρεφόμενο κύλινδρο, προσομοιώνοντας έτσι την ακτινική φόρτιση. Η δοκιμή δυναμικής επαφής – κρούσης χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης σε κρούση, όπου ρυθμιζόμενο βάρος από ατσάλινες πλάκες αφήνεται να πέσει από συγκεκριμένο ύψος πάνω από το ζεύγος τροχός-λάστιχο. Θεωρείται η περίπτωση όπου ο τροχός συγκρούεται με το κράσπεδο ή με ένα μεγάλο εμπόδιο. Η δοκιμή είναι κατάλληλα σχεδιασμένη έτσι ώστε να αξιολογεί την αντοχή σε μετωπική σύγκρουση του ζεύγους τροχός-λάστιχο που χρησιμοποιούνται σε οποιοδήποτε αυτοκίνητο. Πριν την δοκιμή, ο τροχός περνάει από ολοκληρωμένο οπτικό έλεγχο για να βεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν ρωγμές. Για να περάσει τη δοκιμή κρούσης, ο τροχός πρέπει να πληροί τις ακόλουθες ελάχιστες προδιαγραφές απόδοσης : Δεν θα υπάρχουν εμφανή σπασίματα στο κεντρικό μέλος του τροχού, δεν θα υπάρχει αποκόλληση του κεντρικού μέλους από τη ζάντα, δεν θα υπάρχει απότομη απώλεια πίεσης στον αέρα του λάστιχου και παραμόρφωση του τροχού (Διεθνές Πρότυπο, 1995).

Το πρότυπο δοκιμής κρούσης παρέχει λεπτομερή περιγραφή των διαδικασιών και του απαιτούμενου εξοπλισμού για την εφαρμογή του ελέγχου. Η μηχανολογική διάταξη που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Διάταξη δοκιμής κρούσης

Ο τροχός είναι τοποθετημένος με τον άξονα του σε γωνία $13 \pm 1^\circ$ σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η επιφάνεια επαφής του ασφάλινου βάρους που πρόκειται να συγκρουστεί με τον τροχό πρέπει να έχει πλάτος τουλάχιστον 125 mm και μήκος 375 mm. Το βάρος που αφήνεται να πέσει βρίσκεται 230 mm (± 2 mm) πάνω από το ανώτερο σημείο του τοποθετημένου τροχού.

Γενικά θεωρείται πως όταν ένας τροχός ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της δοκιμής κρούσης, τότε ανταποκρίνεται αποτελεσματικά και στις άλλες μεθόδους όπως τη δοκιμή ακτινικής κόπωσης και τη δοκιμή περιστροφικής κάμψης.

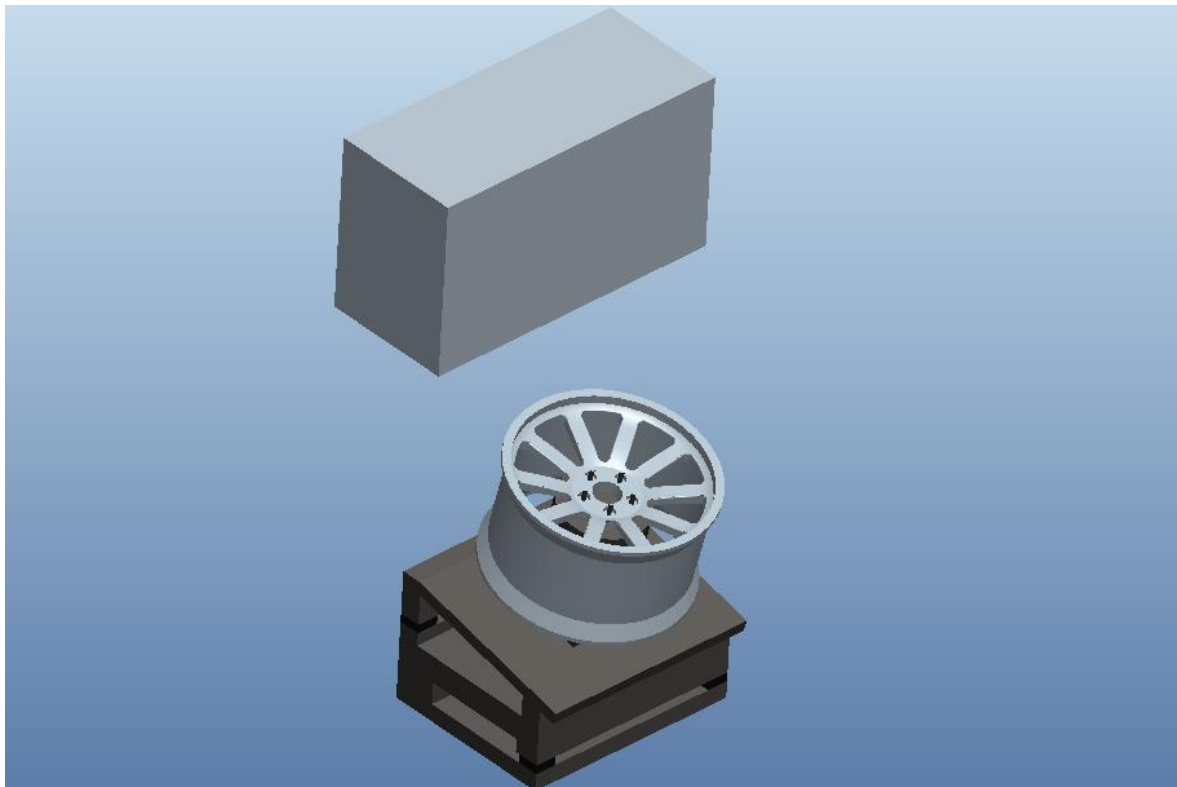
4.2: Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων αναπτύσσουν ασφαλή, με υψηλή απόδοση καυσίμου και χαμηλού βάρους εξαρτήματα για τα οχήματα, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στους κυβερνητικούς κανονισμούς και τα πρότυπα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Σε πραγματικές συνθήκες, ο καθορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς του τροχού είναι πολύ σημαντικός, αλλά η δοκιμή και η επίβλεψη των τροχών κατά τη διαδικασία παραγωγής τους είναι μια διαδικασία δαπανηρή σε χρόνο και κόστος. Για οικονομικούς λόγους, είναι σημαντικό να μειώσουμε το χρόνο που αφιερώνεται για την ανάπτυξη και τον έλεγχο ενός καινούργιου τροχού. Μια τρισδιάστατη ανάλυση των τάσεων σε έναν τροχό αλουμινίου περιλαμβάνει

πολύπλοκη γεωμετρία. Ως εκ τούτου, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι τάσεις χρησιμοποιώντας στοιχειώδεις μηχανικές προσεγγίσεις. Γι' αυτό το λόγο, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis-FEA) χρησιμοποιείται ευρέως στο στάδιο του σχεδιασμού της διαδικασίας ανάπτυξης του προϊόντος για να ερευνηθεί η μηχανική απόδοση του πρωτότυπου σχεδίου. Η προσομοίωση των δοκιμών που γίνονται στους τροχούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο και το κόστος που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού. Με αυτόν τον τρόπο, οι όποιες σχεδιαστικές τροποποιήσεις θα μπορούν να πραγματοποιηθούν στο προϊόν, έτσι ώστε να εξετάσουμε πως αυτές θα επηρεάσουν την απόδοση του, χωρίς να χρειάζονται δαπανηρές αλλαγές εργαλείων και εξοπλισμού με πραγματική παραγωγή. Έτσι, με σκοπό την αντικατάσταση της πραγματικής διαδικασίας ελέγχου, η προσομοίωση της δοκιμής κρούσης θα πρέπει να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα και επαρκείς πληροφορίες.

4.3: Διαδικασία ανάλυσης

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Pro/Engineer η μηχανολογική διάταξη, ανάλογη με αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η δοκιμή πρόκειται να γίνει μόνο για τον τροχό, χωρίς το λάστιχο.



Εικόνα 4.2: Διάταξη δοκιμής κρούσης στο λογισμικό Pro/Engineer

Η διάταξη αποτελείται από τον τροχό που προέκυψε από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, το έλαστρο κρούσης, καθώς και την βάση πρόσδεσης του τροχού, σε σημεία της οποίας έχει τοποθετηθεί γόμα για την απορρόφηση των κραδασμών από την κρούση.

Η παραπάνω συναρμολόγηση γίνεται εξαγωγή σε αρχείο stl, το οποίο θα εισάγουμε στο πρόγραμμα Abaqus.

4.4: Δυναμική ανάλυση στο Abaqus

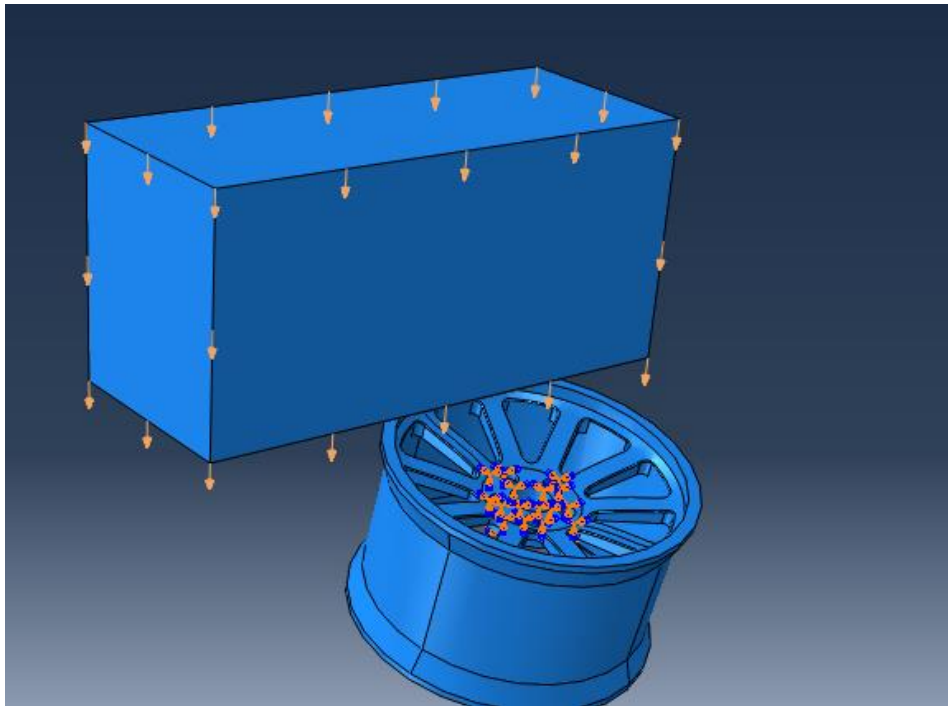
Για την συγκεκριμένη εργασία, θα χρησιμοποιήσουμε την λειτουργία Dynamic/Explicit του Abaqus.

Επειδή πρόκειται για κρούση, πρέπει να ορίσουμε τις παραμέτρους της επαφής. Από το περιβάλλον του Abaqus επιλέγουμε “Interaction → Create Interaction”. Επιλέγουμε την περίπτωση γενικής επαφής (“General Contact”). Στη συνέχεια ορίζουμε τις μηχανικές ιδιότητες της κρούσης. Επιλέγουμε “Interaction → Create Interaction Property”, με επιλογή τύπου επαφής (Type: Contact). Στις επιλογές που εμφανίζονται επιλέγουμε “Tangential Behavior” και “Normal Behavior” από τις μηχανικές ιδιότητες (“Mechanical”) της κρούσης.

Για λόγους οικονομίας χρόνου, η ανάλυση δεν θα πραγματοποιηθεί σε ολόκληρη τη διάταξη, αλλά θα επικεντρώσουμε στο σημείο που μας ενδιαφέρει, όπως φαίνεται παρακάτω. Επιλέγουμε να ξεκινήσουμε την διαδικασία από τη στιγμή που το έλαστρο κρούσης και ο τροχός έρχονται σε επαφή. Σε αυτή τη περίπτωση πρέπει να καθορίσουμε τις συνθήκες ακριβώς πριν την επαφή, δηλαδή την ταχύτητα του ελαστρού. Στο μενού των φορτίσεων επιλέγουμε τη δημιουργία προκαθορισμένου πεδίου (“Create Predefined Field”). Επιλέγουμε το έλαστρο και δίνουμε την τιμή 2 m/sec, αφού αυτή την ταχύτητα έχει τη στιγμή της κρούσης. Αυτή υπολογίζεται εύκολα από τον τύπο $u = \sqrt{2gh}$, όπου h το ύψος από το οποίο αφήνεται να πέσει το έλαστρο κρούσης.

Οι υπόλοιπες οριακές συνθήκες αφορούν τα σημεία στήριξης του τροχού στη βάση και την επίδραση της βαρύτητας για την πτώση του ελαστρού κρούσης.

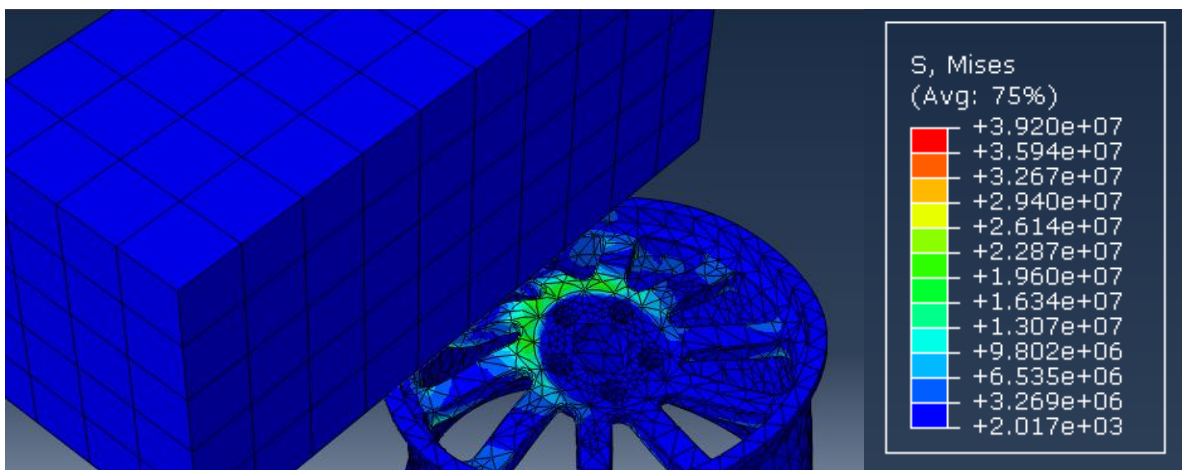
Δημιουργήθηκαν συνολικά 200 τετραγωνικά και 9012 τετράεδρα στοιχεία, με element size 0.075, για υπολογιστική ευκολία.



Εικόνα 4.3: Οριακές συνθήκες

Για υπολογιστική ευκολία επιλέχθηκε ο χρόνος των 50 ms για την προσομοίωση της δοκιμής κρούσης. Αυτός βέβαια μπορεί να αλλάξει, ανάλογα και με τις υπολογιστικές δυνατότητες του συστήματος και τις απαιτήσεις της δοκιμής.

Η δυναμική ανάλυση κρούσης ολοκληρώθηκε μετά από υπολογιστικό χρόνο 45 λεπτών, δίνοντας τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα δοκιμής κρούσης – Κατανομή τάσεων Von Mises

Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινιστεί ότι ανάλογες μελέτες δυναμικής δοκιμής κρούσης σε περιβάλλον CAE έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν. Κάθε μια από τις μελέτες αυτές προσεγγίζει ελαφρώς διαφοροποιημένα το πρόβλημα, κυρίως όσον αφορά την προς ανάλυση διάταξη ή τις δυναμικές φορτίσεις που περιγράφουν το πρόβλημα. Όλες όμως αποσκοπούν και επιδιώκουν την καλύτερη δυνατή καταγραφή των αποτελεσμάτων που θα έδινε μια πραγματική δοκιμή κρούσης για έναν ήδη κατασκευασμένο τροχό.

Για τη δοκιμή κρούσης χρησιμοποιήθηκε έλαστρο κρούσης βάρους 630 kg, με αποτέλεσμα η συνολική δύναμη να είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες που χρησιμοποιήθηκαν στην στατική ανάλυση. Σε κάθε περίπτωση η διαδικασία μπορεί να διαφοροποιηθεί και να προσαρμοστεί, ανάλογα με τις απαιτήσεις της δοκιμής. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται απλά η διαδικασία για την εφαρμογή μιας δυναμικής δοκιμής κρούσης.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Το τελικό σχέδιο του τροχού, ανταποκρινόμενο αποτελεσματικά σε όλες τις απαιτήσεις ασφαλείας, μπορεί να προωθηθεί για παραγωγή. Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη διαδικασία βελτιστοποίησης επιτεύχθηκε μείωση του συνολικού βάρους του τροχού από 27 kg σε 15 kg. Αυτή η μείωση έχει δύο σημαντικά οφέλη: μείωση του συνολικού βάρους του αυτοκινήτου, αλλά και μείωση του κόστους παραγωγής.

Ένα μεγάλο εύρος σχεδίων μπορεί να προκύψει από τη διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε για το τελικό σχέδιο, αρκεί να πειραματιστεί κανείς με τις σχεδιαστικές ρυθμίσεις της εργασίας βελτιστοποίησης στο λογισμικό Abaqus.

Αν αναλογιστεί κανείς τον μεγάλο ανταγωνισμό που υπάρχει στην αυτοκινητοβιομηχανία, η ανάπτυξη προϊόντων χαμηλού κόστους και υψηλής ποιότητας είναι το μεγαλύτερο στοίχημα για τους κατασκευαστές. Η ανάπτυξη των συστημάτων CAD/CAM/CAE και οι διευρυμένες δυνατότητες που αυτά προσφέρουν έχουν αναγκάσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες να θέτουν υψηλούς στόχους, με γνώμονα την αξιοπιστία, την ασφάλεια, αλλά και την αισθητική εμφάνιση των προϊόντων τους.

Βιβλιογραφία

1. S. Das (2014), "Design and Weight Optimization of Aluminium Alloy Wheel ", *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 4, Issue 6
2. M. Cerit (2010), "Numerical simulation of dynamic side impact test for an aluminium alloy wheel", *Scientific Research and Essays* Vol. 5(18), pp. 2694-2701
3. J. Stearns, T. S. Srivatsan, X. Gao, & P. C. Lam (2006), "Understanding the Influence of Pressure and Radial Loads on Stress and Displacement Response of a Rotating Body: The Automobile Wheel", *International Journal of Rotating Machinery* Volume 2006, Article ID 60193, Pages 1-8
4. Ch. P. V. Ravi Kumar¹ & Prof. R. Satya Meher (2013), "Topology Optimization of Aluminium Alloy Wheel", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*
5. Β. Φέτση (2013), "Σχεδιασμός και τοπολογική βελτιστοποίηση ρότορα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
6. Steel Market Development Institute, *Lightweight Steel Wheel Project*
7. C.L. Chang & S.H. Yang (2008), "Finite element simulation of wheel impact test", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 28, Issue 2
8. E.M. Adigio & E.O. Nangi (2014), "Computer Aided Design and Simulation of Radial Fatigue Test of Automobile Rim Using ANSYS", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 11, Issue 1 Ver. IV, PP 68-73
9. S. Prasad & M.A. Kumar (Hyundai Motor India Engineering)(2013), "Topology Optimization of Alloy Wheel", *Altair Technology Conference 2013 India*
10. P. Meghashyam, S. Girivardhan Naidu & N. Sayed Baba (2013), "Design and Analysis of Wheel Rim using CATIA & ANSYS", *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, Volume 2, Issue 8
11. L. Wang, Y. Chen, C. Wang & Q. Wang (2011), "Fatigue Life Analysis of Aluminum Wheels by Simulation of Rotary Fatigue Test", *Journal of Mechanical Engineering* 57, PP 31-39
12. N. Satyanarayana & Ch.Sambaiah (2012), "Fatigue Analysis of Aluminum Alloy Wheel Under Radial Load", *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE)*, ISSN No. 2231 -6477, Vol-2, Issue-1
13. M. Yaman & B.Yegin, "A Light Commercial Vehicle Wheel Design Optimization for Weight, NVH and Durability Considerations", *5th ANSA & μETA International Conference*
14. P. H. Yadav¹ & P. G. Ramdasi (2012), "Optimization of Car Rim Using OptiStruct", *IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology (IOSR-JESTFT)*, ISSN: 2319-2402, ISBN: 2319-2399. Volume 2, Issue 3, PP 10-15

15. R. R. V. Neves, R. C. Santiago & M. Alves (2009), "Numerical Simulation of Wheel-Tire Assembly Subjected to Impact Loading", *20th International Congress of Mechanical Engineering*
16. S. Johnsen, *Structural Topology Optimization : Basic Theory, Methods and Applications*
17. Comsol, *Fatigue Analysis of an Automobile Wheel Rim solved with COMSOL MULTIPHYSICS 3.5a*
18. C. Bosi, G.L. Garagnani & R. Tovo, *Fatigue Properties of Cast Aluminium Alloy for Rims of Car Wheels*
19. M. P. Bendsøe & O. Sigmund (2003), *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, Springer
20. M. P. Bendsøe, O. Sigmund & N. Olhoff (2006), *IUTAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials*, Springer
21. <http://www.alueurope.eu/aam/>
22. <http://www.simulia.com/download/rum11/GL/Sandeep-Urankar-ATOM-SGL-RUM-2011/>
23. <http://mbi-wiki.uni-wuppertal.de/en/optimisation/einfuehrung-in-die-topologieoptimierung/>
24. Abaqus 6.13 Documentation
25. S. King, T. Richards, *Solving Contact Problems with Abaqus*
26. http://en.wikipedia.org/wiki/Topology_optimization
27. <http://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>
28. http://en.wikipedia.org/wiki/PTC_Creo_Elements/Pro