

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

***Μελέτη Αστοχίας Πτέρυγας Φτερωτής Κατασκευασμένης Από
Υπερκράμα Νικελίου Υπό Συνθήκες Μηχανικής Φόρτισης***

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοσμετάτος Νικόλαος
Λαμπρόπουλος Σπυρίδων

Επιβλέπων: Κ.Ι. Γιαννακόπουλος

Αθήνα 2016

Copyright © Κοσμετάτος Νικόλαος, Λαμπρόπουλος Σπυρίδων, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Α.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε αρχικά να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας , κ. Γιαννακόπουλο Κωνσταντίνο, για τη συμβολή του στην ολοκλήρωση της εργασίας, το επιστημονικό υλικό που μας προσέφερε, καθώς και τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές του.

Ευχαριστούμε τον επίκουρο καθηγητή κ.Τσολάκη Αντώνη για τις ιδέες του στο κομμάτι των πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες μας έφεραν πιο κοντά στην ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας

Επιπροσθέτως ευχαριστούμε την εταιρεία P.V. Engineering και συγκεκριμένα τον κ. Παπαϊωάννου Δημήτρη για την βοήθεια του σχετικά με το σχεδιασμό του περυγίου, τον καθηγητή κ. Σαγιά Βασίλειο για τις συμβουλές του στο σχεδιαστικό κομμάτι του πειράματος ,τον κ. Νίκα Κων/νο Στέφανο για την πολύτιμη βιβλιογραφία και τον κ. Παπαγεωργίου για την παραχώρηση του στερεοσκοπίου για τη λήψη φωτογραφιών.

Τέλος, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την υποστήριξη, την κατανόηση και τη βοήθειά τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μας στο τμήμα της Μηχανολογίας του Α.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Μηχανολογίας του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα. Στόχος της είναι η μελέτη πτέρυγας φτερωτής αεριοστρόβιλου κινητήρα jet (turbo-prop), και τα αίτια αστοχίας της, υπό συνθήκες μηχανικής φόρτισης.

Πρόκειται για ένα πτερύγιο που αποτελείται από ένα υπερκράμα νικελίου και είναι ένα από τα 38 που βρίσκονται τοποθετημένα στο πρώτο στάδιο του στροβίλου του κινητήρα, αμέσως μετά την έξοδο του θαλάμου καύσης. Ο κινητήρας του οποίου εξάρτημα είναι το υπό εξέταση πτερύγιο είναι κατασκευής Pratt & Whitney και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο PW123-AF. Ένας τύπος κινητήρα που χρησιμοποιείται στα πολύ γνωστά πυροσβεστικά αεροσκάφη Canadair.

Στο θεωρητικό μέρος παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας που διέπει τους αεριοστρόβιλους κινητήρες, τα είδη των κινητήρων, καθώς και τα επιμέρους εξαρτήματα του κινητήρα από όπου προέρχεται το υπό ανάλυση πτερύγιο. Γίνεται αναφορά στους κυριότερους τρόπους κατασκευής πτερυγίων και στα υλικά που χρησιμοποιούνται. Επιπρόσθετα, γίνεται περιγραφή και ανάλυση της μεθόδου με πεπερασμένα στοιχεία και τα χαρακτηριστικά της αντίστροφης μηχανικής, εργαλεία απαραίτητα για την κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο του πειραματικού μέρους, παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού του τριασδιάστατου μοντέλου. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο, δίνεται βάση στον τρόπο υπολογισμού των ασκούμενων στο πτερύγιο δυνάμεων, ενώ στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στα χαρακτηριστικά του πτερυγίου και στις συνθήκες λειτουργίας. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος προσδιορισμού του υλικού κατασκευής του δοκιμίου με τη διαδικασία της χημικής ανάλυσης να λαμβάνει χώρα. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την στατική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ στο έκτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον οπτικό έλεγχο του πτερυγίου και τον έλεγχο με στερεοσκόπιο. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας και τα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: αεριοστρόβιλος κινητήρας, πτερύγιο, πεπερασμένα στοιχεία, στατική ανάλυση, δυνάμεις, αίτια αστοχίας

Abstract

This thesis was carried out in the Department of Mechanical Engineering of The Piraeus University of Applied Sciences. The main objective of this research is the failure analysis of a turboprop turbine blade, the determination of the possible failure causes and the understanding in depth of a jet engine's operation.

The turbine blade is made of Ni superalloy, and it is one of the 38 blades which are placed in the very first turbine disk, right after the combustion chamber. Pratt & Whitney 123AF is the model of the turboprop engine where this type of blade is used. It is a common engine that can be found in the Bombardier CL-415 (Canadair).

In theoretical part, the basic rules of jet engine operation are described, alongside with different kinds of aircraft engines and their main parts. Moreover, there is a reference to the different manufacturing methods and materials of a turbine blade. Last but not least, there is a description of the Finite Element Analysis (FEA) and the method of Reverse Engineering, tools which are necessary for the comprehension of the experimental procedure.

In the first chapter of the experimental part, there is the procedure of the blade's 3d model design. In the second chapter, the analytical mathematical calculation of the loads applied on the blade is described and in the third one there is a brief reference of the blade's characteristics and the operation conditions. Furthermore, in the next chapter, the procedure of the chemical analysis for the determination of the material that the blade is made of is presented. In the fifth chapter of the experimental part the results of the static structural analysis are presented through a series of pictures. The results, not only of the optical and but also the stereoscope inspection, are shown in the sixth chapter. Lastly, there are the overall results and the final conclusions.

Keywords: *turbine blade, turboprop, FEA, static analysis, loads, chemical analysis, material, failure*

Σκοπός

Η παρούσα πτυχιακή εκπονήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό των αιτίων απόσυρσης από τη λειτουργία ενός πτερυγίου πρώτης βαθμίδας στροβίλου, κινητήρα αεροπορικής χρήσης. Έγινε ανάλυση των μηχανικών φορτίσεων οι οποίες δρουν στο πτερύγιο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων. Στη συνέχεια με τη χρήση λογισμικού πραγματοποιήθηκε προσομοίωση λειτουργίας του πτερυγίου ώστε να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις των μηχανικών φορτίσεων σε αυτό. Σκοπός αυτής της μεθόδου ήταν να διευκρινιστεί εάν η αστοχία οφείλεται σε μηχανική καταπόνηση ή σε άλλους μηχανισμούς φθοράς.

Περιεχόμενα

ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.....	1
1. Αστοχία πτερυγίων πρώτης βαθμίδας στροβίλου	1
2. Συνήθεις αστοχίες πτερυγίων αεροστροβίλων.....	7
3. Επιλογή κατάλληλου υλικού και ανάλυση αστοχίας σε αμοστροβίλους ναυτιλιακών εφαρμογών χρησιμοποιώντας Reverse engineering και τεχνικές FEA (ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων).....	10
4. Σχεδιασμός και ανάλυση πτερυγίου αμοστροβίλου με τη χρήση FEA.....	18
5. Εκτίμηση της διάρκειας ζωής, μέχρι τον θρυμματισμό, επίστρωσης θερμικού φραγμού (TBC) πτερυγίου αεροστροβίλου με χρήση δοκιμής θερμικής κόπωσης.....	27
6. Εκτίμηση κατάστασης πτερυγίων στροβίλου και της προστατευτικής επίστρωσης ...	33
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	38
Κεφάλαιο 1.....	38
Εισαγωγή.....	38
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	38
1.2 Ορισμός αερίωσης.....	39
1.3 Ώση.....	39
Κεφάλαιο 2.....	40
Κινητήρας αεροσκάφους.....	40
2.1 Αρχή λειτουργίας κινητήρα jet και τα μέρη του	40
2.2 Είδη κινητήρων.....	41
2.3 Τύποι αεροστροβίλων κινητήρων	41
2.3.1 Στροβιλοαντιδραστήρας - Turbojet engine.....	41
2.3.2 Ελικοστροβίλος - Turboprop engine.....	42
2.3.3 Αξονοστροβίλος - Turboshaft engine	43
2.3.4 Στροβιλοανεμιστήρας - Turbofan engine	43
Κεφάλαιο 3.....	45
Ο κινητήρας PW123AF.....	45
3.1 Ψυχρό τμήμα κινητήρα PW123AF.....	45
3.2 Συμπιεστής.....	46
3.2.1 Λειτουργία	46
3.2.2 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές	46
3.2.3 Αξονικοί συμπιεστές.....	47
3.3 Πτερύγια συμπιεστή	47

3.3.1 Κινητά πτερύγια.....	47
3.4 Θερμό τμήμα κινητήρα PW123AF.....	48
3.5 Στρόβιλος.....	49
3.6 Πτερύγια ρότορα	50
3.7 Στοιχεία κινητών πτερυγίων	51
3.7.1 Χαρακτηριστικά πτερυγίων	52
3.8 Ψύξη πτερυγίων.....	52
Κεφάλαιο 4.....	53
Κατασκευή πτερυγίων	53
4.1 Υλικά κατασκευής πτερυγίων	53
4.2 Διαδικασία κατασκευής.....	53
4.2.1 Συμβατική equiaxed διαδικασία χύτευσης	53
4.2.2 Χυτά πτερύγια κράματος κατευθυνόμενης στερεοποίησης (Directional Solidification)	54
4.2.3 Χυτά πτερύγια μονοκρυσταλλικού κράματος	55
Κεφάλαιο 5.....	57
Επιστρώσεις (coatings)	57
Κεφάλαιο 6.....	58
Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	58
6.1 Γενικά	58
6.2 Ιστορική αναδρομή.....	58
6.3 Ανάλυση	58
6.4 Επίλυση	60
Κεφάλαιο 7.....	61
Αντίστροφη σχεδίαση (Reverse engineering)	61
7.1 Εισαγωγή	61
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	63
Εισαγωγή.....	63
Κεφάλαιο 1.....	63
Σχεδιασμός πτερυγίου.....	63
1.1 Εξοπλισμός	63
1.2 Διαδικασία	64
1.3 Αποτέλεσμα.....	65
1.4 Μετατροπή του νέφους σημείων σε τρισδιάστατο (solid) αντικείμενο	66

Κεφάλαιο 2	67
Χαρακτηριστικά πτερυγίου και συνθήκες λειτουργίας	67
2.1 Χαρακτηριστικά πτερυγίου	67
2.2 Συνθήκες λειτουργίας	67
Κεφάλαιο 3	69
Υπολογισμός δυνάμεων	69
3.1 Γενικά	69
3.2 Υπολογισμός δυνάμεων καυσαερίων	69
3.3 Αναλυτικός υπολογισμός αξονικής και περιφερειακής δύναμης με χρήση τριγώνων ταχυτήτων	71
3.5 Μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού φυγοκέντρου	72
3.6 Υπολογισμός φυγοκέντρου	73
Κεφάλαιο 4	74
Χημική ανάλυση	74
4.1 Διαδικασία	74
4.2 Προετοιμασία πτερυγίου	74
4.3 Αποτελέσματα	75
4.4 Ιδιότητες υλικού Inconel 625	76
Κεφάλαιο 5	77
Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία	77
5.1 Στατική ανάλυση στη μέγιστη ταχύτητα (20000 rpm).....	77
5.2 Αποτελέσματα - Παρατηρήσεις.....	82
Κεφάλαιο 6	83
Έλεγχος πτερυγίου	83
6.1 Οπτική μελέτη των επιφανειών αστοχίας του πτερυγίου	83
Κεφάλαιο 7	88
Συμπεράσματα	88
Βιβλιογραφία	89

ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

1. Αστοχία πτερυγίων πρώτης βαθμίδας στροβίλου

Ο **M.R. Khajavi** και ο **M.H. Shariat** [1], μελέτησαν τους μηχανισμούς αστοχίας που εμφανίζονται στα πτερύγια της πρώτης βαθμίδας στροβίλου αεριοστρόβιλου κινητήρα και πιο συγκεκριμένα τις επιπτώσεις της θερμής διάβρωσης στα πτερύγια του στροβίλου του κινητήρα GE-F5.

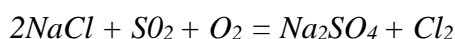
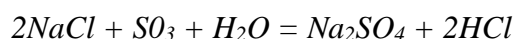
Τα καύσιμα που χρησιμοποιούν οι αεριοστρόβιλοι περιέχουν προσμίξεις όπως θείο, νάτριο, κάλιο, βανάδιο, μόλυβδος και μολυβδαίνιο που μπορούν να προκαλέσουν θερμή διάβρωση. Οι ρύποι που εισέρχονται με τον αέρα διαφέρουν ανάλογα με τη τοποθεσία λειτουργίας του κινητήρα συνήθως όμως περιέχουν νάτριο, θείο, ασβέστιο και χλώριο. Αυτές οι ακαθαρσίες στο καύσιμο και τον αέρα οδηγούν στη δημιουργία σουλφιδίων που κατακάθονται στην επιφάνεια των πτερυγίων με αποτέλεσμα την εμφάνιση θερμής διάβρωσης .

Για να λάβει χώρα το φαινόμενο της θερμής διάβρωσης πρέπει το προστατευτικό στρώμα από οξειδία στην επιφάνεια του πτερυγίου να έχει καταστραφεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως η μηχανική διαταραχή του στρώματος των οξειδίων μέσω κόπωσης ή πλαστικής παραμόρφωσης του υποστρώματος που θα ασκήσει τάσεις στα επιφανειακά οξειδία. Άλλος τρόπος είναι η διάχυση του θείου μέσα από τα οξειδία μέχρι να σχηματιστούν σουλφίδια χρωμίου μέσα στο μέταλλο. Με αυτό το τρόπο αναστέλλεται και η δημιουργία νέου στρώματος οξειδίων αν προηγουμένως έχει αφαιρεθεί με μηχανικό τρόπο. Ένας ακόμη τρόπος καταστροφής του στρώματος οξειδίων είναι η δημιουργία ενός τοπικού αναγωγικού περιβάλλοντος στον κινητήρα που προκαλείται από την ατελή καύση του καυσίμου λόγω περίσσειας αυτού. Τέτοιες συνθήκες καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων ιδιαίτερα με τη παρουσία προσμείξεων όπως Na_2SO_4 .

Η θερμή διάβρωση μπορεί να οριστεί η ταχεία διάβρωση, που οφείλεται στην ύπαρξη αλάτων ως προσμείξεων όπως Na_2SO_4 , NaCl και V_2O_5 που συνδυάζονται και σχηματίζουν λιωμένες επικαθήσεις που βλάπτουν τα προστατευτικά στρώματα των οξειδίων.

Το σουλφίδιο νατρίου είναι μια διαβρωτική χημική ένωση που σχηματίζεται στη φλόγα από νατριούχα χλωρίδια ή άλλα νατριούχα συστατικά και οργανικά στοιχεία του θείου που συναντιούνται σχεδόν σε όλα τα καύσιμα.

Τα αποτελέσματα των παρακάτω αντιδράσεων είναι μορφές σουλφιδίων νατρίου:



Υπάρχουν δύο είδη θερμής διάβρωσης [Εικ.1.1]. Η θερμή διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας (HTHC) και η χαμηλής θερμοκρασίας (LTHC). Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη δημιουργία αυτών των τύπων διάβρωσης είναι αρκετοί. Κάποιοι από αυτούς είναι, η θερμοκρασία και οι θερμοκρασιακοί κύκλοι, η σύνθεση του κράματος, η σύνθεση των καυσαερίων αλλά και η ταχύτητα αυτών, καθώς και τα θερμομηχανικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Η κατηγοριοποίηση της μορφής της διαβρωτικής προσβολής του πτερυγίου γίνεται με βάση τη μορφολογία της και όχι τη θερμοκρασία στην οποία έγινε.

Θερμή διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας (HTHC): Είναι ένα φαινόμενο γνωστό από τη δεκαετία του 1950. Είναι μια ταχεία οξείδωση που γίνεται σε θερμοκρασίες 815 με 926°C. Στις ακαθαρσίες του καυσίμου και του αέρα υπάρχει θείο το οποίο διαχέεται στο μέταλλο και σχηματίζει σουλφίδια χρωμίου, τα οποία μετατρέπονται σε ασταθή οξείδια. Το είδος αυτό της διάβρωσης προσβάλλει τα όρια των κόκκων.

Αυτού του είδους η διάβρωση ξεκινάει συνήθως από το μέσο του πτερυγίου κατά μήκος της πλευράς που δέχεται τις υψηλές πιέσεις. Η κοίλη πλευρά του πτερυγίου, δηλαδή αυτή που δέχεται τις περισσότερες καταπονήσεις είναι ευνοϊκή περιοχή για την ανάπτυξη του φαινομένου αυτού καθώς οι προσμίξεις που υπάρχουν στα καυσαέρια προσκρούουν πρώτα εκεί.

Θερμή διάβρωση χαμηλής θερμοκρασίας (HCLT): Αναγνωρίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 70' ως ξεχωριστός μηχανισμός διάβρωσης και εμφανίζεται σε θερμοκρασίες 593-760°C και απαιτείται υψηλή τοπική πίεση από SO₃. Οφείλεται σε ευτηκτικά συστατικά που δημιουργούνται από τον συνδυασμό σουλφιδίων νατρίου με κάποια από τα συστατικά του κράματος όπως το νικέλιο (NiSO₄ - Na₂SO₄).

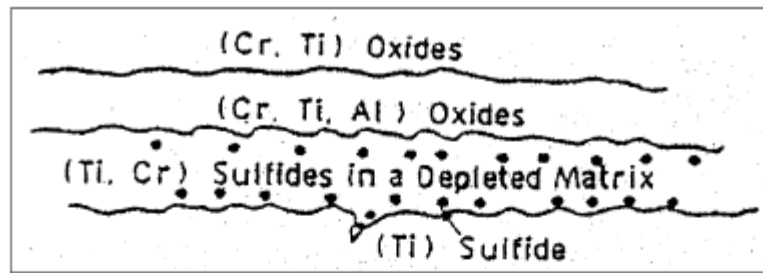
Τα χαρακτηριστικά της θερμής διάβρωσης χαμηλής θερμοκρασίας είναι τα εξής. Εμφανίζει πολλά διαβρωτικά στρώματα και δεν εμφανίζει απογυμνωμένη περιοχή μετάλλου, δεν προσβάλλει τα όρια των κόκκων και δεν υπάρχουν ελεύθερα σωματίδια σουλφιδίων κάτω από τα στρώματα.

Με τη χρήση αναλυτή δέσμης ηλεκτρονίων, βρέθηκε ότι σουλφίδια χρωμίου και τιτανίου σχηματίζουν ένα συνεχές στρώμα. Το επιφανειακό στρώμα σε αυτή τη περίπτωση περιέχει μόνο τα σχετικά χαμηλής προστασίας οξείδια νικελίου και κοβαλτίου.

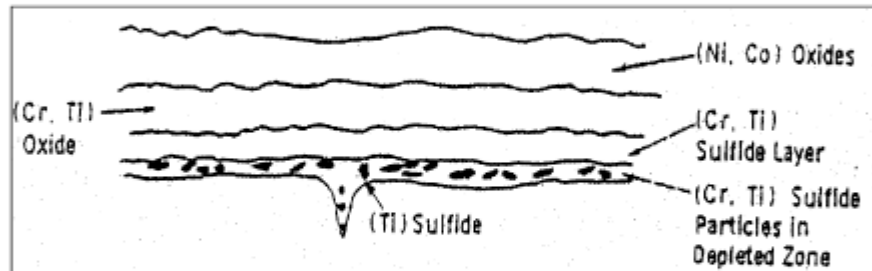
Στη περιοχή της βάσης του πτερυγίου, οι θερμοκρασίες είναι συνήθως χαμηλότερες από αυτές που εμφανίζονται στα ακροπτερύγια, συνεπώς είναι πιο επιρρεπείς στην εμφάνιση θερμής διάβρωσης χαμηλής θερμοκρασίας.

Θερμή διάβρωση μεταβατικού τύπου

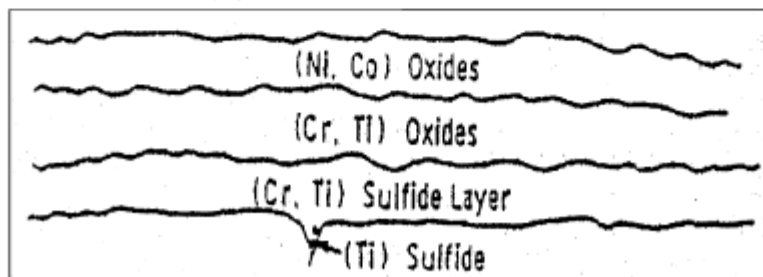
Οι θερμοκρασίες στις οποίες αναφέρθηκε ότι εμφανίζονται οι δύο τύποι θερμής διάβρωσης είναι προσεγγιστικές και το είδος του φαινομένου εξαρτάται από τη σύσταση των τηγμένων αλάτων, τη σύσταση των καυσαερίων αλλά και τη σύσταση της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με τα άλατα. Για παράδειγμα έχουν καταγραφεί περιπτώσεις θερμής διάβρωσης υψηλής θερμοκρασίας σε θερμοκρασίες μετάλλου σχεδόν 700°C. Πρακτικά υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά και στους δύο τύπους διάβρωσης εξ' ου και η ονομασία μεταβατική θερμή διάβρωση (THC). Με τη χρήση αναλυτή δέσμης ηλεκτρονίων βρέθηκε ότι σουλφίδια χρωμίου και τιτανίου συσσωματώνονται αυξανόμενα και σχηματίζουν δίκτυα σουλφιδίων. Τα επιφανειακά στρώματα περιέχουν κυρίως οξείδια νικελίου και κοβαλτίου.



(a) High temperature hot corrosion



(b) Transition hot corrosion



(c) Low temperature hot corrosion

Εικ.1.1 Σχηματική απεικόνιση των παραγώγων των τριών ειδών θερμής διάβρωσης

Μελέτη περίπτωσης πτερυγίου στροβίλου κινητήρα τύπου GE-F5

Σε αυτή τη μελέτη διερευνήθηκαν πρωτοβάθμια πτερύγια στροβίλου και απεικονίζονται τα πτερύγια που αστόχησαν. Τέθηκαν σε οπτικό έλεγχο και φωτογραφική καταγραφή. Ελέγχθηκαν με οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) και χρησιμοποιήθηκαν EDS και χαρτογράφηση με ακτίνες X αλλά και ποσοτική ανάλυση του κράματος.

Οπτικός έλεγχος

Στη περιοχή γύρω από τη βάση και η κοίλη και η κυρτή επιφάνεια ήταν ιδιαίτερα τραχείες και είχαν πράσινο χρώμα. Απώλεια υλικού παρατηρήθηκε στη κορυφή του πτερυγίου [Εικ.1.3] και πράσινη απόχρωση στην κοίλη πλευρά. Η ακμή πτερυγίου που προηγείται κατά τη περιστροφή και στη περιοχή κοντά στη βάση εμφανίζεται πεπλατυσμένη [Εικ.1.4], ενώ η ακμή που ακολουθεί ήταν αλλοιωμένη και εμφάνιζε “δόντια”. Και στις δύο πλευρές του πτερυγίου υπήρχαν ενδείξεις σύγκρουσης με σωματίδια.



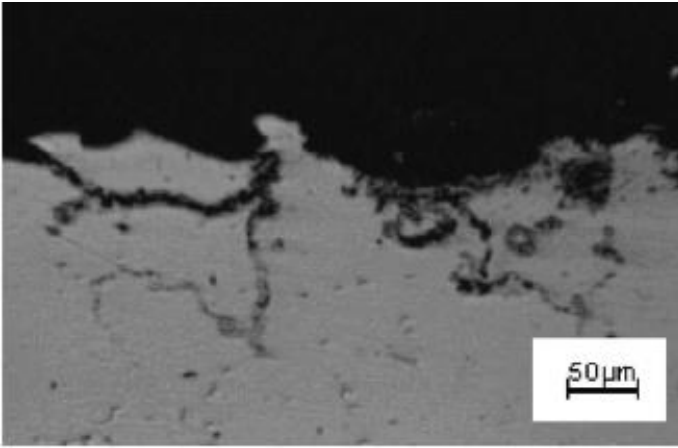
Εικ.1.3 Απώλεια υλικού στο ακροπτερύγιο



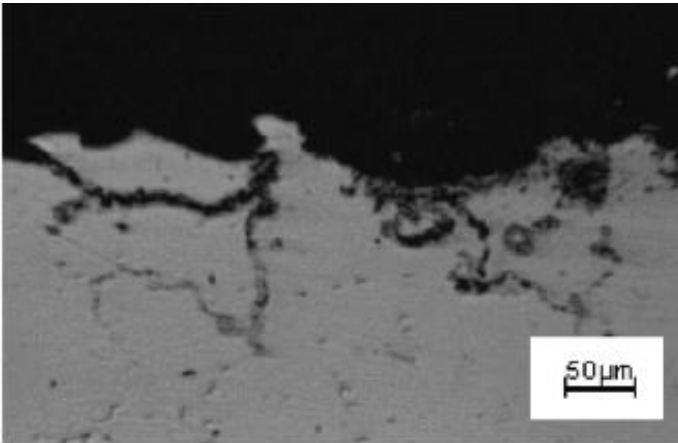
Εικ.1.4 Τράχυνση της επιφάνειας της βάσης και της πίσω ακμής, πλάτυνση της μπροστινής ακμής

Μεταλλογραφικός έλεγχος

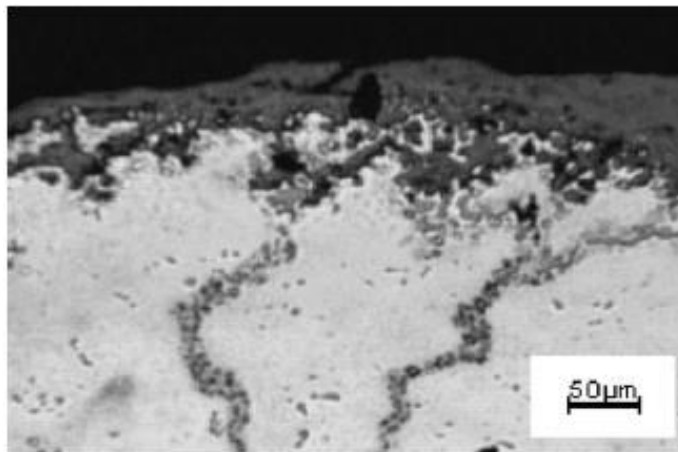
Ο μεταλλογραφικός έλεγχος έδειξε τριών ειδών χαρακτηριστικά ανάλογα με τη τοποθεσία του δείγματος [Εικ.1.5-1.8]. Γενικά κοντά στο ακροπτερύγιο ήταν εμφανής θερμή διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας. Θερμή διάβρωση χαμηλής θερμοκρασίας παρατηρήθηκε κατά κύριο λόγο στη βάση. Το τρίτο είδος χαρακτηριστικών είναι αυτό που παρουσίαζαν οι περιοχές με τραχεία επιφάνεια σε μακροσκοπική κλίμακα. Σε αυτές τις περιοχές δεν υπήρχαν ενδείξεις προστατευτικής επίστρωσης.



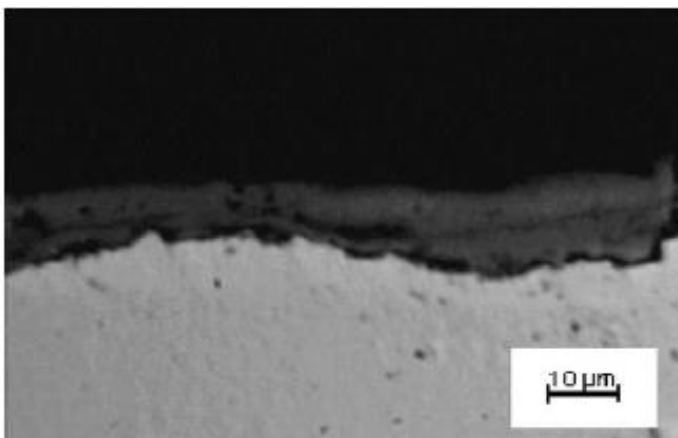
Εικ.1.5 Θερμή διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας χωρίς στρώμα επικάλυψης



Εικ.1.6 Θερμή διάβρωση χαμηλής θερμοκρασίας χωρίς στρώμα επικάλυψης



Εικ.1.7-1.8 HTHC, διακρίνεται διάχυση στα όρια των κόκκων και σωματίδια σουλφιδίων

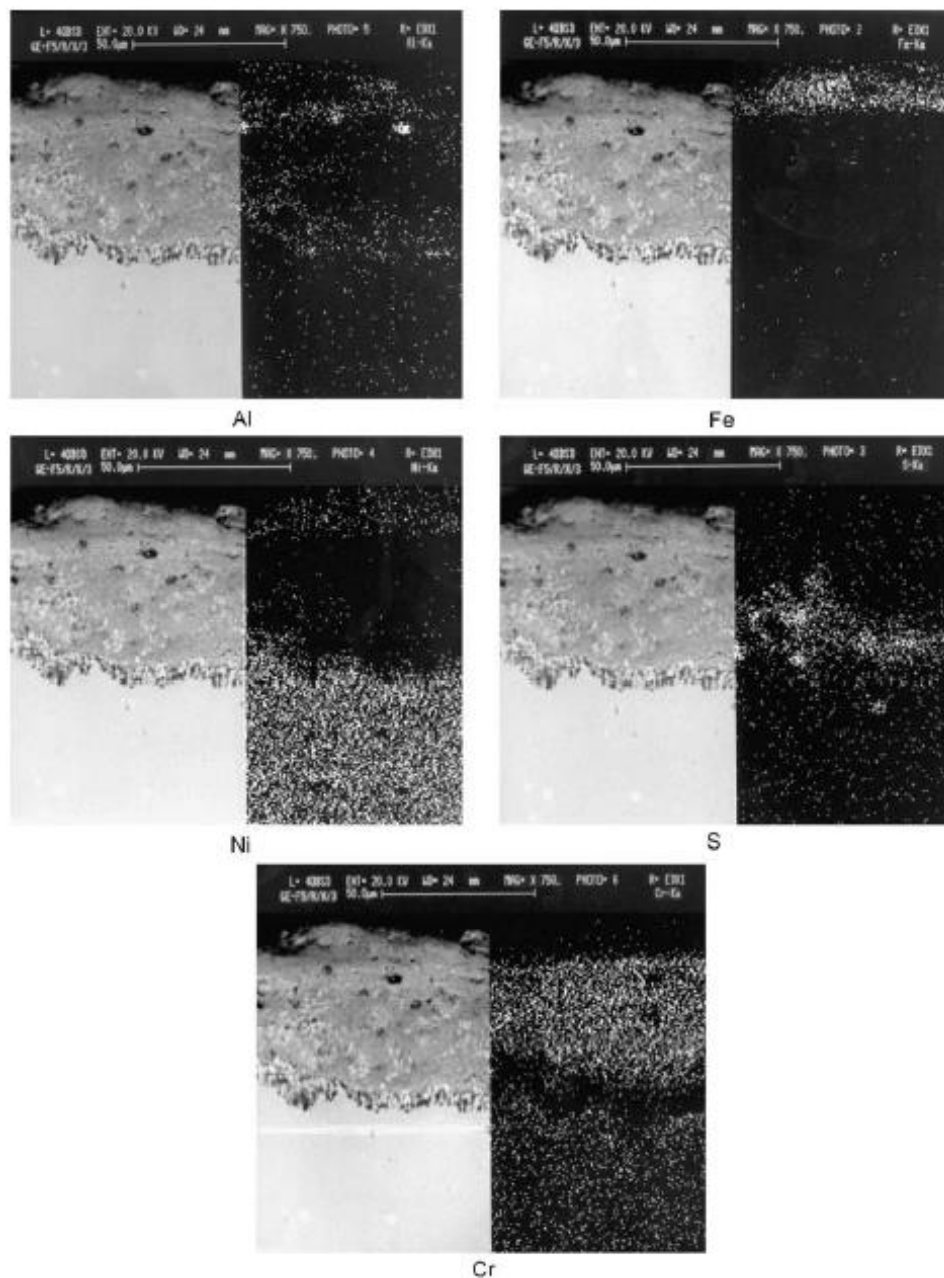


Έλεγχος με τη χρήση SEM

Η ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έδειξε την παρουσία Ni, Cr, Al, Ti, Co, S, V, Zn, Si και Fe στα επιφανειακά στρώματα.

Το Zn μπορεί να εισήλθε στο καύσιμο από τις προστατευτικές επικαλύψεις της δεξαμενής του καυσίμου]. Η παρουσία του σιδήρου και σιλικόνης πιθανότατα να οφείλεται στο σπάσιμο κομματιών από μέρη του κινητήρα που προηγούνται, όπως ο συμπιεστής, τα οποία συγκρούστηκαν με τα πτερύγια.

Στην ανάλυση των διάφορων στοιχείων με ακτίνες X [Εικ.1.9] φάνηκε ότι τα πτερύγια υπέφεραν από μεταβατική θερμή διάβρωση. Με την ίδια ανάλυση σε άλλες περιοχές του πτερυγίου φάνηκε η ύπαρξη θερμής διάβρωσης και υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας.



Εικ.1.9 Χάρτης ακτίνων X διάφορων στοιχείων σε περιοχή κοντά στη βάση, στη κοίλη πλευρά

Ποσοτική ανάλυση του κράματος του πτερυγίου

Η ποσοτική ανάλυση έδειξε ότι το κράμα είναι πανομοιότυπης σύστασης με το **IN738-LC**. Η σύσταση κατά βάρος του κράματος ήταν : 0.003% P, 0.004% S, 0.02% Zr, 0.05% Mg, 0.09% C, 0.44% Fe, 0.99% Nb, 1.94% Mo, 3.2% W, 3.7% Ti, 4.0% Al, 8.18% Co, 15.92% Cr, 61,46% Ni.

Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της μελέτης ήταν ότι το πτερύγιο υπέφερε και από τους δύο τύπου θερμής διάβρωσης. Ότι η πράσινη απόχρωση δεν ήταν χαρακτηριστικό της HTHC καθώς παρατηρήθηκε και σε περιοχές όπου υπήρχε LTHC. Η κοινή απόχρωση δικαιολογείται καθώς το επιφανειακό στρώμα σε περιοχές με HTHC αποτελείται από οξειδία χρωμίου ενώ σε αυτές με LTHC από οξειδία νικελίου, και τα δύο οξειδία έχουν πράσινη απόχρωση. Και οι ενδείξεις σύγκρουσης στα πτερύγια οφείλονται σε θραύσματα του καλύμματος του συμπιεστή.

2. Συνήθειες αστοχίες πτερυγίων αεροστροβίλων

Ο **Tim J.Carter [2]** μελέτησε και παρουσίασε τους συνηθέστερους μηχανισμούς αστοχίας πτερυγίων αεροστροβίλων κινητήρων. Τα εξαρτήματα του κινητήρα που απορρίπτονται πιο συχνά είναι τα πτερύγια είτε του συμπιεστή είτε του στροβίλου. Οι βασικές αιτίες είναι δύο. Αντικείμενα τα οποία εισέρχονται στον κινητήρα μέσω της εισαγωγής και προκαλούν ζημιές και η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Αστοχίες που οφείλονται σε μηχανισμούς φθοράς όπως η κόπωση είναι σπάνιες.

Μηχανικές φθορές

Οι μηχανικές φθορές οφείλονται κυρίως σε ξένα σώματα, τα οποία εισέρχονται στον συμπιεστή του κινητήρα. Αυτό είναι γνωστό ως FOD (Foreign Object Damage).

Τα σώματα αυτά μπορεί να είναι εργαλεία, τα οποία έχουν αφηθεί κοντά στην εισαγωγή του κινητήρα, πτηνά που εισέρχονται κυρίως κατά την απογείωση, κομμάτια πάγου που αναρροφώνται σε πολύ μεγάλα υψόμετρα, άμμος και πιο σπάνια ηφαιστειακή στάχτη.

Η ζημιά που προκαλούν τα FOD είναι η πλαστική παραμόρφωση των πτερυγίων του συμπιεστή με επίδραση στην ροή του εισερχόμενου αέρα. Η αλλοίωση των χαρακτηριστικών της ροής έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία κραδασμών και την εμφάνιση αστοχιών λόγω κόπωσης. Μια άλλη περίπτωση είναι η αποκόλληση κομματιών των πτερυγίων του συμπιεστή, και η σύγκρουση αυτών με μέρη του κινητήρα.

Φθορές λόγω υψηλών θερμοκρασιών

Εισερχόμενα αντικείμενα από τον συμπιεστή είναι σχεδόν απίθανο να φτάσουν στην θερμή περιοχή του κινητήρα, παρ' όλα αυτά κατάλοιπα της ανάφλεξης των αντικειμένων αυτών στον θάλαμο καύσης μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση των πτερυγίων του στροβίλου. Μία ακόμη σπάνια μορφή φθοράς είναι η διάβρωση από τις επικαθίσεις στερεού άνθρακα (coke)

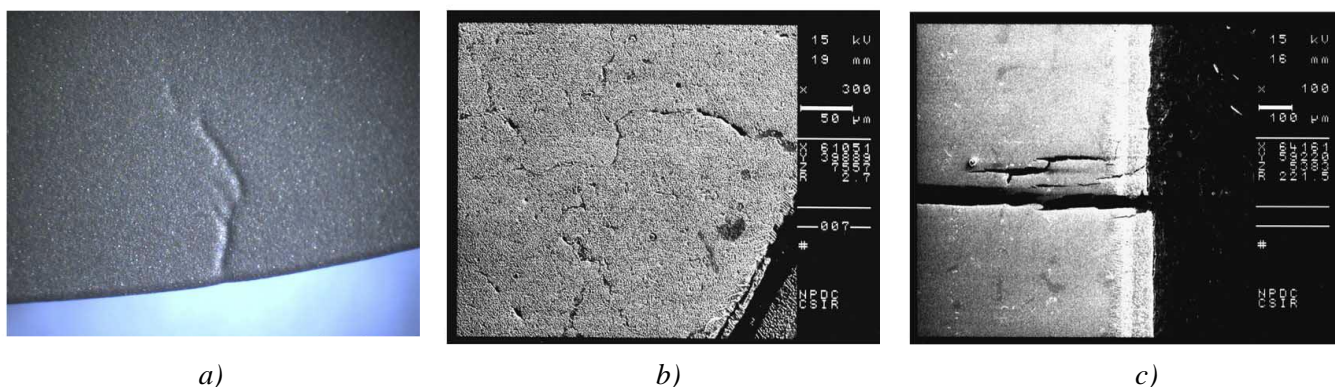
στους εγχυτήρες καυσίμου που περνούν στο στρόβιλο, αλλά και από την αποκόλληση θραυσμάτων της κεραμικής επικάλυψης του θαλάμου καύσης.

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του στροβίλου είναι πολύ υψηλές που οδηγούν τα κράματα κατασκευής στα όρια αντοχής τους. Στις συνθήκες αυτές παρουσιάζονται τρεις μηχανισμοί αστοχίας που επηρεάζουν τα πτερύγια της τουρμπίνας: a) Ερπυσμός, b) Κόπωση και c) θερμή διάβρωση.

Η κρυσταλλική δομή, η μικροδομή που διαμορφώνεται με τις θερμικές κατεργασίες και οι προστατευτικές επιστρώσεις των υπερκραμάτων που χρησιμοποιούνται, αποτρέπουν την εμφάνιση των μηχανισμών αστοχίας που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Αστοχία λόγω ερπυσμού

Όλα τα πτερύγια των στροβίλων παρουσιάζουν σημάδια ερπυσμού [Εικ.2.1] αφού λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Σε φυσιολογικές συνθήκες παρουσιάζεται μια ανεκτή επιμήκυνση του πτερυγίου. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί εκτός των φυσιολογικών ορίων η επιμήκυνση ξεπερνά τις ανοχές με αποτέλεσμα την επαφή του ακροπτερυγίου με το προστατευτικό κέλυφος του στροβίλου. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται ρωγμές και τα πτερύγια αντικαθίστανται.



Εικ.2.1 a)Μορφή ρωγμής λόγω ερπυσμού έπειτα από οπτικό έλεγχο, b) Διαχωρισμός των κόκκων στα όρια τους, c) Μορφή ρωγμής στο υλικό πτερυγίου κατευθυνόμενης στερεοποίησης

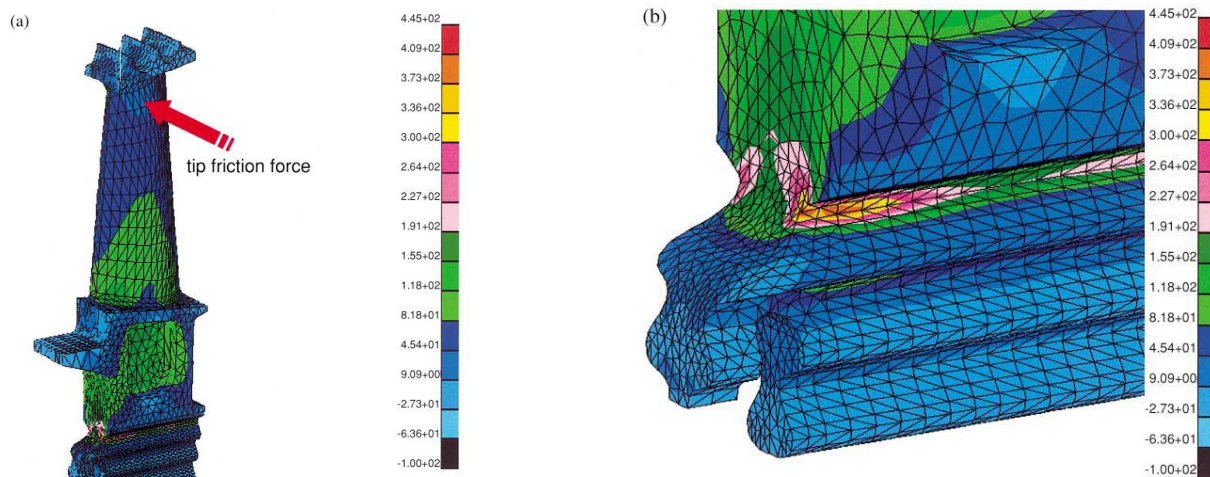
Αστοχία λόγω κόπωσης

Η αστοχία λόγω κόπωσης υψηλών κύκλων των πτερυγίων του στροβίλου είναι σχετικά σπάνια, καθώς προλαμβάνεται κατά το σχεδιασμό. Μόνο εξωτερικές αιτίες (π.χ. επιφανειακών φθορών λόγω σύγκρουσης ξένων σωμάτων) σε συνδυασμό με τους κύκλους λειτουργίας και του υψηλούς ρυθμούς περιστροφής μπορούν να προκαλέσουν κόπωση η οποία θα οδηγήσει σε άμεση αστοχία.

Η άλλη περίπτωση είναι η αστοχία λόγω κόπωσης χαμηλών κύκλων. Αυτή σχετίζεται με το ξεκίνημα και σταμάτημα του κινητήρα. Πριν την εκκίνηση τα εξαρτήματα του στροβίλου βρίσκονται σε χαμηλή θερμοκρασία ενώ κατά την λειτουργία υφίστανται μεγάλα φυγοκεντρικά

φορτία υπό υψηλές θερμοκρασίες. Εξαιτίας αυτής της ραγδαίας εναλλαγής της θερμοκρασίας (θερμικό στρες) κατά την εκκίνηση αλλά και κατά το σβήσιμο του κινητήρα η ζωή των εξαρτημάτων του στροβίλου περιορίζεται.

Επίσης αξίζει να αναφέρουμε την προσπάθεια των **Jianfu Hou, Bryon J. Wicks, Ross A. Antoniou [3]** οι οποίοι με τη χρήση μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων (FEM) [Εικ.2.2 a,b] ανέλυσαν τα αίτια αστοχίας πτερυγίου στροβίλου το οποίο εμφάνισε ρωγμή στη βάση στήριξης λόγω κόπωσης. Κατέληξαν ότι το πιθανότερο αίτιο αστοχίας είναι ένας συνδυασμός κόπωσης χαμηλών κύκλων (LCF) και κόπωσης υψηλών κύκλων (HCF) που προκλήθηκαν από την επαφή του ακροπτερυγίου με τον προστατευτικό δακτύλιο του ρότορα.



Εικ.2.2

a) Συνολική κατανομή τάσεων

b) Λεπτομέρεια σημείου αστοχίας

Αστοχία λόγω διάβρωσης

Τόσο τα πτερύγια του συμπιεστή, όσο και τα πτερύγια του στροβίλου εκτίθενται σε ισχυρές διαβρωτικές συνθήκες. Ο εισερχόμενος αέρας μπορεί να περιέχει νάτριο ή χλώριο από το θαλασσινό αέρα ή από τις ουσίες που προστατεύουν τον αεροδιάδρομο από τον πάγο. Συστατικά του περιβάλλοντος λειτουργίας όπως μολυσματικοί παράγοντες που εκπέμπονται από εργοστάσια ή από φωτιές δασικών εκτάσεων εμπεριέχουν θείο και νάτριο. Επιπλέον τα παράγοντα της καύσης εμπεριέχουν στοιχεία όπως θείο, βανάδιο ή ακόμα μόλυβδο και βρώμιο σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα παραπάνω στοιχεία βρίσκονται στα αεροπορικά καύσιμα ή σε πρόσθετα αύξησης των οκτανίων του καυσίμου.

Οποιαδήποτε από αυτές τις προσμίξεις προσβάλλει άμεσα τα κράματα νικελίου σε υψηλές θερμοκρασίες και για αυτό το λόγο επικαλύψεις καλούνται να προστατεύσουν το υλικό του πτερυγίου [Εικ.2.3]. Υπάρχει ακόμα και η περίπτωση η περίσσεια αέρα να διαβρώσει και αυτή όποιο τμήμα του πτερυγίου δεν έχει προστατευτική επίστρωση.

Συνήθως οι επιστρώσεις αποτελούνται από χρώμιο ή αλουμίνιο, αλλά συχνά περιέχουν και πιο εξωτικά υλικά όπως ίτριο και λευκόχρυσο. Παρ' όλα αυτά η προσβολή του πτερυγίου είναι αναπόφευκτη αφού ο κινητήρας λειτουργεί σε διαβρωτικό περιβάλλον, είτε αυτό αφορά τους μολυσματικούς παράγοντες της ατμόσφαιρας, είτε την αυξημένη ποσότητα βλαβερών ουσιών στα καύσιμα.



Εικ.2.3 Προσβολή της επιφάνειας του περυγίου από σουλφίδια

3. Επιλογή κατάλληλου υλικού και ανάλυση αστοχίας σε αεροστροβίλους ναυτιλιακών εφαρμογών χρησιμοποιώντας Reverse engineering και τεχνικές FEA (ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων)

Η συγκεκριμένη έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους **Naresh Gurajarapu, Naga Bhushana Rao και I.N. Niranjan Kumar [4]**, έγινε με σκοπό να αναλυθεί η αστοχία του περυγίου στροβίλου ναυτιλιακών εφαρμογών. Πραγματοποιήθηκε τόσο στατική ανάλυση όσο και θερμική ανάλυση με τη βοήθεια του ANSYS 14.5 ώστε να προβλεφθούν οι συνθήκες που οδήγησαν στην αστοχία. Το δοκίμιο της έρευνας προήλθε από ένα στροβιλοκινητήρα 30 MW, ναυτιλιακής χρήσης. Πριν αστοχήσει, το περύγιο είχε περίπου 10000 ώρες λειτουργίας, ενώ η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του ήταν περίπου 15000 ώρες. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε μία συγκριτική μελέτη σχετικά με το υλικό κατασκευής του περυγίου, με τα υλικά που επιλέχθηκαν να είναι ένα Nickel based super alloy X, το Nimonic alloy 80A και το Inconel 625.

Μοντελοποίηση και ανάλυση

Μοντελοποίηση μέσω CATIA

Επειδή δεν υπήρχαν πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία του περυγίου επιλέχθηκε ο δρόμος της αντίστροφης μηχανικής. Το δοκίμιο σχεδιάστηκε με σημεία από CMM και ολοκληρώθηκε με το CATIA. Πιο συγκεκριμένα τα σημεία ενώθηκαν με καμπύλες (B-spline) σε 2D περιβάλλον. Στη συνέχεια το διδιάστατο μοντέλο απέκτησε όγκο μέσω της εντολής extrude.

Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Δύο είναι οι κατηγορίες των τάσεων που δέχεται το περύγιο και πρέπει αναλυθούν. Η πρώτη είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω της φυγόκεντρου και η δεύτερη είναι οι θερμικές τάσεις. Η διαδικασία της ανάλυσης του περυγίου αποτελείται από δύο μέρη: Την ανάλυση δομής και τη θερμική ανάλυση. Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS. Για να εκτιμηθεί η κατανομή των τάσεων, η παραμόρφωση, οι θερμοκρασίες καθώς και οτιδήποτε άλλο επηρεάζει τη λειτουργία του εξαρτήματος είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας της ρίζας. Οι δυνάμεις που δρουν στο περύγιο είναι η πίεση από τα καυσαέρια και η δύναμη λόγω της περιστροφής.

Ιδιότητες υλικών

Πίνακας 1 Ιδιότητες υπερκραμάτων

Materials	Super Alloy Grade X	Nimonic Alloy 80A	Inconel 625
Young's Modulus (GPa)	210	222	208
Density (kg/m ³)	7780	8190	8440
Poisson's ratio	0.3	0.35	0.29
Thermal conductivity (W/mk)	22	11.2	21.3
Thermal expansion (0C)	10*10 ⁻⁶	12.7*10 ⁻⁶	13.1 * 10 ⁻⁶
Yield strength (MPa)	1175	1144	1150
Melting temperature (0C)	1370	1340	1350

Οριακές συνθήκες

Στο περύγιο ασκήθηκαν τριών ειδών φορτία: α) Μία αξονική δύναμη F_a , β) Μία περιφερειακή δύναμη F_t και γ) η φυγόκεντρος F_c . Το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων αυτών είναι το αεροδυναμικό κέντρο του περυγίου. Οι δυνάμεις των καυσαερίων υπολογίστηκαν κατασκευάζοντας τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και την έξοδο του κινητού περυγίου, ενώ η φυγόκεντρος με εμπειρικές σχέσεις σε διαφορετικό αριθμό στροφών του κινητήρα. Οι τιμές τους παρουσιάζονται στους Πίνακες 2 και 3.

Πίνακας 2 Σύνοψη δυνάμεων

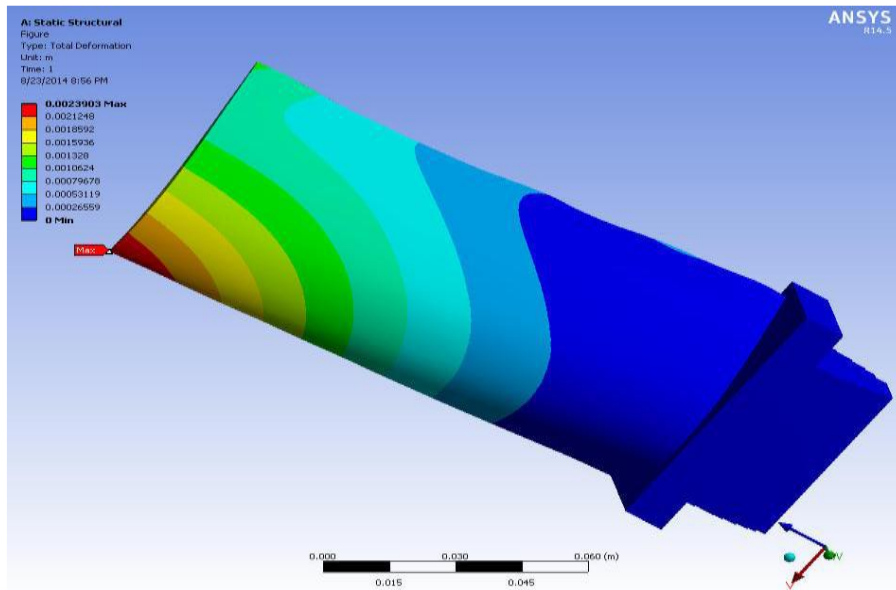
Gas forces on blade ↓	Speed (rpm)		
	4000	6000	9000
Tangential force in Newton's	535	775	1260
Axial force in Newton's	222.5	200	320

Πίνακας 3 Σύνοψη φυγοκεντρικών δυνάμεων

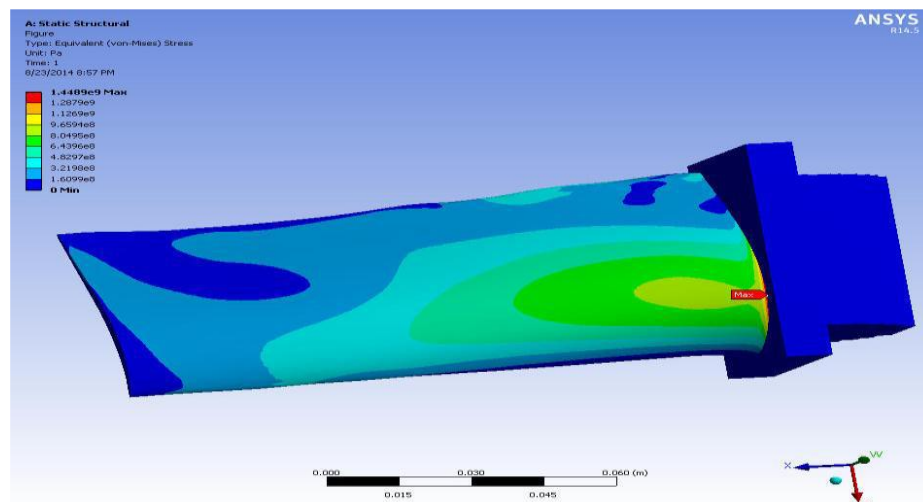
Materials ↓	Centrifugal force at different speeds, F_c in N		
	4000 RPM	6000 RPM	9000 RPM
Super alloy X	37592	84578	190301
Mnemonic alloy 80 A	39580	89050	200364
Inconel 625	40958	91759	206459

Στατική ανάλυση δομής στις 9000 rpm

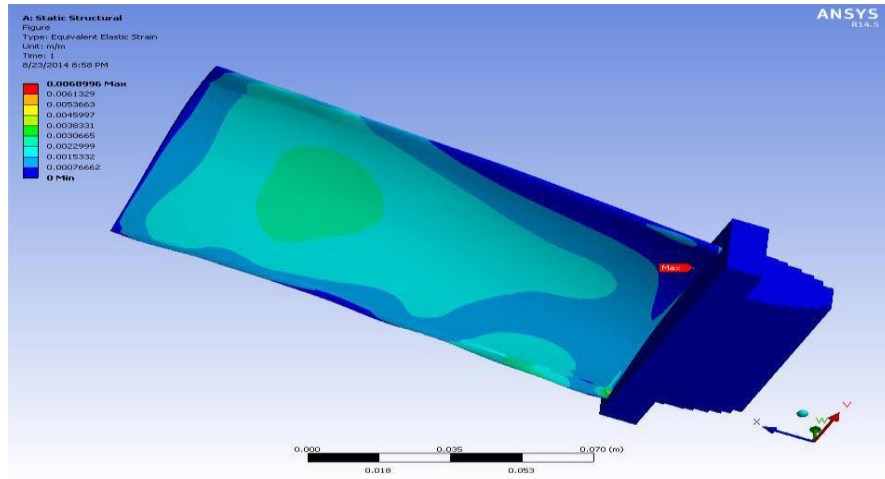
Υπερκράμα Χ



Εικ.3.1 Συνολική παραμόρφωση πτερυγίου.

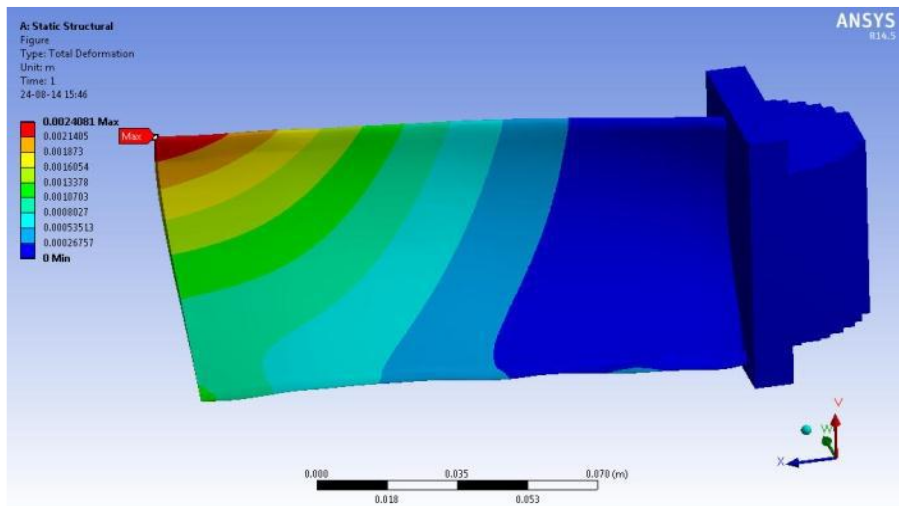


Εικ.3.2 Τάσεις Von-mises

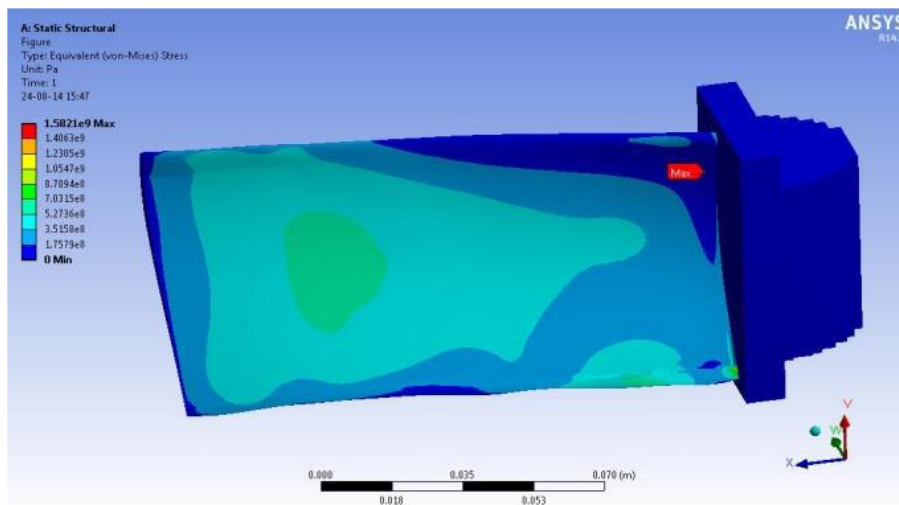


Εικ.3.3 Ελαστική παραμόρφωση

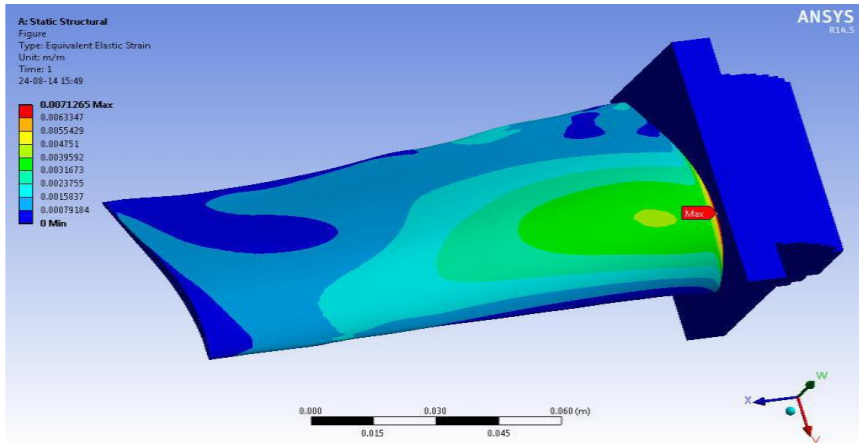
Nimonic 80A



Εικ.3.4 Συνολική Παραμόρφωση πτερυγίου

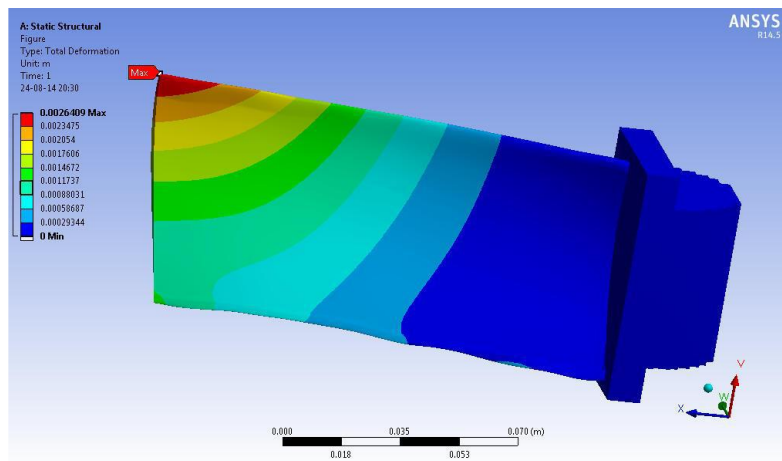


Εικ.3.5 Τάσεις Von-mises

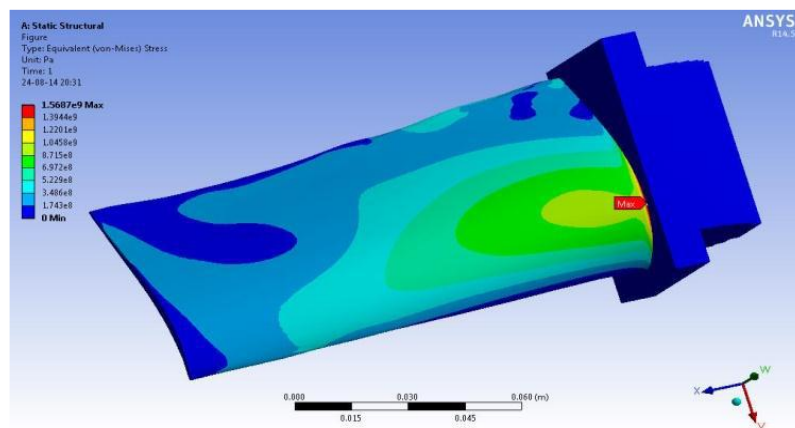


Εικ.3.6 Ελαστική παραμόρφωση

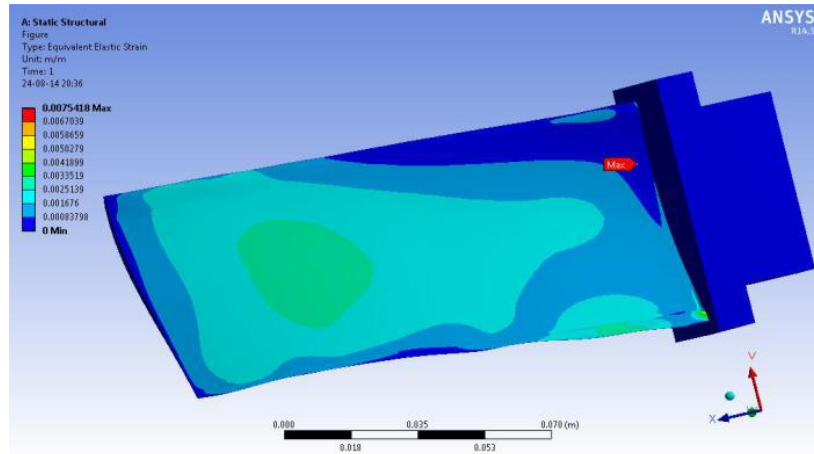
Inconel 625



Εικ.3.7 Συνολική Παραμόρφωση πτερνγίου



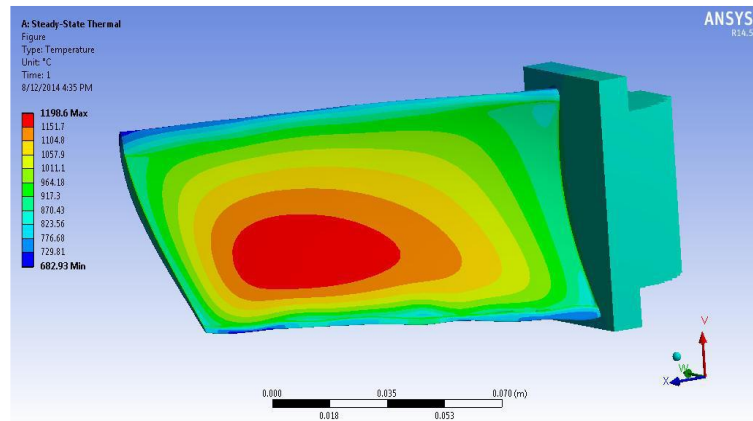
Εικ.3.8 Τάσεις Von-mises



Εικ.3.9 Ελαστική παραμόρφωση

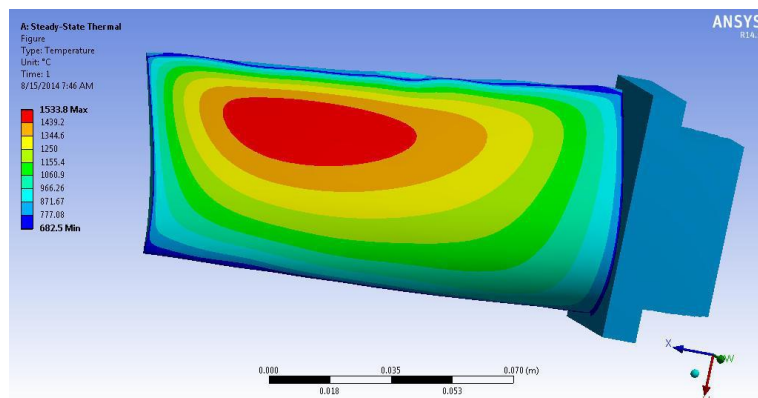
Θερμική ανάλυση

Υπερκράμα X

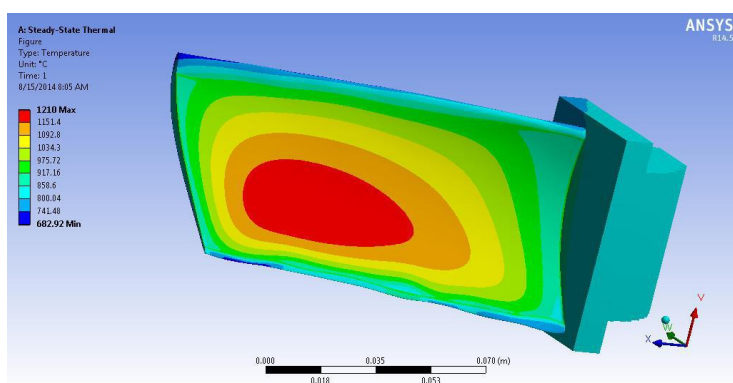


Εικ.3.10 Κατανομή θερμοκρασιών

Nimonic 80A



Εικ.3.11 Κατανομή θερμοκρασιών



Εικ.3.12 Κατανομή θερμοκρασιών

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Αποτελέσματα ανάλυσης δομής

Πίνακας 4 Μεταβολές μηχανικών παραμέτρων, διαφορετικών υλικών σε διαφορετικές ταχύτητες.

	Rotation in rpm ↓	Turbine blade Material		
		Super alloy X	Nimonic alloy 80 A	Inconel 625
Total Deformation (m)	4000	0.00039669	0.00040487	0.00044774
	6000	0.0010111	0.0010222	0.0011218
	9000	0.0023903	0.0024081	0.0026409
von-mises	4000	267.62	292.51	292.49
Strain	6000	629.44	687.98	682.73
	9000	965.59	1054.7	1045.8
	4000	0.0012744	0.0013176	0.0014062
	6000	0.0029973	0.003099	0.0032824
	9000	0.0068996	0.0071265	0.0075418

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πραγματοποιήθηκε στο πτερύγιο της πρώτης βαθμίδας υψηλής πίεσης του στροβίλου, σε διαφορετικές στροφές (π.χ. 4000, 6000 και 9000 rpm), προσδιορίζοντας τα δομικά και θερμικά φορτία με σκοπό να βρεθούν τα κριτήρια αστοχίας του υπάρχοντος υλικού του πτερυγίου και επιπρόσθετα να εξακριβωθεί το κατάλληλο υλικό για την καλύτερη απόδοση. Οι τάσεις von-mises αυξάνονται όσο αυξάνονται οι στροφές και τα αποτελέσματα βρίσκονται μέσα στα όρια και για τα τρία υπερκράματα της έρευνας. Οι τιμές της παραμόρφωσης ποικίλουν ελάχιστα και οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία ένωσης της του πτερυγίου με τη ρίζα. Η κατανομή των τάσεων και της παραμόρφωσης παρουσιάζονται στις Εικ.3.1-3.9, ενώ οι τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης

Πίνακας 5 Μέγιστη θερμοκρασία

Super alloy Material	Melting temperature(°C)	Max. Temperature obtained(°C)
Super alloy X	1400	1198.6
Nimonic alloy 80 A	1380	1533.8
Inconel 625	1350	1210

Είναι εμφανές ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται στην κύρια ακμή (χείλος) του πτερυγίου. Παρόλα αυτά παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας απο το κύριο χείλος στο χείλος εκφυγής. Οι μέγιστες θερμοκρασίες τόσο στο υπερκράμα X και το Inconel 625 είναι κάτω απο το σημείο τήξης, αλλά στο Nimonic 80 A είναι πάνω από το σημείο αυτό. Η κατανομή των θερμοκρασιών για τα τρία υλικά φαίνεται στις Εικ.3.10-3.12, ενώ οι τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Συμπεράσματα

- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να δώσει μία πλήρη εικόνα των δομικών και θερμικών χαρακτηριστικών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του σχεδιασμού και την βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας.
- Η λήψη των σχεδιαστικών δεδομένων έγινε με τη βοήθεια CMM.
- Έγινε συγκριτική μελέτη μεταξύ τριών υλικών για τη κατασκευή του πτερυγίου.
- Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι το πτερύγιο από το υπάρχων υλικό (υπερκράμα X) δεν αστόχησε λόγω των φορτίων. Οι τάσεις στις μέγιστες στροφές ήταν αρκετά κάτω από την τιμή ασφαλείας.
- Οι τάσεις παίρνουν τη μέγιστη τιμή στην ένωση πτερυγίου και ρίζας.
- Οι συνολική παραμόρφωση είναι μέγιστη στο άκρο του πτερυγίου.
- Παρατηρήθηκε ότι η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη και η μέγιστη τιμή της είναι κάτω από το σημείο τήξης στο πτερύγιο από υπερκράμα X με βάση το νικέλιο.
- Ανάμεσα στα τρία υλικά το υπερκράμα X είναι το πιο κατάλληλο λόγω των μικρότερων αναπτυσσόμενων τάσεων και στις τρεις διαφορετικές ταχύτητες και λόγω των ασφαλέστερων κατανομών των θερμοκρασιών.

4. Σχεδιασμός και ανάλυση πτερυγίου ατμοστροβίλου με τη χρήση FEA

Σε αυτή την έρευνα οι **K.Swarnalata Naga Durga και Dr.P.H.V.Sesha Talpa Sai [5]** υπολογίζουν την παραμόρφωση λόγω τάσεων αλλά και την αντοχή σε κόπωση σε ένα πτερύγιο ατμοστροβίλου και έπειτα τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του ANSYS. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι να προσεγγιστεί το πρόβλημα, ωστόσο η μέθοδος του Smith, Watson και Torrer (SWT) είναι η πιο λογική επιλογή.

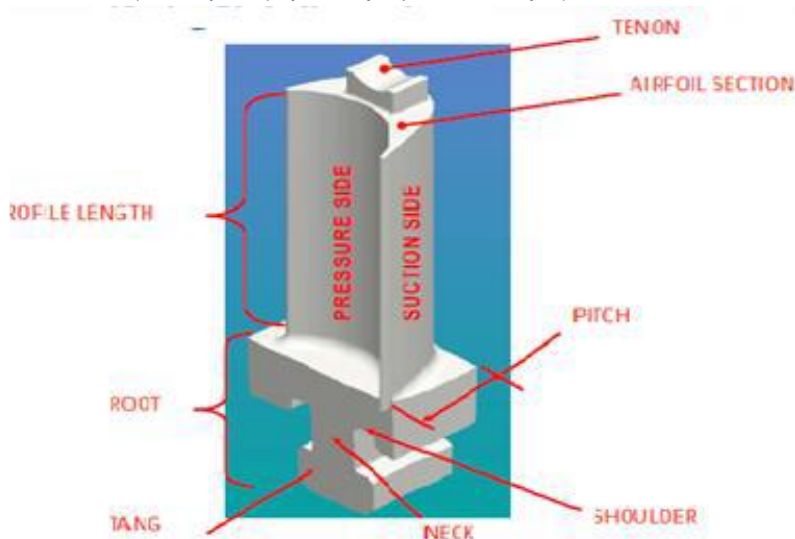
Ο ατμοστροβίλος είναι μια συσκευή που αποσπά τη θερμική ενέργεια από τον συμπιεσμένο ατμό και τη χρησιμοποιεί για να παράγει μηχανικό έργο μέσω ενός περιστρεφόμενου άξονα. Σε αυτή τη περίπτωση η πίεση και η ροή του ατμού περστρέφουν με ταχύτητα τον ρότορα. Τα κινητά πτερύγια μετατρέπουν τη κινητική ενέργεια σε δυνάμεις ώθησης και αντίδρασης, που προκαλούνται από τη πτώση της πίεσης και κατά συνέπεια περιστρέφουν το ρότορα και τον άξονα της τουρμπίνας. Τα πτερύγια του στροβίλου υψηλής και ενδιάμεσης πίεσης είναι μικρού και μεσαίου μεγέθους αντίστοιχα λόγω του μικρού όγκου του ρεύματος ατμού που διέρχεται από αυτές. Παρ'ότι τα εξαρτήματα αυτά λειτουργούν σωστά στην αρχή, συχνά αστοχούν κατά τη λειτουργία τους λόγω κόπωσης που οφείλεται σε κυκλικά επαναλαμβανόμενα φορτία. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι ο χαρακτηρισμός της ικανότητας ενός υλικού να αντέξει σε πολλούς κύκλους κόπωσης τους οποίους θα υποστεί ένα εξάρτημα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

Έρευνα Βιβλιογραφίας

A.Κινητά πτερύγια

Το κινητό πτερύγιο μπορεί να χωριστεί στα εξής μέρη, το προφίλ και τη ρίζα. Αλλά η ονοματολογία [Εικ.4.1] των επιπέων μερών είναι η εξής:

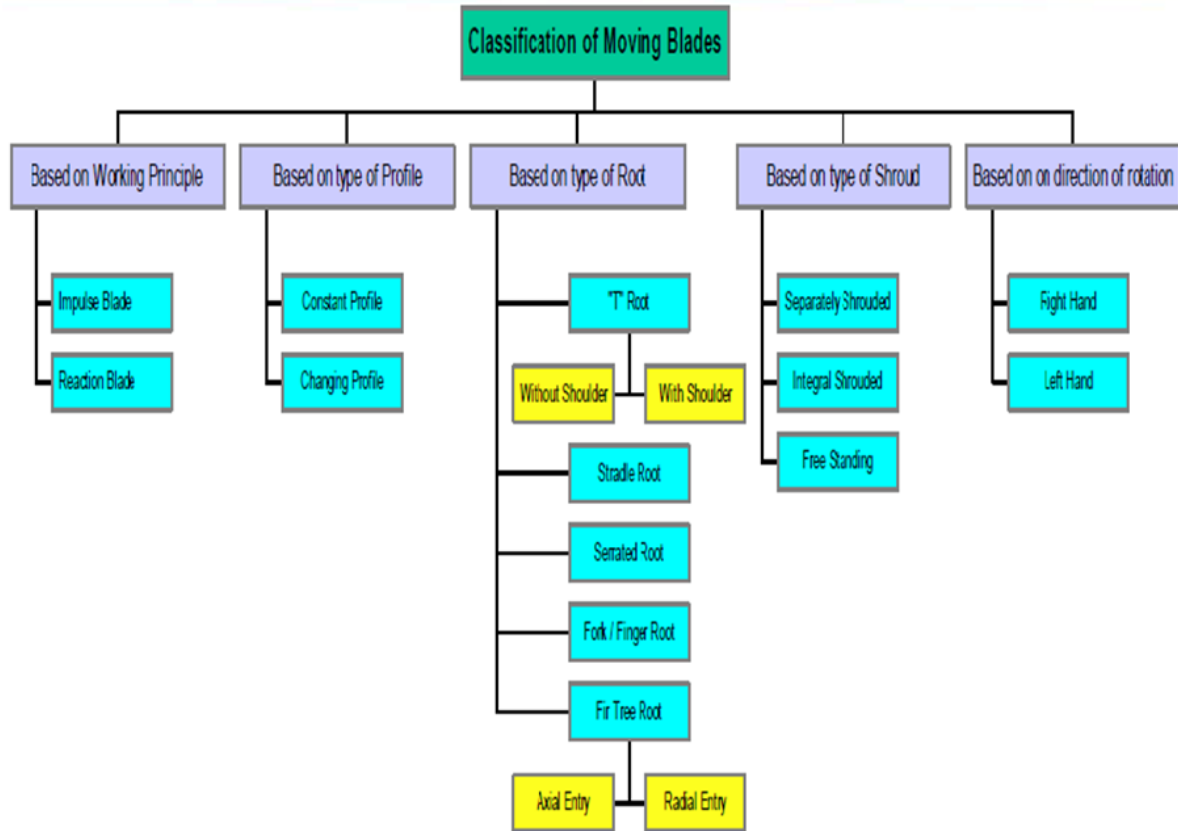
- Tang: Είναι το κάτω μέρος της ρίζας
- Neck: Το μεσαίο κομμάτι της ρίζας
- Shoulder: Το πάνω κομμάτι της ρίζας
- Airfoil section: Είναι μία αεροτομή του προφίλ του πτερυγίου



Εικ.4.1 Ονοματολογία κινητού πτερυγίου

B. Κατηγοριοποίηση κινητών πτερυγίων

Τα κινητά πτερύγια κατηγοριοποιούνται με βάση την αρχή λειτουργίας τον τύπο του προφίλ τον τύπο της ρίζας και άλλα όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1:



Διάγραμμα 1 Κατηγοριοποίηση κινητών πτερυγίων

Γ. Οι ιδιότητες των υλικών που απαιτούνται για τα πτερύγια αεροστροβίλων

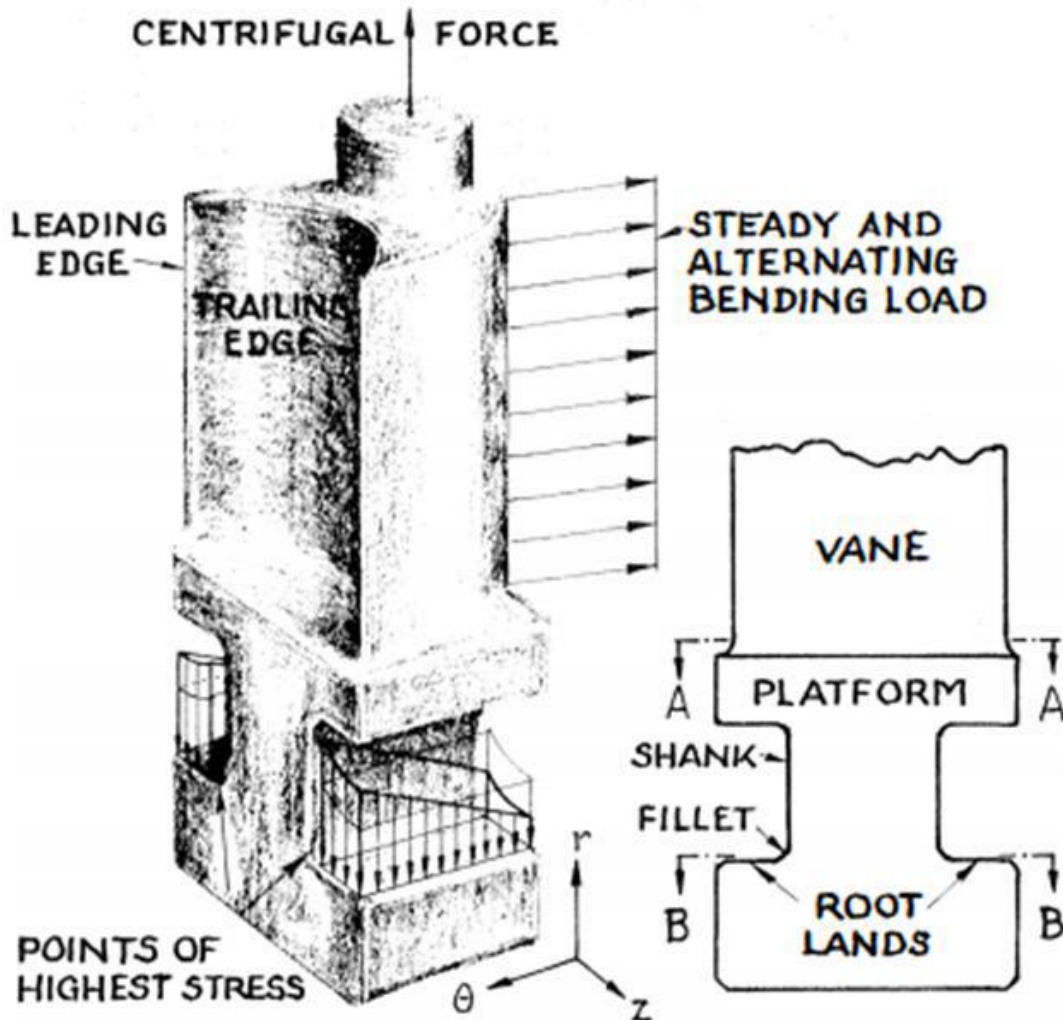
Η επιλογή των υλικών είναι ένας παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στο συνολικό κόστος. Οι άξονες συνήθως κατασκευάζονται είτε από κυλινδρικούς δοκούς είτε είναι σφυρήλατοι. Στους αεροστροβίλους συνήθως χρησιμοποιούνται ανοξείδωτοι χάλυβες είτε κράματα χάλυβα με χρώμιο. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού είναι διαρκή διλλήματα μεταξύ των επιθυμητών ιδιοτήτων.

Δ. Καταπονήσεις στα πτερύγια των αεροστροβίλων.

Παρατηρείται μεγάλη γκάμα στατικών και δυναμικών τάσεων και φορτίων στα πτερύγια στροβίλων, ειδικά σε αυτά με μεγάλο μήκος. Φυγοκεντρικές καταπονήσεις και φυγοκεντρικά φορτία είναι η αρχική αιτία καταπονήσεων στα πτερύγια. Σε αντίθεση και σύμφωνα με τον «κανόνα» του αντίχειρα, στα περισσότερα πτερύγια, τα στατικά φορτία δε ξεπερνούν το $0,5S_y$ στο μισό περίπου του μήκους του προφίλ και το $0,25S_y$ για το 80% του μήκους αυτού, με το S_y να είναι το όριο ελαστικότητας του υλικού. Οι φυγοκεντρικές τάσεις είναι ανάλογες της ταχύτητας περιστροφής και γι' αυτό σε δοκιμές μπορεί εμφανιστούν τάσεις έως και 75% του ορίου ελαστικότητας του υλικού. Επίσης οι τάσεις αυτές μπορεί να έχουν τεράστια επίπτωση σε

περιοχές που υπάρχει συγκέντρωση όπως είναι τα σημεία που εφάπτεται και σταθεροποιείται η ρίζα.

E. Γεωμετρία ρίζας και κατανομή φορτίων



Εικ.4.2 Κατανομή φορτίων στις εδράσεις της ρίζας

Στο περύγιο ασκούνται η εξής δυνάμεις: Φυγοκεντρικές ,αξονικές και κάθετες δυνάμεις οι οποίες μαζί δημιουργούν καμτικές τάσεις [Εικ.4.2].

ΣΤ. Κατανομή τάσεων στη ρίζα του περυγίου

Εκτενείς έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί από εταιρείες και ερευνητικές ομάδες πάνω στο κομμάτι της κατανομής των τάσεων στη ρίζα των περυγίων. Η τεχνική της φωτοελαστικής ανάλυσης είναι από τα εργαλεία που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την κατανομή των τάσεων σε σημεία όπου παρατηρείται συγκέντρωσή τους. Στην εικόνα [Εικ.4.3] φαίνεται το μοτίβο που σχηματίζεται από τις τάσεις στη ρίζα σχήματος T και παρατηρείται συμπύκνωση κοντά στη επιφάνεια έδρασης της ρίζας. Με τη φωτοελαστική μέθοδο το πρόβλημα αναλύεται δυσδιάστατα και αφορά τις ακτινικές φορτίσεις. Η χρήση αυτής της μεθόδου για την ανάλυση και των αξονικών φορτίων μπορεί να γίνει εύκολα αλλά αν λάβουμε υπόψη και τα δύο ήδη τάσεων τότε αμέσως το πρόβλημα γίνεται τρισδιάστατο. Επειδή όμως οι συγκεντρώσεις των τάσεων γίνονται σε μικρές περιοχές είναι πολύ δύσκολη η εξαγωγή συμπερασμάτων.



Εικ.4.3. Συγκέντρωση τάσεων στη ρίζα σχήματος T

Υπολογισμοί και Ανάλυση του πτερυγίου αεροστροβίλου

A. Επιλογή υλικού

Για τη σωστή λειτουργία του εξαρτήματος το υλικό πρέπει να έχει κάποιες ιδιότητες. Κάποιες από τις απαιτούμενες αυτές ιδιότητες είναι οι εξής:

- Αντοχή σε ερπυσμό
- Αντοχή σε κόπωση σε υψηλές θερμοκρασίες
- Σχετικά εύκολο στη διαμόρφωση
- Ένα τέτοιο υλικό είναι X22CrMoV121 και συναντάται πολύ συχνά στα πτερύγια αεροστροβίλων.

B. Υπολογισμός φυγόκεντρον δύναμης

Η φυγόκεντρον είναι μια δύναμη με κατεύθυνση από το κέντρο της κυκλικής τροχιάς προς την περιφέρεια. Μια απλοποιημένη δισδιάστατη μορφή ενός πτερυγίου φαίνεται στην εικόνα 4.4.

Η γενική εξίσωση είναι $F=mr\omega^2$ με m τη μάζα που περιστρέφεται r την απόσταση του σώματος από τον άξονα περιστροφής και ω τη γωνιακή ταχύτητα του αντικειμένου.

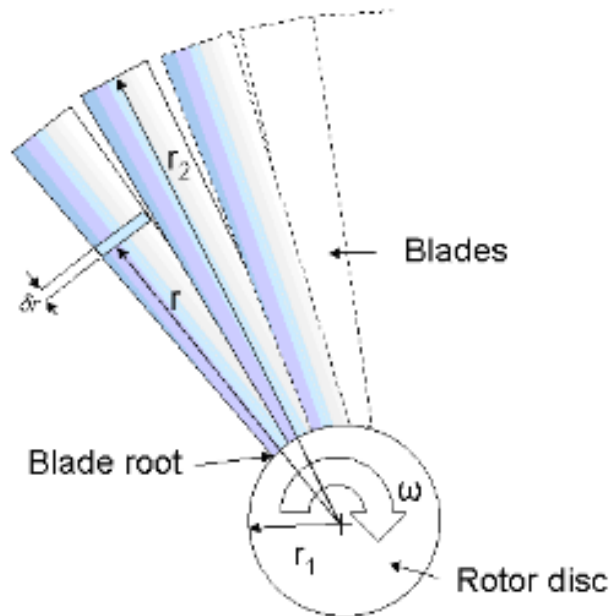
Αν θεωρήσουμε ένα κομμάτι μάζας δm το οποίο έχει πλάτος δr τότε η εξίσωση παίρνει τη μορφή $\delta F=\delta m r \omega^2$

Μια αεροτομή του πτερυγίου έχει επιφάνεια $A(\text{mm}^2)$ και η πυκνότητα του υλικού $\rho(\text{kg}/\text{mm}^3)$. Έτσι το στοιχείο της μάζας μπορεί να γραφτεί:

$$\delta m = \rho A \delta r$$

και η εξίσωση (2) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\delta F = (\rho A \delta r) r \omega^2 \quad \text{ή} \quad dF = \rho A \omega^2 r dr$$



Εικ.4.4 Απλοποιημένη γεωμετρία πτερυγίου

Η τελική μορφή της εξίσωσης της φυγοκέντρου για το συνολικό μήκος του πτερυγίου είναι:

$$F = \rho A \omega^2 \int_{r_1}^{r_2} r dr$$

Με τα ακόλουθα στοιχεία η τιμή της φυγοκέντρου είναι :

Blade speed $N = 8000$ rpm

Blade cross-sectional area $A = 165.161$ mm²

Material density $\rho = 7850 \times 10^{-6}$ kg/mm³

Blade tip radius $r_2 = 267.5$ mm

Blade root radius $r_1 = 220.5$ mm

Blade length $r_2 - r_1 = 47$ mm

Αντικαθιστώντας στον τύπο έχουμε: *Centrifugal Force* $F = 10.436,2N$

Γ. Υπολογισμός αντοχής σε κόπωση

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για τον υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιείται η μέθοδος Smith, Watson and Topper. Η εξίσωση SWT έχει τη μορφή:

$$\sigma_{Maximum} \frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{(\sigma'_{failure})^2}{E} (2N_{failure})^{2b} + \sigma'_{failure} \epsilon'_{failure} (2N_{failure})^{b+c}$$

Και όπου:

σ_{max} = Maximum stress

$\Delta \epsilon / 2$ = Total strain amplitude

$\sigma'_{failure}$ = Fatigue Strength Coefficient or Effective strength

$\epsilon'_{failure}$ = Fatigue ductility coefficient

E = Modulus of Elasticity

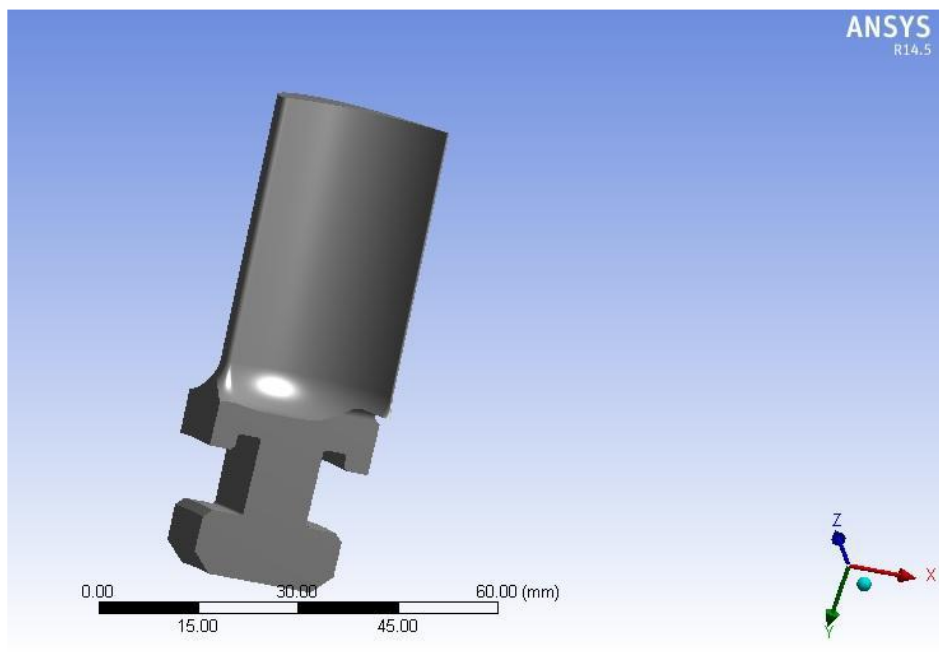
$N_{failure}$ = Number of reversals

B = Fatigue strength exponent

c = Fatigue ductility exponent

Δ. Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία σε πτερύγιο τουρμπίνας αεροστροβίλου

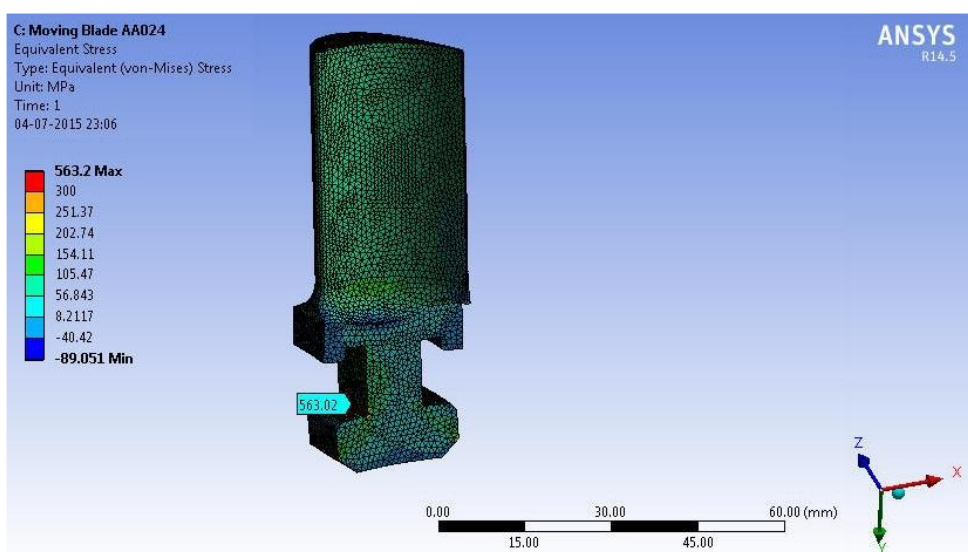
Σκοπός της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία στο λογισμικό ANSYS ήταν να προσδιοριστούν οι τάσεις και η αντοχή στην κόπωση του εξαρτήματος [Εικ.4.5], στη κρίσιμη περιοχή. Διαπιστώθηκε ότι η κρίσιμη περιοχή είναι η ρίζα σχήματος T και πιο συγκεκριμένα η κυρτή περιοχή του λαιμού.



Εικ.4.5 Τρισδιάστατο μοντέλο του πτερυγίου

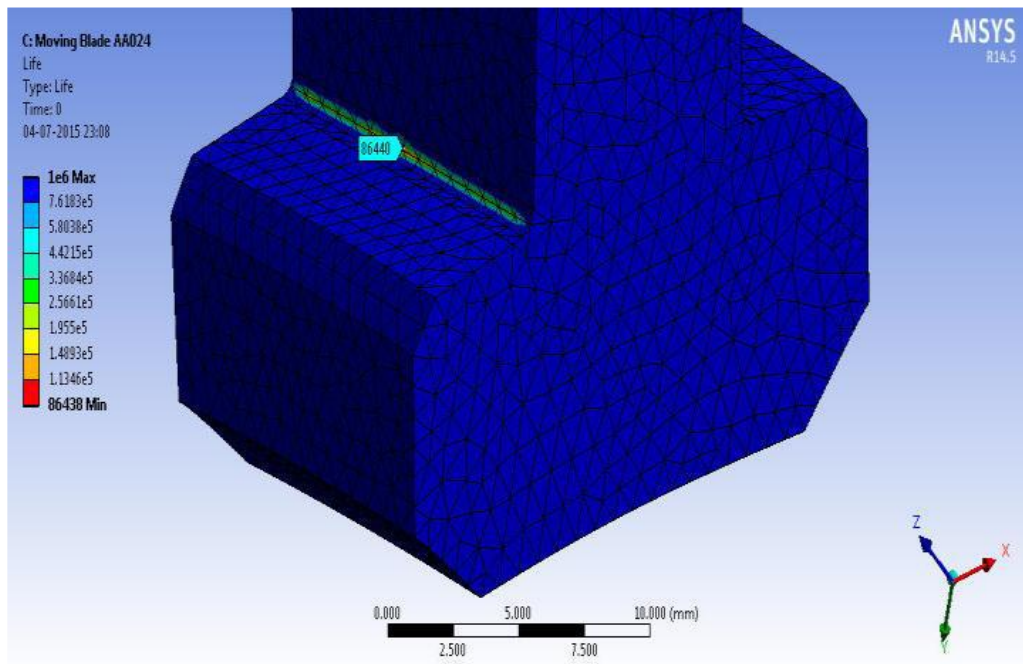
Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό κομμάτι η κύρια δύναμη που ασκείται στο πτερύγιο είναι η φυγόκεντρος, και αν συγκρίνουμε τα μεγέθη των άλλων δυνάμεων με της φυγόκεντρος τότε αυτές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Συνεπώς σε αυτή την ανάλυση η φυγόκεντρος δύναμη είναι το μοναδικό φορτίο που λαμβάνουμε υπόψη.

Οι ισοδύναμες von Mises τάσεις, που παρατηρήθηκαν στη γωνία της ρίζας απεικονίζονται την παρακάτω εικόνα 4.6.:



Εικ.4.6 Ισοδύναμες τάσεις στο πτερύγιο αεροστροβίλου

Η ελάχιστη αντοχή σε κόπωση παρατηρείται στο ίδιο σημείο με διάρκεια ζωής του εξαρτήματος 86438 κύκλοι και απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα 4.7:



Εικ.4.7 Περιοχή μέγιστης καταπόνησης σε κόπωση

Αποτελέσματα και συζήτηση

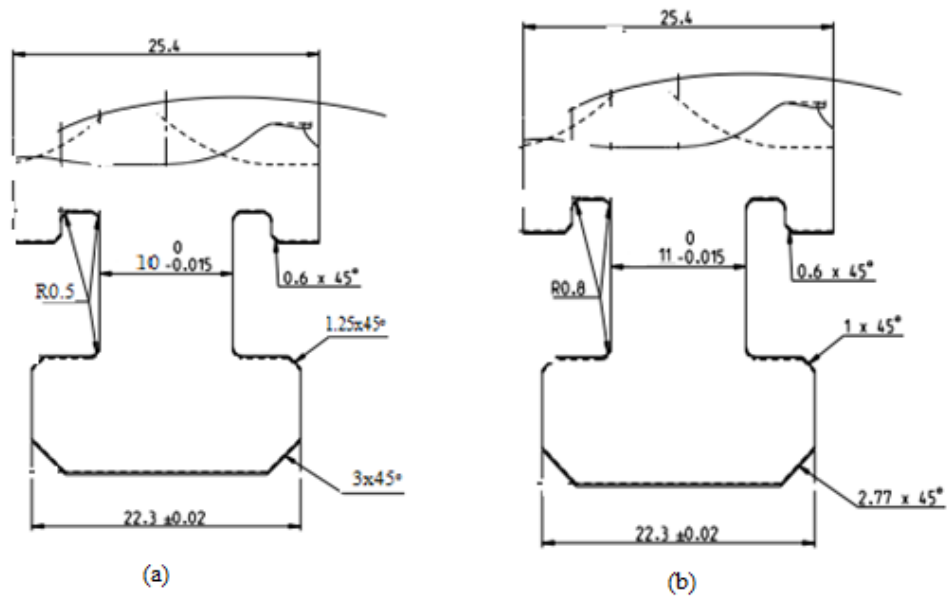
Το υπάρχον σχέδιο του πτερυγίου παρουσιάζει αρκετά καλή αντοχή σε κόπωση στη θεωρητική ανάλυση. Παρουσιάζεται όμως πρόβλημα στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς στον θεωρητικό υπολογισμό η αντοχή σε κόπωση είναι πρακτικά άπειροι κύκλοι ($2.438e6$) ενώ στην προσομοίωση λειτουργίας μέσω του λογισμικού ANSYS με τον υπάρχοντα σχεδιασμό του πτερυγίου έχει διάρκεια ζωής 86436 κύκλους.

A. Προτεινόμενες αλλαγές στον σχεδιασμό του πτερυγίου.

Στη περίπτωση που αναλύθηκε, η αστοχία είναι πιθανότερο να εμφανιστεί στη ρίζα σχήματος T. Για το λόγο αυτό χρειάζονται κάποιες μετατροπές [Εικ.4.8] στον σχεδιασμό ώστε να αποκτήσει υψηλότερη αντοχή σε κόπωση της τάξης των $1e6$ κύκλων.

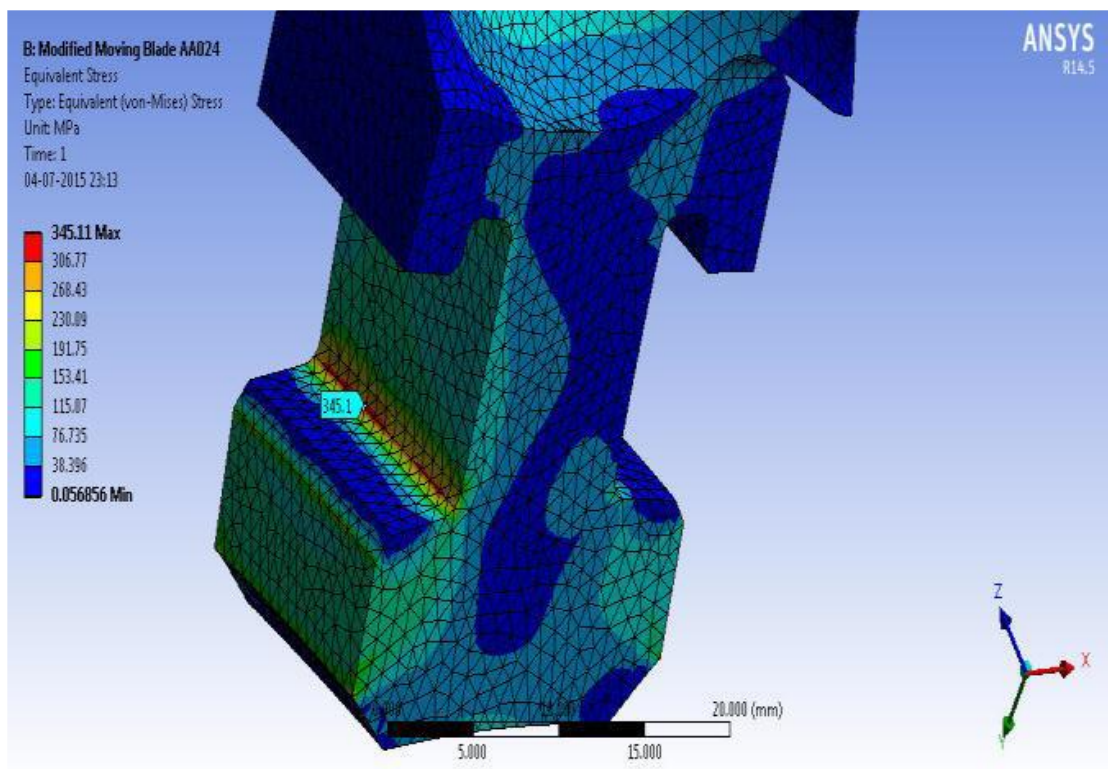
Οι αλλαγές που προτείνονται είναι οι εξής:

1. Το πάχος του λαιμού να αυξηθεί κατά 1mm
2. Η ακτίνα στο fillet της ρίζας να αυξηθεί από 0.5 σε 0.5mm
3. Και οι διαστάσεις του σπασίματος στο κάτω μέρος της ρίζας να αλλάξουν σε $1x45^\circ$ και $2.77x45^\circ$ από $1.25x45^\circ$ και $3x45^\circ$ αντίστοιχα.



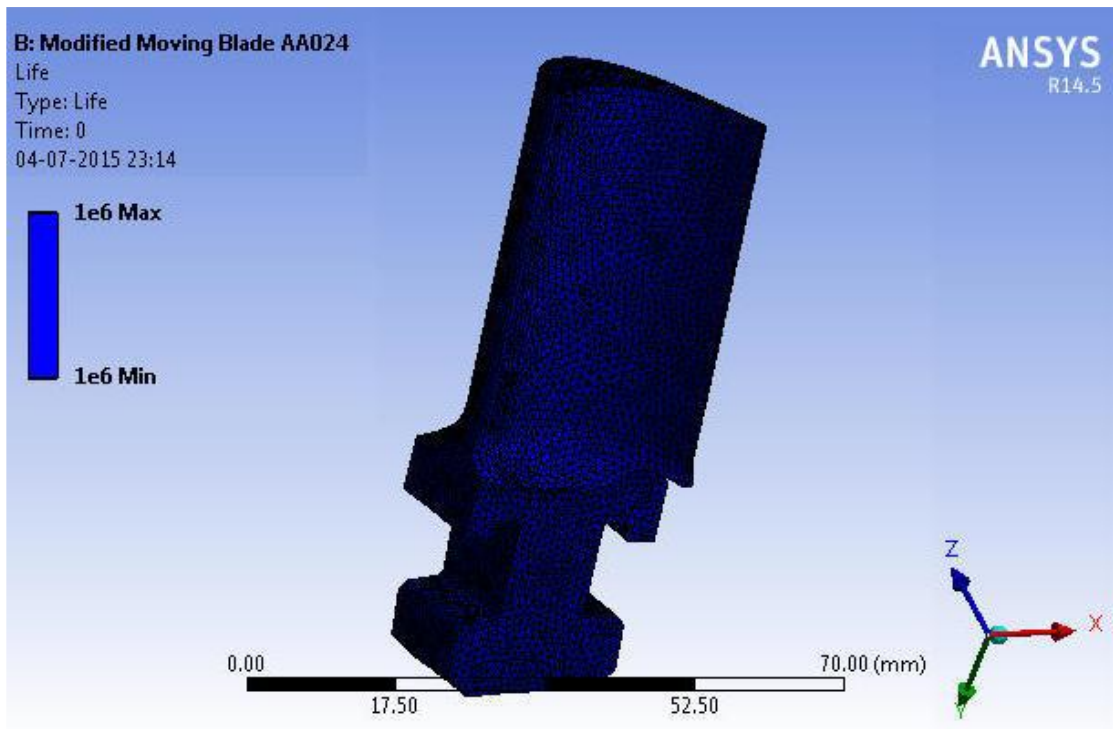
Εικ.4.8 (α) Υπάρχον σχέδιο (β) προτεινόμενο σχέδιο

Αφού έγιναν οι τροποποιήσεις στο σχεδιασμό της ρίζας του πτερυγίου και εφαρμόστηκαν τα ίδια φορτία, τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:



Εικ.4.9 Τάσεις von Mises στο τροποποιημένο πτερόγιο

Με την εφαρμογή των τροποποιήσεων στο σχεδιασμό της ρίζας του πτερυγίου παρατηρείται ότι στη δυσμενή περιοχή, που παραμένει η ίδια, η τάση έχει μειωθεί σε 345MPa από 563MPa [Εικ.4.9]. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της αντοχής σε κόπωση [Εικ.4.10]



Εικ.4.10 Αντοχή σε κόπωση(κύκλοι) του τροποποιημένου πτερυγίου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της τάσης και της διάρκειας ζωής μεταξύ του υπάρχοντος πτερυγίου και του βελτιωμένου [Πίνακας 6].

S.No.	Parameter	Existing Blade	Modified Blade
1	Equivalent stress (Mpa)	560	345.1
2	Fatigue life "N"	86438	1000000

Πίνακας 6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία διερευνήθηκε η αντοχή σε κόπωση και η διάρκεια ζωής ενός πτερυγίου στροβίλου αμμοστροβίλου. Ο υπάρχον σχεδιασμός του πτερυγίου εμφανίζει πολύ καλά χαρακτηριστικά σε κόπωση και μεγάλη διάρκεια ζωής σύμφωνα με τον θεωρητικό υπολογισμό. Παρουσιάζεται όμως πρόβλημα στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς στον θεωρητικό υπολογισμό η αντοχή σε κόπωση είναι πρακτικά άπειροι κύκλοι ($2.438e6$) ενώ στην προσομοίωση λειτουργίας μέσω του λογισμικού ANSYS με τον υπάρχοντα σχεδιασμό του πτερυγίου έχει διάρκεια ζωής 86436 κύκλους. Για τον λόγο αυτό έγιναν κάποιες προτάσεις για μετατροπές στον σχεδιασμό ώστε να αποκτήσει υψηλότερη αντοχή σε κόπωση της τάξης των $1e6$ κύκλων.

5. Εκτίμηση της διάρκειας ζωής, μέχρι τον θρυμματισμό, επίστρωσης θερμικού φραγμού (TBC) πτερυγίου αεροστρόβιλου με χρήση δοκιμής θερμικής κόπωσης

Μια ομάδα μηχανικών από τη Κορέα, οι **In-Hwan Shin, Jae-Mean Koo, Chang-Sung Seok, Sung-Ho Yang, Tack-Woon Lee, Bum-Soo Kim** [6], μελέτησαν και ανέλυσαν τη διαδικασία θρυμματισμού και αποκόλλησης της προστατευτικής επίστρωσης τύπου TBC που χρησιμοποιείται σε πτερύγια στροβίλου αεροκινητήρων αλλά και γενικότερα σε αεροστρόβιλους όλων των τύπων.

Οι επικαλύψεις TBC χρησιμοποιούνται για να προστατεύουν τα πτερύγια των στροβίλων από τα καυσαέρια και για να μετριάσουν την επιφανειακή τους θερμοκρασία. Η αστοχία των επικαλύψεων συνδέεται άμεσα με αστοχία του πτερυγίου καθώς ο θρυμματισμός τους θα οδηγήσει στην επιτάχυνση φαινομένων όπως τοπική διάβρωση και οξείδωση. Συνεπώς η διάρκεια ζωής της επικάλυψης TBC, μέχρι τον θρυμματισμό της, είναι σημαντική για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των πτερυγίων ενός κινητήρα.

Στη συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θερμικής κόπωσης στους 1100°C και στους 1151°C. Έπειτα έγινε έλεγχος συνοχής και c-scanning στην επικάλυψη των δοκιμίων και από τα αποτελέσματα προέκυψε μια εμπειρική σχέση βασισμένη στην αναλογία της θρυμματισμένης περιοχής και του πλήθους των θερμικών κύκλων. Έτσι η διάρκεια ζωής της επικάλυψης μέχρι τον θρυμματισμό μπορεί να εκτιμηθεί.

Οι επικαλύψεις τύπου TBC αποτελούνται από μία συνδεδετική επίστρωση από MCrAlY (όπου M = Ni, Co ή και τα δύο), μία κεραμική (7–8 wt.% ZrO₂–Y₂O₃) επίστρωση πάνω από την συνδεδετική και ένα στρώμα θερμικά αναπτυσσόμενων οξειδίων – TGO (Thermal Growing Oxide) στην επιφάνεια. Το στρώμα των οξειδίων αναπτύσσεται στην περιοχή μεταξύ του συνδεδετικού στρώματος και του κεραμικού κατά τη διάρκεια λειτουργίας του στροβίλου. Οι πιθανότητες αστοχίας σε αυτή την ενδιάμεση περιοχή αυξάνουν εξαιτίας των διάφορων τάσεων που ασκούνται [3,6]. Γενικότερα οι επικαλύψεις τύπου TBC υφίστανται θερμική κόπωση παράγοντας που συμβάλλει κατά πολύ στη δημιουργία συνθηκών αστοχίας στην επικάλυψη.

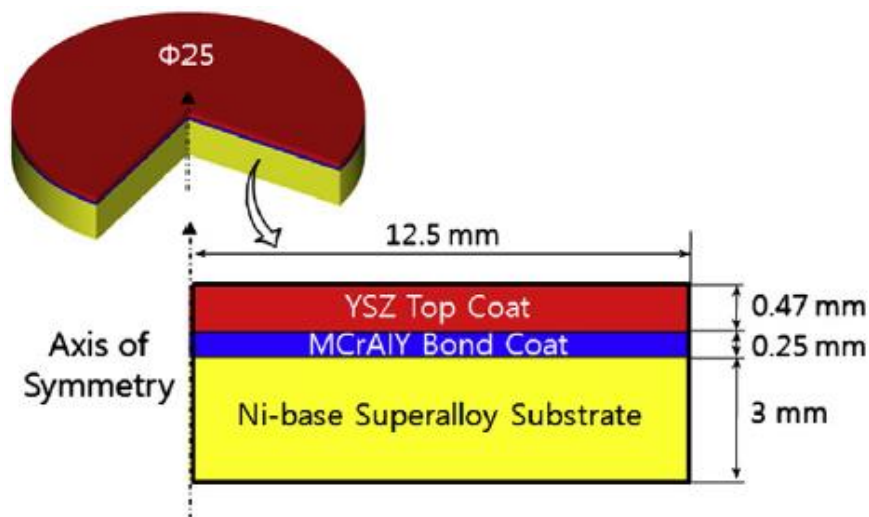
Δοκιμή θερμικής κόπωσης

Η σχηματική απεικόνιση του δοκιμίου [Εικ.5.1] που έχει σχήμα νομίσματος διαμέτρου 25mm μας δείχνει το υπόστρωμα από κράμα νικελίου (GTD111DS) και το συνδεδετικό στρώμα MCrAlY που εναποτέθηκε στο κράμα μέσω LVPS (Low Vacuum Plasma Spray). Το κεραμικό YSZ (Yttria Stabilized Zirconia) στρώμα εναποτέθηκε στο MCrAlY μέσω APS (Air Plasma Spray) στη μορφή ενός DVC δομημένου στρώματος όπως φαίνεται στον πίνακα 7.

Specifications of each layer of the coated specimen [5,7].

Component	Material	Coating type	Thickness
Top coat	YSZ (7–8% ZrO ₂ –Y ₂ O ₃)	APS	470 μm
Bond coat	MCrAlY (Co 32Ni 21Cr 8Al 0.5Y)	LVPS	250 μm
Substrate	GTD-111DS	–	3 mm

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά των στρωμάτων της επικάλυψης



Εικ.5.1 Σχηματική απεικόνιση της επικάλυψης του δοκιμίου [7]

Μέθοδοι δοκιμών

Οι δοκιμές θερμικής κόπωσης για την εκτίμηση της περιόδου μέχρι τον θρυμματισμό της επικάλυψης TBC των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες. Κάθε κύκλος δοκιμής θερμικής κόπωσης αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο το δοκίμιο θερμαίνεται για 45 λεπτά στους 1100°C και στους 1151°C. Στο δεύτερο βήμα το δοκίμιο ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου για 15 λεπτά.

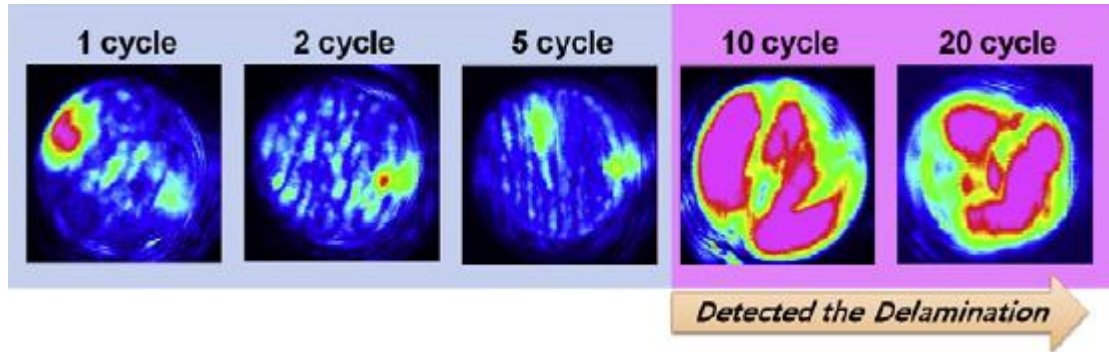
Ο θρυμματισμός της επικάλυψης παρατηρήθηκε οπτικά όταν τα δοκίμια έχουν ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου. Σε όλες τις περιπτώσεις η έναρξη των ρωγμών προέκυψε στα άκρα των δοκιμίων πριν προχωρήσει σε όλο το άνω στρώμα της επικάλυψης. Στη μελέτη επειδή είναι δύσκολο να μετρηθεί η περιοχή της αποκόλλησης της επικάλυψης κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ορίσαμε τη διάρκεια μέχρι την αποκόλληση όλης της περιοχής της επικάλυψης ως τη διάρκεια ζωής της μέχρι τον θρυμματισμό.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η διάρκεια ζωής της TBC επικάλυψης του δοκιμίου εκτιμάται σε 10 με 19 κύκλους στους 1151 °C και από 37 μέχρι 52 κύκλους στους 1100 °C.

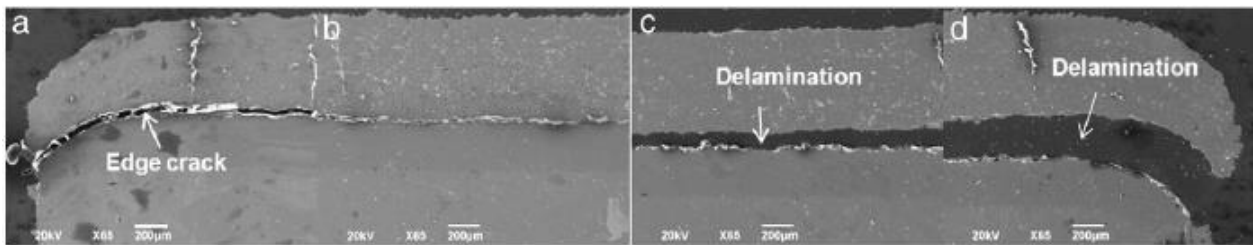
Ανάλυση με τη μέθοδο c-scanning (ακουστική μικροσκοπία)

Για να εκτιμηθεί ο μηχανισμός αστοχίας της επικάλυψης προετοιμάστηκαν τα δοκίμια και σταμάτησαν σκόπιμα μετά από 1, 2, 5, και 10 κύκλους θερμικής κόπωσης. Σε όλα τα δείγματα έπειτα πραγματοποιήθηκε ανάλυση c-scanning. Η περιοχή αποκόλλησης της επικάλυψης ανιχνεύθηκε χρησιμοποιώντας την αντίστροφη φάση των υπερηχητικών σημάτων. Για να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της μεθόδου c-scanning [Εικ.5.2], έγιναν αναλύσεις της μικροδομής από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) [Εικ.5.3]. Διαπιστώθηκε έτσι ότι δεν υπήρχε κάποια εσωτερική ρωγμή. Η ανάλυση του δοκιμίου όμως έπειτα από 20 κύκλους θερμικής κόπωσης έδειξε ότι η ρωγμή της επικάλυψης εμφανίζεται στα άκρα του δοκιμίου και εκτείνεται προς το κέντρο.

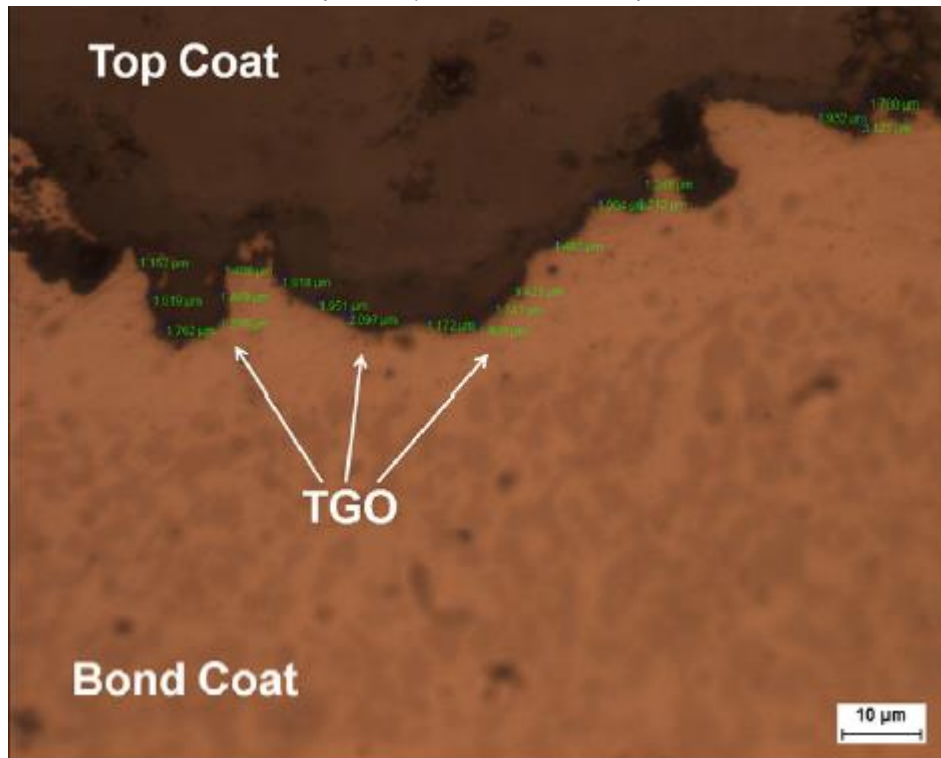
Σε αυτή τη μελέτη παρατηρήθηκε επίσης η ανάπτυξη του πάχους του στρώματος οξειδίων (TGO) [Εικ.5.4] από τον πρώτο μέχρι τον εικοστό κύκλο θερμικής κόπωσης στους 1100 °C. Η ρωγμή εξαπλώθηκε με την αύξηση των κύκλων και εκτιμήθηκε ότι η ανάπτυξη της ρωγμής ήταν αποτέλεσμα του σχηματισμού των οξειδίων και των υψηλών τάσεων στα άκρα.



Εικ.5.2 Αποτελέσματα ανάλυσης c-scanning για την εύρεση της περιοχής αποκόλλησης της TBC



Εικ.5.3 Εικόνα SEM από διατομή της επικάλυψης του δοκιμίου μετά από 20 κύκλους Θ.Κ a)αριστερό άκρο b),c)μέσο και d) δεξί άκρο



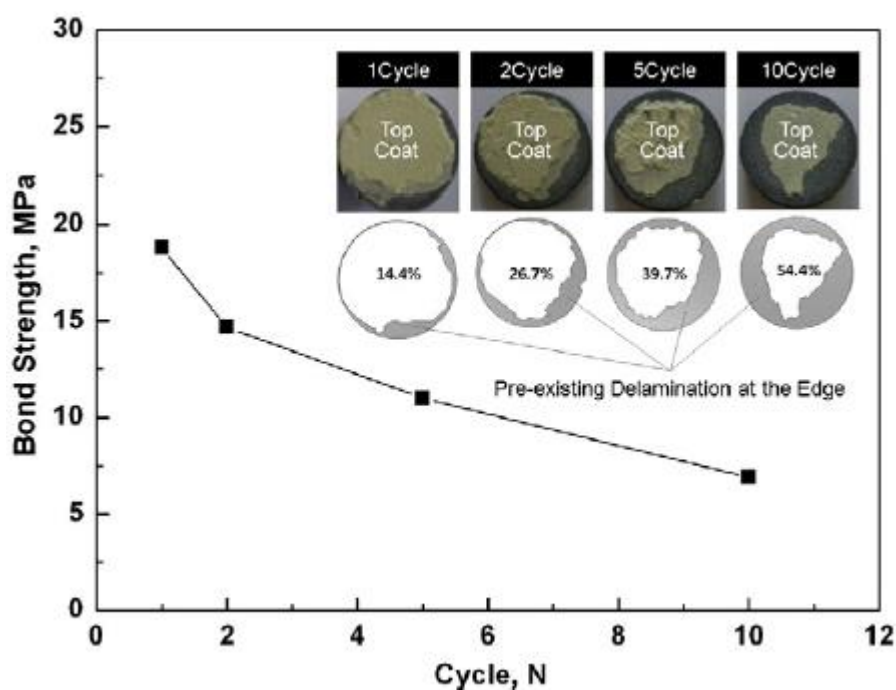
Εικ.5.4 Διακρίμανση του πάχους του στρώματος οξειδίων έπειτα από 20 κύκλους θερμικής κόπωσης

Έλεγχος συνοχής της επικάλυψης

Παρατηρήθηκε ότι η συνοχή της επικάλυψης με το κράμα του δοκιμίου μειωνόταν με την αύξηση των κύκλων και ταυτόχρονα αυξανόταν η περιοχή αποκόλλησης που ξεκινούσε από τα άκρα της επιφάνειας. Από αυτό το αποτέλεσμα εκτιμήθηκε ότι η έκταση της περιοχής αποκόλλησης σχετίζεται με την δύναμη της συνοχής της επικάλυψης και ταυτόχρονα βρέθηκε η σχέση μεταξύ της έκτασης της αποκόλλησης και της αστοχίας από θερμική κόπωση.

Για να διατηρηθεί αυτή η σχέση πραγματοποιήθηκαν επιπλέον δοκιμές συνοχής της επικάλυψης στα δοκίμια που είχαν καταστραφεί από θερμική κόπωση στους 1151°C. Το κατεστραμμένο δοκίμιο που ήταν προσδεμένο στο εξάρτημα στήριξης με συνθετική κόλλα τύπου εροxy τοποθετήθηκε στους 170°C για δύο ώρες, ώστε να διασφαλιστεί η συνοχή της κόλλας. Οι δοκιμές της συνοχής της επικάλυψης έγιναν σύμφωνα με τα πρότυπα της οδηγίας ASTM C633-79. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ταχύτητα 1mm/min κάτω από εφελκυστικό φορτίο και η σχέση της περιοχής αποκόλλησης με τη θερμική κόπωση αναλύθηκε.

Η περιοχή αποκόλλησης μετά το πέρας της δοκιμής συνοχής της TBC μετρήθηκε μέσω φωτογραφικής ανάλυσης [Εικ.5.5]. Η αναλογία της αποκολληθείσας περιοχής αυξήθηκε μέσω της θερμικής κόπωσης από 21% σε 55% έπειτα από 5 κύκλους στους 1151 °C και από 15% σε 54% έπειτα από 10 κύκλους στους 1100 °C.



Εικ.5.5 Αποτελέσματα δοκιμής της συνοχής στη περίπτωση της θερμικής κόπωσης

Με βάση τη παραδοχή που έγινε, ότι δηλαδή η διάρκεια του θρυμματισμού της επικάλυψης ισούται με το πλήθος των κύκλων στους οποίους αποκολλήθηκε όλη η επιφάνεια της επικάλυψης, τότε η διάρκεια ζωής της TBC μέχρι τον θρυμματισμό της υπολογίστηκε, έπειτα από προσαρμογή της καμπύλης, στους 19 κύκλους στους 1151°C και στους 35 κύκλους με θερμοκρασία 1100°C. Οι εξισώσεις προσαρμογής της καμπύλης είναι οι εξής:

$$A_d = 23N^{0.5} \text{ στους } 1151 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

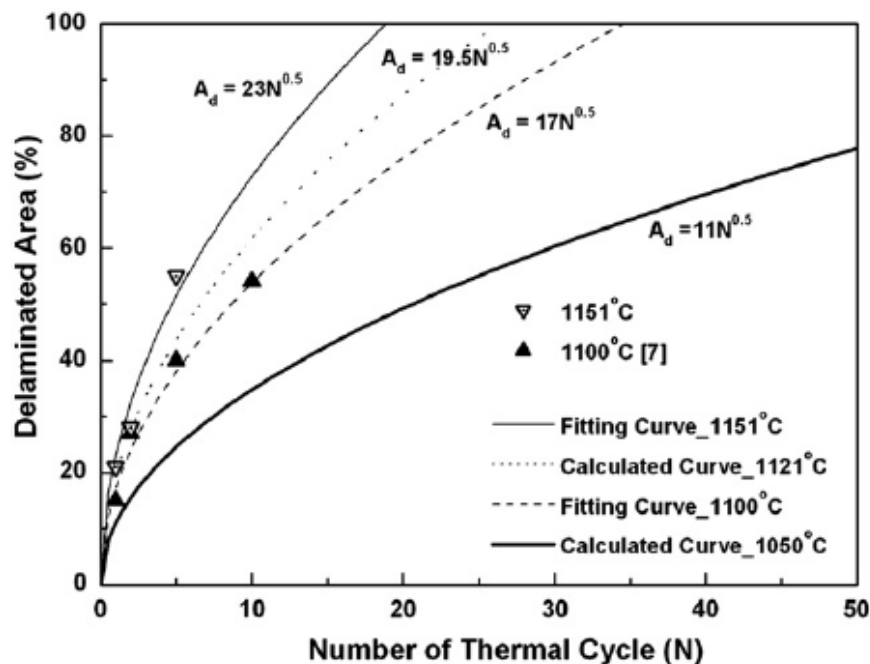
$$A_d = 17N^{0.5} \text{ στους } 1100 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Όπου A_d είναι η αναλογία της περιοχής αποκόλλησης και N το πλήθος των θερμικών κύκλων. Σαν αποτέλεσμα της σύγκρισης των δύο καμπύλων, φαίνεται ότι η διάρκεια θρυμματισμού της επικάλυψης από τη δοκιμή θερμικής κόπωσης, συμπίπτει με αυτή της καμπύλης προσαρμογής. Από τις εξισώσεις προκύπτει ότι η αποκολληθήσα περιοχή είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του πλήθους των κύκλων. Είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία στην οποία επιταχύνεται η οξείδωση του συνδετικού στρώματος της επικάλυψης είναι οι 950°C . Με σημείο αναφοράς αυτό και το ότι η περιοχή αποκόλλησης είναι συνάρτηση του πλήθους των κύκλων και της θερμοκρασίας, προέκυψε η ακόλουθη εμπειρική σχέση δύο μεταβλητών:

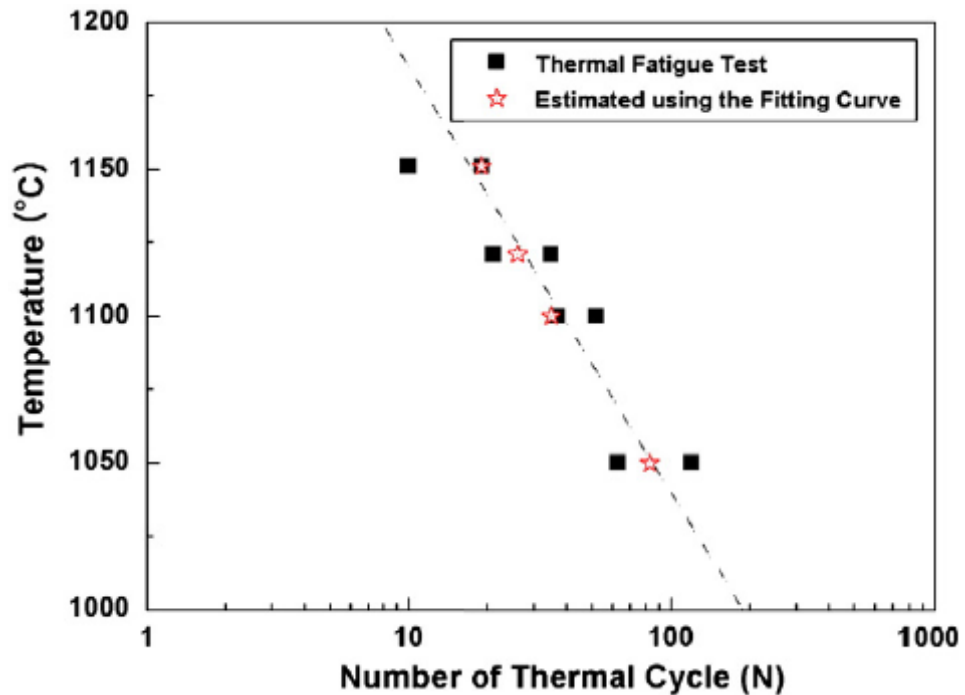
$$A_d = \frac{(T_o - 960)}{8.3} N^{0.5} \quad (3)$$

Όπου T_o είναι η θερμοκρασία δοκιμής.

Από την σχέση (3) προέκυψε ότι η διάρκεια θρυμματισμού στους 1121°C είναι 26 κύκλοι και 83 κύκλοι στους 1050°C . Έπειτα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές θερμικής κόπωσης συγκρίθηκαν με αυτά της σχέσης (3) [Εικ.5.7]. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διάρκεια ζωής της επικάλυψης μέχρι τον θρυμματισμό μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά [Εικ.5.6] χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ της αποκολληθήσας περιοχής και του πλήθους των κύκλων θερμικής κόπωσης που υπέστη το δοκίμιο.



Εικ.5.6 Διάρκεια ζωής της επικάλυψης στους 1121°C και 1050°C που προβλέφθηκε μέσω παρεμβολής.



Εικ.5.7 Αποτελέσματα πρόβλεψης συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα της δοκιμής

Συμπεράσματα της μελέτης

Σε αυτή τη μελέτη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θερμικής κόπωσης σε δοκίμια σχήματος νομίσματος. Τα δοκίμια ήταν κατασκευασμένα από υπερκράμα νικελίου και είχαν επίστρωση τύπου TBC σαν αυτή που χρησιμοποιείται στα πρωτοβάθμια πτερύγια στροβίλων των αεροστροβίλων κινητήρων. Με τη χρήση ακουστικής μικροσκοπίας και ελέγχου της συνοχής της επικάλυψης προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, ρωγμές αποκόλλησης προέκυψαν στα άκρα των δοκιμίων και στη συνέχεια όσο αυξάνονταν οι κύκλοι, η περιοχή της αποκόλλησης επεκτάθηκε προς το κέντρο μέχρι τον πλήρη θρυμματισμό την επικάλυψης.
2. Παρατηρήθηκε αύξηση του πάχους του στρώματος οξειδίων από τον πρώτο μέχρι τον εικοστό κύκλο στους 1100°C. Επίσης ότι η ρωγμή αναπτυσσόταν όσο αυξανόταν το πλήθος των κύκλων.
3. Η διάρκεια ζωής μέχρι τον θρυμματισμό μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά κάνοντας χρήση της σχέσης μεταξύ της αποκολληθείσας περιοχής και του πλήθους των κύκλων θερμικής κόπωσης.

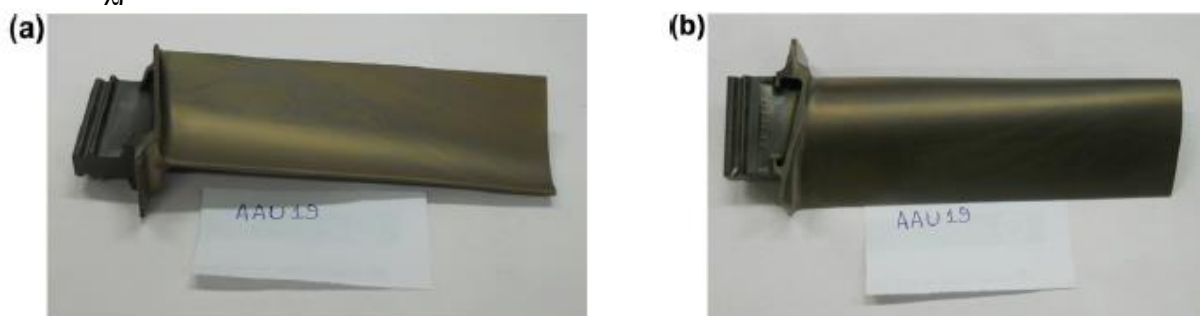
6. Εκτίμηση κατάστασης πτερυγίων στροβίλου και της προστατευτικής επίστρωσης

Εισαγωγή

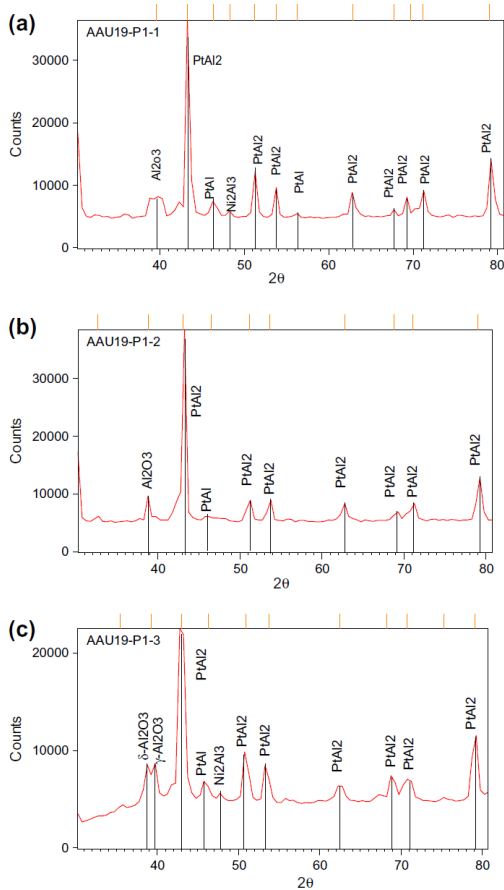
Οι **R. Rajerdan, M.d. Ganeshachar, Jivankumar, T. Mohana Rao** [7], ερεύνησαν τόσο πτερύγια στροβίλου χαμηλής πίεσης με σημάδια αλλαγής χρώματος, για την ακεραιότητα της τροποποιημένης με λευκόχρυσο προστατευτικής επίστρωσης αλουμινίου, όσο και πτερύγια στροβίλου υψηλής πίεσης για το είδος του υλικού κατασκευής και την ακεραιότητα της επίστρωσης τους. Βαφή, EDS και XRD ήταν οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για να αποδειχθεί ότι η προστατευτική επικάλυψη ήταν σε καλή κατάσταση. Τα πτερύγια του ρότορα υψηλής πίεσης ελέγχθηκαν και στο SEM. Παρατηρήθηκε αποδόμηση σε τμήματα της επίστρωσης και ρωγμές DS CM 247 LC στο βασικό υλικό κατασκευής, τα οποία οδήγησαν στην απόρριψη της συγκεκριμένης παρτίδας.

Μελέτες αστοχίας πτερυγίων στροβίλων πραγματοποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές με διορθωτικές μετρήσεις. Ο Park και άλλοι διερεύνησαν ρωγμές του κινητήρα J69-T-25 για να φτάσουν στο συμπέρασμα ότι η πρόωμη αστοχία κόπωσης πραγματοποιήθηκε λόγω της ζημιάς της επιφάνειας στην μπροστινή πλευρά και της θερμής διάβρωσης. Ο Zhang και άλλοι ανέλυσαν ρωγμές σε πτερύγια από κράμα DS, ερεύνησαν τις αιτίες και πρότειναν μέτρα πρόληψης τους. Ο Naem και άλλοι διενέργησαν μεταλλουργικές αναλύσεις στην πρώτη και τη δεύτερη βαθμίδα του στροβίλου για να παρατηρήσουν ρωγμές σε διαφορετικά τμήματα των πτερυγίων, εκτραχυμένες γ' φάσεις με κατακρημνίσματα και ρωγμές στα όρια των κόκκων της επίστρωσης του πτερυγίου. Τα μεταλλουργικά ευρήματα επιβεβαιώθηκαν με μηχανική ανάλυση.

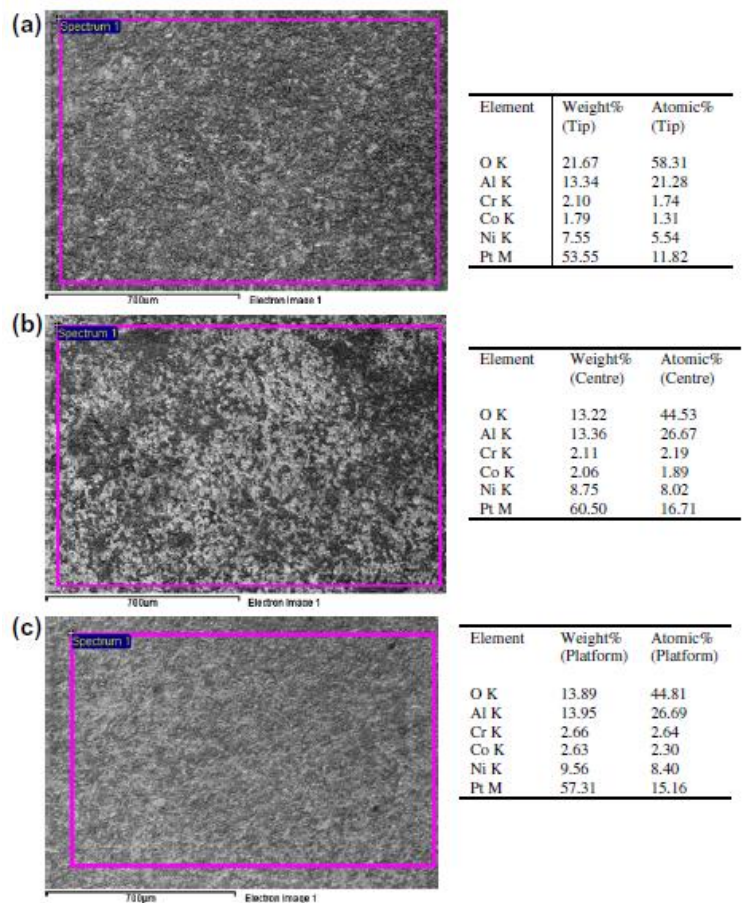
Ο Das και άλλοι ερεύνησαν την ισοθερμική οξειδωση της επίστρωσης αλουμινιδίου λευκόχρυσου σε CM247LC για να καταλάβουν την διαδικασία αποδόμησης της. Επιπλέον παρατήρησαν ότι η ισοθερμική έκθεση στους 1000 °C για πάνω από 200 h, οδήγησε σε δημιουργία Ni₃Al. Ο Antony Goward πρότεινε τη βαφή (θερμική) σαν διαδικασία ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της προστατευτικής επίστρωσης αλουμινιδίου λευκόχρυσου. Το πτερύγιο θερμαίνεται σε περιβάλλον οξυγόνου και αζώτου στους 650 °C για 1-4 h. Το χρυσαφί χρώμα είναι η ένδειξη της ύπαρξης επίστρωσης αλουμινιδίου. Πολύπλοκα αζωτοξείδια του AlCrNi δίνουν αυτό το χαρακτηριστικό κίτρινο-χρυσαφί χρώμα [Εικ.6.1]. Το μπλε χρώμα αποτελεί ένδειξη ότι δεν υπάρχει αλουμινίδιο στην επίστρωση. Αυτό οφείλεται στην παρουσία οξειδίων στην γ' φάση. Ο Binoist και οι άλλοι μελέτησαν την μικροδομή επιστρώσεων αλουμινίου, με πρόσθετο λευκόχρυσο, σε υπερκράματα νικελίου. Παρατηρήθηκε ελεγχόμενος σχηματισμός PtAl₂ [Εικ.6.2-6.3] λόγω ότι δεν είχε πραγματοποιηθεί προηγουμένως διάχυση λευκόχρυσου.



Εικ.6.1 Πτερύγιο LPTR CM247LC DS. Το κίτρινο χρώμα υποδεικνύει την απουσία Ni₃Al στην επίστρωση: a) Εμπρός όψη, b) Πίσω όψη



Εικ.6.2 XRD επίστρωσης πτερυγίου
 α) Κορυφή, β) Κέντρο, γ) Βάση



Εικ.6.3 Μορφολογία επιφάνειας επίστρωσης
 και EDS στοιχειομετρική σύνθεση

Επιπροσθέτως, ταυτοποιήθηκε ότι το $PtAl_2$ δημιουργείται όταν δότης πλούσιος σε αλουμίνιο είναι παρόν. Μόνο κατά την πολύωρη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατόν το $PtAl_2$ να μετατραπεί σε $NiAl$ και αυτό διότι το $PtAl_2$ είναι πολύ σταθερό.

Το σπάσιμο των πτερυγίων ενός αεροστρόβιλου κινητήρα μελετήθηκε από τον Kim ώστε να διαπιστωθούν τα αίτια. Η ρωγή φαίνεται να ξεκίνησε στα όρια λόγω του διαχωρισμού του Hf με το Ti. Τέλος, ανάλυση αστοχίας των πτερυγίων του LPTR πραγματοποιήθηκε από τον Bhaumik και άλλους για να διευκρινιστεί ότι οι ρωγές δημιουργήθηκαν λόγω του λυγισμού και των δόνησεων που ακολούθως μεταφέρθηκαν στα πτερύγια.

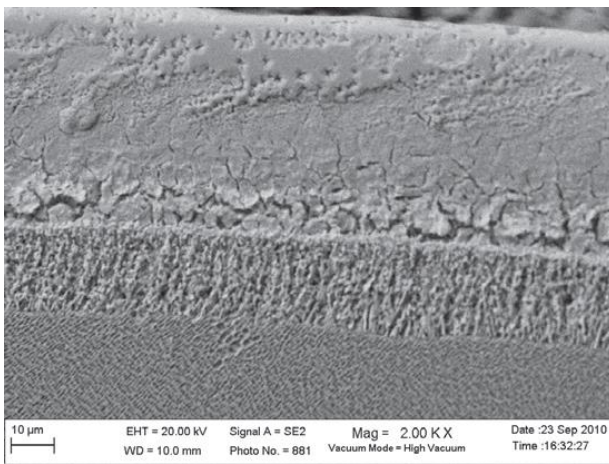
Προετοιμασία

Τα πτερύγια του στροβίλου χαμηλής πίεσης, μετά την λειτουργία τους για 80 h αποχρωματίστηκαν. Έτσι έπρεπε να ελεγχθεί η κατάσταση της επίστρωσης για να συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται. Τα πτερύγια δημιουργήθηκαν με χύτευση DS CM247 LC ενώ η επίστρωση ήταν από αλουμινίδια λευκόχρυσου με διαδικασία Chromalloy RT 22. Ο έλεγχος των πτερυγίων έγινε χωρίς να καταστραφεί κάποιο τμήμα, και αυτό διότι εάν ήταν σε καλή κατάσταση θα έπρεπε να είναι δυνατόν να ξαναχρησιμοποιηθούν.

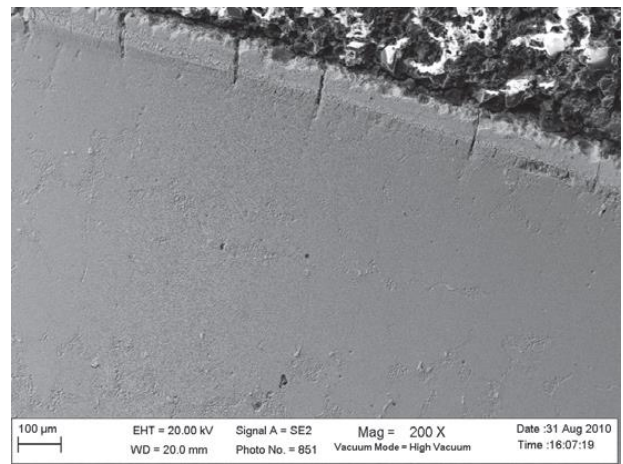
Τα αντίστοιχα περύγια του ρότορα υψηλής πίεσης είχαν το ίδιο είδος επίστρωσης. Ετοιμάστηκαν δοκίμια για μεταλλογραφικό έλεγχο για να διερευνηθούν τα προβλήματα που οφείλονται σε υπερθέρμανση.

Πειραματικά

Η θερμική βαφή έλαβε χώρα μέσω εκτόξευσης κόνεως αλουμίνας 320 στα περύγια με πίεση 3-4 kg/cm², ενώ ακολούθησε θέρμανση των περυγίων 650°C για 1,5 h. Ακολούθησε ανάλυση μέσω διασποράς ακτινών X στα περύγια του LPR, αλλά και στα δοκίμια από τα αντίστοιχα περύγια του HPTR, ώστε να αναγνωριστούν οι φάσεις στην επίστρωση αλουμινιδίου λευκόχρυσου.

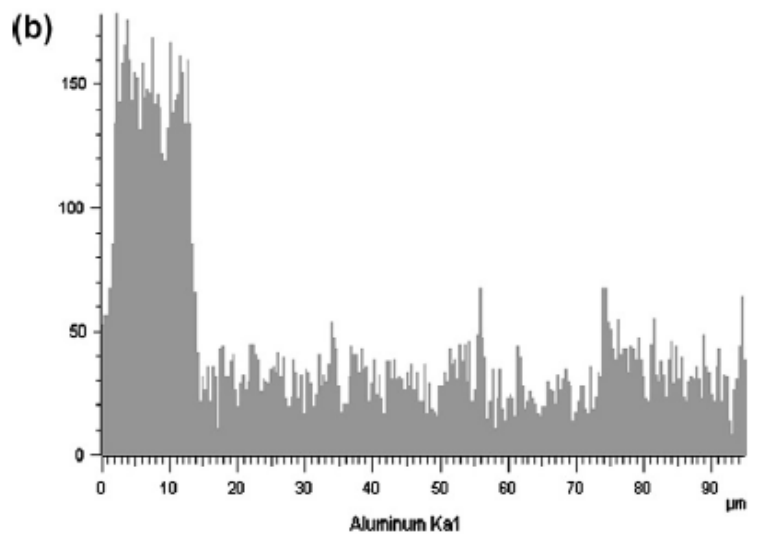
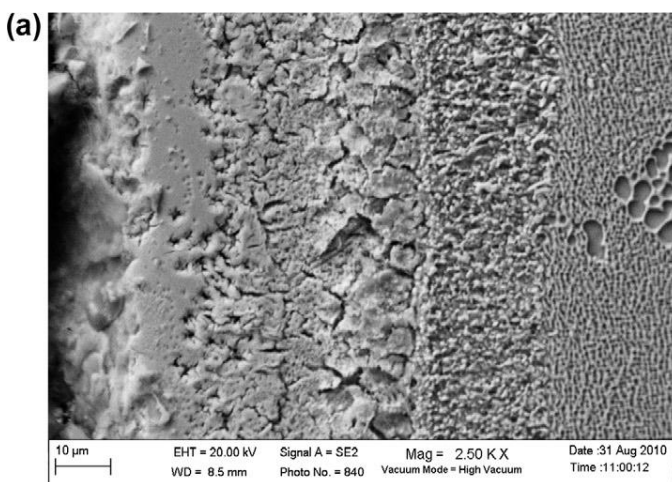


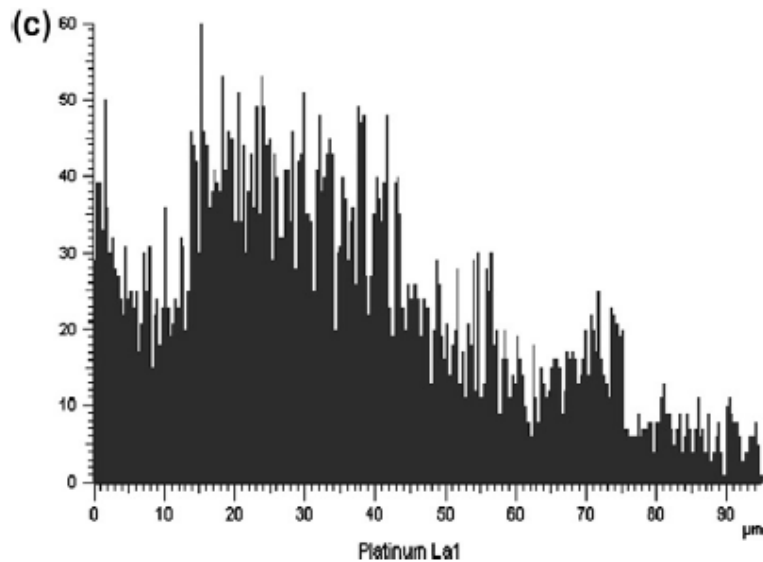
a



b

Εικ. 6.4 Ρωγήμ μικροδομής *a*) Οριζόντια *b*) Κάθετη





Εικ.6.5 Συγκεντρώσεις στοιχείων στην επίστρωση του HPTR DS CM247LC a) Τομή επίστρωσης, b) Αλουμίνιο, c) Λευκόχρυσος

Αποτελέσματα και συζήτηση

LPTR blade

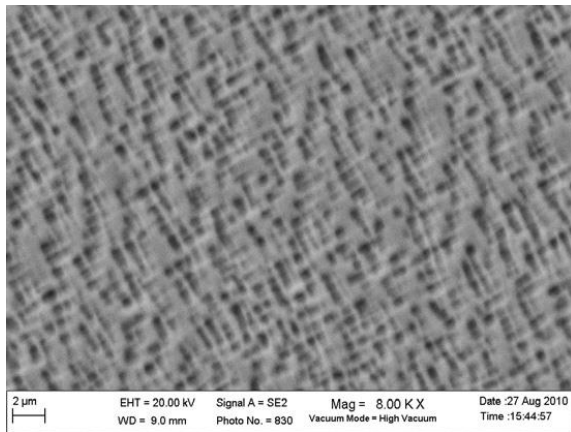
Το χρυσαφί χρώμα είναι ένδειξη ύπαρξης επικάλυψης αλουμινιδίου. Πολύπλοκα μεταλλικά νιτρίδια AlCrNi. Το μπλε χρώμα στη βάση υποδεικνύει την απουσία αλουμινιδίου στην επίστρωση. Αυτό οφείλεται στα οξειδία της γ' φάσης.

Η ανάλυση με τη βοήθεια ακτινών X ανέδειξε την ύπαρξη επαρκούς ποσότητας αλουμινίου σε περιεκτικότητα κατά βάρος. Η περιεκτικότητα αυτή κυμάνθηκε από 13.3% με 14% στην κορυφή του πτερυγίου. Το αντίστοιχο ποσοστό για το λευκόχρυσο ήταν 53,6% στην κορυφή, 60,5% στο κέντρο και 57,3% στη βάση.

HPTR blade

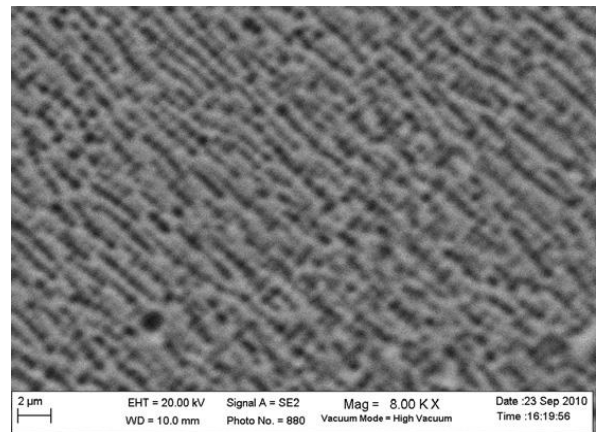
Η μικροδομή της τομής του αλουμινιδίου λευκόχρυσου φαίνεται στην Εικ.6.4a και 6.4b. Παρατηρούμε ότι από τα 74 μm της επίστρωσης μόνο τα 14 μm είναι σε καλή κατάσταση. Στο υπόλοιπο τμήμα παρατηρούνται ρωγμές. Το ποσοστό κατά βάρος του αλουμινίου [Εικ. 6.5b] στην πρώτη στρώση της επιφάνειας των 14 μm κυμαινόταν από 16% με 17%, ενώ στην εσωτερική περιοχή όπου υπάρχουν ρωγμές ήταν 3,8%. Δεν παρατηρήθηκε αλουμίνιο στην ενδιάμεση ζώνη διάχυσης. Το αντίστοιχο ποσοστό βάρους του λευκόχρυσου [Εικ.6.5c] ήταν 37%, 24% και 9%. Στην κύρια ακμή του μεσαίου τμήματος του πτερυγίου κάθετες ρωγμές παρατηρήθηκαν.

Η γ' μικροδομή ήταν ανέπαφη σε κάποιες περιοχές [Εικ.6.6] ενώ σε άλλες είχε διαλυθεί [Εικ.6.7]. Επιπρόσθετα από την κορυφή της κύριας ακμής του πτερυγίου παρατηρήθηκαν ρωγμές οι οποίες έφταναν σε βάθος 0,18 μm [Εικ. 6.8]. Οπότε και η σειρά των πτερυγίων δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί.



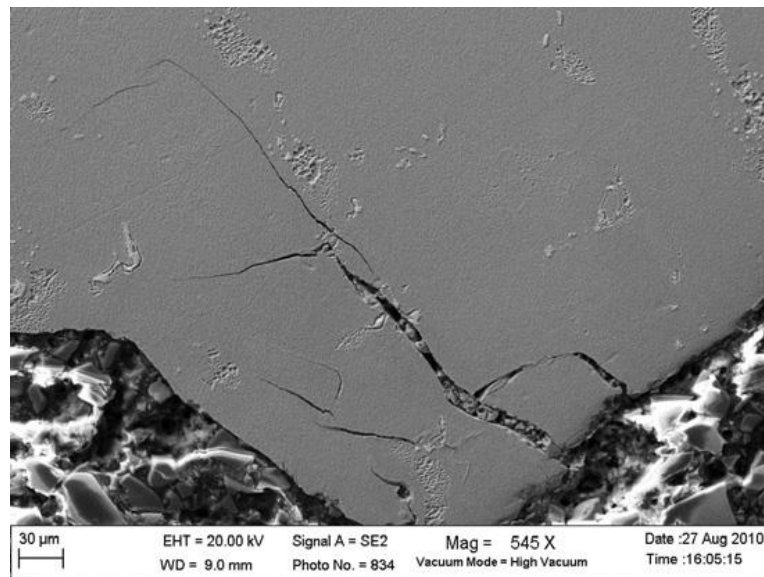
Εικ 6.6

Άθικτη μικροδομή γ' φάσης σε κάποια μέρη του πτερυγίου



Εικ 6.7

Μικροδομή DS CM247 LC



Εικ.6.8 Ρωγμή στο άκρο του πτερυγίου

Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα πτερύγια του στροβίλου χαμηλής πίεσης από DS CM 247 LC με την επίστρωση αλουμινιδίων λευκόχρυσου συμπέραναν ότι η επίστρωση βρισκόταν σε καλή κατάσταση. Ο έλεγχος και η ανάλυση της μικροδομής των πτερυγίων του στροβίλου υψηλής πίεσης έδειξε αστοχία της επίστρωσης μέσω ρωγμών στην επιφάνεια και στο εσωτερικό. Επίσης παρατηρήθηκε εκτενής διαλυτοποίηση της γ' φάσης σε συγκεκριμένες περιοχές.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ιστορικά πρωτοπόρος της ανακάλυψης της αρχής της **αεριώθησης (jet propulsion)** θεωρείται ο Έλληνας επιστήμονας **Ήρωνας** (Αλεξάνδρεια, 1ος αιώνας μ.Χ.). Ο Ήρωνας επινόησε και κατασκεύασε μία μηχανή, γνωστή ως **μηχανή του Ήρωνα** ή **αιολοπύλη**, η οποία θεωρείται ως η πρώτη μορφή των αεριοστροβίλων κινητήρων. Η πιθανή μορφή της κατασκευής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [Εικ.1]. Ένα κλειστό δοχείο με νερό θερμαινόταν ώστε να παραχθεί ατμός. Αυτός μεταφερόταν μέσω δύο κάθετων σωλήνων σε μία σφαίρα, η οποία έφερε αυλούς στη διεύθυνση της ακτίνας της. Καθώς η σφαίρα γέμιζε με ατμό, περιστρεφόταν και ο ατμός εύρισκε οδό διαφυγής από τους ακτινικούς αυλούς.



Εικ.1 Η μηχανή του Ήρωνα [8]

Το 1629, ο Ιταλός μηχανικός Giovanni Branca σχεδίασε τον πρώτο, ουσιαστικά, στροβίλο. Ατμός, παραγόμενος σε θερμαινόμενο δοχείο, περιστρέφει δίσκο που έφερε κοιλότητες στην περιφέρειά του. Η περιστροφή του δίσκου μεταφερόταν μέσω συστήματος γραναζιών σε άλλον άξονα. Το 1791, ο Άγγλος John Barber σχεδίασε ένα σύστημα το οποίο λειτουργούσε με το θερμοδυναμικό κύκλο του σύγχρονου αεριοστροβίλου κινητήρα. Το 1808, ο Άγγλος John Bumbell κατασκεύασε έναν αεριοστροβίλο παρόμοιο με τους σημερινούς, μα χωρίς σταθερά πτερύγια. Αρκετές ομοιότητες με τους αεριοστροβίλους της εποχής μας παρουσίαζε και ο κινητήρας που κατασκεύασε το 1837 ο Γάλλος Bresson. Το 1850, ο Fernihough επινόησε τον πρώτο αεριοστροβίλο κινητήρα που είχε τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί ως εργαζόμενα μέσα ατμό ή αέρα. Η κατασκευή του πρώτου αεριοστροβίλου που λειτούργησε με αέρα, ξεφεύγοντας από τη χρήση του ατμού, ανήκει στον F. Stoltz, το 1872.

Ο μηχανικός Frank Whittle το 1930 κατοχύρωσε την κατασκευή που θεωρείται ο πρώτος επιτυχημένος αεριοστροβίλος κινητήρας για την κίνηση αεροσκάφους. Το 1939, ο Γερμανός μηχανικός Hans Von Ohain κατασκεύασε έναν κινητήρα jet ο οποίος και δοκιμάστηκε σε αεροσκάφος. Με τα χρόνια η εξέλιξη στους κινητήρες jet υπήρξε ραγδαία, σε σημείο οι πτήσεις σε υπερηχητικές ταχύτητες να αποτελούν καθημερινότητα. [8]

1.2 Ορισμός αερίωθησης

Ο κινητήρας αερίωθησης παράγει προωθητική δύναμη (ώση, thrust), προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, εξαναγκάζοντας μία μάζα αερίου να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ως δράση θεωρούμε τη δύναμη που εξασκείται σε μία μάζα καυσαερίων προς το οπίσθιο τμήμα του κινητήρα του αεροσκάφους. Ως αντίδραση στην έξοδο της μάζας αυτής λαμβάνεται μία δύναμη (ώση) προς το εμπρόσθιο τμήμα του κινητήρα και του αεροσκάφους. Το μέγεθος της δύναμης αυτής εξαρτάται από την ποσότητα της μάζας αερίου που εισέρχεται στον κινητήρα και το βαθμό της επιτάχυνσης που θα αποκτήσουν τα εξερχόμενα αέρια.

1.3 Ώση

Η ώση είναι μια δύναμη αντίδρασης που μετριέται σε kp, pounds ή lbf. Η μάζα των καυσαερίων και η τελική τους ταχύτητα καθορίζουν την παραγόμενη ώση του αεριωθητή [Εικ.2]. Πρακτικά χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης της ισχύος των κινητήρων jet.



Εικ.2 Η δράση και η αντίδραση στην κίνηση του αεροσκάφους

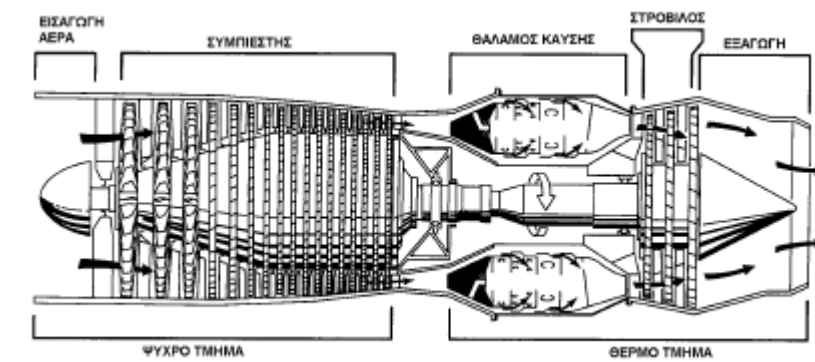
Κεφάλαιο 2

Κινητήρας αεροσκάφους

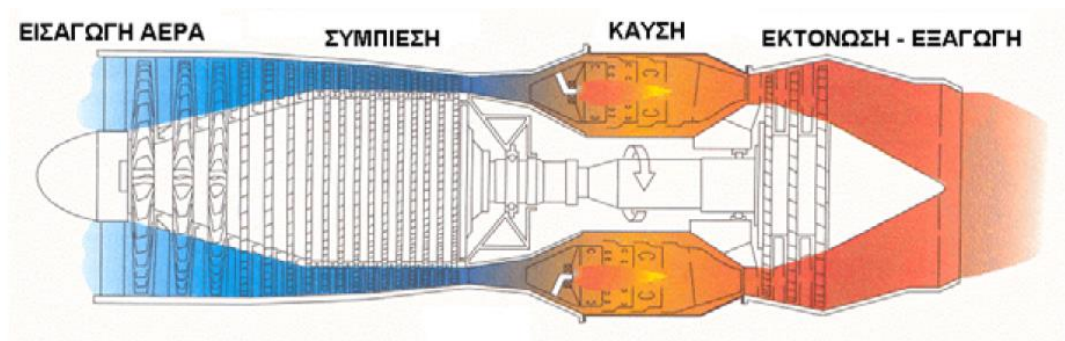
2.1 Αρχή λειτουργίας κινητήρα jet και τα μέρη του

Ο αεροστροβίλος είναι μια μηχανή που μετατρέπει την θερμότητα σε ισχύ. Η θερμική ενέργεια προέρχεται από την καύση ενός καυσίμου και η μηχανική ισχύς παρέχεται σε μια περιστρεφόμενη άτρακτο. Ένας αεροστροβίλος αποτελείται από τρία βασικά μέρη, τα οποία απεικονίζονται στην Εικ.3, : τον συμπιεστή (compressor), τον θάλαμο καύσεως (combustion chamber), και τον στρόβιλο (τουρμπίνα, turbine). [9]

Το πρώτο μέρος είναι ο συμπιεστής. Αποτελεί το ψυχρό τμήμα του κινητήρα και συμπιέζει μάζα αέρα που οδηγείται στον θάλαμο καύσης. Σε αυτό το τμήμα του κινητήρα γίνεται η ανάμειξη του αέρα με καύσιμο και ανάφλεξη του μείγματος. Στο τέλος υπάρχει ο στρόβιλος, στα πτερύγια του οποίου γίνεται η αποτόνωση των καυσαερίων. Ο θάλαμος καύσης και ο στρόβιλος αποτελούν το θερμό τμήμα του κινητήρα. Στη διαδρομή αυτή που ακολουθούν τα καυσαέρια, προκαλούν τη περιστροφή του στροβίλου ο οποίος συνδέεται με τον συμπιεστή με κοινό άξονα. Η λειτουργία της διάταξης αυτής, που απεικονίζεται σχηματικά στην Εικ. 4, ωθεί τα καυσαέρια προς την εξαγωγή (δράση) και αυτά με τη σειρά τους ασκούν μια δύναμη ή ώση (αντίδραση), στην αντίθετη κατεύθυνση προς τον κινητήρα. [8]



Εικ.3 Βασικά μέρη του αεροστροβίλου [8]



Εικ.4 Φάσεις λειτουργίας αεροστροβίλου [8]

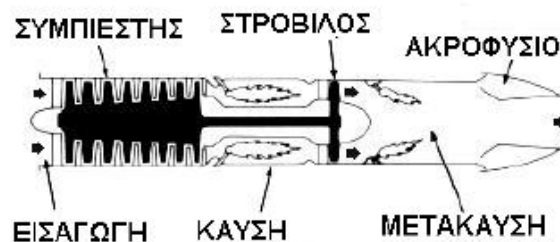
2.2 Είδη κινητήρων

- Ramjet
- Pulse jet
- Αεριοστρόβιλοι-Gas turbine engines
 - Turbojet
 - Turboprop
 - Turbofan
 - Turboshaft
 - Turboramjet
 - Turborocket

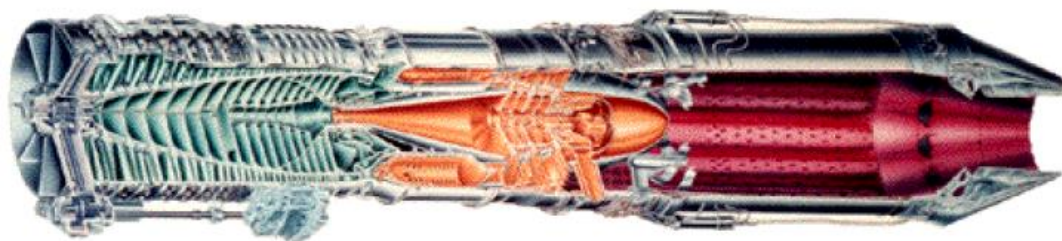
2.3 Τύποι αεριοστρόβιλων κινητήρων

2.3.1 Στροβιλοαντιδραστήρας - Turbojet engine

Ο στροβιλοαντιδραστήρας αποτελεί την πιο απλοποιημένη έκδοση αεριοστρόβιλου κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή το αεροσκάφος κινείται με τη βοήθεια της ώσης που παράγεται από τη ροή των εξερχομένων καυσαερίων, μέσω του ακροφυσίου εξαγωγής στο πίσω μέρος του κινητήρα [Εικ.5 και 6]. [8]



Εικ.5 Τα βασικά μέρη ενός στροβιλοαντιδραστήρα [8]

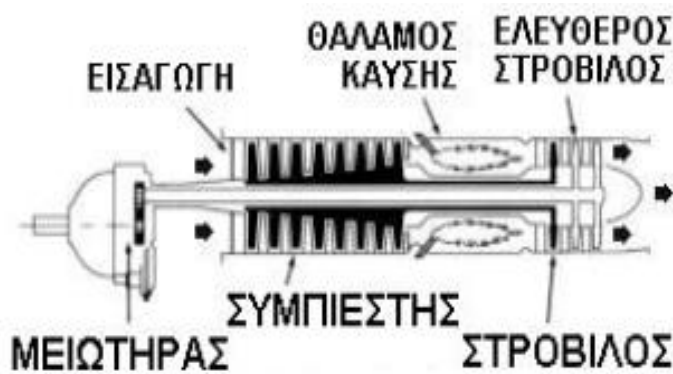


Εικ.6 Ο στροβιλοαντιδραστήρας GE-J79 [8]

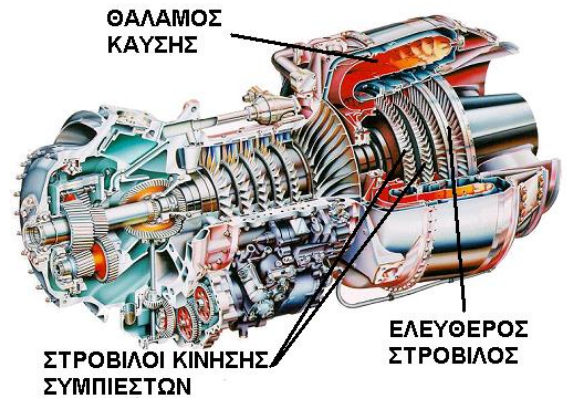
2.3.2 Ελικοστρόβιλος - Turboprop engine

Η χρήση του κινητήρα είναι πολύ διαδεδομένη. Οι διαφορές με το στροβιλοαντιδραστήρα είναι ελάχιστες και περιορίζονται στο ότι χρησιμοποιείται ένα σύστημα γραναζιών ως μειωτήρας στροφών για τη μετάδοση κίνησης στον έλικα. Τα βασικά μέρη του ελικοστρόβιλου απεικονίζονται στην Εικ. 7. Η ενέργεια σε ποσοστό σχεδόν 90% αποδίδεται ως ισχύς στον άξονα που κινεί τον έλικα.

Σε ορισμένους ελικοστρόβιλους χρησιμοποιείται ξεχωριστός στρόβιλος για την κίνηση του έλικα. Αυτός ονομάζεται ελεύθερος στρόβιλος. (power turbine). Ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα σε τομή φαίνεται στην Εικ. 8 [8].



Εικ. 7



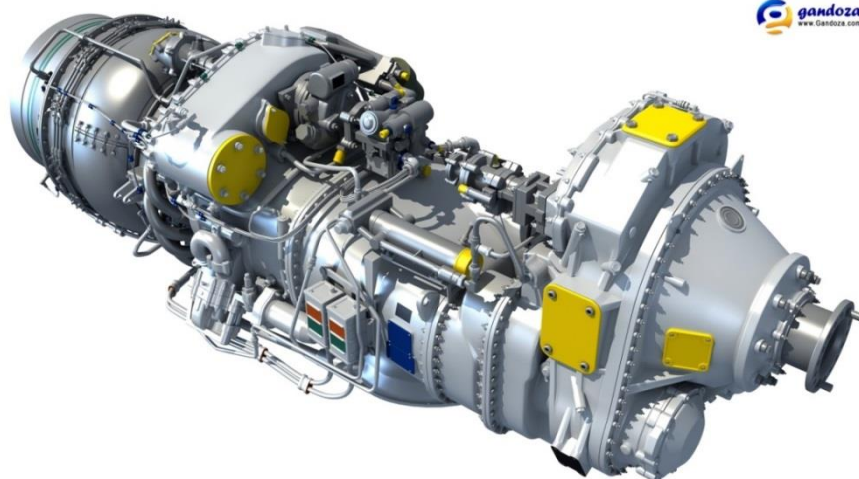
Εικ. 8

Εικ. 7-8 Βασικά μέρη ελικοστρόβιλου κινητήρα [8]

PW123AF

Στην δική μας περίπτωση θα ασχοληθούμε το με τον ελικοστρόβιλο κινητήρα (turboprop) και τα μέρη αυτού, και πιο συγκεκριμένα με το μοντέλο της Pratt and Whitney, PW 123AF [Εικ.9], που προέρχεται από το γνωστό πυροσβεστικό αεροσκάφος Canadair CL-415.

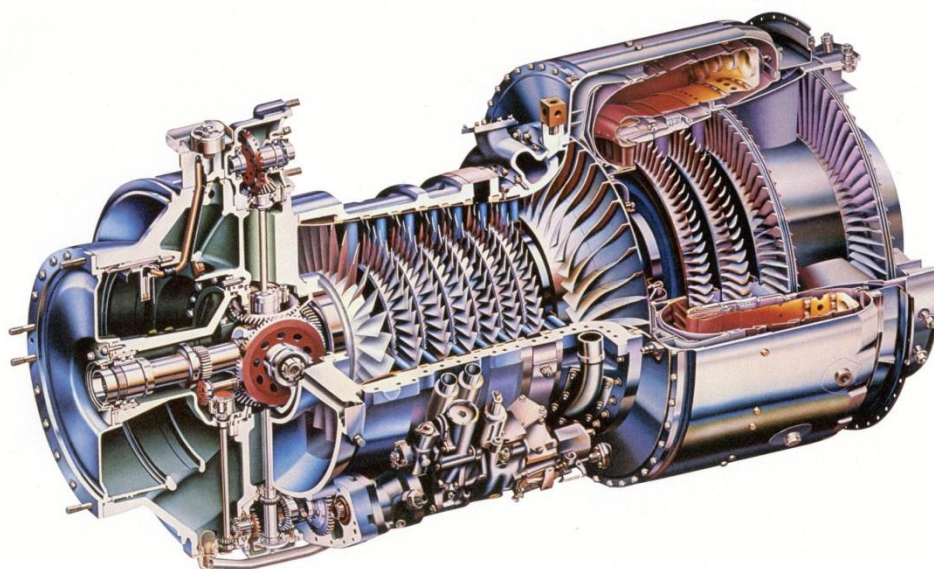
Χάρη στο μειωτήρα η ταχύτητα του στρόβιλου μειώνεται σε ένα πιο λειτουργικό φάσμα για την έλικα, από τις περίπου 20.000 rpm στις 1.200 rpm.



Εικ.9 Ελικοστρόβιλος κινητήρας PW123 [10]

2.3.3 Αξονοστρόβιλος - Turboshaft engine

Αυτός ο τύπος αεριοστρόβιλου [Εικ.10] παρέχει σχεδόν αποκλειστικά την ισχύ στον άξονα του. Η ομοιότητα με τον ελικοστρόβιλο είναι μεγάλη και στη περίπτωση που ο ελεύθερος στρόβιλος (power turbine) είναι συνδεδεμένος με έναν άξονα, όπως αυτός ενός στροφοπίου ελικοπτήρου, τότε έχουμε αξονοστρόβιλο. [8]

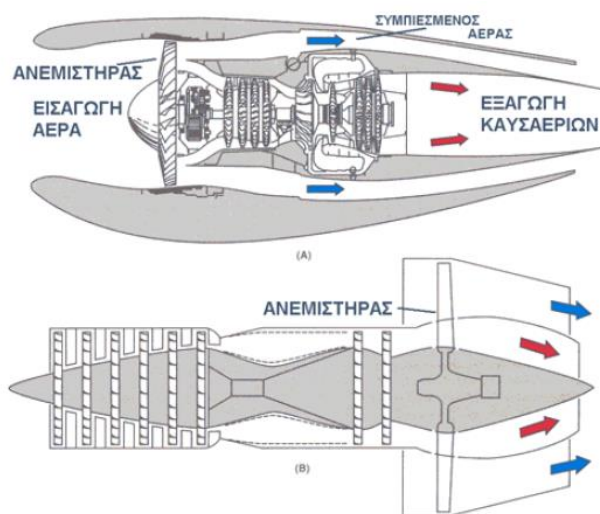


T55 TURBOSHAFT ENGINE
ALLIEDSIGNAL ENGINES

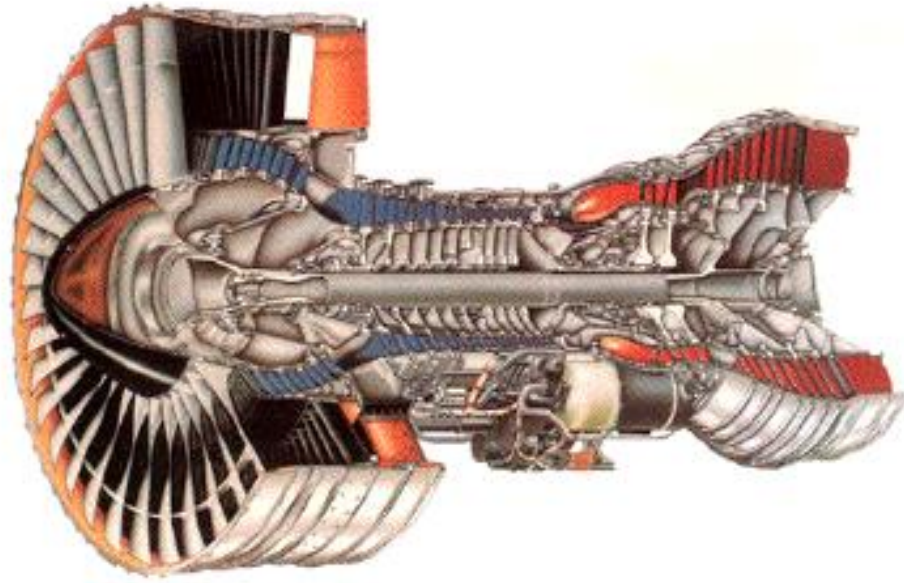
Εικ.10 Τομή αξονοστρόβιλου κινητήρα [8]

2.3.4 Στροβιλοανεμιστήρας - Turbofan engine

Ο στροβιλοανεμιστήρας είναι μια παραλλαγή του στροβιλοαντιδραστήρα και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό βήμα στην εξέλιξη των αεριοστροβίλων [Εικ.12]. Συνδυάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα του στροβιλοαντιδραστήρα και του ελικοστρόβιλου. Ο στροβιλοανεμιστήρας διέπεται από τις ίδιες αρχές λειτουργίας με έναν ελικοστρόβιλο με τον έλικα ή στη συγκεκριμένη περίπτωση τον ανεμιστήρα (Fan) να βρίσκεται μέσα στο σώμα του κινητήρα [Εικ.11].



Εικ.11 Θέσεις ανεμιστήρα στον στροβιλοανεμιστήρα [8]



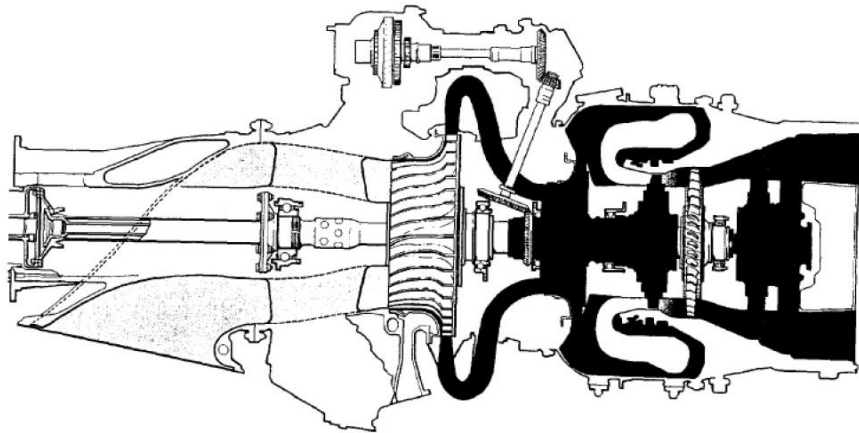
Εικ.12 Στροβιλοανεμιστήρας σε τομή [8]

Κεφάλαιο 3

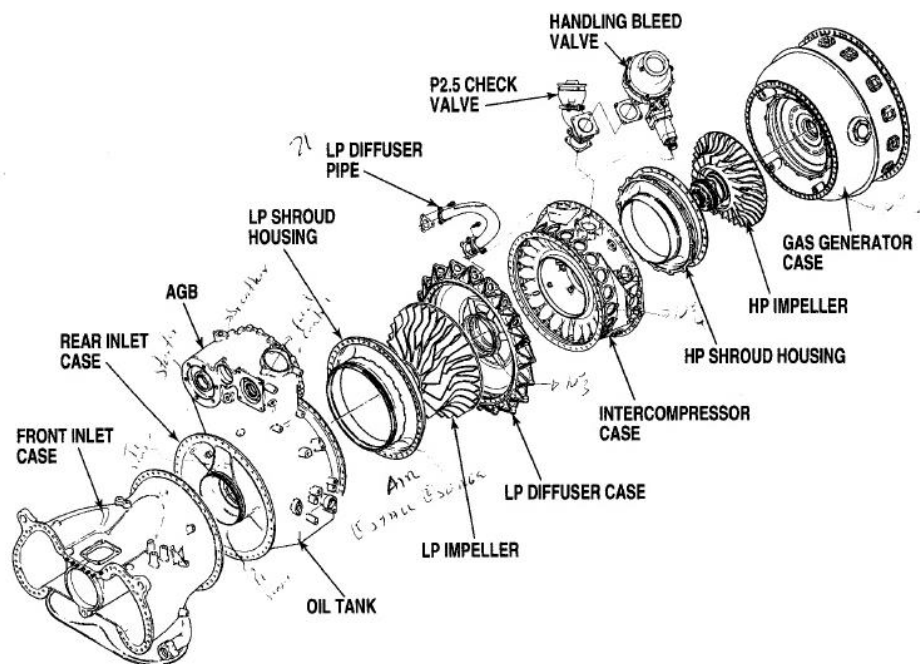
Ο κινητήρας PW123AF

3.1 Ψυχρό τμήμα κινητήρα PW123AF

Αποτελείται από την εισαγωγή, δύο φυγοκεντρικούς συμπιεστές υψηλής και χαμηλής πίεσης μαζί με τις αντίστοιχες σωληνώσεις για την καθοδήγηση του εισερχόμενου αέρα. Σκοπός του είναι η αναρρόφηση μεγάλων ποσοτήτων αέρα και η αύξηση της πίεσης του ώστε να οδηγηθεί στο θάλαμο καύσης. Η τομή του ψυχρού τμήματος φαίνεται στην Εικ.13, ενώ τα εξαρτήματα που το αποτελούν παρουσιάζονται αναλυτικά στην Εικ.14.



Εικ.13 Τομή ψυχρού τμήματος κινητήρα [11]

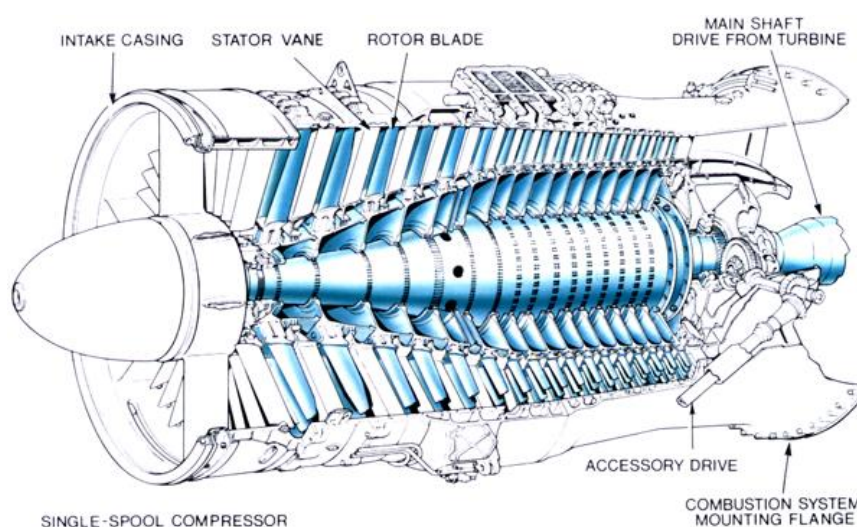


Εικ.14 Εξαρτήματα ψυχρού τμήματος του κινητήρα. [11]

3.2 Συμπιεστής

3.2.1 Λειτουργία

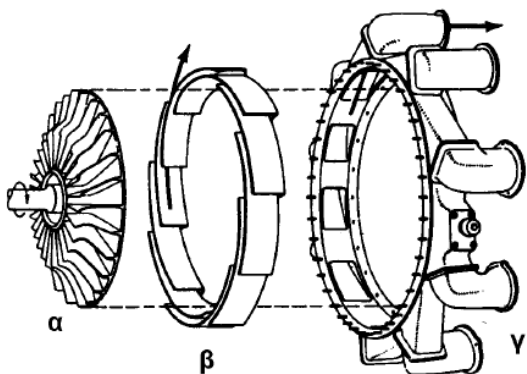
Η παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας ώσης συνδέεται άμεσα με την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα. Ο συμπιεστής είναι η διάταξη που παρέχει σε έναν αεριοθούμενο κινητήρα τις απαραίτητες ποσότητες αέρα [Εικ.15]. Η λειτουργία του είναι να συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα ώστε κατά την έξοδό του από τον συμπιεστή να έχει πολλαπλάσια πυκνότητα από την αρχική. Το αποτέλεσμα είναι ο κινητήρας να διαχειρίζεται πολύ μεγάλες ποσότητες αέρα αναλογικά με τον μικρό του όγκο. Οι σύγχρονοι συμπιεστές έχουν λόγο συμπίεσης που ξεπερνά το 30:1 και οι ταχύτητες του αέρα κατά τη συμπίεση φτάνουν τα 150-200m/sec. [8]



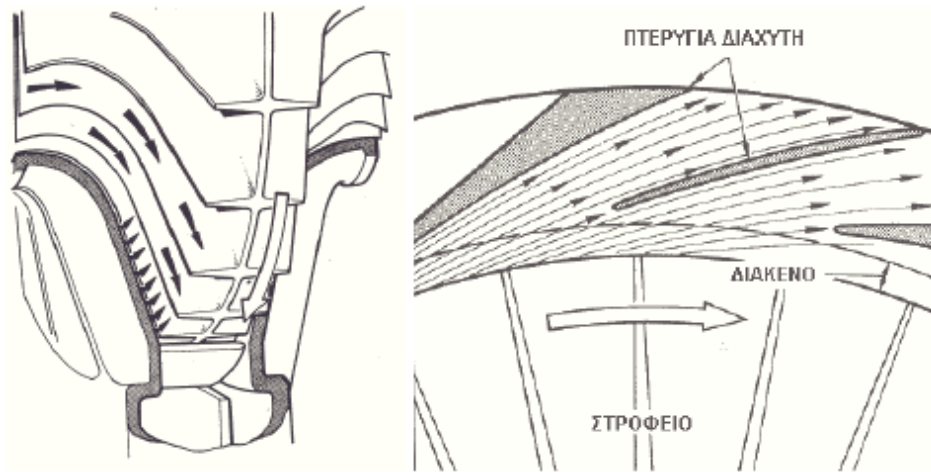
Εικ.15 Τομή τμήματος συμπιεστή αεριοθούμενου κινητήρα

3.2.2 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής αποτελείται από τρία μέρη [Εικ.16]: τον πτερυγιοφόρο δίσκο (στροφείο, ρότορας, impeller), τον διαχύτη (diffuser) και στις περισσότερες περιπτώσεις την πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής (manifold) του συμπιεσμένου αέρα στο επόμενο τμήμα του κινητήρα. Ο αέρας αναρροφάται λόγω της υποπίεσης που αναπτύσσεται από την περιστροφή του στροφείου και των πτερυγίων που αυτό φέρει. Η κίνηση του στροφείου πραγματοποιείται από το στρόβιλο μέσω του κοινού άξονα [Εικ.17]. Ο συμπιεσμένος αέρας έπειτα οδηγείται από τους διαχύτες στην πολλαπλή σωλήνωση, που με τη σειρά της τον κατευθύνει στο θάλαμο καύσης. Το στροφείο είναι συνήθως κατασκευασμένο από κράματα αλουμινίου αλλά και τιτανίου. [8]



Εικ.16 Τα μέρη του φυγοκεντρικού συμπιεστή: α) το στροφείο, β) ο διαχύτης, γ) η πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής [8]



Εικ.17 Συνεργασία του στροφείου με τον διαχύτη [8]

3.2.3 Αξονικοί συμπιεστές

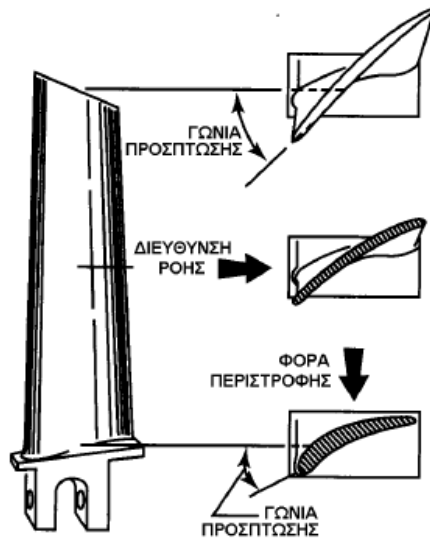
Ο αξονικός συμπιεστής (axial flow compressor) αποτελείται από δύο κύρια τμήματα: Τον ρότορα (rotor) που είναι περιστρεφόμενος, και τον στάτορα (stator) που είναι σταθερός. Ο ρότορας αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο πάνω στον οποίο είναι προσαρμοσμένα τα κινητά πτερύγια (blades). Ο στάτορας είναι συνήθως διαιρεμένος σε ημικυκλικά τμήματα και στο εσωτερικό τους είναι τοποθετημένα τα σταθερά πτερύγια (vanes). Μια σειρά κινητών πτερυγίων με τα ακολουθούμενα σταθερά αποτελεί μία βαθμίδα. Οι αξονικοί συμπιεστές είναι πολυβάθμιοι και ανάλογα με το μέγεθος και την απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα, οι βαθμίδες αυξάνονται.[8]

Στους πολυβάθμιους αξονικούς συμπιεστές μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο της ασταθούς ροής στα πτερύγια των αρχικών βαθμίδων και πτώση της απόδοσης των βαθμίδων που εργάζονται στις πιο υψηλές πιέσεις. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων διαιρείται ο συμπιεστής σε τμήματα, δύο ή και τρία, το κάθε ένα από τα οποία συνδέεται με ομόκεντρους κοίλους άξονες με το αντίστοιχο τμήμα του στροβίλου. Έτσι επιτυγχάνονται διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής στα διάφορα τμήματα του συμπιεστή, διατηρώντας τη ταχύτητα του αέρα κατά μήκος του συμπιεστή σταθερή και τη πίεση αυξανόμενη. [8]

3.3 Πτερύγια συμπιεστή

3.3.1 Κινητά πτερύγια

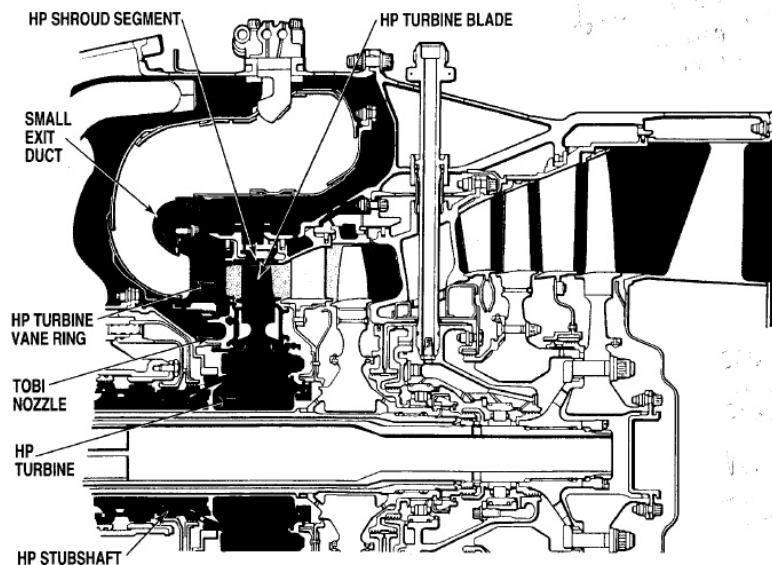
Τα κινητά πτερύγια έχουν σχήμα αεροτομής και μεταβλητή γωνία προσβολής (angle of incidence) ή συστροφή (twist), από τη ρίζα (root) ως το ακροπτερύγιο (tip) [Εικ.18]. Η συστροφή επιτυγχάνει υψηλότερη πίεση στο ακροπτερύγιο έτσι ώστε να εξισορροπείται η διαφορά της ταχύτητας κατά μήκος του πτερυγίου, που οφείλεται στην ακτίνα καμπυλότητας. Το μήκος του πτερυγίου διαφοροποιείται ανάλογα με τη θέση που έχει κατά μήκος του συμπιεστή, με αυτά που βρίσκονται πιο κοντά στην εισαγωγή του κινητήρα να είναι μεγαλύτερα.[8]



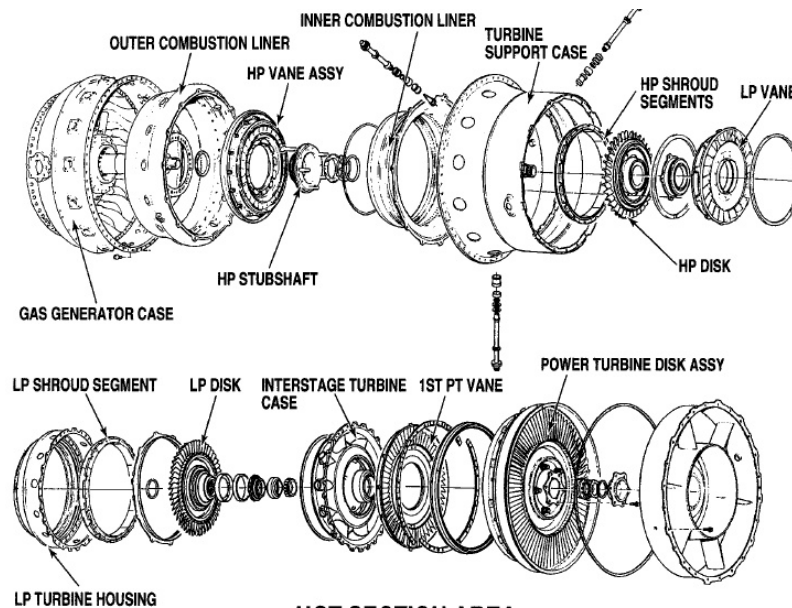
Εικ.18 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακροπτερυγίου.[8]

3.4 Θερμό τμήμα κινητήρα PW123AF

Το τμήμα αυτό [Εικ.19-20] αποτελείται από το θάλαμο καύσης, το στρόβιλο υψηλής πίεσης και τον αντίστοιχο χαμηλής, τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια. Εδώ πραγματοποιείται η ανάφλεξη του συμπιεσμένου μίγματος αέρα-καυσίμου με τα παραγόμενα καυσαέρια να οδηγούνται στα πτερύγια του στρόβιλου υψηλής πίεσης. Αυτός με τη σειρά του μέσω ενός άξονα δίνει κίνηση στον συμπιεστή υψηλής πίεσης και στον μειωτήρα στροφών των παρελκομένων του κινητήρα. Στη συνέχεια τα καυσαέρια οδηγούνται στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης και τέλος καταλήγουν στο τρίτο και τέταρτο στάδιο του συμπιεστή που αποτελούνται από τους δύο στρόβιλους ισχύος.



Εικ.19 Τομή θερμού τμήματος κινητήρα.[11]



Εικ.20 Αναλυτική παρουσίαση των εξαρτημάτων του θερμού τμήματος.[11]

3.5 Στρόβιλος

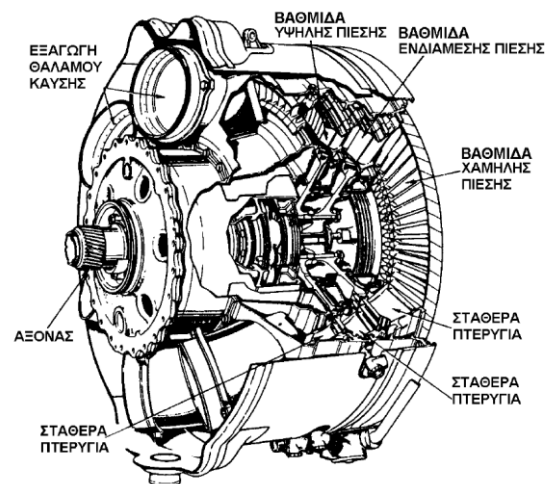
Ο στρόβιλος [Εικ.21] απορροφά ενέργεια από το ρεύμα των θερμών καυσαερίων, κατά την έξοδό τους από το θάλαμο καύσης, και τη μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια για την παραγωγή ισχύος ή ροπής για την κίνηση του συμπιεστή. Συμπληρωματικά, ο στρόβιλος εξασφαλίζει την κίνηση των παρελκομένων (accessories). Στον ελικοστρόβιλο και τον αξονοστρόβιλο κινητήρα, ο στρόβιλος δίνει κίνηση και στον έλικα. Η ισχύς που παρέχει ο στρόβιλος κατά τη λειτουργία του μπορεί να πάρει τιμές της τάξης των 50.000 Hp.

Τα εξερχόμενα από τον θάλαμο καύσης καυσαέρια εκτονώνουν την κινητική τους ενέργεια στις βαθμίδες του στροβίλου μετατρέποντας τη σε κινητική ενέργεια και ισχύ. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο ένα πτερύγιο στροβίλου μπορεί να παράξει ισχύ 250 Hp. Η διεργασία της μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανική ισχύ λαμβάνει χώρα σε πολύ περιορισμένο χώρο κατά μήκος του στροβίλου. Επίσης, αξιοσημείωτες είναι οι θερμοκρασίες λειτουργίας στην είσοδο του στροβίλου, οι οποίες μπορούν να φτάσουν και τους 1650°C. Όπως ο συμπιεστής, και ο στρόβιλος απαντάται σε μονοβάθμιο και πολυβάθμιο. [8]

Η βαθμίδα του στροβίλου αποτελείται από:

- Μία σειρά **σταθερών πτερυγίων (vanes)**, γνωστά και ως στάτορας ή στάτης (stator), τα οποία ακολουθούνται από
- Μία σειρά **κινητών πτερυγίων (blades)**, γνωστά και ως ρότορας (rotor) ή στροφέο.

Γενικά, ο στρόβιλος [Εικ.22] αποτελείται από:



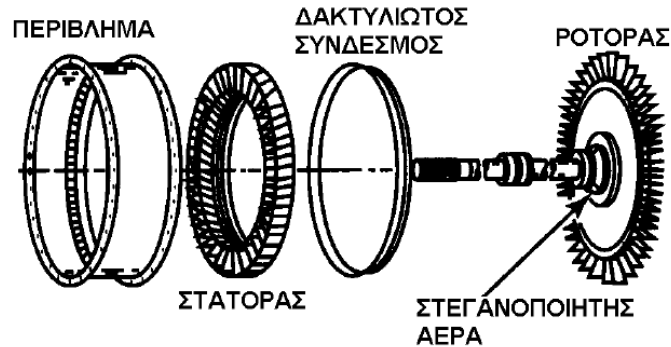
Εικ.21 Στρόβιλος και τα κύρια εξαρτήματα του [8]

- Το **περίβλημα (casing)**, το οποίο περιβάλλει το στάτορα και το ρότορα. Συνήθως, φέρει φλάντζες στα δύο του άκρα για τη σύνδεση του τμήματος του στροβίλου με τα τμήματα του θαλάμου καύσης και του ακροφυσίου εξαγωγής.

- Το **στάτορα**

- Το **δακτύλιο (shroud)**, που τοποθετείται στην εσωτερική και εξωτερική περιφέρεια των σταθερών πτερυγίων του στάτορα

- Το **ρότορα**.

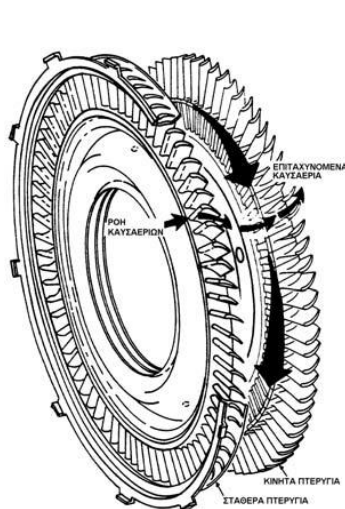


Εικ.22 Κύρια μέρη στροβίλου [8]

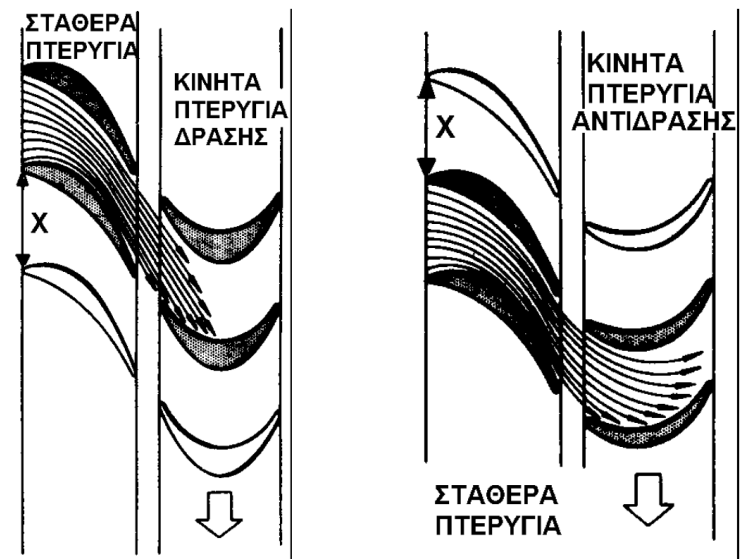
3.6 Πτερύγια ρότορα

Η διατομή της περιοχής μεταξύ δύο διαδοχικών κινητών πτερυγίων του στροβίλου μειώνεται προς το χείλος εκφυγής τους. Έτσι, η ροή των καυσαερίων επιταχύνεται, με παράλληλη μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας τους, και οι συνθήκες γίνονται κατάλληλες για την παραγωγή έργου. Μία βαθμίδα στροβίλου κατηγοριοποιείται ανάλογα με το ποσό της ενέργειας που μετατρέπεται στα σταθερά και τα κινητά πτερύγια [Εικ.23] [8]. Διακρίνουμε:

- Το στρόβιλο δράσης ή σταθερής πίεσης (impulse turbine) [Εικ.24α],
- Το στρόβιλο αντίδρασης (reaction turbine) [Εικ.24β], και
- Το συνδυασμό τους (impulse – reaction turbine).



Εικ.23 Σταθερά και κινητά πτερύγια στροβίλου [8]



Εικ.24 Ροή σε α) στρόβιλο δράσης και σε β) στρόβιλο αντίδρασης [8]

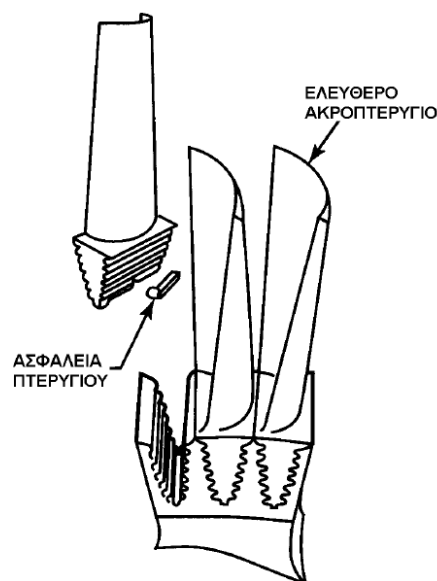
Στην πρώτη κατηγορία βαθμίδας, τα σταθερά πτερύγια μετατρέπουν τη δυναμική ενέργεια των καυσαερίων σε κινητική. Στη συνέχεια, τα καυσαέρια συναντούν τα κινητά πτερύγια με μεγάλη ταχύτητα. Η περιστροφή του στροφείου του ρότορα επιτυγχάνεται από την ορμή που αποκτούν τα κινητά πτερύγια, τα οποία προκαλούν την αλλαγή της διεύθυνσης της ροής των καυσαερίων κρατώντας την πίεσή τους σχεδόν σταθερή. Αυτό οφείλεται στο ότι η διατομή εισόδου και εξόδου μεταξύ δύο διαδοχικών κινητών πτερυγίων, σε αυτήν την περίπτωση, διατηρείται σταθερή [8].

Στο στρόβιλο αντίδρασης η εκτόνωση των καυσαερίων πραγματοποιείται τόσο στα σταθερά όσο και στα κινητά πτερύγια. Κατά τη δίοδο των καυσαερίων από τα σταθερά πτερύγια της βαθμίδας, συμβαίνουν τα ίδια φαινόμενα όπως και στο στρόβιλο δράσης, σε μικρότερη ένταση όμως. [8]

3.7 Στοιχεία κινητών πτερυγίων

Τα πτερύγια του ρότορα είναι χυτά ή σφυρήλατα. Όπως και αυτά που βρίσκονται στον στατορα, έτσι και τα κινητά πτερύγια υπόκεινται στις ίδιες θερμικές καταπονήσεις. Η διαφορά είναι ότι τα κινητά πτερύγια λόγω της περιστροφής τους καταπονούνται από υψηλά φυγοκεντρικά φορτία. Μέταλλα όπως κράματα Τιτανίου έχουν καλή συμπεριφορά και αντοχή στις θερμικές καταπονήσεις παρουσιάζουν, όμως, μεγάλη δυσκολία στη μορφοποίηση και κατεργασία τους. Αυτή τους η αδυναμία οδήγησε στην ανάπτυξη χυτών κραμάτων νικελίου με χρώμιο, κοβάλτιο, αλουμίνιο, τιτάνιο και μολυβδένιο, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κινητών πτερυγίων. Τα πτερύγια περνούν και από ειδική θερμική κατεργασία (heat treatment) μετά τη χύτευσή τους, ώστε να αποκτήσουν την επιθυμητή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασιακές και μηχανικές καταπονήσεις. [8]

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την καλή λειτουργία του ρότορα είναι ο τρόπος της σύνδεσης των κινητών πτερυγίων στην περιφέρεια του δίσκου [Εικ.25]. Η ρίζα του πτερυγίου πρέπει να έχει ανοχή όταν τοποθετηθεί στο δίσκο του στροφείου. Σκοπός της ύπαρξης αυτής της ανοχής είναι εύκολη η τοποθέτηση και η αφαίρεση τους καθώς και η την απορρόφηση των θερμικών διαστολών. Σε συνθήκες λειτουργίας τα κενά των ανοχών καλύπτονται. Στη πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο δίσκος φέρει στην περιφέρειά του υποδοχές σε σχήμα ελάτου (fir tree). Ανάλογη διατομή έχει και η βάση του κινητού πτερυγίου. Η στήριξη επιτυγχάνεται με πείρους, ασφαλιστικούς κοχλίες ή παρεμβύσματα. Αυτού του είδους οι συναρμογές, προϋποθέτουν μεγάλη κατασκευαστική ακρίβεια, ώστε να υπάρχει ισορροπία στην κατανομή των τάσεων στα δύο μέρη. [8]



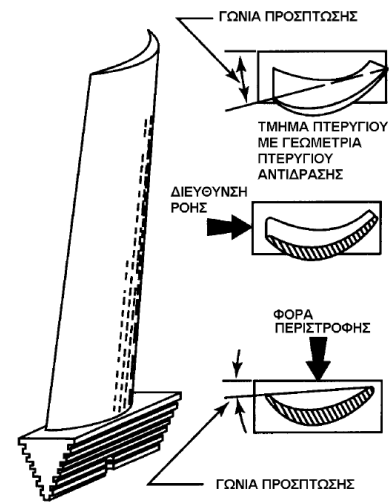
Εικ.25 Συναρμογή πτερυγίου [8]

Οι αντίξοες συνθήκες κατά τις οποίες λειτουργούν τα πτερύγια, κινητά ή σταθερά απαιτούν την ύπαρξη ψύξης ώστε να προστατεύονται από πρόωρη φθορά. Το εσωτερικό των πτερυγίων είναι κοίλο και υπάρχουν δίοδοι για την κυκλοφορία ψυχρού αέρα ο οποίος παρέχεται από τον συμπιεστή του κινητήρα. Διάφορες γεωμετρικές και μεθοδολογίες εφαρμόζονται στα πτερύγια,

αλλά και στο δίσκο του ρότορα, των αεριοστρόβιλων κινητήρων για να επιτευχθεί η βέλτιστη παροχή ψύξης. [8]

3.7.1 Χαρακτηριστικά πτερυγίων

- 1) Γωνία πρόσπτωσης ακροπτερυγίου (tip).
- 2) Γωνία πρόσπτωσης βάσης.
- 3) Βάρος.
- 4) Είδος στερέωσης στο δίσκο (fir tree, dove tail ή με πείρο ασφαλείας).
- 5) Μέθοδος ψύξης.



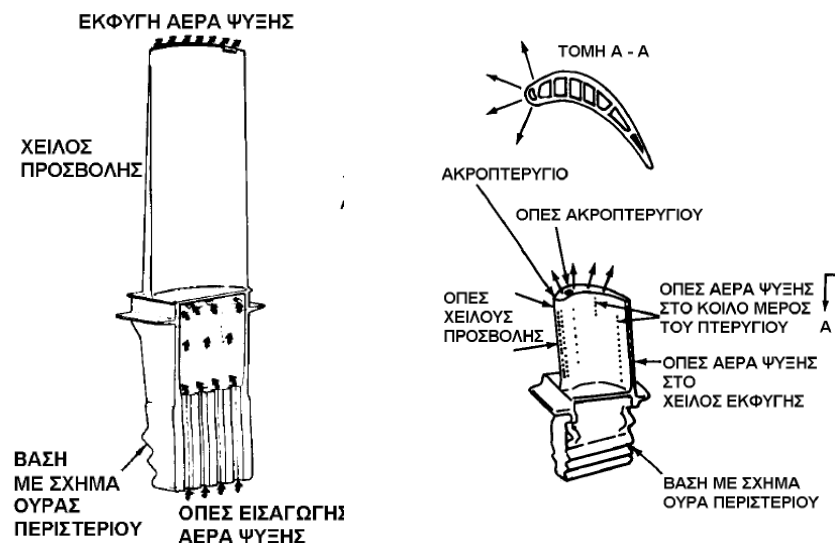
Εικ.26 Χαρακτηριστικά πτερυγίου [8]

3.8 Ψύξη πτερυγίων

Για να είναι δυνατή η λειτουργία η του στροβίλου του κινητήρα σε όσο το δυνατόν υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι ψύξης των πτερυγίων [Εικ. 27]. Στους κινητήρες αεροσκαφών η ψύξη επιτυγχάνεται με αέρα που προέρχεται από την έξοδο του συμπιεστή. Η ψύξη εφαρμόζεται τόσο σε σταθερά όσο και σε κινητά πτερύγια. Τα είδη ψύξης πτερυγίων με αέρα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

α) **Εσωτερική** ψύξη στην οποία θερμότητα απάγεται με συναγωγή από αέρα που ρέει στο εσωτερικό του πτερυγίου,

β) **Εξωτερική** ψύξη στην οποία έχουμε και πάλι απαγωγή θερμότητας από τον αέρα στο εσωτερικό του πτερυγίου, όμως η αποτελεσματικότητα της ψύξης οφείλεται κυρίως στο ότι δημιουργείται ένα στρώμα (film) αέρα στην επιφάνεια του πτερυγίου, που μειώνει σημαντικά την μετάδοση θερμότητας από τα καυσαέρια προς τα τοιχώματα του πτερυγίου. [12]



Εικ.27 Διάφορες μέθοδοι ψύξης πτερυγίου στροβίλου [8]

Κεφάλαιο 4

Κατασκευή πτερυγίων

4.1 Υλικά κατασκευής πτερυγίων

Η αναγνώριση της αντοχής στον ερπυσμό ως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του υλικού των πτερυγίων, η κατανόηση του φαινομένου του ερπυσμού και οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις από τους αεροπορικούς κινητήρες να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες οδήγησε στην ανάπτυξη σφυρήλατων κραμάτων με αυξημένη περιεκτικότητα σε αλουμίνιο και τιτάνιο. Τα προβλήματα όμως στην κατεργασία και διαμόρφωση τέτοιων κραμάτων οδήγησε στην ανάπτυξη χυτών κραμάτων με βάση το Νικέλιο.

Η σύνθεση των χυτών κραμάτων μπορούσε να προσαρμοστεί για να επιτευχθεί υψηλότερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς δεν υπήρχε η ανάγκη διαμόρφωσης του εξαρτήματος. Επίσης τα εξαρτήματα εμφάνιζαν υψηλότερη αντοχή στις θερμικές καταπονήσεις λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των κόκκων τους.

Τα κινητά πτερύγια του στροβίλου πρέπει να αντέχουν στον συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών, τάσεων που ασκούνται αλλά και τις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας του κινητήρα. Ειδικότερα τα πτερύγια της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου, όπως αυτό που εξετάζουμε, πρέπει να εμφανίζουν αυξημένη αντοχή σε θερμή οξείδωση και διάβρωση. Με την πάροδο του χρόνου αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι χύτευσης των κραμάτων των πτερυγίων. [13]

4.2 Διαδικασία κατασκευής

Συνήθως τα πτερύγια των στροβίλων είναι κατασκευασμένα με τη μέθοδο της χύτευσης με επένδυση. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τη δημιουργία αρνητικού καλουπιού με το σχήμα του πτερυγίου, το οποίο γεμίζεται με κερί που παίρνει το σχήμα του εξαρτήματος. Αν το πτερύγιο είναι αεριζόμενο τότε τοποθετείται κεραμικός πυρήνας στο σχήμα των εσωτερικών διόδων στο κέντρο. Έπειτα το κέρινο πτερύγιο καλύπτεται από ειδικό πυρίμαχο καλούπι το οποίο γεμίζεται με το κράμα κατασκευής του πτερυγίου. Έπειτα τα πτερύγια δέχονται την επικάλυψη της θερμικής προστασίας και αν χρειάζονται ανοίγονται οπές ψύξης, συνήθως με κοπή laser.

4.2.1 Συμβατική equiaxed διαδικασία χύτευσης

Ένα από τα πρώτα κράματα που καθιερώθηκε ως κατάλληλο για την κατασκευή πτερυγίων στροβίλου ήταν το IN-713. Οι προσπάθειες βελτιστοποίησης της αντοχής των πτερυγίων σε ερπυσμό οδήγησε σε κράματα όπως το IN-100 και το Rene100. Η προσθήκη πυρίμαχων ενισχυτικών όπως το W(Βολφράμιο) και το Mo(Μολυβδένιο) οδήγησε στη κατασκευή των MAR-M200, MAR-M246, IN-792, M22. Η προσθήκη 2 wt% Hf βελτίωσε την ολκιμότητα και μια σειρά νέων κραμάτων προέκυψε, όπως MAR-M200+Hf και Rene125+Hf. Στον πίνακα 1 φαίνονται τα κυριότερα υπερκράματα συμβατικής χύτευσης. [13]

Grade designation	Chemical composition
IN 713	74.2Ni12.5Cr4.2Mo2Nb0.8Ti6.1Al0.1Zr0.12C0.01B
IN 100	60.5Ni10Cr15Co3Mo4.7Ti5.5Al0.06Zr0.18C0.014B
Rene 100	62.6Ni9.5Cr15Co3Mo4.2Ti5.5Al0.06Zr0.15C0.015B
MAR-M200	59.5Ni9Cr10Co12.5W1.8Nb2Ti5Al0.05Zr0.15C0.015B
MAR-M246	59.8Ni9Cr10Co2.5Mo10W1.5Ta1.5Ti5.5Al0.05Zr0.14C0.015B
IN 792	60.8Ni12.7Cr9Co2Mo3.9W3.9Ta4.2Ti3.2Al0.1Zr0.21C0.02B
M 22	71.3Ni5.7Cr2Mo11W3Ta6.3Al0.6Zr0.13C
MAR-M200+Hf	Ni8Cr9Co12W2Hf1Nb1.9Ti5.0Al0.03Zr0.13C0.015B
MAR-M246+Hf	Ni9Cr10Co2.5Mo10W1.5Hf1.5Ta1.5Ti5.5Al0.05Zr0.15C0.015B
Rene 41	56Ni19Cr10.5Co9.5Mo3.2Ti1.7Al0.01Zr0.08C0.005B
Rene 77	53.5Ni15Cr18.5Co5.2Mo3.5Ti4.25Al0.08C0.015B
Rene 80	60.3Ni14Cr9.5Co4Mo4W5Ti3Al0.03Zr0.17C0.015B
Rene 80+Hf	59.8Ni14Cr9.5Co4Mo4W0.8Hf4.7Ti3Al0.01Zr0.15C0.015B
IN 738	61.5Ni16Cr8.5Co1.75Mo2.6W1.75Ta0.9Nb3.4Ti3.4Al0.04Zr0.11C0.01B
Udimet 700	59Ni14.3Cr14.5Co4.3Mo3.5Ti4.3Al0.02Zr0.08C0.015B
Udimet 710	54.8Ni18Cr15Co3Mo1.5W2.5Ti5Al0.08Zr0.13C
TMD-103	59.8Ni3Cr12Co2Mo6W5Re6Ta0.1Hf6Al

Πίνακας 1 Υπερκράματα Νικελίου συμβατικής χύτευσης [13]

4.2.2 Χυτά πτερυγία κράματος κατευθυνόμενης στερεοποίησης (*Directional Solidification*)

Ο κύριος μηχανισμός αστοχίας των πτερυγίων ήταν η δημιουργία κοιλοτήτων στα εγκάρσια όρια των κόκκων. Μέσω της κατευθυνόμενης στερεοποίησης μπορούσαν να εξαλειφθούν τα εγκάρσια όρια των κόκκων, που αποτελούσε ένα μεγάλο βήμα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των εξαρτημάτων αυτών. Η χρήση αυτής της τεχνικής χύτευσης μπορούσε να βελτιώσει την αντοχή των πτερυγίων και 14°C σε σχέση με αυτά που είχαν κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους.

Στις αρχές της δεκαετίας του 80' τα κράματα κατευθυνόμενης στερεοποίησης ήταν διαθέσιμα και πλήρως λειτουργικά στους κινητήρες των αεροσκαφών. Στον πίνακα 2 φαίνονται τα κυριότερα υπερκράματα κατευθυνόμενης στερεοποίησης. Ένα από αυτά ήταν το DS MAR-M200+Hf. Ένα άλλο ήταν το CM247LC, το οποίο ήταν αποτέλεσμα προσπάθειας για τη βελτιστοποίηση της χημικής σύνθεσης που θα επέφερε βελτίωση της μικροδομής των καρβιδίων, της αντοχής των ορίων των κόκκων σε ρωγμές και την αποφυγή έκλυσης HfO₂ (οξείδιο του Χαφνίου). [13]

Grade designation	Chemical composition	Remarks
DS MAR M-200+Hf	59.5Ni9Cr10Co12.5W2Hf1.8Nb2Ti5Al0.05Zr0.15C0.015B	First generation
CM247LC	61.7Ni8.1Cr9.2Co0.5Mo9.5W3.2Ta1.4Hf0.7Ti5.6Al0.01Zr0.07C0.015B	First generation
PWA1422	59.2Ni9Cr10Co12W1.5Hf1Nb2Ti5Al0.1Zr0.14C0.015B	First generation
DMD4	66.8Ni2.4Cr4Co5.5W6.5Re8Ta1.2Hf0.3Nb5.2Al0.07C0.01B	Third generation

Πίνακας 2 Υπερκράματα Νικελίου με κατευθυνόμενη στερεοποίηση [13]

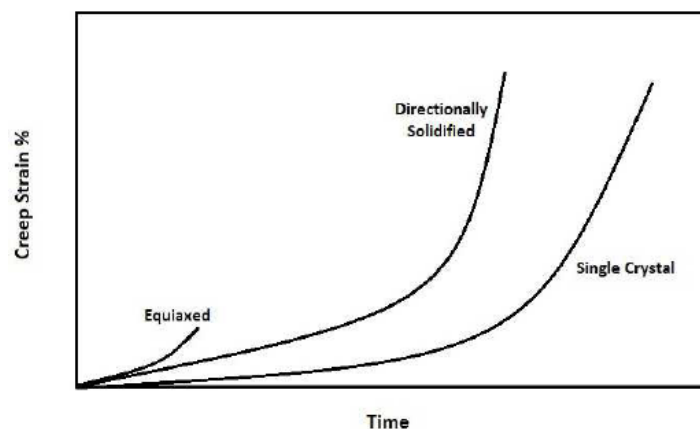
4.2.3 Χυτά πτερύγια μονοκρυσταλλικού κράματος

Στα μονοκρυσταλλικά χυτεύματα δεν υπάρχουν όρια κόκκων στη μικροδομή. Ένας κρύσταλλος με ελεγχόμενο προσανατολισμό κατασκευάζεται σε σχήμα πτερυγίου. Στη μονοκρυσταλλική δομή δεν απαιτείται η ύπαρξη ενισχυτικών στοιχείων όπως C, B, Zr, Hf. Η εξάλειψη αυτών των στοιχείων και ο κατάλληλος σχεδιασμός του κρυστάλλου βοήθησαν στην αύξηση της θερμοκρασίας τήξης του κράματος και αντίστοιχης αύξησης της αντοχής σε θερμοκρασίες. Στην Εικ. 28 φαίνεται η σύγκριση της παραμόρφωσης από ερπυσμό μεταξύ πτερυγίων μονοκρυσταλλικού κράματος, πτερυγίων κράματος κατευθυνόμενης στερεοποίησης και πτερυγίων συμβατικής χύτευσης.

Τα πρώτα μονοκρυσταλλικά υπερκράματα ήταν το RR2000, RR2060 της Rolls Royce, το PWA1480 της Pratt and Whitney, το CMSX2 και CMSX3 της Cannon Muskegon και το ReneN4 της General Electric. Αυτά τα μονοκρυσταλλικά κράματα είχαν σχεδόν 20°C ,θερμοκρασίας μετάλλου, πλεονέκτημα από τα υπάρχοντα DS.

Η ανάπτυξη των μονοκρυσταλλικών κραμάτων με χρήση στους αεροπορικούς κινητήρες δε σταμάτησε εκεί. Δημιουργήθηκαν νέα κράματα με ακόμα πιο βελτιωμένες ιδιότητες και αντοχές στις υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά ήταν τα δεύτερης γενιάς όπως το PWA1484 και το CMSX4 που είχαν πλεονέκτημα έως και 30°C, θερμοκρασίας μετάλλου, έναντι σε αυτά της πρώτης γενιάς. Πολλά από αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Η έρευνα συνεχίστηκε με στόχο τη αύξηση της ικανότητας των κραμάτων κατά ακόμα 30°C και ταυτόχρονα τη βελτίωση της αντοχής στις οποιεσδήποτε συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας. Το αποτέλεσμα της έρευνας ήταν κράματα όπως το CMSX10 ή το ReneN6. [13]

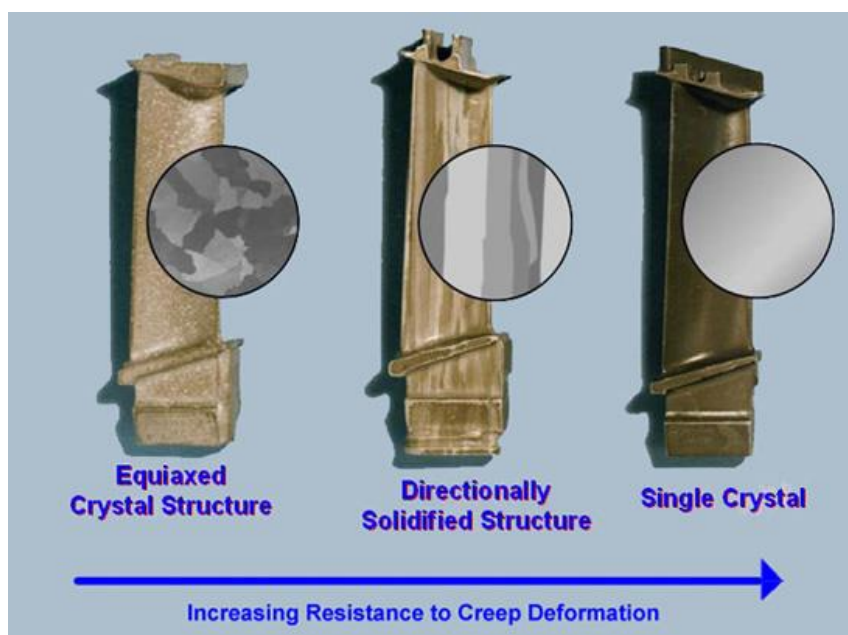


Εικ.28 Σχετική παραμόρφωση από ερπυσμό σε πτερύγια συμβατικής χύτευσης, DS και SC [13]

Generation	Grade designation	Chemical composition	Metal temperature capability °C
First	RR2000	62.5Ni10Cr15Co3Mo4Ti5.5Al1V	
	RR2060	63Ni15Cr5Co2Mo2W5Ta2Ti5Al	
	PW1480	62.5Ni10Cr5Co4W12Ta1.5Ti5Al	1060
	CMSX2	66.2Ni8Cr4.6Co0.6Mo8W6Ta1Ti5.6Al	
	CMSX3	66.1Ni8Cr4.6Co0.6Mo8W6Ta0.1Hf1Ti5.6Al	
	Rene N4	62Ni9.8Cr7.5Co1.5Mo6W4.8Ta0.15Hf0.5Nb3.5Ti4.2Al	
Second	PWA1484	59.4Ni5Cr10Co2Mo6W3Re9Ta5.6Al	1120
	CMSX4	61.7Ni6.5Cr9Co0.6Mo6W3Re6.5Ta0.1Hf1Ti5.6Al	
	Rene N5	63.1Ni7Cr7.5Co1.5Mo5W3Re6.5Ta0.15Hf6.2Al0.05C0.004b0.01Y	
	TUT 92	68Ni10Cr1.2Mo7W0.8Re8Ta1.2Ti5.3Al	
Third to fifth	CMSX10	69.6Ni2Cr3Co0.4Mo5W6Re8Ta0.03Hf0.1Nb0.2Ti5.7Al	1135
	ReneN6	57.3Ni4.2Cr12.5Co1.4Mo6W5.4Re7.2Ta0.15Hf5.8Al0.05C0.004B	1110
	TMS 75	59.9Ni3Cr12Co2Mo6W5Re6Ta0.1Hf6Al	1115
	TMS 80	58.2Ni2.9Cr11.6Co1.9Mo5.8W4.9Re5.8Ta0.1Hf5.8Al0.5B3.0Ir	
	MC-NG	70.3Ni4Cr<0.2Co1Mo5W4Re5Ta0.1Hf0.5Ti6Al4.0Ru	
	DMS4	67Ni2.4Cr4Co5.5W6.5Re9Ta0.1Hf0.3Nb5.2Al	1140
	TMS 196	59.7Ni4.6Cr5.6Co2.4Mo5.0W6.4Re5.6Ta0.1Hf5.6Al5.0Ru	1150

Πίνακας 3 Μονοκρυσταλλικά υπερκράματα νικελίου που χρησιμοποιούνται στους αεροκινητήρες [13]

Η διαφορά στη μικροδομή τριών πανομοιότυπων πτερυγίων, ανάλογα τον τρόπο χύτευσης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 29.



Εικ.29 Μικροδομή πτερυγίων συμβατικής χύτευσης, DS και SC [14]

Κεφάλαιο 5

Επιστρώσεις (coatings)

Εξαιτίας της ανάγκης να μπορούν τα πτερύγια να λειτουργούν σε διαρκώς αυξανόμενες θερμοκρασίες και σε πολύ επιθετικό περιβάλλον, είναι δύσκολο να κατασκευαστούν υπερκράμματα που έχουν την απαραίτητη αντοχή σε ερπυσμό και την απαιτούμενη αντοχή σε διάβρωση και οξειδωση. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν επιστρώσεις στην επιφάνεια των πτερυγίων ώστε να προσφέρουν την απαραίτητη προστασία. Η επίστρωση λειτουργεί σαν ‘δεξαμενή’ στοιχείων που θα σχηματίσουν προσκολλημένα στρώματα οξειδίων στην επιφάνεια του πτερυγίου, προστατεύοντας έτσι το υλικό που βρίσκεται από κάτω, από οξειδωση, διάβρωση και τελικά υποβάθμιση.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι επίστρωσης:

- Οι επιστρώσεις αλουμινιδίων (Aluminide coatings)
- Οι επιστρώσεις επικάλυψης (Overlay coatings)
- Οι επιστρώσεις θερμικού φραγμού (Thermal barrier coatings, TBCs)

Οι επιστρώσεις αλουμινιδίων είναι ο πιο συχνός τύπος που χρησιμοποιείται για την προστασία των κραμάτων από το περιβάλλον. Ένα εξωτερικό στρώμα αλουμινιδίων (CoAl ή NiAl) με αυξημένη αντοχή στην οξειδωση δημιουργείται από την αντίδραση αργυλίου Al με το Ni/Co του κράματος. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται πολύ λεπτά στρώματα ευγενών μετάλλων όπως ο λευκόχρυσος, που έχουν την ιδιότητα να βελτιώνουν την αντοχή των αλουμινιδίων της επίστρωσης. Τουλάχιστον ένα από τα κύρια συστατικά στις επιστρώσεις αλουμινιδίων, κυρίως το νικέλιο, προσφέρεται από το βασικό μέταλλο του κράματος.

Αντίθετα σε μια επίστρωση επικάλυψης όλα τα συστατικά της παρέχονται από την ίδια την επικάλυψη. Το πλεονέκτημα σε αυτόν τον τύπο επικάλυψης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη γκάμα συστατικών ανθεκτικών στη διάβρωση και στην οξειδωση για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της επίστρωσης. Επίσης δεν περιορίζεται το πάχος της επίστρωσης από παράγοντες της διαδικασίας. Οι επιστρώσεις επικάλυψης αναφέρονται συνήθως ως, MCrAlY, όπου το M αναφέρεται στο Ni ή στο Co ή στο Ni+Co. Η συμμετοχή του ύτριου Y στην αντίδραση βελτιώνει την αντίσταση σε διάβρωση. Οι επιστρώσεις κυρίως γίνονται με τη διαδικασία του vacuum plasma spray. Για να ομογενοποιηθεί η επίστρωση και να διασφαλιστεί η προσκόλληση στην επιφάνεια του κράματος πραγματοποιείται θερμή κατεργασία στου 1040 με 1120°C.

Οι επιστρώσεις θερμικού φραγμού (TBCs) προσφέρουν αρκετή προστασία στα υπερκράμματα ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες έως και 150°C υψηλότερα από τα συνηθισμένα τους όρια. Οι επιστρώσεις αυτές είναι κεραμικές και βασίζονται σε $ZrO_2 - Y_2O_3$ και τοποθετούνται με plasma spraying. [13]

Κεφάλαιο 6

Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

6.1 Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) είναι ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων για τα οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμες αναλυτικές λύσεις. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η προσέγγιση του πεδίου ορισμού του προβλήματος και η διαίρεση του σε έναν αριθμό πλεγμάτων. Κάθε πλέγμα είναι συνδεδεμένο με κόμβους και ο συνδυασμός αυτών αποτελεί ένα πεπερασμένο στοιχείο. [15]

Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών. [15]

6.2 Ιστορική αναδρομή

Αν και ακριβής χρονικός προσδιορισμός της ανακάλυψης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι δύσκολο να υπάρξει, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτή η μέθοδος προέκυψε από την ανάγκη να λυθούν πολύπλοκα προβλήματα δομικής ανάλυσης και ελαστικότητας. Πρώιμες μορφές της μεθόδου μπορούμε να βρούμε στα έργα των A.Hrennikoff και R.Courant, αλλά και αργότερα στα έργα του K.Feng. Αν και οι μέθοδοι των πρωτοπόρων αυτών διαφέρουν, μοιράζονται ένα κοινό στοιχείο: τη διάσπαση ενός ενιαίου επιπέδου σε μικρότερα διακριτά επίπεδα, τα αναφερόμενα ως στοιχεία.





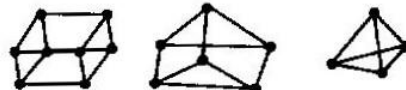
Η μεγάλη ώθηση στη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων προήλθε από τις εργασίες των I.Αργύρη, W.Clough, E.Hinton, τη δεκαετία του '60, καθώς και αργότερα με τις δημοσιεύσεις των Strang και Fix. Έκτοτε η μέθοδος απόκτησε ευρεία χρήση σε όλους τους τομείς της μηχανικής.

6.3 Ανάλυση

Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η διαχείριση οποιασδήποτε μορφής γεωμετρίας ενός αντικειμένου, κατασκευασμένο από οποιοδήποτε υλικό, ένα ή περισσότερα, όλων των οριακών συνθηκών και των συνολικών φορτίσεων στις οποίες αυτό υπόκειται. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνει μια προσεγγιστική λύση, επιλύοντας γνωστές εξισώσεις στα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία στοιχεία έχουμε διαιρέσει το αντικείμενο και στη συνέχεια συνθέτει τις επιμέρους λύσεις για τη λύση του αρχικού προβλήματος.

Ο χρήστης είναι εκείνος που πρέπει να επιλέξει τι είδους θα είναι τα στοιχεία που θα χρησιμοποιήσει για να ενώσει τους κόμβους που θα ορίσει στο μοντέλο. Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα πέντε κύρια είδη στοιχείων. Είναι δυνατή και η χρήση συνδυασμού των στοιχείων για την επίλυση του προβλήματος. Για τη μοντελοποίηση μονοδιάστατων τμημάτων ενός

προβλήματος, τα στοιχεία θα είναι μίας διάστασης. Τα δισδιάστατα στοιχεία είναι τρίγωνα (3 με 10 κόμβους) ή τετράπλευρα (4 με 12 κόμβους), ενώ επίσης μπορούν να βοηθήσουν στην μοντελοποίηση τόσο 2D σωμάτων, όσο και $2 \frac{1}{2} D$. [16]

Διάσταση	Είδος στοιχείου	Γεωμετρία
Σημείο	Μάζα	
Γραμμή	Ελατήριο, δέσμη, ράβδος, διάκενο, στρέψη	
Επιφάνεια	Ομογενές 2D, αξονοσυμμετρικό, επίπεδο κέλυφος	
Καμπύλη επιφάνεια	Κέλυφος	
Όγκος	Ομοιογενής 3D	

Πίνακας 4 Η γεωμετρία των βασικών στοιχείων [16]

Τα τρισδιάστατα στοιχεία χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση στερεών 3D σωμάτων. Σε ένα τρισδιάστατο πλέγμα οι εξωτερικοί κόμβοι χωρίζονται σε γωνιακούς και ενδιάμεσους. Οι πρώτοι ορίζουν το στοιχείο, ενώ οι δεύτεροι αποδίδουν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη γεωμετρία του στοιχείου. Όλα τα στοιχεία ενός προγράμματος βρίσκονται στη βιβλιοθήκη στοιχείων του. Απώτερος στόχος είναι η ανάλυση των σωμάτων με όσο είναι δυνατό απλούστερα στοιχεία και λιγότερους κόμβους, ώστε να προκύψει ένα σύστημα μικρότερου μεγέθους. [16]

Μέχρι την τελική επεξεργασία του μοντέλου με τα πεπερασμένα στοιχεία, προέχει η επεξεργασία των εξής σταδίων:

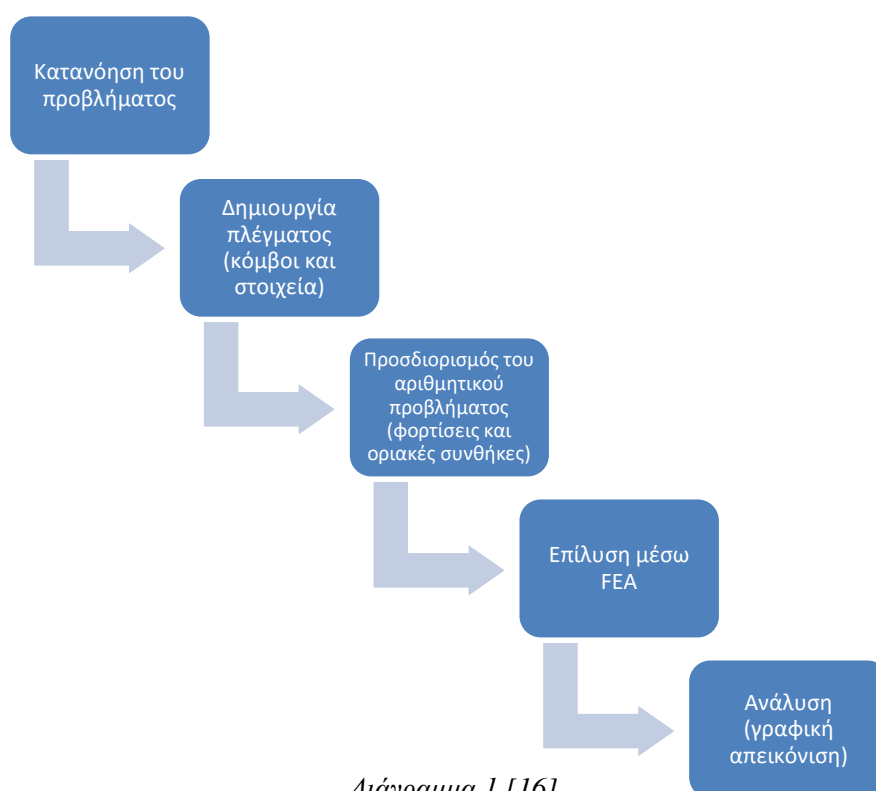
- Ο τύπος της ανάλυσης (στατική, δυναμική, θερμική, κ.α.)
- Το είδος του υλικού κατασκευής και κατ' επέκταση των ιδιοτήτων του όπως το μέτρο Young, ο λόγος Poisson, η θερμική αγωγιμότητα και άλλα. Επίσης ιδιότητα του υλικού αποτελεί και το πάχος του κελύφους.
- Η δημιουργία των κόμβων. Η σύνδεση αυτών των σημείων θα οδηγήσει στη δημιουργία των στοιχείων.
- Η δημιουργία των στοιχείων, τα οποία πρέπει να εφάπτονται. Το σύνολο αυτών αποτελούν το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Όσο πιο πυκνό είναι ένα πλέγμα, τόσο πιο ακριβής θα είναι η ανάλυση, αλλά με μειονέκτημα το μεγάλο χρόνο υλοποίησης.
- Η εφαρμογή των οριακών συνθηκών και των φορτίων. Για παράδειγμα το φορτίο μπορεί να είναι σημειακό ή κατανεμημένο. [16]

6.4 Επίλυση

Η επίλυση χωρίζεται στα εξής στάδια:

- Προσέγγιση της επίλυσης στο επίπεδο του στοιχείου. Μέσω ενός πολυωνύμου στο κάθε στοιχείο προσεγγίζεται η παράμετρος, η οποία μπορεί να είναι μία τιμή (π.χ. θερμοκρασία) ή ένα διάνυσμα.
- Δημιουργία πινάκων στοιχείων και εξισώσεων. Οι πίνακες κάθε στοιχείου (π.χ. μάζα) αναπτύσσονται με τη χρήση διαφόρων μεθόδων. Το μέγεθος των πινάκων επηρεάζεται από το είδος του στοιχείου και από τη ζητούμενη ανάλυση. Για παράδειγμα σε ένα πρόβλημα αποτελούμενο από τρισδιάστατα στοιχεία με 20 κόμβους ανά διάσταση, οι εξισώσεις για την επίλυση φτάνουν τις 24.000.
- Ανάπτυξη του ολικού συστήματος εξισώσεων. Εδώ έχουμε την πρόσθεση των εξισώσεων κάθε στοιχείου και τη δημιουργία του τελικού πίνακα και του συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων.
- Επίλυση για την ζητούμενη παράμετρο στους κόμβους. Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων επιλύεται με τη μέθοδο Gauss. Οι τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν στους κόμβους, ορίζουν την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων του αρχικού προβλήματος.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται γραφικά. Πολύ σημαντικό ρόλο στην όλη διαδικασία, ώστε να έχουμε μία αποτελεσματική ανάλυση με έγκυρα αποτελέσματα παίζει ο καθορισμός των σωστών στοιχείων, η διαίρεση των πεπερασμένων στοιχείων και ο ορισμός των οριακών συνθηκών και των φορτίων. Μετά την επίλυση είναι δυνατή η αλλαγή σε παραμέτρους, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση του τελικού αντικειμένου. [16]

Σε γενικές γραμμές τα βήματα που ακολουθεί ο μηχανικός φαίνονται στο διάγραμμα 1:



Διάγραμμα 1 [16]

Κεφάλαιο 7

Αντίστροφη σχεδίαση (Reverse engineering)

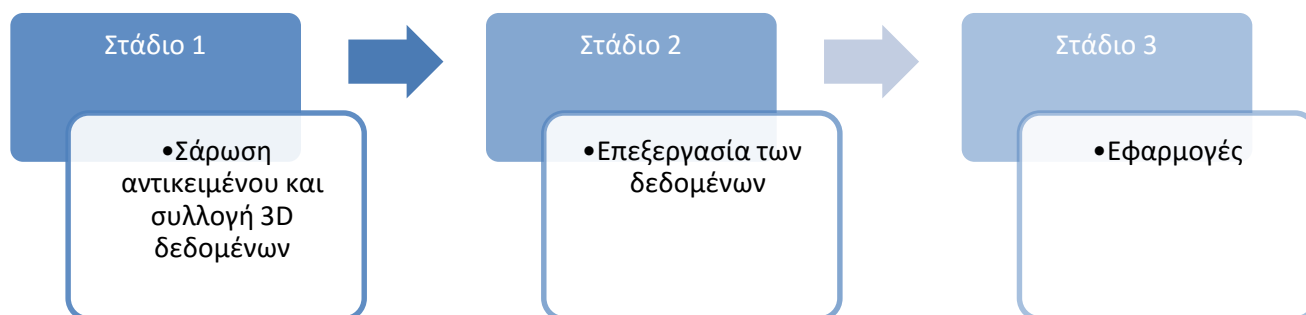
7.1 Εισαγωγή

Η αντίστροφη σχεδίαση ξεκίνησε ως μία διαδικασία επανασχεδίασης ή αντιγραφής προϊόντων. Πρώτο βήμα αποτελεί η παρατήρηση του προϊόντος και η δοκιμή του. Στη συνέχεια αναλύονται τα χαρακτηριστικά των επιμέρους εξαρτημάτων του, αλλά και η συνολική διαδικασία παραγωγής του. Απώτερος στόχος είναι η πλήρης κατανόηση του προϊόντος και ο τρόπος λειτουργίας του. [16]

Οι κύριοι λόγοι χρήσης της αντίστροφης σχεδίαση είναι οι εξής [16]:

- Η παραγωγή του αντικειμένου έχει διακοπεί, αλλά υπάρχει ζήτηση για αυτό.
- Μελέτη ενός προϊόντος το οποίο έχει αποσυρθεί.
- Δεν υπάρχουν τα πρωτότυπα σχέδια και έγγραφα του αντικειμένου.
- Ποιοτικός έλεγχος ενός αντικειμένου.
- Εξάλειψη ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών του αντικειμένου.
- Ανάλυση των χαρακτηριστικών ενός ανταγωνιστικού προϊόντος.
- Βελτίωση της διαδικασίας παραγωγής και εισαγωγή νέων μεθόδων.
- Ψηφιοποίηση ιστορικών εκθεμάτων όπως π.χ. αγάλματα.
- Μοντελοποίηση εμφυτευμάτων και ανθρώπινων μελών για ιατρικές εφαρμογές, προσαρμοσμένων σε κάθε ασθενή.

Τα γενικά στάδια τα οποία αποτελούν την διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα 2:



Διάγραμμα 2 [16]

Στο πρώτο στάδιο λαμβάνει χώρα η επιλογή του τρόπου σάρωσης του αντικειμένου. Το αντικείμενο προετοιμάζεται κατάλληλα και στη συνέχεια εκτελείται η σάρωση, με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του να αποτυπωθούν σωστά. Η διαδικασία της σάρωσης εκτελείται με τρισδιάστατους σαρωτές, οι οποίοι χωρίζονται σε αυτούς με αισθητήρα αφής και σε σαρωτές οπτικής σάρωσης χωρίς επαφή.

Στην πρώτη περίπτωση παράδειγμα αποτελούν οι εργαλειομηχανές μέτρησης συντεταγμένων (coordinate measuring machine – CMM). Με την βοήθεια της ακίδας στην άκρη του βραχίονα της εργαλειομηχανής επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις της τάξης των $+0,01 - 0,02$ mm. Μειονέκτημα των εν λόγω συστημάτων αποτελεί η μεγάλη χρονική διάρκεια της διεργασίας.

Στη δεύτερη κατηγορία το σύστημα σάρωσης, το οποίο μπορεί να είναι είτε laser ή οπτικό, συλλέγει εκατοντάδες σημεία ώστε να ορίσει τη γεωμετρία του αντικειμένου. Η ακρίβεια αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των σημείων. Πλεονέκτημα των συγκεκριμένων συστημάτων αποτελεί η γρήγορη σάρωση μεγάλων και πολύπλοκων αντικειμένων. Ωστόσο παρουσιάζονται και κάποιοι περιορισμοί, όπως:

- Μικρότερη ακρίβεια, από CMM, $\pm 0,025$ έως $0,2$ mm.
- Όταν μία επιφάνεια είναι παράλληλη με τον άξονα του laser είναι δύσκολο να αποτυπωθεί χωρίς την παρέμβαση του χειριστή.
- Χρειάζεται προετοιμασία του αντικειμένου πριν τη σάρωση, με τοποθέτηση στρώματος πούδρας για να αποφευχθούν αντανάκλασεις από την πρόσπτωση του φωτός σε λαμπερές επιφάνειες.
- Για να αποτυπωθούν σωστά όλες οι επιφάνειες ενός πολύπλοκου αντικειμένου, συχνά θα πρέπει να επανατοποθετηθεί σε διάφορες θέσεις. [16]

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τη σάρωση και χωρίζεται σε δύο στάδια: Την επεξεργασία του νέφους σημείων και την επεξεργασία του πλέγματος. Σκοπός της επεξεργασίας του νέφους είναι η αφαίρεση του θορύβου, σημείων που δεν ανήκουν στο αντικείμενο και μείωση του συνολικού αριθμού των σημείων, με σκοπό την ομοιογενή πρόσθεση των πολλών σαρώσεων σε μία. Έτσι έχουμε ένα πρώιμο μοντέλο αποτελούμενο από τα ενωμένα σημεία, τα οποία μας οδηγούν στο πολυγωνικό μοντέλο. Σε δεύτερη φάση και στην επεξεργασία του πλέγματος, πάλι μέσω φίλτρων γίνεται προσπάθεια για την εξάλειψη του θορύβου, την εξομάλυνση των επιφανειών, την μείωση των αριθμών των πολυγώνων, με σκοπό την δημιουργία ενός τελικού μοντέλου. Για τη διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών προγραμμάτων όπως το Geomagic, κ.α. [16]

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο έχουμε το τελικό μοντέλο που ανάλογα για τι χρήση προορίζεται θα έχει και την ανάλογη μορφή.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων αντίστροφης μηχανικής είναι η δυνατότητα παράλληλης απεικόνισης τόσο του αρχικού νέφους σημείων, όσο και του ολοκληρωμένου αντικειμένου κάνοντας εφικτή τη γραφική απεικόνιση των αποκλίσεων. [16]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Εισαγωγή

Τα πτερύγια θεωρούνται το πιο σημαντικό μέρος ενός στροβίλου αφού χάρη σε αυτά είναι δυνατή η αξιοποίηση της ενέργειας που φέρουν τα καυσαέρια τα οποία βρίσκονται υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Χωρίς τα πτερύγια δεν θα υπήρχε ισχύς, ενώ ή παραμικρή αστοχία στο σύνολο αυτών θα οδηγούσε στη μείωση της απόδοσης και σε δαπανηρές επισκευές. Λαμβάνοντας αυτά υπόψιν πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια ανάλυσης ενός πτερυγίου που αποσύρθηκε. Το πτερύγιο, πρώτης βαθμίδας στροβίλου, ήταν τοποθετημένο σε ελικοστρόβιλο κινητήρα (turbo-prop), και πιο συγκεκριμένα στον 123AF της Pratt & Whitney με ισχύ 1686 kW, κινητήρα του γνωστού αεροσκάφους Canadair. Πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση δομής με τη βοήθεια του προγράμματος Inventor, ώστε να διακριβωθεί εάν η αστοχία οφείλεται στις δυνάμεις που ασκήθηκαν στο πτερύγιο. Φυσικά προηγήθηκε ο σχεδιασμός ενός 3D μοντέλου του πτερυγίου, καθώς και χημική ανάλυση ώστε να διαπιστωθεί το υλικό κατασκευής και ακολούθως οι ιδιότητες του. Τα σημεία στα οποία εμφανίστηκαν οι μεγαλύτερες τάσεις μέσω της προσομοίωσης ελέγχθηκαν σε μικροσκόπιο ώστε να εξακριβωθεί εάν έχουν δημιουργηθεί ρωγμές.

Κεφάλαιο 1

Σχεδιασμός πτερυγίου

Λόγω των πολλών λεπτομερειών, των μικρών διαστάσεων, της ιδιαίτερης γεωμετρίας του τεμαχίου και της αδυναμίας πρόσβασης σε Co-ordinate Measuring Machine (CMM) επιλέχθηκε η λύση του 3D scanning ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στην απεικόνισή του. Η διαδικασία σχεδιασμού του πτερυγίου πραγματοποιήθηκε στα γραφεία της PV Engineering.

1.1 Εξοπλισμός

SLS_2 Structured Light 3D Scanning System

Ανήκει στα συστήματα φωτογραμμετρίας και εκμεταλλεύεται την τεχνολογία του Structured Light, η οποία είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα γνωστό μοτίβο από pixels προβάλλεται σε ένα επίπεδο. Ο τρόπος με τον οποίο αυτά παραμορφώνονται όταν προσκρούονται σε αντικείμενα, επιτρέπουν στο σύστημα να υπολογίσει το βάθος και άλλες πληροφορίες σχετικά με τα αντικείμενα αυτά.

Το σύστημα [Εικ.1] αποτελείται από μία κάμερα με φακούς υψηλής ανάλυσης, ένα προτζέκτορα με ειδικούς φακούς για μεγάλο εύρος εστίασης, το αντίστοιχο λογισμικό για τον έλεγχο του συστήματος και την επεξεργασία του σχεδίου, οδηγούς για την κίνηση της κάμερας και του προτζέκτορα και τέλος το τρίποδο για τη σταθεροποίηση του εξοπλισμού.

Το εύρος του μεγέθους του αντικειμένου που μπορεί να σκανάρει το σύστημα κυμαίνεται από 60-500 mm ενώ η ακρίβεια μπορεί να φτάσει έως τα 0,06 mm. Η πυκνότητα του πλέγματος μπορεί να φτάσει ακόμα και το 1.200.000 ακμές ανά σάρωση. [21]



Εικ.1 Σύστημα φωτογραμμετρίας SLS_2

1.2 Διαδικασία

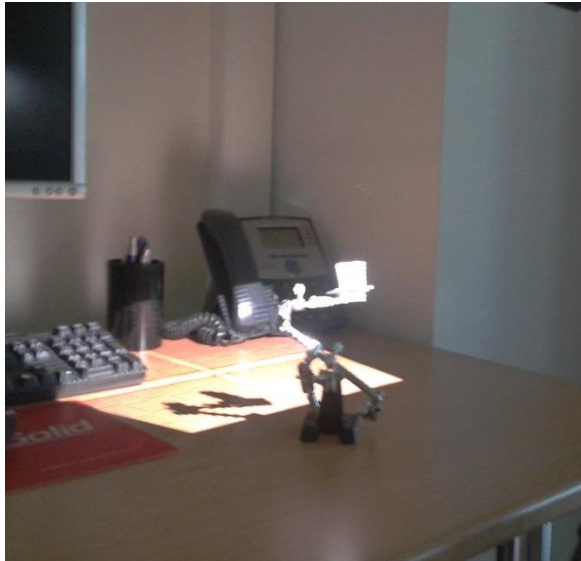
Αρχικά το τεμάχιο καθαρίστηκε με πεπιεσμένο αέρα και νερό ώστε να απομακρυνθούν όσο δυνατόν περισσότερες επικαθίσεις, ώστε να μην εμφανιστούν στην τρισδιάστατη απεικόνιση. Στη συνέχεια ψεκάστηκε στο κομμάτι σπρέι κιμωλίας [Εικ.2-3] ώστε να αποκτήσει άσπρη ματ υφή και να είναι ορατό από το σύστημα, και τοποθετήθηκε σε μία βάση.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 20 σαρώσεις [Εικ.4-5] περιμετρικά του τεμαχίου τα οποία με τη βοήθεια του λογισμικού David Pro edition 3, παραμετροποιήθηκαν ώστε να παρουσιαστεί ένα ακριβές τρισδιάστατο αντίγραφο. Πιο συγκεκριμένα υπήρχαν περιπτώσεις όπου έπρεπε να αφαιρεθεί μέρος της βάσης συγκράτησης που αναγκαστικά απεικονιζόταν στο τρισδιάστατο σχέδιο και ύστερα να τοποθετηθεί το ξανά μέρος του πτερυγίου στο υπόλοιπο σχέδιο.

Τέλος με τη βοήθεια του λογισμικού Geomagic πραγματοποιήθηκε διόρθωση του νέφους σημείων. Η όλη διαδικασία διήρκεσε περίπου 2 ώρες.



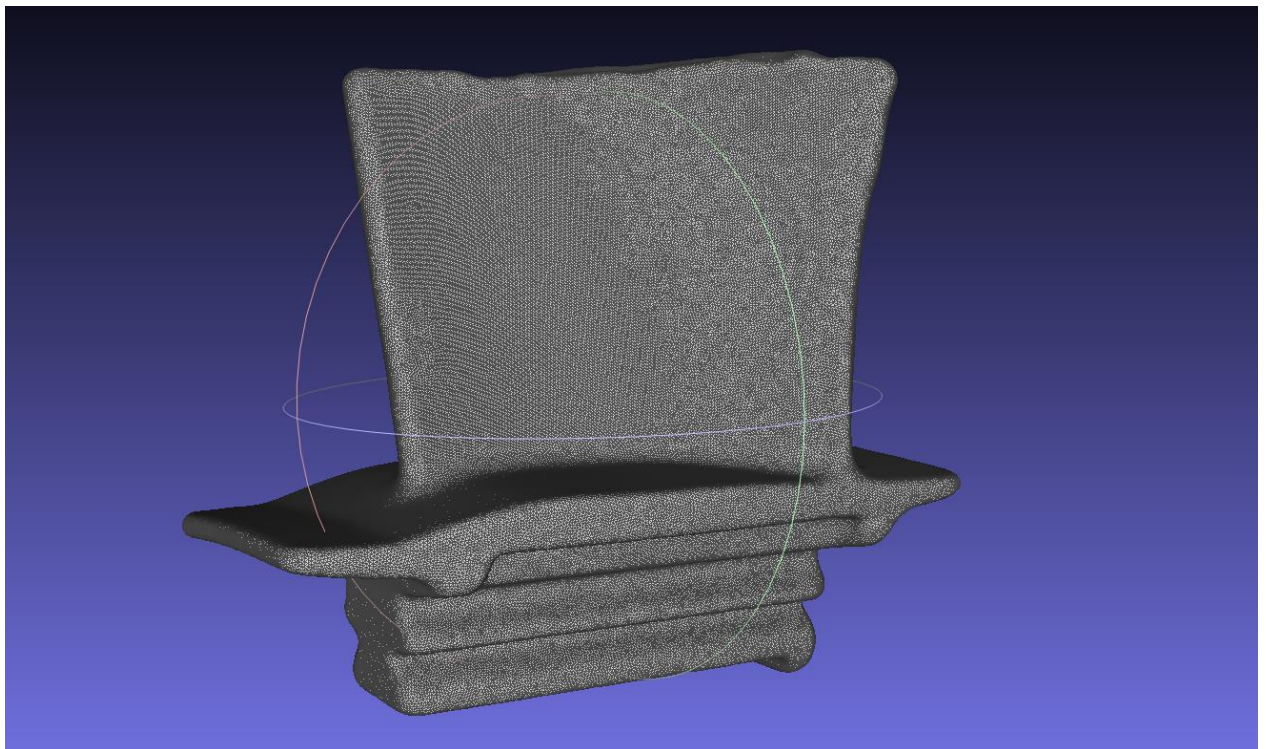
Εικ.2-3 Το πτερόγιο μετά από την τοποθέτηση της πούδρας κιμωλίας



Εικ.4-5 Σκανάρισμα του περνεγίου

1.3 Αποτέλεσμα

Το αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας είναι ένα τρισδιάστατο ακριβές αντίγραφο του περνεγίου, το οποίο αποτελείται από ένα πλέγμα σημείων [Εικ.6] που όμως δεν είναι παραμετροποιήσιμο.



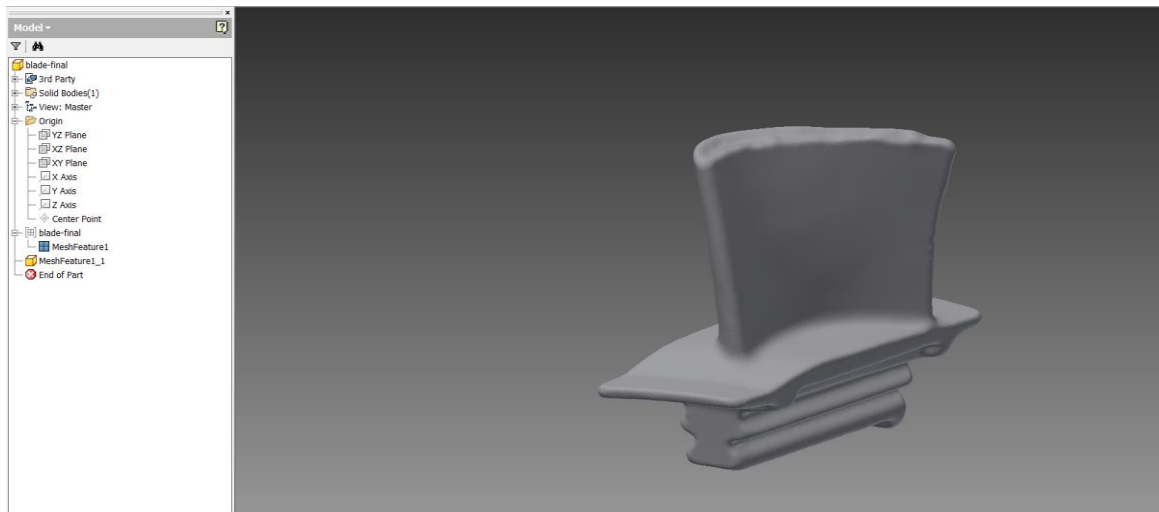
Εικ.6 Εμφάνιση περνεγίου ως πλέγμα σημείων

1.4 Μετατροπή του νέφους σημείων σε τρισδιάστατο (solid) αντικείμενο

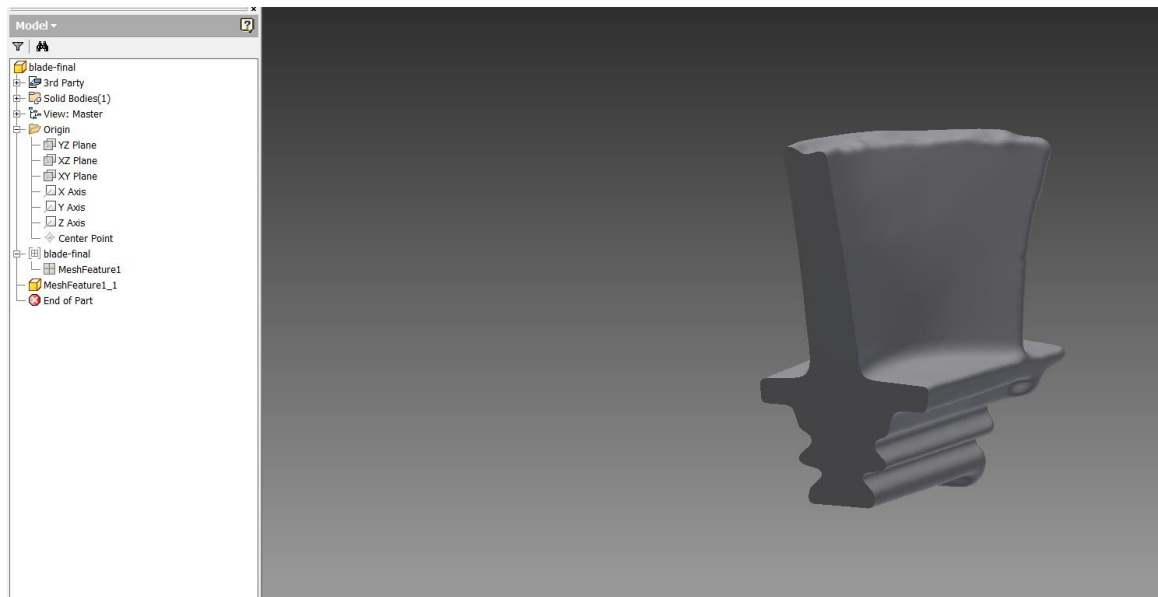
Το αποτέλεσμα της σάρωσης του πτερυγίου ήταν ένα νέφος σημείων, το οποίο για να καταστεί δυνατή η επεξεργασία μέσω λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων έπρεπε να μετατραπεί σε συμπαγές τρισδιάστατο αντικείμενο. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος Mesh Enabler, το οποίο ανήκει στις πρόσθετες εφαρμογές του Autodesk Inventor. Τα βήματα για την μετατροπή φαίνονται στις Εικ.7-9.



Εικ.7 Νέφος σημείων



Εικ.8 Δημιουργία solid μέσω του Mesh Enabler



Εικ.9 Τομή πτερυγίου

Κεφάλαιο 2

Χαρακτηριστικά πτερυγίου και συνθήκες λειτουργίας

2.1 Χαρακτηριστικά πτερυγίου

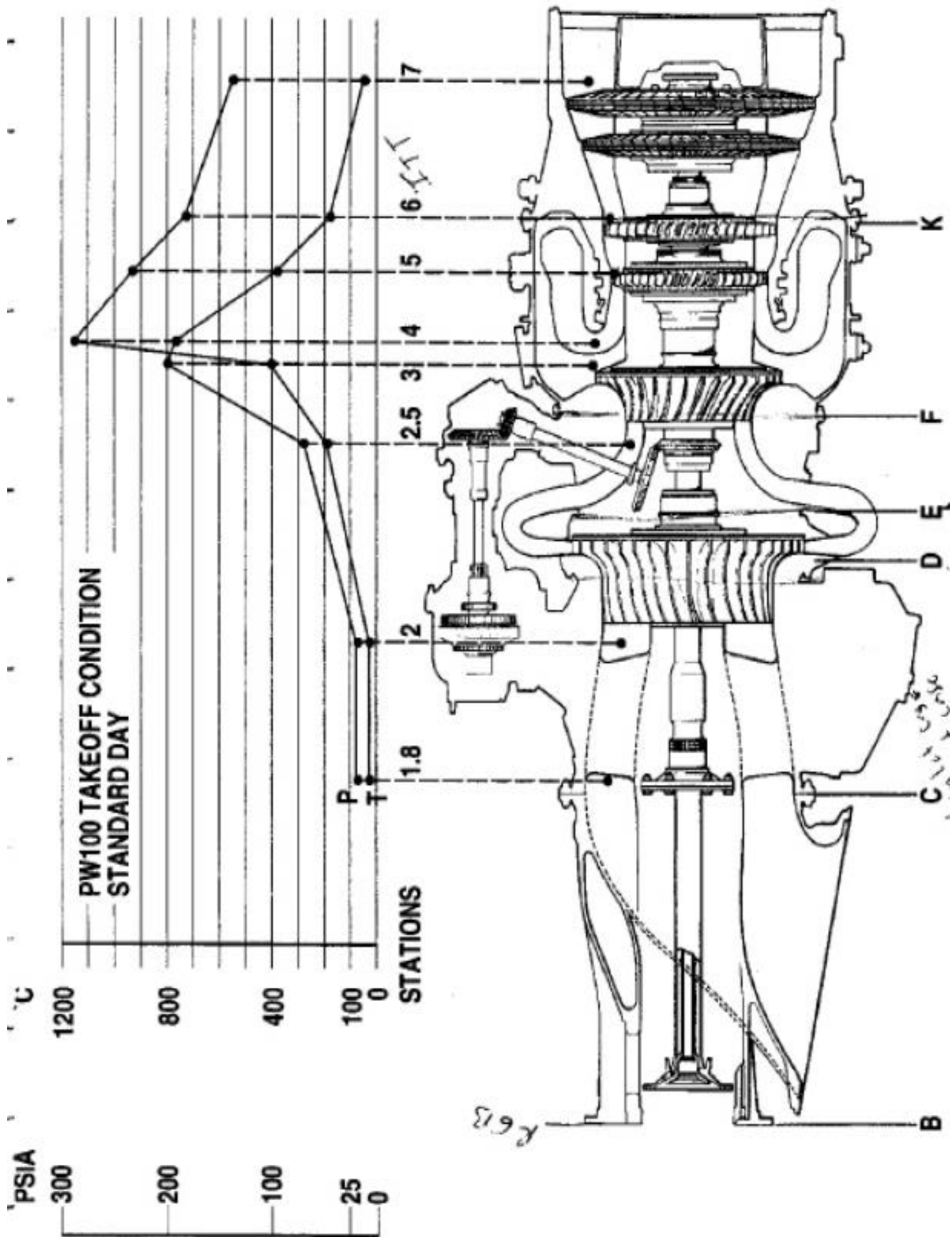
Η πρώτη βαθμίδα του στροβίλου αποτελείται από 38 αερόψυκτα κινητά πτερύγια τα οποία είναι σταθεροποιημένα στον δίσκο μέσω ρίζας σχήματος ελάτου (fir tree). Στα πτερύγια δε χρησιμοποιείται εξωτερικός υποστηρικτικός δακτύλιος (shroud).

Το συνολικό ύψος κάθε πτερυγίου είναι 35.09 mm ενώ το ύψος του ενεργού πτερυγίου είναι 21.11 mm. Το πλάτος της βάσης είναι 16.84 mm, ενώ το μήκος της αγγίζει τα 33.16 mm. Το βάρος κάθε πτερυγίου είναι 32 gr. Τέλος, η ακτίνα του ρότορα της πρώτης βαθμίδας όπου και είναι τοποθετημένα τα πτερύγια είναι 101.89 mm.

2.2 Συνθήκες λειτουργίας

Επειδή το πτερύγιο είναι τοποθετημένο στην πρώτη βαθμίδα, αμέσως μετά την έξοδο του θαλάμου καύσης, η θερμοκρασία βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Αντίθετα η πίεση των καυσαερίων τείνει να μειωθεί στο σημείο του στροβίλου. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1, στο σημείο 5 όπου και βρίσκεται η πρώτη βαθμίδα του στροβίλου, η θερμοκρασία ανέρχεται περίπου στους 900 - 930 °C, ενώ η πίεση βρίσκεται μεταξύ 90 – 100 Psi. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας, όπως αναμένεται, βρίσκεται στο θάλαμο καύσης, στο σημείο 4, και αγγίζει τους 1200 °C. Η μέγιστη τιμή της πίεσης βρίσκεται αμέσως μετά τον συμπιεστή υψηλής πίεσης, στο σημείο 3 και η τιμή της είναι κοντά στα 200 Psi.

Οι συνθήκες των παραπάνω σημείων, καθώς και των υπολοίπων σημείων του κινητήρα που φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα 1, είναι και οι δυσμενέστερες καθώς αφορούν τη λειτουργία του κινητήρα σε κατάσταση απογείωσης. Επειδή όμως ο συγκεκριμένος κινητήρας αφορά πυροσβεστικό αεροσκάφος, οι συνθήκες αυτές εμφανίζονται πιο συχνά, λόγω της απότομης αλλαγής ύψους του αεροσκάφους για προμήθεια και ρίψη νερού.



Διάγραμμα 1 Συνθηκες λειτουργίας PW123AF

Κεφάλαιο 3

Υπολογισμός δυνάμεων

3.1 Γενικά

Το πλήθος των φορτίων που ασκούνται σε ένα κινητό πτερύγιο στροβίλου είναι μεγάλο. Τέτοιες δυνάμεις είναι: Φυγοκεντρικές δυνάμεις, δυνάμεις που ασκούνται από τη ροή του καυσαερίου, από τους κραδασμούς του άξονα περιστροφής του ρότορα και άλλες.[5]

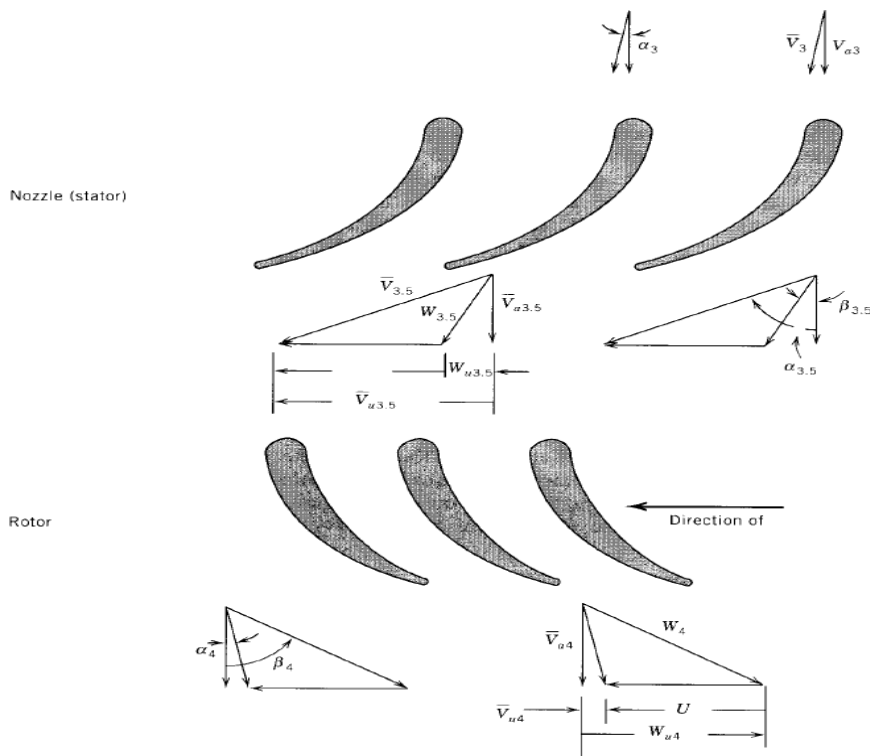
Στην έρευνα που πραγματοποιούμε εξετάζουμε τις φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται από την περιστροφή του ρότορα καθώς και την αξονική και περιφερειακή δύναμη που ασκείται στο πτερύγιο από τη ροή του καυσαερίου.

3.2 Υπολογισμός δυνάμεων καυσαερίων

Για να υπολογιστούν οι κάθετες και οι εφαπτομενικές δυνάμεις που ασκούνται στο πτερύγιο από τα καυσαέρια λόγω των στιγμιαίων αλλαγών της ροής και της διαφοράς πίεσης μεταξύ των πτερυγίων, είναι απαραίτητη η κατασκευή τριγώνων ταχυτήτων στην είσοδο και την έξοδο των πτερυγίων του ρότορα του στροβίλου.

Τα τρίγωνα ταχυτήτων ή αλλιώς διαγράμματα ταχυτήτων είναι ένα διανυσματικός τρόπος απεικόνισης των ταχυτήτων και των συνιστωσών τους. Στην πιο βασική μορφή του ένα τρίγωνο ταχυτήτων αποτελείται από τρεις ταχύτητες: την περιφερειακή ταχύτητα, την απόλυτη και τη σχετική. Πιο συγκεκριμένα:

Η V είναι η απόλυτη ταχύτητα με την οποία τα καυσαέρια εισέρχονται στα κινητά πτερύγια από τη προηγούμενη βαθμίδα σταθερών πτερυγίων. Η W είναι η σχετική ταχύτητα του καυσαερίου, μετά την επαφή του με το πτερύγιο και εκείνη που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, ο οποίος βρίσκεται στην μπροστινή ακμή της προς εξέταση κινητής σειράς πτερυγίων. Η περιφερειακή ταχύτητα συμβολίζεται ως W_u και αποτελεί συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας. Επίσης συνιστώσα ταχύτητα αποτελεί και η V_a , η οποία ονομάζεται αξονική. Οι ταχύτητες αυτές υπολογίζονται τόσο στην είσοδο του ρότορα, όσο και στην έξοδο. Όπως είναι φυσικό μεταξύ των διανυσμάτων των ταχυτήτων δημιουργούνται κάποιες γωνίες. Οι γωνίες μεταξύ των απόλυτων ταχυτήτων και της αξονικής κατεύθυνσης ονομάζονται απόλυτες. Αντίστοιχα Οι γωνίες μεταξύ των σχετικών ταχυτήτων και της αξονικής κατεύθυνσης ονομάζονται σχετικές. Η γραμμική περιστροφική ταχύτητα του πτερυγίου συμβολίζεται με U . Ένα γενικό παράδειγμα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 2.[17],[18]



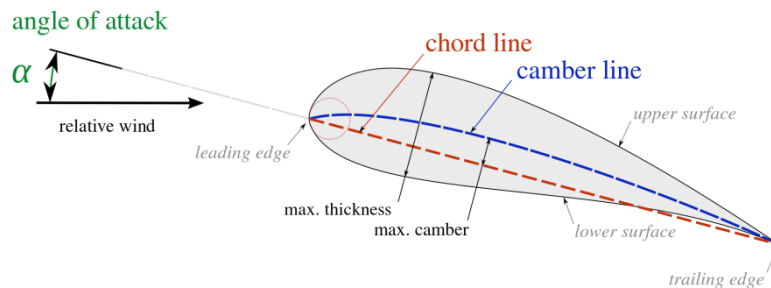
Διάγραμμα 2 Τρίγωνα ταχυτήτων σε μονοβάθμιο στρόβιλο [17]

Πιο συγκεκριμένα στο παραπάνω διάγραμμα 2 φαίνεται ένας μονοβάθμιος στρόβιλος αξονικής ροής.

Τα καυσαέρια εισέρχονται στα σταθερά πτερύγια (nozzles) με μία πίεση p_3 , σε θερμοκρασία T_3 και με ταχύτητα V_3 σε γωνία α_3 . Στη συνέχεια διαστέλλονται σε μία πίεση $p_{3.5}$, σε θερμοκρασία $T_{3.5}$, και οδηγούνται στα κινητά πτερύγια με απόλυτη ταχύτητα $V_{3.5}$ με γωνία $\alpha_{3.5}$.

Τα καυσαέρια εισέρχονται έπειτα στην κινητή σειρά πτερυγίων με σχετική ταχύτητα $W_{3.5}$ υπό γωνία $\beta_{3.5}$. Η γωνία εισόδου στο πτερύγιο του ρότορα επιλέγεται έτσι ώστε η γωνία $\beta_{3.5}$ να είναι εφαπτόμενη, ή όσο πιο κοντά γίνεται, στην γραμμή camber του πτερυγίου [Εικ.10]

Στη συνέχεια τα καυσαέρια φεύγουν, αφού κινήσουν το ρότορα, με πίεση p_4 , σε θερμοκρασία T_4 και με σχετική ταχύτητα W_4 με γωνία β_4 . Η απόλυτη ταχύτητα στην έξοδο του ρότορα είναι η V_4 και η απόλυτη γωνία εξόδου είναι η α_4 . [17]



Εικ.10 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά αεροτομής πτερυγίου

3.3 Αναλυτικός υπολογισμός αξονικής και περιφερειακής δύναμης με χρήση τριγώνων ταχυτήτων

$D = 203.79 \text{ mm}$ (διάμετρος δίσκου)

$N = 20000 \text{ rpm}$ (περιστροφική ταχύτητα δίσκου)

$V_1 = 450 \text{ m/s}$ (απόλυτη ταχύτητα εισόδου)

$V_2 = 270 \text{ m/s}$ (απόλυτη ταχύτητα εξόδου)

$\alpha_1 = 61.87^\circ$

$\beta_1 = 28.07^\circ$

$\alpha_2 = 21.20^\circ$

$\beta_2 = 52.17^\circ$

$\dot{m} = 6.83 \text{ kg/s}$ (ροή μάζας καυσαερίων)

Υπολογισμός γραμμικής ταχύτητας ρότορα:

$$U = \frac{\pi N D}{60} = \frac{\pi 20000 0.20379}{60} = 257.85 \text{ m/s}$$

Είσοδος ρότορα

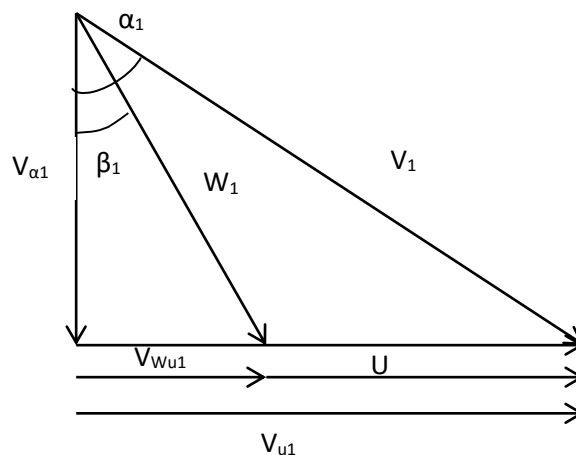
$$\gamma_1 = \alpha_1 - \beta_1 = 61.87 - 28.07 = 33.80^\circ$$

$$W_1 = \cos \gamma_1 V_1 = 373.94 \text{ m/s}$$

$$V_{\alpha 1} = \cos \beta_1 W_1 = 322.95 \text{ m/s}$$

$$W_{u1} = \sin \beta_1 W_1 = 175.96 \text{ m/s}$$

$$V_{u1} = \sin \alpha_1 V_1 = 396.84 \text{ m/s}$$



Εξοδος ρότορα

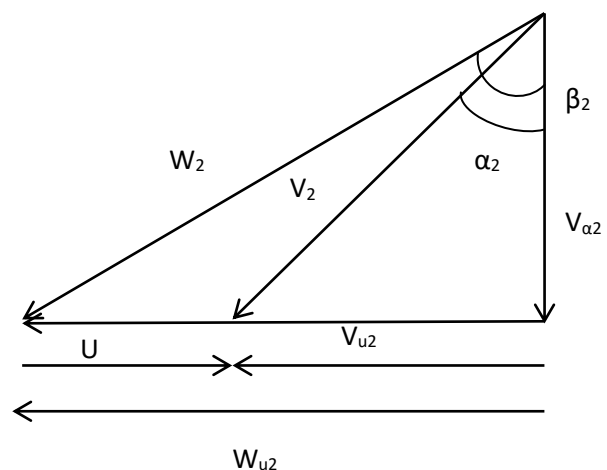
$$\gamma_2 = \beta_2 - \alpha_2 = 52.14 - 21.20 = 30.94^\circ$$

$$W_2 = \frac{U}{\sin \gamma_2} = 501 \text{ m/s}$$

$$V_{\alpha 2} = \cos \alpha_2 V_2 = 251.73 \text{ m/s}$$

$$W_{u2} = \sin \beta_2 W_2 = 395.55 \text{ m/s}$$

$$V_{u2} = \cos \alpha_2 V_2 = 97.69 \text{ m/s}$$



Συνολική αξονική δύναμη:

$$F_a = \dot{m} (W_{u2} - W_{u1}) = 3900 \text{ N}$$

Αξονική δύναμη ανά πτερύγιο:

$$\frac{F_a}{38} = 102.63 \text{ N}$$

Συνολική περιφερειακή δύναμη:

$$F_t = \dot{m} (V_{\alpha 2} - V_{\alpha 1}) = 534.24 \text{ N}$$

Περιφερειακή δύναμη ανά πτερύγιο:

$$\frac{F_t}{38} = 14.06 \text{ N}$$

όπου 38 ο συνολικός αριθμός των πτερυγίων του ρότορα.

3.5 Μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού φυγόκεντρος

Ανάμεσα στις πολλές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα κινητό πτερύγιο, η φυγόκεντρος είναι εκείνη που προκαλεί τις μεγαλύτερες τάσεις. Προκαλείται λόγω της περιστροφής του ρότορα και η τάση που προκύπτει μπορεί να φτάσει ακόμα και το 75% του ορίου ελαστικότητας.[5]

Οι τάσεις που αναπτύσσονται μπορεί να έχουν δραματικά αποτελέσματα στα σημεία που εμφανίζουν συγκεντρωτικές τάσεις, όπως η ρίζα του πτερυγίου.

Η γενική εξίσωση είναι:

$$F_c = m\omega^2 r \quad (1)$$

όπου: m η μάζα του πτερυγίου

r η απόσταση από το κέντρο του ρότορα

ω η γωνιακή ταχύτητα

Η σχέση (1) μπορεί να γραφτεί:

$$\delta F_c = \delta m \omega^2 r \quad (2)$$

Για σταθερή επιφάνεια εγκάρσιας διατομής του πτερυγίου A (m^2) και πυκνότητα υλικού ρ (kg/m^3) έχουμε:

$$\delta m = \rho A \delta r$$

οπότε η σχέση (2) γίνεται:

$$\delta F_c = \rho A \omega^2 r \delta r \Rightarrow dF_c = \rho A \omega^2 r dr$$

Ολοκληρώνοντας, για r_1 την ακτίνα του δίσκου του ρότορα και r_2 την απόσταση του άκρου του πτερυγίου με το κέντρο του δίσκου, έχουμε:

$$F_c = \rho A \omega^2 \int_{r_1}^{r_2} r dr$$

Τελικά:

$$F_c = \rho A \omega^2 \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right)$$

3.6 Υπολογισμός φυγόκεντρο

$$\omega = 20000 \text{ rpm}$$

$$A = 82,2 \text{ mm}^2 = 0.0000822 \text{ m}^2$$

$$\rho = 8440 \text{ kg/m}^3$$

$$r_1 = 101.895 \text{ mm} = 0.101895 \text{ m}$$

$$r_2 = 123.005 \text{ mm} = 0.123005 \text{ m}$$

Μετατρέπουμε τη γωνιακή ταχύτητα από rpm σε rad/sec: $\omega = \frac{2\pi \cdot 20000}{60} = 2093,33 \text{ rad/sec}$

$$F_c = \rho A \omega^2 \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right) = 8440 \times 0.0000822 \times (2093,33)^2 \times \left(\frac{(0.123005)^2 - (0.101895)^2}{2} \right) \Rightarrow$$

$$F_c = 7216.62 \text{ N/blade}$$

$$F_c = ma \Rightarrow a = \frac{7216.62}{0.032} = 225519.3 \text{ m/s}^2$$

Πίνακας 1 Σύγκριση δυνάμεων που ασκούνται στο πτερύγιο

Δύναμη	N
Φυγόκεντρος F_c	7216.62
Αξονική F_a	102.63
Περιφερειακή F_t	14.06

Όπως φαίνεται στον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα η τιμή της δύναμης που ασκείται στο πτερύγιο λόγω της περιστροφής (φυγόκεντρος) είναι κατά πολύ υψηλότερη των δυνάμεων που ασκούνται από τα καυσαέρια.

Κεφάλαιο 4

Χημική ανάλυση

4.1 Διαδικασία

Για τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής του πτερυγίου ήταν απαραίτητη η χημική ανάλυση του. Επιλέχθηκε η διαδικασία του φθορισμού με ακτίνες X (XRF - X-Ray Fluorescence) διότι αποτελεί τον πιο γρήγορο και εύκολο τρόπο εξακρίβωσης της χημικής σύστασης ενός αντικειμένου. Η μέθοδος αυτή είναι μη καταστροφική, είναι δυνατό να μετρηθούν όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα και μπορούν να μετρηθούν συγκεντρώσεις από λίγα ppm έως και το 100%.

Το δείγμα ακτινοβολείται με μία προσπίπτουσα δέσμη ακτινών X χαμηλής ενέργειας, με μέρος της ενέργειας τους να απορροφάται από το αντικείμενο, με συνέπεια τα ηλεκτρόνια του δείγματος να διεγείρονται. Όταν επέλθει η αποδιέγερσή τους, προκαλείται εκπομπή ακτινών X, των οποίων η ενέργεια ανιχνεύεται, κάνοντας δυνατή την αναγνώριση των χημικών στοιχείων του δοκιμίου. Ανάλογα την ένταση των ακτινών X που εκπέμπεται καθορίζεται η συγκέντρωση κάθε στοιχείου. [22]

4.2 Προετοιμασία πτερυγίου

Για να αναλυθεί το δείγμα είναι απαραίτητη η προετοιμασία του για να έχουμε αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, η οποία ωστόσο σε σχέση με άλλες μεθόδους χημικής ανάλυσης είναι εξαιρετικά πιο απλή.

Αρχικά πρέπει το πάχος του δείγματος να είναι επαρκές ώστε να είναι δυνατή η απορρόφηση της δέσμης των ακτινών X. Το πάχος του πτερυγίου αν και μικρό λόγω τόσο των συνολικών διαστάσεων, όσο και της ύπαρξης εσωτερικών διόδων αέρα, κρίθηκε ικανοποιητικό για τη μέτρηση.

Στη συνέχεια η επιφάνεια μέτρησης πρέπει να είναι επίπεδη και λεία, χωρίς ανωμαλίες. Πραγματοποιήθηκε λείανση του δοκιμίου σε περιοχές τόσο του ενεργού πτερυγίου όσο και της ρίζας, ώστε να καθαριστεί από τις επικαθίσεις αλλά και να απομακρυνθεί η προστατευτική επίστρωση. Η ανάλυση αυτής πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικά σημεία.

Τέλος το πτερύγιο καθαρίστηκε ώστε να μην υπάρχουν ξένα σώματα στις επιφάνειες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

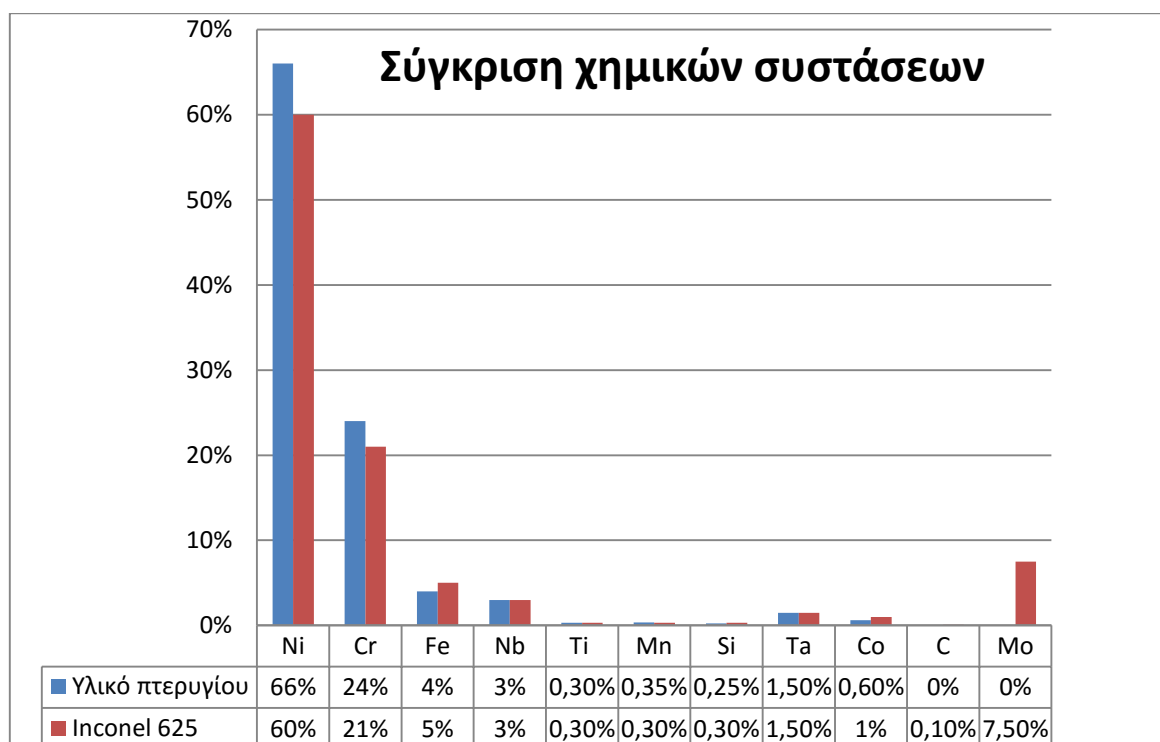
4.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης παρατίθενται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα 2.

Πίνακας 2 Συγκέντρωση χημικών στοιχείων

Χ.Στοιχείο	Συγκέντρωση
Ni	66%
Cr	24%
Fe	4%
Nb	3%
Ti	0,30%
Mn	0,35%
Si	0,25%
Ta	1,50%
Co	0,60%

Με βάση τα ποσοστά συγκέντρωσης των χημικών στοιχείων του υλικού κατασκευής του πτερυγίου, συμπεραίνουμε ότι είναι ένα υπερκράμα νικελίου, που ανήκει στην οικογένεια των Inconel. Πιο συγκεκριμένα το υλικό είναι Inconel 625, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 3, όπου γίνεται σύγκριση της χημικής σύστασης του υπό εξέταση υλικού με την τυπική σύσταση του Inconel 625[19]. Επιπλέον, μέσω της χημικής ανάλυσης, ταυτοποιήθηκε ότι το πτερόγιο διαθέτει προστατευτική επίστρωση από λευκόχρυσο.



Διάγραμμα 3

4.4 Ιδιότητες υλικού Inconel 625

Το Inconel 625 είναι ένα κράμα χρωμίου και νικελίου και χρησιμοποιείται λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής του, της επεξεργασιμότητάς του καθώς και των εξαιρετικών αντιδιαβρωτικών χαρακτηριστικών του. Επίσης έχει πολύ μεγάλη θερμοκρασιακή γκάμα λειτουργίας που κυμαίνεται από κρυογονικές θερμοκρασίες μέχρι και 980 °C.

Η ύπαρξη μολυβδαινίου και νιόβιου στη σύστασή του, χαρίζει μηχανική αντοχή στο υλικό χωρίς να απαιτούνται διεργασίες σκλήρυνσης. Ο συνδυασμός των στοιχείων αυτών με το χρώμιο και το νικέλιο χαρίζουν στο Inconel 625 αυξημένη αντοχή σε ιδιαίτερα διαβρωτικά περιβάλλοντα καθώς και στις επιδράσεις της λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες όπως οξείδωση και ενανθράκωση. Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό του υλικού είναι η πολύ καλή συγκολλησιμότητα του.[19]

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν ένα υλικό με ευρεία χρήση σε πολλούς τομείς. Κάποιοι είναι η αεροναυπηγική όπου συχνά κατασκευάζονται εξαρτήματα του θερμού τμήματος του κινητήρα όπως πτερύγια στροβίλων και διαχύτες καυσαερίων, στη ναυπηγική μέχρι και σε τμήματα πυρηνικών αντιδραστήρων.[19]

Πίνακας 3 Θερμικές ιδιότητες [20]

Thermal Conductivity	9.8 W/mK
Specific Heat	0.410 J/g °C
Thermal Expansion Coefficient	12.800 μm/m°C
Melting Point	1290-1350 °C
Solidus	1290 °C
Liquidus	1350 °C

Πίνακας 4 Μηχανικές ιδιότητες [20]

Ultimate Tensile Strength	880 MPa
Yield Tensile Strength	460 MPa
Elongation at Break	50%
Young's Modulus	207.5 GPa
Shear Modulus	81400 Mpa
Poisson ratio	0.28

Πίνακας 5 Φυσικές ιδιότητες [20]

Density	8440 kg/m ³
---------	------------------------

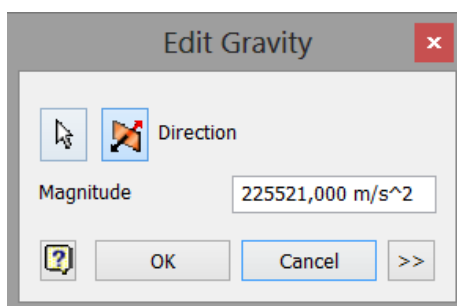
Κεφάλαιο 5

Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

5.1 Στατική ανάλυση στη μέγιστη ταχύτητα (20000 rpm)

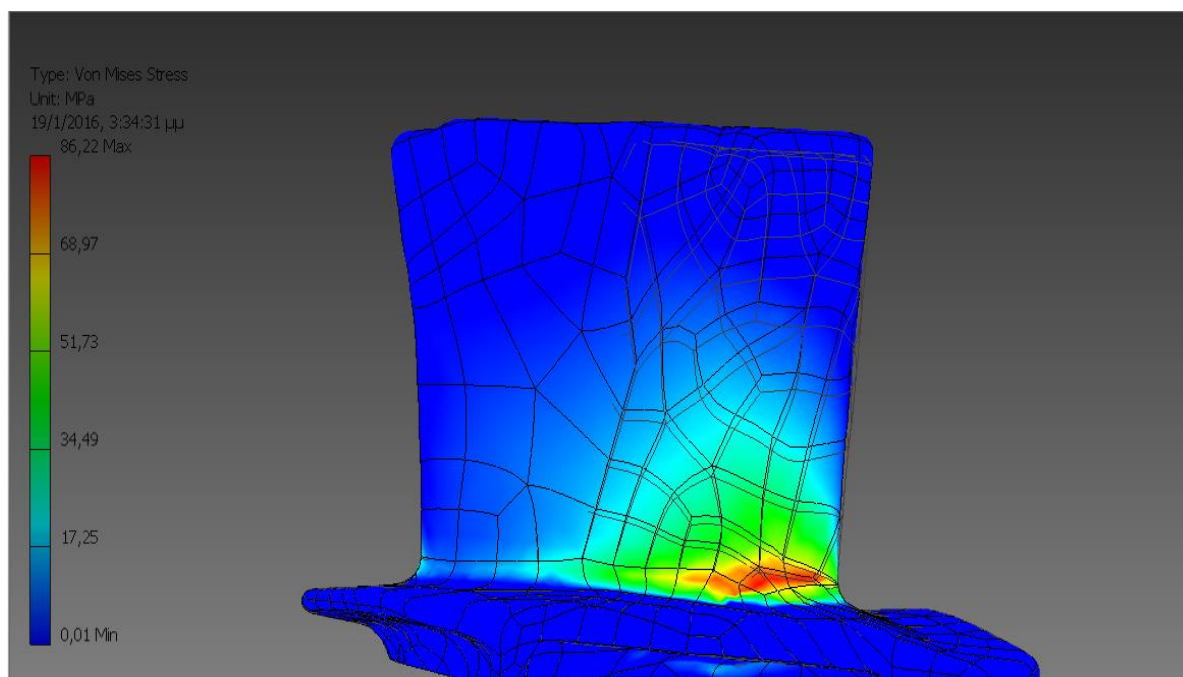
Στην αρχική προσπάθεια επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, το πρόγραμμα αδυνατούσε να αποδώσει σωστά τις αναπτυσσόμενες τάσεις, δεν υπήρχε και σύγκλιση αυτών αλλά ούτε και επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα, λόγω της πολυπλοκότητας του πλέγματος. Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε η αφαίρεση τμήματος της ρίζας καθώς σε εκείνο το σημείο εμφανιζόταν το πρόβλημα. Στη συνέχεια επανασχεδιάστηκε το τμήμα που θα εφαρμοζόταν η πάκτωση.

Για τον υπολογισμό των τάσεων ήταν απαραίτητο να γίνει προσομοίωση της φυγοκέντρου που προκαλείται από την περιστροφή του περυγίου. Για την εφαρμογή της επιλέχθηκε το μοντέλο υπολογισμού της βαρυτικής δύναμης με τη ζητούμενη επιτάχυνση [Εικ.11] να υπολογίζεται από τον τύπο $a=F_c/m$.

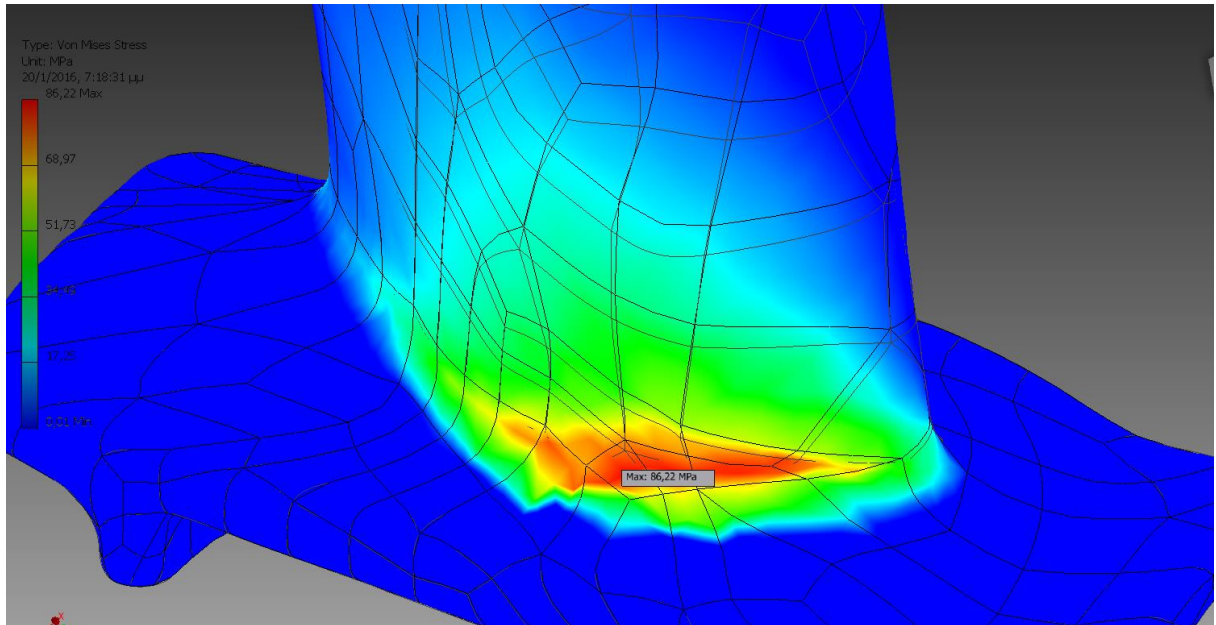


Εικ.11 Μέτρο επιτάχυνσης

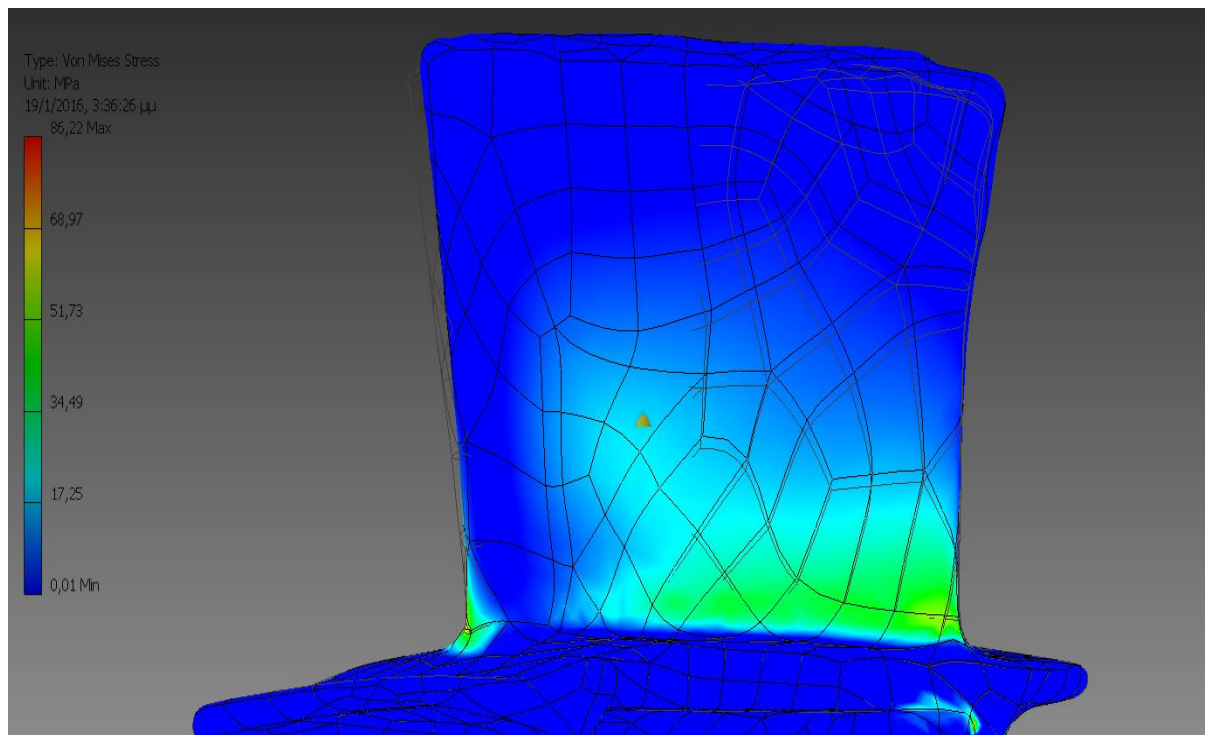
Von-mises



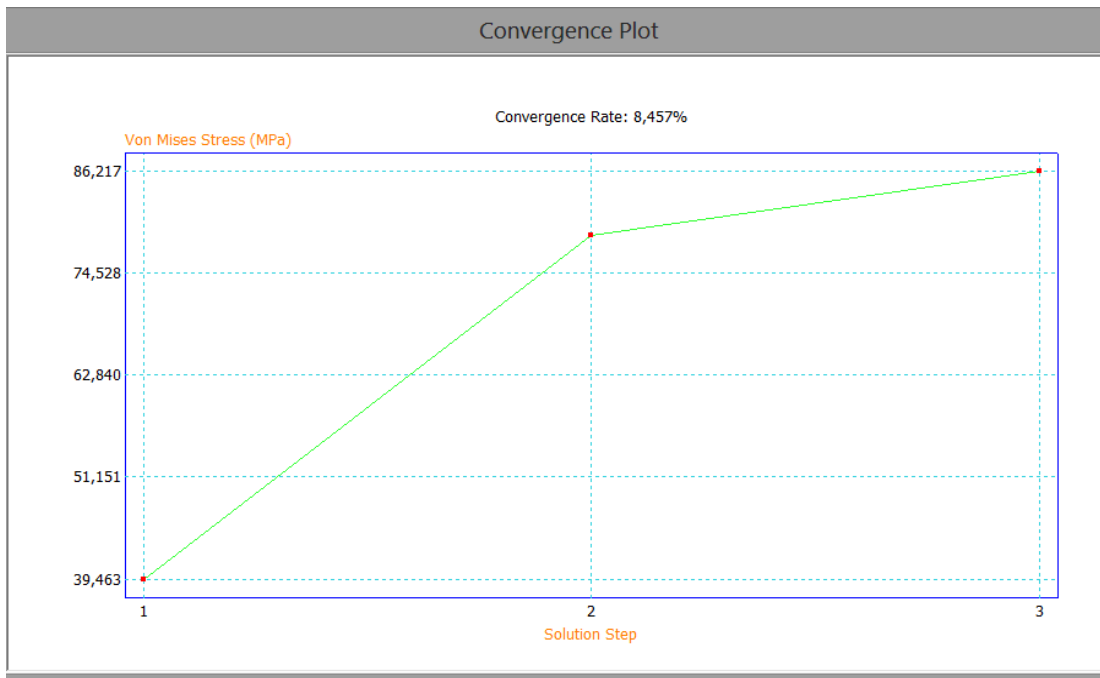
Εικ.12 Αναπτυσσόμενες τάσεις Von-mises



Εικ.13 Αναπτυσσόμενες τάσεις Von-mises και σημείο μέγιστης καταπόνησης

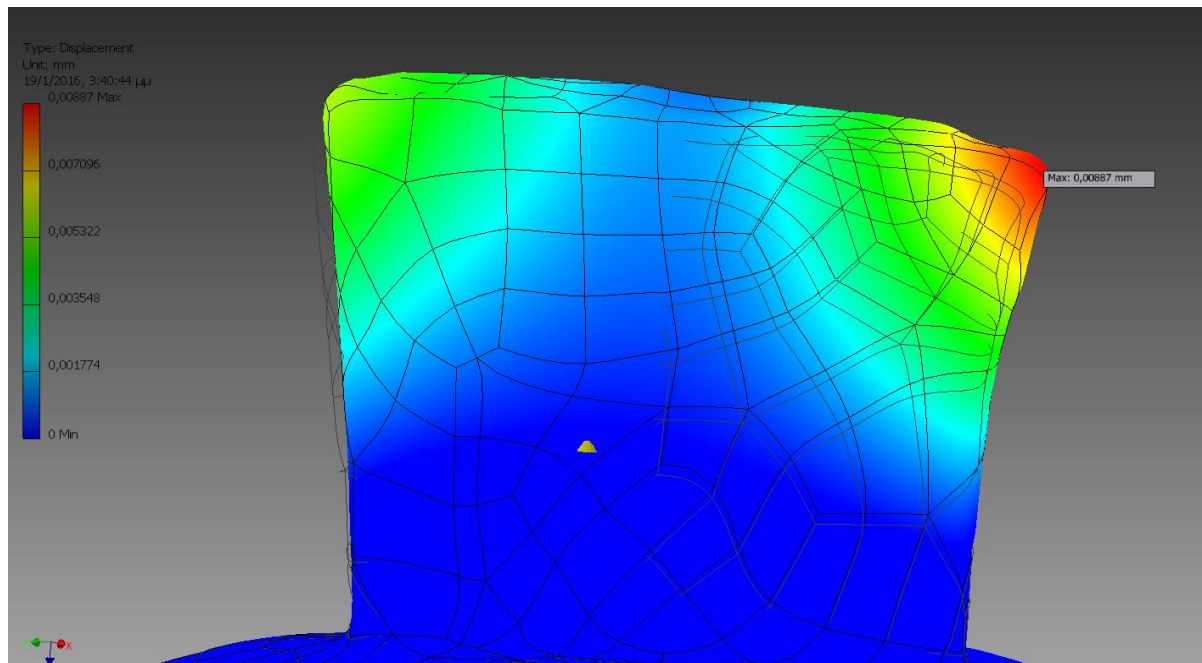


Εικ.14 Αναπτυσσόμενες τάσεις Von-mises στην εσωτερική πλευρά του περυγίου

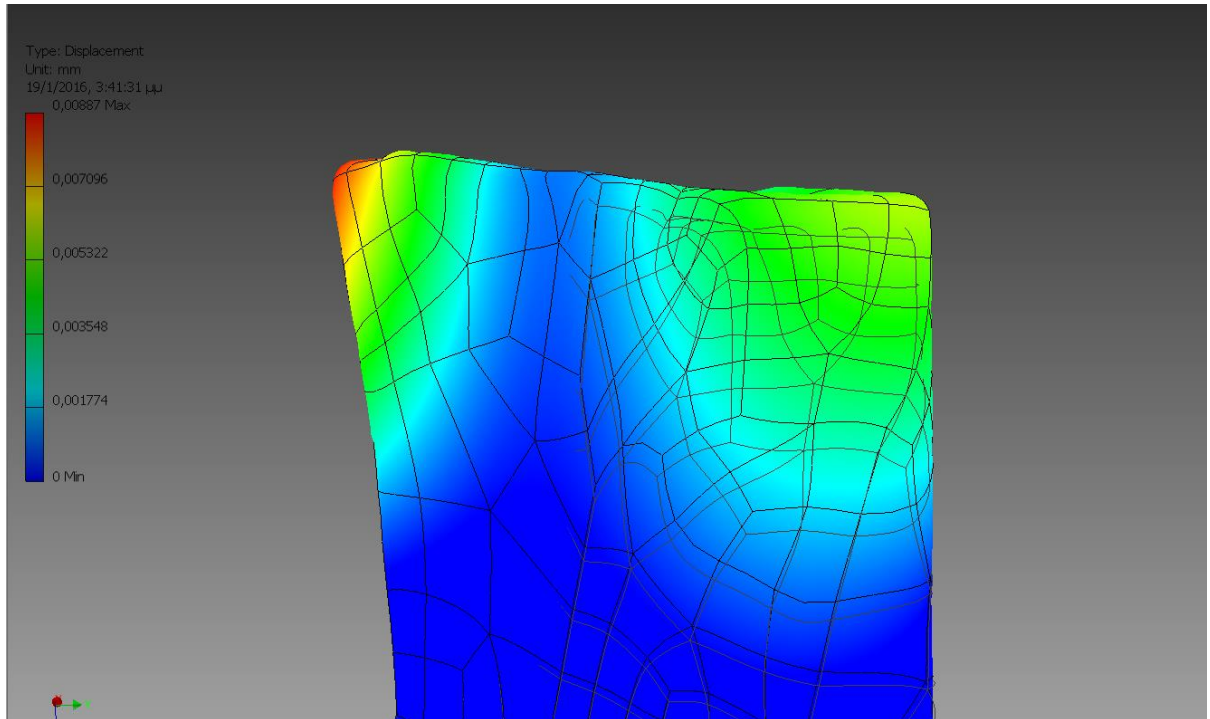


Εικ.15 Διάγραμμα σύγκλισης τάσεων Von-mises

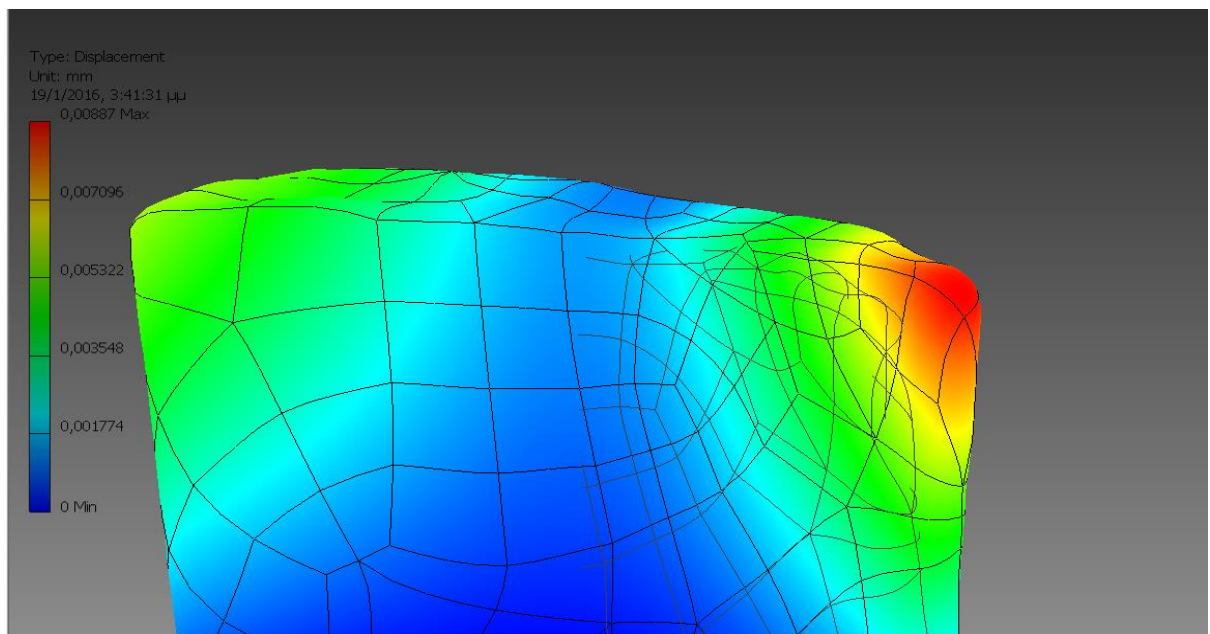
Displacement



Εικ.16 Σημείο μέγιστης μετατόπισης

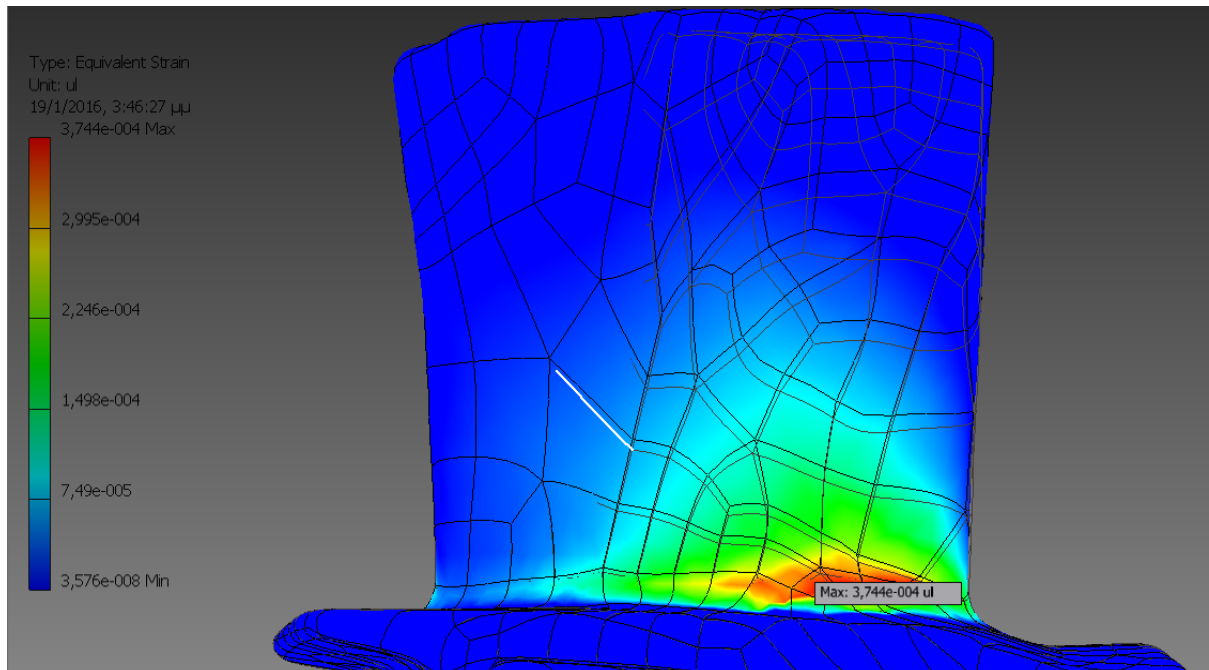


Εικ.17 Περιοχές που υπόκεινται σε μετατόπιση



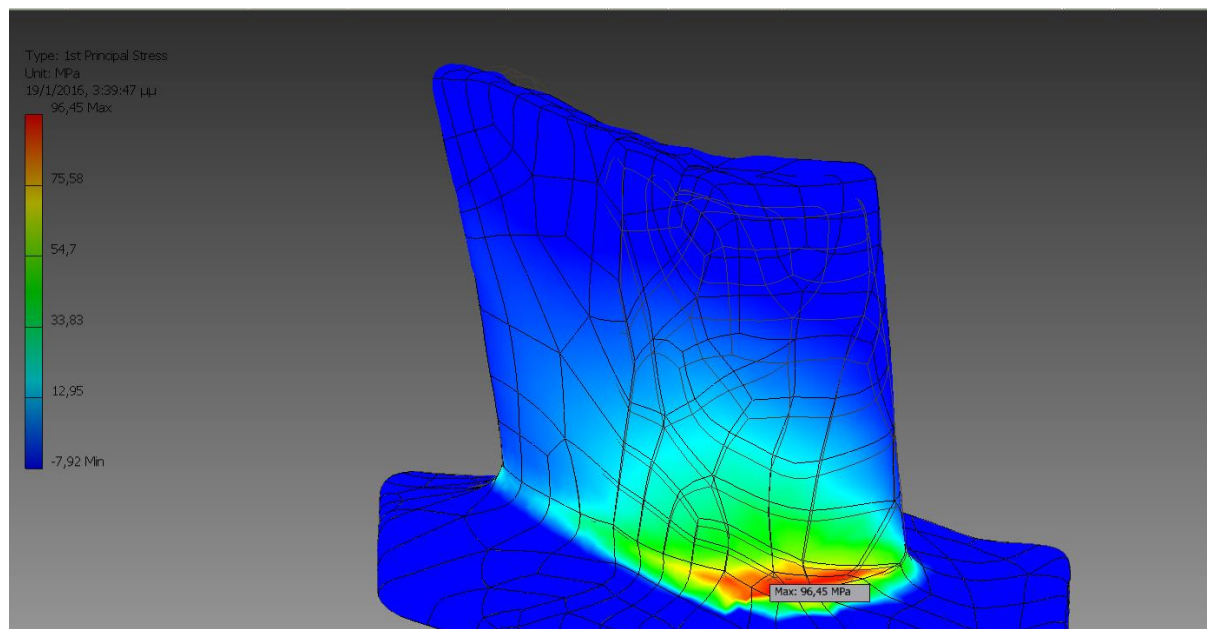
Εικ.18 Περιοχή μέγιστης μετατόπισης

Strain



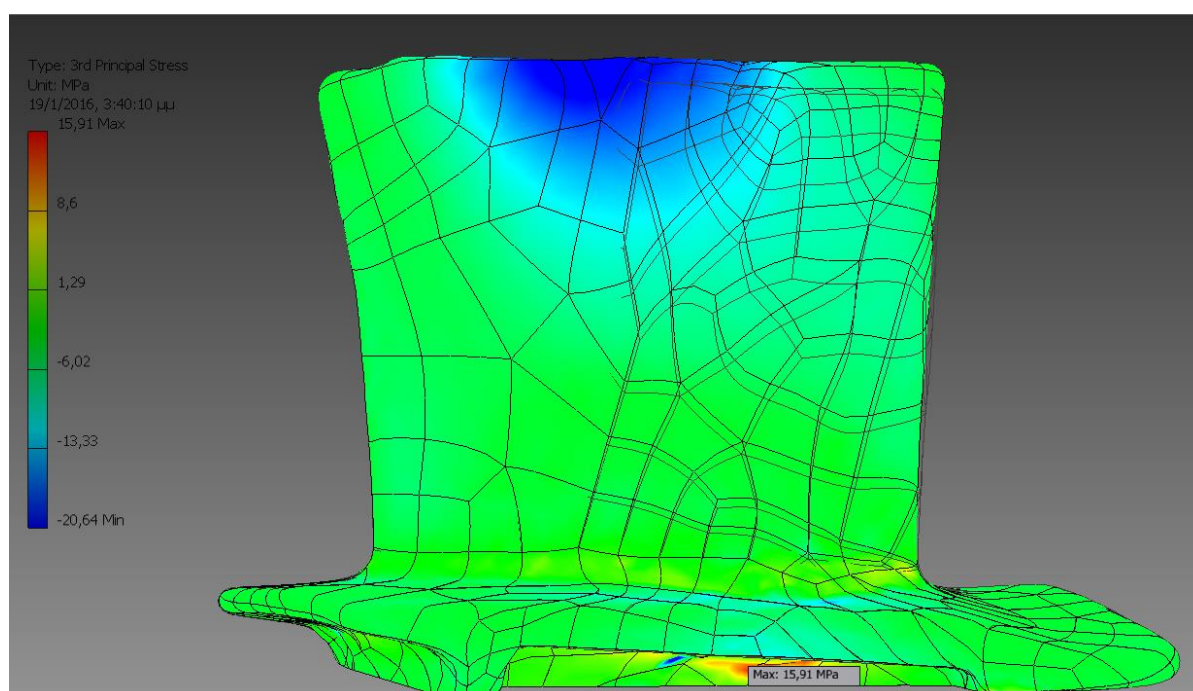
Εικ.19 Σημείο μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης

1st Principal Stress



Εικ.20 Περιοχή μέγιστης εφελκυστικής τάσης

3rd Principal Stress



Εικ.21 Περιοχή μέγιστης θλιπτικής τάσης

5.2 Αποτελέσματα - Παρατηρήσεις

Η στατική δομική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πραγματοποιήθηκε για το περύγιο στροβίλου με ταχύτητα περιστροφής 20000 rpm, εφαρμόζοντας το φορτίο της φυγοκέντρου στο κέντρο βάρους του.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η μέγιστη Von Mises τάση εμφανίζεται στην περιοχή της βάσης του ενεργού τμήματος του περυγίου [Εικ.12-14] με τιμή 86.22 MPa. Η ακρίβεια του αποτελέσματος διασφαλίζεται από το διάγραμμα σύγκλισης [Εικ.15]. Η μέγιστη εφελκυστική τάση εμφανίζεται στο ίδιο σημείο [Εικ.20], ενώ η μέγιστη θλιπτική εμφανίζεται σε περιοχή της ρίζας [Εικ.21]. Η τιμές αυτές βρίσκονται εντός των ορίων ασφαλείας του υλικού, καθώς είναι πολύ μικρότερες από το όριο ελαστικότητας του [Πίνακας 4].

Η μέγιστη τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης όπως φαίνεται στην εικόνα 19 εμφανίζεται στη περιοχή της μέγιστης τάσης.

Τέλος, οι περιοχές με τη μέγιστη μετατόπιση [Εικ.16-18] βρίσκονται στο άκρο του ενεργού περυγίου (tip), αποτέλεσμα το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς στα συγκεκριμένα περύγια δε χρησιμοποιείται εξωτερικός υποστηρικτικός δακτύλιος (shroud).

Οι προαναφερθείσες μέγιστες τιμές των τάσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6 Καταγραφή μέγιστων τιμών

Von-mises (MPa)	86.22
1st Principal Stress (MPa)	96.45
3rd Principal Stress (MPa)	15.91
Displacement (mm)	0.00887
Strain	0.0003744

Κεφάλαιο 6

Έλεγχος πτερυγίου

6.1 Οπτική μελέτη των επιφανειών αστοχίας του πτερυγίου

Παρακάτω παρατίθενται οπτικές φωτογραφίες στερεοσκοπίου στις οποίες παρουσιάζονται οι επιφάνειες έντονης φθοράς υπερκράματος νικελίου κατά τη χρήση του. Στην εικόνα 22 παρατίθεται η πτέρυγα στην οποία είναι εμφανής η βάση σύνδεσης της (ρίζα) με τη φτερωτή, καθώς και το ενεργό πτερύγιο της.

Ως πτερύγιο πρώτης βαθμίδας στροβίλου υψηλής πίεσης, ο χώρος στον οποίο βρίσκεται τοποθετημένο δηλώνει τα έντονα φαινόμενα θερμής διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα από τα καπναέρια του θαλάμου καύσης καθώς αυτά εξέρχονται σε υψηλή θερμοκρασία. Η θερμή διάβρωση (hot corrosion) είναι φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται σε υλικά τα οποία εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον, υγρό ή αέριο, σε υψηλή θερμοκρασία. Σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζεται πέραν του φαινομένου της διάβρωσης η ταυτόχρονη ύπαρξη μηχανικών καταπονήσεων σε υψηλές θερμοκρασίες (ερπυσμός). Για το λόγο αυτό προτιμώνται υλικά με υψηλή αντοχή σε φαινόμενα τέτοια όπως τα υπερκράματα νικελίου. Όπως παρατηρείται στην εικόνα 23, στο ανώτατο σημείο ενός πτερυγίου ίδιου τύπου με μειωμένη φθορά, διακρίνεται μία σειρά οπών (δίοδοι ψύξης). Παρά το γεγονός ότι παρέχεται στο σύστημα εξωτερική ψύξη, στις εικόνες 24 και 25 είναι εμφανής η έντονη διάβρωση των εκτιθέμενων στα καυσαέρια επιφανειών σε αντιθέση με τις εικόνες 26 και 27 οι οποίες αναφέρονται στη βάση του πτερυγίου και τα φαινόμενα διάβρωσης είναι εμφανώς πολύ λιγότερα. Ειδικά στις εικόνες 28 και 29 είναι ορατό το φαινόμενο του πολυχρωματισμού της επιφάνειας που πιθανώς οφείλεται στην ανάπτυξη διαφόρων τύπων οξειδίων και άλλων προϊόντων οξείδωσης.

Στο σημείο της ένωσης του ενεργού πτερυγίου με τη βάση βρίσκεται η περιοχή μέγιστης μηχανικής καταπόνησης σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Παρ' όλα αυτά στις εικόνες 26 και 27 δεν εντοπίζονται ιδιαίτερα σημάδια επιφανειακής φθοράς.



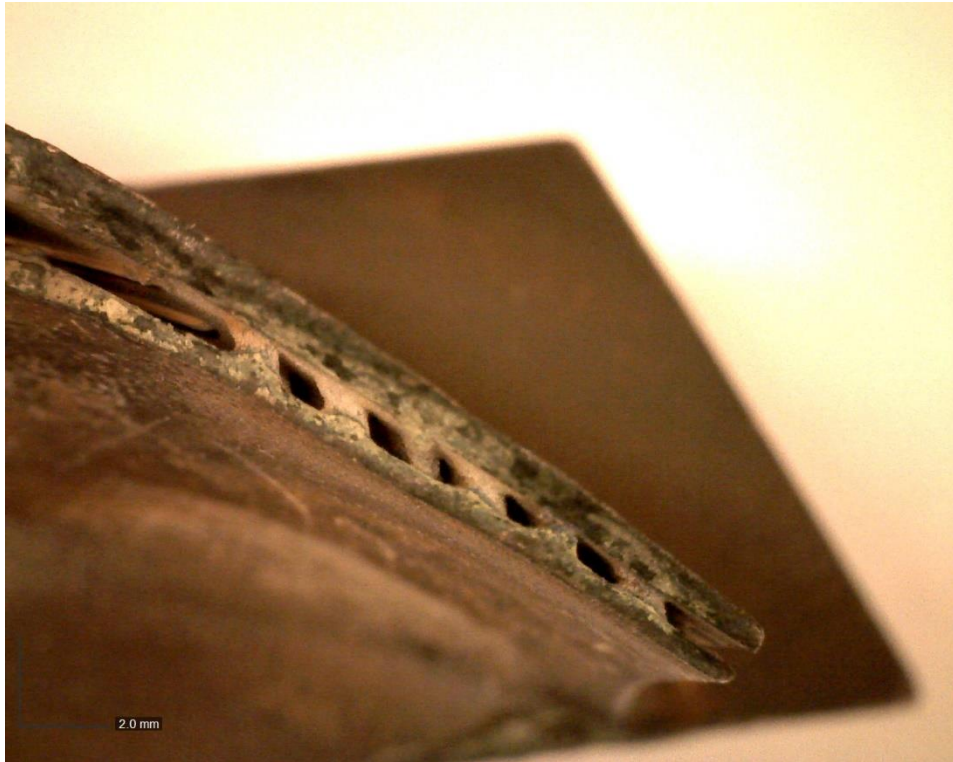
Εικ.22 Πτερύγιο πρώτης βαθμίδας στροβίλου



Εικ.23 Δίοδοι ψύξης πτερυγίου με μειωμένη φθορά



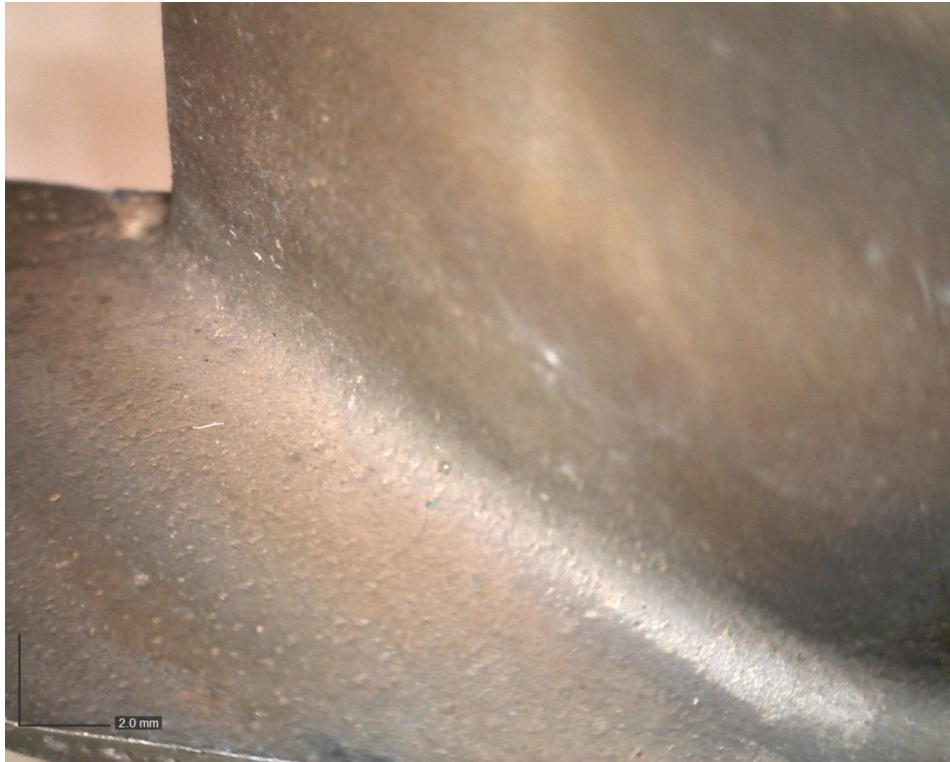
Εικ.24 Περιοχή έντονης διάβρωσης στο ακροπτερύγιο (tip)



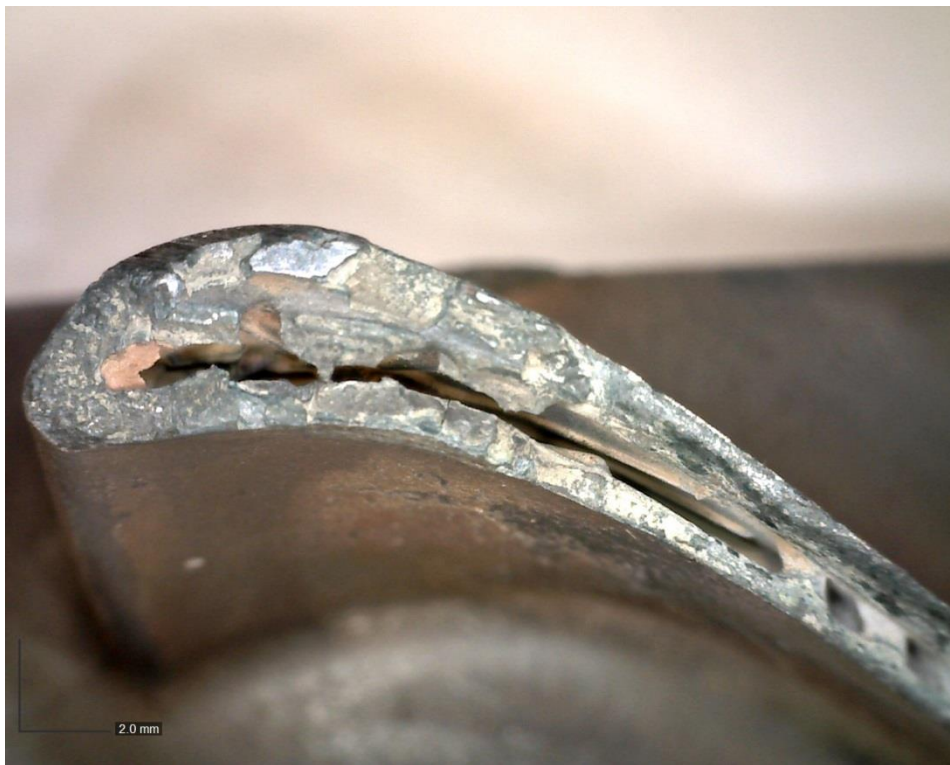
Εικ.25 Περιοχή έντονης διάβρωσης στο ακροπτερύγιο (tip)



Εικ.26 Περιοχή μέγιστης μηχανικής καταπόνησης



Εικ.27 Περιοχή ένωσης βάσης πτερυγίου με ενεργό τμήμα



Εικ.28 Περιοχή με φαινόμενο πολυχρωματισμού επιφανείας (tip)



Εικ.29 Περιοχή με φαινόμενο πολυχρωματισμού επιφανείας (tip)

Η λήψη των φωτογραφιών έγινε με τη βοήθεια του στερεοσκοπίου Dino-Lite στο εργαστήριο Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Έπειτα από μαθηματική ανάλυση και προσομοίωση των μηχανικών φορτίων που ασκούνται στο πτερύγιο πρώτης βαθμίδας στροβίλου μέσω λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και τον οπτικό έλεγχο με τη βοήθεια στερεοσκοπίου, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Από τους μαθηματικούς υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η φυγόκεντρος δύναμη που προκύπτει από την περιστροφή του πτερυγίου είναι πολλαπλάσια μεγαλύτερη από τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό από τα καυσαέρια.
- Από την επίλυση του προβλήματος μέσω πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε, με αρκετά καλή ακρίβεια, ότι η περιοχή που εμφανίζεται η μέγιστη καταπόνηση βρίσκεται στην εξωτερική πλευρά του πτερυγίου, στην ένωση του ενεργού τμήματός του με τη βάση.
- Η τιμή της τάσης όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση, είναι πολύ χαμηλότερη από το όριο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής του πτερυγίου.
- Η μηχανική συμπεριφορά του υλικού μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα κράμα ικανό να λειτουργήσει σε αυτές τις συνθήκες.
- Η χημική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι το υλικό κατασκευής του πτερυγίου είναι ένα υπερκράμα Νικελίου, τύπου Inconel 625, με προστατευτική επίστρωση λευκόχρυσου.
- Όπως διαπιστώθηκε από τον οπτικό έλεγχο στην περιοχή μέγιστης καταπόνησης δεν υπάρχουν εμφανείς ενδείξεις μηχανικής φθοράς.
- Στην περιοχή του ακροπτερυγίου παρατηρήθηκε έντονη φθορά που οφείλεται σε θερμή διάβρωση. Αποτέλεσμα που δικαιολογείται από τις συνθήκες λειτουργίας σε αυτό το τμήμα του κινητήρα.
- Στις ίδιες περιοχές εμφανίζεται το φαινόμενο του πολυχρωματισμού των επιφανειών που οφείλεται στην ανάπτυξη οξειδίων και άλλων προϊόντων οξείδωσης.

Αξίζει να σημειωθούν κάποιες παρατηρήσεις και κάποιοι παράγοντες που επηρέασαν τη συνολική πορεία της εργασίας.

Η μεγάλη διαφορά στην τιμή της δύναμης της φυγόκεντρου σε σχέση με αυτή των δυνάμεων που ασκούνται από τα καυσαέρια μας οδήγησε σε σκόπιμη παράλειψη των δεύτερων από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Για το σχεδιασμό του εξαρτήματος επιλέχθηκε η μέθοδος της τρισδιάστατης σάρωσης. Οι μικρές διαστάσεις του πτερυγίου, η πολυπλοκότητα των επιφανειών αλλά και η σχετικά περιορισμένη ακρίβεια του συστήματος τρισδιάστατης σάρωσης επηρέασαν την ακρίβεια του τελικού μοντέλου. Επίσης, με τη μέθοδο αυτή ήταν αδύνατη η σχεδίαση των εσωτερικών διόδων ψύξης.

Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία παρατηρήθηκε αδυναμία επίλυσης του προβλήματος λόγω της πολυπλοκότητας του πλέγματος στην περιοχή της ρίζας του πτερυγίου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος κρίθηκε απαραίτητη η αφαίρεση τμήματος της ρίζας του τρισδιάστατου αντιγράφου.

Βιβλιογραφία

- [1] Khajavi M. R., Shariat M. H. "Failure of first stage gas turbine blades". Engineering Failure Analysis 11 (2004) 589–597
- [2] Carter J. Tim. "Common failures in gas turbine blades". Engineering Failure Analysis 12 (2005) 237–247
- [3] Jianfu Hou et al. "An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis". Engineering Failure Analysis 9 (2002) 201–211
- [4] Gurajaparapu Naresh et al. "Selection of a Suitable Material and Failure Investigation on a Turbine Blade of Marine Gas Turbine Engine using Reverse Engineering and FEA Techniques". International Journal of u- and e- Service, Science and Technology Vol. 7, No. 6 (2014) 297-308
- [5] K. Swarnalata Naga Durga, Dr. P. H. V. Sesh Talpa Sai. "Design and analysis of steam turbine blade using FEA". International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, Vol.04, Issue.29, August (2015), Pages: 5661-5665
- [6] In-Hwan Shin et al. "Estimation of spallation life of thermal barrier coating of gas turbine blade by thermal fatigue test". Surface & Coatings Technology, Vol. 205 (2011) S157–S160
- [7] Rajerdan et al. "Condition assessment of gas turbine blades and coatings". Engineering Failure Analysis, Vol. 18, Issue 8, December (2011), Pages 2104–2110
- [8] Καρέλας Ευάγγελος, Τριαντάφυλλος Ιωάννης, Φρέσκος Γρηγόριος. "Κινητήρες Αεροσκαφών Ι". Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα, 2004
- [9] Κ. Μαθιουδακης. "Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων", Αθήνα 2007
- [10] <http://www.gandoza.com/turboprop-engine-pw100-pw127-pw150>, τελευταία επίσκεψη: 10/9/2014
- [11] Large PW100 Series Training Manual, Pratt & Whitney, Canada, December (2000)
- [12] Καρέλας Ευάγγελος, Τριαντάφυλλος Ιωάννης, Φρέσκος Γρηγόριος. "Κινητήρες Αεροσκαφών ΙΙ". Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα, 2004
- [13] Nageswara Rao Muktinutalapati (2011). "Materials for Gas Turbines – An Overview", "Advances in Gas Turbine Technology", Dr. Ernesto Benini (Ed.), ISBN: 978-953-307-611-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-gas-turbine-technology/materials-for-gas-turbines-an-overview>.
- [14] http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/other_metals.php, τελευταία επίσκεψη: 20/3/2015
- [15] KunWoo Lee "Βασικές αρχές συστημάτων CAD/CAM/CAE", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, (2009)
- [16] Μπιλάλης Νικόλαος, Μαραβελάκης Εμμανουήλ. "Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη Μοντελοποίηση", Εκδόσεις Κριτική Α.Ε., (2009)
- [17] William W. Bathie. "Fundamentals of Gas Turbines". John Wiley & Sons Inc., Canada, 1996
- [18] Απόστολος Πολυζάκης, "Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή Ενέργειας - Προώθηση, Θεωρία", εκδόσεις Power Heat Cool, Πτολεμαΐδα, 2012, ISBN: 978-960-98311-1-6
- [19] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=NINC33>, τελευταία επίσκεψη: 10/12/2015

- [20] <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4a194f59f35a427dbc5009f043349cb5&ckck=1>, τελευταία επίσκεψη: 10/12/2015
- [21] David, SLS_2 Structured Light 3D Scanning System brochure available: <http://pv-e.com/wp-content/uploads/2015/09/SLS-2.pdf>
- [22] Νίκος Καντηράνης, Λαμπρινή Παπαδοπούλου. Σημειώσεις μαθήματος, " Εργαστηριακές μέθοδοι έρευνας ορυκτών και πετρωμάτων, Μάθημα 2°, Φασματοσκοπία με Φθορισμό των Ακτίνων Χ (XRF) ", διαθέσιμο: <http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo324e/> τελευταία επίσκεψη: 10/12/2015