

ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

10	ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ	10.2
10.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΕ ΑΝΤΟΧΗ	10.2
10.2	Η ΨΥΧΟΜΕΝΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	10.4
10.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ	10.10

ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

10.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΕ ΑΝΤΟΧΗ

(Stodola (1945), Hawthorne and Olson (1960), Horlock (1973), AFAPL-TR-78-52, Γούλιος (1980), Dixon (1978), The Jet Engine, Rolls-Royce plc (1987), Cohen et al (1972), Boyce (2002))

Τα στρεφόμενα (κυρίως) πτερύγια των συμπιεστών και στροβίλων υπολογίζονται και ελέγχονται για την αντοχή τους, αλλά ο πλέον κρίσιμος έλεγχος αντοχής σε κόπωση είναι των πτερυγίων του στροβίλου, που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά, οι μηχανικές τάσεις στα πτερύγια έχουν άμεση επίδραση στο σχεδιασμό της βαθμίδας. Τρεις είναι οι κύριοι παράγοντες τάσεων (Cohen et al (1972): (i) φυγοκεντρικές εφελκυστικές τάσεις (οι μέγιστες αλλά όχι και οι κυριότερες λόγω του ότι είναι σταθερές), (ii) καμπτικές τάσεις προερχόμενες από τις δυνάμεις που ασκούνται επάνω στο πτερύγιο, εκ της αεριοροής (κυμαινόμενες, καθώς τα πτερύγια του στροφείου περνούν από τα άκρα εκφυγής των ακινήτων πτερυγίων), (iii) φυγοκεντρικές καμπτικές τάσεις, όταν τα κέντρα βάρους των διατομών των πτερυγίων, σε διαφορετικές ακτίνες (διαφορετικά εκπετάσματα h_B), δεν βρίσκονται επί της ίδιας ακτίνας (οι στρεπτικές τάσεις που προέρχονται από αυτόν τον παράγοντα είναι πολύ μικρότερες και αγνοούνται), σχήμα 10.3.

Όταν καθορίζονται οι στροφές, η μέγιστη επιτρεπόμενη φυγοκεντρική εφελκυστική τάση θέτει ένα όριο στην επιφάνεια του δακτυλιοειδούς διακένου (τύμπανο/βάση-κέλυφος/άκρο) αλλά δεν επηρεάζει την επιλογή της χορδής c . Η μέγιστη τιμή αυτής της τάσης εμφανίζεται φυσικά στη βάση του πτερυγίου και δίνεται από την

$$(\sigma_{ct})_{\max} = \frac{\rho_b \omega^2}{a_r} \int_r^t a(r) r dr, \text{ όπου } \rho_b \text{ είναι η πυκνότητα του υλικού των πτερυγίων, } \omega \text{ η}$$

γωνιακή ταχύτητα, $a(r)$ η διατομή του πτερυγίου και a_r η τιμή της στη βάση. Η ολοκλήρωση συνήθως γίνεται αριθμητικά, αλλά για προκαταρκτικό σχεδιασμό μπορούμε να υποθέσουμε ομοιόμορφη διατομή με την ακτίνα ($a(r)=ct$) και συνεπώς έχουμε $(\sigma_{ct})_{\max}=2\pi N^2 \rho_b A$ όπου A είναι η επιφάνεια του δακτυλιοειδούς διακένου (annulus) και N σε rps. Επειδή συνήθως η χορδή και η ταχύτητα των πτερυγίων του στροφείου ελαττώνεται βαθμιαία από τη βάση προς το άκρο (βλέπε σχήματα 7.1, αυτό λέγεται και τραπεζοειδής διαβάθμιση-tapering), έχουμε:

$$\frac{\alpha_t}{a_r} = \frac{1}{4} \div \frac{1}{3}$$

και εκ του ασφαλούς μπορούμε να υποθέσουμε στην περίπτωση αυτή, ότι η τάση ελαττώνεται κατά τα 2/3. Έτσι έχουμε:

$$(\sigma_{cr})_{\max} \approx \frac{4}{3} \pi N^2 \rho_b A \quad [10.1]$$

Ένα σύνηθες κράμα που χρησιμοποιείται για πτερύγια αεριοστροβίλων είναι Ni-Cr-Co με $\rho_b=8000 \text{ kg/m}^3$ για το οποίο έχουμε, $(\sigma_{cr})_{\max} = 200 \text{ MN/m}^2 = 2000 \text{ bar}$.

Η δύναμη που προέρχεται από τη μεταβολή της στροφορμής του αερίου στην εφαπτομενική διεύθυνση, που παράγει και τη χρήσιμη ροπή, επίσης δημιουργεί και την καμπτική ροπή του αερίου περί την αξονική διεύθυνση x , η οποία δείχνεται στο σχήμα 10.1 ως M_w . Όπου υπάρχει μεταβολή της ορμής στην αξονική διεύθυνση (δηλαδή όταν), $C_{x3} \neq C_{x2}$ η στις πτερυγώσεις αντίδρασης ($R=0.5$) όπου υπάρχει μια πιεστική δύναμη στην

αξονική διεύθυνση $[\frac{(p_2 - p_3)2\pi r}{n_R}]$ ανά μονάδα ύψους, h_B], δημιουργείται μια επιπλέον

καμπτική ροπή εκ του αερίου, η M_a περί την εφαπτομενική διεύθυνση (σχήμα 10.1). Αναλύοντας αυτές τις καμπτικές ροπές σε συνιστώσες που δρουν γύρω από τους κύριους (principal) άξονες της διατομής, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη τάση με μια μέθοδο κατάλληλη για ασύμμετρες διατομές. Πτερύγια με συστροφή και βαθμιαία ελάττωση πάχους κατά το εκπέτασμα (taper) διαιρούνται σε λωρίδες ύψους dh και οι καμπτικές ροπές υπολογίζονται από τη μέση δύναμη που δρά σε κάθε λωρίδα. Η καμπτική τάση (αερίου) σ_{gb} θα είναι εφελκυστική στο οδηγό άκρο και στο άκρο εκφυγής και θλιπτική στην πλάτη του πτερυγίου, με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται συνήθως στο οδηγό η στο άκρο εκφυγής της βάσης. Επειδή η M_w είναι η κατά πολύ μεγαλύτερη καμπτική ροπή και ο κύριος άξονας XX (σχήμα 10.1) δεν αποκλίνει πολύ από την αξονική διεύθυνση (η γωνία ϕ είναι μικρή), μια χρήσιμη προσέγγιση για αρχικό σχεδιασμό είναι η εξίσωση (Cohen et al (1972):

$$(\sigma_{gb})_{\max} \approx \frac{m \cdot (C_{y2m} + C_{y3m})}{n_R} \cdot \frac{h_B}{2} \cdot \frac{1}{z \cdot c^3} \quad [10.2]$$

Εδώ n_R είναι ο αριθμός των πτερυγίων, οι ταχύτητες υπολογίζονται στη μέση διάμετρο, c είναι η χορδή και z είναι η ελάχιστη τιμή της ροπής αδρανείας (I_{xx}/y) της διατομής στη βάση για ένα πτερύγιο με μοναδιαία χορδή. Ο Ainley προτείνει για τον υπολογισμό του z την εξίσωση και το διάγραμμα του σχήματος 10.2.

Σχεδιάζοντας το πτερύγιο με τα κέντρα βάρους των διατομών να αποκλίνουν ελαφρώς

της ακτίνας, όπως στο σχήμα 10.3 είναι θεωρητικά δυνατό να επιτύχουμε η φυγοκεντρική καμπτική τάση να εξουδετερώνει την καμπτική τάση της αεριοροής. Πρέπει όμως να λάβουμε υπ' όψιν ότι α) αυτές οι δύο τάσεις θα αναιρούνται μόνο στο σημείο σχεδιασμού, β) η σ_{gb} είναι ημιμόνιμη τάση και γ) η φυγοκεντρική καμπτική τάση εξαρτάται έντονα από τις κατασκευαστικές ανοχές ή λάθη και από τον τύπο στήριξης του πτερυγίου στη βάση. Έτσι συνήθως η σ_{gb} δε θεωρείται ότι αναιρείται, και η φυγοκεντρική καμπτική τάση απλώς υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις μέγιστες δυνατές κατασκευαστικές ανοχές για να ελεγχθεί ότι είναι μικρή και ότι τουλάχιστο δεν ενισχύει επιπλέον τη σ_{gb} .

Έχουμε λοιπόν καθορίσει τις κύριες τάσεις, μια μόνιμη (σταθερή) φυγοκεντρική εφελκυστική τάση και μια καμπτική τάση εκ της αεριοροής, η οποία είναι περιοδικά κυμαινόμενη με συχνότητα που εξαρτάται από τις στροφές N και τους αριθμούς των πτερυγίων n_R , n_N . Θα υπάρχουν επίσης διαθέσιμα δεδομένα αντοχής σε ερπυσμό για διαφορετικά υλικά πτερυγίων πιθανόν στη μορφή του σχήματος 10.4a. Εδώ δείχνεται ο χρόνος εφαρμογής μιας σταθερής τάσης, για διάφορες θερμοκρασίες, που απαιτείται για να παράγει 0.2% παραμόρφωση λόγω ερπυσμού. Δεδομένα αντοχής σε κόπωση (fatigue) όπως π.χ. διάγραμμα Gerber θα είναι επίσης διαθέσιμα, από όπου είναι δυνατό να εκτιμηθεί η σχετική ικανότητα του υλικού να αντέξει κυμαινόμενες τάσεις. Από τέτοια δεδομένα και από εμπειρία προηγούμενων κατασκευών εν λειτουργία συνάγεται συνήθως ο καλύτερος και ασφαλέστερος τρόπος συνδυασμού των δύο τάσεων. Διαγράμματα όπως στο σχήμα 10.4b είναι επίσης χρήσιμα (Cohen et al (1972)). Η τελική κατασκευή υπόκειται σε πλήρη έλεγχο αντοχής που περιλαμβάνει θέματα όπως οι θερμικές τάσεις, η στήριξη των πτερυγίων στη βάση (σχήμα 10.5), ο υπολογισμός των δίσκων στήριξης και άλλα.

10.2 Η ΨΥΧΟΜΕΝΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Ο όρος ψυχόμενη βαθμίδα στροβίλου σημαίνει τη χρήση σημαντικής ποσότητας ψυκτικού (συνήθως αέρα) για την ψύξη του στροφείου και των ακινήτων πτερυγίων της βαθμίδας του στροβίλου. Τα κεφάλαια 2 και 3 κατέδειξαν τα προτερήματα που απορρέουν από μια αύξηση στην επιτρεπόμενη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, όσον αφορά την ελάττωση στην κατανάλωση (sfc) και την αύξηση στην ειδική ισχύ εξόδου. Τα προτερήματα αυτά είναι σημαντικά ακόμα και όταν συνυπολογιστούν οι απώλειες του ψυκτικού κυκλώματος.

Στο σχήμα 10.6 φαίνονται μέθοδοι ψύξης του πτερυγίου. Αν εξαιρεθεί η χρήση της ψύξης σταγονιδίων για μικρού χρόνου αύξηση της ώσης σε μηχανές turbojet, συστήματα με υγρά ψυκτικά δεν αποδείχθηκαν πρακτικά λόγω προβλημάτων στη διοχέτευσή τους,

διαβρώσεων και επικαθήσεων. Η κύρια και πλέον επιτυχής μέθοδος ψύξης σε μηχανές παραγωγής, είναι η εσωτερικά του πτερυγίου εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας με αέρα ψύξης. Χρησιμοποιώντας 1.5 - 2% της συνολικής αεριοροής για ψύξη ανά σειρά πτερυγίων, η θερμοκρασία των πτερυγίων μπορεί να ελαττωθεί κατά 200-300 K. Με ταυτόχρονη χρήση σύγχρονων κραμάτων μπορούμε έτσι να φτάσουμε και σε θερμοκρασίες εισόδου μέχρι και 1500-1600K. Τα πτερύγια κατασκευάζονται είτε χυτά, δημιουργώντας τα κατάλληλα ψυκτικά διάκενα, είτε σφυρήλατα όπου τα εσωτερικά διάκενα ανοίγονται με ηλεκτροχημικά τρυπάνια. Ένας μελλοντικός τρόπος ψύξης, είναι μέσω διαχύσεως αέρα, δια μέσου πορώδους επιφανείας πτερυγίων, και η μέθοδος αυτή βρίσκεται υπό συνεχή διερεύνηση.

Εδώ θα συζητήσουμε κυρίως για την ψύξη των περιστρεφόμενων πτερυγίων, διότι αυτά παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη δυσκολία. Παρ' όλα αυτά δε θα πρέπει να μας διαφεύγει ότι, στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των στροβίλων, οι οξειδώσεις είναι ένας περιοριστικός παράγων όσο και ο ερπυσμός, και έτσι συνήθως ψύχονται και στοιχεία υπό μικρές εντάσεις όπως ο στάτορας (nozzle) και τα τοιχώματα του δακτυλιοειδούς διακένου. Μια τυπική κατανομή του ψυκτικού αέρα, που απαιτείται για μια βαθμίδα στροβίλου, σχεδιασμένη να λειτουργεί σε θερμοκρασία 1500K, είναι η ακόλουθη:

τοιχώματα δακτυλιοειδούς διακένου	0.016 (του αέρα εισόδου)
πτερύγια στάτορα	0.025
πτερύγια ρότορα	0.019
δίσκος ρότορα	0.005
Σύνολο :	0.065

Μια τυπική διάταξη ψύξης πτερυγίων και μια τυπική κατασκευή των ψυκτικών διακένων πτερυγίων στάτορα δίνεται στο σχήμα 10.7 (The Jet Engine, Rolls-Royce plc (1987)).

Υπάρχουν δύο σημαντικά θέματα που αφορούν την ψύξη των πτερυγίων. Το πρώτο είναι η επιλογή μιας αεριοδυναμικής ψυκτικής διάταξης, που να απαιτεί το ελάχιστο ψυκτικό ποσό αέρα για μια δεδομένη ψυκτική απόδοση. Μια παράμετρος που περιγράφει την ψυκτική απόδοση είναι η σχετική θερμοκρασία πτερυγίων (ΣΘΠ), ή Blade Relative Temperature, (BRT), που ορίζεται ως, (Cohen et al (1972)):

$$BRT = \frac{T_b - T_{cr}}{T_g - T_{cr}}$$

όπου:

T_b = μέση θερμοκρασία πτερυγίου

T_{cr} = θερμοκρασία ψυκτικού στην είσοδο (π.χ. στην ακτίνα του τυμπάνου, r_T)

T_g = μέση ενεργός θερμοκρασία του αερίου σχετικά με το πτερύγιο (\approx στατική θερμοκρασία + 0.85 x δυναμική θερμοκρασία)

Στις ψυχόμενες βαθμίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υψηλότεροι συντελεστές φόρτισης Ψ (για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των βαθμίδων), υψηλότερο s/c (για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των πτερυγίων) και υψηλότερος συντελεστής ροής Φ (που σημαίνει πτερύγια με μικρότερη καμπυλότητα, δηλαδή επιφάνεια).

Το δεύτερο θέμα είναι η επίδραση, επί της απόδοσης του κύκλου, των απωλειών του συστήματος ψύξης. Οι πηγές απωλειών είναι:

- α) Απώλειες στο έργο του στροβίλου λόγω μείωσης της παροχής μάζας.
- β) Μη αδιαβατική εκτόνωση, και σε πολυβάθμιους στροβίλους υπάρχει και αποτέλεσμα αρνητικής επαναθέρμανσης.
- γ) Απώλειες πίεσης και ελάττωση ενθαλπίας λόγω της ανάμιξης του εκδιωκομένου ψυκτικού αέρα με την κύρια αεριοροή στα άκρα του πτερυγίου (αυτό όμως εξουδετερώνεται από την ελάττωση των κανονικών απωλειών στο άκρο του πτερυγίου - tip leakage loss).
- δ) Τα περιστρεφόμενα πτερύγια προσφέρουν κάποιο έργο στον ψυκτικό αέρα καθώς τον «αντλούν» ακτινικά.
- ε) Σε κύκλους με εναλλάκτη θερμότητας η αποδοτικότητα του εναλλάκτη μειώνεται λόγω της ελαττωμένης θερμοκρασίας.

Οι απώλειες (α) και (ε) μπορούν να συμπεριληφθούν απ' ευθείας στους υπολογισμούς κύκλων, ενώ η επίδραση των (β), (γ) και (δ) συμπεριλαμβάνεται μέσω χρήσης μιας ελαττωμένης τιμής της απόδοσης του στροβίλου. Μια εκτίμηση των τελευταίων, υποδεικνύει ελάττωση της απόδοσης του στροβίλου, κατά 1-3% της μη ψυχόμενης απόδοσης, με τη χαμηλότερη να αναφέρεται σε πτερυγώσεις ώσης (impulse), και την υψηλότερη σε πτερυγώσεις με 50% αντίδραση. Πάντως, υπολογισμοί κύκλων, υποδεικνύουν ότι η ψυχόμενη βαθμίδα οπωσδήποτε προσφέρει πλεονεκτήματα.

Προτού διερευνηθούν τα δύο προαναφερθέντα θέματα του ψυχόμενου στροβίλου είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί το απαιτούμενο ποσό αέρα για δεδομένη σχετική θερμοκρασία πτερυγίου (BRT) και αεροδυναμική διάταξη βαθμίδας. Το σχήμα 10.8 δείχνει τους συμβολισμούς που χρησιμοποιούνται για μια αρχική και μονοδιάστατη ανάλυση (Cohen et al (1972)).

Θεωρούμε τη ροή θερμότητας προς και από ένα στοιχειώδες μήκος πτερυγίου dl σε απόσταση l από τη βάση (τύμπανο). Καθώς ο ψυκτικός αέρας διέρχεται προς το άκρο του

περυγίου, αυξάνει τη θερμοκρασία του, και γίνεται λιγότερο αποδοτικός, έτσι ώστε η θερμοκρασία του περυγίου να αυξάνει από τη βάση προς το άκρο. Θα υπάρξει λοιπόν αγωγή θερμότητας κατά μήκος του εκπετάσματος, αλλά μπορεί να αγνοηθεί, λόγω της μικρής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού των περυγίων. Ισοζύγιο θερμότητας για το στοιχειώδες μήκος dl μας δίνει:

$$h_g S_g (T_g - T_b) = h_c S_c (T_b - T_c) \quad [10.3]$$

όπου h_g και h_c είναι οι συντελεστές μεταφοράς στην πλευρά του αερίου και του ψυκτικού αντίστοιχα. S_g και S_c είναι οι βρεχόμενες περιμέτροι του προφίλ του περυγίου και των ψυκτικών αγωγών.

Για την εσωτερική ροή του ψυκτικού (αέρα) έχουμε :

$$m_c c_{pc} \frac{dT_c}{dl} = h_c S_c (T_b - T_c) \quad [10.4]$$

Βρίσκουμε τη μεταβολή του T_b με το l απαλοίφοντας το T_c . Από τη 10.3 έχουμε :

$$T_c = T_b - \frac{h_g S_g}{h_c S_c} (T_g - T_b) \quad [10.5]$$

και συνεπώς :

$$\frac{dT_c}{dl} = \left(1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c}\right) \frac{dT_b}{dl}$$

Αντικαθιστώντας στη [10.4] και με $\frac{dT_b}{dl} = -\frac{d(T_g - T_b)}{dl}$ λαμβάνουμε :

$$\left(1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c}\right) \frac{d(T_g - T_b)}{dl} + \frac{h_g S_g}{m_c c_{pc}} (T_g - T_b) = 0$$

Η λύση αυτής της διαφορικής εξίσωσης με $T_b = T_{br}$ στο $l = 0$ είναι :

$$T_g - T_b = (T_g - T_{br}) e^{-\frac{kl}{L}} \quad [10.6]$$

όπου :

$$k = \frac{h_g S_g L}{m_c c_{pc} \left[1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c} \right]}$$

Για να υπολογίσουμε τη μεταβολή του T_c με το l μπορούμε να γράψουμε τη 10.5 ως εξής :

$$T_g - T_c = (T_g - T_b) \left[1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c} \right]$$

και αντικαθιστώντας τη 10.6 για το $(T_g - T_b)$ έχουμε :

$$T_g - T_c = (T_g - T_{br}) \left[1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c} \right] e^{-\frac{kl}{L}} \quad [10.7]$$

όταν $l = 0$, $T_c = T_{cr}$ και συνεπώς :

$$T_g - T_{cr} = (T_g - T_{br}) \left[1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c} \right] \quad [10.8]$$

Συνδυάζοντας τις [10.7] και [10.8] έχουμε τη μεταβολή του T_c :

$$T_g - T_c = (T_g - T_{cr}) e^{-\frac{kl}{L}} \quad [10.9]$$

Τελικά αφαιρώντας τη [10.6] από τη [10.8] έχουμε ότι :

$$T_b - T_{cr} = (T_g - T_{br}) \left[1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c} - e^{-\frac{kl}{L}} \right]$$

και διαιρώντας αυτή δια της [10.8] έχουμε τη σχετική θερμοκρασία του περυγίου :

$$\frac{T_b - T_{cr}}{T_g - T_{cr}} = 1 - \frac{e^{-\frac{kl}{L}}}{\left[1 + \frac{h_g S_g}{h_c S_c}\right]} \quad [10.10]$$

Επειδή το h_c θα είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds της ροής του ψυκτικού, και συνεπώς του m_c (και $k=f(m_c)$), η εξίσωση 10.10 δεν είναι ρητή ως προς m_c και ο συνήθης τρόπος υπολογισμού είναι να εκτιμώνται τιμές της σχετικής θερμοκρασίας του περυγίου για διάφορες τιμές του m_c .

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των συντελεστών μεταφοράς h . Πρώτα θεωρούμε το h_c . Μια συνιστώμενη σχέση είναι η παρακάτω :

$$Nu = 0.034 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.1} (Pr)^{0.4} (Re)^{0.8} \left(\frac{T_c}{T_b}\right)^{0.55} \quad [10.11]$$

και οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται στη μέση ολική (bulk) θερμοκρασία. Για αέρα, $Pr=0.71$, και για συνήθεις πρακτικές τιμές του λόγου $L/D=30+100$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται :

$$Nu = 0.020 (Re)^{0.8} \left(\frac{T_c}{T_b}\right)^{0.55} \quad [10.12]$$

Ο παραπάνω συσχετισμός ισχύει για τυρβώδη ροή και η ακρίβεια ελαττώνεται για $Re < 800$. Σ' αυτό το στάδιο του υπολογισμού, οι θερμοκρασίες T_c και T_b είναι άγνωστες, και συνήθως υποθέτονται αρχικά κάποιες τιμές, οι οποίες ελέγχονται αργότερα μέσω εκτίμησης των T_c και T_b στο $l/L=0.5$ από τις εξισώσεις [10.9] και [10.10].

Τα δεδομένα για τους συντελεστές μεταφοράς στην εξωτερική επιφάνεια του περυγίου h_g , προέρχονται από μετρήσεις σε περυγώσεις αεροσήραγγας (cascades) ή από βαθμίδες στροβίλων, με μεγαλύτερες τιμές στη δεύτερη περίπτωση, λόγω αυξημένης τύρβης. Το διάγραμμα του σχήματος 10.9 (Cohen et al (1972)) δίνει χρήσιμες καμπύλες σχεδιασμού για τη μέση τιμή του αριθμού Nusselt γύρω από το περύγιο, συναρτήσει των σπουδαιότερων παραμέτρων του περυγίου, όπως ο λόγος β_2/β_3 (η α_1/α_2 για το στάτορα). Ο Nu_g ελαττώνεται όσο αυξάνει η επιτάχυνση της ροής, επειδή το σημείο μετάβασης της στρωτής σε τυρβώδη ροή, επάνω σε κυρτή επιφάνεια, καθυστερεί λόγω της επιταχυνόμενης ροής. Οι καμπύλες δίνουν ονομαστικές τιμές Nu_g^* για συνθήκες λειτουργίας με $Re_g=2 \times 10^5$ και $\frac{T_g}{T_b} \rightarrow 1$. Ο Nu_g

τότε βρίσκεται από τη σχέση :

$$Nu_g = Nu_g^* \left(\frac{Re}{2 \cdot 10^5} \right)^x \left(\frac{T_g}{T_b} \right)^y$$

όπου το x δίνεται από τις πάνω καμπύλες του σχήματος 10.9 και το $y = 0.14 \left(\frac{Re_g}{2 \cdot 10^5} \right)^{-0.4}$.

Το χαρακτηριστικό μήκος στο Nu_g και Re_g είναι η χορδή του πτερυγίου και οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται στη θερμοκρασία T_g . Η ταχύτητα στο Re_g είναι η σχετική ταχύτητα του αερίου στην έξοδο (w_3 ή c_2 ανάλογα για κινητά ή ακίνητα πτερύγια). Για ένα σχεδιασμό βαθμίδας όλες οι ποσότητες θα είναι γνωστές, εκτός της T_b , την οποία υποθέτουμε και ελέγχουμε στο τέλος του υπολογισμού.

Με όλες τις αναγκαίες πληροφορίες τώρα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη σχετική θερμοκρασία πτερυγίου, για διάφορες τιμές της ροής του ψυκτικού m_c από την εξίσωση [10.10]. Τυπικές καμπύλες της μεταβολής της σχετικής θερμοκρασίας κατά μήκος του εκπετάσματος, για τιμές του m_c 1 και 2% της αεριοροής ανά σειρά πτερυγίων δείχνονται στο σχήμα 10.10 (Cohen et al (1972)). Το ποσό θερμότητας που απάγεται από τα πτερύγια, βρίσκεται υπολογίζοντας την T_{ct} , δηλαδή την T_c στο $l = L$ από την εξίσωση [10.9], και εκτιμώντας το ποσό θερμότητας από το $m_c c_{pc}(T_{ct} - T_{cr})$. Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε, ότι μετά τον παραπάνω προκαταρκτικό σχεδιασμό, οι τελικοί υπολογισμοί θα περιλαμβάνουν εκτίμηση και της διδιάστατης κατανομής θερμοκρασίας κατά τη διατομή του πτερυγίου για αρκετές τιμές του l/L . Συνήθως χρησιμοποιούνται πεπερασμένες διαφορές για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, και εδώ συμπεριλαμβάνεται η αγωγή θερμότητας. Το σχήμα 10.11 δείχνει μια τυπική κατανομή θερμοκρασίας, στο μέσο του εκπετάσματος ενός πτερυγίου, σχεδιασμένου να λειτουργεί με $T_g = 1500$ K και $T_{cr} = 320$ K. Όπως φαίνεται, ένα από τα κύρια προβλήματα είναι η επαρκής ψύξη του άκρου εκφυγής. Τέλος, θα πρέπει να συνεκτιμηθούν οι θερμικές τάσεις και η ανακατανομή των τάσεων λόγω ερπυσμού. Στα ψυχόμενα πτερύγια, οι θερμικές τάσεις κυριαρχούν των καμπτικών τάσεων εκ της αεριοροής, και είναι συγκρίσιμες με τις φυγοκεντρικές εφελκυστικές τάσεις.

10.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

(Hawthorne and Olson (1960), Horlock (1973), Γούλιος (1980), Dixon (1978), Cohen et al (1972), Boyce (2002))

Η ασταθής λειτουργία του συμπιεστή μπορεί να αναφέρεται σε τρία φαινόμενα, την απώλεια στήριξης (compressor stall), την πάλμωση (compressor surge) και τον στραγγαλισμό της ροής του συμπιεστή (compressor choke) και όλα αυτά μπορεί να προκαλούν το ένα το άλλο η και να συνυπάρχουν.

Η απώλεια στήριξης (stall) είναι τριών ειδών, περιστρεφόμενη απώλεια στήριξης (rotating stall), απώλεια στήριξης πτερυγίου (individual blade stall) και απώλεια στήριξης πτερυγισμού (stall flutter). Τα δύο πρώτα φαινόμενα είναι αεροδυναμικής φύσεως ενώ το τρίτο είναι φαινόμενο σχετιζόμενο με την αεροελαστικότητα.

Η απώλεια στήριξης πτερυγίου (individual blade stall) αναφέρεται στη περίπτωση που μια ολόκληρη περιφερειακή σειρά πτερυγίων (blade row) υφίσταται περιφερειακή απώλεια στήριξης η οποία δεν συνυπάρχει με κάποιον μηχανισμό διάδοσης, τουλάχιστον αρχικά, ανάντι και κατάντι του συμπιεστή, είναι δε πιο σπάνιο φαινόμενο από τις άλλες περιπτώσεις. Η απώλεια στήριξης πτερυγισμού (stall flutter) οφείλεται σε αρχική απώλεια στήριξης ενός η περισσοτέρων πτερυγίων, η οποία δημιουργεί απόρριψη στροβίλων Karman στο απόρευμα με συχνότητα που όταν συντονίζεται με την ιδιοσυχνότητα των πτερυγίων προκαλεί το φαινόμενο του πτερυγισμού.

Η περιστρεφόμενη απώλεια στήριξης (rotating stall) τέλος, είναι κρίσιμης σπουδαιότητας για τους συμπιεστές, επειδή περιορίζει το διαθέσιμο λόγο πίεσης σε οποιαδήποτε σχεδίαση. Από την άποψη ενός μεμονωμένου πτερυγίου, η απώλεια στήριξης απλώς σημαίνει αποκόλληση της ροής (flow separation), συνήθως από την επιφάνεια υποπίεσης, αλλά οι αλληλεπιδράσεις του ενός με τα άλλα πτερύγια και με όλο το πεδίο ροής, είναι τόσες πολλές, ώστε η συμπεριφορά του συμπιεστή υπό απώλεια στήριξης να είναι πολύ περίπλοκο φαινόμενο. Για λόγους, που ακόμη είναι υπό διερεύνηση, η απώλεια στήριξης δε συμβαίνει ομοιόμορφα στο δακτύλιο του συμπιεστή, αλλά μάλλον σε μια σειρά ομοιόμορφα διανεμημένων κυψελών, που μπορεί να είναι κοντά στη βάση η στην κορυφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.12, όπου οι σκιασμένες επιφάνειες αντιπροσωπεύουν κυψέλες απώλειας στήριξης. Οι περιοχές απώλειας στήριξης διαδίδονται περιφερειακά, σε σχέση με τη σειρά πτερυγίων που έχει υποστεί απώλεια στήριξης, με μια ταχύτητα που είναι κλασματικό μέρος της εφαπτομενικής ταχύτητας ροής, πάντα σε σχέση με τη σειρά πτερυγίων σε απώλεια στήριξης. Γενικά σε απόλυτες συντεταγμένες, οι κυψέλες κινούνται στη διεύθυνση περιστροφής, σε κλασματικό μέρος της περιστροφικής ταχύτητας (συνήθως 1/2) και γενικά με ταχύτητα 20-70% της U_p . Αυτό σημαίνει ότι οι κυψέλες κινούνται σε σχέση και με τα

σταθερά και τα κινητά πτερύγια και μπορεί να διεγείρουν καταστρεπτικούς κραδασμούς σε κάθε μια η και στις δύο σειρές πτερυγίων. Γι' αυτό και το φαινόμενο, πολλές φορές, καλείται και περιστρεφόμενη απώλεια στήριξης (rotating stall). Ο λόγος για τη διάδοση μπορεί να εξηγηθεί αν καθορισθεί ο τρόπος, με τον οποίο η ροή αποκλίνει, όταν σε ένα πτερύγιο εμφανίζεται απώλεια στήριξης. Όπως είναι σχεδιασμένο στην κορυφή του σχήματος 10.12, η περιοχή απώλειας στήριξης, που εμφανίζεται στο διάκενο 2-3, περιορίζει την ροή και την αναγκάζει να αποκλίνει στις γειτονικές διόδους 1-2 και 3-4. Η απόκλιση αυτή αυξάνει τη γωνία προσβολής στο πτερύγιο 3 στη διεύθυνση της εφαπτομενικής ταχύτητας και τη μειώνει στο πτερύγιο 1 στην αντίθετη, οπότε το πρώτο τείνει να πέσει σε απώλεια στήριξης, και μεταφέρει έτσι την απώλεια στήριξης στη διεύθυνση της εφαπτομενικής ταχύτητας. Ενώ ένας αριθμός γραμμικοποιημένων αναλύσεων έχει προσδιορίσει αρκετά καλά την ταχύτητα διάδοσης των κυψελών, δεν υπάρχει ικανοποιητική τεχνική για τον προσδιορισμό του αριθμού των κυψελών με απώλεια στήριξης, αφού δεν υπάρχει τεχνική για τον προσδιορισμό της συχνότητας. Πολλοί συμπιεστές λειτουργούν με περιστρεφόμενη απώλεια στήριξης σε ορισμένα σημεία του εύρους (της παρ'όλα αυτά ευσταθούς) λειτουργίας τους, ιδίως σε χαμηλές ταχύτητες, όπου οι πρώτες βαθμίδες τείνουν να πέσουν σε απώλεια στήριξης.

Απώλεια στήριξης παρουσιάζεται στις υψηλές ταχύτητες, όταν η παροχή μειωθεί κάτω από την τιμή σχεδιασμού. Όπως προαναφέρθηκε, συνήθως αρχίζει σαν "μερική απώλεια στήριξης", δηλαδή καλύπτει μόνο μέρος του πτερυγίου η περιφερειακά ένα μικρό αριθμό πτερυγίων. Καθώς η παροχή μειώνεται, ο αριθμός των κυψελών αυξάνει και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή αρχίζει να ελαττώνεται όπως στο σχήμα 10.12. Σε κάποια παροχή, μπορεί να γίνει μια απότομη μετάπτωση σε ολική απώλεια στήριξης, στην οποία τα πτερύγια εργάζονται με απώλεια στήριξης σε όλο τους το εύρος, και αυτό οδηγεί σε μια επιπρόσθετη πτώση του λόγου πίεσης. Αν τώρα επιτραπεί στην παροχή να αυξηθεί, η μετάπτωση σε μερική απώλεια στήριξης συμβαίνει σε υψηλότερη παροχή από ότι στην αρχική μετάπτωση, οπότε υπάρχει μια υστέρηση στην αναπροσαρμογή λόγου πίεσης και παροχών. Ας δούμε τώρα αυτή την συνέχεια γεγονότων πιο συγκεκριμένα.

Όπως θα συζητήσουμε εκτενώς στο κεφάλαιο 11.1, η λειτουργική συμπεριφορά ενός συμπιεστή, για ένα εύρος λειτουργικών συνθηκών, παρουσιάζεται σε ένα διάγραμμα του λόγου πίεσης, συναρτήσει της «αδιάστατης» (βλέπε κεφάλαιο 3.2) παροχής μάζας, δηλ.

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = f\left(\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}\right).$$

Ας θεωρήσουμε το τι συμβαίνει σε ένα τέτοιο διάγραμμα, όταν μια

βαλβίδα, τοποθετημένη στη γραμμή παροχής ενός μονοβάθμιου συμπιεστή εργαζόμενου υπό σταθερές στροφές, αρχίζει να ανοίγει (σχήμα 10.12γ). Με κλειστή τη βαλβίδα και την παροχή μηδέν, ο λόγος πίεσης θα έχει κάποια τιμή, όπου θα αντιστοιχεί στο υψομετρικό που

δημιουργούν τα πτερύγια στην εγκλωβισμένη ροή κατάντι αυτών. Καθώς η βαλβίδα ανοίγει και αρχίζει η παροχή, ο λόγος πίεσης αρχίζει να αυξάνει, επειδή τα διάκενα των πτερυγίων, σαν διαχύτες, συνεισφέρουν στην αύξηση της πίεσης. Σε κάποιο σημείο B, όπου η απόδοση φτάνει στη μέγιστη τιμή της, ο λόγος πίεσης φθάνει σε ένα μέγιστο, και οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της παροχής θα προκαλέσει πτώση στο λόγο πίεσης. Για παροχές πολύ μεγαλύτερες της τιμής σχεδιασμού, οι γωνίες ροής θα διαφέρουν πολύ από τις γωνίες των πτερυγίων, με συνέπεια να έχουμε αποκολλήσεις και δραστική πτώση της απόδοσης. Σ' αυτήν την υποθετική συνήθως περίπτωση ο λόγος πίεσης θα πέσει στο 1, σημείο C, όταν η βαλβίδα είναι πλήρως ανοικτή και όλη η ισχύς καταναλώνεται για να υπερνικήσει τις απώλειες εσωτερικής τριβής. Στην πράξη, το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης από το A στο B (σχήμα 10.12γ) δεν επιτυγχάνεται, λόγω του φαινομένου της πάλμωσης ή κυμάτωσης (surge). Η πάλμωση (surge) συνδέεται με μια απότομη πτώση στην αποδιδόμενη πίεση, και με ένα βίαιο αεροδυναμικό παλμό (ταλάντωση), που μεταδίδεται δια μέσου όλης της μηχανής. Μια πιθανή φαινομενολογική εξήγηση της πάλμωσης είναι η ακόλουθη: εάν υποθέσουμε ότι ο συμπιεστής λειτουργεί σε κάποιο σημείο D, στη χαρακτηριστική καμπύλη του σχήματος 10.12γ, που έχει αρνητική κλίση, τότε μια ελάττωση της παροχής θα συνοδευτεί από μείωση της αποδιδόμενης πίεσης. Εάν η πίεση του αέρα, κατάντι του συμπιεστή, δεν πέσει αρκετά γρήγορα, ο αέρας θα τείνει να αναστρέψει τη διεύθυνσή του, και να εισρεύσει πίσω στη διεύθυνση της δημιουργούμενης βαθμίδας πίεσης. Όταν συμβαίνει αυτό, φυσικά εμφανίζεται μια πολύ γοργή ελάττωση του λόγου πίεσης. Εν τω μεταξύ, η πίεση κατάντι του συμπιεστή έχει πέσει αρκετά, έτσι ώστε ο συμπιεστής να είναι τώρα σε θέση να ανακτήσει την λειτουργία του. Ο κύκλος των γεγονότων αυτών επαναλαμβάνεται σε υψηλή συχνότητα.

Αυτή η υστέρηση στην αναπροσαρμογή λόγου πίεσης και παροχών, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά και την ικανότητα απορρόφησης της παροχής από τον καυστήρα ή τα άλλα συστήματα στα οποία ο συμπιεστής παροχετεύει αέρα, είναι η πιο πιθανή αιτία του φαινομένου της πάλμωσης/κυμάτωσης. Έστω για παράδειγμα, ότι ο συμπιεστής αποδίδει τον αέρα στο χώρο του καυστήρα μέσω μιας διόδου όπως στο σχήμα 10.13. Ο συνδυασμός του όγκου και της διόδου μπορεί να επενεργήσει σαν διεγέρτης (που ονομάζεται και διεγέρτης Helmholtz), όπου ο όγκος παίζει το ρόλο του ελατηρίου και το ρευστό στη διόδο το ρόλο της μάζας, στο μηχανικό ανάλογο. Η ταλάντωση εισάγει ροές προς και από τη διόδο, και αυτό θα εμφανισθεί σαν αύξηση και μείωση στην παροχή, $\frac{m\sqrt{T_{02}}}{P_{02}}$, που προσδίδεται η αφαιρείται σε κάποια μέση τιμή. Αν ο

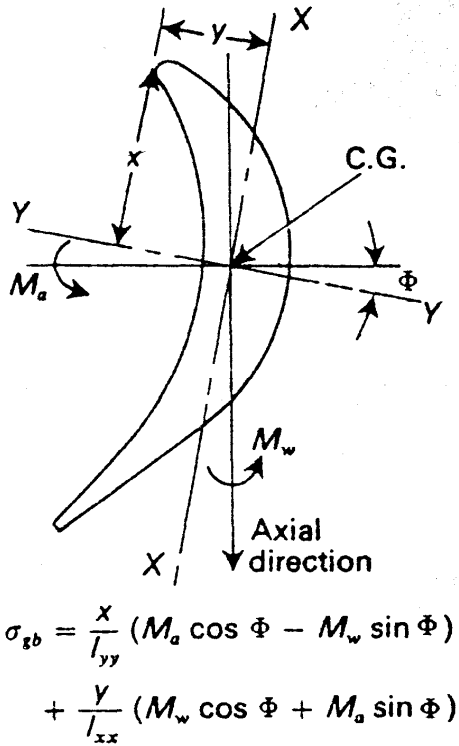
συμπιεστής λειτουργεί στο σημείο 1 του σχήματος 10.12β και ο ταλαντωτής διεγερθεί λόγω

κάποιας διατάραξης, με αποτέλεσμα μια αρνητική ταχύτητα (οπότε και το $\frac{m\sqrt{T_{02}}}{P_{02}}$ μειώνεται) να αναπτυχθεί στην έξοδο του συμπιεστή, ο συμπιεστής ξαφνικά θα πέσει σε πλήρη απώλεια στήριξης, όπως φαίνεται στο χρόνο 0 στο σχήμα 10.13. Η χαμηλότερη πίεση θα υπάρξει έως ότου η ταλάντωση οδηγήσει σε μια θετική διατάραξη του $\frac{m\sqrt{T_{02}}}{P_{02}}$, οπότε ο συμπιεστής πέφτει σε μερική απώλεια στήριξης και αποδίδει υψηλότερη πίεση. Στο μεταξύ η πίεση στον καυστήρα P_4 αυξομειώνεται με τη ταχύτητα κατά προσέγγιση εκτός φάσεως κατά $\pi/2$. Εύκολα φαίνεται ότι, η P_3 είναι μεγάλη, όταν το ρευστό κινείται στο χώρο, και χαμηλή όταν κινείται εκτός, οπότε η ταλάντωση θα εμφανισθεί έτσι απλά. Στη πραγματικότητα, φαινόμενα διασκορπίσεως και άλλα φαινόμενα οδηγούν σε μια ταλάντωση σε ορισμένο εύρος, που ονομάζεται «ταλάντωση ανακούφισης» (relaxation). Όπως θα δούμε και στο κεφάλαιο 11.1, για κάθε σταθερή τιμή των στροφών του συμπιεστή μπορεί να ευρεθεί, στο διάγραμμα $\frac{P_{02}}{P_{01}} = f\left(\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}\right)$, το σημείο που εμφανίζεται η πάλμωση (περίπου μεταξύ D και B, σχήμα 10.12γ) και έτσι να σχηματισθεί μια καμπύλη πάλμωσης (surge line), για το πλήρες εύρος λειτουργίας του συμπιεστή επάνω στο χαρακτηριστικό διάγραμμα λειτουργίας του.

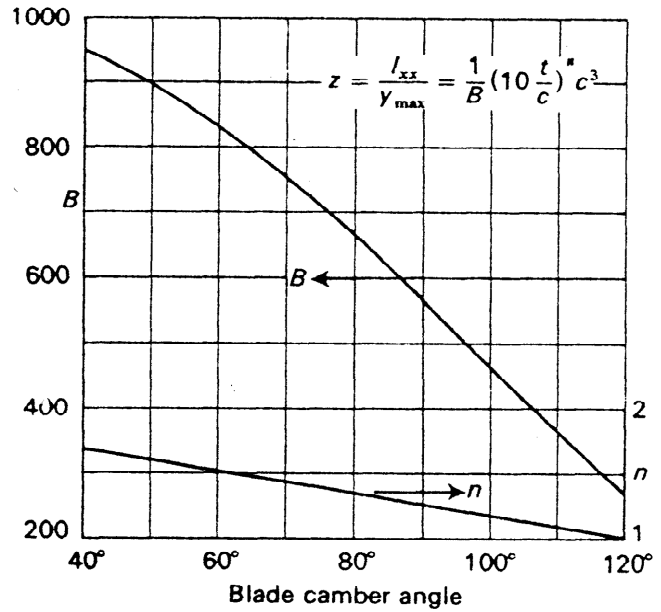
Η ταλάντωση λόγω πάλμωσης μπορεί να αναπτυχθεί σε τέτοια εύρη, ώστε να προκαλέσει σβήσιμο του κινητήρα και, αν συνεχισθεί, να προκαλέσει βλάβες στα πτερύγια του συμπιεστή λόγω των δονήσεων, αύξηση στη θερμοκρασία των καυσαερίων του θαλάμου καύσης και, όπως προαναφέρθηκε μείωση της απόδοσης του συμπιεστή μέχρι και 20%, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να εργασθεί ο κινητήρας αυτοδύναμα, γι' αυτό και πρέπει να αποφεύγεται οπωσδήποτε σε κανονική λειτουργία του κινητήρα.

Ένας ακόμη περιορισμός στο εύρος λειτουργίας στην σειρά των γεγονότων της καμπύλης του σχήματος λόγου πιέσεων – παροχής μάζας του σχήματος 10.12 τίθεται από το σημείο στραγγαλισμού (choke point), E. Καθώς αυξάνει η ροή μάζας και μειώνεται η πίεση η πυκνότητα ελαττώνεται και σε κάποια ελάχιστη διατομή των διακένων του συμπιεστή η ροή γίνεται ηχητική (Mach=1) με αποτέλεσμα να μη μπορεί να υπάρξει άλλη αύξηση της ροής μάζας, το δε σημείο αυτό λειτουργίας λέγεται σημείο στραγγαλισμού.

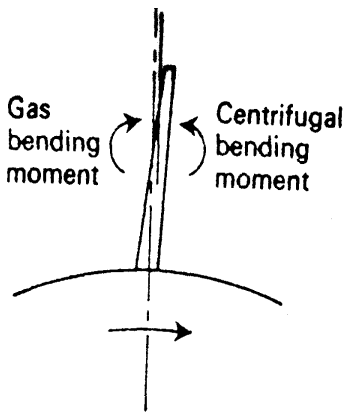
Όλα τα σημεία οριακής λειτουργίας λόγω πάλμωσης στην αριστερή πλευρά μιας συστοιχίας καμπυλών σε διάγραμμα λόγου πιέσεων – παροχής μάζας αποτελούν την γραμμή πάλμωσης (surge line) (ιδέ και κεφ. 11) ενώ όλα τα σημεία οριακής λειτουργίας λόγω στραγγαλισμού στην δεξιά πλευρά της συστοιχίας των καμπυλών αποτελούν την γραμμή στραγγαλισμού (choke line).



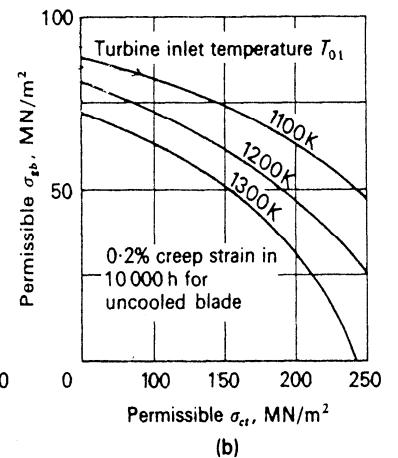
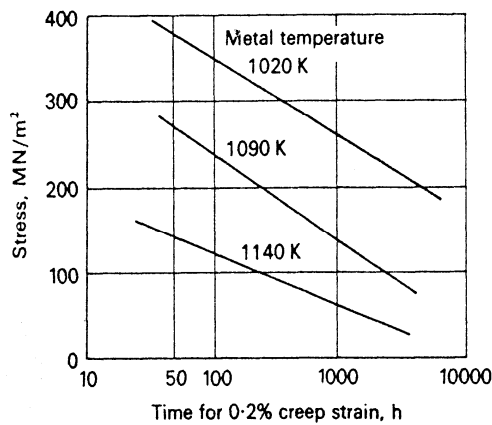
Σχήμα 10.1 Καμπτικές τάσεις που ασκούνται στο πτερόγιο λόγω τη ροής.



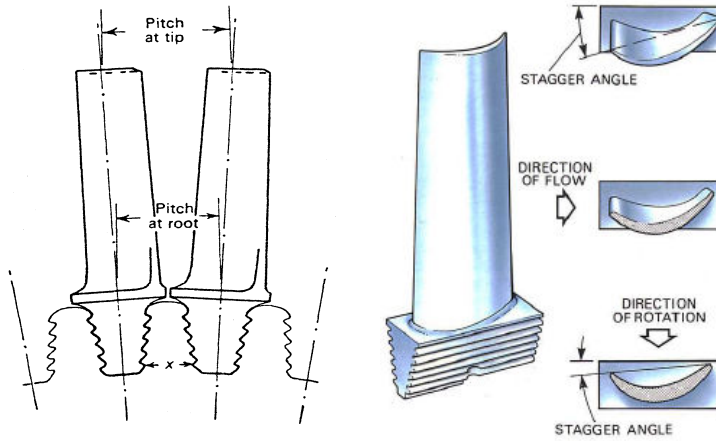
Σχήμα 10.2 Διάγραμμα υπολογισμού των ροπών αδρανείας της διατομής



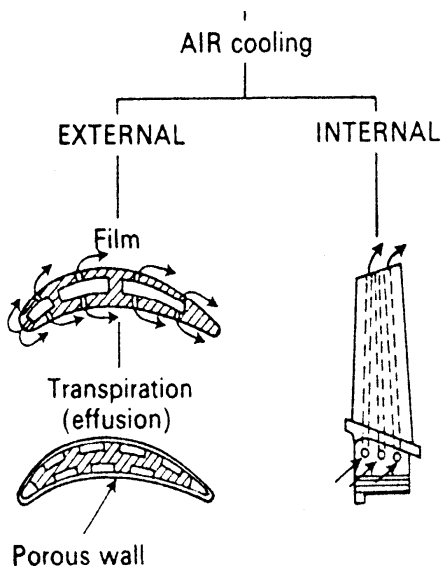
Σχήμα 10.3 Σχηματική παράσταση καμπτικών ροπών που ασκούνται στο πτερόγιο λόγω της αεριοροής και της περιστροφής



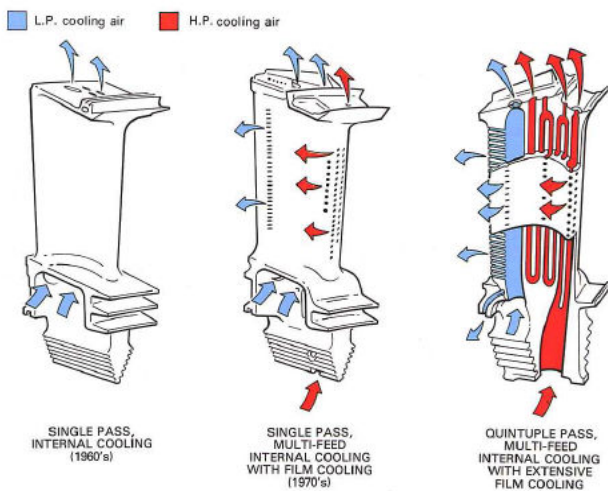
Σχήμα 10.4 Διάγραμμα δεδομένων ερπυσμού για αρχικό σχεδιασμό



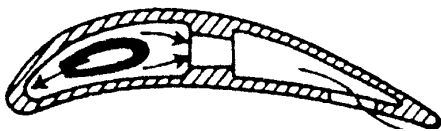
Σχήμα 10.5 Τυπική μέθοδος άρμωσης των πτερυγίων επί του δίσκου

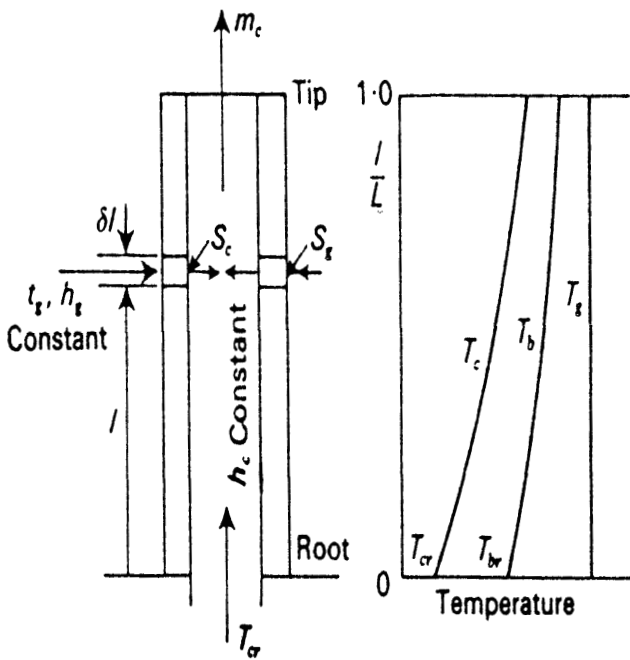


Σχήμα 10.6 Μέθοδοι ψύξης πτερυγίων

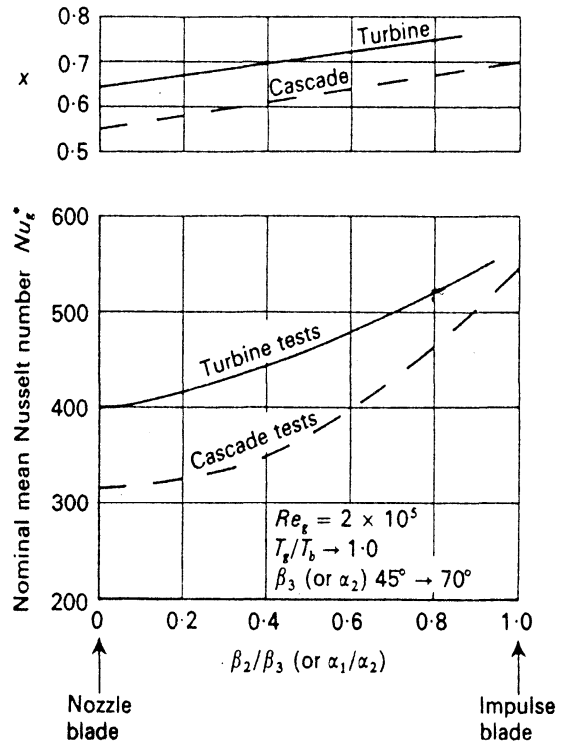


Σχήμα 10.7 Τυπική διάταξη ψύξης πτερύγωσης και στάτορα

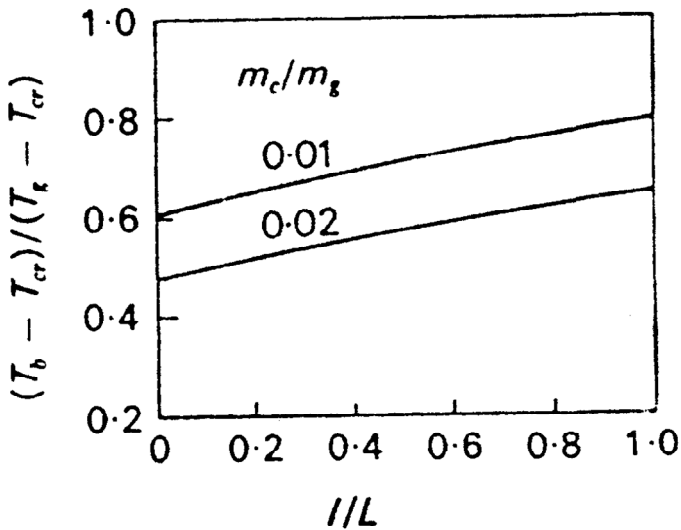




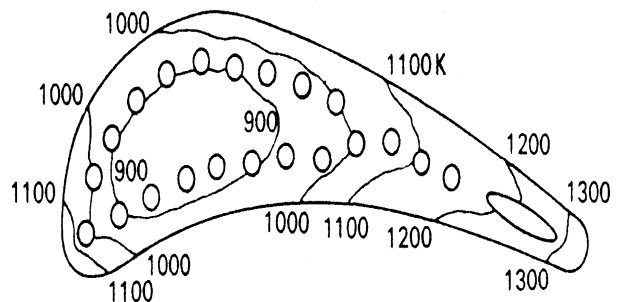
Σχήμα 10.8 Μοντέλο μονοδιάστατης εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας για ψύξη πτερυγίου με αέρα



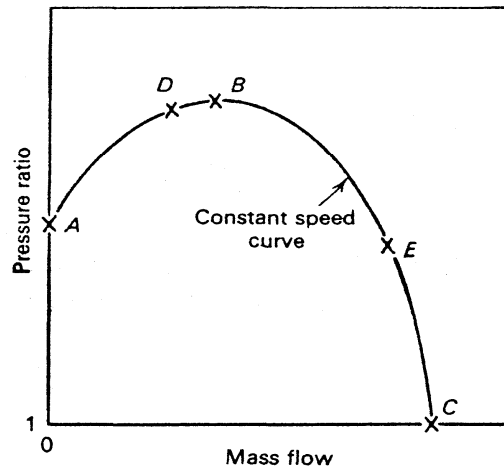
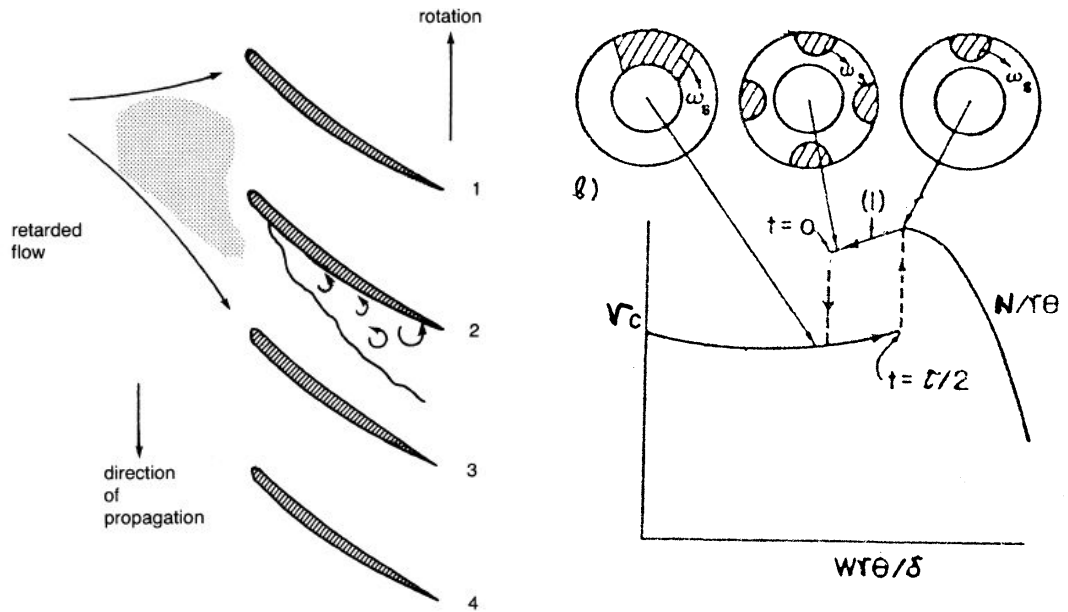
Σχήμα 10.9 Διάγραμμα υπολογισμού μεταφοράς θερμότητας σε πτερύγια



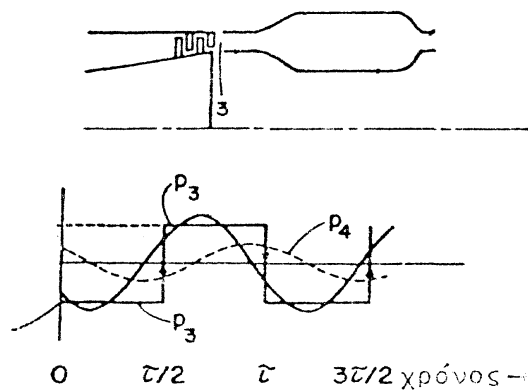
Σχήμα 10.10 Τυπική κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του εκπετάσματος



Σχήμα 10.11 Τυπική κατανομή θερμοκρασίας σε διατομή του πτερυγίου



Σχήμα 10.12 Χαρακτηριστικά απώλειας στήριξης συμπίεστη αξονικής ροής



Σχήμα 10.13 Μηχανισμός διέγερσης πάλμωσης μέσω δημιουργίας απώλειας στήριξης