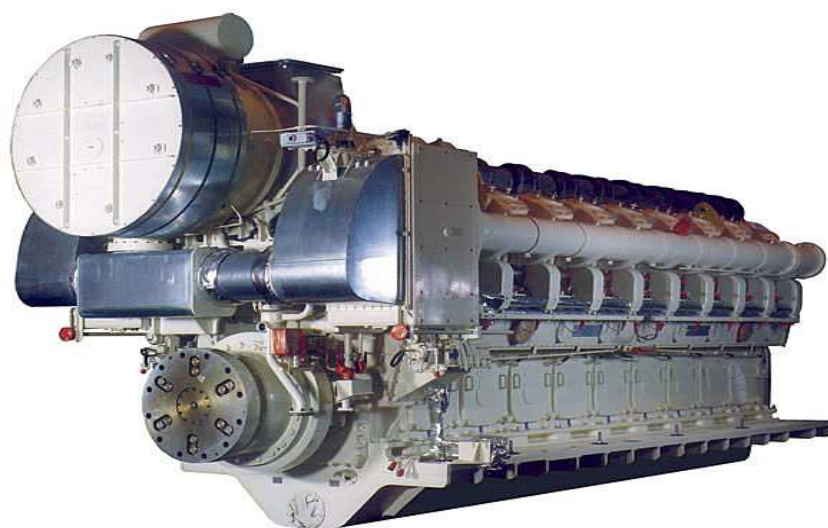




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΜΟΝΩΜΕΝΟΥ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ



ΠΙΤΣΙΡΙΚΟΥ ΕΙΡΗΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : **Ε.Γ.ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ** , ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί τον επίλογο των σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ευάγγελο Γιακουμή, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών και επιβλέπων αυτής της εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα ως προς την μελλοντική επαγγελματική μου απασχόληση. Καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας η καθοδήγηση του υπήρξε άμεση και συνεχής και οι γνώσεις του πολύτιμες. Δε θα μπορούσα φυσικά να μην ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κ. Ρακόπουλο και τον Καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα. Η διδασκαλία τους στα μαθήματα Μ.Ε.Κ. Ι, Μ.Ε.Κ. ΙΙ, και Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ σε συνεργασία με τον κ. Γιακουμή, καθώς και το πλούσιο συγγραφικό τους έργο αποτέλεσαν κίνητρο για την περαιτέρω ενασχόληση μου με την μελέτη των κινητήρων.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω αρκετούς συμφοιτητές μου με τους οποίους συνεργάστηκα και πέρασα πολύ όμορφες στιγμές κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα τον φίλο και συνάδελφο Γιώργο Καρπούζα και τη φίλη μου Εύη για την πολύ σημαντική βοήθεια που μου προσέφεραν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου, Γιάννη και Ελευθερία, για την αμέριστη στήριξη, την πίστη και την αγάπη τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	10
2.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή.....	10
2.2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.....	10
2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	11
2.4. Μεταφορά θερμότητας μεταξύ αερίων και εσωτερικού τοιχώματος κυλίνδρου	11
2.5. Μεταφορά θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο δια μέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου και της μόνωσης	17
2.5.1. Πρόβλημα αγωγής θερμότητας μόνιμης κατάστασης.	18
2.5.2. Πρόβλημα αγωγής θερμότητας χρονικά μεταβαλλόμενο	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΜΕΚ.....	23
3.1. Partially Stabilized Zirconia.....	23
3.2 Νιτρίδιο του πυριτίου – SN.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	35
4.1. Μεταβατική λειτουργία στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel.....	35
4.2 . Απόκριση του κινητήρα κατά την απότομη αύξηση φορτίου	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	51
5.1. Ονομαστική Κατάσταση	52
5.2. Επίδραση μεταβολής επιβαλλόμενου φορτίου.....	55
5.2.1. Σύγκριση των τριών εξεταζόμενων παραμέτρων για τα τρία διαφορετικά μεγέθη φορτίου και τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).	61
5.3. Είδος επιβαλλόμενου φορτίου	64
5.3.1. Σύγκριση των τριών εξεταζόμενων παραμέτρων για τα τρία διαφορετικά είδη φορτίου και τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).....	70
5.4. Χρονική διάρκεια επιβολής του φορτίου.....	73

5.4.1. Σύγκριση των τριών εξεταζομένων παραμέτρων για τους τρεις χρόνους άσκησης του φορτίου και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).....	78
5.5. Όγκος πολλαπλής εξαγωγής	81
5.5.1. Σύγκριση των τριών παραμέτρων για τους τρεις εξεταζόμενους όγκους πολλαπλής εξαγωγής και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).....	87
5.6. Επιφάνεια στροβίλου	89
5.6.1. Σύγκριση των τριών παραμέτρων για τις τρεις εξεταζόμενες επιφάνειες στροβίλου και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).....	95
5.7. Άνοιγμα βαλβίδας εξαγωγής καυσαερίων	98
5.7.1. Σύγκριση των τριών παραμέτρων για τις τρεις εξεταζόμενες γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).....	103
5.8. Συμπεράσματα	106
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
A	Επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας	m^2
A_p	Παράπλευρη επιφάνεια εμβόλου	m^2
c_w	Θερμοχωρητικότητα	J/kgK
D	Διάμετρος εμβόλου	m
h_c	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ψυκτικού μέσου	W/m^2K
h_g	Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας αερίου	W/m^2K
\bar{h}_g	Μέση τιμή συντελεστή μετάδοσης θερμότητας αερίου	W/m^2K
k_g	Συντελεστής συναγωγής	W/mK
k_{ins}	Θερμική αγωγιμότητα μόνωσης	W/mK
k_w	Θερμική αγωγιμότητα τοιχώματος κυλίνδρου	W/mK
ℓ	Μήκος διωστήρα	m
n_{tc}	Ταχύτητα περιστροφής υπερπληρωτή	rpm
\bar{p}_e	Μέση πραγματική πίεση	bar
p_{max}	Μέγιστη πίεση αερίου στο θάλαμο καύσης	bar
\dot{Q}	Ρυθμός μετάδοσης θερμότητας (θερμοροή) στο τοίχωμα του κυλίνδρου	J/s
\dot{Q}_p	Χρονικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης θερμότητας	J/s
r	Ακτίνα στροφάλου	m
Re	Αριθμός Reynolds	-
S_{ins}	Πάχος μόνωσης	m
S_w	Πάχος τοιχώματος κυλίνδρου	m
T_c	Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου	K

T_{max}	Μέγιστη θερμοκρασία αερίου στο θάλαμο καύσης	K
T_p	Χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία	K
$T_{p,g}$	Χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία αερίου καύσης	K
$T_{p,w}$	Χρονικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου	K
T_{gas} ή T_g	Θερμοκρασία αερίου	K
T_w	Θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου	K
$T_{w,g}$	Θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης	K
$\bar{T}_{w,g}$	Μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης	K
$T_{w,c}$	Θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του ψυκτικού μέσου	K
$\bar{T}_{w,c}$	Μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του ψυκτικού μέσου	K
$\bar{T}_{w,m}$	Μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου ανάμεσα στο υλικό της μόνωσης και το χυτοσίδηρο	K
X	Μετατόπιση εμβόλου	m
A	Θερμική διαπερατότητα	m^2/s
α_w	Θερμική διαπερατότητα τοιχώματος κυλίνδρου	m^2/s
λ_α	Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου	-
μ_g	Δυναμικό ιξώδες αερίου	$Pa \cdot s$
σ	Σταθερά Stefan-Boltzman: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$	W/m^2K^4
ρ_w	Πυκνότητα τοιχώματος κυλίνδρου	kg/m^3
φ	Γωνία στροφάλου	0
Φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα	-

Αρτικόμεξα	Επεξήγηση
LHR	Κινητήρες χαμηλής απόρριψης θερμότητας (Low Heat Rejection Engine)
NO _x	Οξειδία του αζώτου
PSZ	Partially Stabilized Zirconia ή Plasma Sprayed Zirconia
SN	Νιτρίδιο του πυριτίου (Silicon Nitride)
TZP	Τετραγωνική κρυσταλλική δομή (Tetragonal Zirconia Polycrystal)
ΑΝΣ	Άνω Νεκρό Σημείο
ΚΝΣ	Κάτω Νεκρό Σημείο
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
4-X	Τετράχρονος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πιο ελκυστικό χαρακτηριστικό των κινητήρων Diesel είναι η μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμου, η οποία μπορεί να υπερβεί το 40% σε εφαρμογές οχημάτων και ακόμα και το 50% στους μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες ή στη παραγωγή ενέργειας. Επομένως, τα οχήματα που εξοπλίζονται με Diesel κινητήρες επιτυγχάνουν πολύ χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου και μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, σε σχέση με τους αντίστοιχους βενζινοκινητήρες. Συνεπώς, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση χρημάτων κατά τη διάρκεια ζωής του οχήματος. Επιπλέον οι κινητήρες Diesel δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις μεταβολές του λόγου αέρα καυσίμου λ_α και δεν παρουσιάζουν κρουστική καύση, ενώ έχουν μεγάλη ροπή και υψηλή αντοχή σχετικά με τις μέγιστες πιέσεις και θερμοκρασίες μέσα στον κύλινδρο.

Συνήθως η μελέτη των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης επικεντρώνεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Παρόλα αυτά τόσο οι κινητήρες των αυτοκινήτων όσο και των φορτηγών λειτουργούν συνήθως υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες. Στην πραγματικότητα μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της λειτουργίας των οχημάτων πραγματοποιείται υπό σταθερές

συνθήκες. Επιπλέον, οι πιο κρίσιμες συνθήκες που αντιμετωπίζουν τόσο οι βιομηχανικοί όσο και οι ναυτικοί κινητήρες απαντώνται κατά τη μεταβατική λειτουργία.

Αρκετά χρόνια τώρα, η μεγάλη πλειοψηφία των κινητήρων Diesel υπερπληρώνονται και αυτή η τάση είναι σίγουρο ότι θα συνεχιστεί καθώς η υπερπλήρωση των Diesel κινητήρων αυξάνει την πραγματική ισχύ πέδης (specific brake power) και εξασφαλίζει μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου και μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Δυστυχώς όμως η μεταβατική λειτουργία των υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel συνδέεται με αργούς ρυθμούς επιτάχυνσης και κακή οδηγική συμπεριφορά, υψηλές εκπομπές ρύπων και αυξημένα επίπεδα θορύβου κατά την καύση. Η αιτία των παραπάνω συμπτωμάτων ονομάζεται υστέρηση του υπερπληρωτή (turbocharger lag) και αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 4.

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας, τόσο στην περίπτωση κινητήρων Diesel όσο και βενζινοκινητήρων, έχει ενταθεί μέσω των επιτυχών προσομοιώσεων των θερμοδυναμικών κύκλων και των ερευνών των θερμικών φορτίσεων σε διάφορες περιοχές μέσα στον θάλαμο καύσης. Η μετάδοση θερμότητας και στους δύο τύπους κινητήρων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, καθώς τα σχετικά φαινόμενα είναι μεταβατικά ακόμα και κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (steady state), τρισδιάστατα και υπόκεινται σε απότομες εναλλαγές πίεσης και θερμοκρασίας των αερίων μέσα στον κύλινδρο.

Το ενδιαφέρον για ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας οδήγησε στους κινητήρες χαμηλής απόρριψης θερμότητας (LHR). Στόχος των κινητήρων αυτών είναι η εξάλειψη της ανάγκης χρήσης συστήματος ψύξης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μόνωσης των τοιχωμάτων του κυλίνδρου, της κυλινδροκεφαλής, των βαλβίδων και της κορώνας του εμβόλου. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση στην καθυστέρηση ανάφλεξης, στο θόρυβο που παράγεται κατά την καύση καθώς και στις εκπομπές των υδρογονανθράκων και των σωματιδίων. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αύξηση της ενέργειας των καυσαερίων, η οποία μπορεί να ανακτηθεί μέσω της υπερπλήρωσης του κινητήρα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μόνωσης αποτελεί η μείωση του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης, ο οποίος συμβάλλει στη μείωση της απόδοσης ισχύος. Επίσης, παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα εκπομπών NOx, χειροτέρευση της καύσης και των ιδιοτήτων του λιπαντικού ελαίου.

Οι εναλλαγές της θερμοκρασίας και της ροής θερμότητας στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης μπορούν να χωρισθούν σε δυο κύριες κατηγορίες:

- A) Τις μακροπρόθεσμες (long-term), αποτέλεσμα της μακροκλίμακας (τάξης δευτερολέπτων) των μη-περιοδικών εναλλαγών της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ή/και του φορτίου.
- B) Τις βραχυπρόθεσμες (short-term), αποτέλεσμα της διακύμανσης της πίεσης των αερίων και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια ενός χρόνου του κινητήρα, έχοντας χρονική περίοδο τάξης ms.

Παρόλο που τις τελευταίες δεκαετίες η μοντελοποίηση των κινητήρων Diesel και η πειραματική έρευνα έχουν βοηθήσει αρκετά στη μελέτη της μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα, οι έρευνες που σχετίζουν τις εναλλαγές θερμοκρασιών με τη μεταβατική λειτουργία είναι σχετικά περιορισμένες.

Σε αντίθεση με τις μακροπρόθεσμες, οι βραχυπρόθεσμες εναλλαγές της θερμοκρασίας αναπτύσσονται πλήρως κατά τη διάρκεια κάθε χρόνου λειτουργίας του κινητήρα. Επομένως, οι βραχυπρόθεσμες εναλλαγές θερμοκρασίας μπορούν να εμφανίσουν μεγάλες τιμές μετά από μία απότομη αύξηση φορτίου, διότι η τροφοδοσία καυσίμου και ιδιαίτερα οι θερμοκρασίες των αερίων αυξάνονται σημαντικά σε διάρκεια λίγων δευτερολέπτων. Στην περίπτωση λοιπόν απότομης αύξησης του φορτίου, οι συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα είναι αρκετά δυσμενείς και μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε αστοχία του υλικού.

Στα επόμενα Κεφάλαια ερευνάται η διάδοση των βραχυπρόθεσμων εναλλαγών της θερμοκρασίας κατά τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα, μετά από απότομη μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου. Επίσης, εξετάζεται η χρήση δύο μονωτικών υλικών (silicon nitride, partially stabilized zirconia) στα τοιχώματα του κυλίνδρου, σε διάφορα πάχη μόνωσης. Σκοπός είναι η κατανόηση του πολύπλοκου μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας και η εξακρίβωση του μεγέθους των μεταβολών της θερμοκρασίας. Για την θεωρητική μελέτη της μετάδοσης θερμότητας εσωτερικά μιας «αδιαβατικής» MEK, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ενός κινητήρα Diesel, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο MEK της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, ενώ χρησιμοποιήθηκε και εξελίχθηκε υπάρχων κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων[8].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

2.1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή οφείλεται κυρίως στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάστασή στην οποία βρίσκεται. Στα μέταλλα η θερμική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ των μικρών σωματιδίων με διάχυση των ηλεκτρονίων ενώ στα αέρια σχεδόν αποκλειστικά με διάχυση των μορίων. Στα υγρά παρατηρείται ο ίδιος μηχανισμός οι αλληλεπιδράσεις όμως μεταξύ των μορίων είναι εντονότερες και συχνότερες απ' ότι στα αέρια.

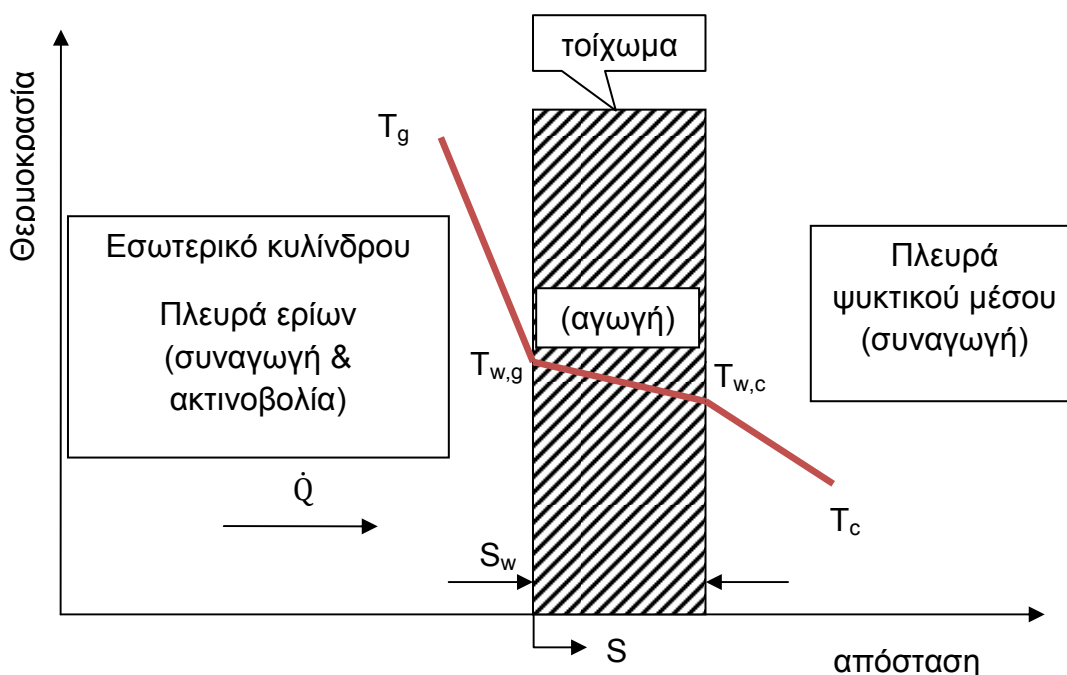
2.2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Η συναγωγή θερμότητας εμφανίζεται μεταξύ της επιφάνειας ενός σώματος και του ρευστού όταν οι θερμοκρασίες τους διαφέρουν.

2.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Στη θερμική ακτινοβολία η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ των σωμάτων με τη βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στέρεα σώματα, τα περισσότερα υγρά και αρκετά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα συγχρόνως όμως απορροφούν και μέρος της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπουν άλλα σώματα. Στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία εμφανίζεται διπλή μετατροπή ενέργειας, και ενώ στην αγωγή και συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για τη μεταφορά θερμότητας, στην ακτινοβολία δε συμβαίνει αυτό. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα με εντονότερο ρυθμό.

2.4. Μεταφορά θερμότητας μεταξύ αερίων και εσωτερικού τοιχώματος κυλίνδρου



Σχήμα 2.1.

Σχηματική απεικόνιση της ροής θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο διαμέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ αερίων και τοιχώματος κυλίνδρου πραγματοποιείται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας \dot{Q} στα τοιχώματα του κυλίνδρου προσομοιώνεται με την παρακάτω τύπου εξίσωση:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = A \cdot h_g(T_g - T_{w,g}) \quad (2.1)$$

Η επιφάνεια A μετάδοσης θερμότητας ισούται με:

$$A = 2(\pi D^2/4) + A_p \quad (2.2)$$

όπου:

h_g : η στιγμιαία σταθερά μετάδοσης θερμότητας

T_g : στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία αερίου

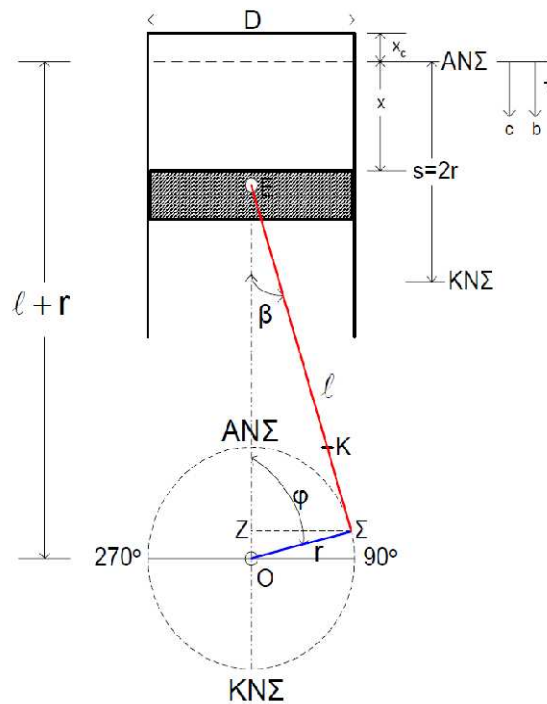
$T_{w,g}$: στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης

A_p : η παράπλευρη επιφάνεια του εμβόλου η οποία ισούται με

$$A_p = \pi D x \quad (2.3)$$

D : η διάμετρος του εμβόλου

x : η μετατόπιση του εμβόλου (Σχήμα 2.2.)



Σχήμα 2.2.

Κινηματικός μηχανισμός Εμβόλου – Διωστήρα – Στροφάλου

Από το Σχήμα 2.2. εντοπίζονται τα μεγέθη:

ℓ : μήκος διωστήρα

r : ακτίνα στροφάλου

D : διάμετρος εμβόλου

x : μετατόπιση εμβόλου

Ακόμα,

$$\lambda = r / \ell \quad (2.4)$$

$$x = x(\varphi) = r(1 - \cos\varphi) + \ell(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\varphi}) \quad (2.5)$$

Για τον υπολογισμό της στιγμιαίας σταθεράς μετάδοσης θερμότητας, h_g , χρησιμοποιούμε τη σχέση του Annand [11]:

$$\frac{dQ}{dt} = A \left[a \frac{k_g}{D} Re^b (T_g - T_{w,g}) + c (T_g^4 - T_{w,g}^4) \right] = Ah_g (T_g - T_{w,g}) \quad (2.6)$$

όπου:

a, b, c είναι σταθερές που υπολογίζονται μετά από πειράματα σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Τυπικές τιμές των σταθερών αυτών για ένα μεγάλο εύρος μηχανών είναι:

$$0,06 < a < 0,76$$

$$0,54 < b < 0,90$$

$$c = 0,57\sigma \quad (2.7)$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ η σταθερά Stefan-Boltzman.} \quad (2.8)$$

$c = 0$ κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και της εναλλαγής των αερίων.

$$k_g = 3,17 \cdot 10^{-4} T_g^{0,772} \text{ είναι ο συντελεστής συναγωγής.} \quad (2.9)$$

$$Re = \rho_g u_{char} L_{char} / \mu_g$$

ο αριθμός Reynolds ο οποίος υπολογίζεται με ένα χαρακτηριστικό μήκος ίσο με την διάμετρο D του εμβόλου και μια χαρακτηριστική ταχύτητα ίση με τη μέση ταχύτητα του εμβόλου, ή προκύπτει από ένα k - ϵ υπομοντέλο τύρβης.

$$(2.10)$$

$$\mu_g = 3,3 \cdot 10^{-7} T_g^{0,7} / (1 + 0,027\Phi) \text{ το δυναμικό ιξώδες.} \quad (2.11)$$

Φ : λόγος ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα.

T_g : στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία αερίου

$T_{w,g}$: στιγμιαία (ομοιόμορφη) θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης

A : επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της σχέσης του Annand είναι ότι περιέχει ένα ξεχωριστό όρο για την ακτινοβολία. Ωστόσο, η χρήση της μέσης θερμοκρασίας αερίου, αντί της πραγματικής μη ομογενούς κατανομής της θερμοκρασίας εσωτερικά του κυλίνδρου, περιορίζει τα οφέλη από αυτό το πλεονέκτημα (ο όρος της ακτινοβολίας στην σχέση του Annand μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία υψωμένη στην τέταρτη δύναμη).

Για την μελέτη της μετάδοσης θερμότητας μέσα στο τοίχωμα του κυλίνδρου με αγωγή, ακόμα και για την απλή περίπτωση όπου μια ομοιόμορφη θερμοκρασία τοιχώματος θεωρείται για όλες τις επιφάνειες του κυλίνδρου, πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμική αδράνεια του τοιχώματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός μοντέλου μετάδοσης θερμότητας, που βασίζεται στο ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο μοντελοποιεί την κατανομή της θερμοκρασίας από την πλευρά των αερίων διαμέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου μέχρι την πλευρά του ψυκτικού μέσου. Με αυτή τη μεθοδολογία, το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου, η θερμική του αγωγιμότητα και η θερμική διαπερατότητα λαμβάνονται υπόψη. Για τη μετάδοση θερμότητας εσωτερικά του τοιχώματος, η μονοδιάστατη, σταθερή αγωγή θερμότητας εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.12)$$

όπου:

$\alpha_w = k_w / (\rho_w c_w)$ η θερμική διαπερατότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

ρ_w : η πυκνότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

c_w : θερμοχωρητικότητα

Εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες και στις δύο πλευρές του τοιχώματος του κυλίνδρου (πλευρά αερίων και πλευρά ψυκτικού μέσου), προκύπτει η παρακάτω σχέση για τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας τετράχρονου (4-Χ) κινητήρα (720° γωνίας στροφάλου):

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \frac{dQ}{d\varphi} d\varphi = A \frac{k_w}{S_w} (\bar{T}_{w,g} - \bar{T}_{w,c}) = Ah_c (\bar{T}_{w,c} - T_c) \quad (2.13)$$

όπου:

A : επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας

$dQ/d\varphi$: η ροή θερμότητας στο τοίχωμα του κυλίνδρου

S_w : το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου

k_w : η θερμική του αγωγιμότητα

$\bar{T}_{w,g}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του αερίου καύσης

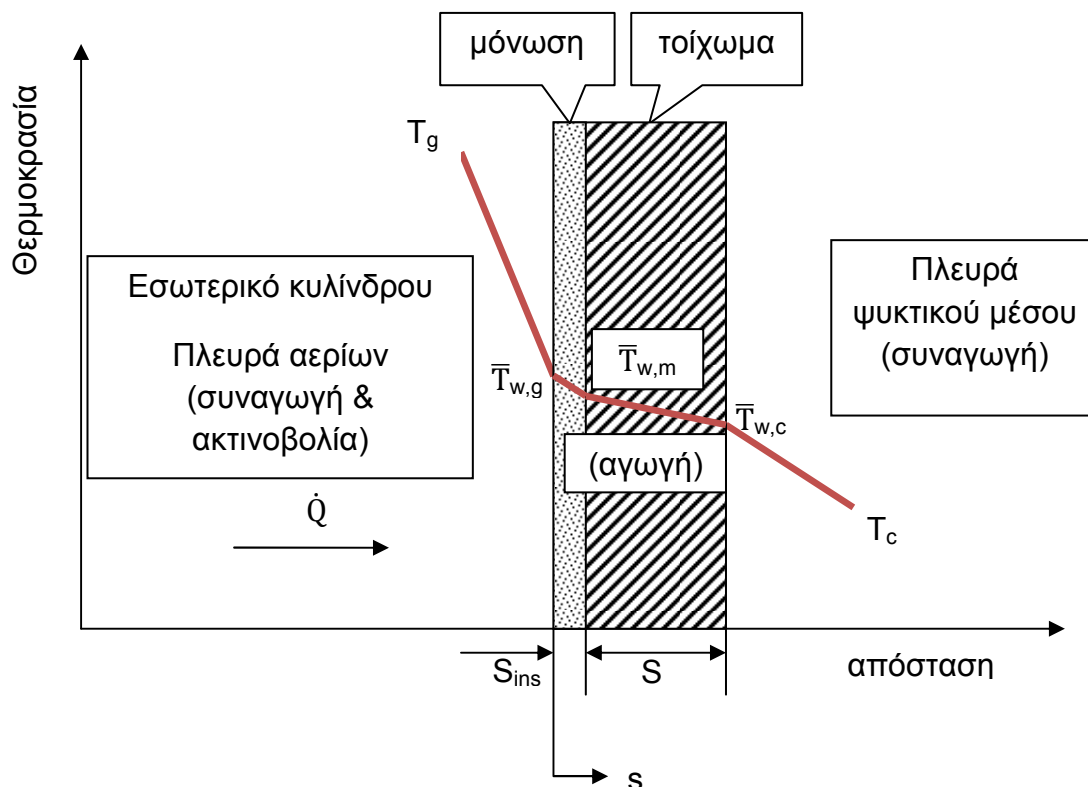
$\bar{T}_{w,c}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του ψυκτικού μέσου

h_c : η σταθερά μετάδοσης θερμότητας από την εξωτερική πλευρά του τοιχώματος του κυλίνδρου με θερμοκρασία $\bar{T}_{w,c}$ στο ψυκτικό μέσο

T_c : θερμοκρασία ψυκτικού μέσου.

Η εξίσωση (2.13) λύνεται για τις δύο άγνωστες θερμοκρασίες του τοιχώματος του κυλίνδρου $\bar{T}_{w,g}$ και $\bar{T}_{w,c}$.

2.5. Μεταφορά θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο δια μέσου του τοιχώματος του κυλίνδρου και της μόνωσης



Σχήμα 2.3.

Σχηματική απεικόνιση της ροής θερμότητας από τα αέρια του θαλάμου καύσης προς το ψυκτικό μέσο διαμέσου του τοιχώματος του μονωμένου κυλίνδρου

Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας \dot{Q} από τα αέρια στο τοίχωμα του κυλίνδρου, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια αρμονική συνάρτηση του χρόνου με περίοδο ενός κύκλου λειτουργίας της μηχανής. Σαν αποτέλεσμα αυτού, περιοδικά θερμοκρασιακά κύματα διαδίδονται στη δομή των τοιχωμάτων του κυλίνδρου, τα οποία εν τούτοις ήδη σβήνουν σε μια μικρή απόσταση λίγων χιλιοστών [mm] από την εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος, πέρα από την οποία η διάδοση της θερμοκρασίας είναι σε σταθερή κατάσταση (steady-state).

Για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας μέσω μιας συγκεκριμένης θέσης του τοιχώματος του θαλάμου καύσης κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας του κινητήρα, η μη μόνιμη εξίσωση αγωγής θερμότητας πρέπει να επιλυθεί εφαρμόζοντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Η ολική θερμοκρασία, σταθερής κατάστασης \bar{T}_w συν την χρονικά μεταβαλλόμενη T_p σε οποιοδήποτε θέση s μέσα στο τοίχωμα, πρέπει να ικανοποιεί την μη μόνιμη, μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_w \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.14)$$

όπου:

$\alpha_w = k_w / (\rho_w c_w)$ η θερμική διαπερατότητα

ρ_w : η πυκνότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

c_w : η συγκεκριμένη θερμική του ικανότητα

Η λύση της (2.14) επιτυγχάνεται διαχωρίζοντας το πρόβλημα σε δύο μέρη. Το ένα είναι αυτό της μόνιμης κατάστασης (steady-state), ενώ το άλλο είναι το χρονικά μεταβαλλόμενο (time-periodic).

2.5.1. Πρόβλημα αγωγής θερμότητας μόνιμης κατάστασης.

Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες σε όλες τις πλευρές του τοιχώματος (πλευρά αερίων, πλευρά ψυκτικού και στο τέλος της πλευράς της μόνωσης), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση, για τη γενική περίπτωση όπου υπάρχει στρώμα μόνωσης (PSZ ή SN) με αναφορά στο Σχήμα 2.3 (πρόκειται για επέκταση της σχέσης 2.13):

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \frac{dQ}{d\varphi} d\varphi = A \frac{k_{ins}}{S_{ins}} (\bar{T}_{w,g} - \bar{T}_{w,m}) = A \frac{k_w}{S_w} (\bar{T}_{w,m} - \bar{T}_{w,c}) = Ah_c (\bar{T}_{w,c} - T_c) \quad (2.15)$$

όπου:

A : επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας

$dQ/d\varphi$: η ροή θερμότητας στο τοίχωμα του κυλίνδρου

S_{ins} : το πάχος του στρώματος της μόνωσης

k_{ins} : η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης

S_w : το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου

k_w : η θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος του κυλίνδρου

$\bar{T}_{w,g}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του αερίου καύσης

$\bar{T}_{w,c}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου από την πλευρά του ψυκτικού μέσου

$\bar{T}_{w,m}$: μέση θερμοκρασία τοιχώματος κυλίνδρου ανάμεσα στο υλικό της μόνωσης και το χυτοσίδηρο

h_c : η σταθερά μετάδοσης θερμότητας από την εξωτερική πλευρά του τοιχώματος του κυλίνδρου με θερμοκρασία $\bar{T}_{w,c}$ στο ψυκτικό μέσο.

T_c : θερμοκρασία ψυκτικού μέσου.

Η (2.15) λύνεται για τις τρεις άγνωστες θερμοκρασίες του τοιχώματος του κυλίνδρου: $\bar{T}_{w,g}$, $\bar{T}_{w,m}$, $\bar{T}_{w,c}$.

2.5.2. Πρόβλημα αγωγής θερμότητας χρονικά μεταβαλλόμενο

Ο χρονικός όρος $T_p(s,t)$ σε οποιαδήποτε θέση S μέσα στο τοίχωμα και οποιαδήποτε στιγμή t , θα ικανοποιεί την μη μόνιμη μονοδιάστατη εξίσωση αγωγής θερμότητας μέσα σε μια παράλληλη πλάκα, έχοντας σταθερά θερμικής διαπερατότητα α :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

Αυτή η διαφορική εξίσωση μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων *Fourier*. Η (2.16) υπόκειται στην οριακή συνθήκη της πλευράς του τοιχώματος η οποία είναι εκτεθειμένη στα αέρια του θαλάμου καύσης $S=0$, όπου η θερμοκρασία των αερίων μεταβάλλεται περιοδικά με το χρόνο:

$$-k_{ins} \left[\frac{\partial T_p}{\partial x} \right]_{s=0} = \bar{h}_g (T_p - T_{pg}) \quad (2.17)$$

Ο χρονικά περιοδικός όρος της θερμοκρασίας των αερίων $T_{pg}(t)$ μπορεί ν' αναπτυχθεί σε σειρά *Fourier*, με τον ακόλουθο τρόπο:

$$T_{pg}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) \right] \quad (2.18)$$

όπου τ_0 είναι η χρονική περίοδος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης, η οποία για έναν τετράχρονο κινητήρα αντιστοιχεί σε μια συχνότητα, η οποία είναι η μισή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Η χρονικά Μέση Τιμή της Θερμοκρασίας των Αερίων \bar{T}_g καθώς και οι συντελεστές A_n και B_n της Εξίσωσης (2.20) δίνονται από τους παρακάτω Euler-Fourier τύπους:

$$A_0 = \bar{T}_g = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} T_g(t) dt \quad (2.19)$$

$$A_n = \frac{2}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} T_g(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) dt \quad (2.20)$$

$$B_n = \frac{2}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} T_g(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t\right) dt \quad (2.21)$$

Η λύση της Εξίσωσης (2.15) , με βάση την οριακή συνθήκη (Εξίσωση 2.17) και την T_{pg} εκφρασμένη με σειρά Fourier (Εξίσωση 2.18) είναι η εξής:

$$T_{pw} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\xi_n x)}{\sqrt{1 + 2\zeta_n + 2\zeta_n^2}} \left[A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t - \xi_n x - \theta_n\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t - \xi_n x - \theta_n\right) \right]$$

όπου οι ακόλουθες ποσότητες έχουν ορισθεί:

$$\xi_n = \sqrt{\frac{\pi n}{\alpha \tau_0}}, \quad \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1+(1/\zeta_n)}\right), \quad \zeta_n = \xi_n \left(\frac{k_w}{h}\right) = \sqrt{\frac{\pi n k_w^2}{\alpha \tau_0 h^2}}$$

Τέλος, συνθέτοντας τους συντελεστές A_n και B_n σε C_n και χρησιμοποιώντας γωνία φάσης δ_n η θερμοκρασία του τοιχώματος μπορεί να πάρει την ακόλουθη απλούστερη μορφή:

$$T_{pw} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\xi_n x)}{\sqrt{1+2\zeta_n+2\zeta_n^2}} \left[C_n \cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t - \xi_n x - \theta_n - \delta_n\right) \right] \quad (2.22)$$

όπου $C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ και $\delta_n = \arctan(B_n/A_n)$.

ο όρος: $C_n \cos(\xi_n x) = C_n \cos\left[\left(\sqrt{\frac{\pi n}{\alpha \tau_0}}\right) x\right] \quad (2.23)$

η (2.22) αντιπροσωπεύει ένα συνημιτονοειδές κύμα με εύρος C_n και μήκος κύματος x_0 , το οποίο υπολογίζεται από τον όρο:

$$\left(\sqrt{\frac{\pi n}{\alpha \tau_0}}\right) x_0 = 2\pi \quad \mu\epsilon \quad n = 1 \quad (2.24)$$

$$x_0 = \sqrt{\pi \alpha \tau_0} \quad (2.25)$$

Σχετικά με τη θερμότητα, σε ένα περιοδικό σύστημα η ροή δια μέσου των τοιχωμάτων πρέπει απαραίτητα να είναι περιοδική (τόσο μέσα όσο και έξω από αυτά) διότι ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στην επιφάνεια είναι άλλοτε θετικός και άλλοτε αρνητικός. Το ποσοστό της θερμότητας που απορροφάται ή απορρίπτεται και σχετίζεται με το περιοδικό αυτό φαινόμενο εκφράζεται με τη παρακάτω Εξίσωση Fourier για θερμική αγωγιμότητα:

$$\frac{dQ_p}{dt} = -k_w A \left. \frac{\partial T_{pw}}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (2.26)$$

Στη συνέχεια αν η T_{pw} (Εξίσωση 2.22) διαφοριστεί ως προς x και το αποτέλεσμα εισαχθεί στην Εξίσωση 2.26, προκύπτει η εξής μορφή:

$$\frac{dQ_p}{dt} = -\sqrt{2} k_w A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi_n}{\sqrt{1+2\zeta_n+2\zeta_n^2}} [C_n \sin\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} t - \frac{\pi}{4} - \theta_n - \delta_n\right)] \quad (2.27)$$

Επιπλέον η μέση τιμή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από τα αέρια στο τοίχωμα του κυλίνδρου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\bar{h}_g = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g d\varphi \quad (2.28)$$

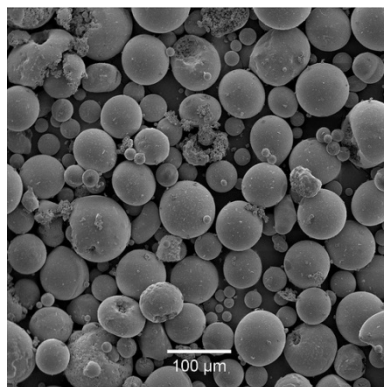
Στην περίπτωση ύπαρξης μόνωσης του τοιχώματος του κυλίνδρου ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις με αντικατάσταση του όρου k_w με k_{ins} .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΜΕΚ

3.1. Partially Stabilized Zirconia



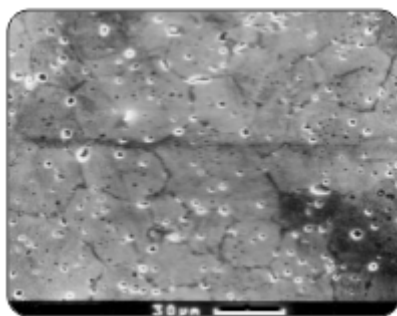
Εικόνα 3.1.

Plasma Sprayed Zirconia - PSZ

Η **zirconia** είναι ένα κεραμικό υλικό το οποίο αποτελείται κατά 90% από διοξείδιο του ζirkονίου (**ZrO₂**) (Εικόνα 3.1). Το οξείδιο του ζirkονίου παράγεται από φυσικά ορυκτά όπως το Baddeleyite ή σκόνη πυριτίου του ζirkονίου (zirconium silicate sand). Η καθαρή zirconia αλλάζει την κρυσταλλική της δομή ανάλογα με τη θερμοκρασία:

- Σε θερμοκρασία κάτω από 1170 °C η zirconia έχει μονοκλινική κρυσταλλική δομή.
- Στους 1170 °C η μονοκλινική κρυσταλλική δομή μετασχηματίζεται σε τετραγωνική, η οποία μένει σταθερή μέχρι τους 2370 °C.
- Στους 2370 °C η τετραγωνική κρυσταλλική δομή μετατρέπεται σε κυβική.

Οι μετασχηματισμοί στην κρυσταλλική δομή συνοδεύονται από μεταβολές στον όγκο. Συγκεκριμένα κατά το μετασχηματισμό από μονοκλινική σε τετραγωνική κρυσταλλική δομή η μεταβολή του όγκου είναι της τάξης του 1%. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να προκαλέσουν μέχρι και ρωγμές στο υλικό όταν αυτό υπόκειται σε απότομες και ανομοιόμορφες θερμοκρασιακές μεταβολές (θέρμανση, ψύξη).



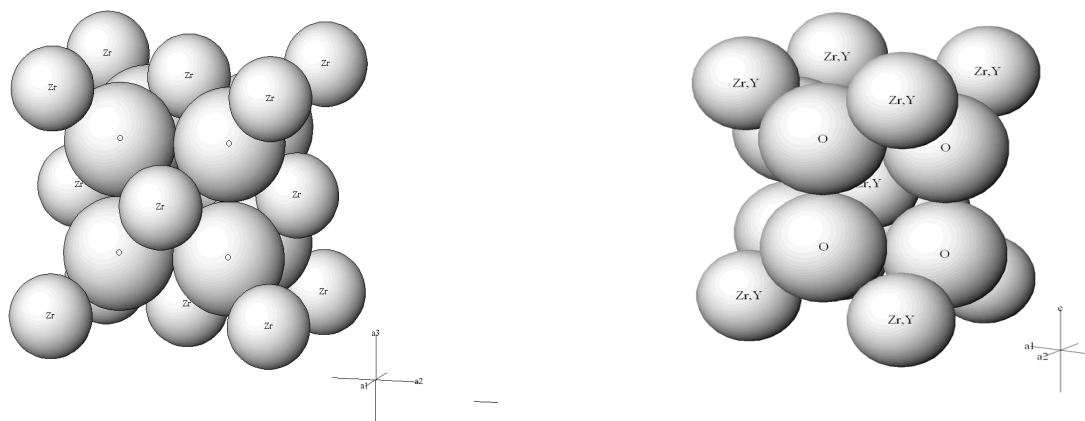
Εικόνα 3.2.

Τυπική κρυσταλλική δομή Mg-PSZ

Η ανάμειξη της zirconia με κάποια οξείδια, όπως **MgO** (οξείδιο του μαγνησίου) (Εικόνα 3.2.), **CaO** (οξείδιο του ασβεστίου), **Ytria** (**Y₂O₃**), **Ce₂O₃** (οξείδιο του δημητρίου), καταστέλλει τον αλλοτροπικό μετασχηματισμό (δηλαδή την μεταβολή της κρυσταλλικής δομής) και συμβάλλει στη σταθεροποίηση είτε της τετραγωνικής είτε της κυβικής δομής ανάλογα με τη θερμοκρασία. Η έκταση του μετασχηματισμού μπορεί να ελεγχθεί από το ποσοστό πρόσμιξης των παραπάνω σταθεροποιητών ώστε να επιτευχθεί ισορροπία στην ανθεκτικότητα ενάντια στην απώλεια δύναμης. Το πιο δημοφιλές οξείδιο που λειτουργεί ως

σταθεροποιητής είναι το **Yttria** (Y_2O_3) , το οποίο προστίθεται και διαχέεται ομοιόμορφα σε αναλογία 5,15%.

Η zirconia είναι πολύ χρήσιμη στην 'σταθεροποιημένη' κατάστασή της. Σε μερικές περιπτώσεις η τετραγωνική φάση μπορεί να είναι μεταστατική (μεταβλητή). Αν επαρκής ποσότητα από την τετραγωνική μεταστατική φάση είναι παρούσα, τότε μια εφαρμοσμένη τάση (πίεση), που ενισχύεται από τη συγκέντρωση τάσεων σε μια ρωγμή στο άκρο, μπορεί να προκαλέσει τη μετατροπή της τετραγωνικής δομής σε μονοκλινική, με ακόλουθη αύξηση του όγκου. Αυτός ο μετασχηματισμός φάσης μπορεί έπειτα να βάλει τη ρωγμή σε συμπίεση, κάτι που καθυστερεί την αύξηση της και ενισχύει την ανθεκτικότητα θραύσης. Αυτός ο μηχανισμός είναι γνωστός ως μετασχηματισμός σκλήρυνσης και επεκτείνει σημαντικά την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των προϊόντων που κατασκευάζονται με βάση τη σταθεροποιημένη zirconia. Αποτέλεσμα του μετασχηματισμού σκλήρυνσης είναι η partially stabilized zirconia και η tetragonal zirconia (Εικόνα 3.3.).



Εικόνα 3.3.

Μονοκλινική κρυσταλλική δομή καθαρής zirconia (ZrO_2) και τετραγωνική κρυσταλλική δομή TZP (Tetragonal zirconia polycrystal)

Επομένως, ανάλογα με τη θερμοκρασία τήξης και κάποιες άλλες διαδικαστικές παραμέτρους, μπορούν να δημιουργηθούν οι παρακάτω δομές:

- Πλήρως σταθεροποιημένη zirconia.

- Partially stabilized zirconia (PSZ), με μεικτή κρυσταλλική δομή (τετραγωνική και κυβική). Έχει κρεμ χρώμα και διακρίνεται για την υψηλή σκληρότητά της ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχει μικρότερο κόστος σε σχέση με τα άλλα κεραμικά της οικογενείας της.
- Polycrystalline tetragonal zirconia (TZP) με μετασταθή τετραγωνική δομή. Πρόκειται για zirconia με περίπου 3% Yttria (Y_2O_3) για σταθεροποιητή. Έχει την υψηλότερη σκληρότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά αυτό μειώνεται σημαντικά μεταξύ 200 °C και 500 °C .

Τα παρακάτω χαρακτηριστικά είναι τυπικά του κεραμικού υλικού zirconia (Πίνακας 3.1):

- Μεγάλη πυκνότητα
- Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- Υψηλή αντοχή σε θραύση
- Πολύ υψηλή αντοχή σε κάμψη και υψηλή σκληρότητα.
- Υψηλή μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας - μέχρι 2400 °C.
- Συντελεστής θερμικής διαστολής περίπου ίσος με αυτόν του χυτοσιδήρου
- Μέτρο ελαστικότητας περίπου ίση με αυτό του χάλυβα
- Υψηλή χημική αντίσταση
- Υψηλή αντίσταση σε τηγμένα μέταλλα
- Υψηλή αντίσταση σε φθορά
- Αγωγιμότητα ιόντων οξυγόνου

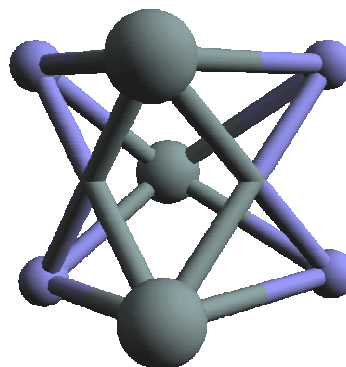
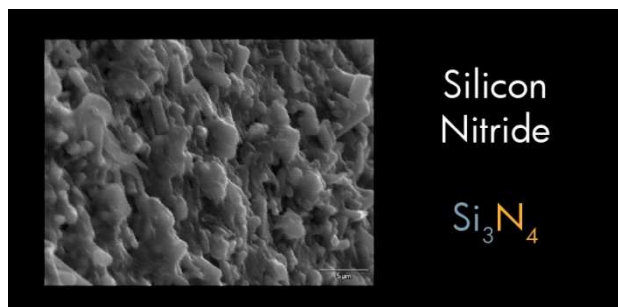
Τα κεραμικά υλικά zirconia χρησιμοποιούνται στην κατασκευή: μητρών διέλασης (extrusion dies), κοπτικών εργαλείων, εδράνων ολίσθησης, οδοντικών αποκαταστάσεων και διαφόρων μερών του κινητήρα. Συγκεκριμένα, η σταθεροποιημένη zirconia χρησιμοποιείται στους αισθητήρες οξυγόνου (αισθητήρες – λ) και σαν μεμβράνη στις κυψέλες καυσίμου, επειδή έχει την δυνατότητα να επιτρέπει στα ιόντα οξυγόνου να κινούνται ελεύθερα μέσω της κρυσταλλικής δομής της στις υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η υψηλή ιοντική αγωγιμότητα, μαζί με μια χαμηλή ηλεκτρονική αγωγιμότητα, την έχουν κάνει ένα από τα πιο χρήσιμα ηλεκτροκεραμικά (electroceraamics). Έχει σημαντική διηλεκτρική σταθερά – k, που ερευνάται για τις πιθανές εφαρμογές της ως μονωτής στις νανοηλεκτρονικές συσκευές τρανζίστορ στο μέλλον. Τέλος, η PSZ έχει πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και χρησιμοποιείται σαν

πυρίμαχη εσωτερική επένδυση των αεροσηράγγων στην αεροδιαστημική βιομηχανία και ως αντιθερμική επίστρωση σε αεροπλάνα. Επίσης χρησιμοποιείται πειραματικά σε θερμαινόμενα τμήματα MEK diesel σαν αντιθερμική επένδυση τοιχωμάτων κυλίνδρων, εμβόλων και βαλβίδων, ώστε να επιτρέπει την λειτουργία τους σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες.

Partially Stabilized Zirconia - PSZ		
Χημικός Τύπος: $ZrO_2 - 10\% MgO$		
Ιδιότητες	Τιμή	Μονάδες (SI)
Πυκνότητα	5.6×10^3	kg/m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	350	GPa
Αντοχή σε Κάμψη	545	MPa
Αντοχή σε Θλίψη	1700	MPa
Ανθεκτικότητα Θραύσης	6	MPa·m ^{1/2}
Σκληρότητα	1100	HV
Θερμική Διαστολή (20 °C)	10×10^{-6}	°C ⁻¹
Τυπική θερμική αγωγιμότητα	2.5	W/mK
Θερμοχωρητικότητα	400	J/kgK
Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας	1000	°C
Διηλεκτρική Σταθερά	6	kV/mm

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες PSZ

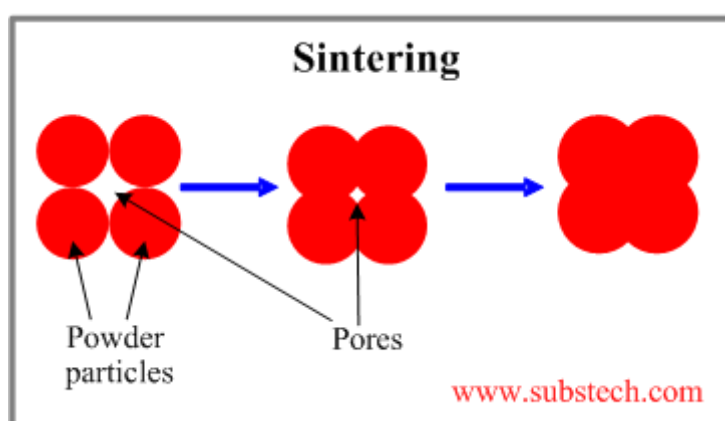
3.2 Νιτρίδιο του πυριτίου – SN



Εικόνα 3.4.

Νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4)

Τα κεραμικά υλικά με βάση το νιτρίδιο του πυριτίου [**Si_3N_4**] (**Silicon Nitride**) παράγονται από την ανάμειξη λεπτόκοκκης σκόνης νιτρίδιου του πυριτίου και οξειδίων (Εικόνα 3.4.). Η σκόνη συμπιέζεται και ακολουθεί η διαδικασία της **πυροσυσσωμάτωσης** στους 1870 °C. Το καθαρό νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) είναι δύσκολο να παραχθεί ως μαζικό υλικό. Η εφαρμογή των συμβατικών τεχνικών συμπύκνωσης είναι προβληματική στην περίπτωση αυτή αφού δεν συμπυκνώνεται εύκολα και δεν μπορεί να θερμανθεί πάνω από τους 1850 °C, παρόλο που η θερμοκρασία αυτή είναι κάτω από το σημείο τήξης του (1900 °C), διότι διασπάται σε πυρίτιο και άζωτο.



Εικόνα 3.5.

Διαδικασία Πυροσυσσωμάτωσης

Πυροσυσσωμάτωση (sintering process) είναι η μετατροπή ενός κεραμικού συσσωματώματος σε συμπαγές στερεό με πύρωση. Η διαδικασία περιλαμβάνει μεταφορά μάζας και αποδιοργάνωση της κεραμικής σκόνης γεμίζοντας τα διασωματιδιακά κενά και προκαλεί ολική συρρίκνωση της αρχικής κεραμικής μάζας (Εικόνα 3.5.). Η διαδικασία ενεργοποιείται θερμικά και ελέγχεται από το ποσοστό της διάχυσης.

Τις τελευταίες δεκαετίες το νιτρίδιο του πυριτίου έχει υπάρξει αντικείμενο πολλών ερευνών, κυρίως λόγω της πρόκλησης να αναπτυχθεί ένα κεραμικό υλικό το οποίο να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες ώστε να εφαρμοστεί σε στρόβιλο υπερπληρωμένων κινητήρων. Πρώτα αναπτύχθηκε ένα κεραμικό υλικό τη δεκαετία του 1950 για θερμομόνωση σωλήνων, υποδοχή τηγμένων μετάλλων (χοάνη) και για κατασκευή ακροφυσίων σε πύραυλους. Αυτού του είδους το υλικό παρασκευάστηκε με περαιτέρω διαδικασία με άζωτο σε θερμοκρασία 1100-1450 °C και ονομάστηκε στη συνέχεια **RBSN (Reaction-bonded Silicon Nitride)**. Ένα πλεονέκτημα ήταν η ελάχιστη έως μηδενική συρρίκνωση και για αυτό το λόγο σε αυτού του είδους τα κεραμικά μπορούσε να γίνει κατεργασία με τη χρήση συμβατικών εργαλείων μέχρι το τελικό μέγεθος και σχήμα, αφού πρώτα έχει προηγηθεί θερμική κατεργασία εναπόθεσης αζώτου ώστε να αποκτήσει το υλικό μηχανική αντοχή.

Το ενδιαφέρον πλέον άρχισε να αυξάνεται με την ενδεχόμενη χρήση κεραμικού σε στρόβιλους, υπήρχε όμως ένα εμπόδιο στη χρήση RBSN. Λόγω της ύπαρξης μικροπορώδους δομής κατά 20-30%, η μηχανική αντοχή ήταν μικρή (200-250 MPa) για εφαρμογή σε κινητήρα. Για ένα από τη φύση του σκληρό υλικό όπως το νιτρίδιο του πυριτίου, οι υψηλής ενέργειας ομοιοπολικοί δεσμοί που δημιουργούν αυτές τις μηχανικές ιδιότητες λειτουργούν αρνητικά στη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης· η αυτοδιάχυση είναι πολύ χαμηλή και τα άτομα αποκτούν κινητικότητα όταν πλέον αρχίζει η διάσπαση σε πυρίτιο και άζωτο (>1850°C) .

Δοκιμάστηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, αυξημένες πυκνότητες αναπτύχθηκαν μέσω προσθήκης χημικών ουσιών. Συγκεκριμένα, με τη χρήση οξειδίου του μαγνησίου, ένα υψηλής πυκνότητας υλικό παρήχθη με τη μέθοδο της άσκησης υψηλών πιέσεων (23MPa) υπό υψηλές θερμοκρασίες (1850°C) (**Hot Pressed Silicon Nitride, HPSN**) και η αντοχή βελτιώθηκε σημαντικά σε σχέση με τη μέθοδο RBSN (Εικόνα 3.6.).



Εικόνα 3.6.

Προϊόντα μεθόδου HPSN

Κατά τη δεκαετία του '70 στις ΗΠΑ, πραγματοποιήθηκε μεγάλη προσπάθεια να παραχθεί τελικά κεραμικός στρόβιλος (Εικόνα 3.7). Έγινε αντιληπτό από την αρχή ότι η μέθοδος HPSN περιορίζεται σε απλά γεωμετρικά σχήματα και ο στόχος δε θα μπορούσε να επιτευχθεί εκτός και αν η συσσωμάτωση γινόταν χωρίς πίεση, οπότε και το σχήμα των εξαρτημάτων μπορούσε να διαμορφωθεί από συμβατικές μεθόδους κατασκευής.



Εικόνα 3.7.

Κατασκευή πτερυγίων στρόβιλου από νιτρίδιο του πυριτίου

Από το 1970 και μετά, η έρευνα για βελτίωση των υλικών έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερη κατανόηση του ρόλου των βοηθητικών συμπύκνωσης (πρόσθετων χημικών ουσιών) στην διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης και στην ανάπτυξη της κρυσταλλικής δομής των κεραμικών με βάση το νιτρίδιο του πυριτίου. Μια εναλλακτική λύση που αναπτύχθηκε είναι

να χρησιμοποιηθεί το θερμικό πλάσμα το οποίο δημιουργείται από παλμούς ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της συμπιεσμένης σκόνης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παραχθεί πυκνό νιτρίδιο του πυριτίου σε θερμοκρασίες 1500 °C έως 1700 °C.

Το σύνολο των βελτιώσεων στην παρασκευή σκόνης, στις τεχνικές διαμόρφωσης καθώς και η ανάπτυξη εναλλακτικών διαδικασιών (θερμικό πλάσμα) έχουν οδηγήσει σε μία ολοκληρωμένη οικογένεια υλικών όπως τα RBSN, HPSN, SSN (Sintered Silicon Nitride), SRBSN (Sintered Reaction-Bonded Silicon Nitride), HIPSN (Hot Isostatically Pressed Silicon Nitride).

Δυστυχώς, η ανάπτυξη και εξέλιξη τους αποδείχτηκε ένας δυσκολότερος και πιο σύνθετος στόχος απ' ό,τι αρχικά υπολογιζόταν. Ο παράγοντας του κόστους και τα σοβαρά τεχνολογικά προβλήματα της μαζικής παραγωγής σύνθετων κεραμικών τμημάτων έχουν περιορίσει την ανάπτυξη, αλλά το υλικό έχει επίσης αντιμετωπιστεί με σχεδιαστικό συντηρητισμό και δυσπιστία σχετικά με την αντοχή των κεραμικών τμημάτων.

Εξαρτήματα MEK κατασκευασμένα από νιτρίδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται τόσο στους κινητήρες αυτοκινήτων όσο και φορτηγών, όμως η χρήση του υλικού περιορίζεται σε εφαρμογές όπου οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες δεν είναι πολύ υψηλές και οι συνέπειες της αστοχίας του υλικού δεν είναι καταστροφικές. Στους κινητήρες Otto χρησιμοποιείται στο σύστημα ωστηρίου - ζυγώθρου βαλβίδων για μειωμένη φθορά, στη βαλβίδα παράκαμψης καυσαερίων και στην κατασκευή στροβιλο-υπερπληρωτών (διαμέτρου 5 cm περίπου) για μειωμένη υστέρηση κατά την επιτάχυνση (λόγω ελαφρύτερης κατασκευής). Στους κινητήρες Diesel για την κατασκευή προθερμαντήρων για γρήγορη εκκίνηση στους κινητήρες έμμεσης έγχυσης, και στους στροβιλο-υπερπληρωτές (διαμέτρου 10 cm περίπου) για μειωμένη υστέρηση κατά την επιτάχυνση.

Άλλες εφαρμογές του νιτρίδιου του πυριτίου είναι στην κατασκευή ρουλεμάν (ένσφαιρων τριβέων και τριβέων κυλίσεως), διαμόρφωση εργαλείων κοπής, κοπή μετάλλων και στο χειρισμό καυτού μετάλλου. Ακόμη, λεπτά φιλμ από νιτρίδιο του πυριτίου αποτελούν δημοφιλές μονωτικό στρώμα στα ηλεκτρονικά υπολογιστών με βάση το πυρίτιο.

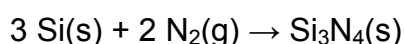
Οι παρακάτω ιδιότητες είναι χαρακτηριστικές του νιτρίδιου του πυριτίου (Πίνακας 3.2):

- Χαμηλή πυκνότητα

- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (μεγάλη σκληρότητα ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες)
- Πολύ καλή αντοχή σε θερμική καταπόνηση και ακραίες εναλλαγές της θερμοκρασίας
- Πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση
- Υψηλό όριο θραύσης (ανθεκτικότητα στο σπάσιμο)
- Αντοχή σε μηχανική καταπόνηση
- Αντίσταση σε 'θερμικό σοκ'
- Αντίσταση κατά της οξειδωσις

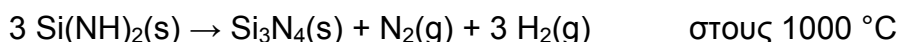
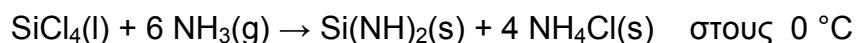
Υπάρχουν 3 τρόποι παραγωγής νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4):

1^{ος} τρόπος παραγωγής: Το νιτρίδιο του πυριτίου μπορεί να ληφθεί από την άμεση αντίδραση του πυριτίου με το άζωτο σε θερμοκρασίες μεταξύ 1300 °C και 1400 °C:



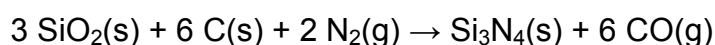
Αυτή ήταν η πρώτη μεγάλης κλίμακας μέθοδος παραγωγής του νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4) σε σκόνη και αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1950. Όμως το προϊόν ήταν χαμηλής ποιότητας.

2ος τρόπος παραγωγής: διπλή αντίδραση σύνθεσης.



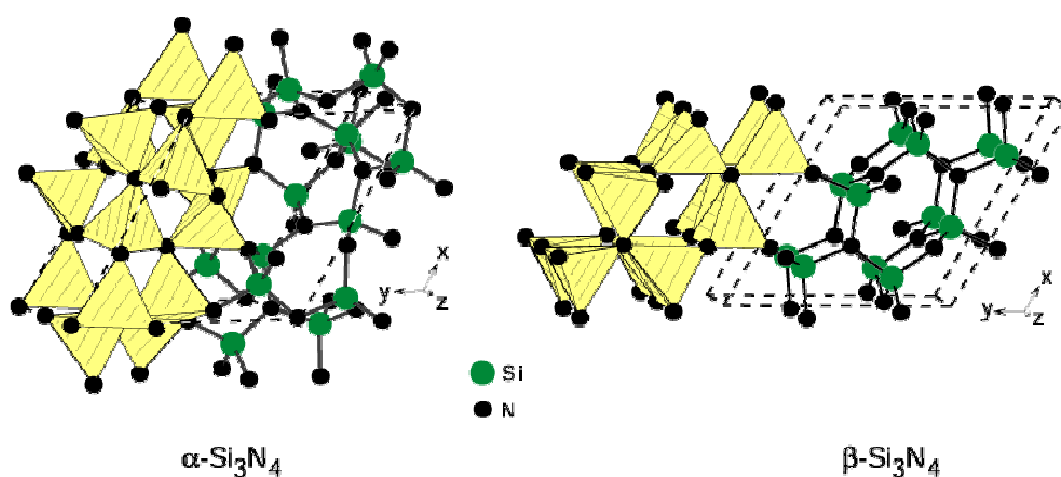
Αυτή η διαδικασία οδηγεί στην παραγωγή άμορφου νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4). Το προϊόν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία με άζωτο στους 1400 °C με 1500 °C για να μετατραπεί σε κρυσταλλική σκόνη. Αυτός είναι τώρα ο δεύτερος πιο σημαντικός τρόπος παραγωγής νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4) για εμπορική χρήση.

3ος τρόπος παραγωγής στους 1400 °C με 1450 °C:



Αυτή η διαδικασία ήταν και η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή νιτρίδιου του πυριτίου (Si_3N_4) σε σκόνη και τώρα θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός από πλευράς κόστους για την βιομηχανική παραγωγή Si_3N_4 υψηλής ποιότητας.

Υπάρχουν 3 κρυσταλλικές δομές του νιτρίδιου του πυριτίου (Silicon Nitride, Si_3N_4) γνωστές ως α , β και γ φάσεις. Η α φάση έχει τριγωνική δομή, η β φάση εξαγωνική δομή και η γ φάση κυβική δομή (Εικόνα 3.8.).



Εικόνα 3.8.

Κρυσταλλικές δομές του Si_3N_4 συνδεδεμένες με $\xi\text{-Fe}_2\text{N}$ (αριστερά η τριγωνική δομή $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ και δεξιά η εξαγωνική δομή $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$)

Οι α και β φάσεις είναι οι πιο γνωστές και συνηθισμένες μορφές του νιτρίδιου του πυριτίου και μπορούν να παραχθούν υπό φυσιολογικές συνθήκες πίεσης. Η γ φάση όμως μπορεί να συντεθεί μόνο κάτω από υψηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και έχει σκληρότητα 35 GPa .

Silicon Nitride – SN		
Χημικός Τύπος: Si₃N₄		
Ιδιότητες	Τιμή	Μονάδες (SI)
Πυκνότητα	3.3 x10 ³	kg/m ³
Πορώδες	0	%
Χρώμα	γκρι (σκόνη)	—
Αντοχή σε Κάμψη	690 - 830	MPa
Συντελεστής Ελαστικότητας	310	GPa
Λόγος Poisson	0.24 - 0.27	—
Σκληρότητα	1450 - 1580	HV
Ανθεκτικότητα Θραύσης	5.7 - 6.1	MPa·m ^{1/2}
Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας	1000	°C
Σημείο Τήξης	1900	°C
Τυπική θερμική Αγωγιμότητα	30	W/mK
Θερμική Διαστολή (20 °C)	3.3 x10 ⁻⁶	°C ⁻¹

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες SN

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

4.1. Μεταβατική λειτουργία στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel

Στο Κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε την απόκριση του κινητήρα Diesel κατά τη μεταβατική λειτουργία μετά από απότομη αύξηση του φορτίου.

Με τον όρο μεταβατική λειτουργία εννοούμε την εξαναγκασμένη και συνήθως απότομη μεταβολή είτε στην παροχή του εγχυόμενου καυσίμου στον κύλινδρο (μεταβολή ταχύτητας περιστροφής) είτε στο φορτίο με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας, π.χ. ηλεκτρική γεννήτρια, έλικα πλοίου, συνθήκες οδοστρώματος-κλίση δρόμου για κίνηση αυτοκινήτου κ.λ.π.

Η μελέτη της μεταβατικής λειτουργίας είναι πολύ σημαντική για τους παρακάτω λόγους:

1. Η συντριπτική πλειοψηφία των οδηγικών συνθηκών στους δρόμους χαρακτηρίζονται από αλληπάλληλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής και στο φορτίο.
2. Ο κινητήρας και τα διάφορα υποσυστήματά του (σύστημα υπερπλήρωσης, αντλία καυσίμου, ρυθμιστής στροφών) βιώνουν μη γραμμικές και μακριά από τις αντίστοιχες της μόνιμης λειτουργίας συνθήκες.
3. Απαιτείται πολύ καλό ταίριασμα ανάμεσα στον κινητήρα και τα υποσυστήματά του για να υπάρχει καλή οδηγική συμπεριφορά και γενικά μεταβατική απόκριση.
4. Παρατηρούνται έντονα αυξημένες εκπομπές καπνού από κινητήρες diesel κατά την φάση της μεταβατικής απόκρισης, συνοδευόμενες από όχι ευνοϊκά χαρακτηριστικά επιτάχυνσης.

Το βασικό μειονέκτημα των στροβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel κατά την μεταβατική λειτουργία εντοπίζεται στην μη μηχανική σύνδεση του κινητήρα (στροφαλοφόρος άτρακτος) με το ζεύγος υπερπλήρωσης. Ως αποτέλεσμα αυτού, κατά την αύξηση ταχύτητας περιστροφής ή φορτίου το παραγόμενο από τον στρόβιλο έργο πρέπει πρώτα να υπερνικήσει την αδράνεια του ζεύγους υπερπλήρωσης ώστε στην συνέχεια να μπορέσει να επιταχύνει τον συμπιεστή, που με την σειρά του θα τροφοδοτήσει τον κινητήρα με την αυξημένη παροχή αέρα που απαιτείται για να αντιμετωπίσει το αυξημένο φορτίο ή για να επιτευχθεί η επιθυμητή αύξηση της ταχύτητας περιστροφής (π.χ. για να επιταχύνει το όχημα). Στην πράξη, η εντολή του οδηγού για αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μέσω του πατήματος του πεντάλ του 'γκαζιού' σε κινητήρες αυτοκινήτων ή της απευθείας μετατόπισης της θέσης του κανόνα πετρελαίου σε βιομηχανικών εφαρμογών κινητήρες, οδηγεί σε σχεδόν ακαριαία αύξηση της παροχής του εγχυόμενου καυσίμου στους κυλίνδρους. Όμως ο συμπιεστής δεν μπορεί να ανταποκριθεί εξίσου άμεσα και να τροφοδοτήσει τον κινητήρα με την αναλογικά απαιτούμενη αυξημένη ποσότητα αέρα, αφού ο στρόβιλος που τον κινεί δεν έχει προλάβει να αυξήσει το παραγόμενο έργο αποτόνωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί παράλληλα:

1. Πρέπει πρώτα να αυξηθεί το επίπεδο των πιέσεων και των θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.
2. Πρέπει να επιταχυνθεί το ρεύμα καυσαερίου στην πολλαπλή εξαγωγής.

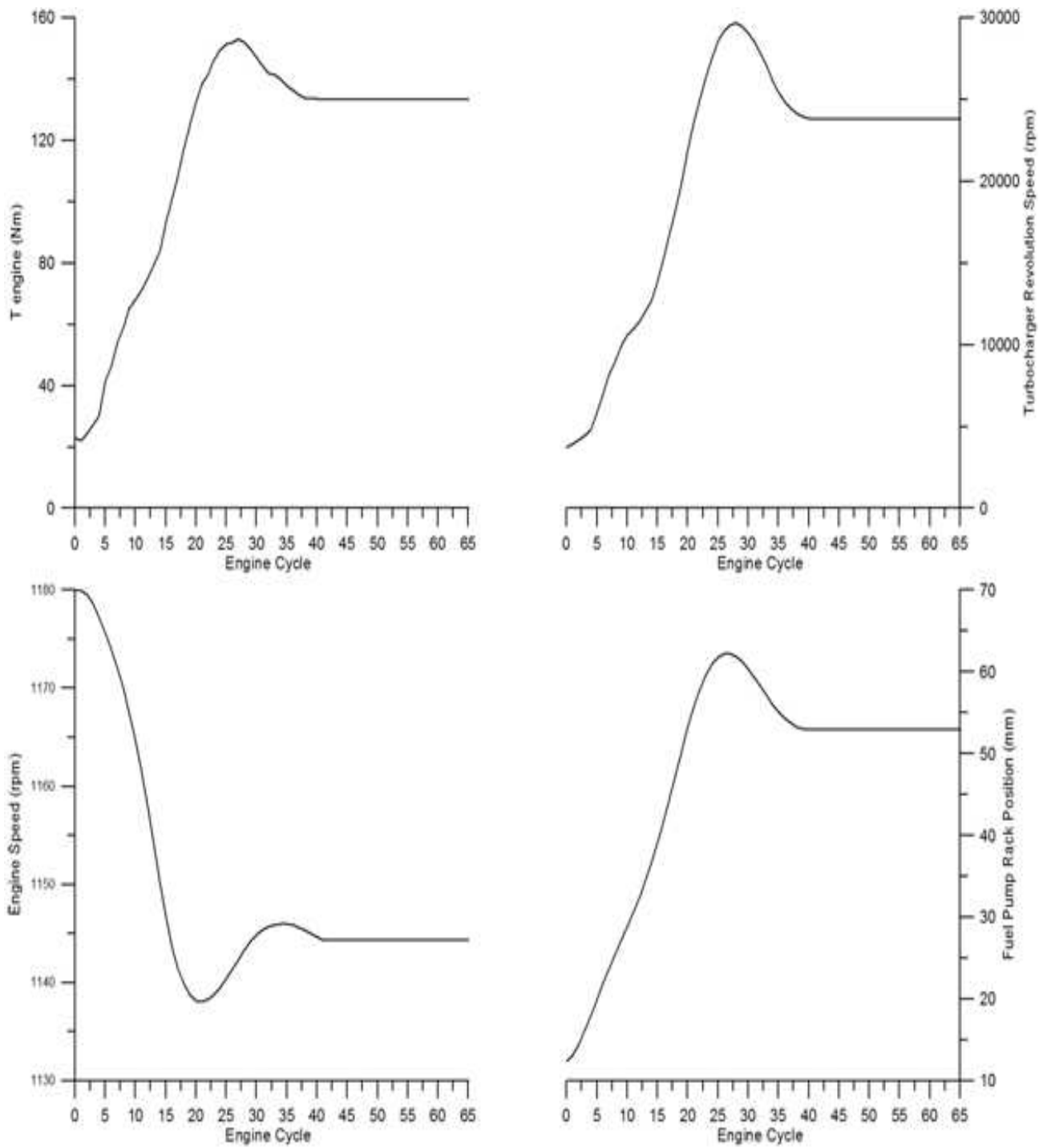
3. Χάνονται πολύτιμα ποσά θερμότητας προς τα πιο ψυχρά τοιχώματα του κυλίνδρου και της πολλαπλής εξαγωγής.
4. Πρέπει να επιταχυνθεί και ο κινηματικός μηχανισμός του κινητήρα (έμβολα, διωστήρες, στρόφαλα).
5. Το ποσό ενέργειας που είναι τελικά διαθέσιμο για αποτόνωση στον στρόβιλο πρέπει να υπερνικήσει την αδράνεια του ζεύγους υπερπλήρωσης, η οποία συνήθως είναι ιδιαίτερα σημαντική. Συγκεκριμένα, κατά την μεταβατική λειτουργία, η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης γίνεται:

$$\tau_T - \tau_C = G_{TC} \frac{d\omega_t}{dt} \quad (4.1)$$

όπου τ_T : η ροπή του στροβίλου, τ_C : η ροπή του συμπιεστή και G_{TC} : η ροπή αδράνειας του ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης.

Έτσι, στους πρώτους κύκλους μετά την απότομη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ή φορτίου, παρατηρείται ανακολουθία ανάμεσα στην αυξημένη παροχή καυσίμου και στην ακόμα χαμηλή ποσότητα του αναρροφώμενου αέρα, με αποτέλεσμα (για κινητήρες diesel) ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου να πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές (ακόμα και κάτω από την μονάδα) οδηγώντας σε αυξημένες εκπομπές καπνού, οι οποίες είναι ορατές από τις εξατμίσεις.

Μετά την πάροδο μερικών δευτερολέπτων, οπότε και έχει επιταχυνθεί το ζεύγος υπερπλήρωσης, μπορεί ο συμπιεστής, κινούμενος πλέον σε αρκετά υψηλές ταχύτητες περιστροφής, να παρέχει την επιπλέον ποσότητα αέρα στον κύλινδρο, οπότε και ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα.



Σχήμα 4.1.

Απόκριση υπερπληρωμένου κινητήρα σε αύξηση φορτίου [8].

Το παραπάνω φαινόμενο είναι γνωστό με τον όρο υστέρηση του υπερπληρωτή (turbocharger lag) και απαντάται τόσο σε κινητήρες πετρελαίου όσο και βενζίνης. Κατά το φαινόμενο αυτό, στους αρχικούς κύκλους η πίεση υπερπλήρωσης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, καθυστερώντας έτσι συνολικά την τελική ισορροπία κινητήρα-φορτίου και ωθώντας τον κινητήρα Diesel σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής, χαμηλότερους λόγους αέρα λ_a και κατ' επέκταση υψηλότερες εκπομπές αιθάλης.

Η υστέρηση του υπερπληρωτή είναι τόσο εντονότερη όσο μεγαλώνει η μέση πραγματική πίεση του κινητήρα και άρα το μέγιστο δυνατό επιβαλλόμενο φορτίο σε αυτόν. Επίσης, πρέπει να τονισθεί ότι η περίπτωση υστέρησης του υπερπληρωτή σε φάση μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής είναι πιο εύκολα αντιμετωπίσιμη από την αντίστοιχη σε φάση αύξησης του φορτίου, αφού σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα υποβοηθάει και την αύξηση της αναρροφώμενης από τον συμπιεστή παροχής αέρα. Αντίθετα, στην περίπτωση αύξησης φορτίου, η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται (έστω και κατά ένα μικρό ποσοστό), αποτελώντας άλλον έναν παράγοντα δυσκολίας του συστήματος. Μάλιστα, σε μερικές περιπτώσεις μεγάλης αύξησης φορτίου (π.χ. 0%-100%) ο κινητήρας είναι δυνατόν να μην μπορεί να ανταποκριθεί γρήγορα στις αυξημένες απαιτήσεις της κατανάλωσης, με αποτέλεσμα να σβήνει (stall).

Στο Σχήμα 4.1. φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, της στρεπτικής ροπής του κινητήρα, της θέσης του κανόνα πετρελαίου και της ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή κατά την διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας. Η απότομη αύξηση της επιβαλλόμενης αντίστασης, δημιουργεί έλλειψη ροπής, με αποτέλεσμα την επιβράδυνση του κινητήρα, όπως φαίνεται αρχικά με την μείωση της ταχύτητάς του. Ο ρυθμιστής στροφών αντιλαμβάνεται την μείωση στην ταχύτητα περιστροφής, και επενεργεί εγχύοντας περισσότερο καύσιμο στον κύλινδρο. Συνεπώς αυξάνονται οι πιέσεις που επικρατούν στο εσωτερικό του κυλίνδρου και άρα και η παραγόμενη ροπή του κινητήρα. Παράλληλα, αυξάνονται και η θερμική ενέργεια των καυσαερίων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους στροβίλο-υπερπλήρωσης.

Για την θεωρητική μελέτη της μετάδοσης θερμότητας εσωτερικά μιας «αδιαβατικής» ΜΕΚ, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ενός κινητήρα Diesel, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο ΜΕΚ της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, ενώ χρησιμοποιήθηκε και εξελίχθηκε υπάρχων κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων[8].

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα δίνονται στον Πίνακα 4.1 και των χρησιμοποιηθέντων μονωτικών στον Πίνακα 4.2.

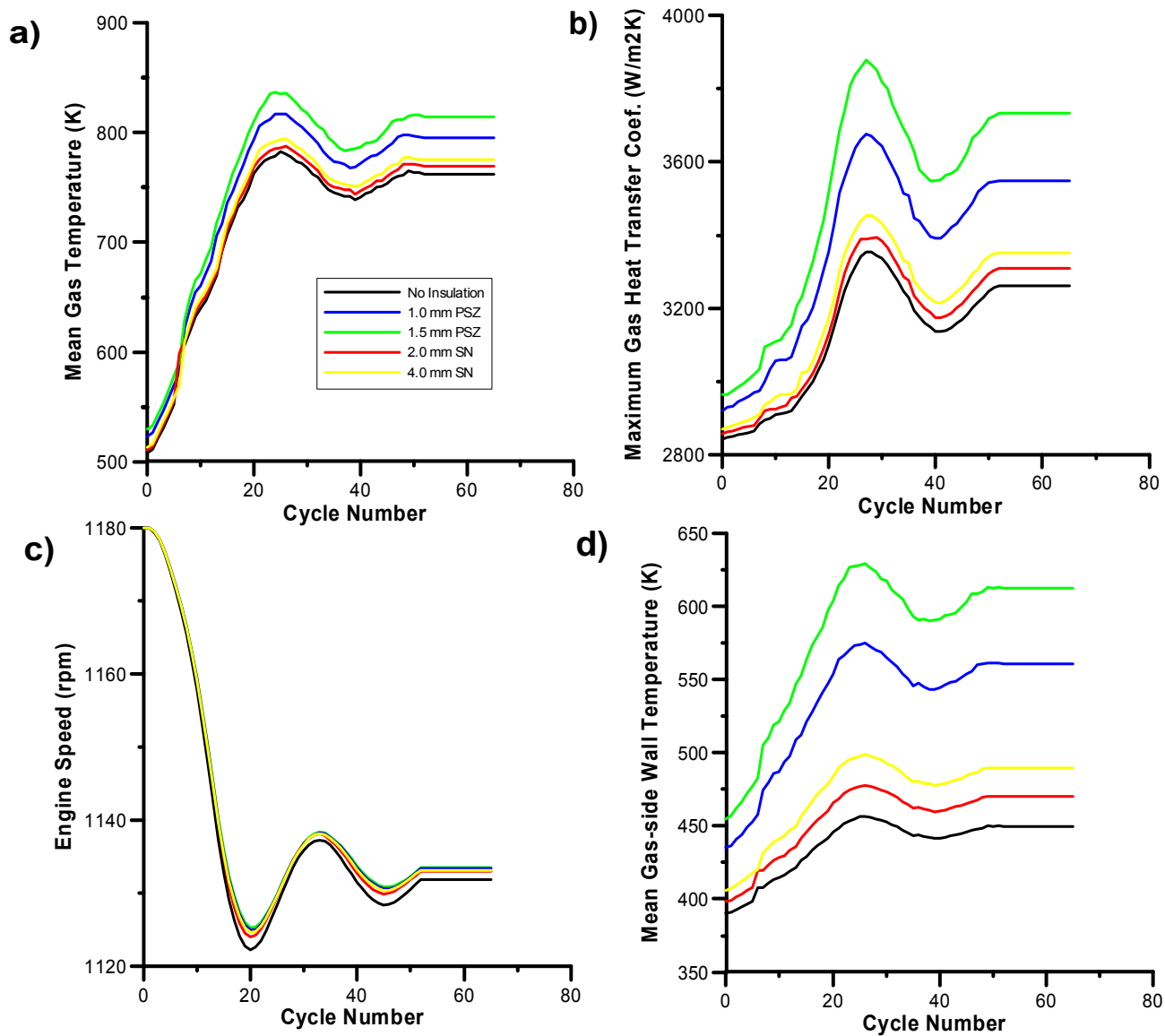
Τύπος	6 Κύλινδρος Τετράχρονος (4-X) Υπερπληρωμένος με ψύξη του αέρα μετά την συμπίεση σε ψυγείο αέρα- νερού Υδροψυκτος
Εύρος λειτουργίας Διάμετρος / Διαδρομή Μέγιστη ισχύς Μέγιστη ροπή	1000-1500 rpm 140 mm /180 mm 236kW @ 1500rpm 1520Nm @ 1250rpm
Υπερπληρωτής	ΚΚΚ Μ4Β 754/345
Αντλία καυσίμου	BOSCH PE 6P 120 A 320 RS 153

Πίνακας 4.1: Δεδομένα του υπό εξέταση κινητήρα

Υλικό	Θερμική διαπερατότητα α_w [m^2/s]	Θερμική αγωγιμότητα k_w [W/mK]
cast iron	$14,0 \times 10^{-6}$	54
SN	$2,8 \times 10^{-6}$	10
PSZ	$0,90 \times 10^{-6}$	1

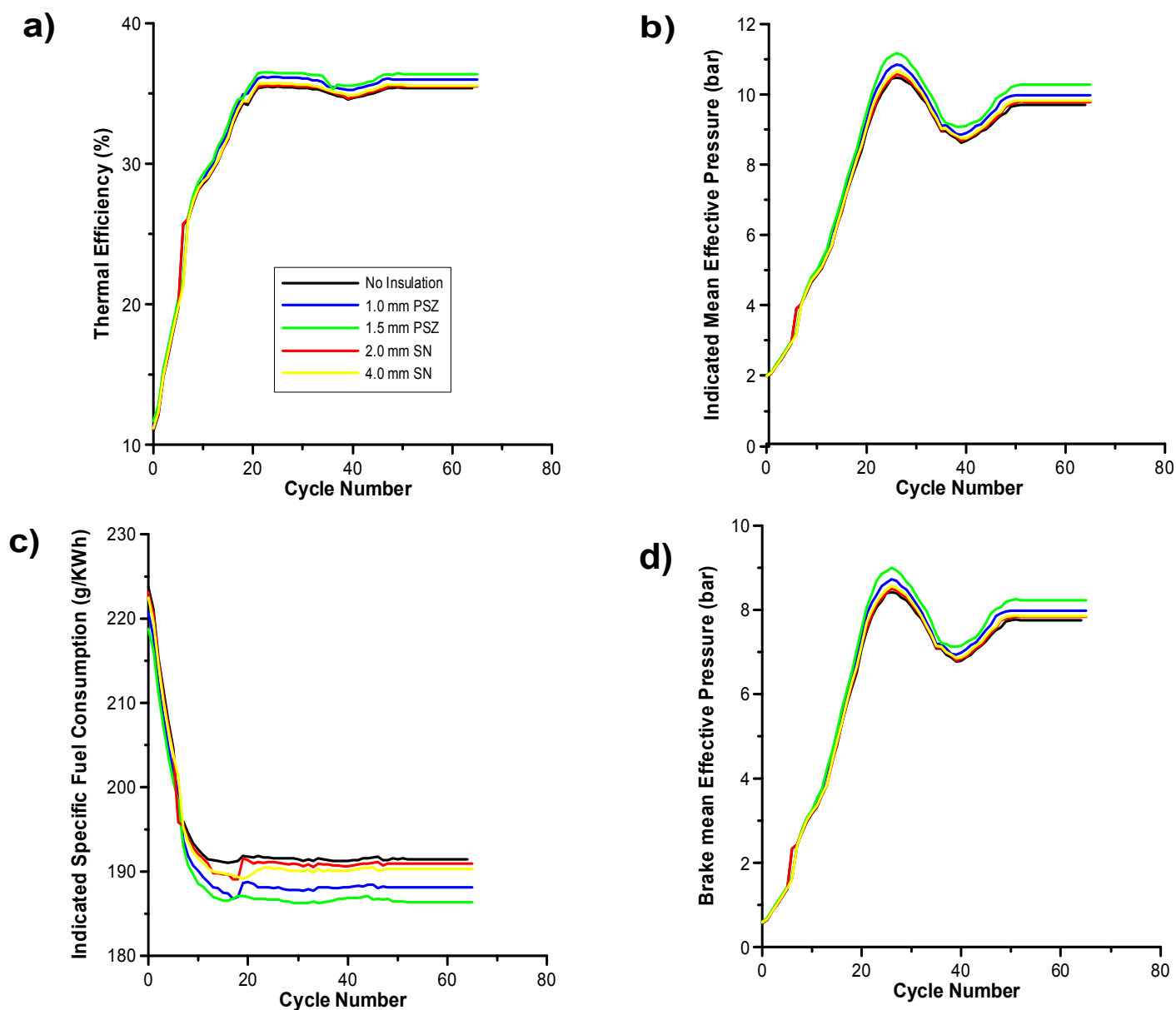
Πίνακας 4.2: Θερμομονωτικές ιδιότητες υλικών

4.2 . Απόκριση του κινητήρα κατά την απότομη αύξηση φορτίου



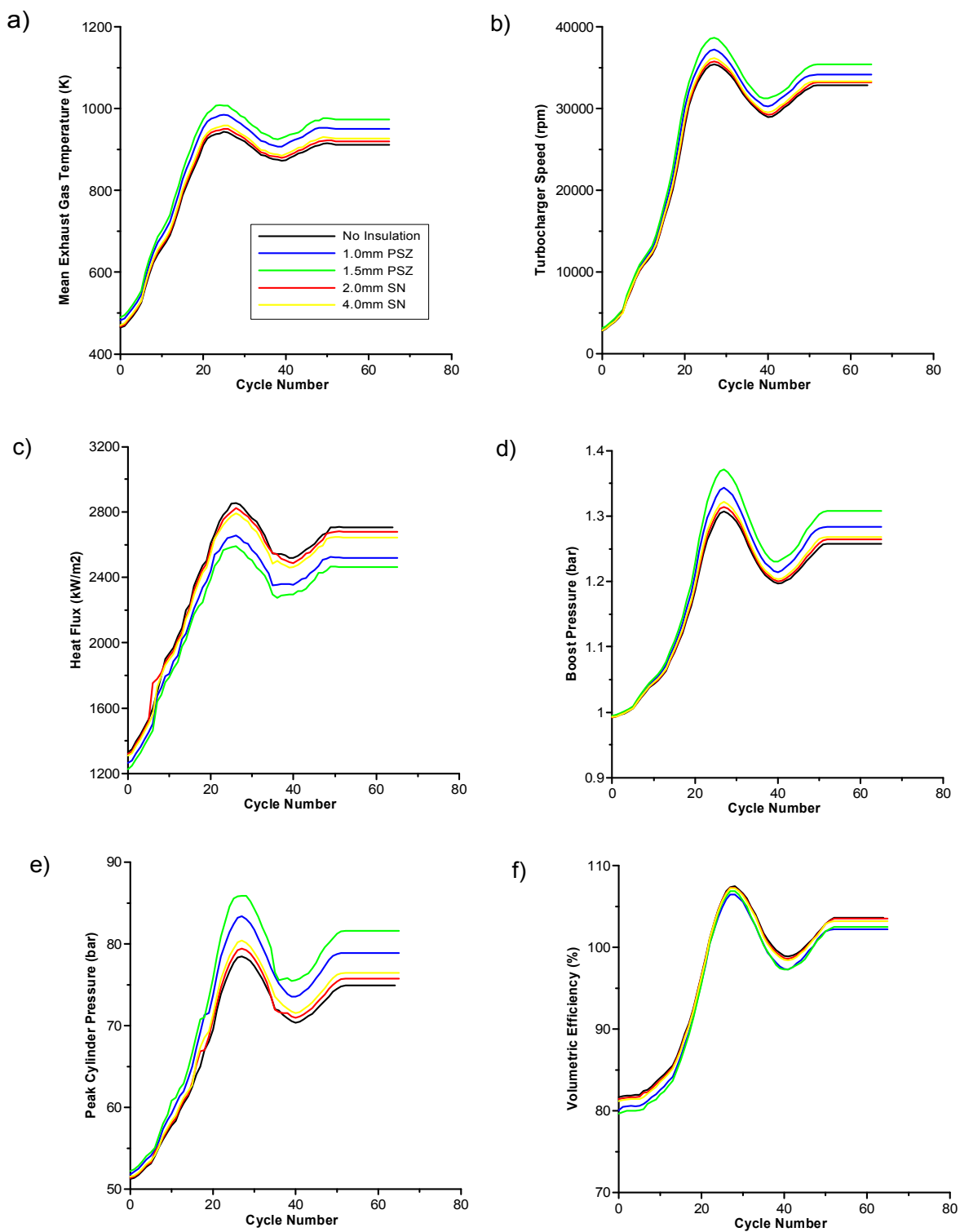
Σχήμα 4.2.

Εξέλιξη μέσης θερμοκρασίας αερίου, μέγιστου συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και μέσης θερμοκρασίας του τοιχώματος του κυλίνδρου στην πλευρά του αερίου καύσης κατά τη μεταβατική λειτουργία μετά από αύξηση φορτίου 5-70% για διάφορα μονωτικά



Σχήμα 4.3.

Εξέλιξη θερμικού βαθμού απόδοσης, μέσης πραγματικής πίεσης, μέσης ενδεικνύμενης πίεσης και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά τη μεταβατική λειτουργία μετά από αύξηση φορτίου 5-70% για διάφορα μονωτικά



Σχήμα 4.4.

Εξέλιξη μέσης θερμοκρασίας καυσαερίων, ταχύτητας περιστροφής υπερπληρωτή, ροής θερμότητας προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου, πίεσης υπερπλήρωσης, μέγιστης πίεσης αερίου θαλάμου καύσης και ογκομετρικού βαθμού απόδοσης κατά τη μεταβατική λειτουργία μετά από αύξηση φορτίου 5-70% για διάφορα μονωτικά

Στο Σχήμα 4.2.d) η μέση θερμοκρασία του τοιχώματος στην πλευρά του αερίου καύσης αυξάνεται κατά την αύξηση του φορτίου. Για τον χυτοσίδηρο το εύρος θερμοκρασιών είναι 390.3 - 456.3 K ενώ για το ισχυρό μονωτικό 1.5 mm PSZ είναι 454.5 - 629.4 K.

Στο Σχήμα 4.2.c) παρουσιάζεται η φθίνουσα απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα κατά την μεταβατική λειτουργία μετά από απότομη αύξηση του φορτίου λειτουργίας. Η απότομη επιβολή φορτίου οδηγεί αναμενόμενα σε μείωση των στροφών του κινητήρα. Παρόλα αυτά, **η χρήση μονωτικού υλικού οδηγεί σε μικρότερη πτώση στροφών, λόγω της μείωσης των θερμικών απωλειών όπως αναφέρθηκε παραπάνω.**

Στο Σχήμα 4.2.b) ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας h_{max} αυξάνεται κατά την αύξηση του φορτίου. Επίσης αυξάνει περισσότερο όσο αυξάνεται ο βαθμός μόνωσης, το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που επικρατούν. Ενδεικτικά, ο μέγιστος συντελεστής αυξάνει στην περίπτωση χρήσης μονωτικού πάχους 1.5 mm PSZ σε σχέση με τον χυτοσίδηρο κατά ποσοστό 15.59%.

Σε αντίθεση με το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, στο Σχήμα 4.4.c) η ύπαρξη μονωτικού υλικού προκαλεί μείωση στη ροή θερμότητας κατά την αύξηση του φορτίου. Η υψηλή ροή θερμότητας είναι ανεπιθύμητη διότι προκαλεί θερμικές καταπονήσεις, επομένως η μείωση της είναι θεμιτή αφού οδηγεί τελικά σε μικρότερες απαιτήσεις από το σύστημα ψύξης. Το φαινόμενο της μείωσης οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνοντας το βαθμό μόνωσης αυξάνεται η θερμοκρασία του τοιχώματος του κυλίνδρου στη πλευρά του αερίου καύσης και μειώνεται η διαφορά ($T_g - T_{w,g}$) επομένως μειώνεται η ροή θερμότητας όπως αποδεικνύεται από την Εξίσωση 2.1. του Κεφαλαίου 2:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = A \cdot h_g (T_g - T_{w,g}) .$$

Στο Σχήμα 4.4.a) παρατηρείται η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας των καυσαερίων κατά την μεταβατική λειτουργία. Η χρήση μονωτικού υλικού προκαλεί ακόμα μεγαλύτερη αύξηση. Συγκεκριμένα στον κύκλο 25 η χρήση μονωτικού υλικού 1.5 mm PSZ προσδίδει 7% μεγαλύτερη θερμοκρασία από τον χυτοσίδηρο.

Στο Σχήμα 4.3.c) παρατηρείται ότι για την συγκεκριμένη αύξηση του φορτίου του κινητήρα η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνεται και αντίστοιχα ο θερμικός βαθμός απόδοσης

αυξάνεται (Σχήμα 4.3.a). Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας γίνεται οικονομικότερος όσο αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο. Η μείωση είναι ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση ισχυρού μονωτικού. Συγκεκριμένα για μονωτικό 1.5 mm PSZ από τον πρώτο μέχρι τον εικοστό κύκλο παρατηρείται μείωση 14.3%. Η απόκριση της ειδικής κατανάλωση καυσίμου όπως και του θερμικού βαθμού απόδοσης επιβεβαιώνουν το κέρδος από την ύπαρξη μόνωσης.

Στα Σχήματα 4.3.d) και 4.3.b) παρατηρείται ότι τόσο η μέση πραγματική πίεση όσο και η μέση ενδεικνύμενη πίεση αυξάνονται κατά τη μεταβατική λειτουργία, μετά από απότομη αύξηση του φορτίου. Τα αυξημένα επίπεδα θερμοκρασιών οδηγούν σε πιο 'γεμάτα' διαγράμματα πίεσης λόγω του αυξημένου έργου εκτόνωσης. Στην περίπτωση της μέσης πραγματικής πίεσης με χρήση ισχυρού μονωτικού 1.5 mm PSZ η μέγιστη τιμή της αυξάνεται κατά 6.8%.

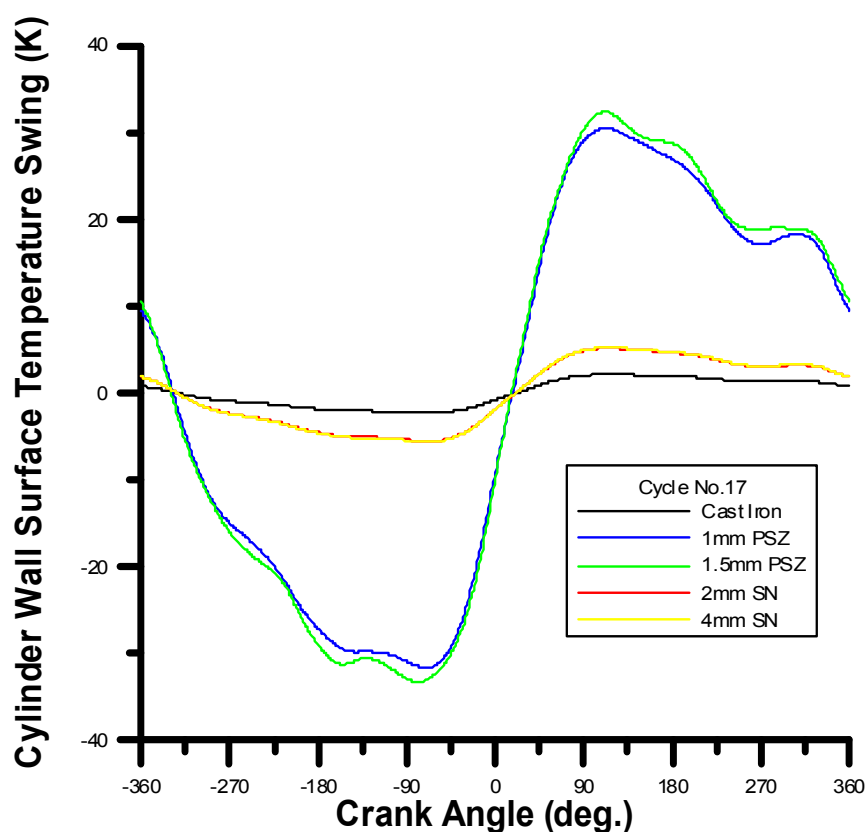
Στο Σχήμα 4.4.d) παρατηρείται ότι με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα αυξάνεται και η πίεση υπερπλήρωσης. Η υστέρηση του υπερπληρωτή γίνεται αισθητή στους πρώτους κύκλους της μεταβατικής λειτουργίας. Η ύπαρξη μονωτικού υλικού αυξάνει ελάχιστα την πίεση υπερπλήρωσης συγκριτικά με την αύξηση των θερμοκρασιών εσωτερικά του κυλίνδρου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή αυξάνεται από τον χυτοσίδηρο στο μονωτικό 1.5 mm PSZ κατά ποσοστό 4.92%.

Παρομοίως, στο Σχήμα 4.4.b) παρατηρείται ότι η ταχύτητα του υπερπληρωτή αυξάνεται κατά τη μεταβατική λειτουργία με την αύξηση του φορτίου. Η υστέρηση του υπερπληρωτή γίνεται αισθητή και εδώ στους πρώτους κύκλους όπου η ταχύτητα παραμένει σταθερή. Η ύπαρξη μονωτικού συμβάλλει στην μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας, όμως και εδώ η αύξηση είναι ελάχιστη συγκριτικά με τα υψηλά επίπεδα θερμοκρασιών μέσα στον κύλινδρο. Συγκεκριμένα στον No.28 κύκλο, όπου παρατηρείται η μέγιστη ταχύτητα, για τον χυτοσίδηρο φτάνει τις 35436 rpm ενώ για 1.5 mm PSZ η ταχύτητα φτάνει τις 38659 rpm, δηλαδή αύξηση 9.1%.

Στο Σχήμα 4.4.f) παρατηρείται ότι ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου. Η ύπαρξη μονωτικού υλικού δρά αρνητικά στη συγκεκριμένη παράμετρο. Το εύρος τιμών είναι από 81.7% έως 107.46% για χυτοσίδηρο ενώ για 1.5 mm PSZ είναι από 79.63% έως 106.89%. Κατά την εισαγωγή του αερίου στον κύλινδρο, όταν υπάρχει μονωτικό υλικό, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας του τοιχώματος του κυλίνδρου

μεταφέρεται θερμότητα στο εισερχόμενο ρεύμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πυκνότητας του αερίου επομένως τη μείωση της εισερχόμενης μάζας στον κύλινδρο και ως εκ τούτου του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης κατά τη μεταβατική λειτουργία.

Στο Σχήμα 4.4.e) παρατηρείται η αναμενόμενη, λόγω αύξησης της παροχής καυσίμου, αύξηση της μέγιστης πίεσης αερίου του θαλάμου καύσης κατά την διάρκεια της μεταβατικής περιόδου. Το μονωτικό υλικό αυξάνει την πίεση ακόμα περισσότερο κατά την αύξηση του φορτίου λόγω μείωσης της ροής θερμότητας προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Συγκεκριμένα το εύρος κυμαίνεται για χυτοσίδηρο από 51.2 bar έως 78.47 bar ενώ για 1.5 mm PSZ από 52.18 bar έως 86.39 bar. Επομένως στον κύκλο 29 το ποσοστό αύξησης είναι 10.1%.



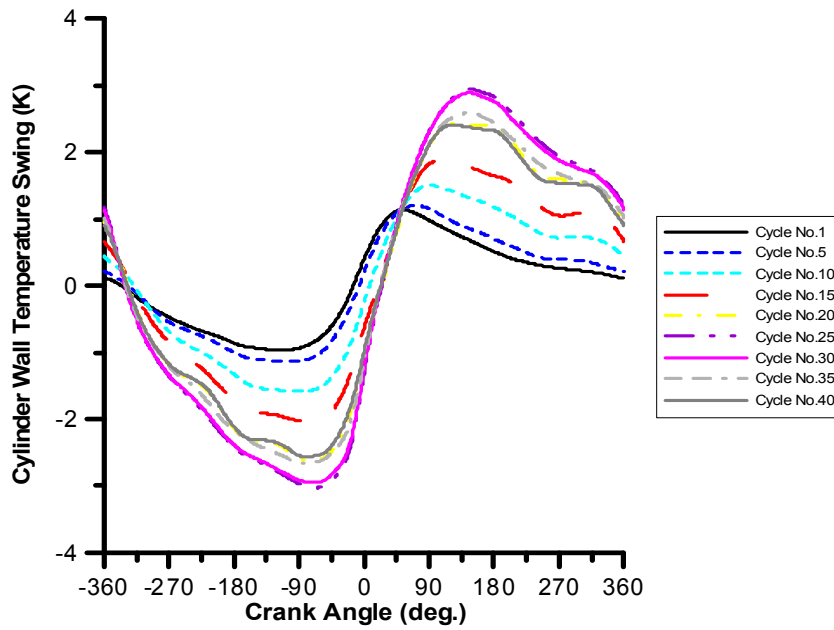
Σχήμα 4.5.

Μεταβολή θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη διάρκεια του No.17 κύκλου λειτουργίας για διάφορα μονωτικά

Στο Σχήμα 4.5. παρουσιάζεται για έναν ενδιάμεσο κύκλο της μεταβατικής λειτουργίας, τον κύκλο 17, η σχέση μεταξύ της θερμοκρασιακής ταλάντωσης στην επιφάνεια του τοιχώματος του κυλίνδρου, για βάθος $S=0$ (Wall Temperature Swing), συναρτήσει της γωνίας στροφάλου (φ). Η συνάρτηση αυτή είναι περιοδική όπως και η λειτουργία του κινητήρα. Οι τιμές είναι και αρνητικές και θετικές. Οι αρνητικές τιμές εμφανίζονται κατά τη φάση της εισαγωγής και της συμπίεσης και οι θετικές τιμές κατά τη φάση της εκτόνωσης και της εξαγωγής. Κατά την εισαγωγή, η θερμοκρασία του τοιχώματος του κυλίνδρου μειώνεται λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το υψηλότερης θερμοκρασίας τοίχωμα στον "ψυχρότερο" εισερχόμενο αέρα. Αντίθετα κατά τη φάση της συμπίεσης η θερμοκρασία του τοιχώματος αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τον υψηλότερης θερμοκρασίας συμπιεσμένο αέρα στο τοίχωμα του κυλίνδρου. Τέλος, από τη μέση της φάσης της εκτόνωσης και έπειτα, η θερμοκρασία του τοιχώματος μειώνεται λόγω μείωσης της θερμοκρασίας των αερίων. **Παρατηρείται ότι το εύρος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται ο βαθμός μόνωσης** (Πίνακας 4.3). Η διαφορά μεταξύ μονωτικού SN πάχους 2.0mm και 4.0mm είναι σχεδόν μηδενική ενώ για μονωτικό PSZ η διαφορά του εύρους από 1.0mm σε 1.5mm είναι της τάξης του 6 %. Συγκεκριμένα για το χυτοσίδηρο το εύρος της ταλάντωσης είναι από -2.3 K μέχρι 2.1 K ενώ για το ισχυρό μονωτικό 1.5 mm PSZ είναι από -31.7 μέχρι 30.5 K. Μεταξύ του μονωτικού SN και του χυτοσιδήρου η διαφορά δεν είναι τόσο αισθητή.

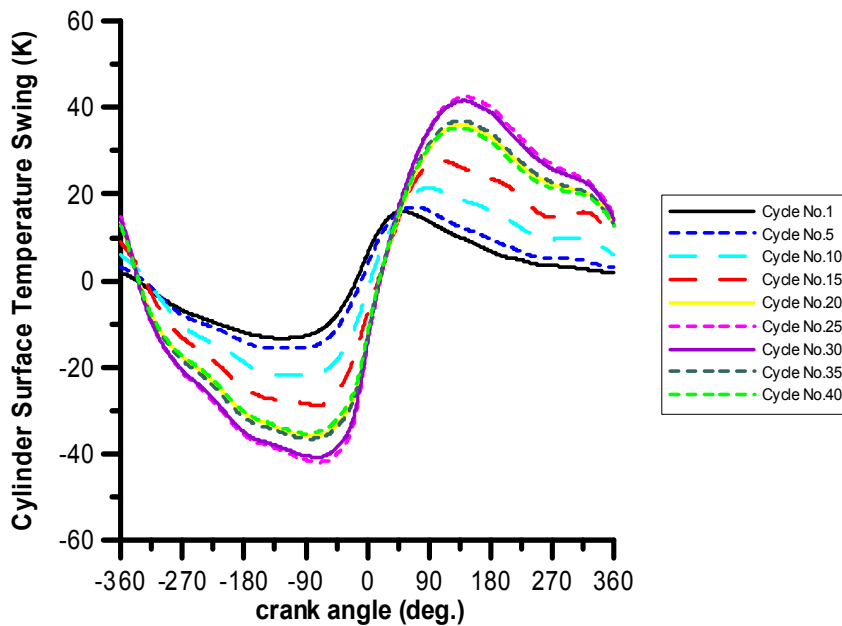
Υλικό	Θερμοκρασιακό εύρος [K]
cast iron	4 - 5
SN	7 - 12
PSZ	50 - 80

Πίνακας 4.3: Θερμοκρασιακό εύρος ταλάντωσης



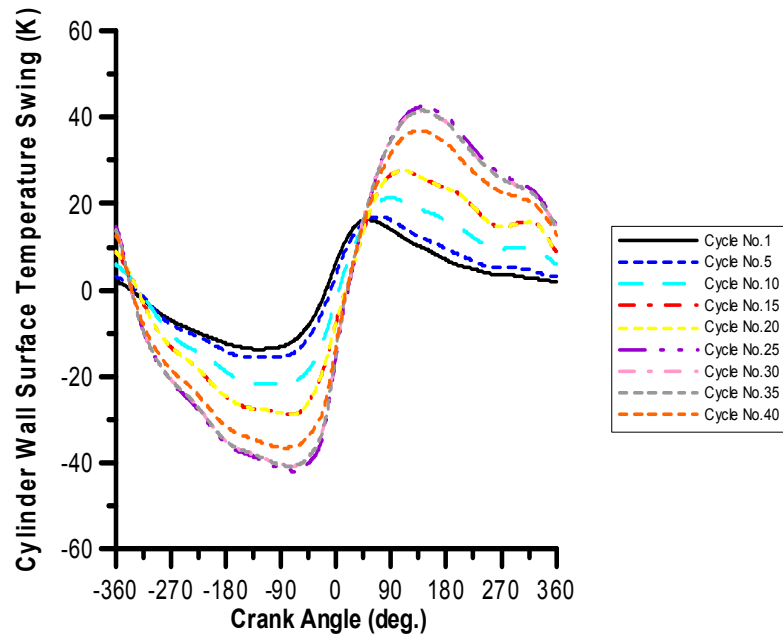
Σχήμα 4.6.

Μεταβολή θερμοκρασιακής ταλάντωσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για διάφορους κύκλους της μεταβατικής λειτουργίας κατά την απότομη αύξηση φορτίου στη περίπτωση χυτοσιδήρου



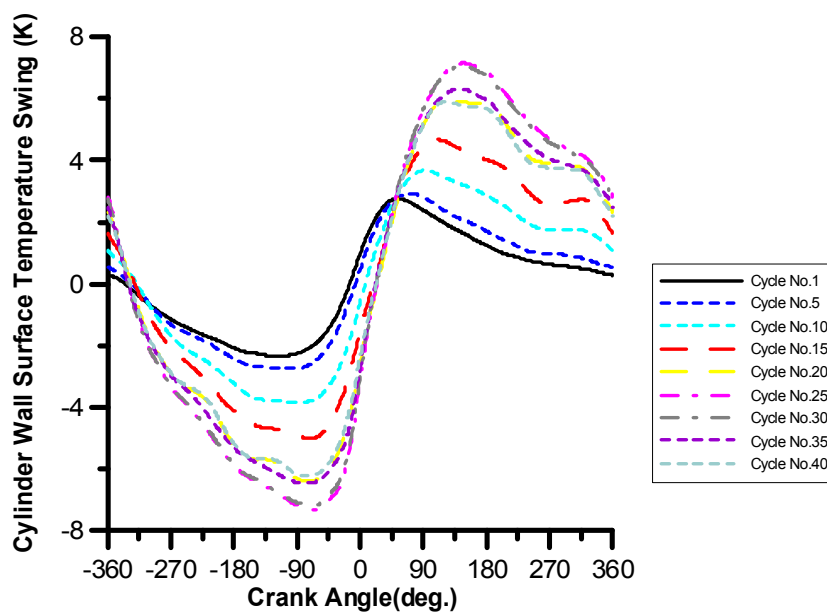
Σχήμα 4.7.

Μεταβολή θερμοκρασιακής ταλάντωσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για διάφορους κύκλους της μεταβατικής λειτουργίας κατά την απότομη αύξηση φορτίου στη περίπτωση μονωτικού 1.0mm PSZ



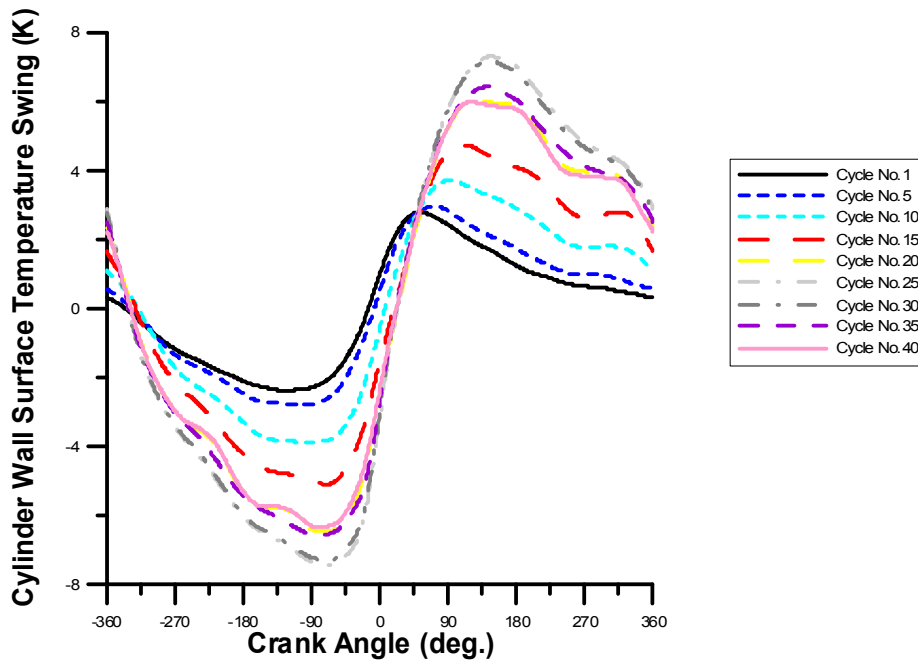
Σχήμα 4.8.

Μεταβολή θερμοκρασιακής ταλάντωσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για διάφορους κύκλους της μεταβατικής λειτουργίας κατά την απότομη αύξηση φορτίου στη περίπτωση μονωτικού 1.5 mm PSZ



Σχήμα 4.9.

Μεταβολή θερμοκρασιακής ταλάντωσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για διάφορους κύκλους της μεταβατικής λειτουργίας κατά την απότομη αύξηση φορτίου στη περίπτωση μονωτικού 2.0 mm SN



Σχήμα 4.10.

Μεταβολή θερμοκρασιακής ταλάντωσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για διάφορους κύκλους της μεταβατικής λειτουργίας κατά την απότομη αύξηση φορτίου στη περίπτωση μονωτικού 4.0 mm SN

Στα Σχήματα 4.6.- 4.10. απεικονίζονται οι θερμοκρασιακές ταλαντώσεις στην επιφάνεια του τοιχώματος του κυλίνδρου στην περίπτωση χυτοσιδήρου καθώς και για κάθε μονωτικό υλικό χωριστά. Οι ταλαντώσεις παρουσιάζονται ανά πέντε κύκλους λειτουργίας από τον πρώτο κύκλο μέχρι τον τεσσαρακοστό. Ο κύκλος με το μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης, σε όλες τις περιπτώσεις, είναι ο No.25, ακολουθεί ο No.30 ενώ το μικρότερο εύρος το παρουσιάζει ο No.1. Το εύρος κάθε θερμοκρασιακής ταλάντωσης είναι ανάλογο των θερμοκρασιών του αερίου οι οποίες, κατά βάση, εξαρτώνται από την παροχή καυσίμου. Επομένως, ο κύκλος στον οποίο έχουμε μέγιστη παροχή καυσίμου είναι στην περιοχή του κύκλου No.25. Αντίθετα στην περιοχή του κύκλου No.1 επικρατούν ουσιαστικά συνθήκες μόνιμης λειτουργίας. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η παροχή του καυσίμου το πλάτος μετακινείται προς τα δεξιά. Σχετικά με τη μόνωση του κυλίνδρου, το εύρος των θερμοκρασιών αυξάνεται όσο αυξάνεται ο βαθμός μόνωσης αλλά με φθίνοντα ρυθμό. Συγκεκριμένα, χωρίς μόνωση το εύρος τιμών είναι για τον κύκλο No.1 (-1.1 K) και για τον No.25 είναι (-3.0-2.9K). Με χρήση ισχυρού μονωτικού 1.5 mm PSZ το εύρος για τον κύκλο No.1 είναι (-13.8,16.4K) και για τον κύκλο No.25 είναι (-41.9-42.6K).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε το φαινόμενο των βραχυπρόθεσμων θερμοκρασιακών ταλαντώσεων στις οποίες υπόκεινται τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης ενός υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel κατά τη μεταβατική λειτουργία του μετά από απότομη αύξηση του φορτίου με το οποίο είναι συνδεδεμένος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η μέση θερμοκρασία των αερίων, το πλάτος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης και το βάθος στο οποίο σβήνει η θερμοκρασιακή ταλάντωση κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων που συμβάλουν στην απόκριση του κινητήρα.

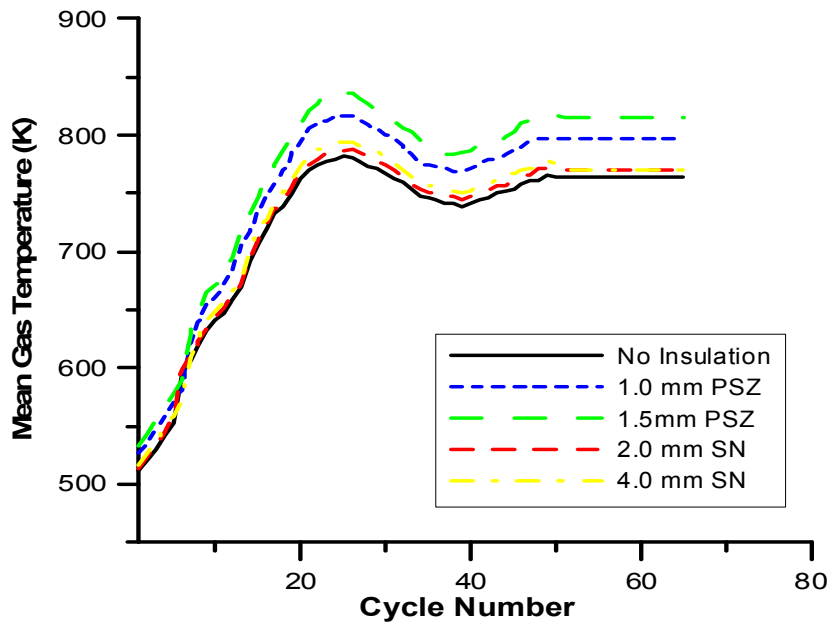
Για την ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα λειτουργίας του κινητήρα κατά τη μεταβατική λειτουργία - απότομη αύξηση φορτίου- τα οποία προέρχονται από κώδικα που έχει εξελιχθεί στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ. του Ε.Μ.Π. και έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά σε λειτουργία χωρίς μόνωση [8].

5.1. Ονομαστική Κατάσταση

Στην Παράγραφο αυτή εξετάζεται η απόκριση των τριών παραμέτρων κατά την ονομαστική μεταβολή του κινητήρα (Πίνακας 5.1), όπου η αύξηση του φορτίου είναι από 5% έως 70%. Η μεταβατική λειτουργία εξελίσσεται κατά τη διάρκεια 65 κύκλων λειτουργίας.

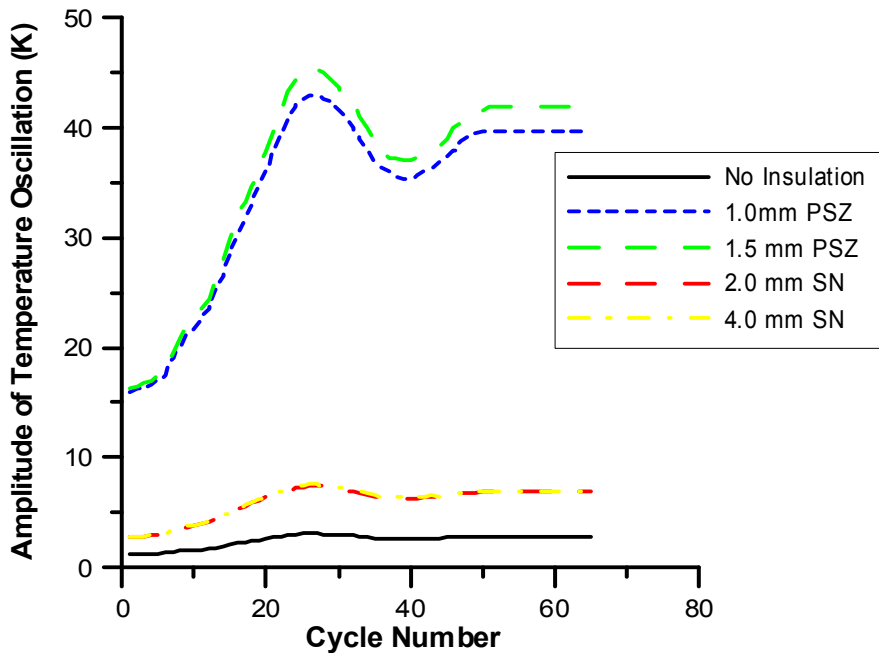
Μεταβολή φορτίου	5%-70%
Χρόνος επιβολής φορτίου	1.3 sec
Τύπος φορτίου	Υδραυλική πέδη (a:2)
Γωνία ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής	296° μετά το ΚΝΣ
Επιφάνεια στροβίλου	$2.61 \cdot 10^{-3} m^2$
Όγκος πολλαπλής εξαγωγής	$0.006046 m^3$

Πίνακας 5.1: Ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας κατά τη μεταβατική λειτουργία



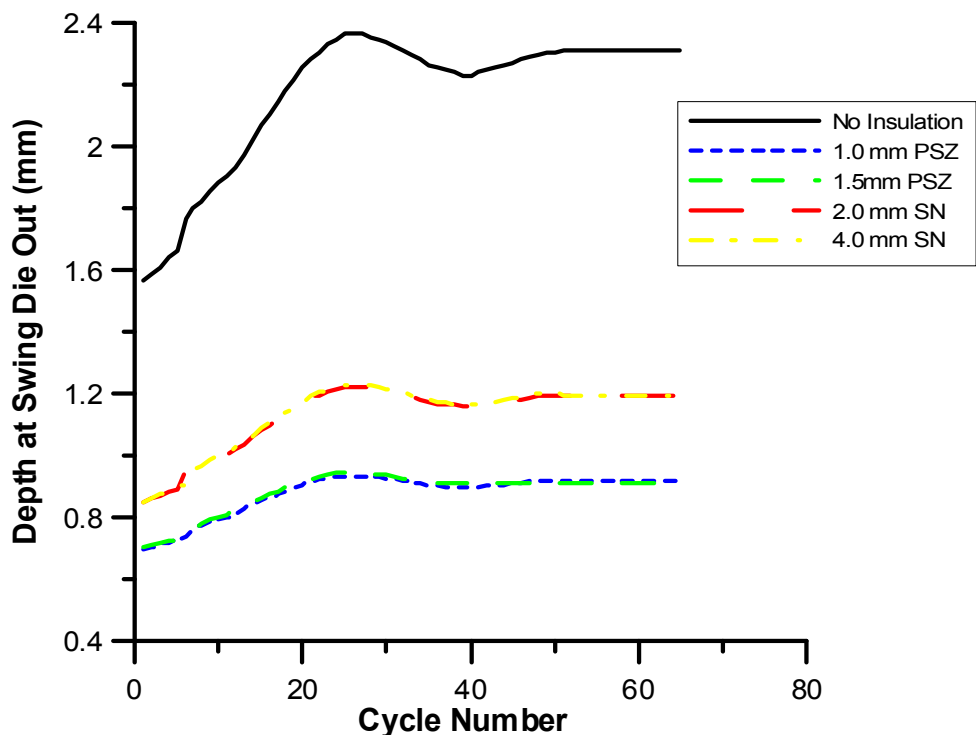
Σχήμα 5.1.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου κατά την ονομαστική μεταβατική λειτουργία



Σχήμα 5.2.

Απόκριση του πλάτους της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά την ονομαστική μεταβατική λειτουργία



Σχήμα 5.3.

Απόκριση του βάθους απόσβεσης της ταλάντωσης κατά την ονομαστική μεταβατική λειτουργία

Στο Σχήμα 5.1. παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία των αερίων κατά τη μεταβατική λειτουργία για αύξηση φορτίου 5%-70%. Από τον κύκλο No.1 μέχρι και τον No.25 παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή οφείλεται στην απότομη αύξηση φορτίου και επομένως στην αύξηση της παροχής του εγχυόμενου καυσίμου μέσα στο θάλαμο καύσης. Από τον κύκλο No.26 μέχρι τον No.50 μειώνεται και στη συνέχεια σταθεροποιείται στη νέα της τιμή ακολουθώντας, γενικά, την εξέλιξη της θέσης του κανόνα πετρελαίου (βλ. Σχήμα 4.1.) Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη με την ύπαρξη μονωτικού και ακολουθεί τη σειρά : χυτοσίδηρος, 2.0 mm SN, 4.0 mm SN, 1.0 mm PSZ, 1.5 mm PSZ. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή για τον χυτοσίδηρο είναι 782.6 K ενώ για 1.5mm PSZ είναι 837.2 K.

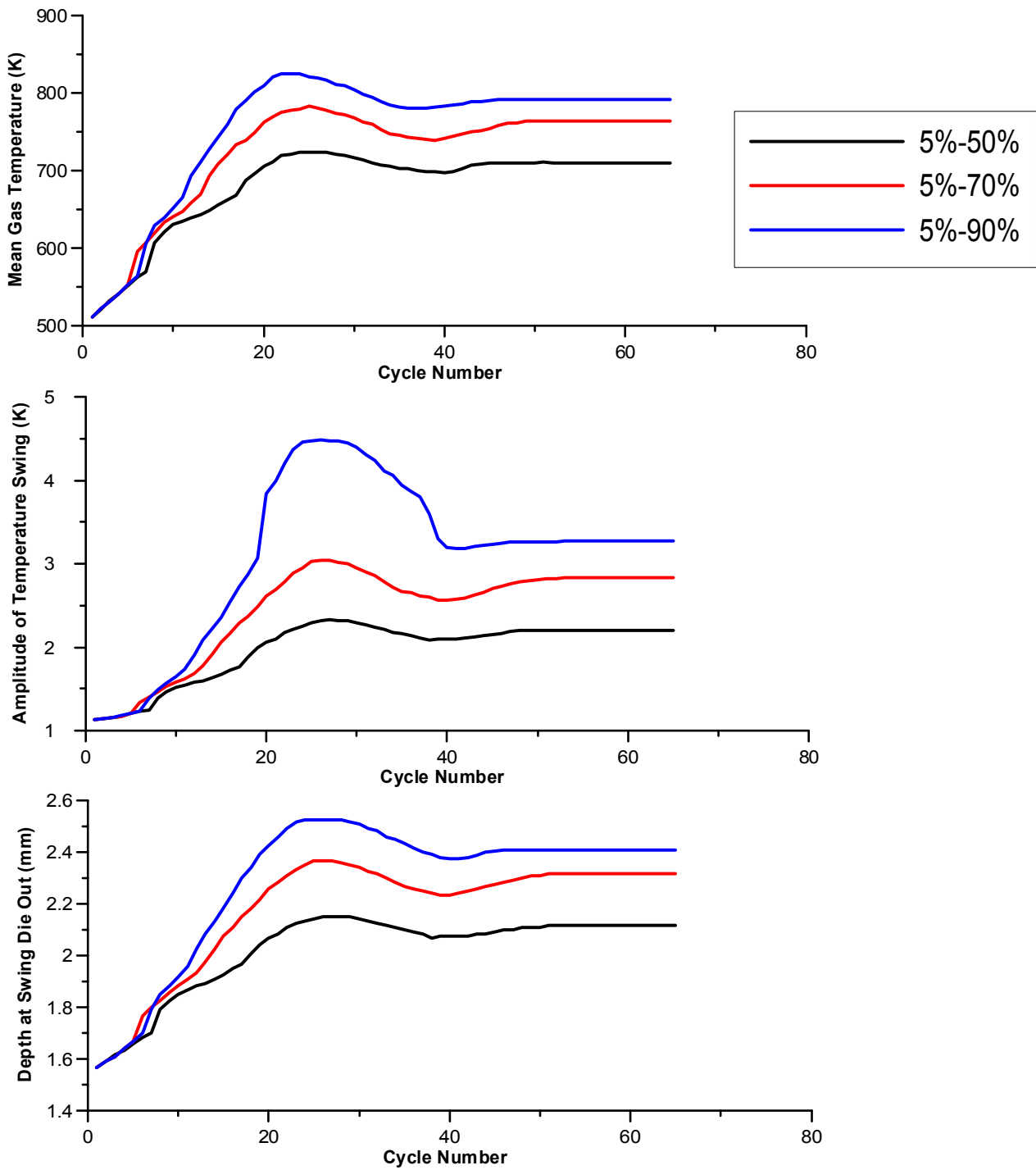
Στο Σχήμα 5.2. παρουσιάζεται η σχέση του πλάτους της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για αύξηση φορτίου 5%-70% με χρήση διαφόρων μονωτικών. Παρατηρείται αύξηση του πλάτους κατά την απότομη επιβολή φορτίου. Η αύξηση αυτή διαφέρει ανάλογα με την ύπαρξη μονωτικού ή όχι καθώς και από το πάχος

του μονωτικού. Συγκεκριμένα για το χυτοσίδηρο το εύρος τιμών είναι 1.1 - 3.1 K, για το 4.0 mm SN είναι 2.8 - 7.5 K ενώ για το ισχυρό μονωτικό 1.5 mm PSZ είναι 16.4 - 45.4 K. Η μεγάλη διαφορά οφείλεται όπως αναφέρθηκε νωρίτερα στις θερμομονωτικές ιδιότητες των υλικών.

Στο Σχήμα 5.3. παρουσιάζεται το βάθος στο οποίο σβήνει η θερμοκρασιακή ταλάντωση κατά τη μεταβατική λειτουργία για απότομη αύξηση φορτίου. Το θερμοκρασιακό εύρος φθίνει κινούμενο από την επιφάνεια εσωτερικά του κυλίνδρου και εξαφανίζεται σε βάθος που κυμαίνεται ανάλογα με το υλικό και ανεξάρτητα από το πάχος της εκάστοτε μόνωσης. Παρατηρείται ότι από τον κύκλο No.1 μέχρι τον κύκλο No.25 το βάθος αυξάνεται ενώ στη συνέχεια παρουσιάζει μικρή μείωση και στη συνέχεια σταθεροποιείται ακολουθώντας την αντίστοιχη καμπύλη των θερμοκρασιών (Σχήμα 5.1). Όσον αφορά το εύρος του βάθους στο οποίο εξαφανίζεται η θερμοκρασιακή ταλάντωση για τον χυτοσίδηρο είναι 1.57 - 2.37 mm, για SN είναι 0.85 - 1.23 mm ενώ για PSZ είναι 0.76 - 0,1 mm. **Συμπεραίνεται ότι η χρήση ισχυρού μονωτικού υλικού οδηγεί σε υψηλή θερμοκρασιακή ταλάντωση, όπως φάνηκε στο Σχήμα 5.2., η οποία σβήνει σε πολύ μικρό βάθος μέσα στο τοίχωμα, προκαλώντας ισχυρό θερμικό 'σοκ' (thermal shock) και κατ' επέκταση υψηλή θερμική καταπόνηση.**

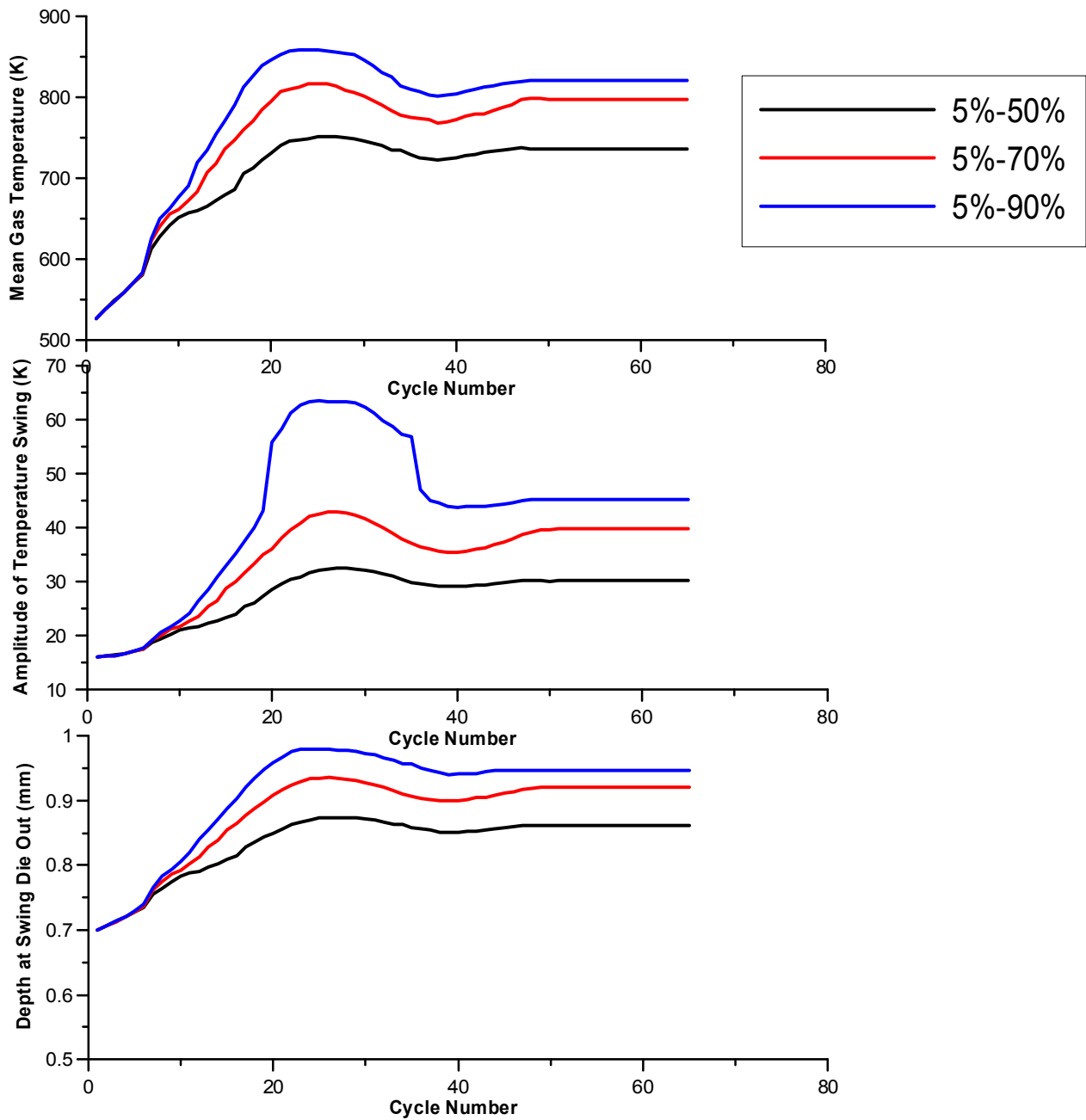
5.2. Επίδραση μεταβολής επιβαλλόμενου φορτίου

Στην Παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η επίδραση του μεγέθους της αύξησης του φορτίου κατά τη μεταβατική λειτουργία στην απόκριση του κινητήρα. Το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου παίζει σημαντικό ρόλο κυρίως σε σχέση με τη μέγιστη πτώση στροφών του κινητήρα και την τελική του ταχύτητα. Στην αρχή της μεταβατικής λειτουργίας όπου ισχύουν οι συνθήκες μόνιμης κατάστασης η ροπή του κινητήρα ισούται με τη ροπή του φορτίου και ο λόγος αέρα καυσίμου λ_α είναι υψηλός λόγω του χαμηλού φορτίου λειτουργίας. Στη συνέχεια, μόλις εφαρμοστεί το μεγαλύτερο φορτίο, η σχέση ισότητας των ροπών παύει να ισχύει διότι ο κινητήρας δε μπορεί να ανταποκριθεί άμεσα στη ροπή του αυξημένου φορτίου και γι αυτό μειώνονται οι στροφές του. Προφανώς, όσο μεγαλύτερο είναι το επιβαλλόμενο φορτίο, τόσο υψηλότερη είναι η ροπή του φορτίου κατά του πρώτους κύκλους της μεταβατικής λειτουργίας.



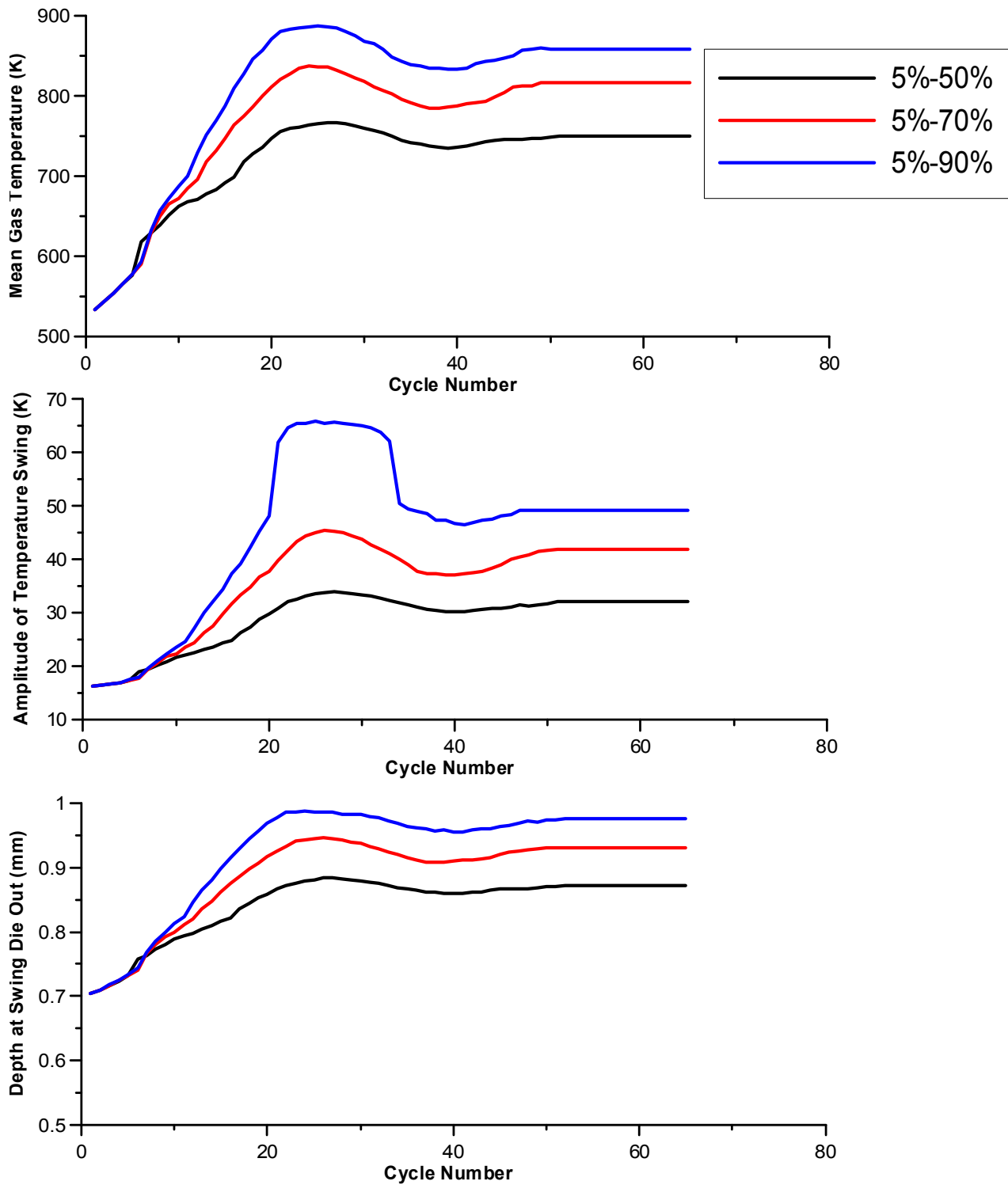
Σχήμα 5.4.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις μεταβολές φορτίου στην περίπτωση χυτοσιδήρου



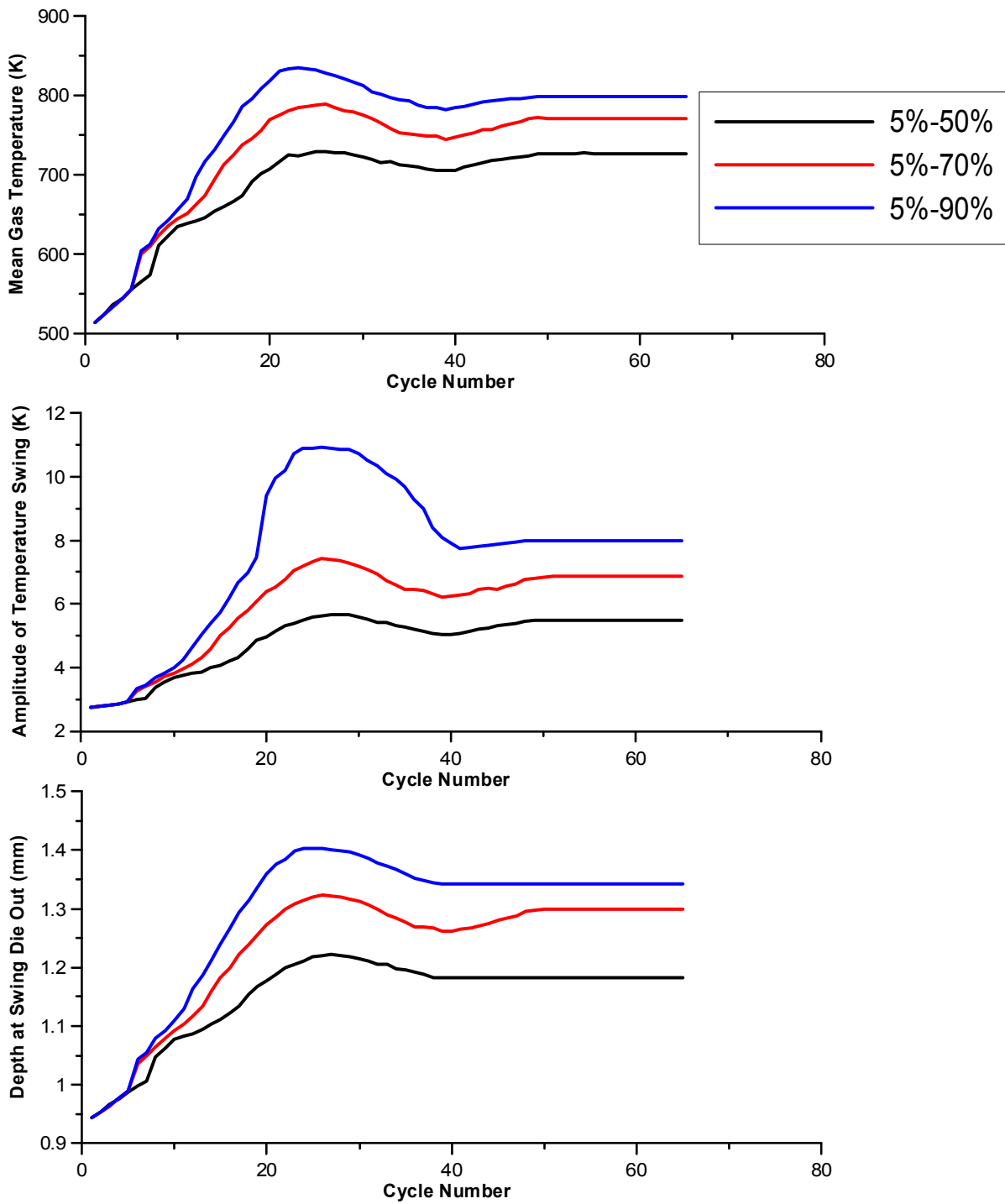
Σχήμα 5.5.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις μεταβολές φορτίου στην περίπτωση 1.0 mm PSZ



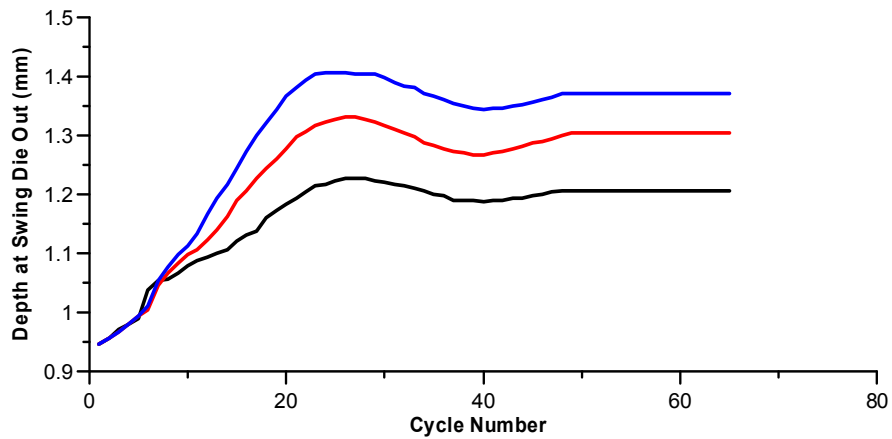
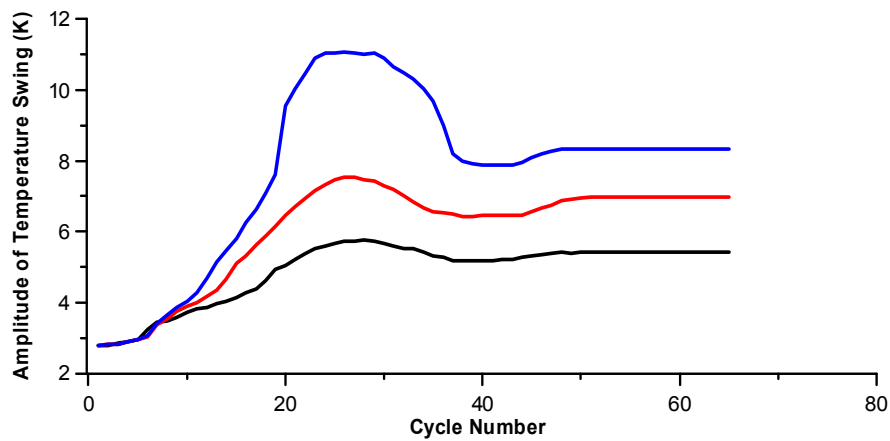
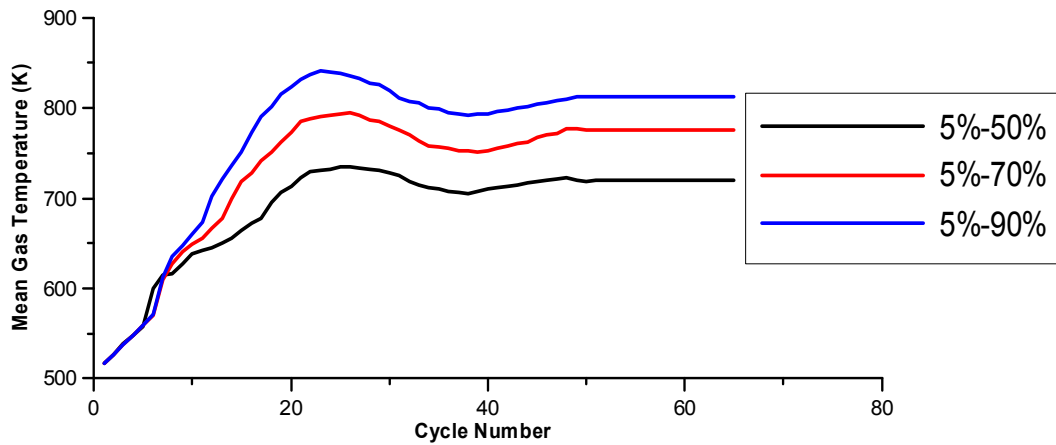
Σχήμα 5.6.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις μεταβολές φορτίου στην περίπτωση 1.5 mm PSZ



Σχήμα 5.7.

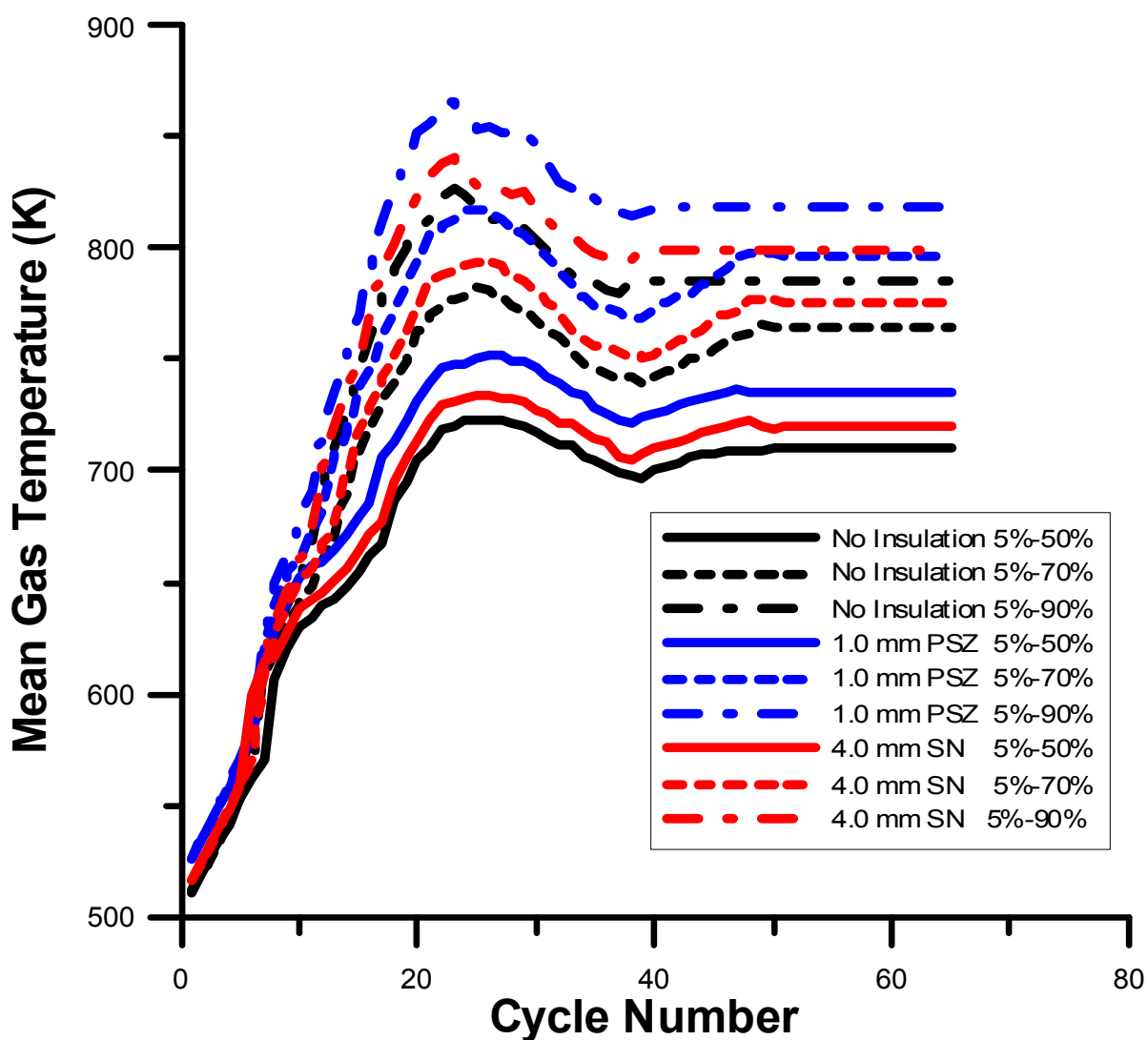
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις μεταβολές φορτίου στην περίπτωση 2.0 mm SN



Σχήμα 5.8.

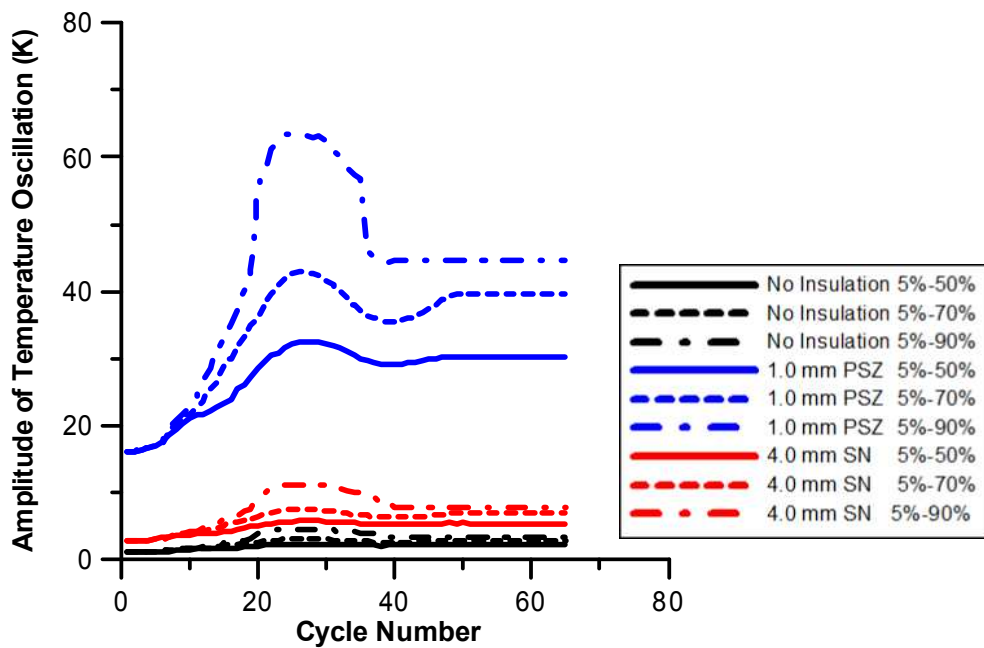
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις μεταβολές φορτίου στην περίπτωση 4.0 mm SN

5.2.1. Σύγκριση των τριών εξεταζομένων παραμέτρων για τα τρία διαφορετικά μεγέθη φορτίου και τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).



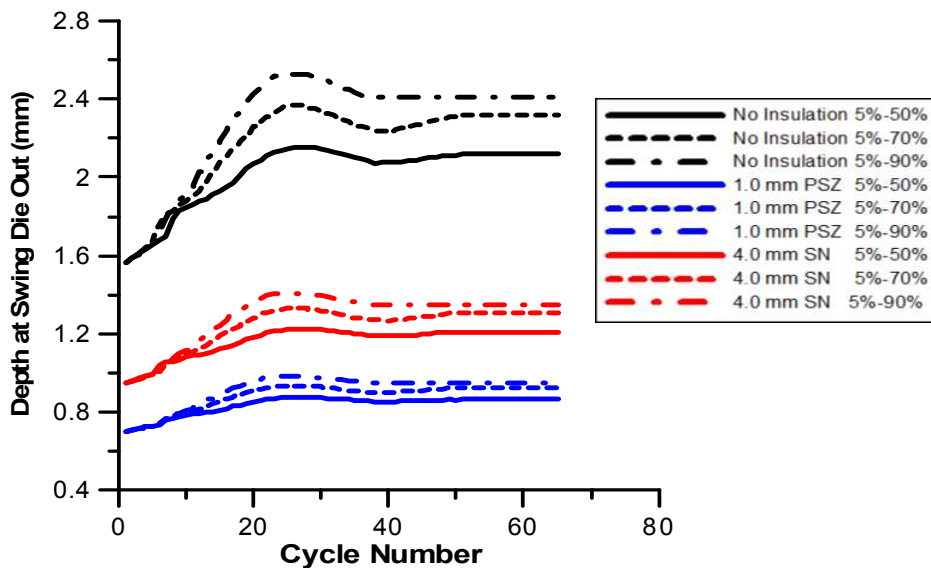
Σχήμα 5.9.

Μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσει διαφόρων μεταβολών φορτίου και μονωτικών



Σχήμα 5.10.

Πλάτος θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσεως διαφόρων μεταβολών φορτίου και μονωτικών



Σχήμα 5.11.

Μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσεως διαφόρων μεταβολών φορτίου και μονωτικών

Στα Σχήματα (5.4.-5.8. και 5.9.) παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας του αερίου στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας κατά τις εξής περιπτώσεις επιβολής απότομης αύξησης του φορτίου: 5-50%, 5-70% και 5-90%. Τόσο στην περίπτωση του χυτοσιδήρου όσο και στην περίπτωση ύπαρξης μονωτικών υλικών, όσο μεγαλύτερο φορτίο ασκείται τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση θερμοκρασία του αερίου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση στροφών του κινητήρα. Ο ρυθμιστής στροφών αντιλαμβάνεται μεγαλύτερη πτώση στροφών και επενεργεί εγχύοντας μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου. Έτσι έχουμε εντονότερο το φαινόμενο υστέρησης του υπερπληρωτή, χαμηλότερο λ_α , χαμηλότερες στροφές κινητήρα και μεγαλύτερες παραμορφώσεις στην στροφαλοφόρο άτρακτο που οδηγούν σε μεγαλύτερη ροπή του κινητήρα, μεγαλύτερη μέγιστη πίεση κυλίνδρου και μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή. Ενδεικτικά, στην περίπτωση του χυτοσιδήρου για φορτίο 5-50% το εύρος θερμοκρασιών είναι 511.3 - 723.5 K ενώ για φορτίο 5-90% το εύρος θερμοκρασιών είναι 511.4 - 826.7 K. Με τη χρήση μονωτικού υλικού 1.5 mm PSZ τα αντίστοιχα εύρη είναι 533.1 - 767.1 K και 533.1 - 883.3 K

Στα Σχήματα (5.4.-5.8. και 5.10.) παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του πλάτους της θερμοκρασιακής ταλάντωσης στην επιφάνεια του τοιχώματος του κυλίνδρου συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας κατά τις εξής περιπτώσεις επιβολής απότομης αύξησης του φορτίου: 5-50%, 5-70% και 5-90%. Παρατηρείται ότι σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση μονωτικού υλικού το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο λόγω μείωσης του λ_α . Παρόλα αυτά οι τιμές του διαφέρουν αισθητά στην περίπτωση χρήσης ισχυρού μονωτικού PSZ από τα υπόλοιπα υλικά. Στην περίπτωση άσκησης φορτίου 5-90% για το χυτοσίδηρο το μέγιστο πλάτος είναι μόλις 4.5 K ενώ για το 1.0 mm PSZ είναι 63.4 K. Αντίθετα για το 4.0 mm SN η απόκλιση από το χυτοσίδηρο είναι αρκετά μικρότερη αφού το μέγιστο πλάτος φτάνει τα 11.01 K.

Στα Σχήματα (5.4.- 5.8. και 5.11.) παρουσιάζεται το βάθος απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη διάρκεια των 65 κύκλων λειτουργίας για τις εξεταζόμενες τρεις περιπτώσεις αύξησης του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το τελικό επιβαλλόμενο φορτίο αυξάνεται το βάθος απόσβεσης. Η απόκλιση μεταξύ του βάθους απόσβεσης χωρίς μονωτικό υλικό και με τη χρήση μονωτικού PSZ είναι μεγάλη. Το βάθος της δεύτερης περίπτωσης είναι πολύ μικρό ειδικά στην περίπτωση 5-50% επιβαλλόμενου φορτίου και σε συνδυασμό με την υψηλή

θερμοκρασιακή ταλάντωση προκαλεί υψηλό θερμικό 'σοκ' και κατ' επέκταση υψηλή θερμική καταπόνηση.

5.3. Είδος επιβαλλόμενου φορτίου

Στην Παράγραφο αυτή εξετάζεται το είδος του φορτίου με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας. Η ροπή αντίστασης που ασκείται προσεγγίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

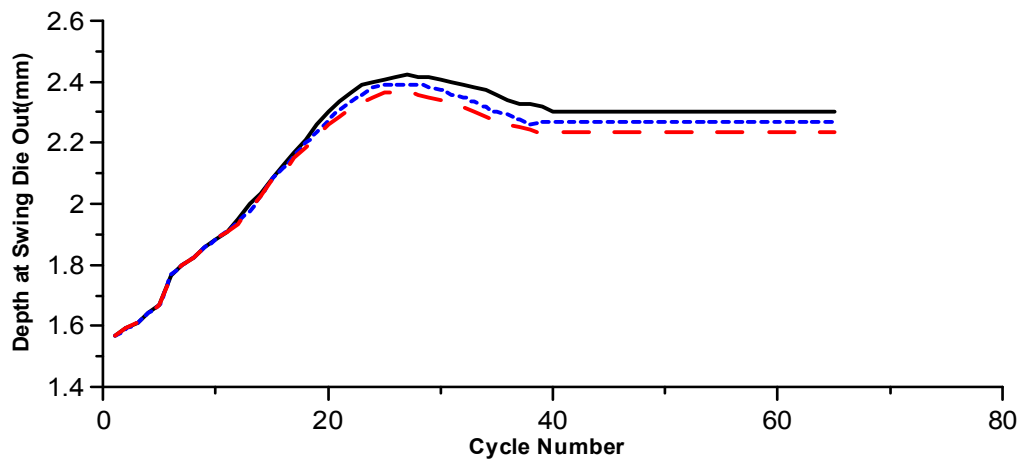
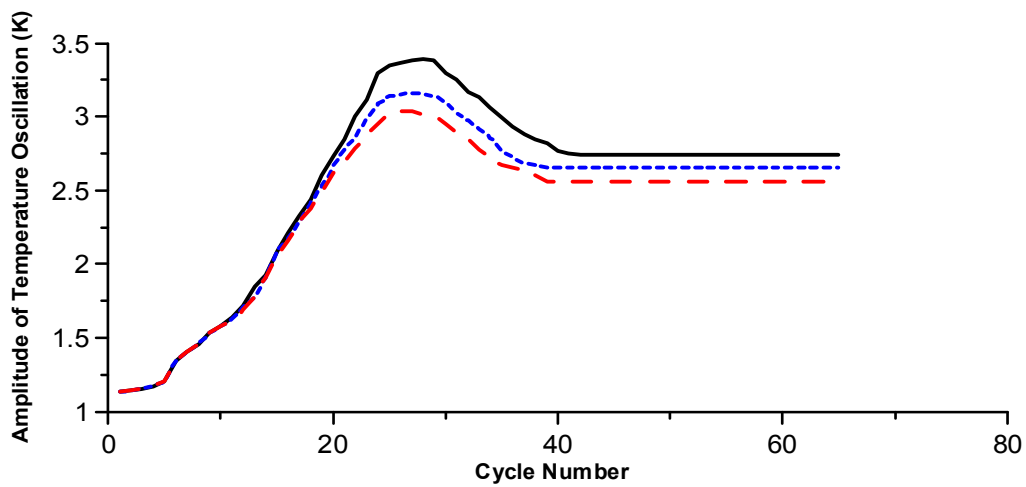
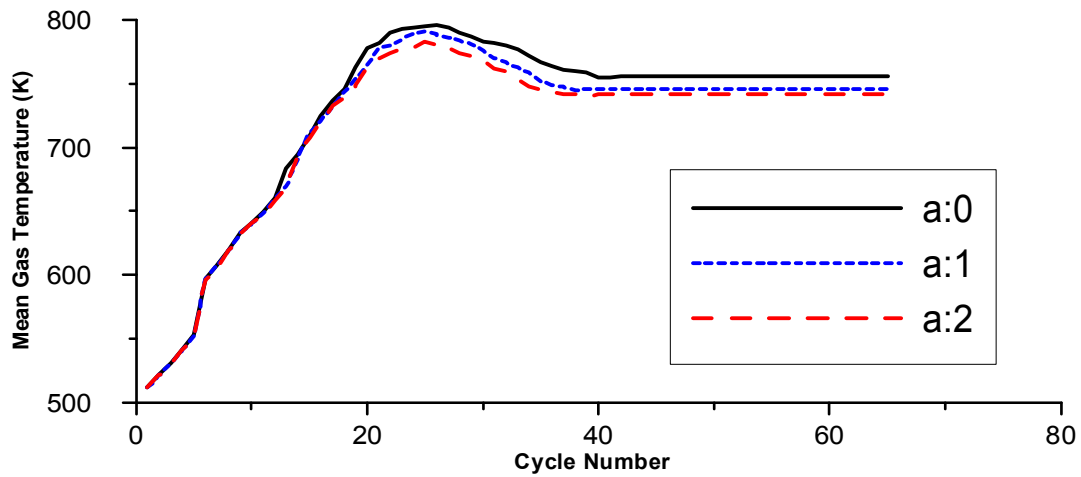
$$\tau_L = c_1 + c_2 \omega_L^a$$

όπου:

a) άκαμπτο φορτίο (κλίση δρόμου) $a=0$

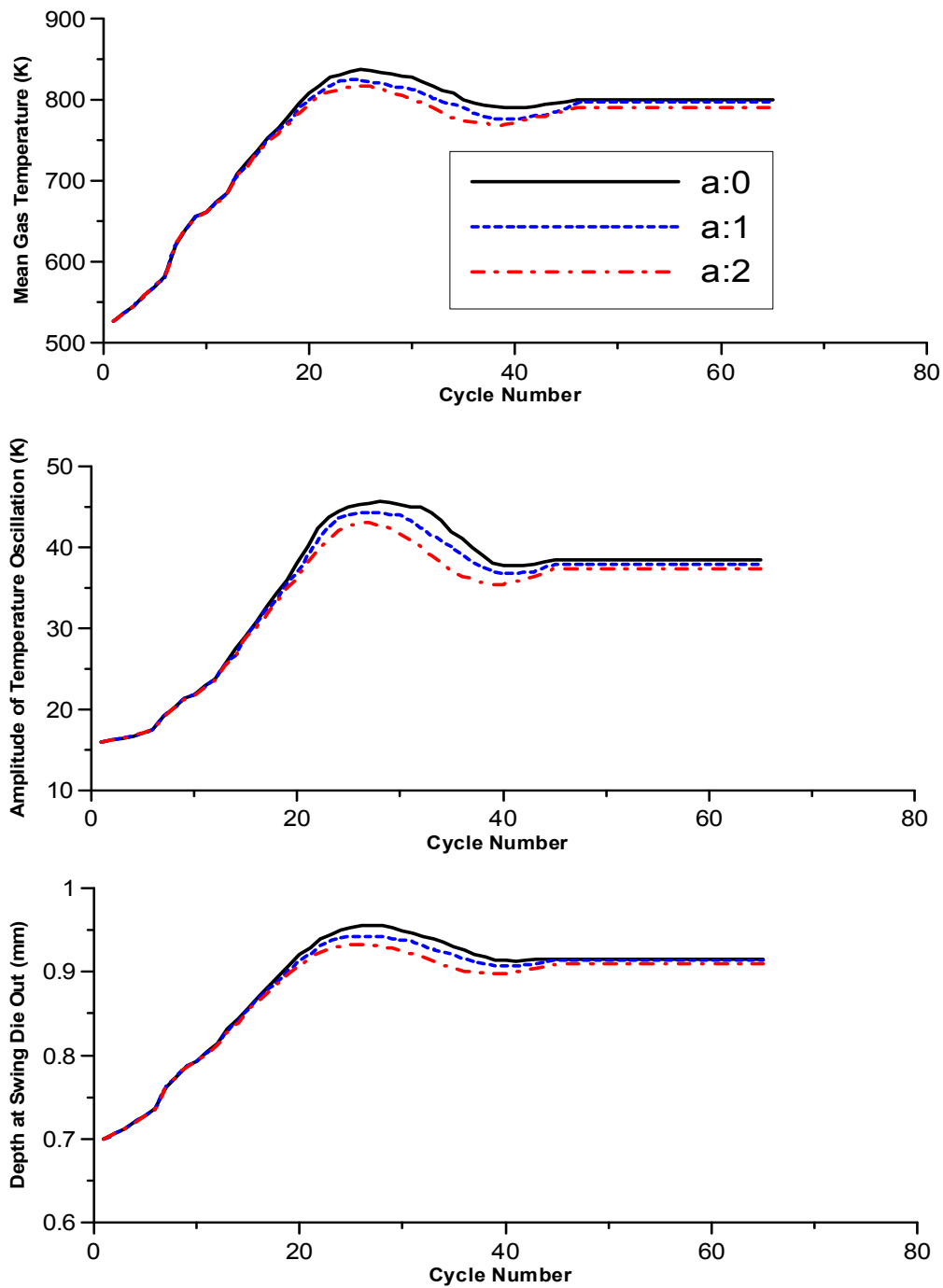
b) γραμμικό φορτίο (ηλεκτρική πέδη, γεννήτρια) $a=1$

c) φορτίο τετραγωνικού τύπου (υδραυλική πέδη, έλικα σταθερού βήματος, αεροδυναμική αντίσταση οχήματος) $a=2$



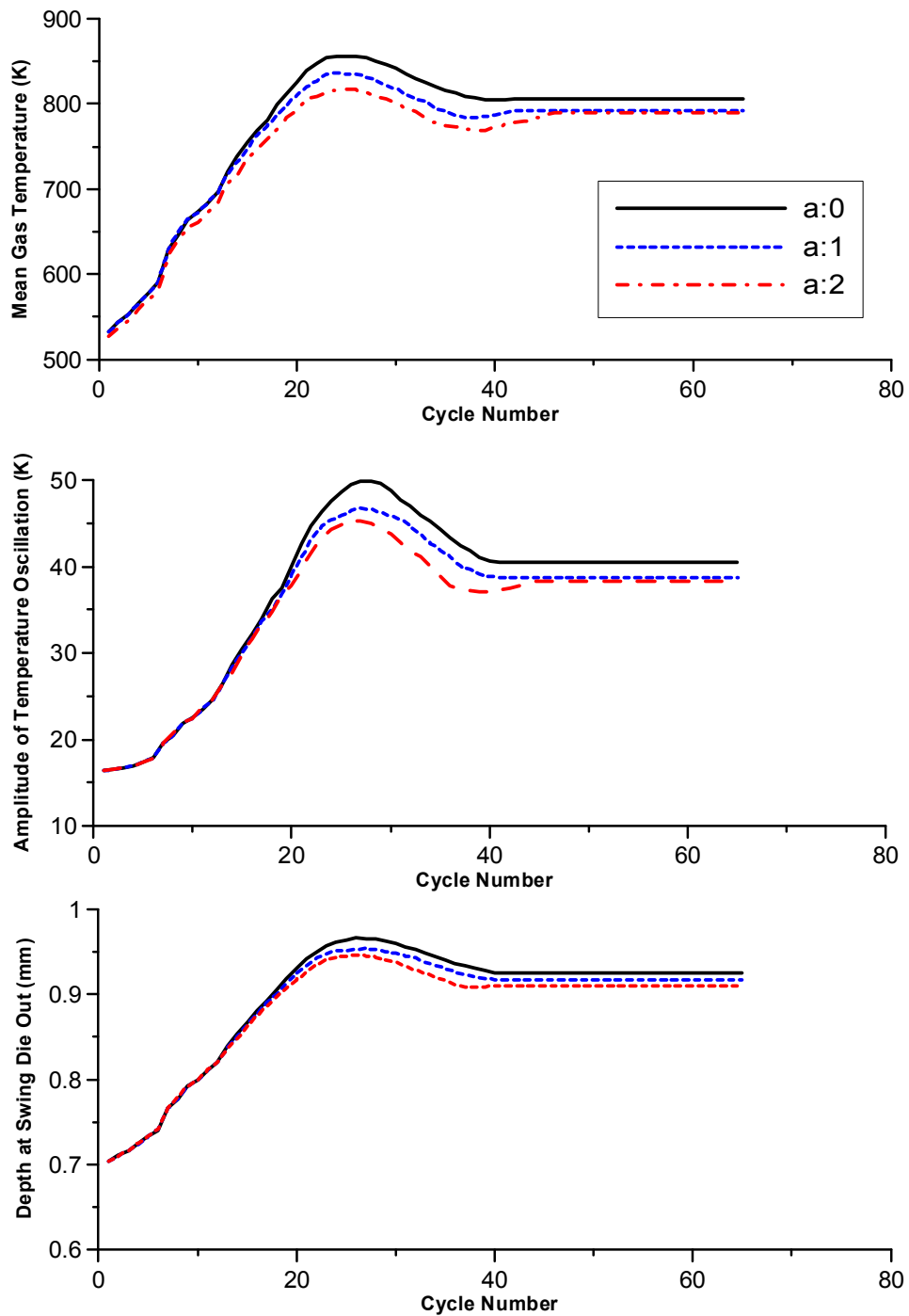
Σχήμα 5.12.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις τύπους φορτίου στην περίπτωση χυτοσιδήρου



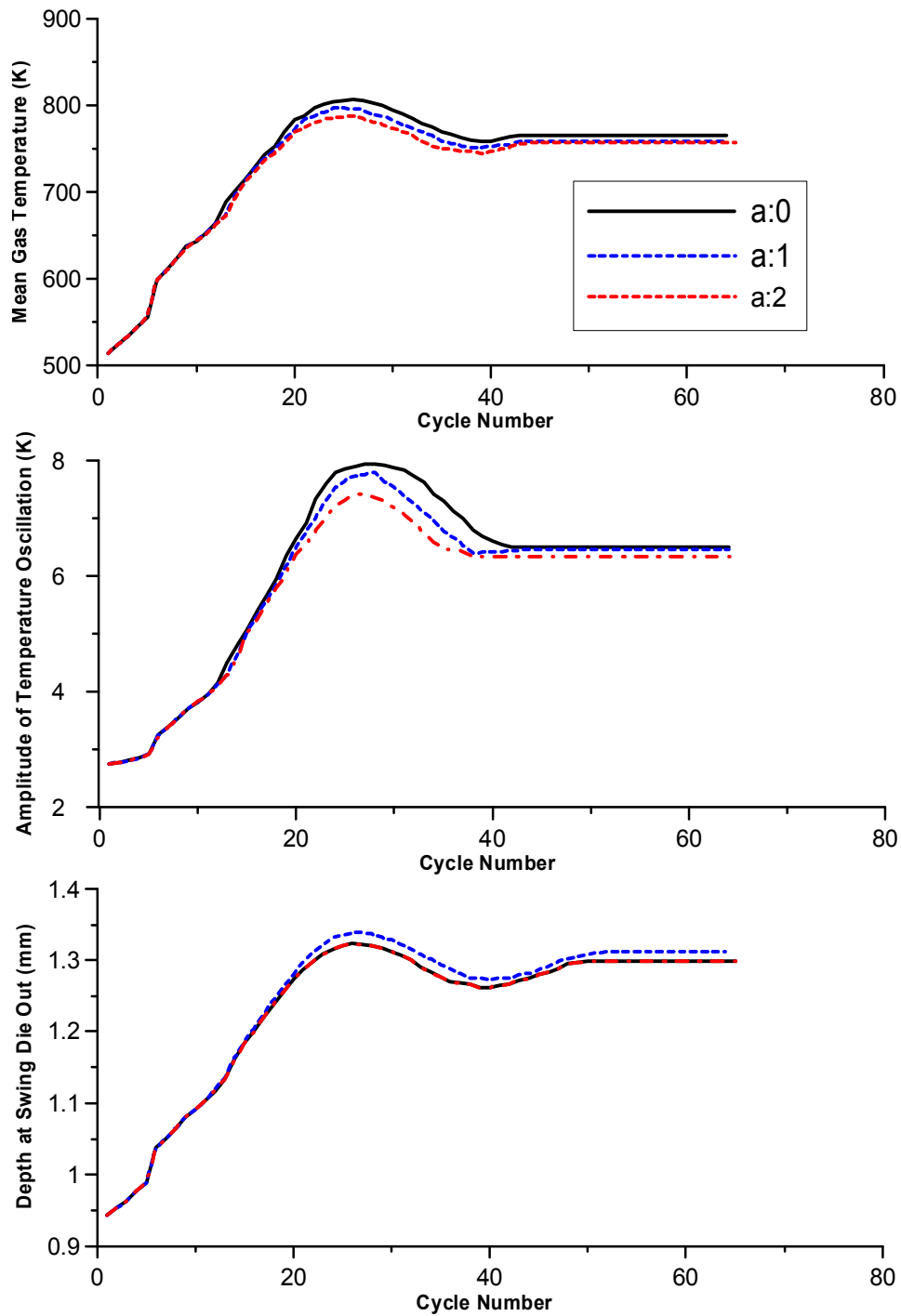
Σχήμα 5.13.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις τύπους φορτίου στην περίπτωση 1.0 mm PSZ



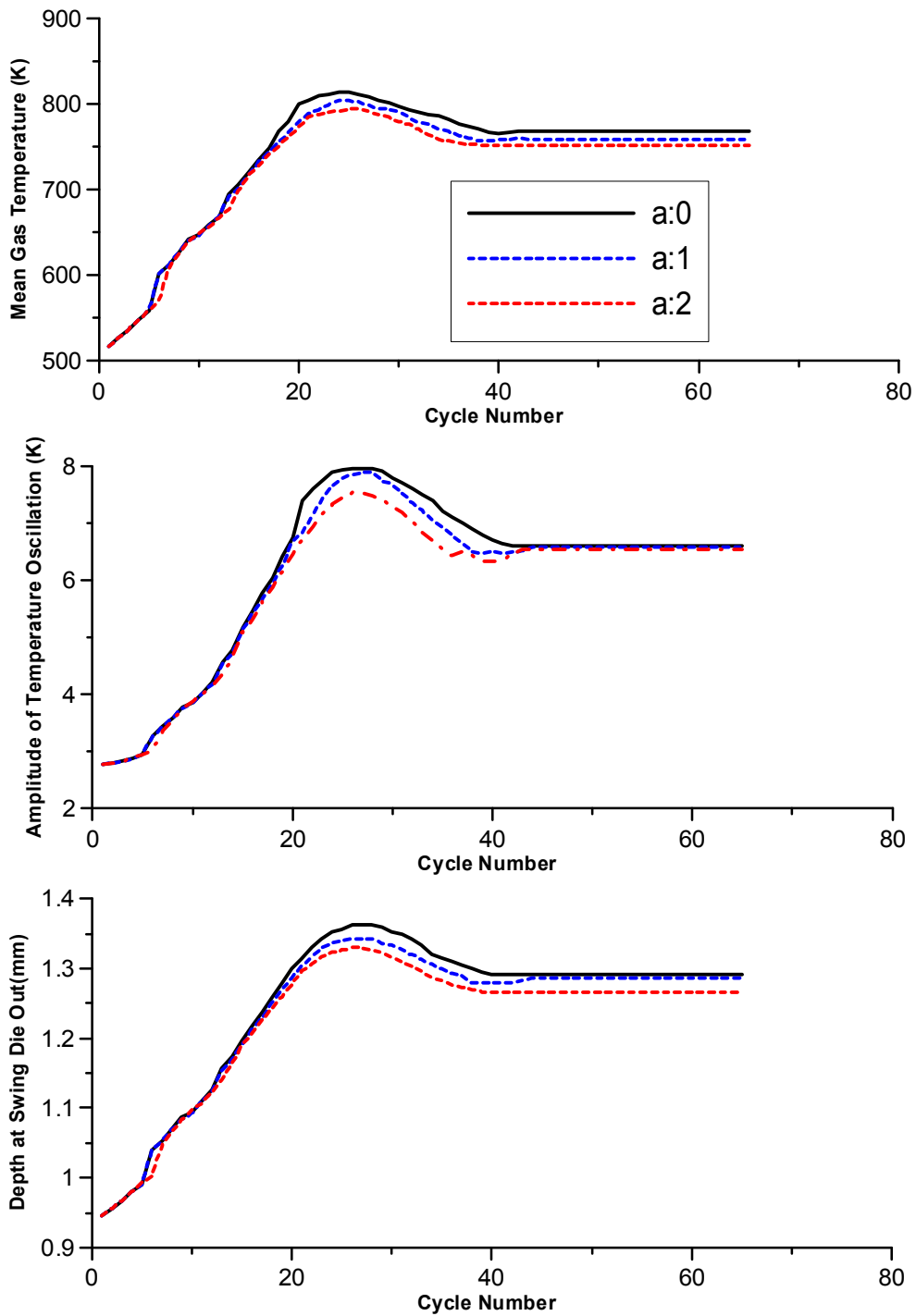
Σχήμα 5.14.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις τύπους φορτίου στην περίπτωση 1.5 mm PSZ



Σχήμα 5.15.

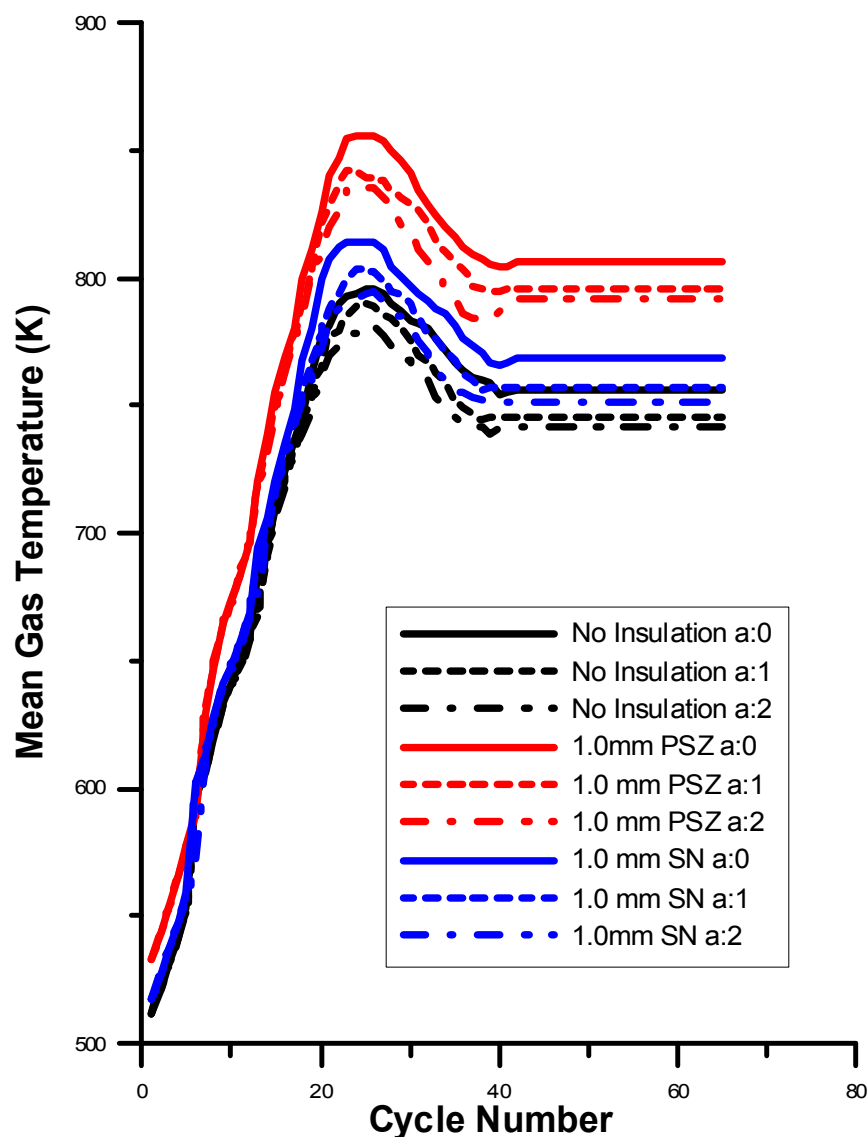
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις τύπους φορτίου στην περίπτωση 2.0 mm SN



Σχήμα 5.16.

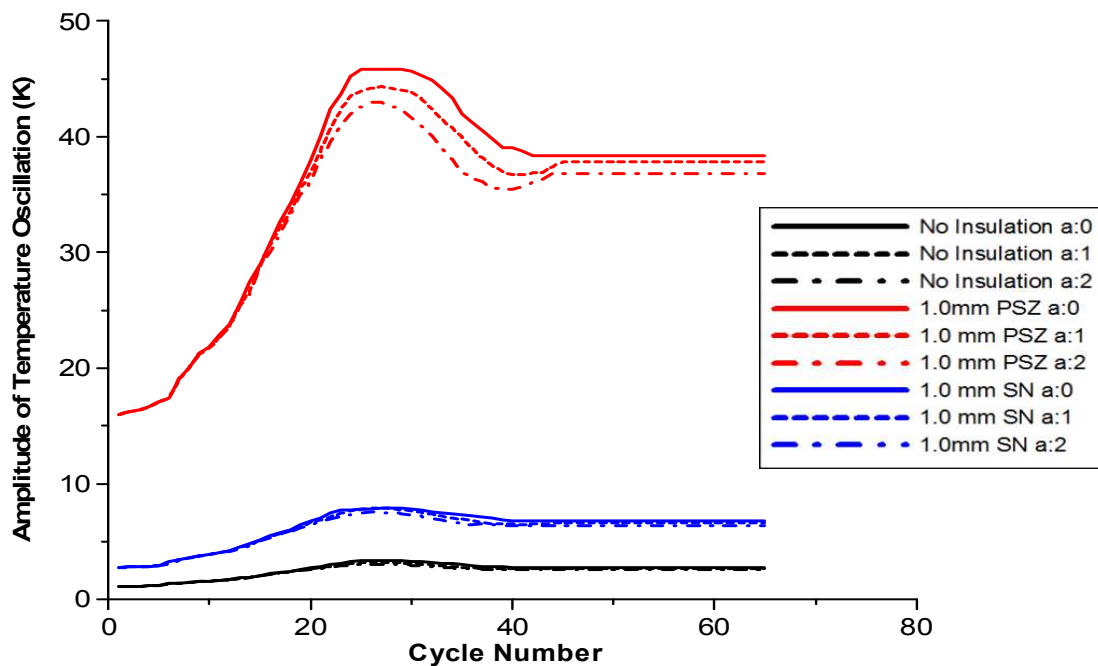
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις τύπους φορτίου στην περίπτωση 4.0 mm SN

5.3.1. Σύγκριση των τριών εξεταζομένων παραμέτρων για τα τρία διαφορετικά είδη φορτίου και τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).



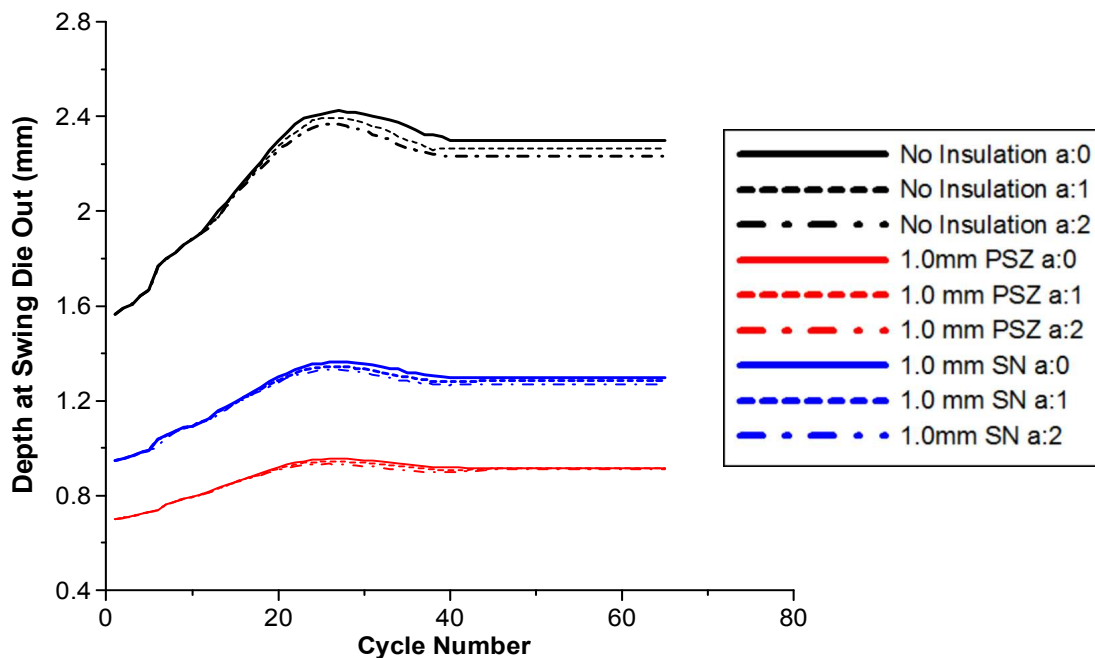
Σχήμα 5.17.

Μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσεως διαφόρων τύπων φορτίων και μονωτικών



Σχήμα 5.18.

Πλάτος θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσει διαφόρων τύπων φορτίων και μονωτικών



Σχήμα 5.19

Βάθος απόσβεσης θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσει διαφόρων τύπων φορτίων και μονωτικών

Στα Σχήματα 5.12- 5.16 και 5.17 παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική περίοδο συναρτήσει των τριών φορτίων. Στην περίπτωση τετραγωνικού φορτίου η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας αερίου είναι η μικρότερη ενώ η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στην περίπτωση άκαμπτου φορτίου. Προφανώς όσο πιο μεγάλη η εξάρτηση της ροπής του φορτίου από την ταχύτητα ή αλλιώς όσο μεγαλύτερος ο εκθέτης a , τόσο ομαλότερα επέρχεται η τελική ισορροπία κινητήρα-φορτίου. Αντίθετα, όσο μικρότερος ο εκθέτης a τόσο μεγαλύτερη η παροχή του εγχυόμενου καυσίμου και τόσο υψηλότερα τα επίπεδα πιέσεων και θερμοκρασιών μέσα στον κύλινδρο. Συγκεκριμένα για $a=0$ έχουμε τη πιο δύσκολη περίπτωση αφού η απόκριση εξαρτάται μόνο από τον κινητήρα (σχέση 4.1.). Παρόλα αυτά επειδή ο εξεταζόμενος κινητήρας έχει σχετικά μεγάλη ροπή αδράνειας ($G_{tc}=1.5 \cdot 10^{-4} kgm^2$) οι διαφορές μεταξύ των τριών περιπτώσεων είναι μικρές. Ενδεικτικά, το ποσοστό της αύξησης της μέγιστης θερμοκρασίας από την περίπτωση τετραγωνικού φορτίου σε αυτή άκαμπτου για 1.0 mm PSZ είναι 2.52%. Κατά την επιβολή άκαμπτου φορτίου παρατηρείται ότι με τη χρήση μονωτικού υλικού 1.0 mm PSZ η θερμοκρασία φθάνει τους 837.2 K στον κύκλο No.25 ενώ στην περίπτωση μη χρήσης μονωτικού η θερμοκρασία φθάνει τους 796 K.

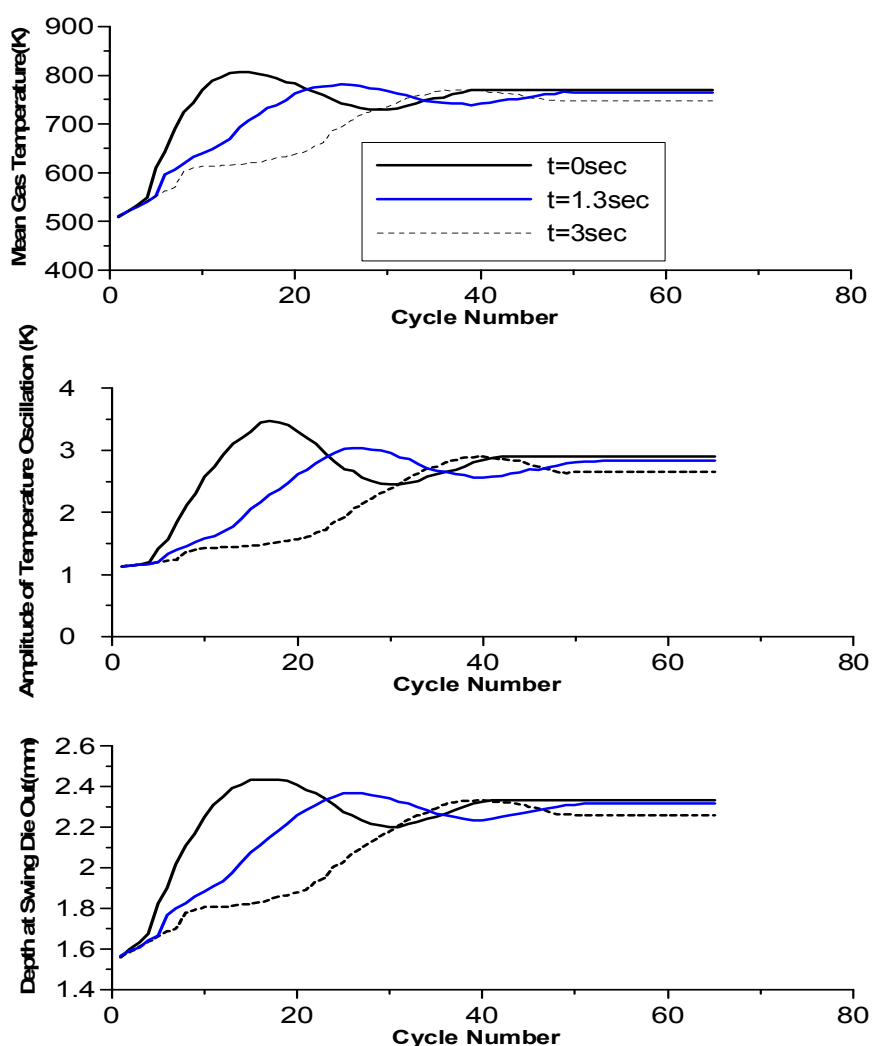
Στα Σχήματα 5.12.- 5.16. και 5.18. παρουσιάζεται το πλάτος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά την επιβολή των τριών ειδών αντίστασης. Όπως αναμενόταν, στην περίπτωση της χρήσης μονωτικού 1.0 mm PSZ τα πλάτη των ταλαντώσεων είναι πολύ μεγαλύτερα απ ότι στην περίπτωση χρήσης μονωτικού SN ή καθόλου χρήσης μονωτικού. Συγκεκριμένα στον κύκλο No.28 όπου έχουμε τη μέγιστη τιμή του πλάτους για τον χυτοσίδηρο είναι 3.4 K, για 4.0 mm SN είναι 8 K ενώ για 1.0 mm PSZ είναι 45.6K. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις υλικών ακολουθείται η εξής φθίνουσα σειρά αντιστάσεων : $a:0$, $a:1$, $a:2$.

Στα Σχήματα 5.12.- 5.16. και 5.19. παρουσιάζεται το βάθος στο οποίο σβήνει η θερμοκρασιακή ταλάντωση συναρτήσει των 65 κύκλων λειτουργίας που συνιστούν την μεταβατική περίοδο για τα τρία εξεταζόμενα είδη φορτίου. Όπως αναμενόταν, και σε αυτή την περίπτωση το μονωτικό υλικό PSZ παρουσιάζει το μικρότερο βάθος με εύρος τιμών (για $a:0$) 0.699-0.958mm. Στη συνέχεια ακολουθεί το μονωτικό SN με 0.9-1.4mm και με μεγάλη διαφορά ο χυτοσίδηρος με 1.6-2.4mm. Επίσης στην περίπτωση γραμμικού φορτίου το βάθος απόσβεσης είναι ελάχιστα μικρότερο ενώ ακόμα μικρότερο είναι στην περίπτωση

άσκησης τετραγωνικού. Ενδεικτικά η μείωση του πλάτους του βάθους απόσβεσης στην περίπτωση χυτοσιδήρου στον κύκλο No.27 από a:0 σε a:2 είναι 2.67%.

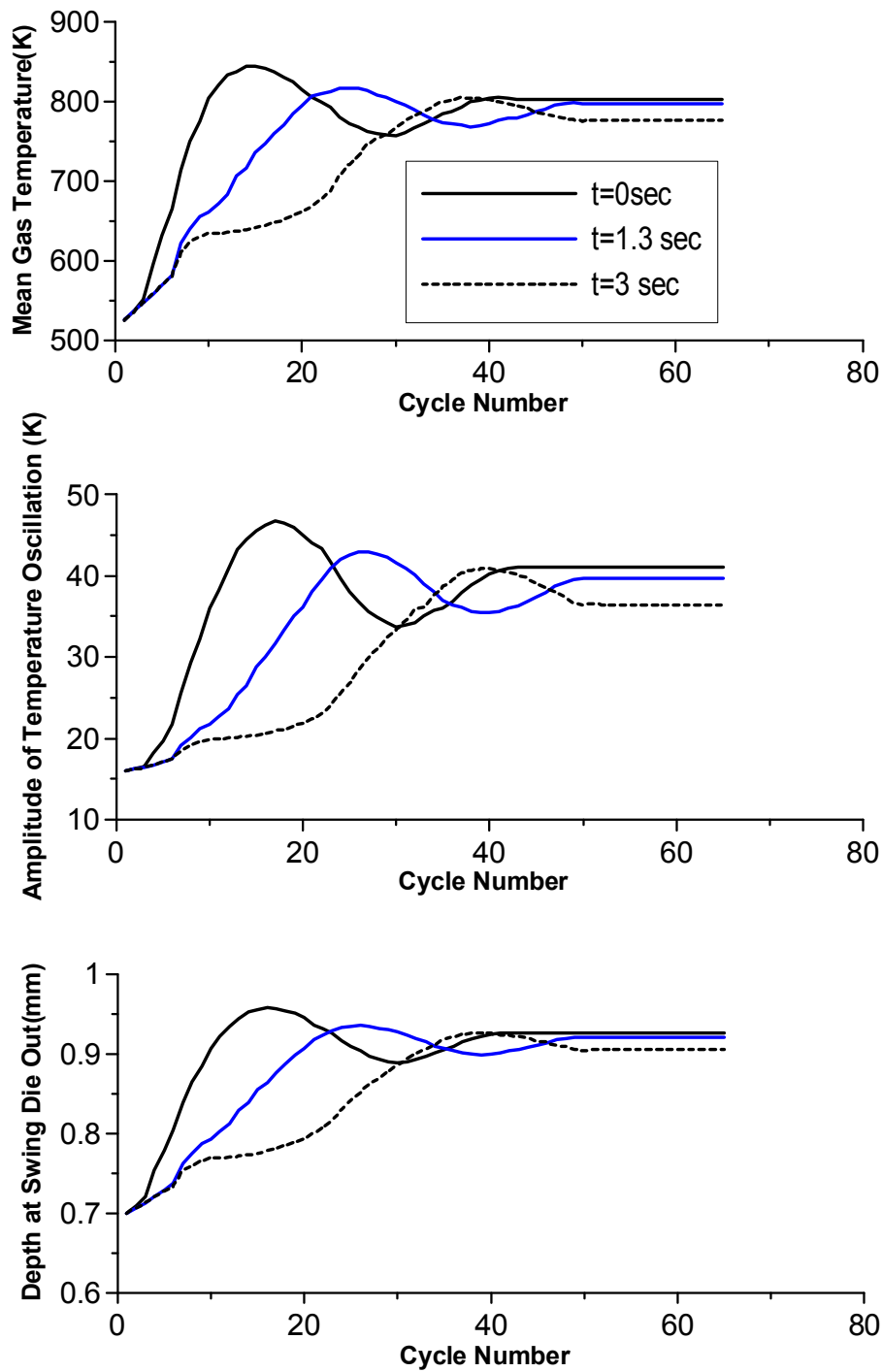
5.4. Χρονική διάρκεια επιβολής του φορτίου

Στην Παράγραφο αυτή εξετάζεται η επίδραση της διάρκειας επιβολής του φορτίου. Οι χρόνοι που εξετάζονται είναι οι εξής: a) 0 sec, b) 1.3 sec, c) 3 sec. Τόσο το μέγεθος όσο και το είδος του φορτίου είναι το ίδιο και στους τρεις εξεταζόμενους χρόνους (Πίνακας 5.1) επομένως αναμένεται ότι κατά την τελική ισορροπία κινητήρα-φορτίου οι συνθήκες θα είναι σχεδόν ίδιες.



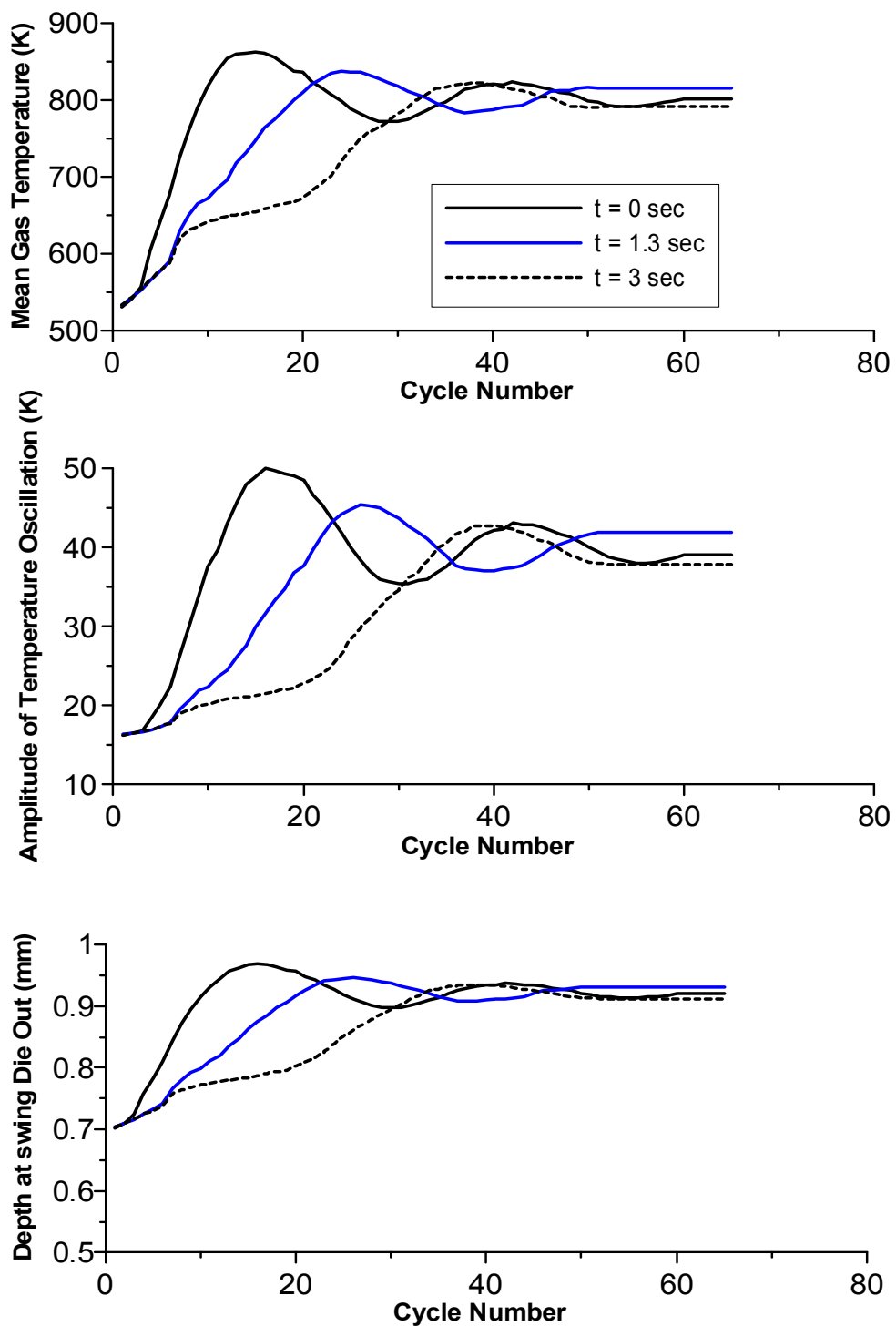
Σχήμα 5.20.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις χρονικές διάρκειες επιβαλλόμενου φορτίου στην περίπτωση χυτοσιδήρου



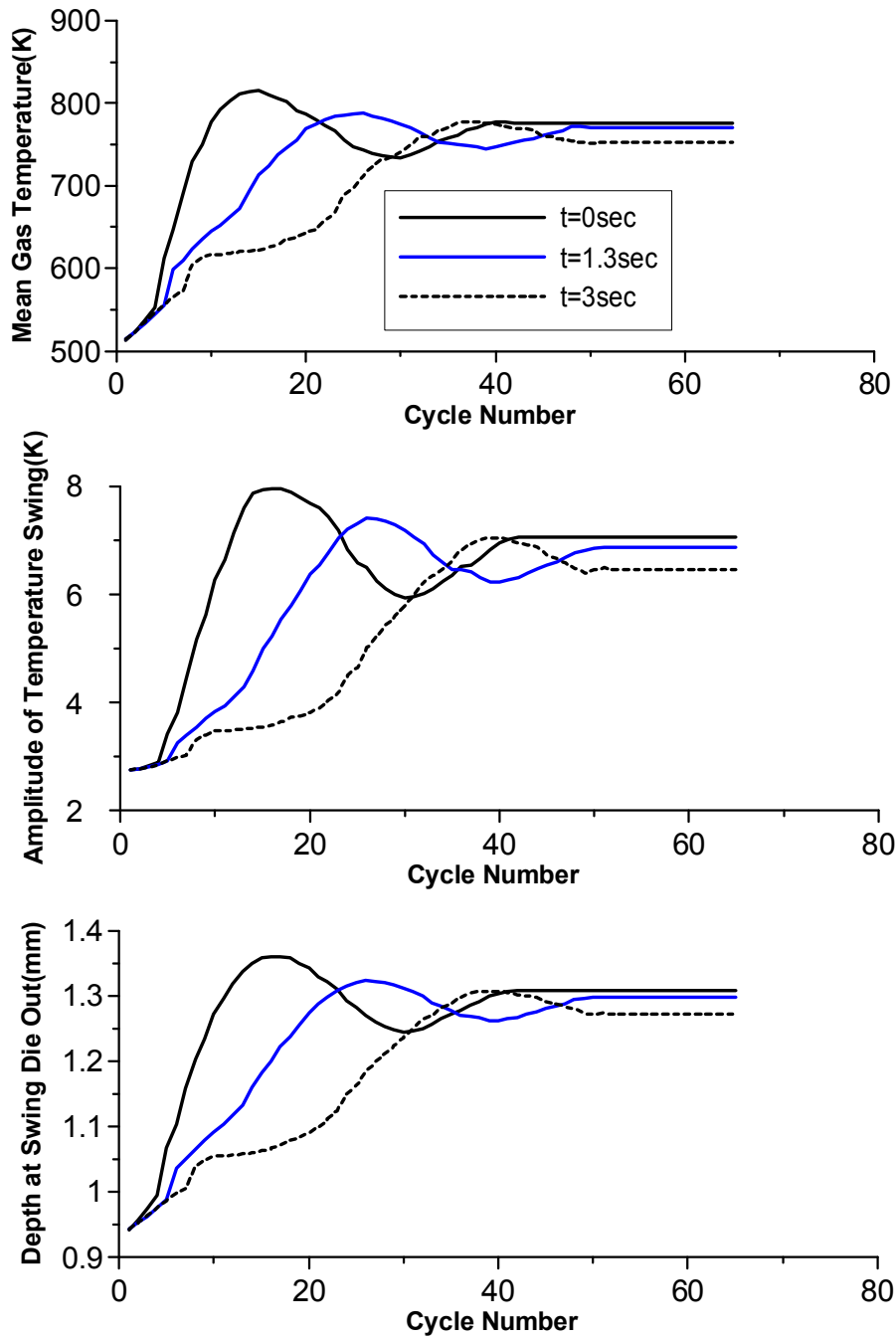
Σχήμα 5.21.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις χρονικές διάρκειες επιβαλλόμενου φορτίου στην περίπτωση μονωτικού 1.0 mm PSZ



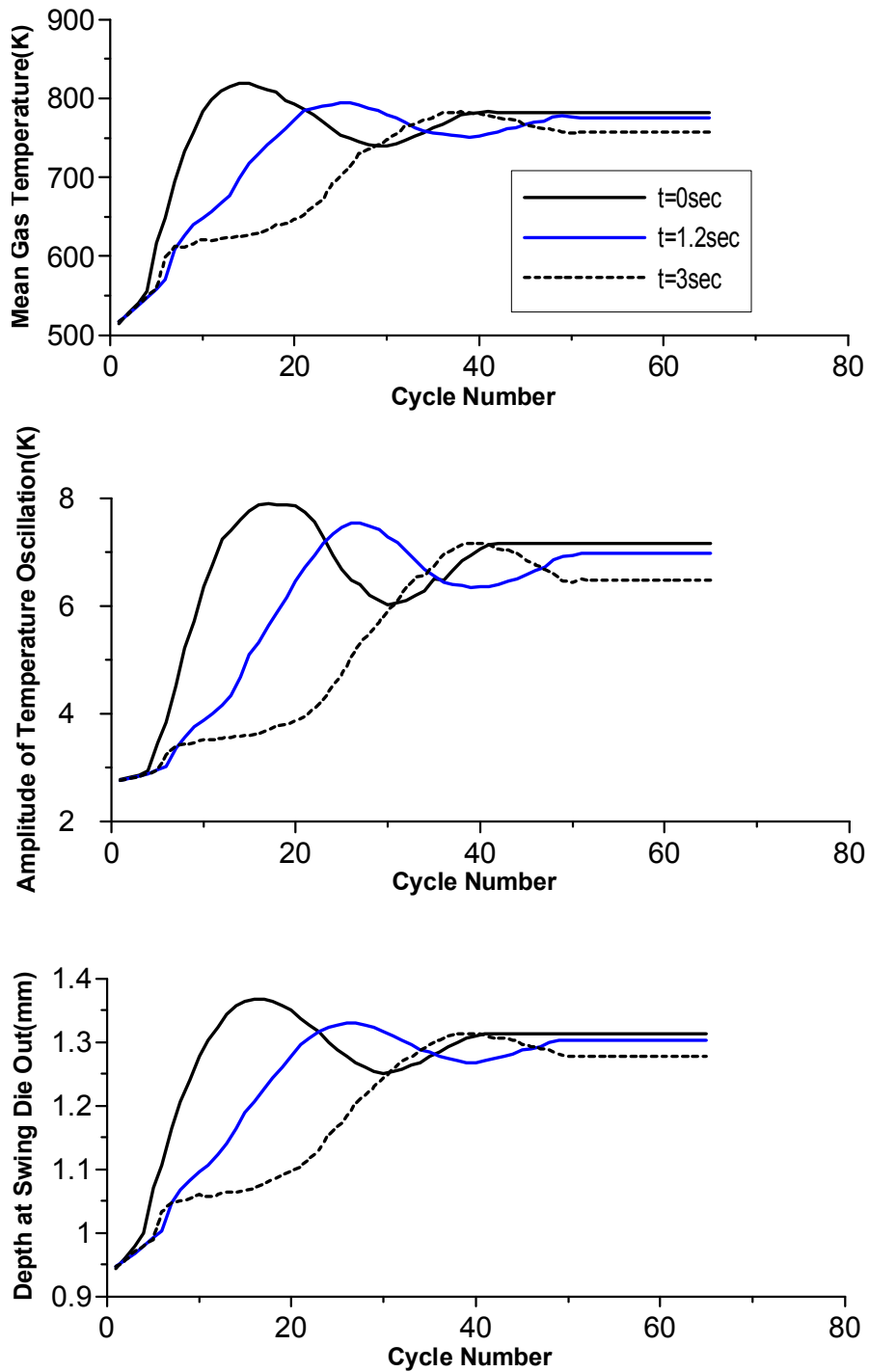
Σχήμα 5.22.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις χρονικές διάρκειες επιβαλλόμενου φορτίου στην περίπτωση μονωτικού 1.5 mm PSZ



Σχήμα 5.23

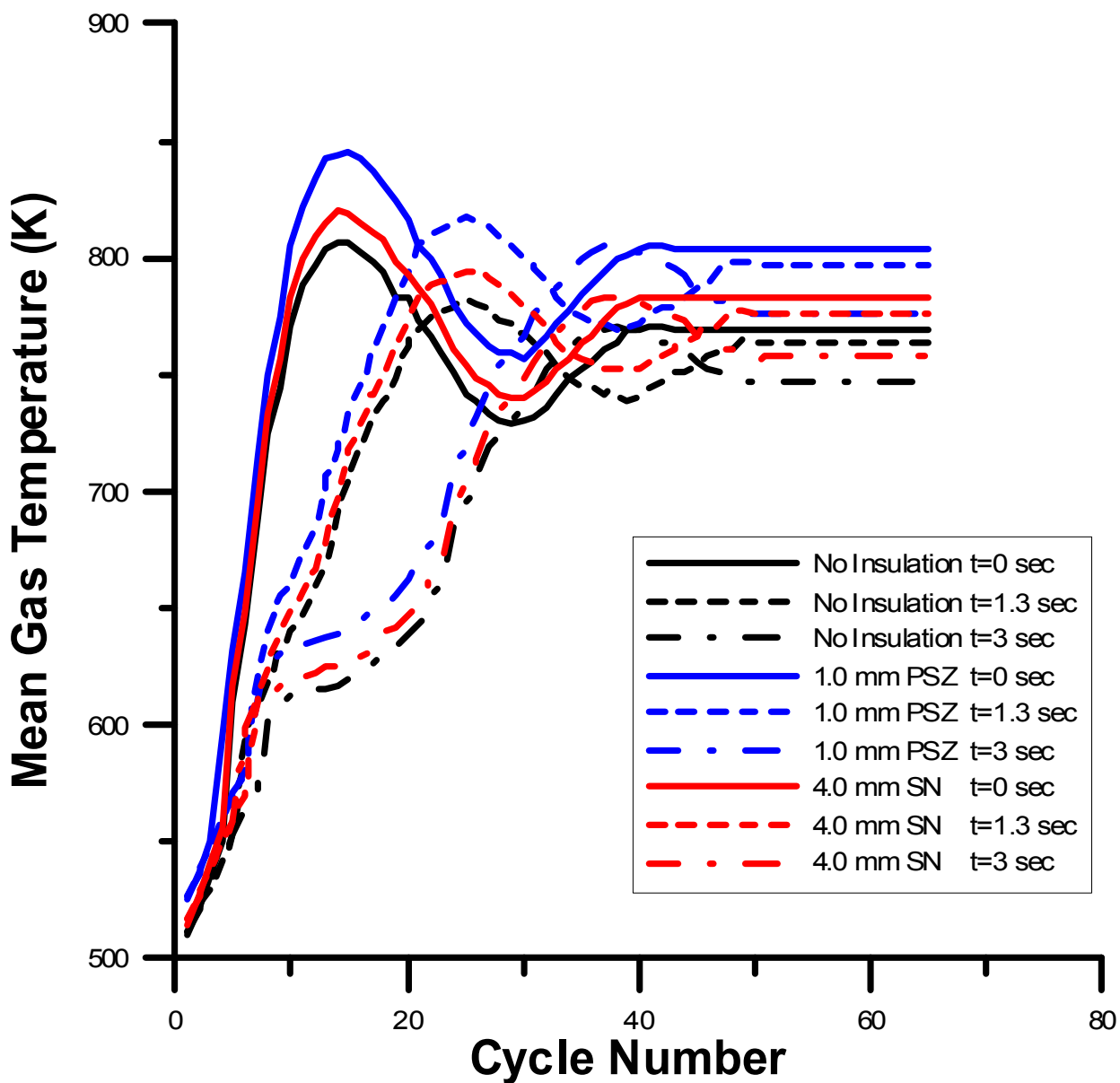
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις χρονικές διάρκειες επιβαλλόμενου φορτίου στην περίπτωση μονωτικού 2.0 mm SN



Σχήμα 5.24.

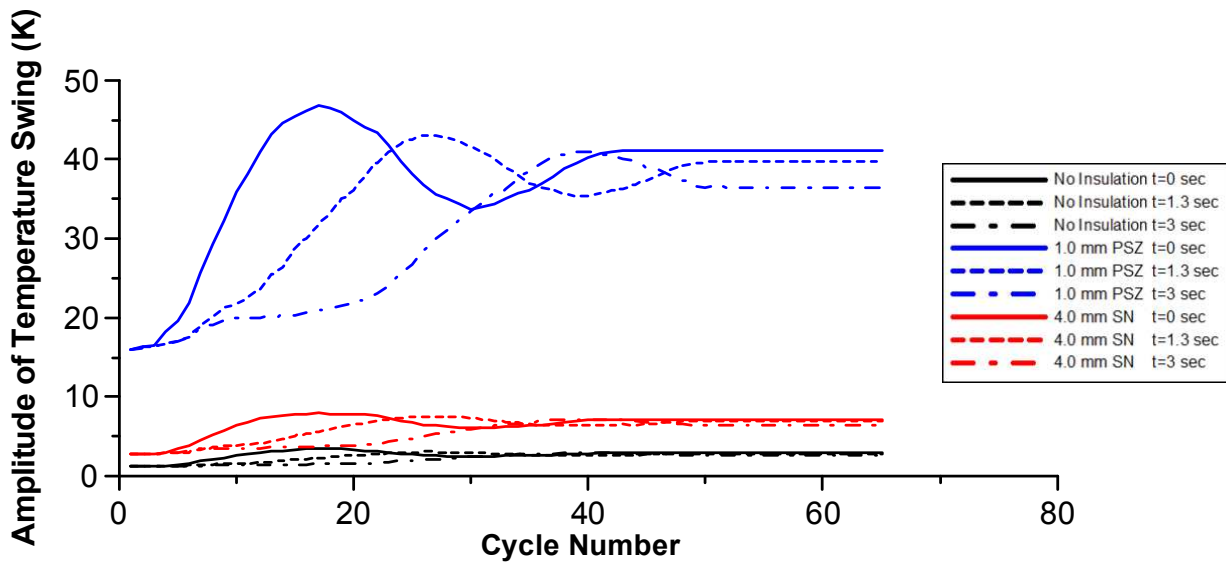
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις χρονικές διάρκειες επιβαλλόμενου φορτίου στην περίπτωση μονωτικού 4.0 mm SN

5.4.1. Σύγκριση των τριών εξεταζομένων παραμέτρων για τους τρεις χρόνους άσκησης του φορτίου και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).



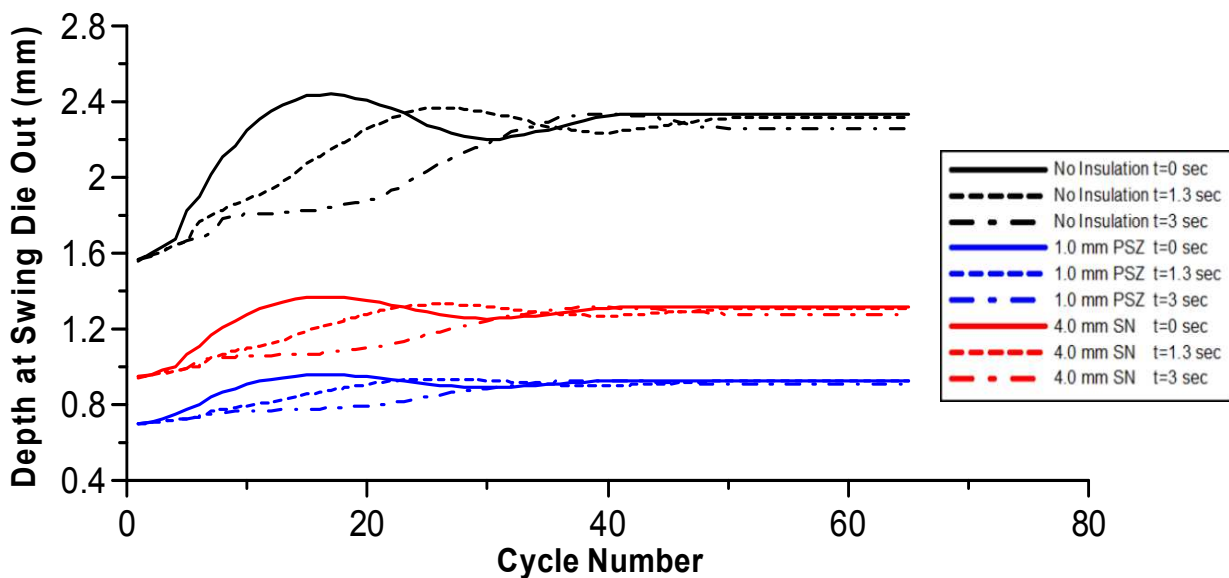
Σχήμα 5.25.

Μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική περίοδο, για διάφορες χρονικές διάρκειες επιβολής του φορτίου και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.26.

Πλάτος θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική περίοδο, για διάφορες χρονικές διάρκειες επιβολής του φορτίου και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.27.

Βάθος απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική περίοδο, για διάφορες χρονικές διάρκειες επιβολής του φορτίου και διάφορα μονωτικά

Στα Σχήματα 5.20.-5.24. και 5.25. παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία των αερίων συναρτήσει των 65 κύκλων λειτουργίας για τους τρεις χρόνους αύξησης του φορτίου. Παρατηρείται σε κάθε περίπτωση, μόνωσης ή όχι, ότι όσο αυξάνεται η διάρκεια επιβολής του φορτίου αυξάνεται η κλίση της καμπύλης (μεταφέρεται το μέγιστο πιο δεξιά) ενώ μειώνεται το εύρος τιμών της. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μικρής διάρκειας επιβολή φορτίου αυξάνει σημαντικά την επιβράδυνση της στροφαλοφόρου ατράκτου στους πρώτους κύκλους λειτουργίας (σχέση 4.1) με αποτέλεσμα η ελάχιστη ταχύτητα και κατ' επέκταση η μέγιστη θερμοκρασία των αερίων να παρατηρείται πολύ νωρίτερα. Η πιο δύσκολη περίπτωση για τον κινητήρα είναι αυτή της ακαριαίας επιβολής φορτίου ($t=0$ sec). Στην περίπτωση αυτή το φορτίο παίρνει την τελική του τιμή από τον πρώτο κιάλας κύκλο λειτουργίας· ο κινητήρας δεν έχει προλάβει να ανταποκριθεί, με αποτέλεσμα να καταπονείται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό η στροφαλοφόρος άτρακτος. Από την άλλη πλευρά, η πιο αργή αύξηση του φορτίου επιφέρει ομαλότερη απόκριση τόσο του κινητήρα όσο και του υπερπληρωτή επειδή η μεταβατική λειτουργία εξελίσσεται σε πιο αργούς, ασφαλείς ρυθμούς. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της μέσης θερμοκρασίας αερίου για τον χυτοσίδηρο μεταφέρθηκε από τον No.15 για 0 sec στον No.26 κύκλο για 1.3 sec και στον No.38 για 3 sec. ενώ η μείωση του πλάτους είναι της τάξης του 3% από 0 σε 1.3 sec και της τάξης του 4.5% από 0 σε 3 sec. Τέλος και σε αυτή την παράμετρο οι μεγαλύτερες τιμές μέσης θερμοκρασίας αερίου εμφανίζονται για μόνωση PSZ, ακολουθεί η SN και τελευταίος ο χυτοσίδηρος.

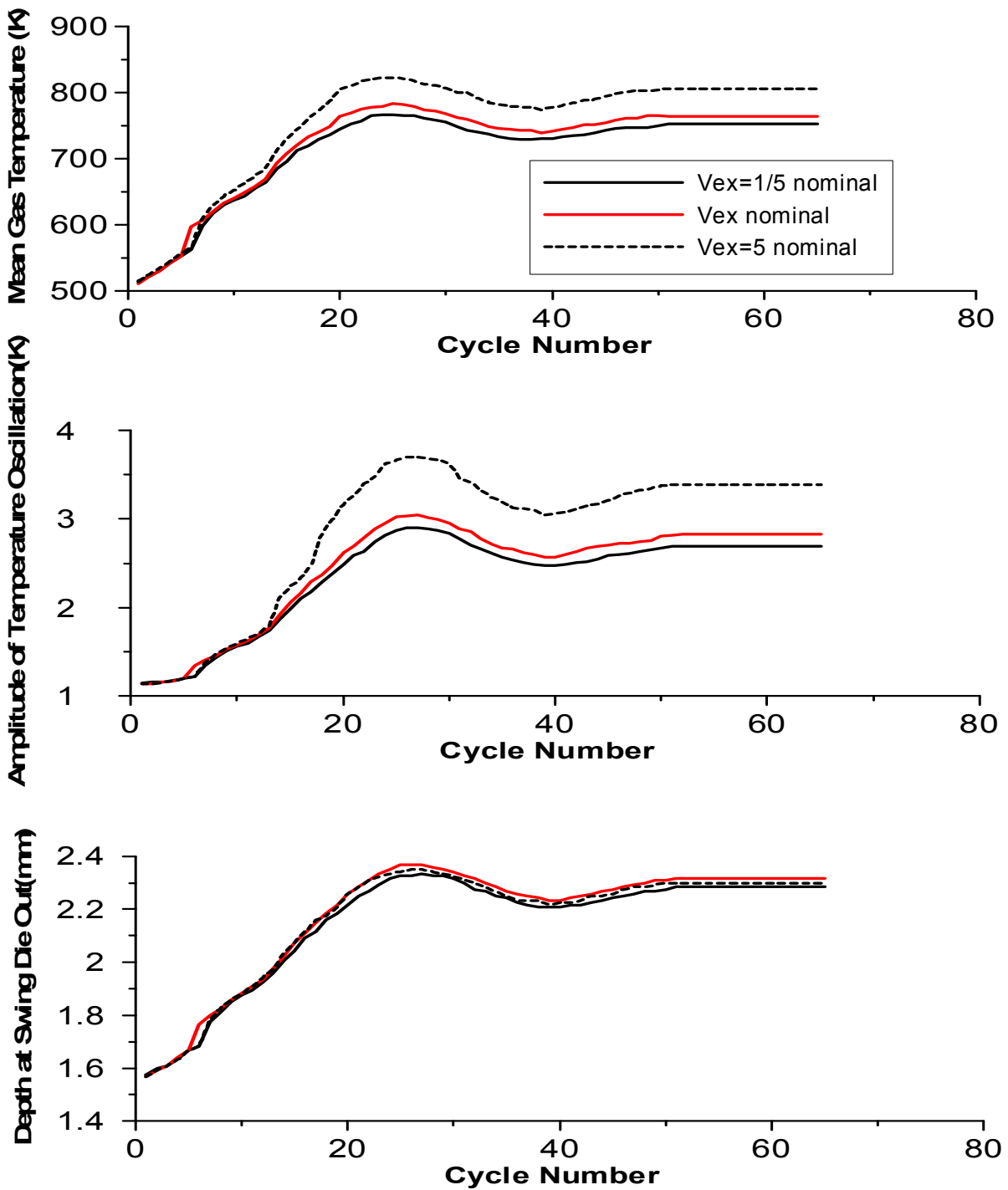
Στα Σχήματα 5.20.-5.24. και 5.26. παρουσιάζεται το πλάτος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης συναρτήσει των 65 κύκλων λειτουργίας για τους τρεις χρόνους αύξησης του φορτίου. Οι καμπύλες έχουν και σε αυτά τα Σχήματα μεγαλύτερη κλίση όσο αυξάνει η χρονική διάρκεια επιβολής του φορτίου. Συγκεκριμένα για το μονωτικό 1.0 mm PSZ το μέγιστο του πλάτους μεταφέρεται από τον κύκλο No.17 για 0 sec στον κύκλο No.26 για 1.3 sec και στον κύκλο No.40 για 3 sec. Η μείωση του μεγίστου του πλάτους είναι 8% από 0 σε 1.3 sec και του 12.6% από 0 σε 3 sec. Τέλος και σε αυτή την περίπτωση το πλάτος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης είναι πολύ μεγαλύτερο για το μονωτικό PSZ από το SN και ακόμα μεγαλύτερο από τον χυτοσίδηρο.

Στα Σχήματα 5.20.-5.24. και 5.27. παρουσιάζεται το βάθος απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης συναρτήσει των 65 κύκλων λειτουργίας για τους τρεις χρόνους αύξησης του φορτίου. Όπως και στα άλλα δύο μεγέθη οι καμπύλες ξεκινούν από

την ίδια αφετηρία αλλά έχουν μεγαλύτερη κλίση όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια επιβολής του φορτίου. Το ποσοστό μείωσης του πλάτους για το χυτοσίδηρο είναι 2.37% από 0 σε 1.3 sec και 4.1% από 0 σε 3 sec. Το μεγαλύτερο βάθος απόσβεσης το παρουσιάζει αναμενόμενα ο χυτοσίδηρος, ακολουθεί το μονωτικό υλικό SN και τέλος το PSZ.

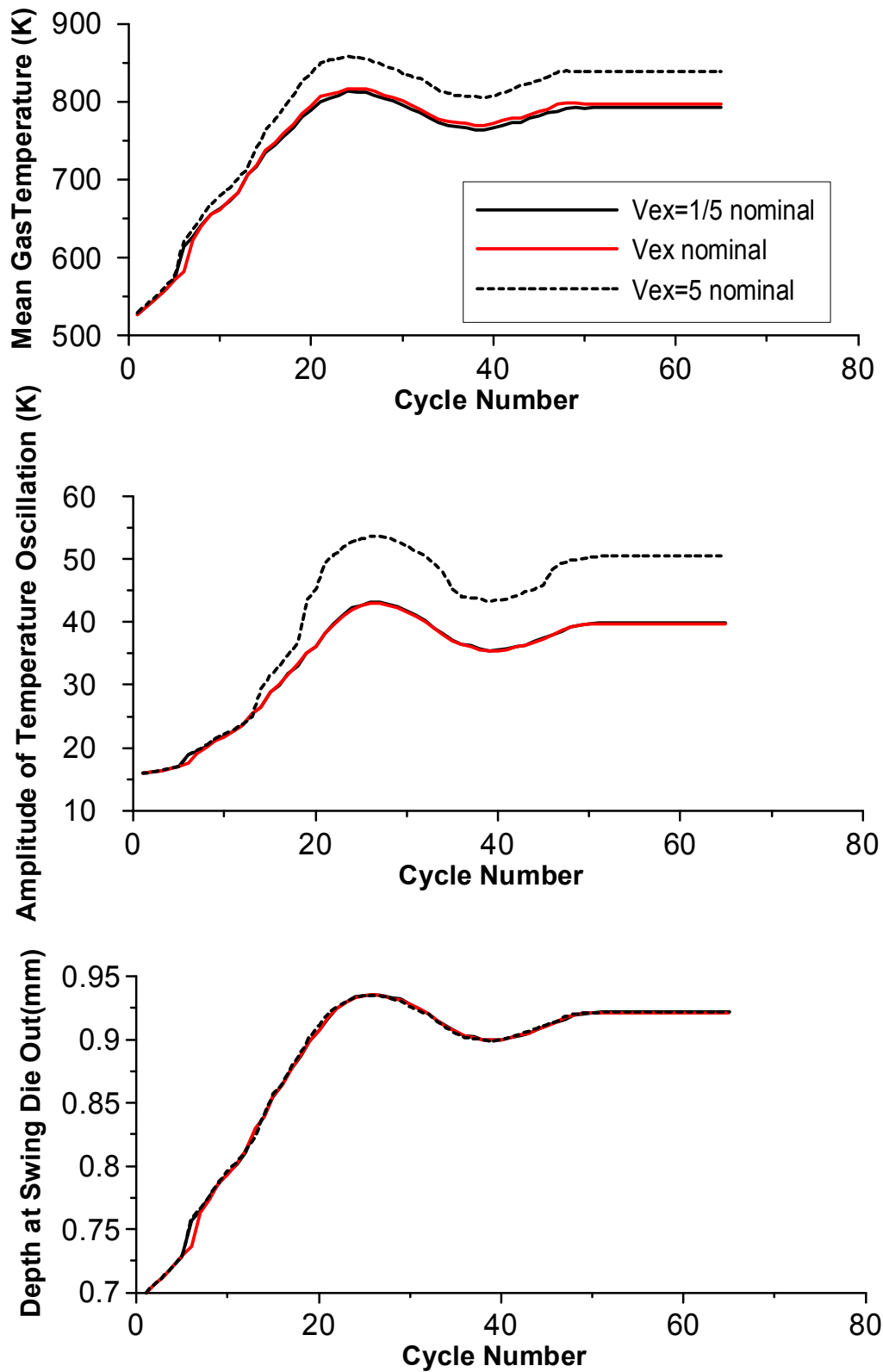
5.5. Όγκος πολλαπλής εξαγωγής

Στην Παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί η επίδραση του όγκου της πολλαπλής εξαγωγής στα τρία εξεταζόμενα μεγέθη. Η διαμόρφωση και ο όγκος της πολλαπλής εξαγωγής αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο σχετικά με την απόκριση του κινητήρα και του υπερπληρωτή κατά την απότομη αύξηση φορτίου. Συγκεκριμένα, μεγάλος όγκος πολλαπλής εξαγωγής σημαίνει μεγάλη αδράνεια αερίων και επομένως αργή επιτάχυνση του στροβίλου. Αντιθέτως, οι μικρότεροι όγκοι πολλαπλής εξαγωγής συμβάλλουν στη γρηγορότερη απόκριση του στροβίλου αφού η πλήρωση του όγκου με καυσαέρια υψηλής πίεσης γίνεται ταχύτερα.



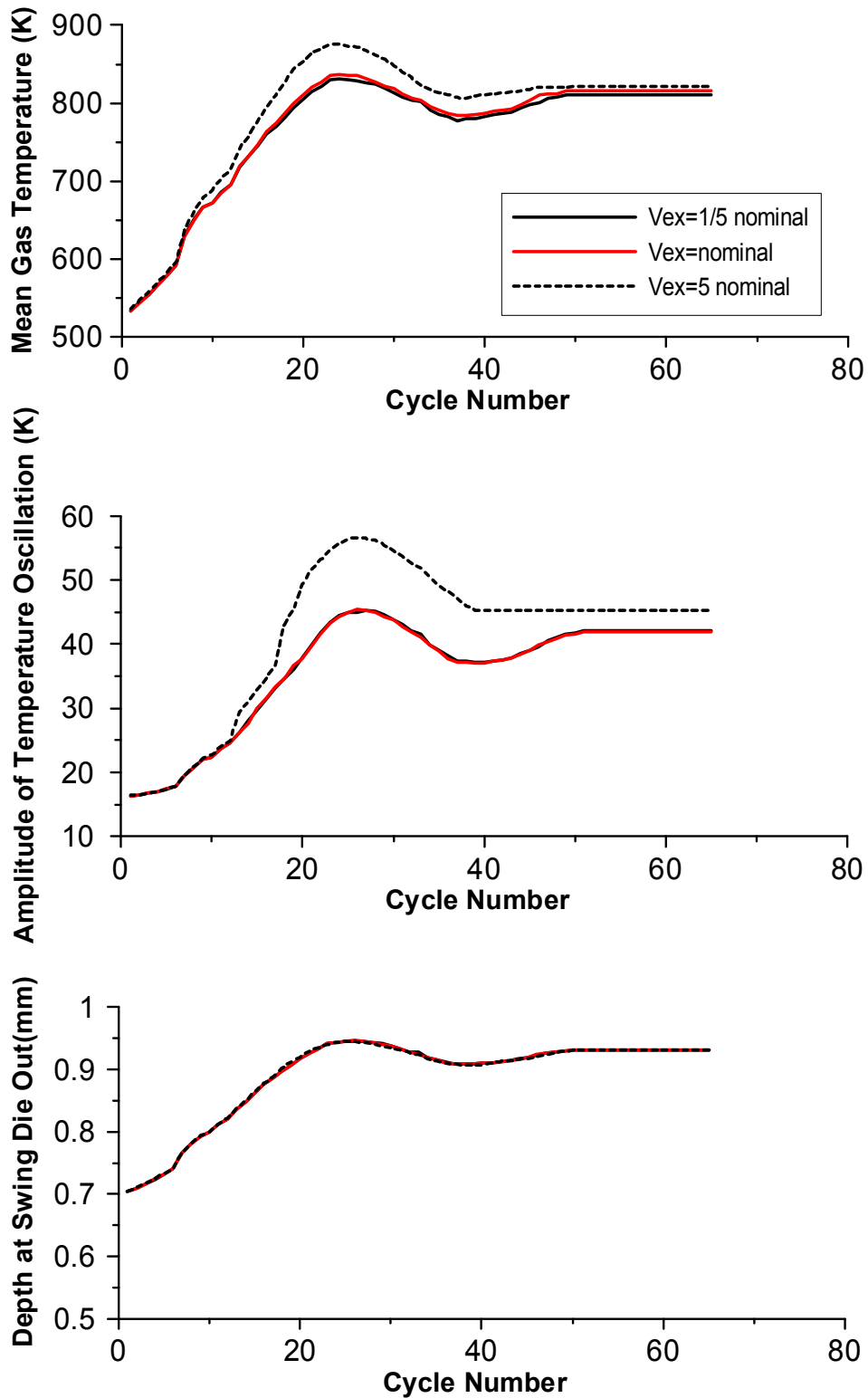
Σχήμα 5.28.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις όγκους πολλαπλής εξαγωγής στην περίπτωση χυτοσιδήρου



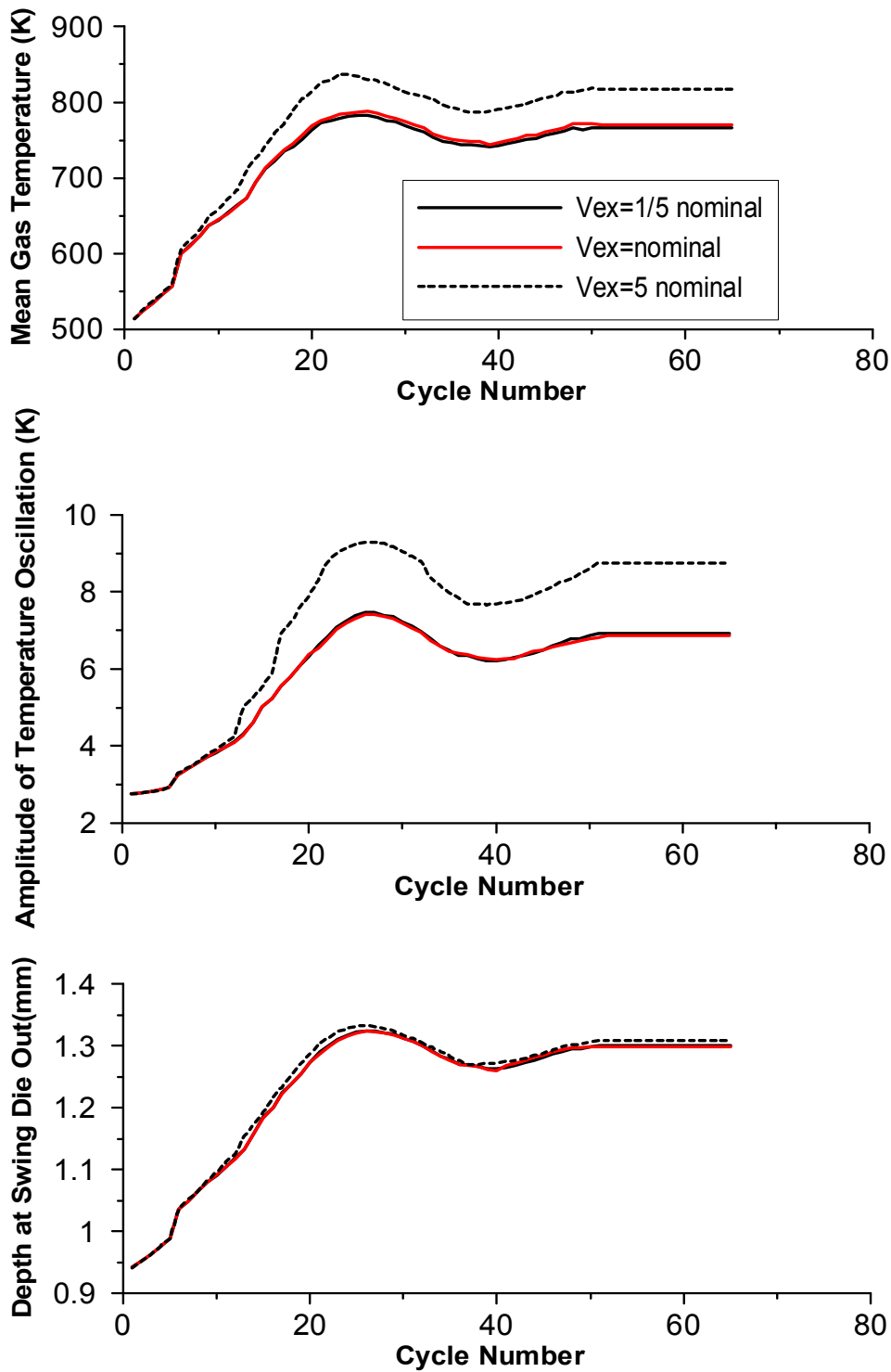
Σχήμα 5.29.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις όγκους πολλαπλής εξαγωγής στην περίπτωση 1.0 mm PSZ



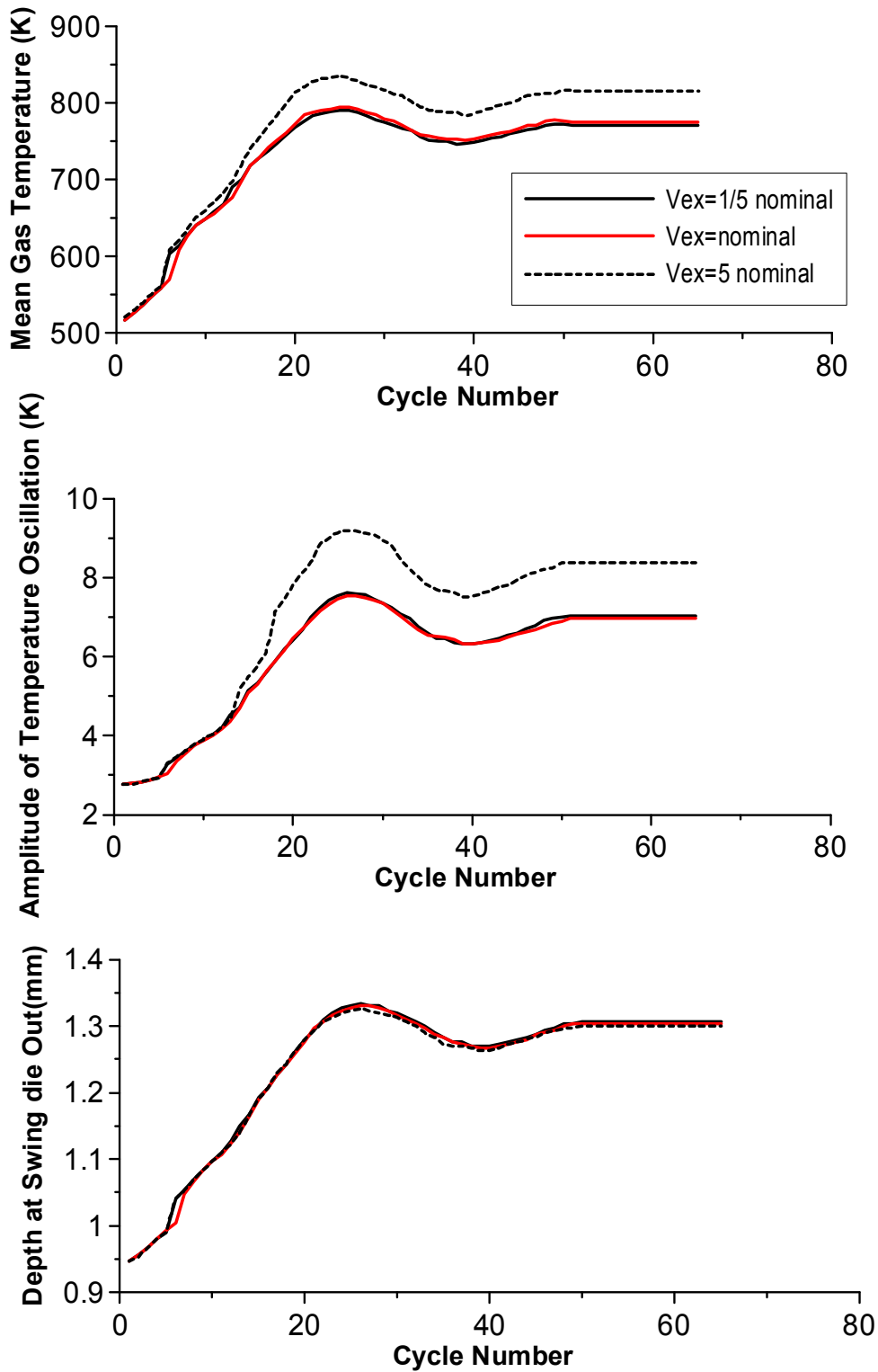
Σχήμα 5.30.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις όγκους πολλαπλής εξαγωγής στην περίπτωση 1.5 mm PSZ



Σχήμα 5.31.

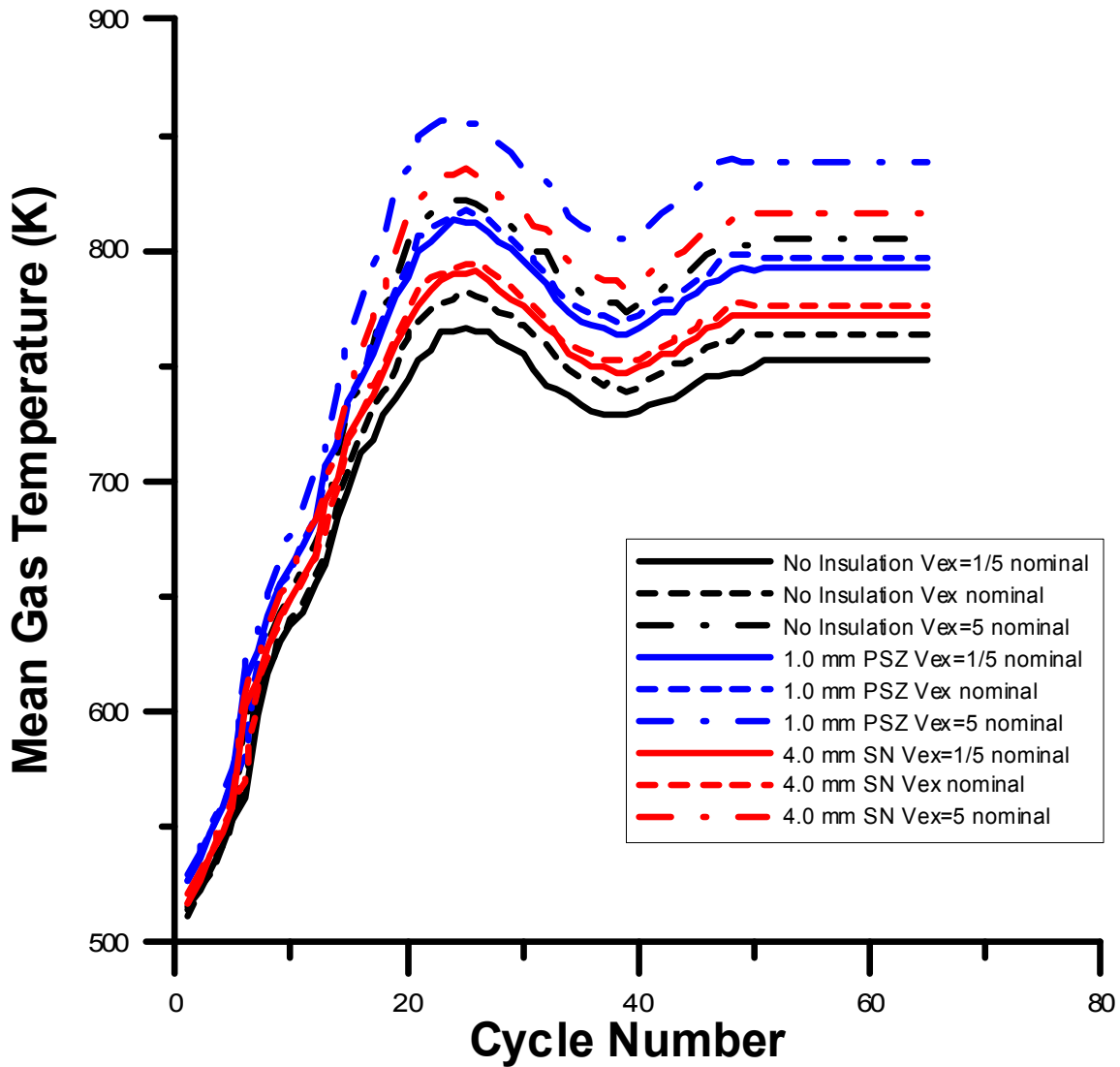
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις όγκους πολλαπλής εξαγωγής στην περίπτωση 2.0 mm SN



Σχήμα 5.32.

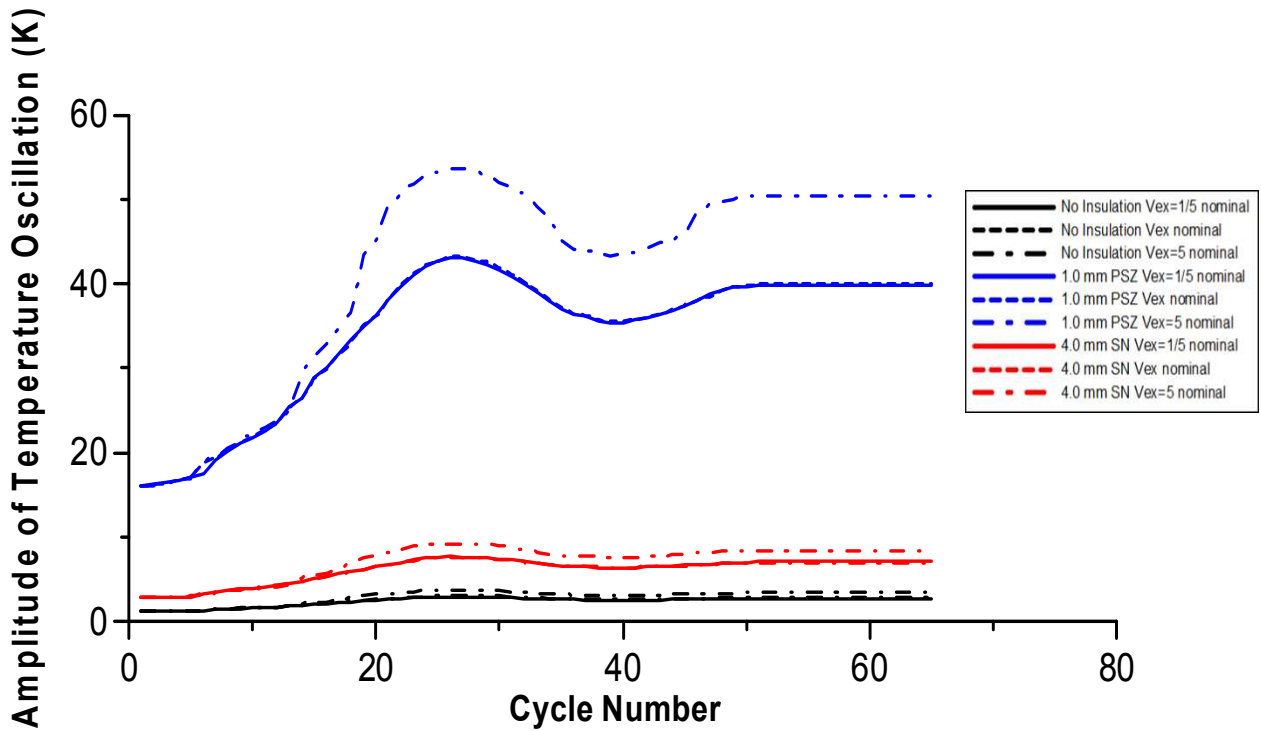
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις όγκους πολλαπλής εξαγωγής στην περίπτωση 4.0 mm SN

5.5.1. Σύγκριση των τριών παραμέτρων για τους τρεις εξεταζόμενους όγκους πολλαπλής εξαγωγής και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).



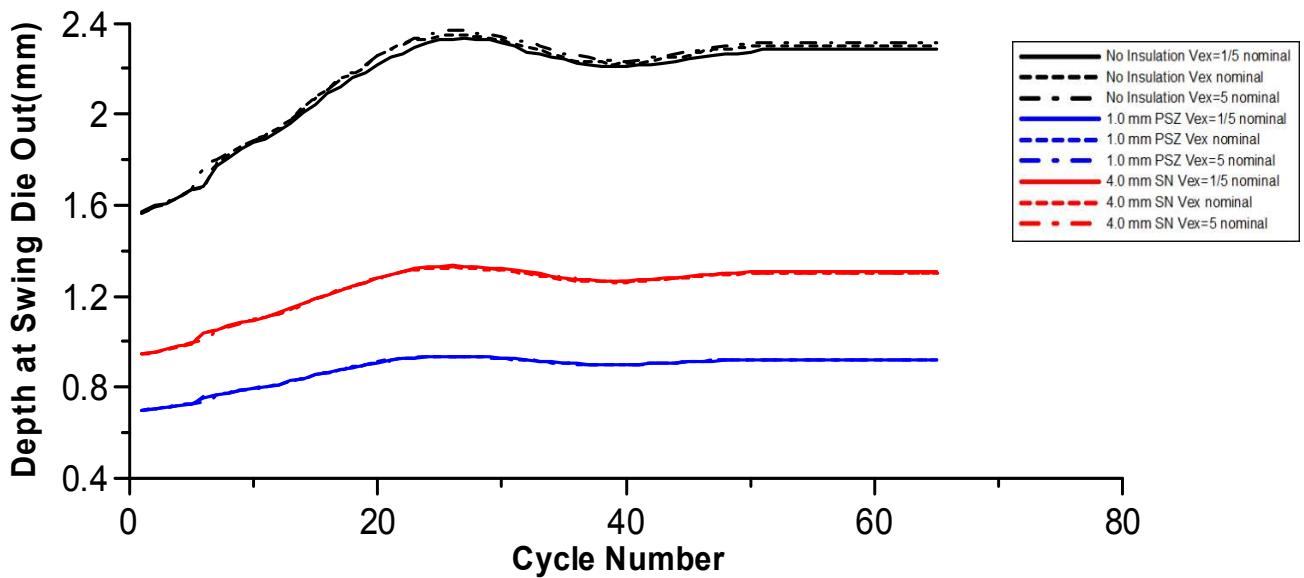
Σχήμα 5.33.

Μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορους όγκους πολλαπλής εξαγωγής και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.34.

Πλάτος θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορους όγκους πολλαπλής εξαγωγής και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.35.

Βάθος θερμοκρασιακής απόσβεσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορους όγκους πολλαπλής εξαγωγής και διάφορα μονωτικά

Στα Σχήματα 5.28.-5.32. και 5.33. παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας αερίου κατά τη διάρκεια της μεταβατικής λειτουργίας για τρεις όγκους πολλαπλής εξαγωγής: $1/5 V_{ex\ nominal}$, $V_{ex\ nominal}$ (Πίνακας 5.1), $5 V_{ex\ nominal}$. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο όγκος πολλαπλής εξαγωγής αυξάνεται και η μέση θερμοκρασία των αερίων. Η αύξηση είναι περισσότερο εμφανής μεταξύ $V_{ex\ nominal}$ και $5 V_{ex\ nominal}$. Αντιθέτως, μεταξύ $1/5 V_{ex\ nominal}$ και $V_{ex\ nominal}$ η διάκριση είναι αμελητέα με ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές όταν έχουμε $V_{ex\ nominal}$. Με μικρό όγκο πολλαπλής εξαγωγής επιτυγχάνουμε μικρότερη πτώση στρωφών του κινητήρα και μικρότερη πτώση του λ_α γιατί η πολλαπλής εξαγωγής γεμίζει πιο γρήγορα με το "νέο" καυσαέριο αυξημένης πίεσης-θερμοκρασίας και επιφέρουμε γρηγορότερα την ισορροπία κινητήρα-φορτίου. Όμως, όπως παρατηρείται στα Σχήματα, μείωση του όγκου κάτω από την ονομαστική του τιμή δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές. Ενδεικτικά, για 1.0 mm PSZ το πλάτος της ταλάντωση αυξάνεται από $1/5 V_{ex\ nominal}$ σε $V_{ex\ nominal}$ κατά ποσοστό 0.47% ενώ από $V_{ex\ nominal}$ σε $5 V_{ex\ nominal}$ το ποσοστό αύξησης είναι 5.06%. Για συγκεκριμένο όγκο πολλαπλής εξαγωγής η αύξηση του θερμοκρασιακού εύρους είναι μεγαλύτερη με την ύπαρξη μονωτικού και ακολουθεί αναμενόμενα την εξής σειρά: cast iron, 2.0mm SN, 4.0mm SN, 1.0mm PSZ, 1.5mm PSZ.

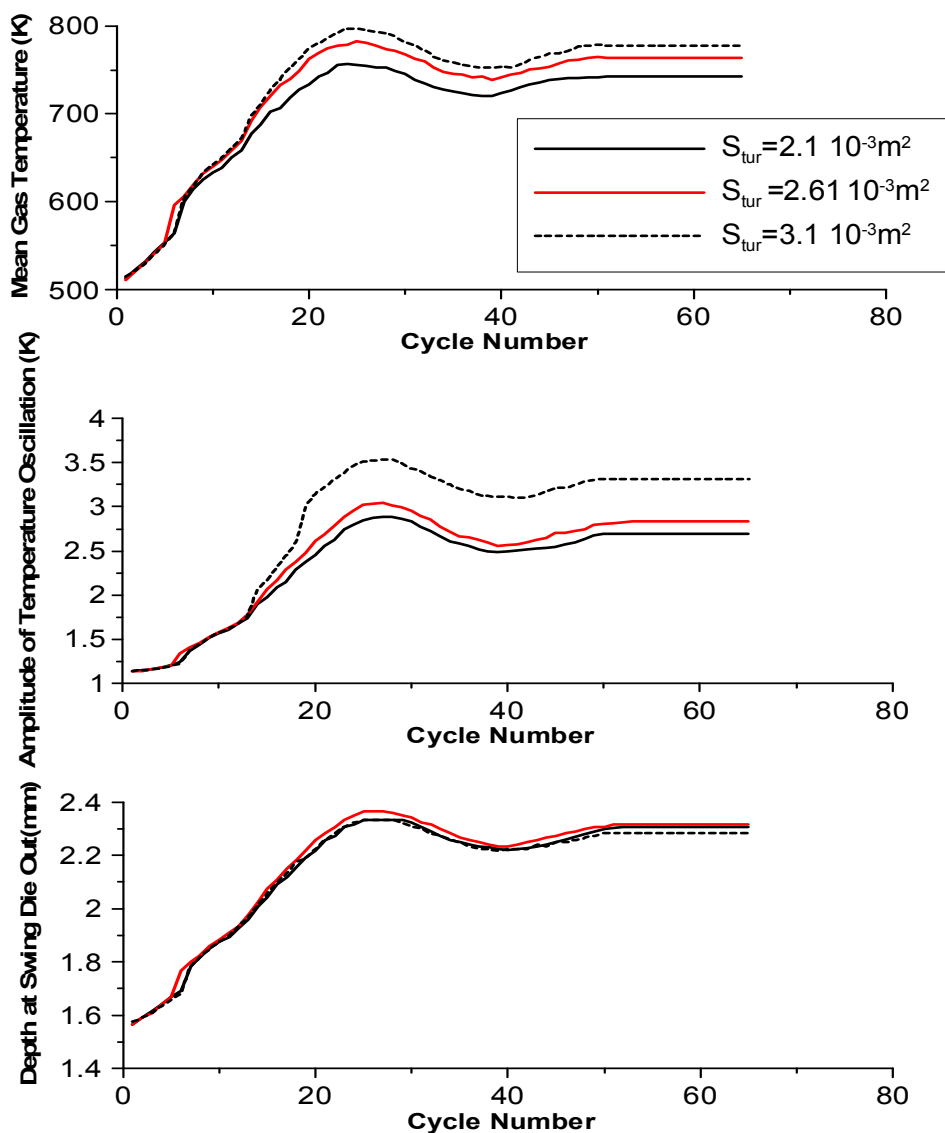
Στα Σχήματα 5.28.-5.32. και 5.34. παρουσιάζεται το πλάτος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα για τους τρεις προαναφερόμενους όγκους πολλαπλής εξαγωγής. Όπως και στα προηγούμενα Σχήματα το πλάτος είναι αρκετά μεγαλύτερο για όγκο πολλαπλής $5 V_{ex\ nominal}$. Επίσης, με τη χρήση μονωτικού PSZ τα πλάτη είναι πολύ μεγαλύτερα απ' ότι με τη χρήση SN ή μόνο χυτοσίδηρου για τους λόγους που έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

Στα Σχήματα 5.28.-5.32. και 5.35. παρουσιάζεται το βάθος απόσβεσης της ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τους τρεις όγκους εξαγωγής. Οι τρεις όγκοι δεν επηρεάζουν το βάθος. Όπως και στις προηγούμενες εξεταζόμενες περιπτώσεις το βάθος καθορίζεται μόνο από το αν υπάρχει ή όχι μονωτικό υλικό και από το είδος του.

5.6. Επιφάνεια στροβίλου

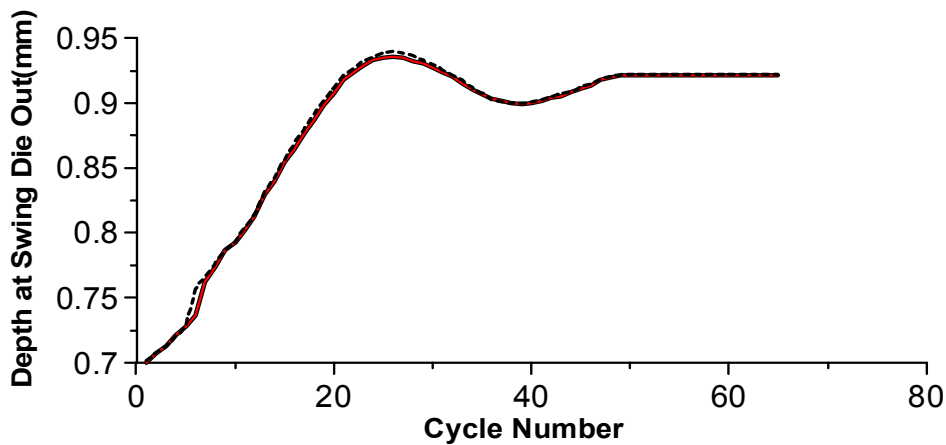
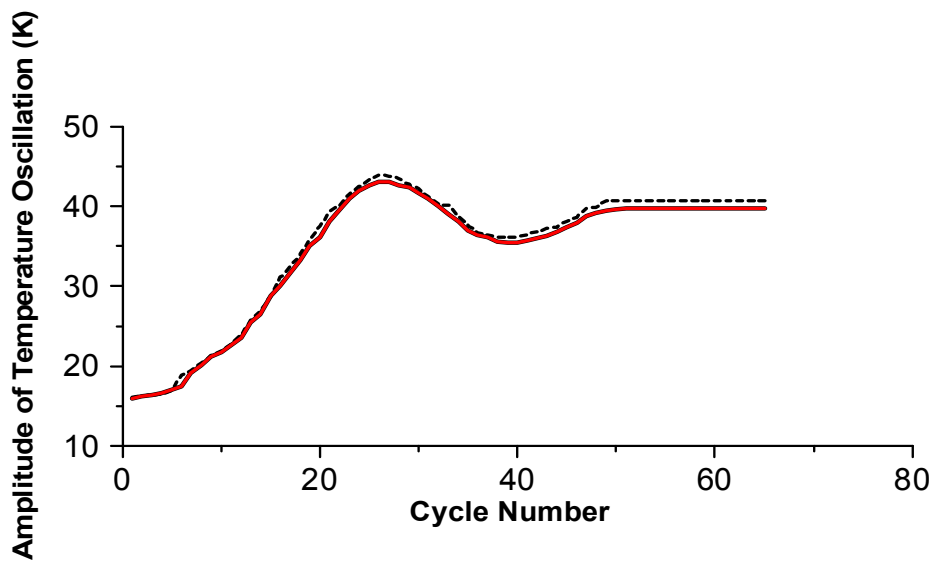
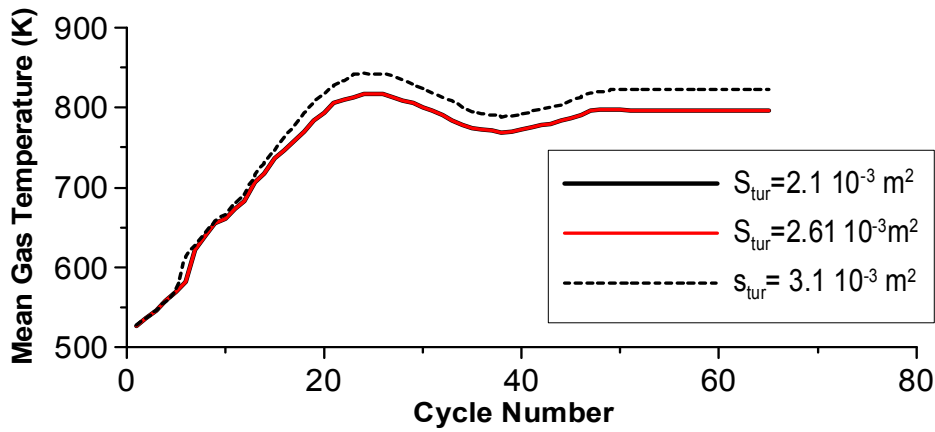
Στα Σχήματα της Παραγράφου αυτής απεικονίζεται η απόκριση των τριών εξεταζομένων μεγεθών κατά τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα συναρτήσει της ενεργούς επιφάνειας του στροβίλου. Η κατάλληλη επιλογή στροβίλου -ως προς το μέγεθος και τη γεωμετρία του- εξαρτάται από το επίπεδο των συνήθων φορτίων λειτουργίας και από το εύρος του πεδίου

λειτουργίας του. Όταν το φορτίο λειτουργίας δεν είναι σταθερό, όπως στους κινητήρες των οχημάτων, τότε προτείνεται ο στρόβιλος μεταβλητής γεωμετρίας: ο στρόβιλος αυτός έχει τη δυνατότητα μείωσης της επιφάνειας του κατά την μεταβολή του φορτίου αυξάνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την πίεση στο οχετό εξαγωγής και την αύξηση της ενθαλπίας του καυσαερίου στο στρόβιλο συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην αντιμετώπιση της υστέρησης του υπερπληρωτή.



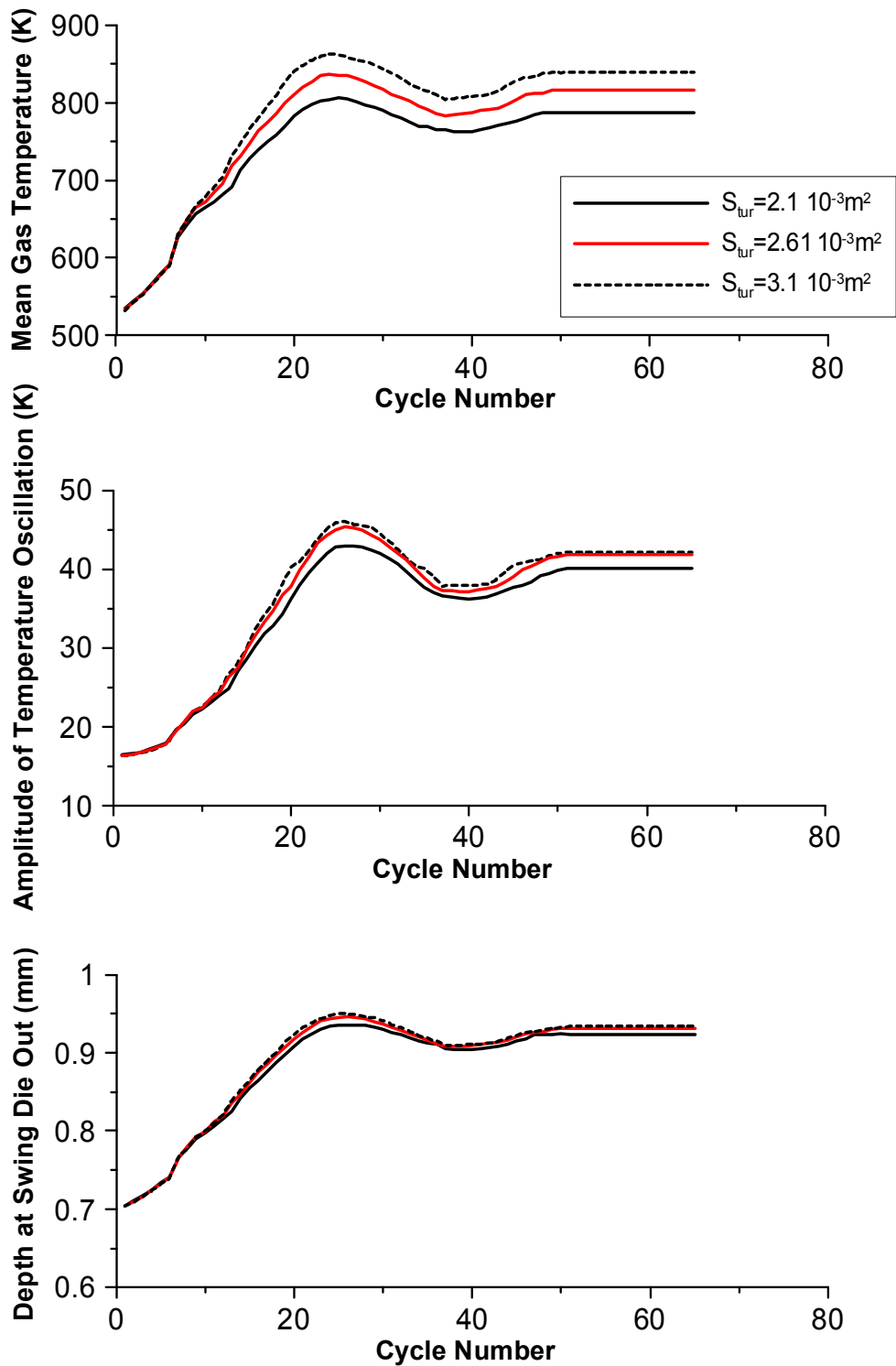
Σχήμα 5.36.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις επιφάνειες στρόβιλου στην περίπτωση χυτοσιδήρου



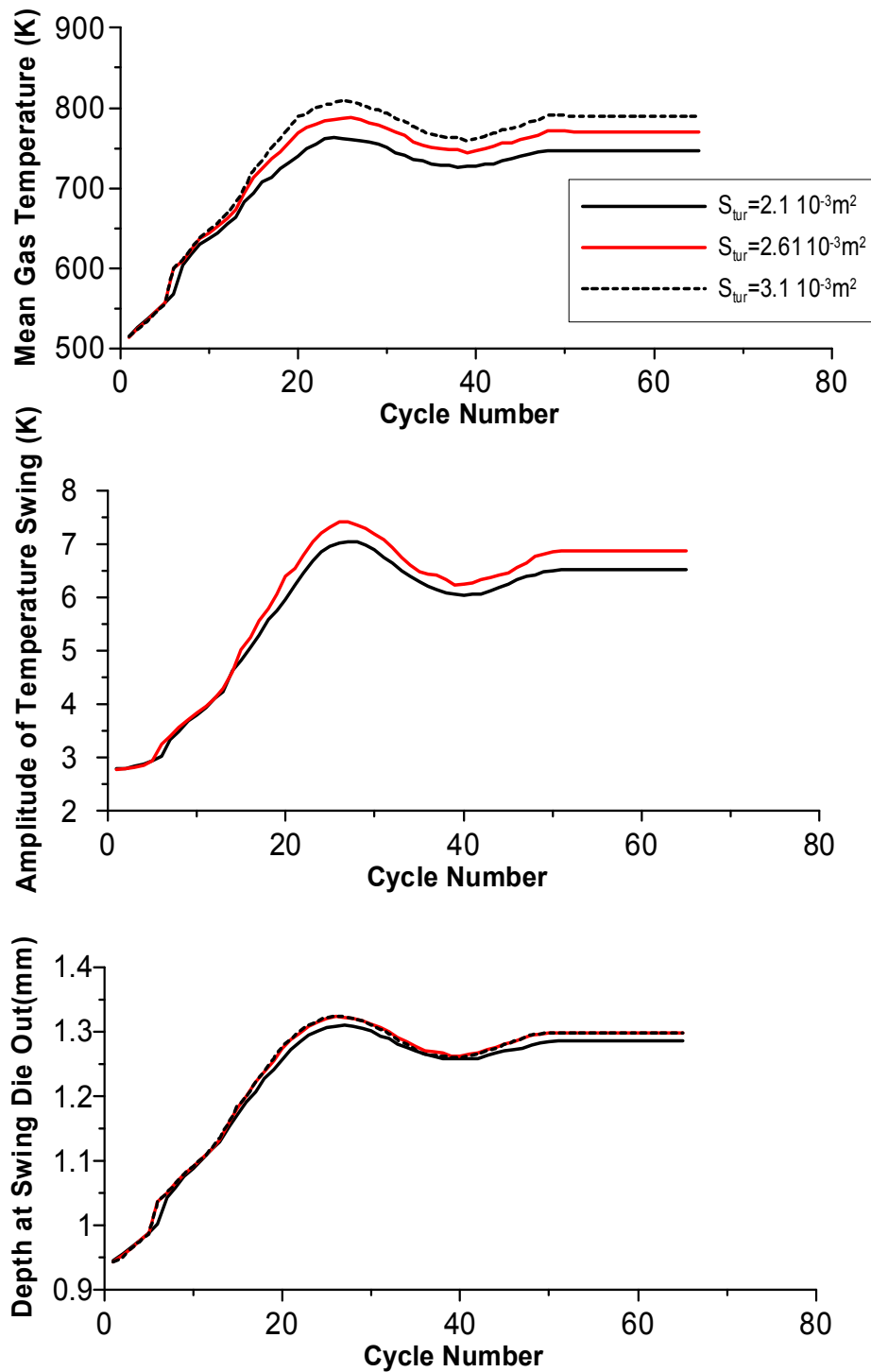
Σχήμα 5.37.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις επιφάνειες στροβίλου στην περίπτωση 1.0 mm PSZ



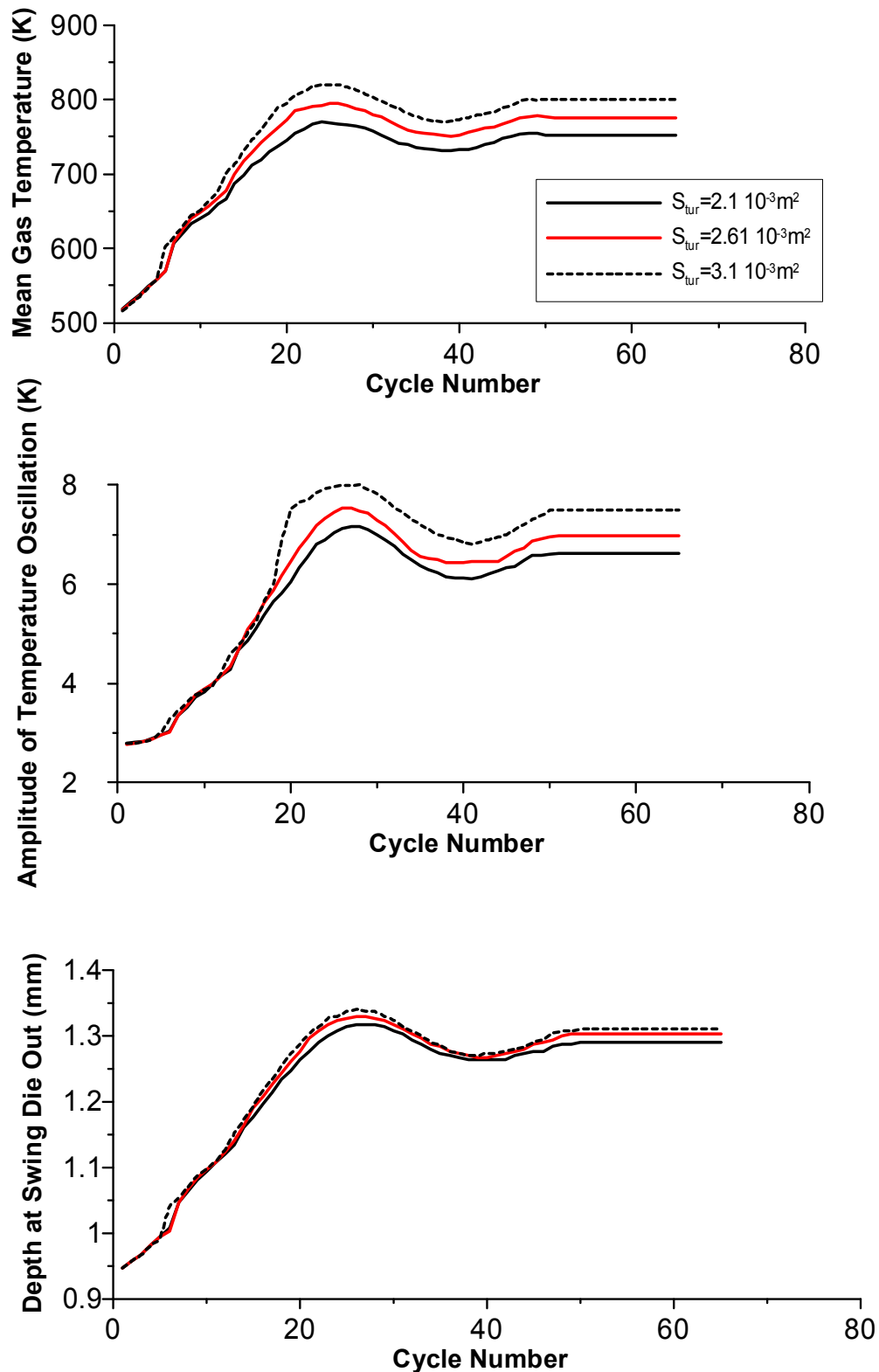
Σχήμα 5.38.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις επιφάνειες στροβίλου στην περίπτωση 1.5 mm PSZ



Σχήμα 5.39.

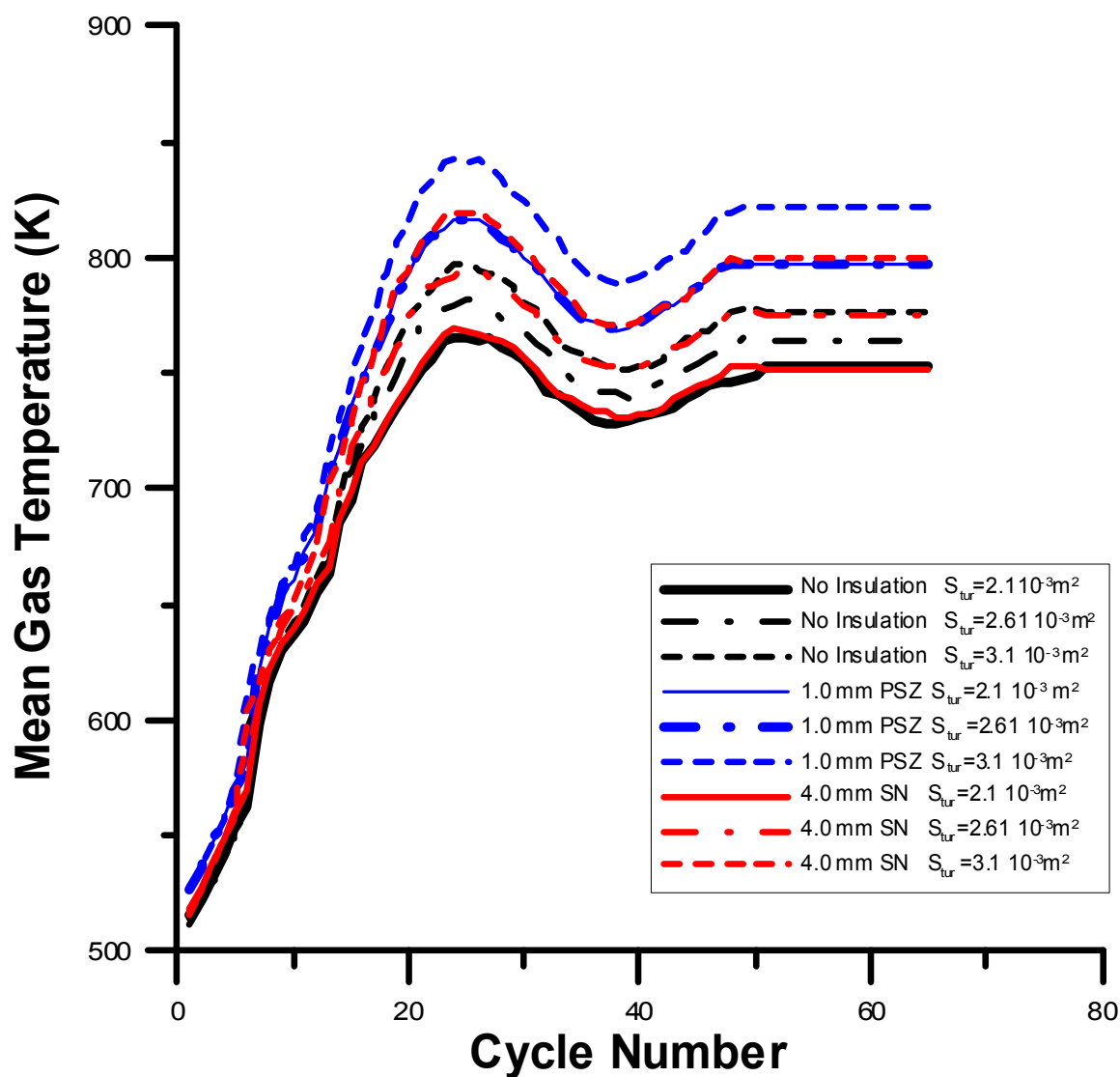
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις επιφάνειες στροβίλου στην περίπτωση 2.0 mm SN



Σχήμα 5.40.

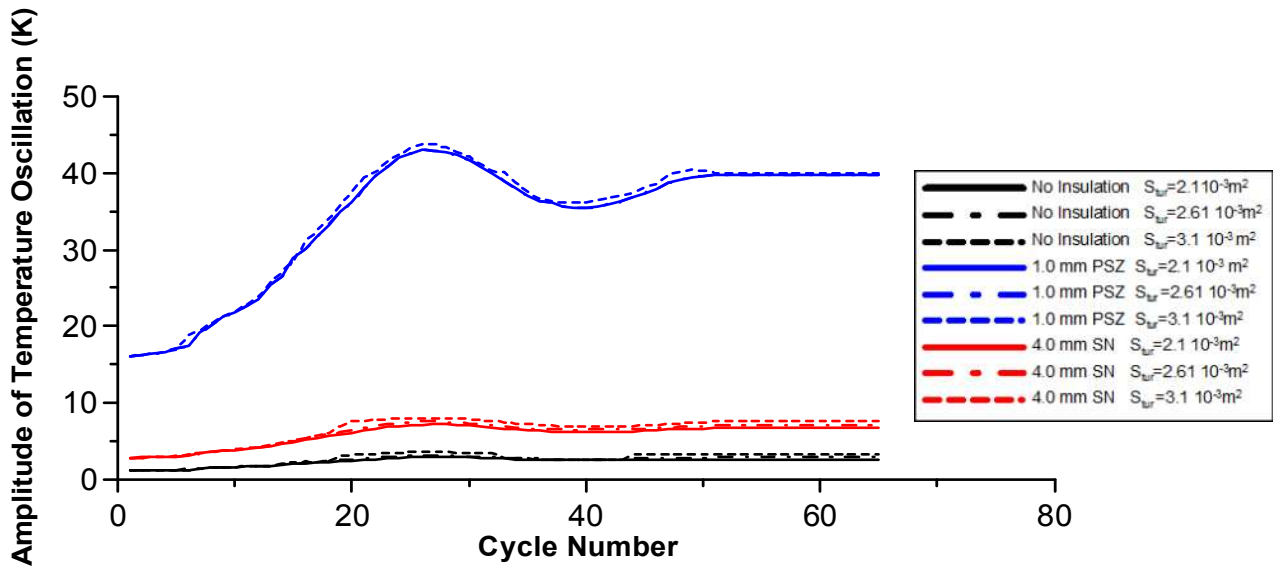
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις επιφάνειες στροβίλου στην περίπτωση 4.0 mm SN

5.6.1. Σύγκριση των τριών παραμέτρων για τις τρεις εξεταζόμενες επιφάνειες στροβίλου και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).



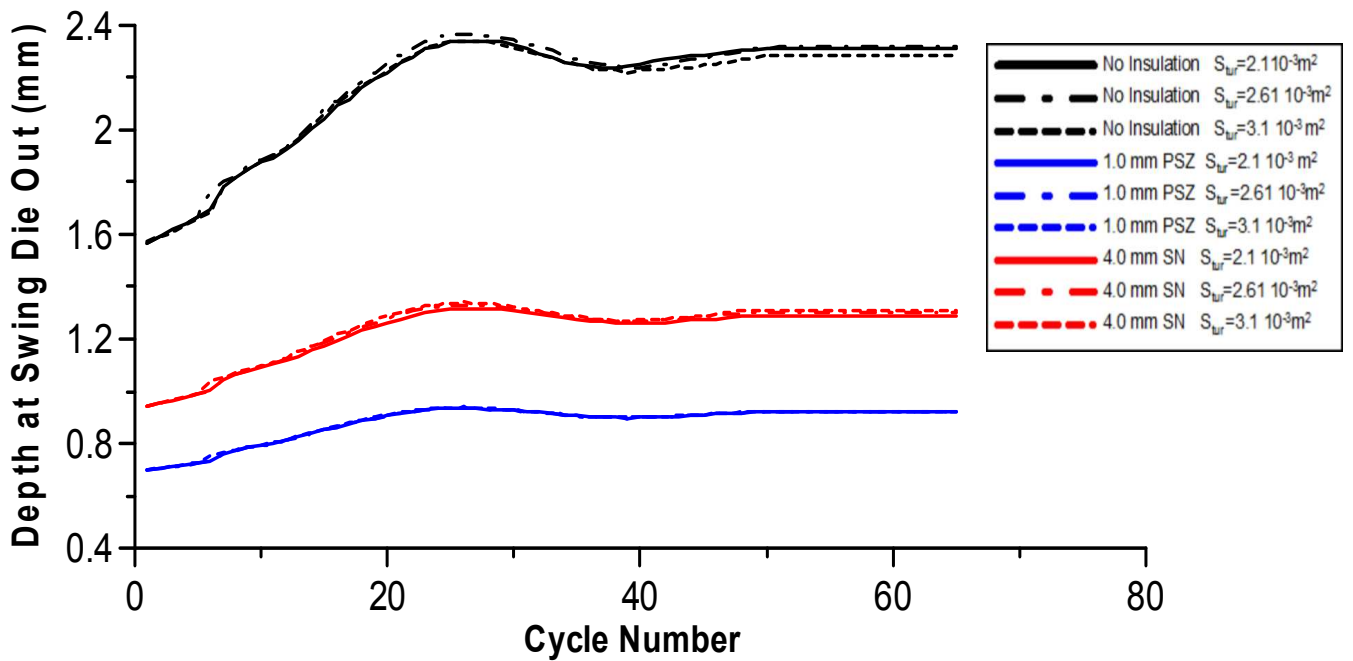
Σχήμα 5.41.

Μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορες επιφάνειες στροβίλου και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.42.

Πλάτος θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορες επιφάνειες στροβίλου και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.43.

Βάθος απόσβεσης θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορες επιφάνειες στροβίλου και διάφορα μονωτικά

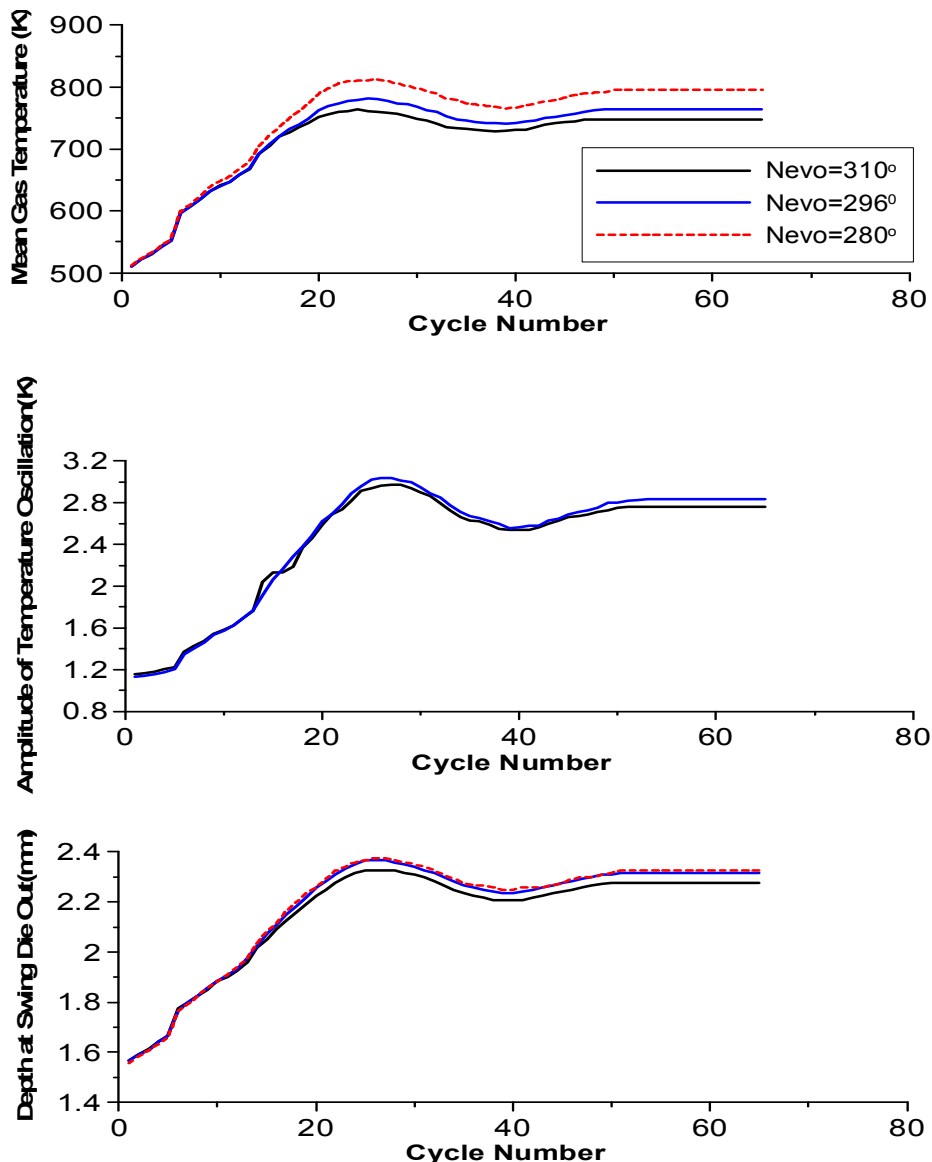
Στα Σχήματα 5.36-5.40 και 5.41 παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρία διαφορετικά μεγέθη ενεργούς επιφάνειας στροβίλου: $S_{tur} = 2.1 \cdot 10^{-3} m^2$, $S_{tur} = 2.61 \cdot 10^{-3} m^2$, $S_{tur} = 3.1 \cdot 10^{-3} m^2$. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ενεργή επιφάνεια του στροβίλου αυξάνεται και η θερμοκρασία του αερίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο πιο μικρή είναι η ενεργή επιφάνεια τόσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα των καυσαερίων. Επομένως, ο στρόβιλος επιταχύνει ταχύτερα τον συμπιεστή, μην αφήνοντας το λόγο αέρα καυσίμου λ_α να μειωθεί αρκετά, αναστέλλοντας έτσι την μεγάλη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του αερίου. Ο κίνδυνος που υπάρχει όταν είναι πολύ μικρή η ενεργή επιφάνεια είναι η υπερβολική αύξηση της πίεσης υπερπλήρωσης (overboosting) η οποία μπορεί να βλάψει τον κινητήρα και να οδηγήσει σε υπερβολική αύξηση στροφών του στροβίλου (over-speeding). Ενδεικτικά για το μονωτικό PSZ πάχους 1.5 mm αύξηση της επιφάνειας είναι 3.6% από $S_{tur} = 2.1 \cdot 10^{-3} m^2$ σε $S_{tur} = 2.61 \cdot 10^{-3} m^2$ ενώ το ποσοστό αυξάνει σε 3.24% από $S_{tur} = 2.61 \cdot 10^{-3} m^2$ σε $S_{tur} = 3.1 \cdot 10^{-3} m^2$. Σχετικά με τα μονωτικά υλικά η αύξηση του θερμοκρασιακού εύρους είναι μεγαλύτερη με την ύπαρξη μονωτικού και ακολουθεί την συνήθη σειρά: cast iron, 2.0 mm SN, 4.0 mm SN, 1.0 mm PSZ, 1.5 mm PSZ.

Στα Σχήματα 5.36-5.40 και 5.42 παρουσιάζεται το πλάτος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τις εξεταζόμενες επιφάνειες στροβίλου. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ενεργή επιφάνεια του στροβίλου αυξάνεται αναμενόμενα και το πλάτος. Επίσης τα μεγαλύτερα πλάτη, όπως αναμενόταν, παρουσιάζονται για 1.5 mm PSZ. Συγκεκριμένα το εύρος του πλάτους του χυτοσίδηρου είναι για $S_{tur} = 3.1 \cdot 10^{-3} m^2$ 1.1-3.5 K ενώ για 1.5 mm PSZ για την ίδια επιφάνεια είναι 16.3 - 46 K.

Το βάθος απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης παρουσιάζει ελάχιστη διαφοροποίηση στην περίπτωση αύξησης της επιφάνειας του στροβίλου ενώ για το ίδιο μονωτικό δε μεταβάλλεται καθόλου συναρτήσει του πάχους. Η διαφορά στο βάθος και σε αυτή την παράμετρο έγκειται στη χρήση μονωτικού ή όχι και στην ισχύ του μονωτικού.

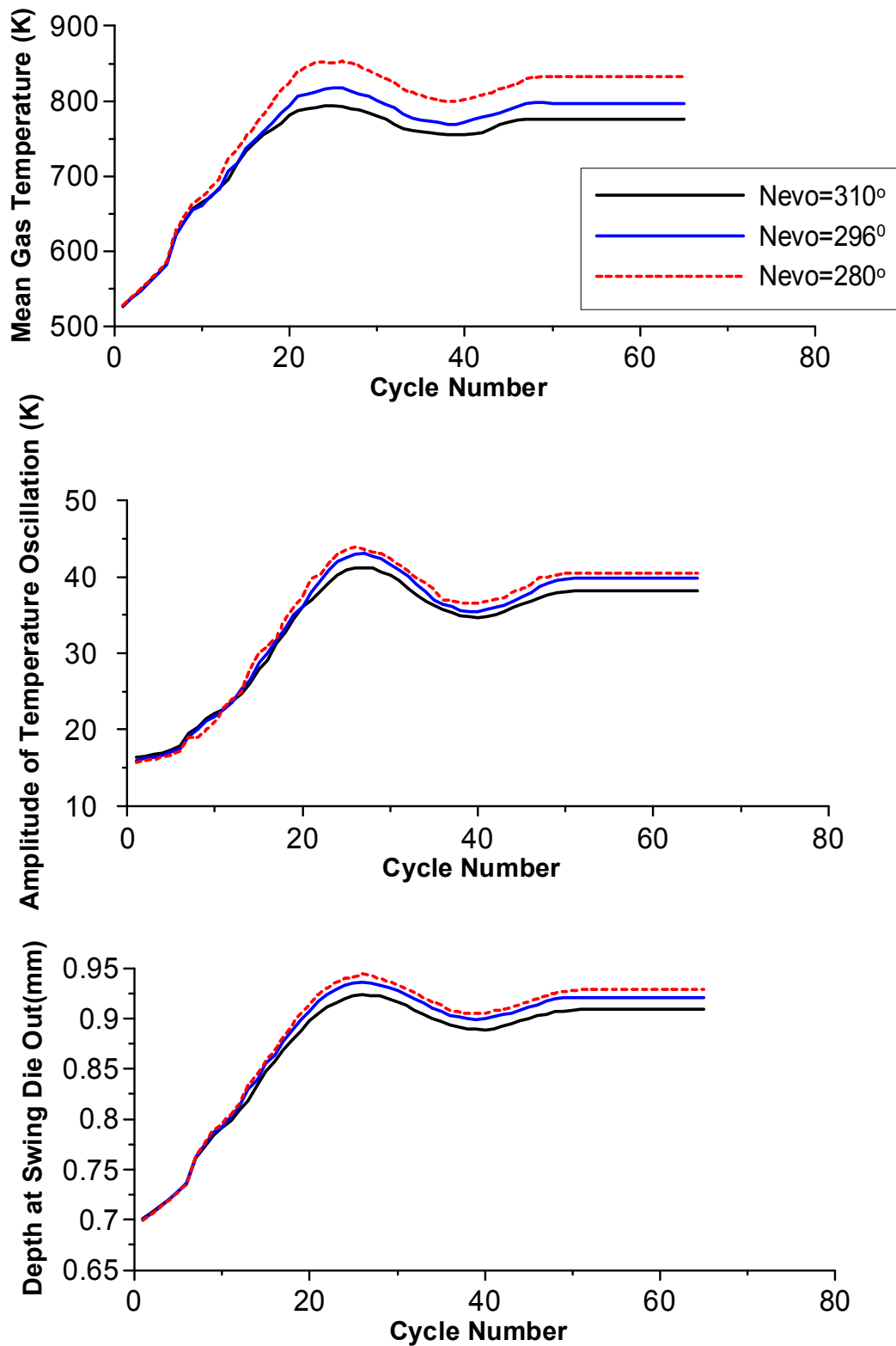
5.7. Άνοιγμα βαλβίδας εξαγωγής καυσαερίων

Στην Παράγραφο αυτή θα εξεταστούν τα τρία μεγέθη κατά τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα συναρτήσει της γωνίας στροφάλου κατά την οποία ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής (Nevo). Ο χρονισμός των βαλβίδων είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος αφού καθορίζει το επίπεδο των πιέσεων και των θερμοκρασιών των αερίων κατά την εξαγωγή τους από τον κύλινδρο.



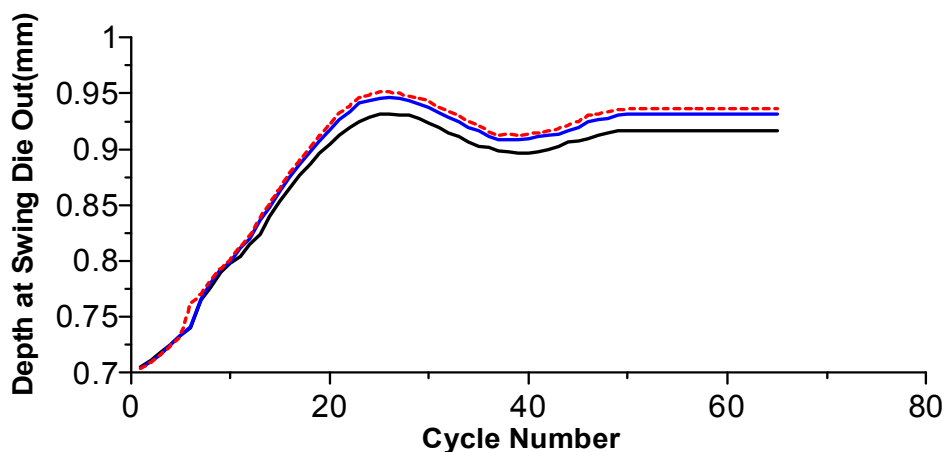
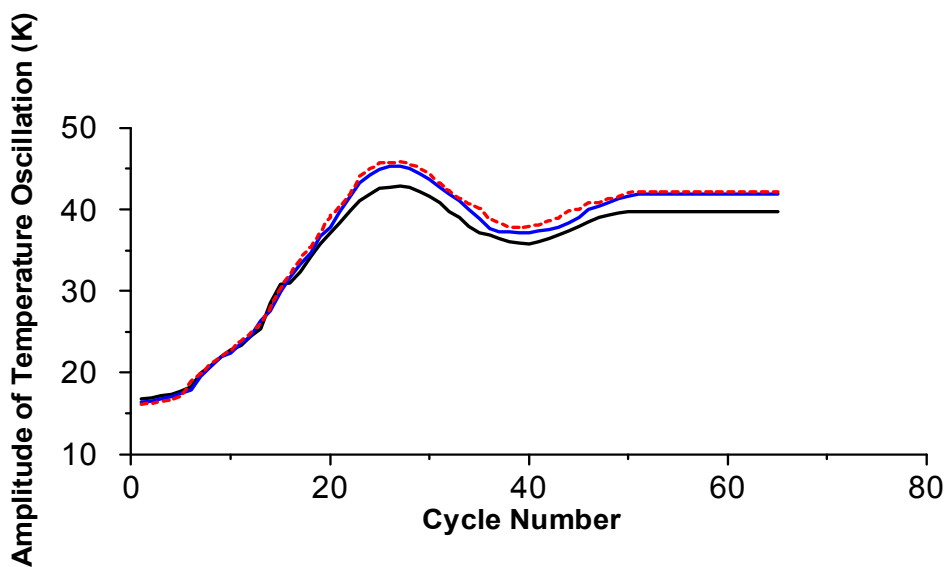
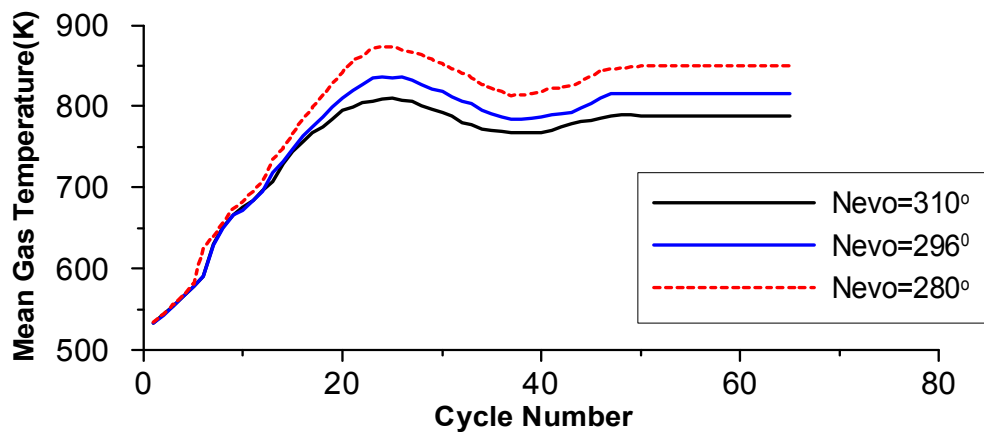
Σχήμα 5.44

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις διαφορετικές γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής στην περίπτωση χυτοσιδήρου



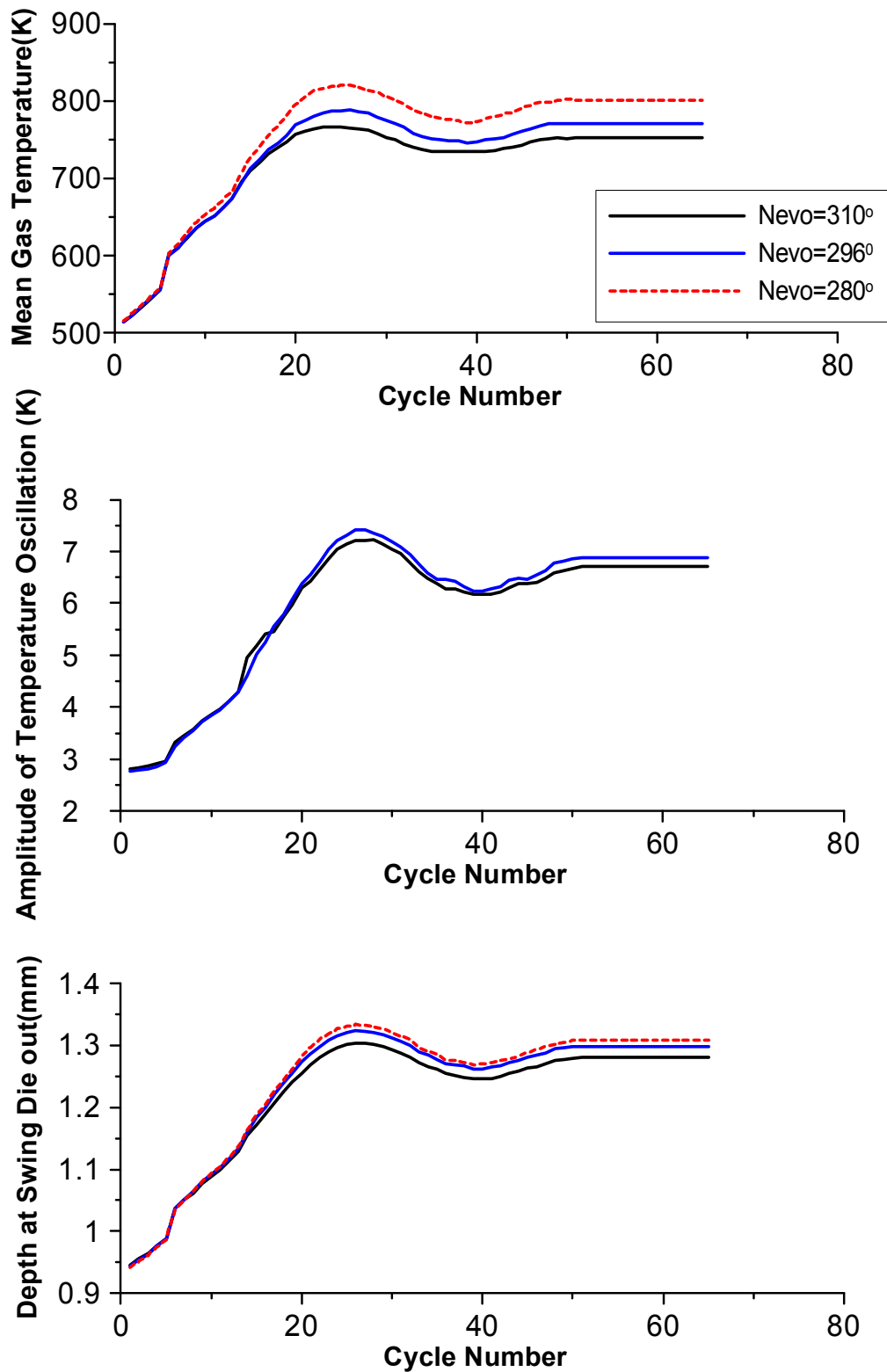
Σχήμα 5.45.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις διαφορετικές γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής στην περίπτωση 1.0 mm PSZ



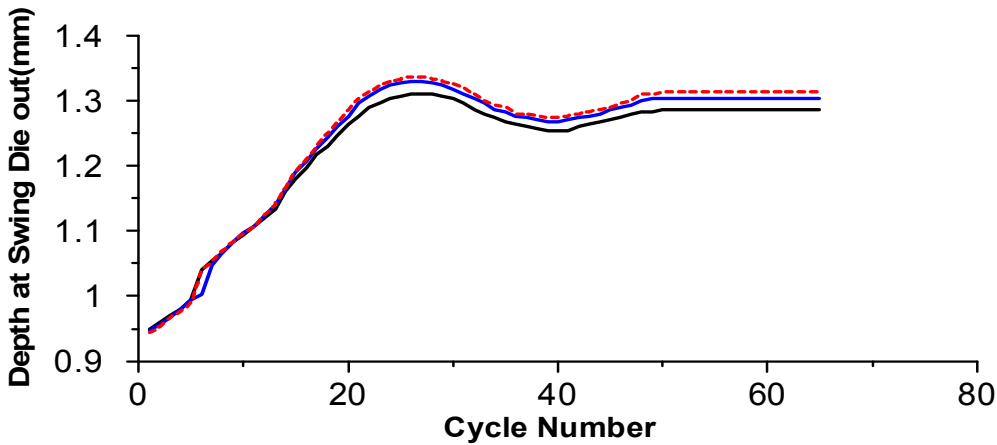
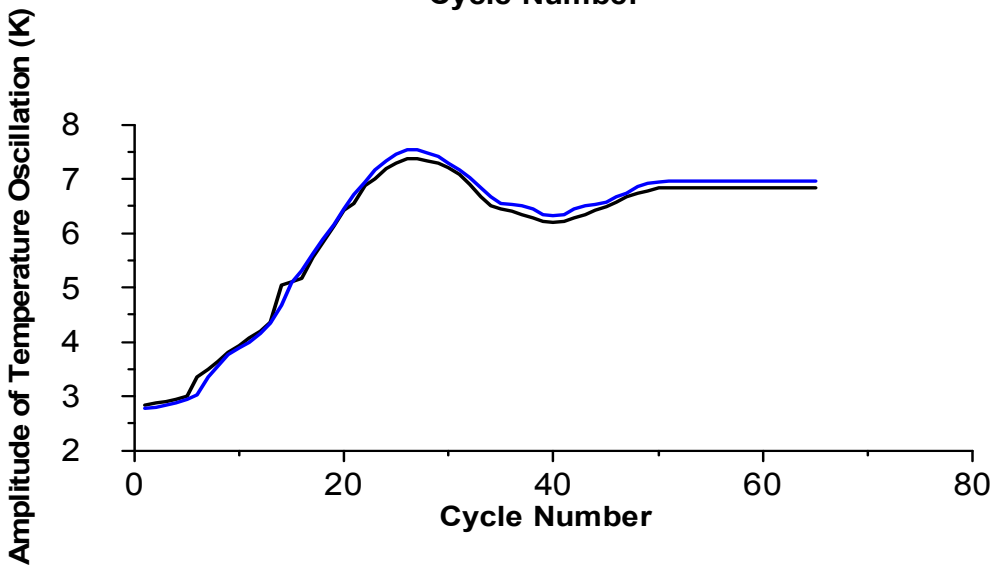
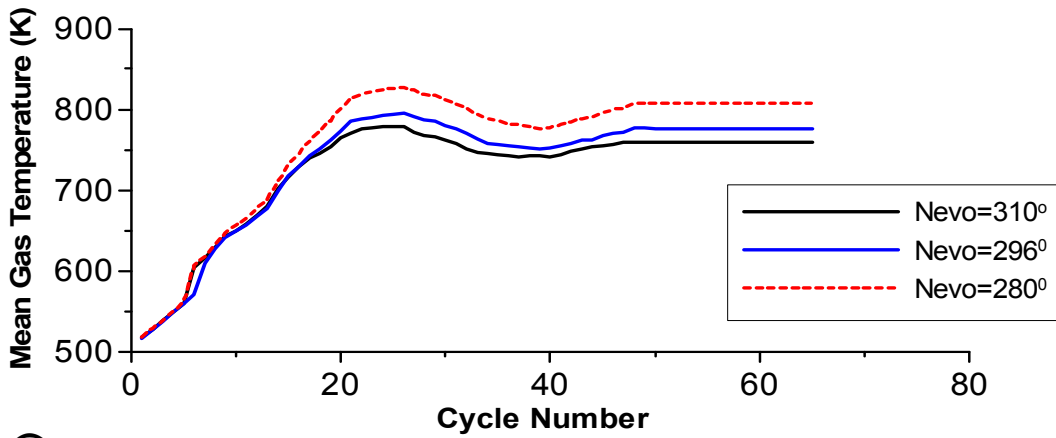
Σχήμα 5.46.

Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις διαφορετικές γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής στην περίπτωση 1.5 mm PSZ



Σχήμα 5.47.

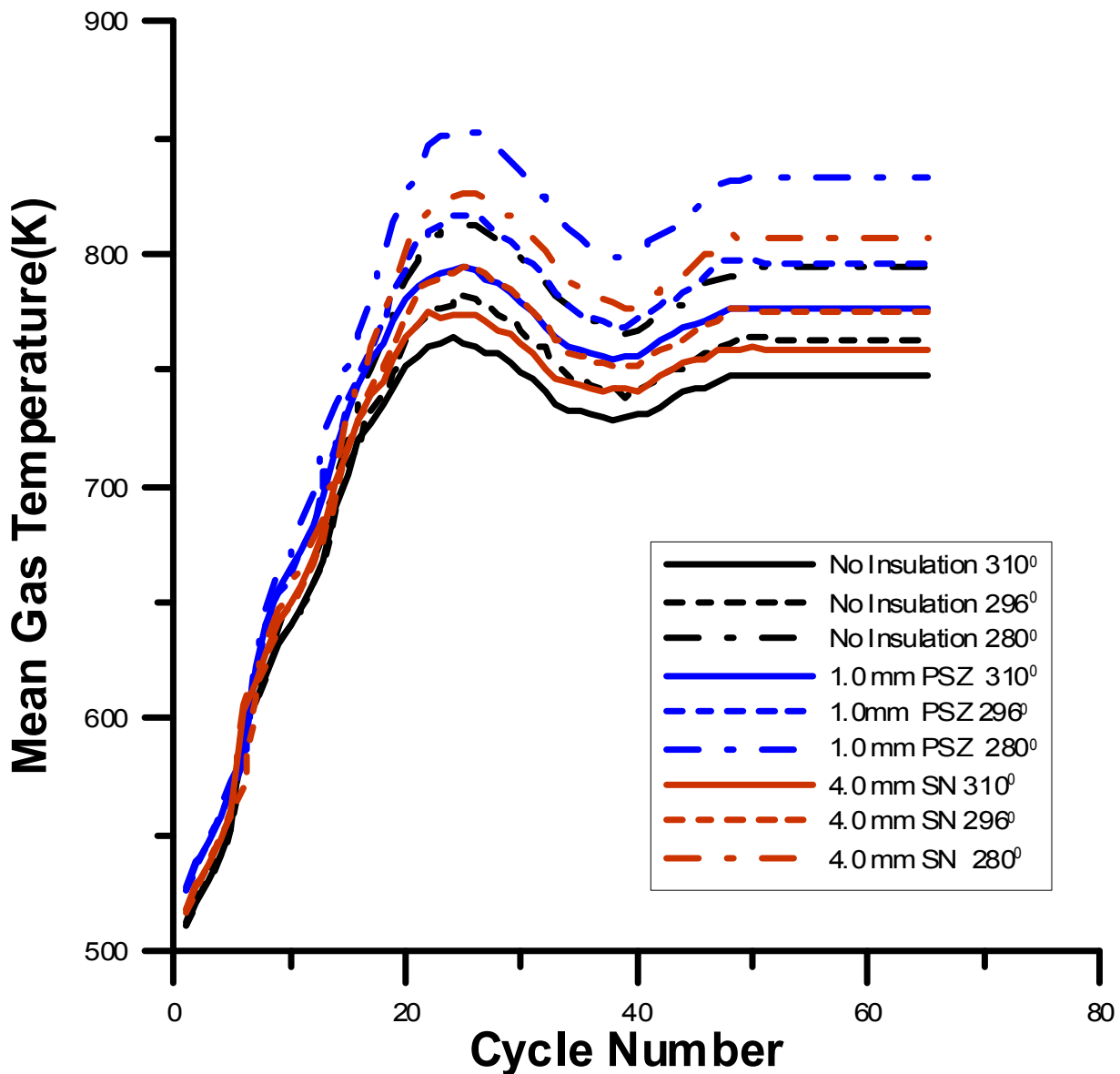
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις διαφορετικές γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής στην περίπτωση 2.0 mm SN



Σχήμα 5.48.

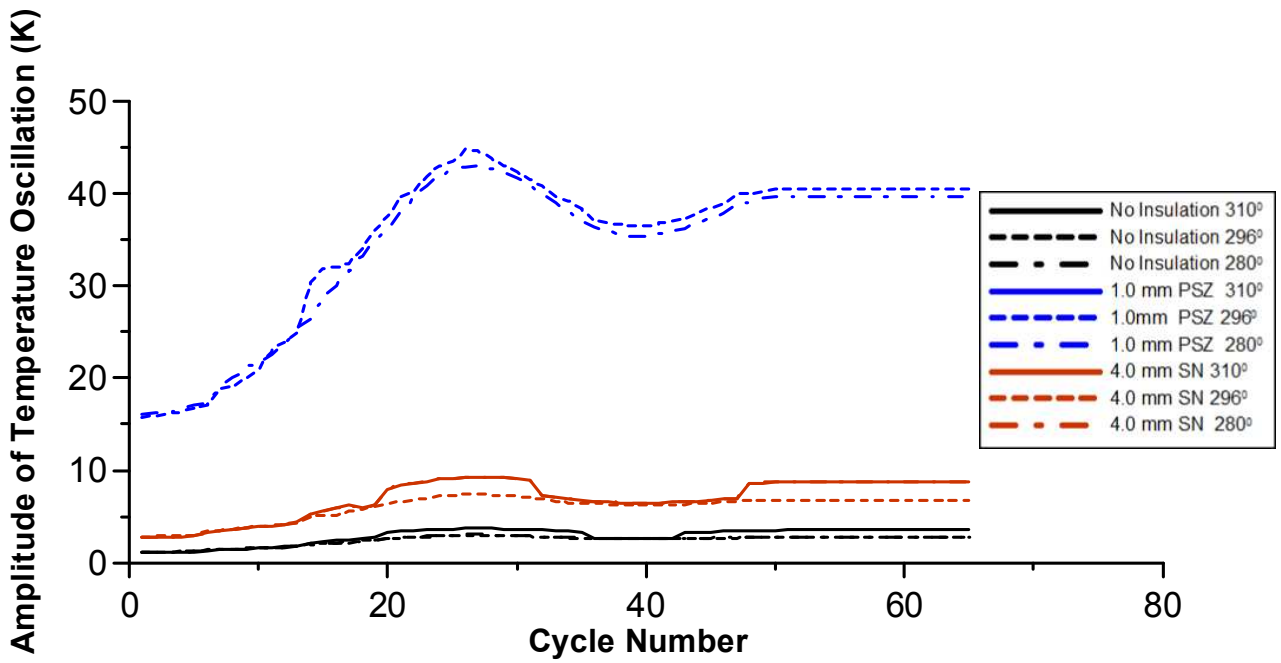
Απόκριση μέσης θερμοκρασίας αερίου, πλάτους θερμοκρασιακής ταλάντωσης και βάθους απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για τρεις διαφορετικές γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής στην περίπτωση 4.0 mm SN

5.7.1. Σύγκριση των τριών παραμέτρων για τις τρεις εξεταζόμενες γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής και για τρεις περιπτώσεις μόνωσης (χυτοσίδηρος, 1.0 mm PSZ, 4.0 mm SN).



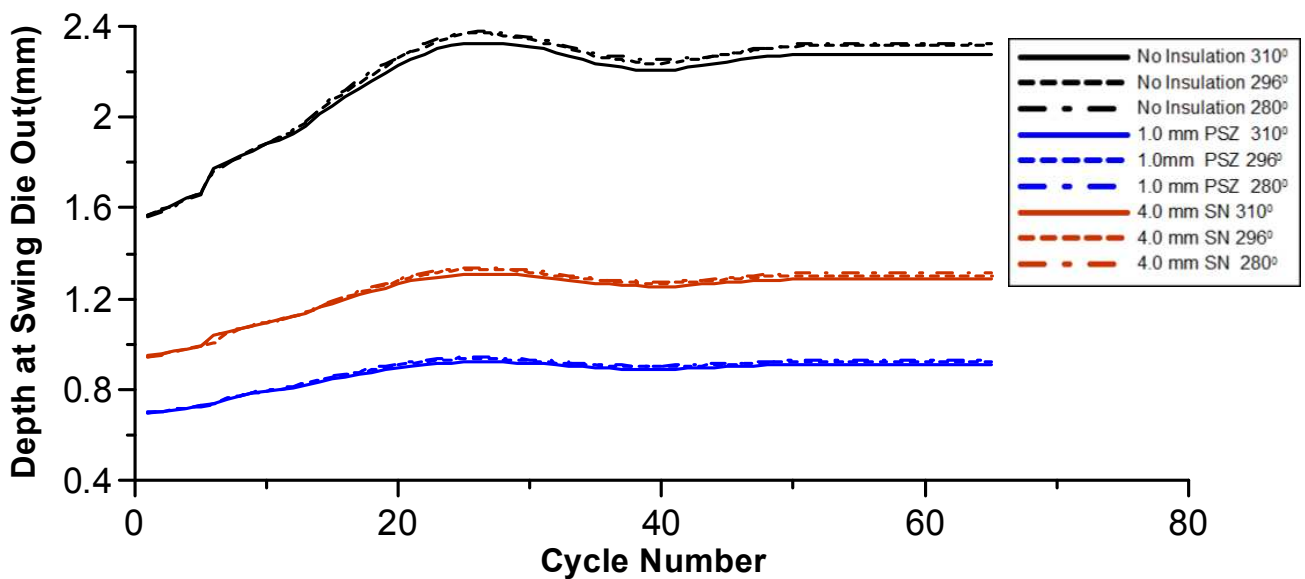
Σχήμα 5.49.

Μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορες γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.50.

Πλάτος θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορες γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής και διάφορα μονωτικά



Σχήμα 5.51.

Βάθος απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία για διάφορες γωνίες ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής και διάφορα μονωτικά

Στα Σχήματα 5.44.-5.48. και 5.49. παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία αερίου κατά τη μεταβατική λειτουργία συναρτήσει του χρόνου που ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής και συγκεκριμένα για : a) 280°, b) 296° και c) 310° μετά το ΚΝΣ. Παρατηρείται, αναμενόμενα, ότι όσο νωρίτερα ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. **Το νωρίτερο άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής έχει ως αποτέλεσμα εκροή καυσαερίου μεγαλύτερης πίεσης και θερμοκρασίας, άρα και δυναμικά καλύτερη-ταχύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου της υστέρησης του υπερπληρωτή. Πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι όσο νωρίτερο το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής, τόσο μικρότερο το έργο αποτόνωσης εντός του κυλίνδρου.** Για 1.0 mm PSZ παρατηρείται αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας αερίων από τις 280° στις 296° κατά ποσοστό 2.86% και από 296° στις 310° κατά ποσοστό 4.23%. Επιπλέον η μεγαλύτερη αύξηση για δεδομένες μοίρες στροφάλου ανοίγματος της βαλβίδας παρατηρείται για μονωτικό PSZ, ακολουθεί το SN και τέλος ο χυτοσίδηρος.

Στα Σχήματα 5.44.-5.48. και 5.50. παρουσιάζεται το πλάτος της θερμοκρασιακής ταλάντωσης κατά την μεταβατική περίοδο συναρτήσει της στιγμής που ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής. Παρατηρείται ότι το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνει όσο νωρίτερα ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής, τόσο στην περίπτωση χρήσης μονωτικού όσο και στην περίπτωση του χυτοσίδηρου. Ενδεικτικό ποσοστό διαφοράς του μέγιστου πλάτους είναι στην περίπτωση του μονωτικού PSZ πάχους 1.5 mm από 280° σε 310° της τάξης του 7.43%. Όπως αναμενόταν, το πλάτος είναι μεγαλύτερο με μονωτικό PSZ και ιδιαίτερα για πάχος 1.5 mm. Ακολουθεί με μεγάλη διαφορά το πλάτος της ταλάντωσης με μονωτικό SN και τέλος ο χυτοσίδηρος.

Τέλος, το βάθος απόσβεσης της ταλάντωσης στα Σχήματα 5.44.-5.48. και 5.51. μειώνεται λίγο για κάθε μονωτικό όσο νωρίτερα ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής. Παρόλα αυτά η χρήση ισχυρού μονωτικού έχει και σε αυτή την περίπτωση πολύ μικρό βάθος απόσβεσης προκαλώντας σε συνδυασμό με το μεγάλο πλάτος θερμοκρασιακή ταλάντωση υψηλή θερμική καταπόνηση.

5.8. Συμπεράσματα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την απόκριση μονωμένου κινητήρα Diesel κατά τη μεταβατική λειτουργία, μετά από απότομη αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου.

Κατά τη μεταβατική λειτουργία, μετά από απότομη αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου, η χρήση μονωτικού υλικού οδηγεί σε:

- μικρότερη αύξηση της ροής θερμότητας προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Επομένως, επικράτηση υψηλότερων επιπέδων πιέσεων και θερμοκρασιών μέσα στον κύλινδρο.
- μικρότερη πτώση στροφών του κινητήρα, λόγω της μείωσης των θερμικών απωλειών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.
- μεγαλύτερη αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.
- μικρότερη αύξηση του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης.
- αύξηση του εύρους της θερμοκρασιακής ταλάντωσης στην επιφάνεια του τοιχώματος του κυλίνδρου ανά κύκλο λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου της μεταβατικής λειτουργίας, το εύρος είναι ανάλογο των θερμοκρασιών των αερίων μέσα στον κύλινδρο οι οποίες, κατά βάση, εξαρτώνται από την παροχή καυσίμου.
- μικρότερο βάθος απόσβεσης της θερμοκρασιακής ταλάντωσης. Το μικρότερο βάθος απόσβεσης σε συνδυασμό με το μεγαλύτερο πλάτος θερμοκρασιακής ταλάντωσης οδηγούν σε ισχυρό θερμικό 'σοκ' και κατ' επέκταση υψηλή θερμική καταπόνηση.

Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας αερίου και του πλάτους της θερμοκρασιακής ταλάντωσης είναι ακόμα μεγαλύτερη για:

- μεγαλύτερη μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου
- μεγάλο όγκο πολλαπλής εξαγωγής
- μεγάλη ενεργή επιφάνεια του στροβίλου
- νωρίτερο άνοιγμα της βαλβίδας πολλαπλής εξαγωγής
- ακαριαία επιβολή φορτίου
- επιβολή άκαμπτου φορτίου

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κ.Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ.Δ. Ρακόπουλος (2000), «Έμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2006), «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις ΕΜΠ.
- 4) Κ.Δ. Ρακόπουλος (1994), «Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 5) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 6) Ξ.Κ. Κακάσιος (2002) «Μετάδοση Θερμότητας», Εκδόσεις «Κλειδάριθμος», Αθήνα
- 7) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) «Diesel Engine Transient Operation», Springer, London.
- 8) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, and D.C. Rakopoulos, «Study of the short-term cylinder wall temperature oscillations during transient operation of a turbo-charged diesel engine with various insulation schemes», International Journal of Engine Research, Vol.9, pp.177-193, 2008.
- 9) C.D. Rakopoulos, D.C. Rakopoulos, G.C. Mavropoulos, E.G. Giakoumis, «Experimental and theoretical study of short term response temperature transients in the cylinder walls of a diesel engine at various operating conditions», Science Direct, Applied Thermal Engineering, Vol.24, pp.679-702, 2004.

- 10) C.D. Rakopoulos, K.A. Antonopoulos, D.C. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, «Investigation of the temperature oscillations in the cylinder walls of a diesel engine with special reference to the limited cooled case», International Journal of Energy Research, Vol.28, pp.977-1002, 2004.
- 11) Annand WJD, «Heat transfer in the cylinders of reciprocating internal combustion engines» Proc Inst Mech Eng, Vol.177, pp.973-990,1963.
- 12) Borman, G. and Nishiwaki, K. «Internal-combustion engine heat transfer. Progress in Energy and Combustion Science», Vol. 13, pp. 1-46, 1987.
- 13) J.F Tovell, «Ceramics and the Reciprocating Internal Combustion Engine», Materials & Design, Vol. 5, pp.215-220, 1984.
- 14) Insaco Incorporated, 2004-2009
- 15) Stanford Materials Corporation, Aliso Viejo, California, USA
- 16) Ceram Research Ltd
- 17) <http://www.wikipedia.org>
- 18) <http://www.substech.com>
- 19) <http://www.journalamme.org>
- 20) <http://www.hardmaterials.de>
- 21) <http://www.sciencedirect.com>
- 22) <http://www.matersci.upatras.gr>

