

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**



Προηγμένα τεχνικά υλικά για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες

**Advanced engineering materials for high temperature
applications**



ΑΝΔΡΙΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

A.M. 5437

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Κ. Σαββάκης

Πρόλογος:

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο <<Προηγμένα τεχνικά υλικά για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες>> εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών, τμήματος Μηχανολογίας, Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης. Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση προηγμένων υλικών και η ανάλυση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων τους σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες. Στην εργασία έχουν συμπεριληφθεί αρκετές εικόνες, αναλυτικά διαγράμματα και όσο το δυνατό πιο απλή και κατανοητή συγγραφή, έτσι ώστε ο αναγνώστης να κατανοεί πλήρως τα φαινόμενα και τις ιδιότητες κάθε υλικού σε κάθε κεφάλαιο. Για την ολοκλήρωση της εν λόγω πτυχιακής εργασίας αφιερώθηκε αρκετός χρόνος και απαιτήθηκε πολύ μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας διεθνώς ώστε να καλυφθούν πλήρως με πολύτιμο και χρήσιμο υλικό όλα τα κεφάλαια της πτυχιακής. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Σαββάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της πτυχιακής εργασίας αλλά και για την στήριξη που μου παρείχε όπου απαιτήθηκε μέχρι το τέλος.

Πίνακας περιεχομένων:

Abstract	4
Εισαγωγή	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	10
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ	10
1.1 Εξαρτώμενοι παράγοντες του ερπυσμού	10
1.2 Φάσεις και πορεία του ερπυσμού έως την αστοχία.....	11
1.3 Παραδείγματα δημιουργίας Ερπυσμού- Τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου με χρησιμοποίηση υλικών που αντέχουν στον ερπυσμό και στην μηχανική καταπόνηση	14
1.4 Μηχανισμοί που εμφανίζονται κατά τον ερπυσμό [12],[13],[14]	17
1.5 Καμπύλη ερπυσμού και από τι εξαρτάται η κάθε αυξομείωση στη καμπύλη	20
1.6 Έλεγχος της συμπεριφοράς των υλικών σε πείραμα ερπυσμού	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	26
2.1 ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	26
2.2 Βελτίωση της πλαστικής της αντοχής των Κεραμικών σε υψηλές θερμοκρασίες. [18] ...	28
2.3 Συγκρίσεις διαφορετικών κεραμικών με βάση την αντοχή στον ερπυσμό	33
2.4 Ανάλυση της ολίσθησης των κόκκων σε θεωρητικό επίπεδο [19],[20].....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	39
3.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1.1 Βαφή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1.2 Επαναφορά.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1.3 Ανόπτηση.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1.4 Ανόπτηση για ανακρυστάλλωση.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1.5 Αποτακτική ανόπτηση.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1.6 Ανόπτηση σφαιροποίησης σεμεντήτη	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1.7. Εξομάλυνση.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.2 Οι λόγοι χρησιμοποίησης των μετάλλων σε υψηλές θερμοκρασίες [24]	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
[25]	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.4 Σημαντικές Ιδιότητες μετάλλων που καθορίζουν την αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία και μειώνουν τα φαινόμενα ερπυσμού[35], [36], [37].. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	56
4.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	56
4.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.....	57
4.3 Ταξινόμηση με βάση τον τύπο πρόσμιξης των σύνθετων υλικών [40] [41].....	63
4.4 Έρευνα για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών από τα συνθετικά υλικά- Τρόποι σκλήρυνσης.....	69
5.1 Εφαρμογές υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες	73
5.2 Μηχανολογικές εφαρμογές υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες [43].....	74
5.2.1 Αεροναυπηγικήκαι αεροδιαστημική.....	76
5.2.2 Κατασκευή μηχανών εσωτερικής καύσης [43],[44],[45],[46].....	77
5.2.3 Υλικά για τις μηχανές εσωτερικής καύσης, για κατασκευές πολύ υψηλών θερμοκρασιών (Αεροδιαστημική), λοιπές εφαρμογές [48], [49]	80
5.3 Ηλεκτρικές -Ηλεκτρονικές εφαρμογές υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες.....	85
5.3.1 Μικρο-ηλεκτρομηχανικές μικρο-συσσκευές σε διάφορες εφαρμογές [57].....	86
5.3.1.1 Μικρο-ηλεκτρομηχανικές μικρο-συσσκευές για την Αεροδιαστημική	86
5.3.1.2 Μικρο-ηλεκτρομηχανικές μικρο-συσσκευές για τα αυτοκίνητα	86
5.3.3 Μόνωση ηλεκτρικών καλωδίων.....	89
5.3.4 Πυκνωτές κινητήρων μονίμου λειτουργίας[61],[62]	89
6. Συμπεράσματα	91
7. Βιβλιογραφία.....	92

Πίνακας περιεχομένων σχημάτων:

Εικόνα 1 Θερμοκρασία τήξης διαφόρων ενώσεων(melting Temperature) και ενέργεια κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας σε δύο μετρούμενες μονάδες(kcal/mol και eV/atom), πηγή: [WilliamD, CallisterJR]	11
Εικόνα 2.2 Περιοδική τάση που εφαρμόζεται σε θεωρητική βάση, ώστε να προφυλάσσονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και να αποφεύγονται τα φαινόμενα ερπυσμού	14
Εικόνα 3 Απώλεια μηχανικών ιδιοτήτων και εγκάρσιες ρωγμές στην ελεύθερη επιφάνεια κοπτικού εργαλείου, που έχει υποστεί μεταξύ άλλων και το φαινόμενο του ερπυσμού[11]	15

Εικόνα 4 Αναρρίχηση της ατέλειας σε άλλο επίπεδο ολίσθησης με διάχυση των ατόμων...	17
Εικόνα 5 Ερπυσμός με ολίσθηση και αναρρίχηση των εξαρμώσεων.....	18
Εικόνα 6 Αλλαγή σχήματος κόκκων εξαιτίας της διάχυσης ατόμων-κενών θέσεων σε αντίθετες κατευθύνσεις	19
Εικόνα 7 Θερμοκρασίες τήξης και υαλώδους μετάβασης ορισμένων πολυμερών υλικών[WilliamD.Callister,JR].....	20
Εικόνα 8 Καμπύλη ταχύτητας ερπυσμού για τους τύπους μετάλλων(χωρίς ποιοτικά χαρακτηριστικά[15].....	21
Εικόνα 9 α) Κρυσταλλική δομή FCC, κυβική εδροκεντρωμένη δομή, β) Παρουσίαση της FCC, μέσα σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα[16].....	22
Εικόνα 10 Πτερύγιο στροβιλοκινητήρα που έχει επέλθει σε αστοχία λόγω των φαινομένων του ερπυσμού	23
Εικόνα 11 Διάγραμμα παραμόρφωσης χρόνου για αυξανόμενες τιμές θερμοκρασιών ή καταπονήσεων	24
Εικόνα 12 Διάγραμμα τάσης θραύσεως θερμοκρασίας για διάφορα μέταλλα και κράματα μετάλλων σε διάφορες θερμοκρασίες μετά από δοκιμή 1000 ωρών σε διάφορες θερμοκρασίες. πηγή: Δρ. Π. Ψυλλάκη,[Αστοχία Υλικών και Κριτήρια Επιλογής τους για Βιομηχανικές Εφαρμογές].....	24
Εικόνα 13 Πειραματική διάταξη ελέγχου ερπυσμού τυπικών δοκιμών.....	25
Εικόνα 14 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας πυροσυσσωμάτωσης sparkplasma με σπινθήρες.....	29
Εικόνα 15 Όρια θραύσης για διάφορες καταπονήσεις για τα υλικά του γυαλιού και του ακουμινίου. Πηγή: Δρ Μηχ Άγγελος Μαρκόπουλος Λέκτορας ΕΜΠ, 'Κεραμικά Υλικά'	31
Εικόνα 16 α) Σχηματική αναπαράσταση ψαθυρής θραύσης γυαλιού, β) Πραγματική αναπαράσταση θραύσης γυαλιού με μεγέθυνση στα 200μm, πηγή: Δρ. Μηχ. Άγγελος Μαρκόπουλος Λέκτορας ΕΜΠ, 'Κεραμικά Υλικά'	32
Εικόνα 17 α) αύξηση της ολίσθησης των κόκκων με τη μέθοδο GB με την αύξηση της θερμοκρασίας, β) Αύξηση της αντοχής σαν συνάρτηση της συχνότητας	34
Εικόνα 18α)Διαγραμματική απεικόνιση της μηχανικής απώλειας σαν συνάρτηση δύο δειγμάτων κεραμικών ζirkονίου του TS2/1(υψηλή περιεκτικότητα ακαθαρσιών) και του TS2/2(χαμηλή περιεκτικότητα), β) Ρυθμός ερπυσμού που μετρήθηκε στους 1623K σαν συνάρτηση του χρόνου[18].....	35
Εικόνα 19 Επίδραση του μεγέθους των κόκκων στη μηχανική απώλεια των κεραμικών που οδηγεί σε φαινόμενα ερπυσμού, β) Συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων στην μηχανική απώλεια σε συνάρτηση με τη συχνότητα[18]	36
Εικόνα 20 Κεραμικός συμπλέκτης CarreraGt της Porsche.....	37
Εικόνα 21 Διάγραμμα φάσεις κεραμικού κράματος που περιέχει οξειδίο του ζirkονίου και οξειδίο του μαγνησίου	38
Εικόνα 22 Υλικά που συνεπάγεται χάσιμο θερμικής ενέργειας στον κλίβανο επεξεργασίας η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εκμετάλλευση από μηχανές ανάκτησης της χαμένης θερμότητας.....	41
Εικόνα 23 α) Σχηματική παράσταση αναγεννητή κλιβάνου, β) Αναγεννητής κλιβάνου κατά τη διαδικασία λειτουργίας φτιαγμένος από πυρίμαχο χάλυβα.....	42

Εικόνα 24 Διαδικασία PCE(Pyrometric Cone Equivalent), δοκιμασίας θέρμανσης σε πυρίμαχα υλικά που έχουν δημιουργηθεί σε τριγωνικά σχήματα και κάμπτονται με τον χρόνο σαν τόξο.....	44
Εικόνα 25 Θερμοκρασίες τήξης για διάφορα πυρίμαχα υλικά	45
Εικόνα 26 Διαδικασία βαφής και επαναφοράς ενός χάλυβα για σκλήρυνση και βιομηχανική χρήση.....	52
Εικόνα 27 Παρουσίαση ενός δωματίου θέρμανσης κατασκευασμένο με μονωτικά πυρίμαχα	55
Εικόνα 28 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών με βάση την κραματική δομή τους.....	56
Εικόνα 29 Κατηγορίες σύνθετων υλικών με βάση το συστατικό που αποτελεί τη μήτρα και το συστατικό που αποτελεί το συστατικό ενίσχυσης	58
Εικόνα 30 α) Δομή συνθετικού υλικού Kevlar, β) Οπτική εμφάνιση του υλικού Kevlar	59
Εικόνα 31 Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχίτων από Sic και Al ₂ O ₃	61
Εικόνα 32 α) Παρουσίαση τιμών παραμόρφωσης και τάση για διάφορα σύνθετα υλικά, β) Συσχετισμός ειδικής αντοχής και ειδικής ακαμψίας	61
Εικόνα 33 Συγκριση θερμικής ευστάθειας ινών για διάφορα σύνθετα υλικά	62
Εικόνα 34 α) Διάγραμμα αντοχής ινών υψηλών θερμοκρασιών, β) Διάγραμμα αντοχής FRP και συνάφειας	63
Εικόνα 35 Σύσταση στοιχείων που φαίνονται στην εικόνα 38 στις καμπύλες 1,2 και 3	66
Εικόνα 36 Καμπύλες τριών δειγμάτων ινών πολυπροπυλενίου που εκχυλίστηκαν με αιθέρα και πολυμερές επτάνιο για να απομακρυνθεί το ατακτικό υλικό.....	66
Εικόνα 37 Μεταβολή της σχετικής υγρασίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για διάφορα υλικά σε σχέση με το Nylon 66.[40].....	67
Εικόνα 38 Τύποι διάταξης των ινών: α) μονοδιευθυντικές ίνες, β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη[41]	68
Εικόνα 39 Διαγραμματική απεικόνιση για οριακούς μαζικούς αριθμούς που συμβαίνει διαδικασία βίαιης αφαίρεσης σωματιδίων και μετατροπή σε σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας για εύρεση αναλογίας σταθερής δομής	72
Εικόνα 40 Βιολικά που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική για την βελτίωση της ποιότητας υγείας των ασθενών.....	76
Εικόνα 41 Βιομηχανικός όγκος παραγωγής σύνθετων υλικών ανά χρόνο και τιμή των σύνθετων υλικών για διάφορες κατασκευές και χρήστες.....	76
Εικόνα 42 Σύνολο υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των τοιχωμάτων ενός επιβατικού αεροπλάνου τύπου Boeing	77
Εικόνα 43 α) Σχηματική αναπαράσταση ενός θαλάμου καύσης πριν την εισαγωγή των επιπλέον εξαρτημάτων, β) Βαλβίδες τιτανίου με υψηλή αντοχή σε θερμικές καταπονήσεις, γ) Πρόσοψη και κάτοψη κεραμικού εμβόλου, δ) Ποιοτική παράσταση διωστήρα με τα διάφορα μέρη	79
Εικόνα 44 Φάση προσγείωσης διαστημικής κάψουλας τη στιγμή που εισέρχεται στο βαρυτικό πεδίο της γής και αναπτύσσει πολύ υψηλές θερμοκρασίες. [http://www.spacex.com/media]	82
Εικόνα 45 Παραστατική αναπαράσταση νανοσωλήνων σύνθετων υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αεροδιαστημικά λεωφορεία στο μέλλον, σύμφωνα με εκπροσώπους της NASA[55]	84

Εικόνα 46 Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε ένα Διαστημικό λεωφορείο κατά την περιήγηση του στο Διάστημα [56]	85
Εικόνα 47 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρων MEMS σε ένα αυτοκίνητο[56]	88
Εικόνα 48 Σχηματική αναπαράσταση για διαστημόπλοια επόμενης γενιάς σύμφωνα με την παρουσίαση από τη NASA[55]	88

Abstract

In this bachelor's thesis, we discuss about the behavior of various materials during their operation at high temperatures. Specifically we study the materials that show resistant to such functions and have prospective improvements for future applications in engineering.

Such materials are ceramics, metal materials, composites and various allied elements that are created to make components more resistant to applications. The description and the negative effects that one of the most difficult phenomena that occur when the thermal and mechanical stresses are too great can be described. In particular, the phenomenon of creep and the way the mechanisms of the materials work to deal with it are analyzed in detail. Finally after we analyze and we present the ways of strengthening the materials, we present some application of materials that are used in mechanical application (Internal Combustion Engines, Aeronautics and Aerospace) and in electrical and electronic applications (microchips, mechanical microelements, and electric cables).

Εισαγωγή

Στον αιώνα που διανύουμε συντελείται μία συνεχόμενη τεχνολογική ανάπτυξη σε όλους τους τομείς της επιστήμης, γεγονός που αυξάνει τις απαιτήσεις για την έρευνα των επιστημόνων και την εύρεση καινοτόμων ιδεών για την περαιτέρω τεχνολογική ανάπτυξη. Ένας τομέας που θα αναλυθεί στην παρούσα διπλωματική είναι η χρήση προηγμένων τεχνικών υλικών για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες που αντιστοιχεί σε μία μεγάλη γκάμα μηχανών κυρίως στον μηχανολογικό κλάδο και συγκεκριμένα σε τομείς όπως

- 1) Οι μηχανές εσωτερικής καύσης
- 2) Οι μηχανουργικές μορφοποιήσεις
- 3) Η Θέρμανση, ψύξη και κλιματισμός οικοδομών κλπ

Κατά την λειτουργία αυτών των μηχανών αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούν διάφορα ανεπιθύμητα φαινόμενα για τα τοιχώματα των μηχανών. Σκοπός της διπλωματικής είναι να αναφερθούν κάποια από αυτά τα ανεπιθύμητα φαινόμενα (ερπυσμός, κρούσεις μορίων στα τοιχώματα και φθορά, φθορά κ.α.).

Ο ερπυσμός είναι μία από τις πιο σημαντικές συνέπειες που έχει η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς είναι το φαινόμενο παραμόρφωσης των υλικών, όταν αυτά δέχονται τάσεις παραμόρφωσης χαμηλότερες από την αντοχή παραμόρφωσης των υλικών. Αυτό συμβαίνει όταν τα υλικά βρίσκονται στην περιοχή υψηλών θερμοκρασιών.

Πιο συγκεκριμένα θα αναφερθούν τα προβλήματα που δημιουργούνται από τον ερπυσμό σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας στο επόμενο κεφάλαιο. Στην συνέχεια θα γίνει η παρουσίαση των ιδιοτήτων διαφόρων υλικών που έχουν τις προδιαγραφές

για να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και θα αναφερθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός. Συγκεκριμένα θα μελετηθούν τα κεραμικά υλικά, τα μεταλλικά υλικά, τα σύνθετα υλικά, καθώς και κάποια υλικά που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές εφαρμογές (Τόρνος, Μηχανές εσωτερικής καύσης, Άτρακτοι κ.α.), καθώς και σε Ηλεκτρονικές εφαρμογές (μικροτσιπ, Επεξεργαστές Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Κιβώτια που έχουν υψηλές Αντιστάσεις κ.α.)

Άλλες εφαρμογές εμφανίζονται σε πολλές μηχανές κυρίως μηχανολογικού τύπου, όπως κινητήρες αυτοκινήτων, αεροπλάνων και άλλων μεταφορικών μέσων. Επίσης άλλες μηχανές που χρησιμοποιούνται σε υψηλή θερμοκρασία είναι οι μηχανές θέρμανσης σε οικοδομικούς χώρους, όπως οι λέβητες, τα θερμαντικά σώματα, τα τζάκια και διάφορες άλλες μηχανές θέρμανσης , αλλά και γενικότερα μηχανές εναλλαγής θερμότητας. Για παράδειγμα υπάρχουν και μεγαλύτερου είδους μηχανές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία, όπως εναλλάκτες θερμότητας, με μεγάλα δίκτυα σωλήνων που χρησιμεύουν για διεργασίες όπως το λιώσιμο και η μορφοποίηση μετάλλων όπως αναφέρθηκε, η θέρμανση για την παραγωγή τροφίμων και για την επεξεργασία αυτών κ.α. Επίσης υπάρχουν ειδικά υλικά για χρήση και προστασία ηλεκτρικών συσκευών που δουλεύουν σε υψηλές θερμοκρασίες ή μικροτσιπ που είναι ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες και χρειάζεται ένα ισχυρό υλικό.

Γενικότερα εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας συναντάμε σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάπτυξη μεγάλης τριβής μεταξύ δύο αντικειμένων, καθώς όπως γνωρίζουμε από την επιστήμη υλικών, όταν αναπτύσσεται μεγάλη τριβή έχουμε φαινόμενα με υψηλές θερμοκρασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ . 1

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

1.1 Εξαρτώμενοι παράγοντες του ερπυσμού

Όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, πρέπει να τηρούν τις απαιτούμενες ειδικές προδιαγραφές, με σκοπό να μην υπάρχει κίνδυνος για την ασφάλεια των ατόμων που, είτε λειτουργούν ως διαχειριστές της εφαρμογής είτε ως απλοί συμμετέχοντες.

Ο ερπυσμός είναι το φαινόμενο των υλικών να εμφανίζουν αύξηση των παραμορφώσεων με το χρόνο, ενώ οι δυνάμεις που δέχονται από εξωτερικά ερεθίσματα παραμένουν σταθερές και είναι ακόμη και μικρότερες της παραμόρφωσης διαρροής των υλικών. Πρέπει λοιπόν να εστιαστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό με σκοπό να περιοριστούν ή τουλάχιστον να αυξηθεί ο χρόνος έναρξης τους. Συνεπώς παρακάτω φαίνονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο και στην συνέχεια παρουσιάζεται σχολιασμός για κάθε παράγοντα ξεχωριστά.

Το φαινόμενο του ερπυσμού είναι συνάρτηση :[1]

- 1) Της εφαρμοζόμενης τάσης που δέχεται ένα υλικό (σ : N/m²)
- 2) Του χρόνου επιβολής της τάσης στο υλικό (t : sec)
- 3) Και της Θερμοκρασίας επιβολής των τάσεων κατά το χρονικό διάστημα επιβολής (T : °C)

Σύμφωνα με έρευνες επιστημόνων στον κλάδο των υλικών ο ερπυσμός αρχίζει να εμφανίζεται για τιμές μεγαλύτερες από $0,4 T_m$, όπου T_m είναι το απόλυτο σημείο τήξεως του Μετάλλου. [1]. Στον Πίνακα 1.1.1 φαίνονται διάφορες θερμοκρασίες τήξης για υλικά, οι οποίες έχουν μεγάλες διακυμάνσεις με μεγαλύτερη θερμοκρασία τήξης αυτή του Βολφραμίου και του διαμαντιού και χαμηλότερη αυτή του Υδράργυρου (εξαιρώντας τους δεσμούς Vander Wallsκαι της ενώσεις υδρογόνου)

Bonding Type	Substance	Bonding Energy		Melting Temperature (°C)
		<i>kJ/mol</i> (kcal/mol)	<i>eV/Atom,</i> <i>Ion, Molecule</i>	
Ionic	NaCl	640 (153)	3.3	801
	MgO	1000 (239)	5.2	2800
Covalent	Si	450 (108)	4.7	1410
	C (diamond)	713 (170)	7.4	>3550
Metallic	Hg	68 (16)	0.7	-39
	Al	324 (77)	3.4	660
	Fe	406 (97)	4.2	1538
	W	849 (203)	8.8	3410
van der Waals	Ar	7.7 (1.8)	0.08	-189
	Cl ₂	31 (7.4)	0.32	-101
Hydrogen	NH ₃	35 (8.4)	0.36	-78
	H ₂ O	51 (12.2)	0.52	0

Εικόνα 1 Θερμοκρασία τήξης διαφόρων ενώσεων (melting Temperature) και ενέργεια κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας σε δύο μετρούμενες μονάδες (kcal/mol και eV/atom), πηγή: [WilliamD, CallisterJR]

Μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξεως εμφανίζουν ερπυσμό ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα ο Μόλυβδος που εμφανίζει ερπυσμό για Θερμοκρασία $\theta=25^{\circ}\text{C}=273+25=298$ Kelvin. Συνεπώς ο Μόλυβδος κρίνεται ως ένα πολύ κακό υλικό για διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών

1.2 Φάσεις και πορεία του ερπυσμού έως την αστοχία

Ο ερπυσμός εμφανίζει κατά την εκδήλωση του διάφορες φάσεις. Η Εικόνα 1.1 δείχνει τις τρεις διαφορετικές φάσεις ερπυσμού ενός μεταλλικού υλικού, με την πάροδο του χρόνου. Αυτές οι φάσεις είναι κατά σειρά οι παρακάτω: [2],[3],[4],[5]

- 1) Φάση πρωτογενούς ερπυσμού (EP). Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται συνεχής μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης του υλικού (ταχύτητα ερπυσμού, $c=de/dt$), με τον χρόνο και αποδίδεται σε ενεργοποίηση μηχανισμών σκλήρυνσης του υλικού. Εδώ το υλικό στην ουσία υποβοηθείται από την

αρχική ελαστική παραμόρφωση (Εικόνα 1.1), που έχει την ιδιότητα να μπορεί να αποφάει κάποιες αρχικές τάσεις και συνεπώς το υλικό να “νιώθει” ότι δέχεται μικρότερη τάση από ότι δέχεται στην πραγματικότητα.

- 2) Φάση δευτερογενούς ερπυσμού (PS), που ο ρυθμός παραμόρφωσης παραμένει σταθερός. Σε αυτό το στάδιο η ταχύτητα ερπυσμού είναι γραμμική με τον χρόνο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα (Εικόνα 1.1) και ενεργοποιούνται μηχανισμοί ενδοτράχυνσης και διάχυσης ατόμων. Αυτό το στάδιο έχει την μεγαλύτερη διάρκεια στη ζωή ενός υλικού και η ταχύτητα ερπυσμού δίνεται από την σχέση

$$3) \quad c = \frac{de}{dt} = C * e^{\left(\frac{E_d}{R*T}\right)} \quad 1.1$$

Όπου :

C: η σταθερά που ποικίλει με βάση την επιλογή υλικού

R: η σταθερά των αερίων (8,31 J/(mol*K))

E_d: η ενέργεια ενεργοποίησης ερπυσμού του υλικού σε J/mol

$$C = \frac{A*S}{d^2} \quad , \quad 1.2$$

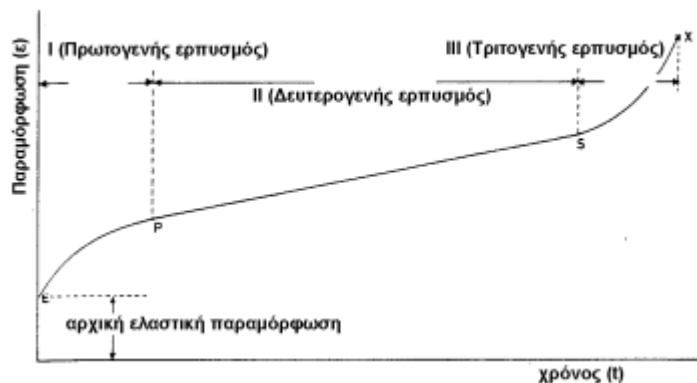
όπου A: η σταθερά του υλικού ,

S : η αύξηση μεγέθους των κόκκων,

d: η μέση διάμετρος του κρυσταλλικού κόκκου.

Όπως φαίνεται λοιπόν η δευτερογενής φάση του ερπυσμού εξαρτάται κατά πολύ από την δομή του κάθε υλικού και περιλαμβάνει μεθόδους με βάση δημιουργία νέων πιο συμπαγών δομών υλικών με μικρότερο s, και μεγαλύτερο d, ώστε να υπάρχει μικρή ταχύτητα ερπυσμού βάση της σχέση 1.2. Αυτό θα φανεί και στο κεφάλαιο 1.2 στους τρόπους για αποφυγή φαινομένων ερπυσμού. Ο σκοπός των επιστημόνων πλέον είναι η εύρεση νέων μεθόδων ανάμιξης υλικών ώστε να κάνουν όλο και πιο συμπαγή τα υλικά με τις ιδιότητες που περιγράφηκαν. Επιπρόσθετα με αυτό αναζητούν τρόπου για μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης του ερπυσμού.

- 4) Φάση τριτογενούς ερπυσμού που χαρακτηρίζεται από αυξανόμενο ρυθμό παραμόρφωσης έως και την τελική θραύση του υλικού.



Εικόνα 2 Διαφορετικές φάσεις ερπυσμού, συνάρτηση της παραμόρφωσης και του χρόνου για επιβολή στατικής τάσης και θερμοκρασίας

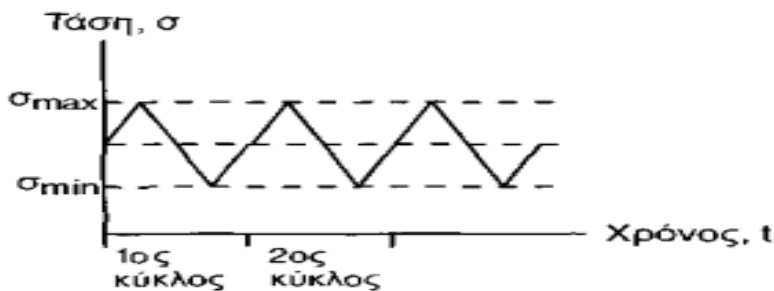
Εικόνα 1.1 : Διαφορετικές φάσεις ερπυσμού, συνάρτηση της παραμόρφωσης και του χρόνου για επιβολή στατικής τάσης και θερμοκρασίας [6]

Ανάλογα τον τύπο υλικού κάποια υλικά με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες μπορούν να παρουσιάζουν σε πολύ άμεσο χρόνο τριτογενή ερπυσμό και να έρχεται ταχύτατα η αστοχία. Σημαντικό ρόλο σε αυτό χωρίς να υπολογίζουμε τις ιδιότητες του κάθε υλικού, αλλά έχοντας σαν δεδομένο ένα συγκεκριμένο υλικό, παίζει :[7]

- 1) Η αρχική ελαστική παραμόρφωση του υλικού. Η παραμόρφωση αυτή πρέπει να μην είναι αρκετά μεγάλη, κάτι που αν ισχύει δηλώνει ότι ένα υλικό έχει καταπονηθεί και στο παρελθόν. Παρόλα αυτά η ελαστική παραμόρφωση του υλικού δεν εμπεριέχει μέσα τις εναπομένουσες τάσεις που έχουν δημιουργήσει μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, συνεπώς δεν είναι κύρια πηγή αστοχίας.
- 2) Ο ρυθμός της τάσης και η τιμή της παίζει πολύ μεγάλο ρόλο. Συγκεκριμένα περιοδικές τάσεις (Εικόνα 1.2) με μέγιστο και ελάχιστο πλάτος τάσης μπορούν να είναι λιγότερο επίπονες για την αντοχή του υλικού σε σχέση με τάσεις οι οποίες έχουν απότομες αυξομειώσεις. Αυτό συνδέεται με τις εναπομένουσες τάσεις που σχολιάστηκαν παραπάνω. Οι περισσότερες μηχανολογικές μηχανές που αναπτύσσουν μεγάλες δυνάμεις έχουν περιοδικό χαρακτήρα, ώστε να προφυλαχτεί ακριβώς αυτό το φαινόμενο. Όταν ένα υλικό παραμορφώνεται ελαστικά και έπειτα η δύναμη που εφαρμόστηκε μηδενίζεται αυτό το υλικό μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση χωρίς να αποκτήσει εναπομένουσες τάσεις, ενώ όταν η τάση δεν είναι περιοδική μπορεί να δημιουργήσει πιο εύκολα φαινόμενα ερπυσμού και

περισσότερες εναπομένουσες τάσεις στο υλικό (πιθανή εμφάνιση μικρορηγματώσεων). Στην περίπτωση που οι μη περιοδικές δυνάμεις εφαρμόζονται για μεγάλο διάστημα τότε το υλικό μπορεί να υποστεί ακόμα και αστοχία.

- 3) Η γεωμετρία του υλικού και το σημείο που εφαρμόζεται η δύναμη παίζει μεγάλο ρόλο για την ανάπτυξη ερπυσμού. Υλικά που είναι συμμετρικά και δέχονται τάσεις έχουν την δυνατότητα να κατανέμουν την τάση αυτή σε όλο το υλικό και να μην δημιουργούν συγκεντρώσεις τάσεων στο σημείο που επιβάλλεται η φόρτιση. Αυτό του δίνει μεγαλύτερο χρόνο ζωής και μειώνει την πιθανότητα αστοχίας στο υλικό λόγω των υψηλών τάσεων που δέχεται, σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία.



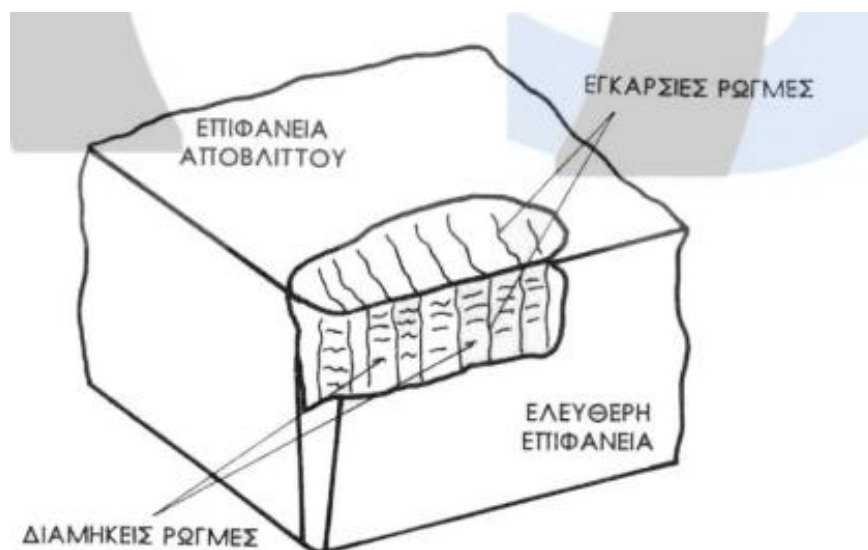
Εικόνα 2.2 Περιοδική τάση που εφαρμόζεται σε θεωρητική βάση, ώστε να προφυλάσσονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και να αποφεύγονται τα φαινόμενα ερπυσμού

εικόνα 2 : Περιοδική τάση που εφαρμόζεται σε θεωρητική βάση, ώστε να προφυλάσσονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και να αποφεύγονται τα φαινόμενα ερπυσμού.

1.3 Παραδείγματα δημιουργίας Ερπυσμού- Τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου με χρησιμοποίηση υλικών που αντέχουν στον ερπυσμό και στην μηχανική καταπόνηση

Για παράδειγμα σε έναν τόρνο που χρησιμοποιεί ένας μηχανολόγος σε ένα εργαστήριο, το υλικό από το οποίο αποτελείται ο τόρνος πρέπει να τηρεί κάποιες συγκεκριμένες μηχανικές και χημικές προδιαγραφές, έτσι ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω υπάρχουν κάποια υλικά που

έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και μπορεί να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα λόγω υψηλών τάσεων και υψηλών θερμοκρασιών. Αν τα υλικά αυτά δεν τηρούν αυτές τις προδιαγραφές τότε το κοπτικό εργαλείο θα υποστεί φθορά με αποτέλεσμα μερική αστοχία του κοπτικού εργαλείου ή ακόμα και ολική αστοχία του κοπτικού εργαλείου. Στην Εικόνα 1.2 φαίνεται η μερική αστοχία ενός κοπτικού εργαλείου το οποίο υπέστη ρωγμές λόγω των υψηλών τάσεων. [9],[10]



Εικόνα 3 Απώλεια μηχανικών ιδιοτήτων και εγκάρσιες ρωγμές στην ελεύθερη επιφάνεια κοπτικού εργαλείου, που έχει υποστεί μεταξύ άλλων και το φαινόμενο του ερπυσμού[11]

Εικόνα 1.2 : Απώλεια μηχανικών ιδιοτήτων και εγκάρσιες ρωγμές στην ελεύθερη επιφάνεια κοπτικού εργαλείου, που έχει υποστεί μεταξύ άλλων και το φαινόμενο του ερπυσμού. [11]

Μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες που πρέπει να έχουν συνεπώς τα υλικά που συμμετέχουν σε λειτουργίες υψηλών θερμοκρασιών είναι η μηχανική τους αντοχή. Ένα από τα συχνά προβλήματα όταν το υλικό δεν τηρεί αυτή την προδιαγραφή για μία συγκεκριμένη διεκπεραίωση εργασίας σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία τότε λέμε ότι επέρχεται αστοχία του υλικού και η αντοχή του υλικού δεν είναι επαρκής για αυτή της διεργασίας. Μία από τις πιο σημαντικές συνέπειες της αστοχίας του υλικού είναι τα έντονα φαινόμενα ερπυσμού που όπως θα φανεί παρακάτω προκαλεί σημαντικά μηχανικά προβλήματα στα υλικά και χαλάει κατά πολύ τις αρχικές τους ιδιότητες. Τέτοια υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα πολυμερή υλικά που

έχουν μία απόδοση μηχανικής αντοχής για μεγάλο χρονικό διάστημα σε διαρκής καταπονήσεις δυνάμεων.[11]

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο οργανισμό έρευνας για τα προηγμένα υλικά υπάρχουν μέθοδοι δημιουργίας υλικών και παραγωγής νέων υλικών με τα οποία γίνεται πιο ισχυρή η μηχανική αντοχή τους. Συγκεκριμένα αυτές οι μέθοδοι είναι [2]

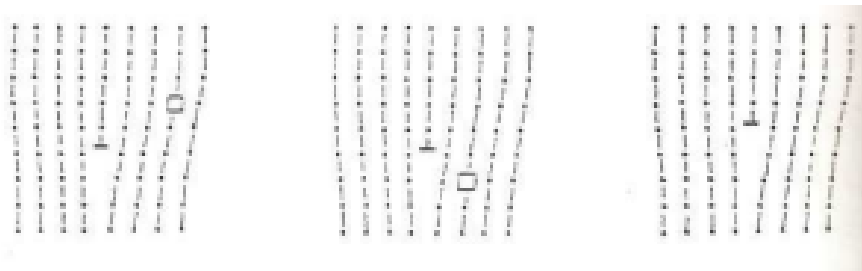
- 1) Η μείωση της επίδρασης των ορίων των κόκκων. Αυτό υποδηλώνει τις ατέλειες που μπορεί να έχει ένα υλικό στα άκρα της μοριακής του δομής και μπορεί από εκείνο το σημείο να ξεκινήσει να δημιουργείται μια εναπομείνασα τάση στο υλικό και να δημιουργήσει φαινόμενα ερπυσμού, γρηγορότερα από τι θα ήταν υπολογισμένο.
- 2) Η Χρησιμοποίηση μονοκρυσταλλικών υλικών με μεγάλους κόκκους. Αυτή η τακτική βοηθάει τα υλικά να έχουν μία πιο συμπαγή δομή και κατά συνέπεια οι δυνάμεις που δέχονται δεν μπορούν να τους δημιουργήσουν προβλήματα στη μορφή τους, παρά μόνο αν ξεπεραστούν κάποιες πολύ υψηλές θερμοκρασίας και το υλικό χάσει τις μηχανικές του ιδιότητες.
- 3) Η προσθήκη στερεών δεσμών κόκκων για την πλήρωση των κενών θέσεων και την ενδυνάμωση της μηχανικής αντοχής.
- 4) Η χρησιμοποίηση υλικών με υψηλή θερμοκρασία τήξης
- 5) Συμβουλευτική για τα υλικά από δεδομένα δοκιμών ερπυσμού, που γίνονται από επιστήμονες των υλικών, κατά τη διάρκεια επιλογής των υλικών για ένα συγκεκριμένο μηχάνημα.
- 6) Ρύθμιση κατάλληλων διαστημάτων συντήρησης της μηχανής ανάλογα με την τυποποιημένη διάρκεια ζωής και υπολογισμός της φθοράς που έχει επέλθει, ώστε να μην υπάρξει αστοχία πριν από την διάρκεια ζωής που έχει υπολογιστεί σε πειραματικό στάδιο.

1.4 Μηχανισμοί που εμφανίζονται κατά τον ερπυσμό[12],[13],[14]

Μέταλλα

Στα μέταλλα συναντάμε τον μηχανισμό με *ερπυσμό εξαρμώσεων* όπου υπάρχουν δύο στάδια . Το πρώτο στάδιο παρουσιάζει ερπυσμό με ολίσθηση εξαρμώσεων και το δεύτερο στάδιο παρουσιάζει ερπυσμό με ολίσθηση και αναρρίχηση εξαρμώσεων. Αυτού του είδους μηχανισμός παρουσιάζει κατά κύριο λόγο τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται τα μέταλλα όταν βρίσκονται σε συνθήκες ερπυσμού. Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω της μετακίνησης των εξαρμώσεων δημιουργείται η πλαστική παραμόρφωση των μετάλλων.

Όσον αφορά την υλοποίηση της μετακίνησης της εξάρμωσης (με ολίσθηση) στο επιθυμητό επίπεδο ολίσθησης, είναι απαραίτητο η ώθηση της τάσης διάτμησης να είναι τέτοια ώστε να υπερέχει της αντίστασης που εμφανίζει ένα κρυσταλλικό πλέγμα, αλλά και των άλλων εμποδίων (π.χ. διαφορετικές εξαρμώσεις, σωματίδια καθίζησης και διασποράς) που μπορεί να συναντήσει. Εάν μια εξάρμωση δεν έχει την απαιτούμενη τάση και συναντήσει κάποιο από τα παραπάνω εμπόδια κατά τη διάρκεια της μετακίνησής της, τότε σταματάει να κινείται με αποτέλεσμα να σταματά επίσης και η πλαστική παραμόρφωση.

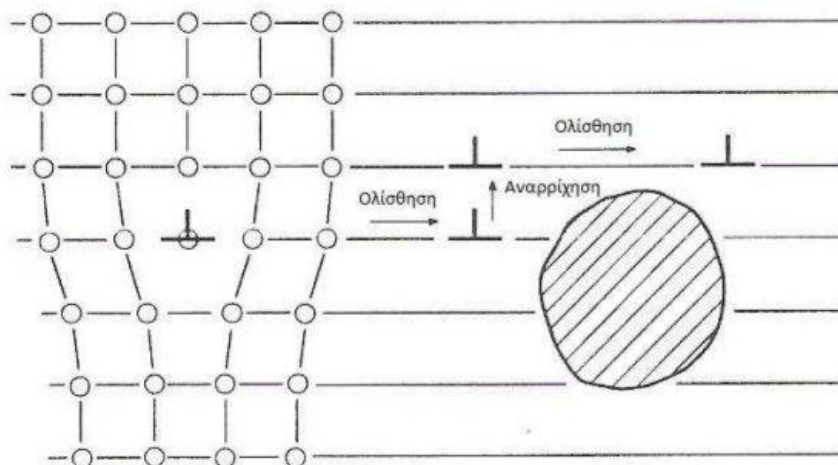


Εικόνα 4 Αναρρίχηση της ατέλειας σε άλλο επίπεδο ολίσθησης με διάχυση των ατόμων

Εικόνα 1.3: Αναρρίχηση της ατέλειας σε άλλο επίπεδο ολίσθησης με διάχυση των ατόμων.

Όμως για να επιτευχθεί η ολίσθηση της εξάρμωσης η οποία βρίσκεται σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση του πρώτου επιπέδου ολίσθησης θα χρειαστεί η συμμετοχή της διάχυσης. Έτσι η μεταφορά των ατόμων της

εξάρμωσης γίνεται με τη βοήθεια της διάχυσης. Όταν βρεθεί κάποιο εμπόδιο, τότε η εξάρμωση αναρριχείται για να το αποφύγει σε ένα καινούριο επίπεδο ολίσθησης. Φυσικά δεν μπορεί να υπάρξει μόνο ένα εμπόδιο, έτσι συνεχίζεται η μετακίνηση της εξάρμωσης και με τον ίδιο τρόπο αποφεύγει και τα υπόλοιπα εμπόδια.



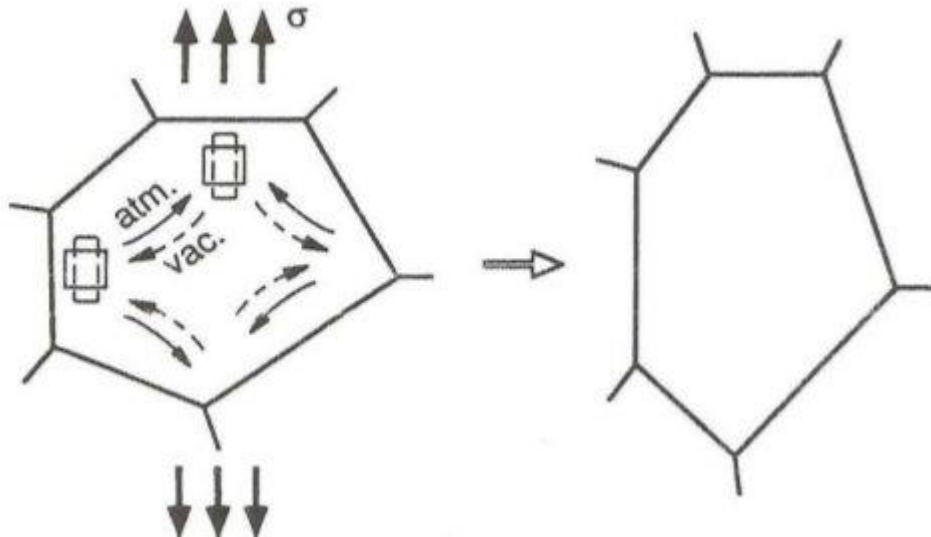
Εικόνα 5 Ερπυσμός με ολίσθηση και αναρρίχηση των εξαρμώσεων

Εικόνα 1.4: Ερπυσμός με ολίσθηση και αναρρίχηση των εξαρμώσεων.

Κεραμικά υλικά

Στην κατηγορία των κεραμικών υλικών συναντάμε τον *ερπυσμό διάχυσης*. Ο ερπυσμός διάχυσης εμφανίζεται στα κεραμικά υλικά γιατί η ολίσθηση των εξαρμώσεων έχει μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας σε σύγκριση με τα μέταλλα.

Κατά τη διάρκεια του ερπυσμού διάχυσης παρουσιάζονται σημαντικές αλλαγές ως προς το σχήμα των κρυσταλλικών κόκκων. Εξαιτίας αυτών των αλλαγών δημιουργούνται εσωτερικά κενά και μικρορωγμές ανάμεσα στους κρυσταλλικούς κόκκους. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου χρειάζεται μια επιπλέον μεταφορά μάζας του υλικού στους κόκκους. Έτσι η κάλυψη των κενών πραγματοποιείται μέσω της ολίσθησης των ορίων των κόκκων.



Εικόνα 6 Αλλαγή σχήματος κόκκων εξαιτίας της διάχυσης ατόμων-κενών θέσεων σε αντίθετες κατευθύνσεις

Εικόνα 1.5: Αλλαγή σχήματος κόκκων εξαιτίας της διάχυσης ατόμων-κενών θέσεων σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Για να μη δημιουργούνται αυτά τα κενά μεταξύ των κόκκων θα πρέπει η ταχύτητα ερπυσμού διάχυσης να ισούται με τη ταχύτητα ερπυσμού ολίσθησης των κόκκων.

Θερμοπλαστικά υλικά

Ένα θερμοπλαστικό υλικό συνήθως είναι ένα πολυμερές το οποίο δεν είναι δύσκαμπτο ή δυνατό όπως τα μέταλλα και οι ιδιότητες που έχουν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες πολυμερή υλικών: α) ψαθυρά, β) πλαστικά, γ) ελαστικά.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που διαθέτουν είναι πως μπορούν να πάρουν εύκολα διάφορα σχήματα και συνήθως έχουν χαμηλό κόστος. Βέβαια όπως όλα τα υλικά έτσι και τα πολυμερή διαθέτουν και κάποια μειονεκτήματα όπως για παράδειγμα ότι είναι πολύ πιο εύθραυστα σε σύγκριση με τα μέταλλα και τα κεραμικά.

Μέσω του πολυμερισμού ο οποίος διαχωρίζεται σε α) προσθήκης και β) συμπύκνωσης, επιτυγχάνεται η σύνθεση πολυμερών μεγάλου μοριακού βάρους. Οι ιδιότητες λοιπόν ενός πολυμερή υλικού μπορούν να τροποποιηθούν.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι τα πλαστικά, των οποίων η κατεργασία πραγματοποιείται συνήθως με πλαστική παραμόρφωση με τη χρήση υψηλών θερμοκρασιών. Σε αυτή τη παραμόρφωση συμβάλλουν η επαναδιάταξη των μακρομορίων και η διολίσθηση των μακρομορίων.

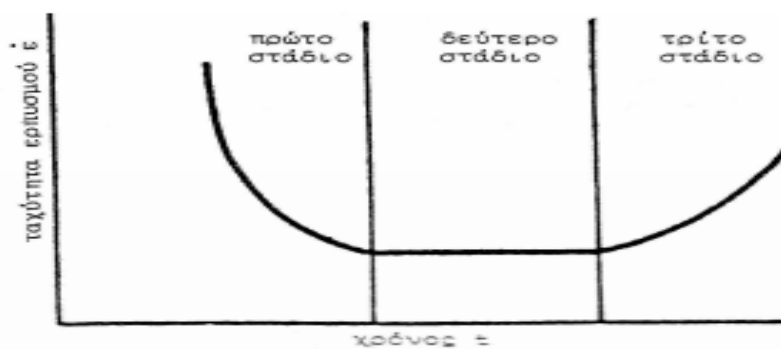
Υλικό	Θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (°C)	Θερμοκρασία τήξης (°C)
Πολυαιθυλένιο (υψηλής πυκνότητας)	-110	115
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο	-97	327
Πολυαιθυλένιο (υψηλής πυκνότητας)	-90	137
Πολυπροπυλένιο	-18	175
Nylon 6.6	57	165
Πολυεστέρας (PET)	69	265
Πολυβινυλοχλωρίδιο	87	212
Πολυστυρένιο	100	240
Πολυκαρβονικός εστέρας	150	265

Εικόνα 7 Θερμοκρασίες τήξης και υαλώδους μετάβασης ορισμένων πολυμερών υλικών[WilliamD.Callister, JR]

1.5 Καμπύλη ερπυσμού και από τι εξαρτάται η κάθε αυξομείωση στη καμπύλη

Θεωρητικά η καμπύλη που προκύπτει για την ταχύτητα ερπυσμού χωρίς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (τιμές $\dot{\epsilon}$) φαίνεται στην Εικόνα 1.4.1 . Όπως βλέπουμε στο πρώτο στάδιο η ταχύτητα ερπυσμού ξεκινάει από μία πολύ υψηλή ταχύτητα αλλά στην συνέχεια πέφτει. Αυτό συμβαίνει διότι επιδρούν διάφοροι μηχανισμοί αυτό-συγκράτησης των ατόμων μέσα στο υλικό που βοηθάει στην αντοχή του υλικού και η δύναμη αυτών των μηχανισμών ποικίλλει, με βάση τον τύπο του υλικού. Οι

μηχανισμοί αυτοί εξαρτώνται από πρωταρχικές γνώσεις πάνω στην τεχνολογία υλικών που έχουν να κάνουν με την μικρομοριακή δομή του κάθε υλικού. Στο δεύτερο στάδιο του ερπυσμού φαίνεται η ταχύτητα να παραμένει σταθερή. Στο δεύτερο στάδιο του ερπυσμού όπως περιγράφηκε και παραπάνω εμφανίζονται μηχανισμοί αυτοδιάχυσης ατόμων που βρίσκονται μέσα στην ίδια κρυσταλλική δομή, που τείνουν να συμπληρώσουν τις κενές θέσεις και να δυναμώσουν και πάλι την χωροκεντρωμένη δομή του μετάλλου ή του υλικού. Αυτό βοηθάει στην διατήρηση της σκληρότητας του υλικού και κατά συνέπεια η ταχύτητα του ερπυσμού παραμένει σταθερή στο δεύτερο στάδιο. Φτάνοντας στο τρίτο στάδιο ερπυσμού βλέπουμε ότι η ταχύτητα αυξάνεται με τον χρόνο, κάτι το οποίο είναι αρνητικό για το μέταλλο. Η αύξηση της ταχύτητας συμβαίνει λόγω της επέκτασης των ατελειών σε όλη την χωροκεντρωμένη δομή, όπου είχε ξεκινήσει η ατέλεια και πλέον η μηχανισμοί αυτοσυγκράτησης και αυτο-πλήρωσης που είχαμε στα δύο πρώτα στάδια δεν ενεργοποιούνται πλέον. Στο στάδιο αυτό φαίνεται καθαρά από το μικροσκόπιο και οι ατέλειες που υπάρχουν στα όρια των κόκκων στην κυψελίδα που ξεκίνησε η ατέλεια. Όταν το υλικό φτάνει λοιπόν σε αυτό το στάδιο, έχει περάσει από υψηλές καταπονήσεις σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν του έχει μείνει μεγάλο διάστημα ζωής, καθώς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να επέλθει και σε ολική αστοχία και θραύση στο σημείο που υπάρχουν οι περισσότερες εναπομένουσες τάσεις.

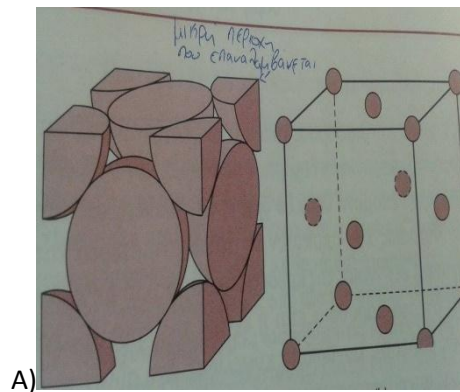


Εικόνα 8 Καμπύλη ταχύτητας ερπυσμού για τους τύπους μετάλλων(χωρίς ποιοτικά χαρακτηριστικά)[15]

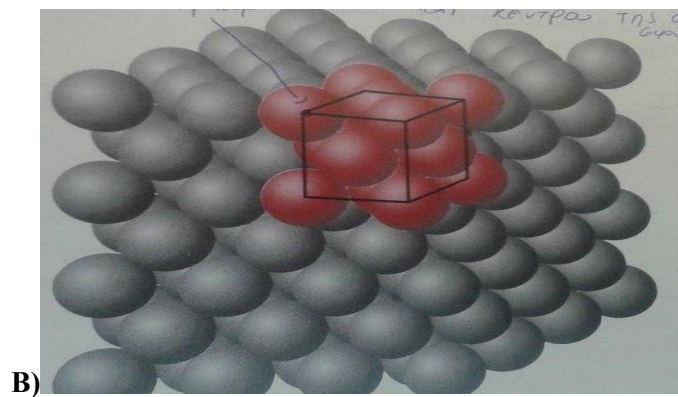
Συγκεκριμένα εξαρτώνται σε θεωρητικό επίπεδο από : [16]

Την κρυσταλλική δομή του κάθε υλικού. Για παράδειγμα υπάρχουν κάποια ήδη δομών που αποτελούνται από την χωροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή (body-centered cubic.) (Εικόνα 1.4.2α) , την ενδροκεντρωμένη κυβική

κρυσταλλική δομή (Face-centered cubic), την δομή μέγιστης εξαγωνικής πυκνότητας (Hexagonal close-packed , HPC) .



Εικόνα 9 α) Κρυσταλλική δομή FCC, κυβική εδροκεντρωμένη δομή, β) Παρουσίαση της FCC, μέσα σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα[16]



1.6 Έλεγχος της συμπεριφοράς των υλικών σε πείραμα ερπυσμού

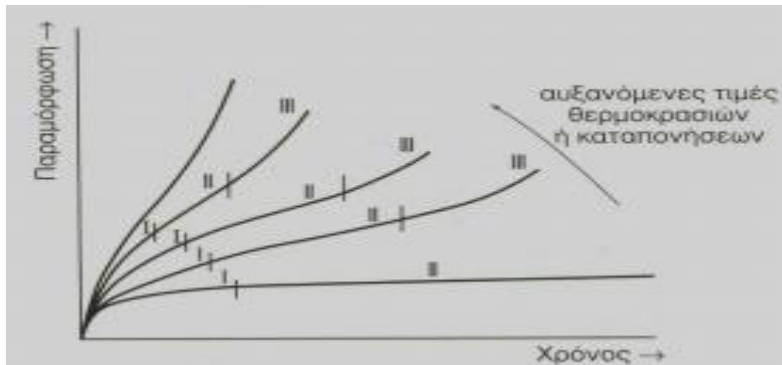
Για να ελεγχθεί η συμπεριφορά των υλικών κατά την διαδικασία χρήσης μίας μηχανής, σε μία λειτουργία, αρχικά γίνεται ένα πείραμα, ώστε να φανεί η τάση που μπορεί να λάβει ένα υλικό. Σε αυτό το σημείο θα περιγραφεί πως γίνονται αυτά τα πειράματα ελέγχου της συμπεριφοράς των υλικών, όπως του αλουμινίου που περιγράφηκε παραπάνω (Εικόνα 1.3.7). Ο έλεγχος συμπεριφοράς γίνεται στην ουσία για να

- 1) Μετρηθούν οι τάσεις που δέχεται το υλικό κάτω από της οποίες το υλικό θα αρχίσει να εμφανίζει προβλήματα ερπυσμού. Σε αυτά τα προβλήματα περιλαμβάνονται :
- Το όριο διαρροής. Το όριο διαρροής ή αλλιώς τάση διαρροής είναι η ελάχιστη τιμή στην οποία προκαλείται πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο. Σε μερικά μεταλλικά υλικά όπως για παράδειγμα το αλουμίνιο είναι δύσκολο να ευρεθεί από την καμπύλη σ - ϵ και ορίζεται ως η τάση, η οποία αποδίδει 0,2 πλαστική παραμόρφωση. Πριν από αυτό το όριο δεν παρατηρείται καμία πλαστική παραμόρφωση και όλες οι παραμορφώσεις ακυρώνονται (το δοκίμιο επέρχεται στην αρχική κατάσταση) μετά από την αποφόρτιση.
 - Το όριο θραύσης. Αυτό το όριο είναι μεγαλύτερο από το όριο διαρροής και είναι το τελευταίο σημείο στην καμπύλη τάση- παραμόρφωσης ενός υλικού και αντιστοιχεί στην τάση στην οποία αστοχεί το υλικό
 - Όρια απαρχής ερπυσμού και οι μηχανισμοί αυτού όπως περιγράφηκαν παραπάνω με σκοπό την αποφυγή φαινομένων ερπυσμού κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Τα όρια αυτά βρίσκονται στον στο στάδιο του πρωτογενή ερπυσμού και παρατηρούνται καθώς το φαινόμενο που επικρατεί είναι η διάχυση των ατόμων που βρίσκονται στα όρια των κόκκων.
 - Ο χρόνος ζωής ενός δοκιμίου αφότου περάσει από τα τρία στάδια του ερπυσμού (πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή ερπυσμό) μέχρις ότου φτάσει στο τελικό σημείο αστοχίας λόγω ερπυσμού όπως στην Εικόνα 1.5.1.1 που φαίνεται παρακάτω για το πτερύγιο στροβιλοκινητήρα που έχει αστοχήσει λόγω ερπυσμού.

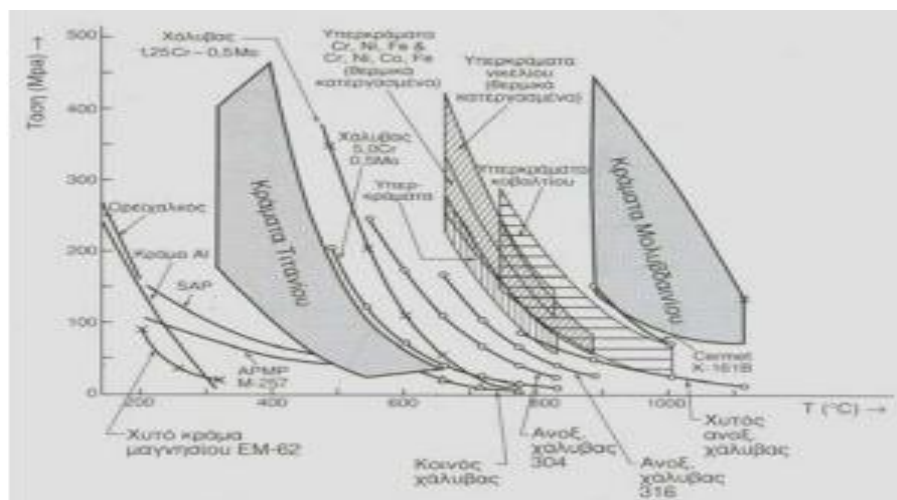


Εικόνα 10 Πτερύγιο στροβιλοκινητήρα που έχει επέλθει σε αστοχία λόγω των φαινομένων του ερπυσμού

2) Η εξαγωγή του διαγράμματος παραμόρφωσης με τον χρόνο για διάφορα υλικά είναι επίσης ένα από τα στοιχεία που εξάγονται από τα πειράματα ερπυσμού όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5.1.2 και κατά συνέπεια η τελική εξαγωγή του γενικού διαγράμματος που προκύπτει για διάφορα υλικά που φαίνονται στην Εικόνα 1.5.1.3



Εικόνα 11 Διάγραμμα παραμόρφωσης χρόνου για αυξανόμενες τιμές θερμοκρασιών ή καταπονήσεων

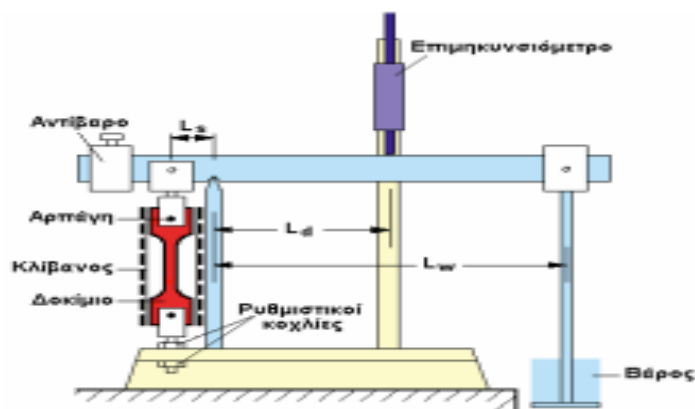


Εικόνα 12 Διάγραμμα τάσης θραύσεως θερμοκρασίας για διάφορα μέταλλα και κράματα μετάλλων σε διάφορες θερμοκρασίες μετά από δοκιμή 1000 ωρών σε διάφορες θερμοκρασίες. πηγή: Δρ. Π. Ψυλλάκη, [Αστοχία Υλικών και Κριτήρια Επιλογής]

Για να γίνει αυτός ο έλεγχος αντοχής σε ερπυσμό ενός απλού δοκιμίου χρησιμοποιείται μία πειραματική διάταξη η οποία φαίνεται στην Εικόνα 12 Αυτή η διάταξη αποτελείται από κάποια επιμέρους στοιχεία.

Συγκεκριμένα το δοκίμιο βρίσκεται μέσα σε έναν κλίβανο και είναι πιασμένο με δύο αρπαγές, ώστε να διατηρείται σταθερό. Σε κάποιες διατάξεις ο κλίβανος αυτός παίζει τον ρόλο φούρνου που θερμαίνει το δοκίμιο παράλληλα με την μηχανική του καταπόνηση από βαρίδιο που βρίσκεται δεξιά της διάταξης αυτής. Υπάρχει επίσης ένα επιμηκυσιόμετρο που μετράει τις επιμηκύνσεις που γίνονται στο δοκίμιο κατά την διάρκεια της φόρτισης. Το αντίβαρο παίζει τον ρόλο του ισορροπιστή, ώστε η

μηχανική καταπόνηση να είναι σταθερή και να μην έχει αυξομειώσεις που θα δώσουν λάθος πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 13 Πειραματική διάταξη ελέγχου ερπυσμού τυπικών δοκιμών

Ύστερα από την Ανάλυση του πρώτου κεφαλαίου που παρουσιάστηκε το φαινόμενο του ερπυσμού και η ατέλειες ή αστοχίες που μπορεί να προκύψουν σε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο είναι αναγκαίο να γίνει η ανάλυση των υλικών που πληρούν κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές, με τις οποίες, αλλά μπορεί να είναι πιο σκληρά, άλλα πιο ελαστικά, άλλα να είναι ψαθυρά και γενικά να έχουν διάφορες διαφορετικές μεταξύ τους, των οποίων οι ιδιότητες του κατατάσσουν σε ένα συγκεκριμένο είδος υλικών.

Στην συνέχεια θα αναλυθούν με τη σειρά κάποια συγκεκριμένα υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες και θα προκύψουν κάποια συμπεράσματα με βάση τις θετικές και τις αρνητικές ιδιότητες του καθενός. Έπειτα θα γίνει σύγκριση μεταξύ των υλικών και θα προταθούν λύσεις για μηχανές και άλλες εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας, βάση των ιδιοτήτων που ταιριάζει σε κάθε υλικό .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Ξεκινώντας την ενασχόληση μας με τα υλικά, τα πρώτα υλικά που πρόκειται να ασχοληθούμε είναι τα κεραμικά υλικά. Ο ορισμός για τα κεραμικά αφορά ένα ανόργανο μη μεταλλικό υλικό, το οποίο έχει υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες ($> 1000^{\circ}\text{C}$) είτε κατά το στάδιο της επεξεργασίας του είτε κατά του στάδιο της εφαρμογής του.

Κεραμικά(ceramics)

Ανόργανα μη μεταλλικά υλικά

❖ Παραδοσιακά κεραμικά

Βασική πρώτη ύλη: Πηλός με αργιλοπυριτική σύσταση(Al_2O_3, SiO_2)

Πορσελάνες, τούβλα, κεραμίδια, είδη αγγειοπλαστικής

- Πυρίμαχα κεραμικά
- Γυαλί
- Τσιμέντο

❖ Νεώτερα κεραμικά

Οξειδία: Al_2O_3 (Aloumina), SiO_2 (Silica)

Καρβίδια: SiC (Silicon carbide)

Νιτρίδια: AlN (aluminum nitride)

Ιοντικοί κρύσταλλοι (NaCl)

❖ Μηχανολογικά κεραμικά (Engineering Ceramics)

Κεραμικά κοπτικά υλικά, εξαρτήματα κινητήρων, κεραμικά φρένα

❖ Ηλεκτρονικά κεραμικά(Electronics ceramics)

Πιεζοηλεκτρικά κεραμικά εξαρτήματα και αισθητήρες υπερήχων για τη μέτρηση ροής αερίου, θερμότητας και νερού

❖ Βιοκεραμικά (Bioceramics)

Βιοκεραμικά φίλτρα νερού

Κάποια από τα κύρια πλεονεκτήματα τους είναι

- 1) Η σχετικά χαμηλή τους πυκνότητα
- 2) Το υψηλό σημείο τήξης τους
- 3) Το υψηλό μέτρο ελαστικότητας τους
- 4) Η χαμηλή θερμική και ηλεκτρική τους αγωγιμότητα
- 5) Η καλή τους αντίσταση σε θλίψη
- 6) Η πολύ υψηλή τους σκληρότητα
- 7) Η πυρίμαχη, η αντιδιαβρωτική και η αντιτριβική τους συμπεριφορά.

Η λέξη κεραμικό προέρχεται από την ελληνική λέξη “Κέραμος”, η οποία σημαίνει καμένη γη. Οι πρώτοι άνθρωποι που ασχολήθηκαν με την κεραμική ανέμιζαν πηλό με λίγο νερό ύστερα από λιώσιμο του πηλού σε υψηλή θερμοκρασία και έπειτα αποξήρανση που γινόταν κάτω από τον ήλιο. Από το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, οι επιστήμονες και μηχανικοί είχαν συνθέσει πολλά νέα κεραμικά. Ένας πιο σύγχρονος ορισμός για τα κεραμικά είναι ένα υλικό που περιέχει ένα μεταλλικό και έναν μη-μεταλλικό στοιχείο. Τα κεραμικά στοιχεία χωρίζονταν ως κεραμικά οξειδία (ZrO_2 , Al_2O_3 , Y_2O_3 κλπ.) η μη-οξειδία κεραμικά όπως τα καρβίδια (SiC , ZrC κλπ.), νιτρίδια (Si_3N_4 , BN κλπ).

Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι ότι σχηματίζουν, λόγω της φύσης τους μεταξύ της ατομικής τους σύνδεσης ενώσεις ιονικές και ομοιοπολικές. Αυτές οι ιδιότητες είναι αντίθετες με αυτές ενός μετάλλου. Αυτό οδηγεί τα κεραμικά να έχουν ακριβώς αντίθετες ιδιότητα από τα μέταλλα. Τα μέταλλα είναι μη εύθραυστα (εμφάνιση ελαστικής συμπεριφορά και όλκιμα (εμφάνιση πλαστικής συμπεριφοράς). Αντίθετα τα κεραμικά είναι σκληρά και εύθραυστα.

Μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την βελτίωση των κεραμικών υλικών στην βιομηχανία, στην Αεροδιαστημική και σε στρατιωτικές εφαρμογές είναι η μέθοδος SPS (SparkplasmaSintering), η οποία δημιουργεί νανοδομημένα κεραμικά με

προσθήκη ανθρακικών καρβιδίων για την ενίσχυση της σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

2.2Βελτίωση της πλαστικής της αντοχής των Κεραμικών σε υψηλές θερμοκρασίες. [18]

Ο Mehdi ύστερα από φασματοσκοπία που έκανε σε κάποια τέτοια κεραμικά βρήκε κάποιες μικροδομές άνθρακα (CNT- Carbonnanotube) που εμφανίστηκαν στο φασματοσκόπιο ύστερα από το πείραμα. Με την παρατήρηση αυτών των μικροδομών συμπέρανε ότι τα κεραμικά αυτά έχουν πολύ υψηλή απόδοση ερπυσμού σε υψηλές θερμοκρασίες και συνεπώς πολύ υψηλή αντοχή σε μεγάλες τάσεις. Αυτό κατέληξε ότι μπορεί να βοηθήσει την χρήση τέτοιων υλικών σε μηχανές υψηλών καταπονήσεων όπως κοπτικά εργαλεία στα μηχανουργεία ή κινητήρες υψηλής θερμοκρασίας. [17α]

Ένα ακόμα θετικό που βρήκε ήταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του κεραμικού που δεκαπλασιαζόταν με την προσθήκη των μικροδομών νανοδομών άνθρακα (CNT – Carbonnanotube).

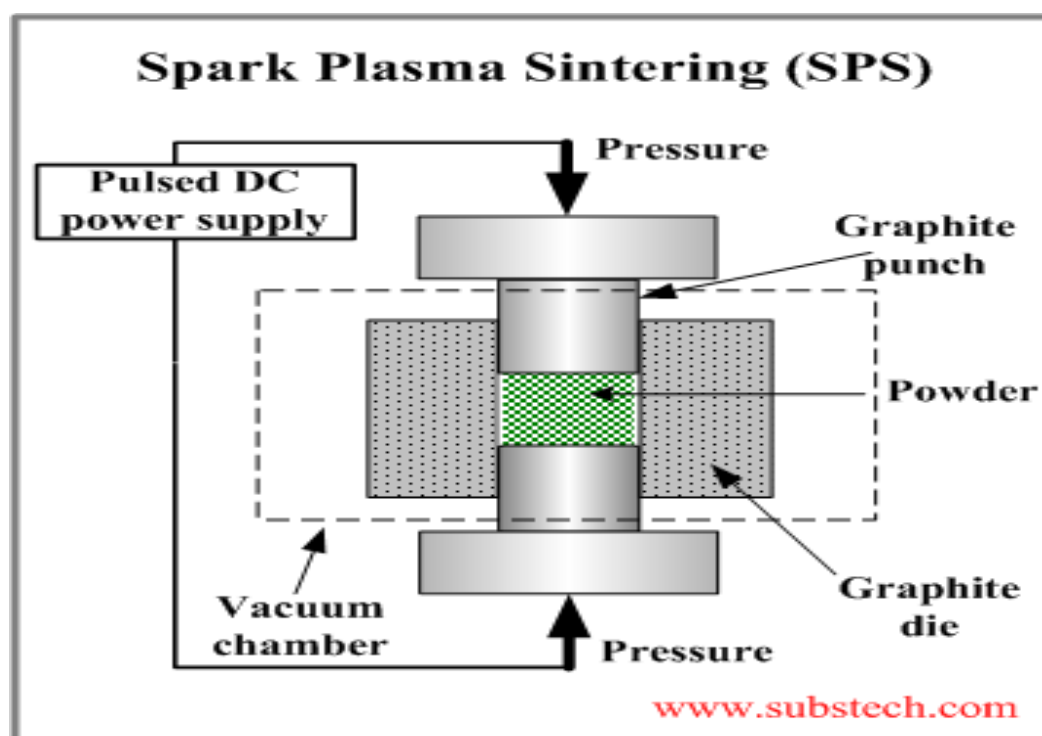
Μία ακόμα θετική συνεισφορά των CNT's στην συμπεριφορά των κεραμικών σε υψηλές θερμοκρασίας, ύστερα από μέτρηση του ισοθερμικού φάσματος κάποιων σύνθετων κεραμικών υλικών στους 1600K, ήταν ότι με μικρές προσθήκες CNT η απώλεια των μηχανικών ιδιοτήτων, που μπορεί να οδηγήσει το υλικό μακροσκοπικά (ύστερα από μεγάλο χρονικό διάστημα επιβολή τάσης) σε ερπυσμό, μειώνεται. Συνεπώς αυτή η προσθήκη κάνει το κεραμικό υλικό ακόμα πιο σκληρό και μεγαλώνει την αντοχή του στον ερπυσμό. Αυτή η δράση των CNT'sερμηνεύεται από τον επιστήμονα με τον λόγο ότι αυτά τα καρβίδια άνθρακα ενισχύουν την δύναμη αποκατάστασης των μηχανισμών ολίσθησης επιπέδων στα όρια των κόκκων με

αποτέλεσμα να μειώνεται το φαινόμενο αυτό που οδηγεί στον ερπυσμό, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 1.3.

Επίσης μετρήσεις επίσης σε σύνθετα κεραμικά που ενισχύθηκαν πάλι με CNT, ύστερα από μέτρηση διαφορετικών ιδιοτήτων, όπως η σκληρότητα, η σκληρότητα θραύσης και η μηχανική απώλεια σε υψηλή θερμοκρασία, κατέδειξαν τον κρίσιμο ρόλο των CNT's στις παραπάνω μηχανικές ιδιότητες. Η διαδικασία εμπλουτισμού των κεραμικών με αυτά τα καρβίδια γίνεται με πυροσυσσωμάτωση με σπινθήρες (SPS-Sparkplasma sintering).

Πυροσυσσωμάτωση κεραμικών υλικών είναι η διαδικασία κατά τη διάρκεια της οποίας τα συστατικά ενός κεραμικού (μίγμα από υλικά σε σκόνη), μετατρέπονται με τη βοήθεια της υψηλής θερμοκρασίας, σε ένα πολύ δυνατό και με μεγάλη πυκνότητα κεραμικό σώμα.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 14 κατά την διαδικασία SPS δίνεται ένα ηλεκτρικός παλμός από μία μηχανή ηλεκτρισμού που δημιουργεί σπινθήρες και δημιουργείται πίεση σε ένα μηχάνημα συμπίεσης κενού.



Εικόνα 14 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας πυροσυσσωμάτωσης sparkplasma με σπινθήρες

Το SPS (Εικόνα 14) αναφορικά συνδυάζει τη χρήση μηχανικής πίεσης και μικροσκοπικής ηλεκτρικής εκκένωσης μεταξύ των σωματιδίων, ώστε να φτάσουν τα σωματίδια αυτά σε ένωση και στην πλήρη συμπύκνωση μεταξύ του, που θα δώσει

στο υλικό πολύ μεγάλη σκληρότητα, για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς σε εκείνες της θερμοκρασίες το υλικό είναι ανάγκη να έχει υψηλή αντοχή, λόγω των φαινομένων τριτογενή ερπυσμού. Με την μέθοδο αυτή πετυχαίνουμε υλικά με μικρόκοκκη δομή μέσα στο κρυσταλλικά πλέγματα του υλικού και με αποτέλεσμα η διαδικασία ολίσθησης των ατόμων από την δομή του υλικού (Όριο ολίσθησης κόκκων) να δημιουργείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίας σε σχέση με την περίπτωση των συμβατικών κεραμικών με μεγαλύτερους κόκκους.

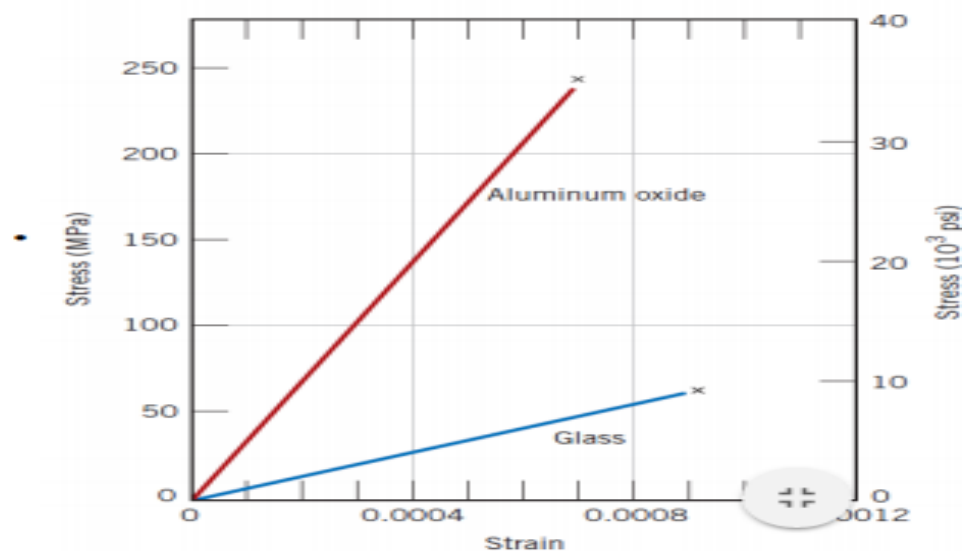
Η παραπάνω διαδικασία ολίσθησης των ατόμων του υλικού είναι ένας μηχανισμός ενεργοποίησης των μηχανισμών ολίσθησης το οποίο είναι σκόπιμο να ενεργοποιείται όσο το δυνατόν νωρίτερα , καθώς βοηθάει να μην αυξάνεται η ταχύτητα ερπυσμού τόσο γρήγορα και να αργεί η φάση τριτογενή ερπυσμού που είναι συνώνυμη με αύξηση της ταχύτητας ερπυσμού και των κακών μηχανικών ιδιοτήτων του κεραμικού. Αυτό συμβαίνει διότι με την ολίσθηση το υλικό διατηρεί την ελαστικότητα του και δεν παραμένουν εναπομένουσες τάσεις σε αυτό.

Παρόλα αυτά το κόστος αυτής της διαδικασίας είναι ιδιαίτερα υψηλό και υπάρχει ιδιαίτερη δυσκολία στην επίτευξη ομοιογενούς κατανομής των CNT's σε όλα τα κρυσταλλικά πλέγματα του υλικού.

Επίσης σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας βάση πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί φαίνεται ότι υπάρχει ασθενής διασυνδετική συγκόλληση μεταξύ των CNT και των κεραμικών κόκκων και συνεπώς τα πλεονεκτήματα των CNT's δεν λειτουργούν σε θερμοκρασίες υψηλής θερμοκρασίας, δηλαδή οι εφαρμογές που αναλύονται στην παρούσα πτυχιακή εργασία.

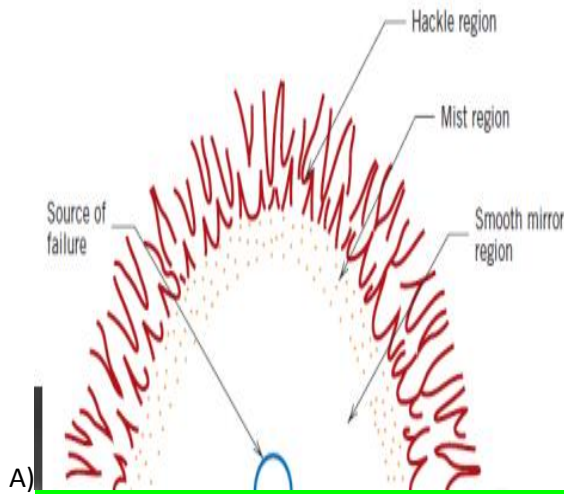
Ως εκ τούτου μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα για τα κεραμικά υλικά ότι για υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν χαμηλές αντοχές ερπυσμού ειδικά αν δεν έχουν αναμιχθεί με διαδικασίες όπως αυτή του SPS (SparkplasmaSintering) και κατά βάση επιλέγονται κάποια άλλα υλικά που θα αναλυθούν στην συνέχεια που είναι κυρίως πολυμερή υλικά, μεταλλικά υλικά τα οποία έχουν υψηλότερη αντοχή στον ερπυσμό λόγω του μεγάλου ποσοστού άνθρακα, αλλά και άλλων ιδιοτήτων που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Επίσης λόγω της δυσκολίας επίτευξης ομοιογενούς κατανομής των CNT σε όλο το μήκος του υλικού και στο μήκος όλων των κρυσταλλικών πλεγμάτων η διαδικασία και η χρήση των κεραμικών σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας κρίνεται ασύμφορη.

Επίσης ένα χαρακτηριστικό των κεραμικών είναι ότι στερούνται πλαστικής περιοχής και θραύονται με την επιβολή τυχαίου φορτίου. Για τον λόγο αυτό πρέπει να εξετάζεται η αρτιότητα τους μετά από κάθε χρήση ενός τέτοιου δοκιμίου, με σκοπό να ανιχνευθούν οι εναπομένουσες τάσεις που έχει ένα κεραμικό υλικό. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15 το γυαλί που συμπεριλαμβάνεται στην κατηγορία των κεραμικών έχει πολύ μικρότερη αντοχή σε θραύση σε σχέση με το οξείδιο του αλουμινίου. [18α]

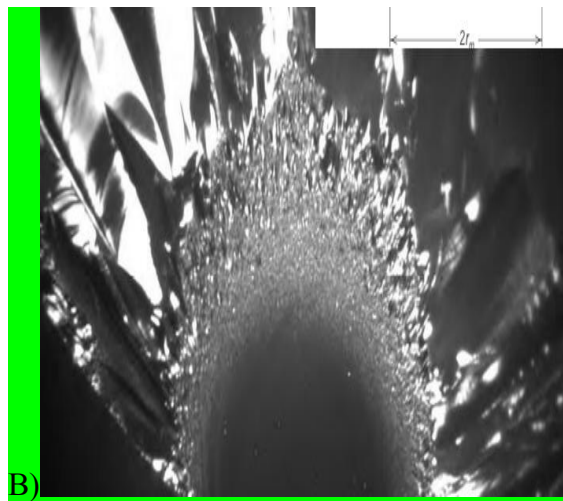


Εικόνα 15 Όρια θραύσης για διάφορες καταπονήσεις για τα υλικά του γυαλιού και του αλουμινίου. Πηγή: Δρ Μιχ' Άγγελος Μαρκόπουλος Λέκτορας ΕΜΠ, 'Κεραμικά Υλικά'

Η χαμηλή αντοχή σε θραύση αυτών των υλικών οφείλεται στο γεγονός ότι σχεδόν πάντα έχουν μικρορωγμές ή ακαθαρσίες που αποδίδονται σε διάφορες αιτίες, ενώ όπως φαίνεται στην Εικόνα 16 στην σχηματική αναπαράσταση της θραύσης ενός γυαλιού υπάρχει μία πηγή της αστοχίας που παρατηρείται στο μέσα τμήμα του γυαλιού.



Εικόνα 16 α) Σχηματική αναπαράσταση ψαθυρής θραύσης γυαλιού, β) Πραγματική αναπαράσταση θραύσης γυαλιού με μεγέθυνση στα 200μm, πηγή: Δρ. Μηχ. Άγγελος Μαρκόπουλος Λέκτορας ΕΜΠ, 'Κεραμικά Υλικά'



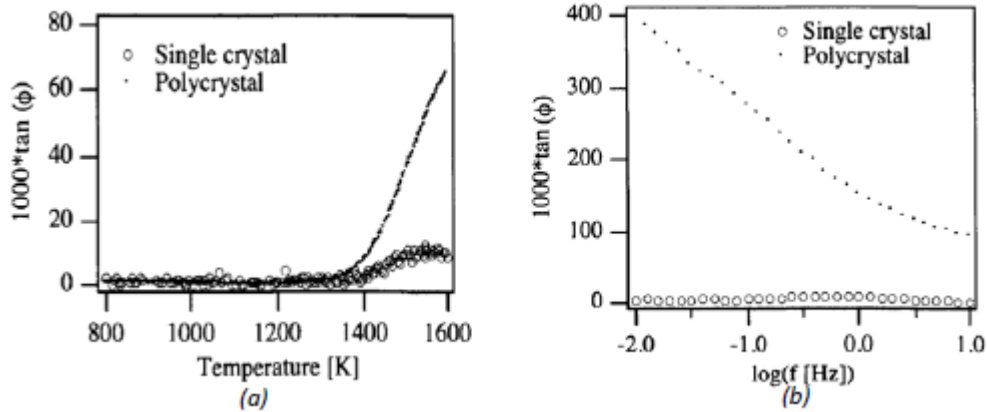
Μία ακόμα διαδικασία για βελτίωση της αντοχής των κεραμικών υλικών είναι οι κατεργασίες εν θερμό που λαμβάνουν χώρα σε ένα υλικό και πετυχαίνουν την μικρότερη απόσταση μεταξύ των κόκκων σε σχέση με την αρχική δομή πριν την μορφοποίηση. Οι περισσότερες μορφοποιήσεις τέτοιου είδους εξαρτημάτων ακριβείας και στοιχείων μηχανών (π.χ. από χάλυβα, ορείχαλκο κ.λπ.) πραγματοποιούνται σε υψηλή θερμοκρασία, διότι η ψυχρή διαμόρφωση γίνεται με μεγάλη δυσκολία λόγω της σκληρότητας του μετάλλου και μπορεί να προκαλέσουν φθορές στον μηχανολογικό εξοπλισμό που διεξάγει την σκλήρυνση [18β]

Η μέθοδος της γήρανσης είναι μία γνωστή μέθοδος και ευρέως χρησιμοποιούμενη. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από κάποιες διαδικασίες. Συγκεκριμένα γίνεται θέρμανση του υλικού σε μία θερμοκρασία κατά την οποία παραμένει για αρκετή ώρα, ώστε να ενεργοποιηθούν μηχανισμοί διάχυσης των ατόμων. Στην συνέχεια με απότομη ψύξη του υλικού πραγματοποιείται μία απότομη καθίζηση των ατόμων που

σκληραίνει το υλικό και προσδίδει πλήρη συνοχή στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού.

2.3 Συγκρίσεις διαφορετικών κεραμικών με βάση την αντοχή στον ερπυσμό

Διάφοροι επιστήμονες έχουν αναπτύξει θεωρητικά μαθηματικά μοντέλα, ώστε να αναλύουν την ολίσθηση των κόκκων με αυτήν την μέθοδο (Χαλάρωση GB). Τα θεωρητικά μοντέλα υπολογίζουν την ολίσθηση των κόκκων κάτω από μία συγκεκριμένη εφαρμοζόμενη τάση. Σύμφωνα με την Εικόνα 1.4.2 φαίνεται ότι για εφαρμογές με $T > 1200$ K, δηλαδή σε υψηλές θερμοκρασίας, οι ολισθήσεις των κόκκων αυτού του είδους αυξάνονται εκθετικά. Παρόλα αυτά η μαύρη γραμμή που αυξάνεται πολύ παραπάνω αντιπροσωπεύει ένα μονοκρυσταλλικό ζirkόνιο, ενώ το πολυκρυσταλλικό ζirkόνιο φαίνεται να έχει πολύ καλύτερη συμπεριφορά, λόγω της πιο συμπυκνωμένης του δομής. Για αυτό και στην Εικόνα 17 φαίνεται η καμπύλη του μονοκρυσταλλικού ζirkονίου να μην αυξάνεται πάρα πολύ με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η απεικόνιση βοηθάει να συγκρίνουμε δύο διαφορετικά υλικά που είναι συγγενικά και να αποδείξουμε ότι το μονοκρυσταλλικό ζirkόνιο έχει πιο σταθερή δομή σε υψηλές θερμοκρασίες και κατά συνέπεια προτιμάτε από το πολυκρυσταλλικό ζirkόνιο.



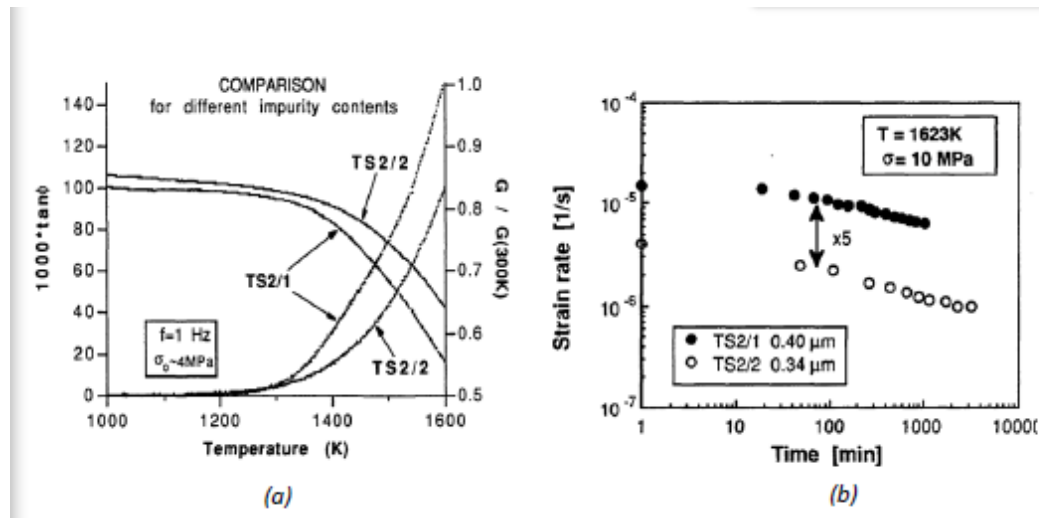
Εικόνα 17 α) αύξηση της ολίσθησης των κόκκων με τη μέθοδο GB με την αύξηση της θερμοκρασίας, β) Αύξηση της αντοχής σαν συνάρτηση της συχνότητας

Επίσης στο σχήμα 18 φαίνονται δύο διαγράμματα που έχουν να κάνουν με δύο υλικά που περιέχουν μήτρα άνθρακα και πρόσθετα ζirkονίου, αλλά με διαφορετικό μέγεθος ατόμων ζirkονίου (TS2/1 0,4nm και TS2/2 0,34nm). Συγκεκριμένα φαίνονται δύο στοιχεία για το καθένα :

- 1) Η Μηχανική απώλεια σε συνάρτηση με την θερμοκρασία
- 2) Η Τάσεις που δέχεται κάθε υλικό σε συνάρτηση με την θερμοκρασία

Όπως φαίνεται το συστατικό με μεγαλύτερο μέγεθος ατόμων ζirkονίου φαίνεται να δείχνει εντονότερη μηχανική απώλεια για υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με το συστατικό με μικρότερη ποσότητα σε ζirkόνιο.

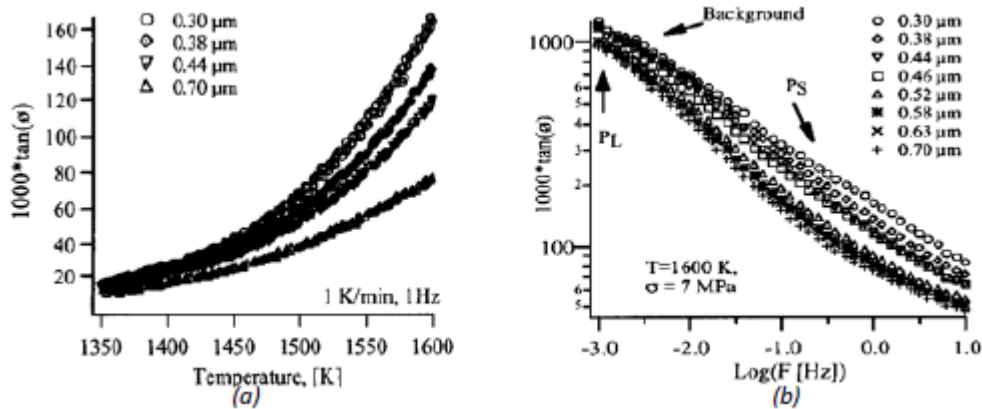
Ένα ακόμα πείραμα που γίνεται με αυτά τα δύο υλικά είναι η δοκιμή ερπυσμού στα 1623 K . Βύση των αποτελεσμάτων φαίνεται το TS2/1 να παρουσιάζει για τάση καταπόνησης $\sigma = 10 \text{ Mar}$, χαμηλότερο ποσοστό παραμόρφωση σε σχέση με το TS2/2



Εικόνα 18α) Διαγραμματική απεικόνιση της μηχανικής απώλειας σαν συνάρτηση δύο δειγμάτων κεραμικών ζirkονίου του TS2/1 (υψηλή περιεκτικότητα ακαθαρσιών) και του TS2/2 (χαμηλή περιεκτικότητα), β) Ρυθμός ερυσμού που μετρήθηκε στους 1623K σαν συνάρτηση του χρόνου [18]

Κατά συνέπεια όπως φαίνεται στη εικόνα 17 φαίνεται η σημαντικότητα των προσμίξεων με καρβίδια με το σωστό μέγεθος ατόμων, ώστε τα κεραμικά υλικά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιες εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών με επιτυχή τρόπο. Όπως φαίνεται η πρόσμιξη με ζirkόνιο μεγαλύτερου μεγέθους ατόμων είναι αρνητική για την μηχανική συμπεριφορά και την σταθερότητα της δομής, λόγω των μεγάλων αποστάσεων των κέντρων των ατόμων μεταξύ τους και μεταξύ των ατόμων του αρχικού μετάλλου άνθρακα.

Στο σχήμα 19 φαίνεται η επίδραση του μεγέθους των κόκκων (d) στο φάσμα της μηχανικής απώλειας ως συνάρτησης της θερμοκρασίας. Φαίνεται λοιπόν ότι η μηχανική απώλεια αυξάνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία και όσο ψηλότερο είναι το μέγεθος του κόκκου (μέγεθος ατόμων) τόσο μικρότερο είναι το επίπεδο απόσβεσης.



Εικόνα 19 Επίδραση του μεγέθους των κόκκων στη μηχανική απώλεια των κεραμικών που οδηγεί σε φαινόμενα ερπυσμού, β) Συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων στην μηχανική απώλεια σε συνάρτηση με τη συχνότητα[18]

Μέθοδοι για διαχωρισμό ιδιοτήτων με βάση ιδιότητες της μακρομοριακής δομής.

Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν τα κεραμικά περιγράφονται παρακάτω, καθώς πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν εκτενώς με τα κεραμικά. Πιο συγκεκριμένα Το 1880, οι Brothers Pierre and Jacques Curie ανακάλυψαν τον πιεζοηλεκτρισμό, ο οποίος είναι μία από τις βασικές ιδιότητες των κεραμικών. Το 1893, ο E.G. Acheson, εφηύρε το συνθετικό καρβίδιο (carborundum) με την θέρμανση ένα μίγματος οπτάνθρακα και πηλού.

Λόγω της θερμικής αντίστασης που έχουν τα κεραμικά, χρησιμοποιούνται επίσης ως καταλυτικοί μετατροπείς και εξαρτήματα στον κινητήρα. Η αντιδιαβρωτική δράση τους λόγω έλλειψης οξυγόνου από τα υλικά τα βοηθάει να έχουν υψηλό χρόνο ζωής σε αυτές τις εφαρμογές, γι'αυτό και να χρησιμοποιούνται. Επίσης χρησιμοποιούνται για την δημιουργία πυκνωτών, μονωτών, υπεραγωγών και άλλων ηλεκτρικών συσκευών, όπου λόγω των αντιστάσεων που υπάρχουν υπάρχει κάποια υψηλή θερμοκρασία.

Στην Εικόνα 20 φαίνεται το σύστημα ενός κεραμικού συμπλέκτη CarreraGt της Porsche. Συγκεκριμένα αποτελείται από καρβίδιο του πυριτίου, το οποίο είναι πολύ σκληρό όπως ένα διαμάντι, με εξαιρετική αντίσταση στην φθορά και αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 20 Κεραμικός συμπλέκτης CarreraGt της Porsche

2.4 Ανάλυση της ολίσθησης των κόκκων σε θεωρητικό επίπεδο [19],[20]

Η εκθετική αύξηση της μηχανικής απώλειας και η μείωση του συντελεστή διάτμησης σε υψηλή θερμοκρασία συνιστά την εμφάνιση ολκιμότητας στα κεραμικά υλικά. Αυτό βοηθάει το υλικό να μετατραπεί από εύθραυστο σε περισσότερο όλκιμο. Στην Εξίσωση 1.5.1 ο εκθετικός όρος $\exp\left(-\frac{\Delta H_{act}}{RT}\right)$, περιγράφει ότι η εξίσωση τείνει ασυμπτωτικά σε μηδενικό συντελεστή διάτμηση λόγω ερπυσμού. (ε) για μικρά ΔH_{act} ή για μεγάλα T . Η εξίσωση που περιγράφει την μηχανική απώλεια που υπολογίζεται με την εισαγωγή εξίσωσης ερπυσμού. Ο ερπυσμός λοιπόν περιγράφεται από τον τύπο :

$$\varepsilon(\sigma, T) = A \frac{\sigma^n}{d^P} \exp\left(-\frac{\Delta H_{act}}{RT}\right) \quad 1.5.1$$

Όπου d : μέσο μέγεθος του κόκκου

σ : η εφαρμοζόμενη τάση

P : ο ρυθμός καταπόνησης

ΔH_{act} : η ενθαλπία ενεργοποίησης ερπυσμού

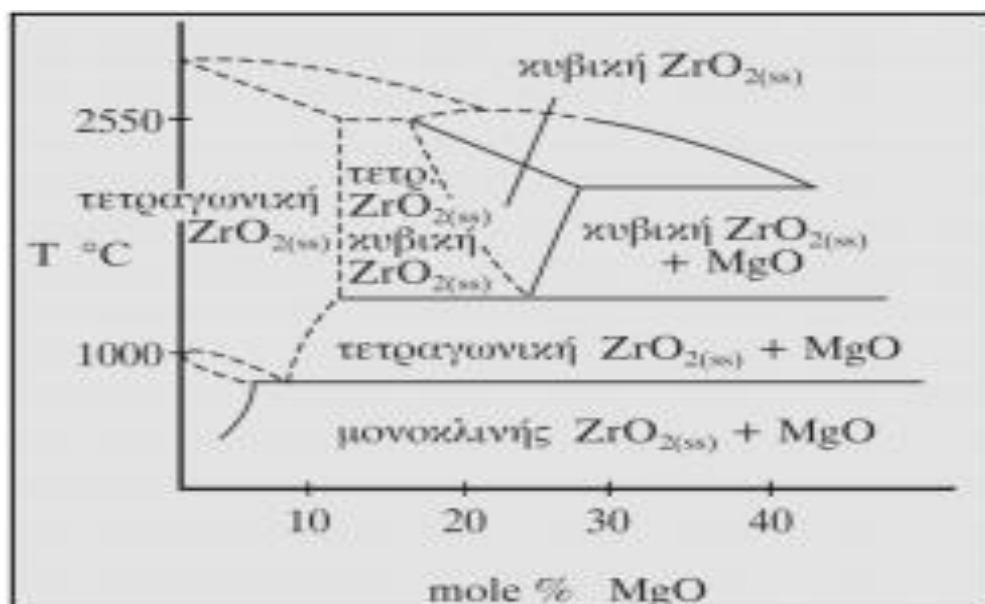
T : η απόλυτη θερμοκρασία αερίου

R : η σταθερά αερίων

Κατά συνέπεια φαίνεται ότι το φαινόμενο του ερπυσμού και την μηχανικής απώλειας δεν είναι μόνο συνάρτηση της θερμοκρασίας, αλλά και του είδους του υλικού και των προσμίξεων που αυτό έχει υποστεί. Βάση αυτών των αποτελεσμάτων είναι θεμιτό να αναλύεται η παραμόρφωση των συνθετικών-κεραμικών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες.

Σύμφωνα με τους επιστήμονες λοιπόν οι μετρήσεις για τον ορισμό της παραμόρφωσης αναλύθηκαν με

- 1) Έλεγχο ερπυσμού με συμπίεση στους 1600K και σε χαμηλή πίεση (MPa)
- 2) Μηχανικές μετρήσεις απώλειας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (μεταξύ 300 και 1600 K).



Εικόνα 21 Διάγραμμα φάσεις κεραμικού κράματος που περιέχει οξείδιο του ζιρκονίου και οξείδιο του μαγνησίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Πυρίμαχα υλικά

3.1 Ιστορική αναδρομή των πυρίμαχων υλικών

Τα πυρίμαχα υλικά είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες για τον λόγο του ότι αντέχουν σε αυτές και εκτίθενται σε διάφορες δύσκολες συνθήκες που πρέπει να ανταπεξέλθουν και να μη δημιουργηθεί μία ασφάλεια για τη λειτουργία των κατασκευών.

Τα πρώτα σύνθετα πυρίμαχα υλικά που ήταν ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες για να χρησιμοποιούνται κυρίως σε φούρνους και για τη κατασκευή γυαλιού κατασκευάστηκαν την περίοδο του 1550 μ.Χ και ήταν απαραίτητα για να αναπτυχθεί μία νέα τεχνολογία ύπαρξης υλικών, ώστε να αναπτυχθεί ο κατασκευαστικός τομέας των εργαλείων. Με το πέρασμα των χρόνων δημιουργήθηκαν και άλλες δομές υλικών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες λειτουργίες μηχανών. Ένα από αυτά τα υλικά είναι τα σύνθετα κεραμικά υλικά που λόγω της υψηλής αντοχής σε φθορά και της αντοχής του στη κρούση χαρακτηρίζονται ως πυρίμαχα υλικά.

Αυτά τα κεραμικά σύνθετα υλικά μπορούν επίσης μπορούν να εφαρμοστούν ως ανορθωτές, σε θερμικά στοιχεία, αισθητήρες, και διακόπτες ηλεκτρικού κυκλώματος, καθώς και σε σχετικές εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται καλές μηχανικές ιδιότητες υπό υψηλό ρεύμα ή συνθήκες θερμοκρασίας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση του SiC, σε βιομηχανικά εξαρτήματα με άμεση, ηλεκτρική θέρμανση, στην οποία το σύνθετο υλικό χρησιμεύει ως θερμαντικό στοιχείο.

Γενικά τα πυρίμαχα υλικά έχουν σημαντική επίδραση και στο κόστος και στην ποιότητα των προϊόντων του χάλυβα. Η διαφοροποίηση για τα προϊόντα χάλυβα και η καθαρή απαίτηση για αυτά τα προϊόντα από το αγοραστικό κοινό έχει αυξήσει τη ζήτηση τους για υψηλή πυρίμαχη ποιότητα. Αναφερόμενοι σε προϊόντα του χάλυβα, σε τέτοιες διεργασίες απαιτούνται συνήθως υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 1600 βαθμών Κελσίου. Επιπλέον οι βιομηχανίες δύναται να χειρίζονται κάποιες φάσεις στην υψηλή αυτή θερμοκρασία που είναι επικίνδυνες και πρέπει να λαμβάνονται κάποια μέτρα ασφαλείας, όπως όταν υπάρχει λιωμένος χάλυβας, σκωρία και θερμά αέρια στο περιβάλλον εργασίας. Σε αυτές τις φάσεις εμφανίζονται

οι χημικές αντιδράσεις που παράγονται οι πυρίμαχοι χάλυβες. Η κύρια απαίτηση στην παραγωγή χαλύβων με πυρίμαχα χαρακτηριστικά είναι η ανθεκτικότητα των μηχανών ή των εργαλείων, παράλληλα με χαμηλό κόστος των διεργασιών δημιουργίας πυρίμαχων χαλύβων.

3.2 Ο ορισμός του πυρίμαχου υλικού

Για να γίνει κατανοητό πως συμπεριφέρεται ένα πυρίμαχο υλικό ή μία πυρίμαχη συσκευή λειτουργίας, είναι ανάγκη να προσδιοριστεί η έννοια του πυρίμαχου υλικού. Συγκεκριμένα τα πυρίμαχα είναι ανόργανα μη μεταλλικά υλικά που μπορούν να αντέξουν σε υψηλή θερμοκρασία, χωρίς να υποβάλλονται σε φυσικοχημικές αλλαγές ενώ παραμένουν σε επαφή με λιωμένη σκωρία μέταλλο και αέρια.

Συνεπώς για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητη για την παραγωγή σειράς πυρίμαχων υλικών με διαφορετικές ιδιότητες με σκοπό να καλύψουν το φάσμα των συνθηκών επεξεργασίας. Η κατηγοριοποίηση των πυρίμαχων υλικών αποτελείται από τα εξής :

- 1) Πυρολυμένα
- 2) Χημικά
- 3) Ανθρακούχα

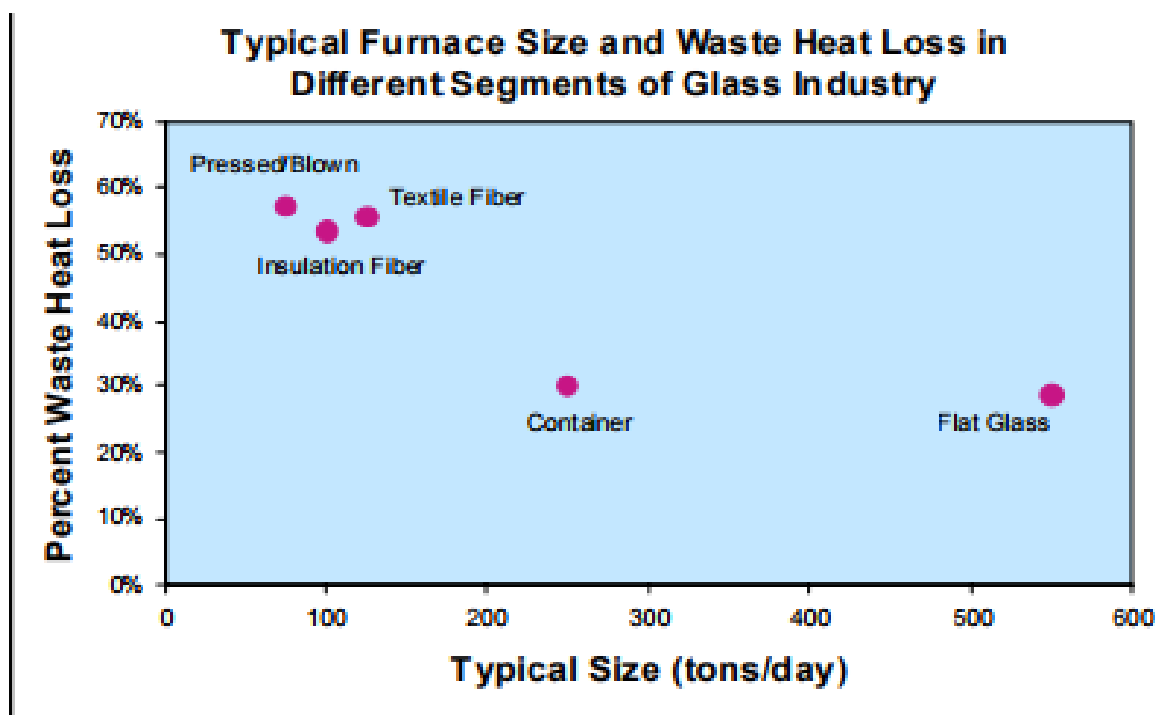
Η δημιουργία αυτών των υλικών έχει πολλούς σκοπούς και κάθε κατηγορία έχει και τα δικά της στοιχεία που πρέπει να δίνεται βάση.

Τα πυρολυμένα υλικά είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σε φούρνους και κλίβανους που υπάρχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες, με σκοπό να ελαχιστοποιούν τις απώλειες θερμότητα από τον θάλαμο αντίδρασης και να προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση σε τέτοιου είδους μηχανές. Για να φανεί πόσο σημαντική είναι αυτή η ελαχιστοποίηση απωλειών θερμότητας παρουσιάζονται αρχικά κάποια άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για κλίβανους και παρουσιάζεται η απώλεια θερμότητας που συνεπάγεται.

Το παράδειγμα των εναλλακτικών υλικών φαίνεται παρακάτω, καθώς παρουσιάζονται κάποια από τα σημαντικότερα συστήματα σχετίζονται με τις

διεργασίες στις ροές καυσαερίων που είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντας για την ανάκτηση ενέργειας.

Επίσης ένα από τα σημαντικά παραδείγματα ανάκτηση ενέργειας είναι η χρησιμοποίηση κλιβάνου που χρησιμοποιείται για την τήξη γυαλιού από βιομηχανίες με σκοπό να χρησιμοποιηθεί η ενέργεια από τα θερμασμένα συστατικά του γυαλιού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 υπάρχουν υλικά που με την θέρμανση τους μέσα σε κλίβανους, συμβαίνει μεγάλη απώλεια θερμότητας (π.χ. 25% από την θέρμανση για δημιουργία επίπεδου γυαλιού-Flat glass).



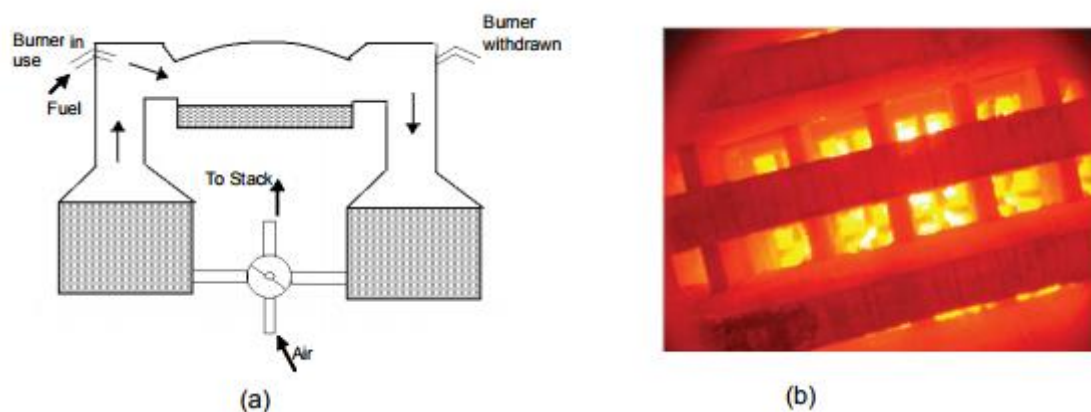
Εικόνα 22 Υλικά που συνεπάγεται χάσιμο θερμικής ενέργειας στον κλίβανο επεξεργασίας η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εκμετάλλευση από μηχανές ανάκτησης της χαμένης θερμότητας

Η διαφορά λοιπόν με αυτά τα υλικά σε σχέση με τα υλικά των πυρολυμένων πυρίμαχων υλικών είναι πολύ σημαντική. Πιο συγκεκριμένα με τα πυρολυμένα πυρίμαχα υλικά έχει επιτευχθεί η δημιουργία αναγεννητών κλιβάνου που είναι πολύ σημαντικοί για τις διεργασίες διοχέτευσης της θερμότητας για διάφορες διεργασίες.

Οι αναγεννητές χρησιμοποιούνται συχνότερα με φούρνους και φούρνους οπτανθρακοποίησης και χρησιμοποιούνταν ιστορικά με φούρνους ανοιχτού τύπου από χάλυβα, πριν αντικατασταθούν οι κλίβανοι από πιο αποδοτικά σχέδια που υπάρχουν μέχρι και σήμερα.

Οι καινούργιοι κλίβανοι χρησιμοποιούνται επίσης για την προθέρμανση της θερμής έκρηξης που συμβαίνει σε φούρνους θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία σιδήρου

Η καύση μεταφέρεται στον θερμαινόμενο αέρα εκτόνωσης και συστήματα αναγέννησης είναι ειδικά σχεδιασμένα για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται σχηματικά ένας τέτοιος κλίβανος που έχει κατασκευαστεί από πυρίμαχο χάλυβα.



Εικόνα 23 α) Σχηματική παράσταση αναγεννητή κλιβάνου, β) Αναγεννητής κλιβάνου κατά τη διαδικασία λειτουργίας φτιαγμένος από πυρίμαχο χάλυβα

Το πλεονέκτημα των πυρίμαχων υλικών λοιπόν έναντι άλλων που προτίθενται για παρόμοιες λειτουργίες είναι η δυνατότητα αυτών των υλικών να έχουν τα εξής πλεονεκτήματα :

- 1) Να λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες $>1500^{\circ}\text{C}$
- 2) Να δέχονται τις ξαφνικές αλλαγές θερμοκρασίας
- 3) Να έχουν μπορούν να αντέξουν φορτίου σε κάποιες δύσκολες συνθήκες λειτουργίας
- 4) Να δημιουργούν χημική και λειαντική δράση των φάσεων του υλικού
- 5) Να μη μολύνει το υλικό με το οποίο έρχεται σε επαφή

Στα πλαίσια λειτουργίας των διαφόρων συστατικών που χαρακτηρίζονται ως πυρίμαχα είναι ανάγκη να υπάρχει κάποια πειραματική ανάπτυξη του τρόπου που αυτά λειτουργούν σε κάποιες συγκεκριμένες θερμοκρασίες.

Στα πλαίσια των καταπονήσεων των πυρίμαχων υλικών παρουσιάζονται διάφορες φάσεις των υλικών, καθώς υπάρχουν αρκετές καταπονήσεις που πρέπει να προσεχθούν και να ληφθούν υπόψη. Οι κυριότερες καταπονήσεις που μπορεί να

δέχονται τα πυρίμαχα υλικά και να δημιουργείται πρόβλημα στη λειτουργία της κατασκευής είναι τα εξής δύο στάδια :

- 1) Οι διάφορες μηχανικές τάσεις
- 2) Οι μηχανικές παραμορφώσεις
- 3) Οι θερμικές τάσεις
- 4) Οι θερμικές παραμορφώσεις

Συγκεκριμένα τα πυρίμαχα υλικά λόγω της χημικής πολυπλοκότητά τους τήκονται προοδευτικά σε ένα εύρος θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου η ανακλαστικότητα ή το σημείο σύντηξης εκτιμάται ιδανικά με τη μέθοδο σύντηξης κώνου. Το ισοδύναμο πρότυπο κώνου που τήκεται στον ίδιο βαθμό όπως ο κώνος δοκιμής είναι γνωστός ως ισοδύναμο πυρομετρικού κώνου. Αυτή είναι μία διαδικασία που γίνεται με κάποια τυποποιημένη διάταξη όλων των συστατικών που θεωρούνται πυρίμαχα με σκοπό να γίνει η εξαγωγή της θερμοκρασίας που αυτή η διάταξη του κώνου αγγίζει τη πλάκα στήριξης και με αυτόν τον τρόπο γίνεται η αξιολόγηση της αντοχής όλων των πυρίμαχων συστατικών στην θερμοκρασία.

Αυτή η διαδικασία αποτελείται από πυρομετρικούς κώνους που είναι μικρά τριγωνικά κεραμικά πρίσματα που όταν ορίζονται σε μία ελαφρά γωνία και κάμπτονται σε ένα τόξο, φτάνουν στο επίπεδο της βάσης σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, που είναι αποτέλεσμα της σταθερής θερμικής καταπόνησης. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 24 και είναι σημαντική για σκοπούς ελέγχου της ποιότητας του κάθε πυρίμαχου συστατικού σε μία ορισμένη θερμοκρασία.

End Points of Orton Pyrometric Cones			
Cone number	End point (°C)	Cone number	End point (°C)
12	1337	31	1679
13	1349	31½	1699
14	1398	32	1717
15	1430	32½	1730
18	1491	33	1741
17	1512	34	1759
18	1522	35	1784
19	1541	36	1796
20	1564	37	1830
23	1590	38	1850
26	1605	39	1865
27	1627	40	1885
28	1638	41	1970
29	1645	42	2015
30	1654		



Εικόνα 24 Διαδικασία PCE(Pyrometric Cone Equivalent), δοκιμασίας θέρμανσης σε πυρίμαχα υλικά που έχουν δημιουργηθεί σε τριγωνικά σχήματα και κάμπτονται με τον χρόνο σαν τόξο

Δεδομένου ότι οι πυρομετρικοί κώνοι είναι ευαίσθητοι, τόσο ο χρόνος όσο και η θερμοκρασία, οι πραγματικές θερμοκρασίες που συνδέονται με κάθε κώνο μπορεί να διαφέρουν, αλλά αυτός είναι επίσης ένας από τους λόγους που είναι πολύ σημαντική η επεξεργασία κεραμικών. Το συγκεκριμένο πυρίμαχο υλικό που ελέγχεται στην Εικόνα 24 φαίνεται να έχει μετρηθεί 42 φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος μέχρις ότου ακουμπήσει την οριζόντια πλάκα. Με βάση την τελική θερμοκρασία που φαίνεται να αντέχει η πειραματική μέτρηση σταμάτησε στη θερμοκρασία 2015 ° C.

3.3 Ιδιότητες των πυρίμαχων υλικών

3.3.1 Σημείο τήξης

θερμοκρασία τήξης τους με σκοπό να γίνει γνωστό ποια υλικά είναι τα πιο ανθεκτικά και σε τι θερμοκρασίες μπορεί να Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας (εικόνα 25) με διάφορα στοιχεία και την αντέξουν. Το σημείο τήξης χρησιμεύει ως επαρκής βάση για την εξέταση της θερμικής σταθερότητας του και είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που υποδεικνύει τη μέγιστη θερμοκρασία χρήσης Όπως φαίνεται τα πιο ανθεκτικά υλικά στη τήξη είναι :

- 1) Ο γραφίτης που αντέχει στους 6300 ° F
- 2) Η Θωρία που αντέχει στους 5430 ° F
- 3) Το μαγνήσιο που αντέχει στους 5070 ° F
- 4) Το ζirkόνιο που αντέχει στους 4890 ° F
- 5) Ο ασβέστης

REFRACTORY ELEMENT	MELTING TEMPERATURES (°F)
Graphite C Pure	6300 °F
Thoria, ThO ₂ Pure Sintered	5430 °F
Magnesia, MgO, Pure Sintered	5070 °F
Zirconia, ZrO ₂ , Pure Sintered	4890 °F
Lime, CaO	4660 °F
Beryllia, BeO, Pure Sintered	4620 °F
Silicon Carbide, SiC, Pure	4080 °F
Magnesia, 90-95%	3980 °F
Chromite, FeO-Cr ₂ O ₃	3960 °F
Chromium Oxide	3880 °F
Alumina, Al ₂ O ₃ , Pure Sintered	3720 °F
Chromite, 38%, Cr ₂ O ₃	3580 °F
Alumina Fused Bauxite	3400 °F
Silicon Carbide, 80-90%	3400 °F
Fireclay	3400 °F
Titania, TiO ₂	3360 °F
Kaolin, Al ₂ O ₃ -, SiO ₂	3300 °F
Silica, SiO ₂	3120 °F

Εικόνα 25 Θερμοκρασίες τήξης για διάφορα πυρίμαχα υλικά

3.3.2 Ανθεκτικότητα του πυρίμαχου υλικού

Η ανθεκτικότητα του πυρίμαχου υλικού υποδεικνύεται από τον δείκτη που περιγράφηκε η λειτουργία του παραπάνω και συγκεκριμένα από τον δείκτη PCE (ισοδύναμο πυρομετρικού κώνου). Συγκεκριμένα αυτή η θερμοκρασία θα πρέπει να είναι πάντα υψηλότερη από το σημείο εφαρμογής της λειτουργικής θερμοκρασίας μίας μηχανής που είναι φτιαγμένη από ένα συγκεκριμένο υλικό.

Η διαδικασία αυτή περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω και φάνηκε ο τρόπος που εξάγεται αυτός ο ισοδύναμος δείκτης. Συνεπώς φαίνεται ότι η ανάλυση αυτής της διαδικασίας μπορεί να δώσει σημαντικό πλεονέκτημα σε έναν κατασκευαστή για το πυρίμαχο υλικό που είναι να επιλέξει σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία λειτουργίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Αυτό συμβαίνει διότι πρέπει στις μηχανικές συσκευές και λειτουργίες να υπάρχει πάντα μία απόσταση ασφαλείας από το σημείο τήξης του συστατικού, διότι μπορούν να δημιουργηθούν ανεπιθύμητες αντιδράσεις που δεν έχουν υπολογιστεί και να τηχθεί το υλικό, κάτι που δεν είναι επιθυμητό.

Ανθεκτικότητα υπό φορτίο:

Η ανθεκτικότητα επισημαίνει την αντίσταση σε ακραίες συνθήκες θερμότητας (θερμοκρασία > 1800 ° F) και διάβρωση όταν περιέχονται θερμά και τετηγμένα υλικά ενώ μεταφέρονται και / ή υφίστανται επεξεργασία.

Η ικανότητα να αντέχει την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να υποστεί αισθητή η παραμόρφωση μετριέται ως προς την ανθεκτικότητα. Η ανθεκτικότητα υπό δοκιμή φορτίου (δοκιμή RUL) δίνει μια ένδειξη της θερμοκρασίας κατά την οποία τα τούβλα θα καταρρεύσουν, σε συνθήκες λειτουργίας με παρόμοιο φορτίο. Ωστόσο, υπό την πραγματική υπηρεσία, όπου τα τούβλα θερμαίνονται μόνο σε μία όψη, τα περισσότερα από αυτά το φορτίο φέρεται από το σχετικά πιο ψυχρό άκαμπτο τμήμα των τούβλων. Ως εκ τούτου, η δοκιμασία RUL, δίνει μόνο ένα δείκτη της πυρίμαχης ποιότητας, αντί μιας μορφής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πυρίμαχο σχεδιασμό υλικών για τέτοιες λειτουργίες υψηλής θερμοκρασίας.

Τα δεδομένα της δοκιμής RUL είναι αρκετά σημαντικά. Κάτω από αυτές τις συνθήκες που οι πυρίμαχες που χρησιμοποιούνται είναι θέρμανση από όλες τις πλευρές οι τοίχοι, κλπ.

Ένας από τους λόγους που μπορεί να μειωθεί αυτή η ανθεκτικότητα του υλικού είναι το πυρίμαχο υλικό να λειτουργεί κάτω από τη φόρτιση μίας συγκεκριμένης τάσης που επηρεάζει την ανθεκτικότητα. Για αυτό το μοντέλο επηρεασμού της τάσης υπάρχει ένας άλλος δείκτης μέτρησης που ονομάζεται RUL.

Η ανθεκτικότητα υπό φορτίο (RUL) είναι ένα μέτρο της συμπεριφοράς παραμόρφωσης των πυρίμαχων κεραμικών προϊόντων που υπόκεινται σε σταθερό φορτίο και αυξανόμενη θερμοκρασία. Το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο συμβαίνει το μαλάκωμα δεν είναι πανομοιότυπο με το εύρος τήξης της καθαρής πρώτης ύλης. Ωστόσο πρέπει να προσδιορίζεται αξιόπιστα με το RUL 421 για να ελέγχει τη χρήση των πυρίμαχων προϊόντων σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Η ερπυσμό στη συμπίεση αυτή λαμβάνει επίσης μέρος (CIC) και αναφέρεται στο ποσοστό της συρρίκνωσης ενός πυρίμαχου τεστ δοκιμής υπό σταθερό φορτίο και εκτίθεται σε σταθερή υψηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η δοκιμή ερπυσμού είναι μέρος αυτής της διαδικασίας καθώς μπορεί να παρουσιαστεί λόγω της μείωσης της ανθεκτικότητας του πυρίμαχου υλικού λόγω της ύπαρξης του σταθερού φορτίου που καταπονεί μηχανικά το υλικό.

3.2.3 Ερπυσμός σε υψηλή θερμοκρασία

Ο ερπυσμός είναι μια ιδιότητα εξαρτώμενη από το χρόνο που καθορίζει την παραμόρφωση σε δεδομένη στιγμή και σε δεδομένη χρονική στιγμή θερμοκρασία από ένα υλικό υπό πίεση. Τα πυρίμαχα υλικά πρέπει να διατηρούν σταθερότητα διαστάσεων κάτω από ακραίες θερμοκρασίες (συμπεριλαμβανομένης της επαναλαμβανόμενης θερμικής κυκλοφορίας) και τη σταθερή διάβρωση από πολύ καυτά υγρά και αέρια.

Συνεπώς το κριτήριο αποδοχής που συνήθως υιοθετείται είναι: αυτή η συμπιεστική ολίσθηση (παραμόρφωση σε δεδομένο χρόνο και θερμοκρασία υπό τάση) για κανονικές συνθήκες εργασίας του φορτίου και η θερμοκρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,3% κατά τις πρώτες 50 ώρες της δοκιμής. Αυτό το ποσοστό έχει βρεθεί να δείχνει ότι ο ρυθμός ερπυσμού πέφτει κατά ένα αμελητέο ποσό στο τέλος της προβλεπόμενης περιόδου και επομένως, το πυρίμαχο μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές για χρήση για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Στα πλαίσια του πειράματος του ερπυσμού λοιπόν, το κάθε πυρίμαχο υλικό υποβάλλεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία καταπόνησης, κατά την οποία ελέγχεται το ποσοστό ερπυσμού και ο ρυθμός ανάπτυξης αυτού.

3.2.4 Όγκος σταθερότητας, διαστολή και συρρίκνωση σε υψηλή θερμοκρασία

Η συστολή ή επέκταση των πυρίμαχων υλικών μπορεί να λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της υπηρεσίας. Τέτοιες μόνιμες αλλαγές στις διαστάσεις μπορεί να οφείλονται σε:

- α) Οι αλλαγές στις αλλοτροπικές μορφές που προκαλούν αλλαγή στο ειδικό βάρος
- β) Μια χημική αντίδραση η οποία παράγει ένα νέο υλικό αλλαγμένου ειδικού βάρους.
- γ) Ο σχηματισμός της υγρής φάσης
- δ) Αντιδράσεις πυροσυσσωμάτωσης
- ε) Μπορεί επίσης να συμβεί εξαιτίας της ροής με σκόνη και σκωρία ή με την επίδραση των αλκαλίων των πυρίμαχων υλικών, για τον σχηματισμό πυριτικών αλκαλίων-αλουμίνας, προκαλώντας επέκταση και διάσπαση. Αυτό είναι ένα παράδειγμα που παρατηρείται γενικά σε υψικαμίλους.

Ενώ είναι επιθυμητό όλες αυτές οι αλλαγές να γίνουν κατά τη διάρκεια της κατασκευής, δεν είναι δυνατόν για οικονομικούς λόγους, καθώς η διαδικασία εξαρτάται από το χρόνο. Η μόνιμη γραμμική αλλαγή (PLC) κατά την επαναθέρμανση και τη ψύξη των τούβλων δίνουν μια ένδειξη σχετικά με τη σταθερότητα του όγκου του προϊόντος καθώς και την επάρκεια των παραμέτρων επεξεργασίας κατά την κατασκευή. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό ως μέτρο του βαθμού μετατροπής που επιτυγχάνεται στη κατασκευή τούβλων πυριτίας και άλλων εφαρμογών όπως φούρνων που οι αποστάσεις ασφαλείας συρρίκνωσης και αλλαγής όγκου είναι μικρές λόγω της ύπαρξης γεμάτου φορτίου μέσα στο φούρνο που θερμαίνεται.

3.2.5 Αναστρέψιμη Θερμική Επέκταση

Οποιοδήποτε υλικό όταν θερμαίνεται επεκτείνεται και συμβάλλει στην ψύξη. Η αναστρέψιμη θερμική διαστολή είναι αντανάκλαση των μετασχηματισμών φάσης που συμβαίνουν κατά τη θέρμανση και την ψύξη. Το PLC και η αναστρέψιμη θερμική διαστολή ακολουθείται στο σχεδιασμό των πυρίμαχων επενδύσεων για την παροχή αρμούς διαστολής. Κατά γενικό κανόνα, τα άτομα με μικρότερη συν-αποδοτικότητα θερμικής διαστολής είναι λιγότερα επιρρεπείς σε θερμική καταστροφή.

Αυτό το ζητούμενο λοιπόν βασίζεται στα χημικά χαρακτηριστικά ενός πυρίμαχου συστατικού, καθώς με βάση τις χημικές αντιδράσεις του υλικού σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αυξάνεται και ο όγκος του, λόγω των χημικών ιδιοτήτων και της πυκνότητας των μικρομορίων και άλλως φυσικών ιδιοτήτων της μικρομοριακής δομής του υλικού.

Για παράδειγμα η ταχύτητα και ο αριθμός των κρούσεων μεταξύ των μικρομορίων παίζει σημαντικό ρόλο στις υψηλές θερμοκρασίες και στον ρυθμό της θερμικής καταστροφής. Συγκεκριμένα, όσες περισσότερες είναι οι κρούσεις των μορίων αυτών τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να υπάρχει αναστρέψιμη θερμική διαστολή που μπορεί να οδηγήσει σε θερμική καταστροφή.

3.2.6 Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα ορίζεται ως η ποσότητα θερμότητας που θα ρέει μέσα από την περιοχή του πυρίμαχου υλικού ή της πυρίμαχης κατασκευής προς την κατεύθυνση της εξωτερικής επιφάνειας σε καθορισμένο χρόνο με γνωστή κλίση θερμοκρασίας υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης. Αυτή η ιδιότητα δείχνει τα γενικά χαρακτηριστικά ροής θερμότητας του πυρίμαχου υλικού και εξαρτάται από τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του συγκεκριμένου πυρίμαχου συστατικού καθώς και τη θερμοκρασία εφαρμογής.

Τα πυρίμαχα υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας απαιτούνται για ορισμένες εφαρμογές όπου υπάρχει καλή μεταφορά θερμότητας όπως τα τοιχώματα φούρνου αναγεννητές και υδρόψυκτοι τοίχοι κλιβάνου, καθώς και πολλές άλλες εφαρμογές που έχουν ανάγκη την μεταφορά θερμότητας μέσω ενός υλικού που είναι πυρίμαχο.

Ωστόσο τα πυρίμαχα με χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα προτιμώνται στις βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς βοηθούν εξοικονομώντας θερμότητα. Το πορώδες είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη ροή θερμότητας μέσω των πυρίμαχων υλικών. Η θερμική αγωγιμότητα του ενός πυρίμαχου μειώνεται στην αύξηση του πορώδους του.

Αν και είναι μια από τις λιγότερο σημαντικές ιδιότητες όσον αφορά την απόδοση του υλικού στις καταπονήσεις που έχουν περιγράψει προηγουμένως εντούτοις είναι μία ιδιότητα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάποιες εφαρμογές, καθώς πρέπει να υπάρχει η αναγκαία θερμική μεταφορά μέσω του υλικού, ώστε να μεταφέρεται ένα ικανοποιητικό ποσό θερμότητας ή αντίθετα να υπάρχει χαμηλή θερμική μετάδοση μέσω της πυρίμαχης συσκευής.

3.2.7 Σταθερότητα μεγέθους και διαστάσεων

Το μέγεθος και το σχήμα των πυρίμαχων υλικών είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού, καθώς επηρεάζει τη σταθερότητα της κάθε δομής που υπάρχει σε ένα πυρίμαχο σκεύος ή μία πυρίμαχη μηχανή.

Η ακρίβεια και το μέγεθος διαστάσεων είναι εξαιρετικά σημαντικές για τη σωστή τοποθέτηση του

πυρίμαχου σχήματος και την ελαχιστοποίηση του πάχους και των αρμών στην κατασκευή.

3.2.8 Πορώδες

Το πορώδες είναι ένα μέτρο του αποτελεσματικού ανοιχτού χώρου πόρων στο πυρίμαχο μέσα στο οποίο το τετηγμένο μέταλλο, η σκωρία, οι ροές, οι ατμοί κλπ μπορούν να διεισδύσουν και έτσι να συμβάλουν στην ενδεχόμενη υποβάθμιση της δομής.

Το πορώδες του πυρίμαχου υλικού εκφράζεται ως το μέσο ποσοστό του ανοικτού χώρου πόρων στο σύνολο πυρίμαχη ένταση. Υλικά υψηλού πορώδους τείνουν να είναι πολύ μονωτικά ως αποτέλεσμα του μεγάλου όγκου αέρα που παγιδεύουν, επειδή ο αέρας είναι πολύ κακός θερμικός αγωγός. Ως αποτέλεσμα, γενικά

χρησιμοποιούνται χαμηλού πορώδους υλικά σε θερμότερες ζώνες, ενώ τα πιο πορώδη υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως για θερμική υποστήριξη.

Τέτοια υλικά, ωστόσο, δεν δουλεύουν με υψηλότερες θερμοκρασίες και άμεση πρόσκρουση φλόγας, και είναι πιθανό να συρρικνωθούν όταν υποβάλλονται σε τέτοιες συνθήκες. Τα πυρίμαχα υλικά με υψηλό πορώδες είναι συνήθως δεν επιλέγονται όταν θα έρχονται σε επαφή με λιωμένη σκωρία επειδή δεν μπορούν να είναι διεισδύσουν τόσο εύκολα.

3.2.9 Πυκνότητα

Η χύδην πυκνότητα υπολογίζεται και εκτιμάται γενικά σε συνδυασμό με το εμφανές πορώδες που ορίστηκε παραπάνω και είναι μία σημαντική ιδιότητα για τη συμπεριφορά του πυρίμαχου υλικού όταν έρχεται σε επαφή με άλλες ουσίες σε υψηλή θερμοκρασία, όπου οι πόροι του έχουν ανοίξει

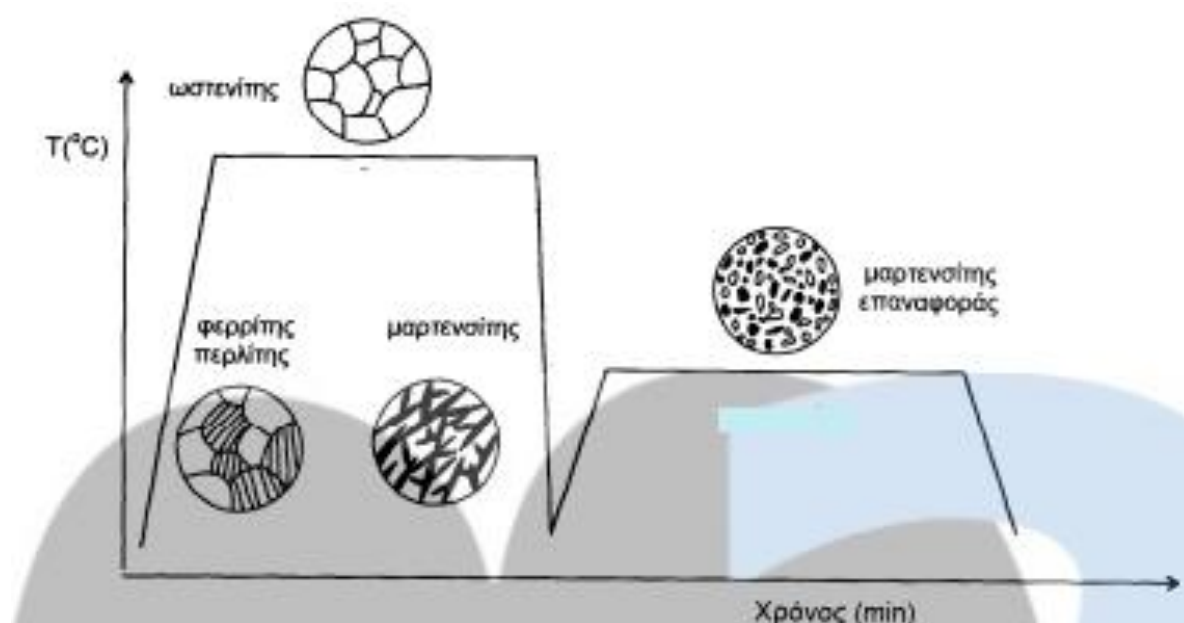
Πρόκειται για ένα μέτρο του βάρους ενός δεδομένου όγκου του πυρίμαχου υλικού. Για πολλά πυρίμαχα, η πυκνότητα όγκου παρέχει μία γενική ένδειξη της ποιότητας του προϊόντος και θεωρείται ότι το πυρίμαχο με μεγαλύτερη πυκνότητα όγκου (χαμηλό πορώδες) θα είναι καλύτερο σε ποιότητα. Αυτό έχει να κάνει με την μικρομοριακή δομή του πυρίμαχου υλικού που δεν επιτρέπει άλλες ουσίες να διεισδύσουν εύκολα στο υλικό ή στη πυρίμαχη μηχανή και να δημιουργήσουν φαινόμενα φθοράς που μπορούν να έχουν ανεπιθύμητες συνέπειες και να οδηγήσουν μέχρι και τη θραύση.

Μία αύξηση της πυκνότητας χύδην αυξάνει την σταθερότητα όγκου, τη θερμική ικανότητα, καθώς και την αντίσταση σε τριβή και διείσδυση σκωρίας.

3.2.10 Αντοχή στη σύνθλιψη εν ψυχρώ

Η ψυχρή δύναμη σύνθλιψης, η οποία θεωρείται από ορισμένους ως αμφίβολη συνάφεια ως χρήσιμη ιδιοκτησία, εκτός από την αποκάλυψη λίγο περισσότερο από την ικανότητα να αντέχει την αυστηρή της μεταφοράς. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένας χρήσιμος δείκτης για την επάρκεια της αντοχής στην πυρκαγιά και την τριβή σε συνύπαρξη με άλλες ιδιότητες όπως η πυκνότητα και το πορώδες.

Αυτή η ιδιότητα λαμβάνει υπόψη τις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας που συμβαίνουν σε διάφορες διεργασίες κυρίως βιομηχανικού χαρακτήρα, καθώς διάφορες διαδικασίες απαιτούν απότομες αλλαγές θερμοκρασίες, ώστε να παραχθούν οι απαραίτητες ιδιότητες για μία μηχανή. Μία από τις πιο συχνές διαδικασίες που συμβαίνει η σύνθλιψη εν ψυχρώ σε πυρίμαχα υλικά είναι η διαδικασία της σκλήρυνσης με βαφή και κατά την επαναφορά. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 26 και παρουσιάζει τις απότομες αλλαγές που συμβαίνουν στο υλικό κατά τη διαδικασία αυτή με το πέρασμα του χρόνου. Για να μπορεί να είναι επιτυχής αυτή η διαδικασία είναι ανάγκη το υλικό να είναι πυρίμαχο και να αντέχει στη σύνθλιψη εν ψυχρώ.



Εικόνα 26 Διαδικασία βαφής και επαναφοράς ενός χάλυβα για σκλήρυνση και βιομηχανική χρήση

3.3 Κατηγοριοποίηση πυρίμαχων υλικών

Η κατηγοριοποίηση των πυρίμαχων υλικών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ένα παράδειγμα κατηγοριοποίησης που μπορεί να δοθεί είναι η κατηγοριοποίηση της χημικής σύνθεσης των πυρίμαχων, η μέθοδος κατασκευής ή οι φυσική μορφή και οι ιδιότητες των πυρίμαχων υλικών. Παρακάτω δίνονται τύποι πυρίμαχων ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση και τη φυσική τους μορφή.

3.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη χημική σύνθεση

Τα πυρίμαχα υλικά αποτελούνται από ένα ή περισσότερα συστατικά σε οργανικές ενώσεις με μη μεταλλικά στοιχεία. Συγκεκριμένα υπάρχουν τα πυρίμαχα υλικά που είναι ανθεκτικά στο οξύ. Οι κύριες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι το SiO_2 και το ZrO_2 και το αργιλιοπυριτικό άλας. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται όπου η σκωρία και η ατμόσφαιρα είναι όξινη και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά βασικές συνθήκες στο περιβάλλον.

Τα τυπικά πυρίμαχα είναι το διοξείδιο του πυριτίου και ο χαλαζίας ενώ τα βασικά πυρίμαχα είναι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται που είναι οι ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου (CaO), οξειδίου του Μαγνησίου (MgO), χρωμόμαγνησίτη και δολομίτη. Στα δύο τελευταία δημιουργείται μία βασική πυρίμαχη σύνθεση νεκρού καμένου μαγνησίτη και δολομίτη με μετάλλευμα χρωμίου.

- 1) Μανησίτης : Οι συνδυασμού χρωμίου έχουν καλή αντοχή στη χημική δράση της βασικής σκωρίας και μηχανική αντοχή και σταθερότητα όγκου σε υψηλές θερμοκρασίες
- 2) Μαγνησίτης : Είναι ανθεκτικός με την ύπαρξη άνθρακα, καθώς με μεγάλη ποσότητα άνθρακα έχει εξαιρετική αντίσταση σε χημική επίθεση και αντιδράσεις από χαλύβδινες σκωρίες
- 3) Πυρίμαχα Χρωμο-Μαγνησίτη : Χρησιμοποιείται στην εσωτερική επένδυση του BOF και άλλων πλευρικών τοιχωμάτων των σωληνώσεων εμβάπτισης
- 4) Μαγνησίτης : Βασικός πυρίμαχος χαρακτήρας. Τα υλικά μαγνησίτη δεν μπορούν να αντισταθούν στο θερμικό απόθεμα του υλικού, είναι χαλαρά στην αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία και δεν είναι ανθεκτικά στη τριβή.

Μία άλλη κατηγορία είναι τα ουδέτερα πυρίμαχα υλικά που είναι χημικά σταθερά σε οξέα και βάσεις. Αυτά κατασκευάζονται από τις ενώσεις Al_2O_3 , Cr_2O_3 και άνθρακα.

Τα διαμορφωμένα πυρίμαχα έχουν τη μορφή των τούβλων ορισμένων βασικών διαστάσεων. Αυτά τα πυρίμαχα είναι συμπιεσμένα μηχανικά και έχουν ομοιόμορφες ιδιότητες. Ειδικά σχήματα με τις απαιτούμενες διαστάσεις είναι χειροποίητα χυτευτά και χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένους κλιβάνους και φούρνους, όπως αυτός που περιγράφηκε στην Εικόνα 3.2. Διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής :

- 1) Το πυρίμαχο υλικό είναι σε χαλαρή ξηρή μορφή με διαβαθμισμένο μέγεθος σωματιδίων. Αναμιγνύονται με νερό για χρήση. Οι υγρές μάζες εμπλοκής χρησιμοποιούνται αμέσως κατά το άνοιγμα

- 2) Τα χυτά υλικά πυρίμαχων υλικών που περιέχουν συνδετικό υλικό όπως το τσιμέντο αλουμινίου το οποίο προσδίδει υδραυλικές ιδιότητες ρύθμισης όταν αναμειγνύεται με νερό. Αυτά τα υλικά εγκαθίστανται με χύτευση και είναι επίσης γνωστά ως πυρίμαχα σκυροδέματα.
- 3) Τα κονιάματα είναι λεπτά αλεσμένα πυρίμαχα υλικά, τα οποία γίνονται πλαστικά όταν αναμειγνύονται με νερό. Αυτά χρησιμοποιούνται για να γεμίσουν το κενό που δημιουργείται από ένα παραμορφωμένο κέλυφος και για να φράξουν το αέριο στο τοίχωμα ώστε να αποτρέψουν τη διείσδυση της σκωρίας.
- 4) Τα πλαστικά πυρίμαχα συσκευασίας συσκευάζονται σε συσκευασίες που είναι αδιαπέραστες από την υγρασία και τα ανοιχτά κομμάτια ανοίγουν την εποχή του χρήσης. Τα πλαστικά πυρίμαχα έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση.

Μία άλλη κατηγορία είναι τα μονωτικά πυρίμαχα. Τα μονωτικά πυρίμαχα έχουν αντικαταστήσει τα συμβατικά πυρίμαχα σε βιομηχανίες χαλυβουργίας και άλλα μέταλλα σε βιομηχανίες εξόρυξης. Τα μονωτικά πυρίμαχα είναι χαλαρά υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν αρμούς με ελεύθερη επένδυση. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των μονωτικών επενδύσεων αυτών είναι :

- 1) Σταθερότητα του όγκου κοπής
- 2) Η βελτίωση της τάσης
- 3) Η εξάλειψη της άρθρωσης σε σύγκριση με την επένδυση τούβλων
- 4) Η ικανότητα εγκατάστασης σε κατάσταση θερμής αναμονής
- 5) Η ευκολία στη μετακίνηση

Τα μονωτικά πυρίμαχα μπορούν να εγκατασταθούν με χύτευση, ψεκασμό κλπ. Οι μάζες περιστροφής χρησιμοποιούνται κυρίως σε κρύα κατάσταση, έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν τα επιθυμητά σχήματα με ακρίβεια. Στην Εικόνα 27 φαίνεται ένα δωμάτιο θέρμανσης πυρίμαχης συσκευής που συμπεριλαμβάνεται στη Κατηγορία των μονωτικών πυρίμαχων.



Εικόνα 27 Παρουσίαση ενός δωματίου θέρμανσης κατασκευασμένο με μονωτικά πυρίμαχα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ανάλυση της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών στις υψηλές θερμοκρασίες.

Ως σύνθετα υλικό χαρακτηρίζεται το υλικό το οποίο παράγεται με σύνθεση δύο ή περισσότερων υλικών, κατά τέτοιο τρόπο ώστε το νέο "σύνθετο" ενιαίο υλικό να έχει "καλύτερες ιδιότητες" από τα επιμέρους υλικά. Τα υλικά αυτά μπορούν να αποκτήσουν έως και 5-6 φορές μεγαλύτερη αντοχή από αυτή των απλών μετάλλων. Παρακάτω θα προβούμε σε ανάλυση των σύνθετων υλικών που όπως είναι προφανές από την λέξη "σύνθετος", είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μία συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους .

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 28 τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από συνδυασμό μεταλλικών κραμάτων, κεραμικών και πολυμερών ελαστικών.



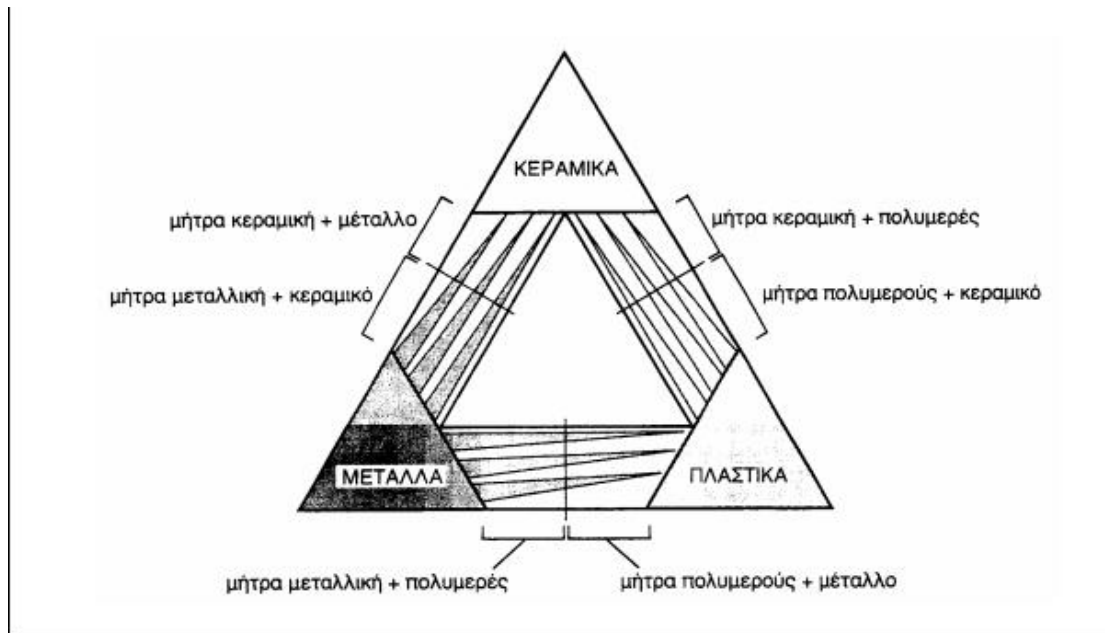
Εικόνα 28 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών με βάση την κραματική δομή τους

4.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών- Συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες

4.2.1 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Στην ουσία όμως δεν παίζουν όλα τα συστατικά μέρη του υλικού τον ίδιο ρόλο, αλλά το ένα από τα συστατικά μέρη παίζει τον ρόλο του συστατικού ενίσχυσης. Το συστατικό ενίσχυσης είναι αυτό που έχει την μικρότερη περιεκτικότητα μέσα στο συνολικό υλικό/κράμα και προσδίδει βελτιωμένες ιδιότητες, τόσο μηχανικές όσο και χημικές, ώστε το υλικό να είναι πιο ανθεκτικό κάτω από επώδυνες για την σύσταση του συνθήκες.

Το δεύτερο συστατικό ονομάζεται μήτρα είναι και αυτό συνήθως χαμηλής πυκνότητα, μεγάλου όγκου και η συμμετοχή του στο σύνθετο υλικό εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων ενίσχυσης. Αυτά τα υλικά συνήθως είναι τα υλικά με χαμηλό κόστος για αυτό τον λόγο και καταλαμβάνουν τον μεγαλύτερο όγκο στα συνθετικά υλικά. Η χαμηλή πυκνότητα του υλικού του δίνει την ικανότητα να μπορεί να μορφοποιηθεί εύκολα, ώστε να ενισχυθεί σημαντικά με συστατικά ενίσχυσης, καθώς διαθέτει πολλά ελεύθερα κενά στην κρυσταλλική δομή που είναι υποψήφια για κάλυψη από χημικά στοιχεία υψηλότερης σκληρότητας και διακράτησης της κρυσταλλικής δομής μέσω μεθόδων ομογενοποίησης των δύο συστατικών.



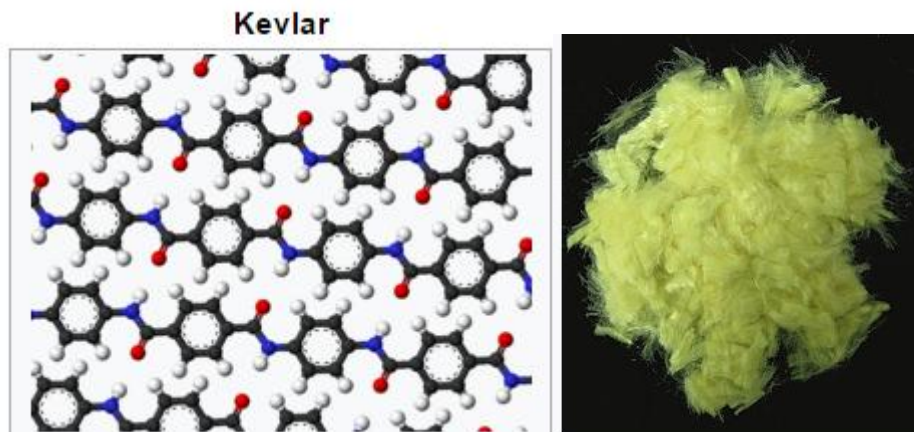
Εικόνα 29 Κατηγορίες σύνθετων υλικών με βάση το συστατικό που αποτελεί τη μήτρα και το συστατικό που αποτελεί το συστατικό ενίσχυσης

Τα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών έγινε δυνατή η φασματοσκοπία υλικών μέσω στην μικροδομή τους και πάρθηκαν πολύ σημαντικά συμπεράσματα για την δομή του κάθε υλικού και τον τρόπο που είναι καταμελημένα τα άτομα στα κρυσταλλικά πλέγματα, τον τρόπο συγκράτησης των δεσμών και τις δυνατότητες του κάθε στοιχείου σε συγκεκριμένες συνθήκες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 30, πολυμερή υλικά υπήρχαν από την αρχαιότητα. Παρόλα αυτά τα συγκεκριμένα πολυμερή ήταν συνθέσεις υλικών με δεσμούς ατόμων πολύ χαμηλής ενέργειας και δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τις εφαρμογές που χρησιμοποιούμε τα σημερινά πολυμερή.

Συνθετικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι :

- 1) Τα κεραμικά συνθετικά υλικά
- 2) Τα υλικά με μήτρα μετάλλου και ενισχυτικά στοιχεία για βελτίωση των ιδιοτήτων (Metal-Matrix composites)
- 3) Το Kevlar που συντίθεται σε διάλυμα από μονομερή φαινυλενο-διαμίνη και τερεφθαλοϋλοχρωρίδιο σε αντίδραση συμπύκνωσης αποδίδοντας ως υποπροϊόν υδροχλωρικό οξύ. Τα αποτελέσματα έχει κρυσταλλική συμπεριφορά υγρού. Το αρχικό διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τον πολυμερισμό των μονομερών φαινυλενο-διαμίνων ήταν το εξαμεθυλοφωσφοραμίδιο, αλλά για λόγους ασφαλείας, η ερευνητρια DuPont αντικατέστησε την συγκεκριμένη διαλυτή ουσία με διάλυμα N-μεθυλό-πυρρολιδόνης και χλωριούχου ασβεστίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η διεργασία πολυμερισμού ήταν τόσο σημαντική για την ανάπτυξη της τεχνολογίας στα πολυμερή και σύνθετα υλικά που η ερευνήτρια Akzo που είχε κατοχυρώσει με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας της διαλυτής ουσίας ήρθε σε διαμάχη ευρεσιτεχνίας με τους άλλους ερευνητές που προσπάθησαν να κλέψουν την σκέψη της δημιουργίας. Το συγκεκριμένο υλικό έχει πολλές εφαρμογές στις βιομηχανικές εφαρμογές, όπως στην επένδυση των φρένων και στην θωράκιση του σώματος, ενώ το χρησιμοποιείται και σε εφαρμογές προστασίας όπως αλεξίσφαιρα γιλέκα, καθώς έχει ενισχυμένη βαλλιστική αντίσταση, διότι είναι υλικό ιδιαίτερα εύκαμπτο, που μπορεί να λάβει μεγάλη επιμήκυνση χωρίς να επέλθει στο όριο θραύσης και είναι ανθεκτικό στην κόπωση.[38],[39]



Εικόνα 30 α) Δομή συνθετικού υλικού Kevlar, β) Οπτική εμφάνιση του υλικού Kevlar

4.2.2 Συμπεριφορά σύνθετων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει για τις ποικίλες κατηγορίες των σύνθετων υλικών έχουν αποδειχθεί πολλά πλεονεκτήματα, όσον αφορά την συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με άλλα υλικά. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι η μίξη ανθρακικών υλικών μπορεί να δημιουργήσει πολύ δυνατές και με υψηλή αντοχή επικαλύψεις υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει η σταθερότητα των ανθρακικών δεσμών. Αυτή η δυνατότητα υψηλής αντοχής μπορεί να εφαρμόζεται στους 1700 °C για αρκετές ώρες από την λειτουργική διαδικασία του υλικού με τα σύνθετα υλικά.

Ένα ακόμα θετικό στις υψηλές θερμοκρασίες αυτών των υλικών είναι ότι δεν ευνοείται η διαδικασία του ερπυσμού και αυτό συμβαίνει για τον λόγο του ότι η δομή

αυτών των υλικών δεν είναι συμπαγής, καθ'όλο το μήκος τους και σταματάει τα ανεπιθύμητα φαινόμενα λόγω αυτής της διαφορετικότητας.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που συμβαίνει στη λειτουργία των σύνθετων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες είναι ότι ευνοούνται οι χημικές αντιδράσεις λόγω ανομοιομορφίας του υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αντιδράσεις που προκαλούνται στα σύνθετα υλικά να αποσυντίθεται το υλικό σε απλούστερα μόρια όπως το νερό, το οξυγόνο, το άζωτο ο άνθρακας κλπ.

Κάποια από τα σύνθετα υλικά διαθέτουν μονοκρυσταλλικές ίνες αλουμίνας που είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι της επιφανειακής φθοράς και αυτό μπορεί να οδηγήσει ταχύτατα στην αστοχία. Τέτοιες ενώσεις είναι για παράδειγμα οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλουμίνας (Al_2O_3) που παρόλο που έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες έχουν μειονέκτημα στον τομέα της επιφανειακής φθοράς, λόγω χαλαρότητας των δεσμών σε υψηλότερη θερμοκρασία των $800^{\circ}C$.

Στην εικόνα 31 φαίνεται η διαφορά του παραπάνω παραδείγματος από σύνθετα υλικά που αποτελούνται από νηματικούς μονοκρυσταλλικούς τριχίτες, που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του $1\mu m$, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλει κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρύλλια και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη. Στην εικόνα 31 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από SiC και Al_2O_3 .

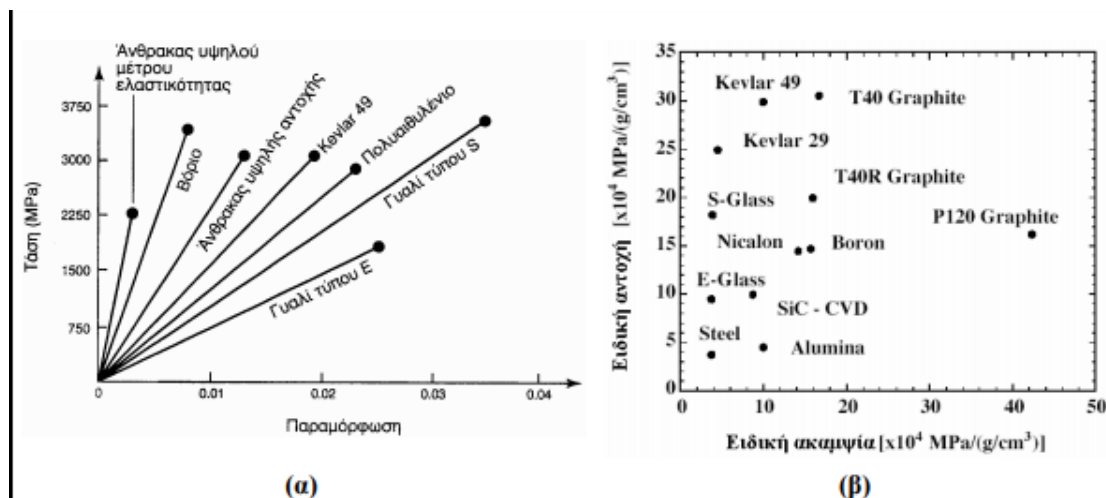
Συνοψίζοντας φαίνεται ότι παρόλο που η οργανική ένωση είναι η ίδια εντούτοις όταν υπάρχουν νηματικοί τριχίτες τα υλικά μπορούν να εμφανίζουν μεγαλύτερη συνοχή και να μην εμφανίζονται ανεπιθύμητα φαινόμενα ερπυσμού και φθορών στην ίδια θερμοκρασία. Αυτό βοηθάει αυτά τα σύνθετα υλικά να λειτουργούν σε ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες που προσεγγίζουν σχεδόν τη διπλάσια θερμοκρασία σε σχέση με τα υλικά μονοκρυσταλλικής ίνας.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC _{INA}	SiC _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}	Al ₂ O ₃ _{INA}	Al ₂ O ₃ _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}
Μέτρο ελαστικότητας (GPA)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm ³)	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

Εικόνα 31 Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχίτων από SiC και Al₂O₃

Ένα ακόμα στοιχείο που πρέπει να εξετάζεται και έχει να κάνει με την ειδική αντοχή και την ακαμψία, εξαρτάται εξίσου από την θερμοκρασία και τη χρονική διάρκεια λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα με βάση την τάση που μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε σύνθετο υλικό μέχρις ότου επέλθει η θραύση, αυτή η δύναμη σχετίζεται άμεσα με τη θερμική ευστάθεια των ινών ενός σύνθετου υλικού.

Στην Εικόνα 32 φαίνεται η τάση που επέρχεται η θραύση για κάθε υλικό και παρατηρείται ότι για τα υλικά που εφαρμόζεται υψηλή τάση για τη θραύση και εμφανίζεται μεγάλη παραμόρφωση, αυτά τα υλικά έχουν μικρή θερμική ευστάθεια ινών.



Εικόνα 32 α) Παρουσίαση τιμών παραμόρφωσης και τάση για διάφορα σύνθετα υλικά, β) Συσχετισμός ειδικής αντοχής και ειδικής ακαμψίας

Το αποτέλεσμα της θερμικής ευστάθειας ινών φαίνεται στην εικόνα 33 και είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας παραμόρφωσης που δεν αφήνει τα υλικά να συμπεριφέρονται σωστά έπειτα από κάποιες θερμοκρασίες. Όπως φαίνεται οι συνθετικές ίνες άνθρακα και αλουμινίου είναι αυτές που έχουν την υψηλότερη θερμική ευστάθεια.

Ίνα	T _{max} (°C)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

* Παρουσία οξυγόνου: T_{max}=500 °C

Εικόνα 33 Συγκριση θερμικής ευστάθειας ινών για διάφορα σύνθετα υλικά

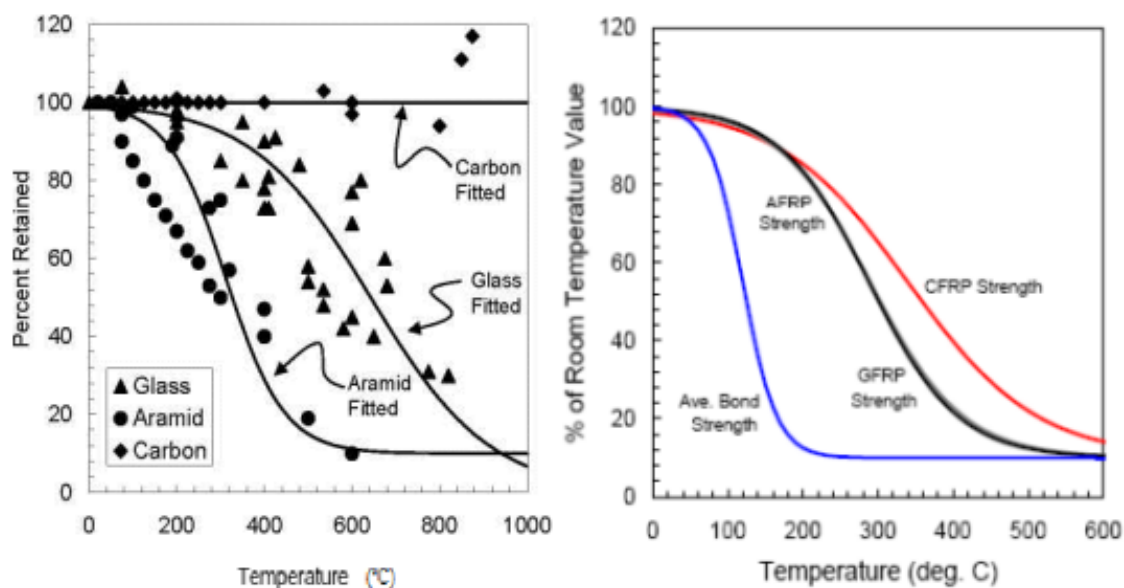
Ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία σε κατοικίες. Σύμφωνα με τη δομή τους έχουν διαφορετική προβλεπόμενη πυραντίσταση σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών και αυτό έχει να κάνει με τον χρόνο αναμονής μέχρι να αναζωπυρωθεί η φωτιά λόγω αυτού του συνθετικού υλικού. Σύμφωνα με στοιχεία που προκύπτουν από έρευνες αποδείχθηκε ότι οι ίνες είναι ανθεκτικότερες στις υψηλές θερμοκρασίες έναντι των ρητινών. Όπως αποδείχθηκε λοιπόν :

- 1) Οι ίνες άνθρακα που αποτελούνται τα σύνθετα υλικά με άνθρακα είναι ουσιαστικά ανεπηρέαστες έως τους 1000°C
- 2) Οι ίνες υαλού διατηρούν περίπου το μισό της εφελκυστικής τους αντοχής πάνω από τους 600°C
- 3) Οι ίνες αραμιδίου είναι περισσότερο εξαρτώμενες θερμοκρασιακά σε σχέση με τις ίνες υαλού.

Όταν στο συνθετικό υλικό των ινών υπάρχει και ρητίνη τότε η αντοχή του σύνθετου υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται κατά πολύ, όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Σε θερμοκρασίες 250-400 °C τα περισσότερα σύνθετα υλικά χάνουν το μισό της αρχικής αντοχής τους σε εφελκυσμό. (εικόνα 34 α)

Επίσης τα FRP (Ινοπλισμένα πολυμερή), αποτελούνται από ίνες υψηλής αντοχής που είναι πλεγμένες σε μία μήτρα ρητίνης. Αυτές οι ίνες εμφανίζουν αυξημένη δυσκαμψία και εφελκυστική περιοχή. Ένα από τα λίγα θετικά αυτού του σύνθετου υλικού είναι ότι μπορεί να προσαχθεί σε πολλά σχήματα επιφάνειας, έπειτα από την κατάλληλη προετοιμασία αυτής. Παρόλα αυτά σε υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζουν χαμηλή αντίσταση και οι θερμομηχανικές ιδιότητες τους μειώνονται, καθώς εξαρτούνται από τις ιδιότητες της μήτρας. (Εικόνα 34 β)

Επίσης ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι είναι πολύ εύφλεκτα και όταν υπάρχει μεγάλη θερμοκρασία ή έρθουν σε επαφή με τη φωτιά αναφλέγονται.



Εικόνα 34 α) Διάγραμμα αντοχής ινών υψηλών θερμοκρασιών, β) Διάγραμμα αντοχής FRP και συνάφειας

4.3 Ταξινόμηση με βάση τον τύπο πρόσμιξης των σύνθετων υλικών[40] [41]

Η δεύτερη ταξινόμηση που γίνεται στο σύνολο των συνθετικών υλικών έχει να κάνει με τον τρόπο που γίνεται η πρόσμιξη των στοιχείων και με τον τρόπο που αυτά τα στοιχεία ταξινομούνται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Έτσι ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες που είναι

- 1) Τα ινώδη σύνθετα(fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας. Τα ινώδη συνθετικά υλικά διακρίνονται ανάλογα με των προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα.

Η μακρύτερη ποσότητα ινώδους υλικού αποτελείται από άτομα άνθρακα, υδρογόνου και αζώτου διατεταγμένα υπό μορφή μορίων μακρίας αλυσίδας και υπάρχουν συγκεκριμένες διευθετήσεις επί της μοριακής δομής, με τις δυνάμεις συνεκτικότητας να συγκρατούν τα μόρια της αλυσίδας μαζί και τις ακολουθίες των μοριακών δομικών μονάδων.

Σε αυτά τα υλικά δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και συγκεκριμένα στην εφαρμογή μηχανικών κραδασμών που επιτρέπουν να διαχωρίζονται οι ελαστικές και οι ιξώδεις αποκρίσεις. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για εφαρμογές που λειτουργεί σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγιστο που παρουσιάζει το διάγραμμα (Εικόνα 38) , είναι σημαντικό δεδομένο, καθώς δείχνει ότι περίπου στους 20°C, οι ιδιότητες εφελκυσμού θα είναι πολύ ευαίσθητες έως την ποσότητα του υπάρχοντος ατακτικού υλικού. Γι'αυτόν τον λόγο και η καμπύλη 1 που δεν κατέχει ατέλειες φαίνεται λόγω έλλειψης των μηχανισμών αυτο-συγκράτησης στην θερμοκρασία δωματίου οι απώλειες είναι πολύ υψηλότερες. Παρόλα αυτά για υψηλότερες θερμοκρασία φαίνεται το συστατικό Α μειώνει τις απώλειες και λειτουργεί καλύτερα από τα συγκρινόμενα άλλα δύο. Αυτή η εναλλαγή οφείλεται κυρίως στις ιδιότητες του άνθρακα που είναι σε μεγάλες θερμοκρασίες έχει μεγάλη δυναμικότητα και μπορεί να εξυπηρετήσει.

Φαίνεται οι ρολογικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες αυτών των στοιχείων να είναι πολύ καλές και σύγχρονες, καθώς υπάρχει συνεχής βελτίωση των ιδιοτήτων που προκαλούνται από τον συμπολυμερισμό και τον εμβολιασμό του συστατικού.

[40]

Σύμφωνα με τον Meredith όταν οι ίνες υποβάλλονται σε τάσεις μεγαλύτερες από ένα μικρό ποσοστό, τότε η τάση χαλαρώνει λόγω των τμημάτων των μορίων που μετακινούνται το ένα κάτω στο άλλο κάτω από την επιρροή της αύξησης θερμότητας λόγω της τάσης που εφαρμόζεται. Ο ρυθμός χαλάρωσης εξαρτάται από την θερμοκρασία, την περιεκτικότητα σε υγρασία και το μέγεθος του στελέχους. Η ειδική ιδιότητα των ινωδών συνθετικών υλικών φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα

Ακόμα και σε τέτοια συνθετικά υλικά όπως το πολυπροπυλένιο το οποίο από την ονομασία και μόνο φαίνεται ότι έχει δυνατούς δεσμούς ανάμεσα στα άτομα που το αποτελούν, αλλά παρόλα αυτά υπάρχουν επιπλέον δράσεις για επιπλέον σκλήρυνση και ενδυνάμωση του υλικού με στρατηγικές απομάκρυνσης του ατακτικού υλικού, πλήρωσης των θέσεων και υποκατάστασης των κενών θέσεων.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 38 υπάρχουν καμπύλες για τρία δείγματα ινών πολυπροπυλενίου τα οποία έχουν εκχυλιστεί με αιθέρα και πολυμερές επτάνιο με πολλές αλληλουχίες στην σειρά, ώστε να απομακρυνθεί το υλικό που υπάρχει από τις αταξίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ύψη των κορυφών απώλειας είναι εντυπωσιακά διαφορετικά.

Οι καμπύλες διαφέρουν στις εξής ιδιότητες :

- μέγεθος μη κρυσταλλικών περιοχών (A)
- Μέγεθος ατελών κρυσταλλικών περιοχών (A')
- Τέλεια κρυσταλλικές περιοχές (C)

Συνεπώς με βάση αυτά τα στοιχεία προκύπτουν τα τρία στοιχεία της καμπύλης με τα παρακάτω στοιχεία που προκύπτουν στον πίνακα 35. Όπως φαίνεται

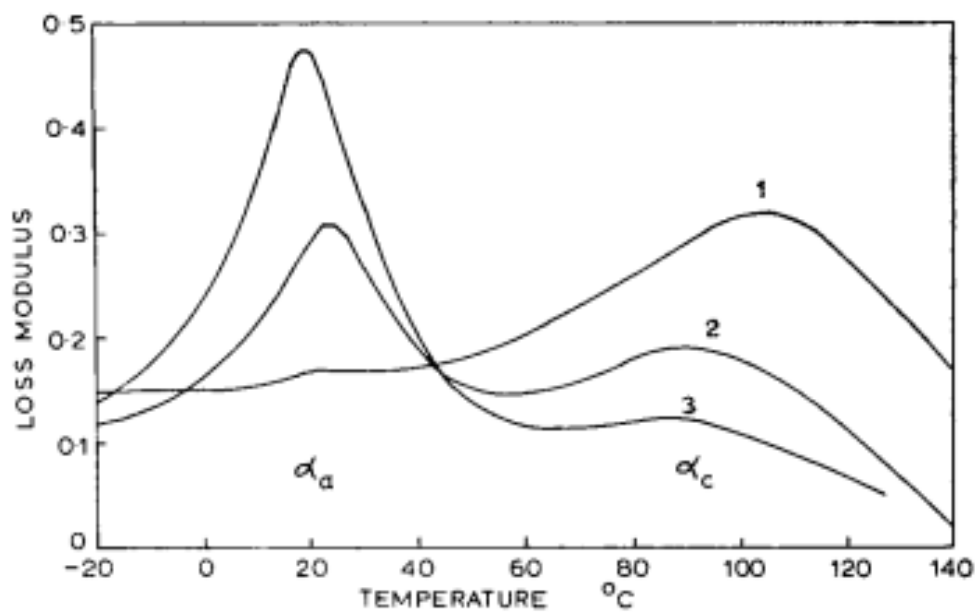
- 1) η καμπύλη 1 που έχει πολύ μικρά μεγέθη ατελειών κρυσταλλικών περιοχών με την αύξηση της θερμοκρασία αυξάνει συντελεστή απώλειας για υψηλές θερμοκρασίες, ενώ για χαμηλές θερμοκρασίες έχει τις χαμηλότερες απώλειες
- 2) Η καμπύλη 2 έχει ενδιάμεσα χαρακτηριστικά γι' αυτό δεν παρουσιάζει κάποια μέγιστα ή ελάχιστα που να ξεχωρίζουν
- 3) Η καμπύλη 3 είναι η καμπύλη με τις τέλεια κρυσταλλικές περιοχές. Όπως βλέπουμε αυτό για χαμηλές θερμοκρασίες είναι αρνητικό. Αυτό μπορεί να συμβαίνει, διότι κατά την ενεργοποίηση των μηχανισμό αυτοδιάχυσης, λόγω της αρτιότητας του κρυσταλλικού πλέγματος δεν υπάρχουν κενές θέσεις για πλήρωση των επιπέδων ολίσθησης που ξεφεύγουν από τις διατάξεις και συνεπώς κάθε μία ατέλεια ή ολίσθηση των κόκκων που μπορεί να συμβεί δεν υπάρχει χώρος για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμό αυτό-συγκράτησης ατελειών στο στοιχείο.

Στην ουσία στο διάγραμμα όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή φαίνεται να ενεργοποιούνται ειδικοί μηχανισμοί αυτόματα από το συστατικό. Για υψηλή θερμοκρασία αυτό που παίζει τον κυριότερο ρόλο, μέσα σε όλους του ελέγχους που γίνονται, ήταν η σωστή κρυσταλλική-φάση των δομών. Η απουσία παντελούς αυξημένης επεξεργασίας όμως θέτει ακόμα πιο δύσκολο το έργο της σκλήρυνση. Επίσης μία τιμή του συντελεστή απώλειας σχετίζεται άμεσα με υψηλό ποσοστό χαλάρωσης από την τάση. Αυτοί οι μηχανισμού

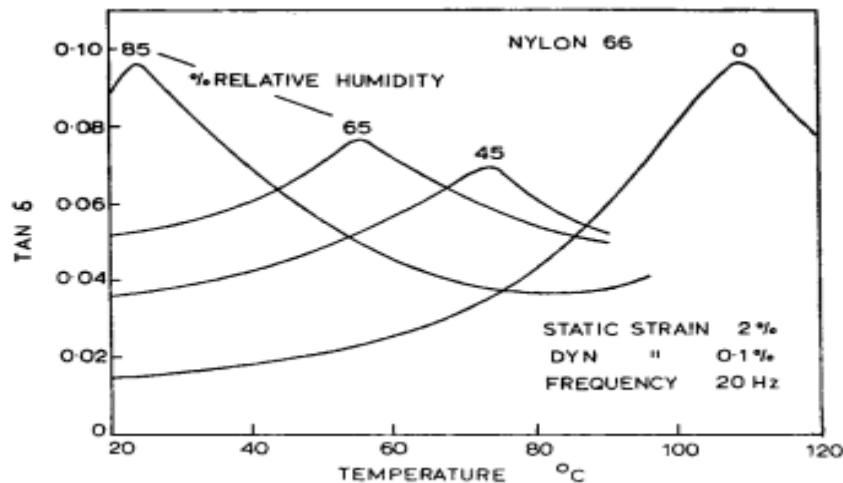
Επίσης στην Εικόνα 37 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασία στην σχετική υγρασία που, είναι ένα σημαντικό δεδομένο στοιχείο για τις ιδιότητες των συνθετικών υλικών, καθώς όταν υπάρχει υγρασία στην επιφάνεια του συνθετικού υλικού μπορούν πιο εύκολα να δημιουργούνται

<i>X</i>	<i>A</i>	<i>A'</i>	<i>C</i>	<i>A'+C</i>
0.20	0.78	0.12	0.10	0.22
0.40	0.59	0.21	0.20	0.41
0.60	0.38	0.29	0.33	0.62

Εικόνα 35 Σύσταση στοιχείων που φαίνονται στην εικόνα 38 στις καμπύλες 1,2 και 3



Εικόνα 36 Καμπύλες τριών δειγμάτων ινών πολυπροπυλενίου που εκχυλίστηκαν με αιθέρα και πολυμερές επτάνιο για να απομακρυνθεί το ατακτικό υλικό



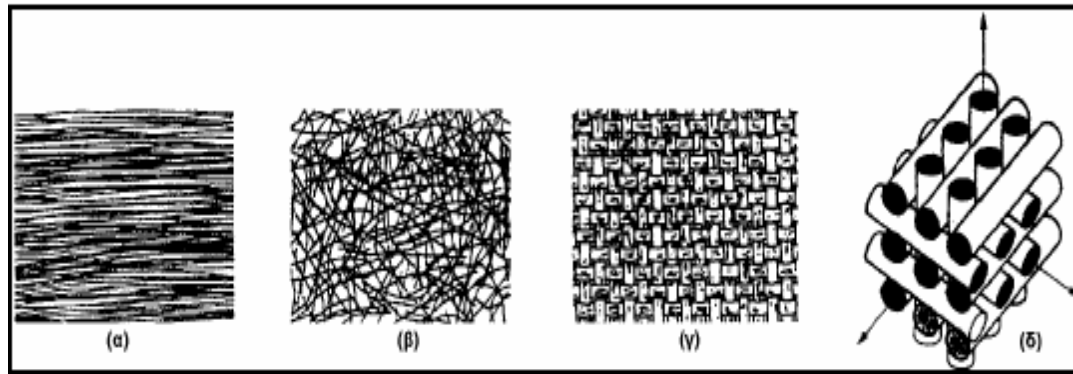
Εικόνα 37 Μεταβολή της σχετικής υγρασίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για διάφορα υλικά σε σχέση με το Nylon 66.[40]

Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε

- i) Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- ii) Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Ενώ τα πολυδιευθυντικά σύνθετα χωρίζονται στις ακόλουθες υπό-ομάδες που είναι τα :
 - Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
 - Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης
 - Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση

Όσον αφορά επίσης τις ίνες μία διάκριση των ινώδων συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς τη διάμετρο των ινών (l/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως "

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $l/d > 100$
 - Ασυνέχεια ή κοντές ίνες (Discontinuous fibers) , όταν είναι $l/d < 100$
 - Νηματίδια ή κοντές ίνες (Whiskers) : Με $d < 1\mu\text{m}$ και $l = 100\mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλου κεραμικού υλικού)
- 2) Τα στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
 - 3) Τα κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας



Εικόνα 38 Τύποι διάταξης των ινών: α) μονοδιευθυντικές ίνες, β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη[41]

Βάση ερευνών οι ίνες προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, λόγω της περίπλοκης ανάμιξής τους και της δυσκολίας παρουσίασης αταξιών, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου δεν υπάρχουν οι αρνητικοί μηχανισμοί ερπυσμού, αρνητικής διάχυσης με ταυτόχρονη εξαγωγή της εμπλουτισμένης ουσίας στο συστατικό. Δεν έχει σημασία να βρούμε αυτή τη στιγμή ποια από τις 4 δομές αντέχει παραπάνω σε χαμηλές θερμοκρασία και ποια σε υψηλές. Παρόλα αυτά αξίζει να σχολιαστεί, πως οι μονοδιευθυντικές θέσεις ινών είναι λιγότερο ανθεκτικές, καθώς δεν σχηματίζουν ισχυρές κρυσταλλικές δομές μεταξύ των άλλων ινών και μπορούν πιο εύκολα να δημιουργούν αταξία στα όρια των κόκκων και άλλα προβλήματα που έχουν να κάνουν με τον ερπυσμό των συστατικών και την διάχυση που δεν έχει σαν αποτέλεσμα την αυτοσυγκράτηση σωματιδίων με υπό κατάσταση ή πλήρωση θέσεων, αλλά πηδάζει σε άλλα πράγματα σαν υλικό.

4.4 Έρευνα για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών από τα συνθετικά υλικά- Τρόποι σκλήρυνσης.

Ο ρόλος της μήτρας ενός υλικού

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει συντελεστεί λοιπόν, η εκτενής χρήση εφαρμογών υψηλών θερμοκρασιών με σύνθετα υλικά. Σύμφωνα λοιπόν με αυτούς τους δύο ορισμούς όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1 τα συνθετικά υλικά αποτελούνται άλλοτε από μεταλλική μήτρα, άλλοτε από κεραμική μήτρα και άλλοτε από μήτρα πολυμερούς υλικού. Η μήτρα είναι στην ουσία το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός κράματος. Στην ουσία είναι το σημαντικότερο υλικό του κράματος στο οποίο βασίζονται οι ιδιότητες του κράματος που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή μηχανών, ενώ τα άλλα χρησιμοποιούνται για να προσδώσουν περαιτέρω ιδιότητες στο κράμα

Με την ανάλυση της μήτρας και της δομής του κράματος μπορεί να γίνει η διάκριση της σκληρότητας του υλικού, των τάσεων που μπορεί να απορροφήσει, χωρίς να συμβούν ανεπιθύμητα φαινόμενα, καθώς και τις θερμοκρασίες που μπορεί να λειτουργεί χωρίς να υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης, ερπυσμού κ.α.

Σε μία έρευνα στο Ινστιτούτο έρευνας Υλικών στο πανεπιστήμιο Tohoku και με πολύ ακριβείς μεθόδους, οι επιστήμονες προσπάθησαν να εκτιμήσουν με ακρίβεια μεθόδους, ώστε να προσδιορίσουν τις σημαντικές ιδιότητες των διαφόρων συνθετικών υλικών, προκειμένου να επιτευχθεί η πραγματοποίηση νέων υλικών, που θα συνδέονταν μεταξύ του με έναν από τους τρόπους σύνδεσης που θα αναλυθούν παρακάτω.

Οι στόχοι των επιστημόνων του πανεπιστημίου ήταν να κατανοήσουν την δομική μορφολογία που συναντάται σε μακρομοριακό επίπεδο μέσα το πυρήνα των ατόμων ενός κράματος. Δηλαδή μέσω της έρευνας του κράματος σε ατομικό επίπεδο με εξελιγμένες μορφές έρευνας και εξελιγμένα μικροσκόπια και αναλυτές φάσματος προσπάθησαν να παρατηρήσουν τον μακρομοριακό "κόσμο" των υλικών, ώστε να βελτιώσουν τις ιδιότητες τους. [42]

Ανάλυση της δομής των υλικών σε μακρομοριακό επίπεδο

Οι Atsuo Kasuya et al. σχολίασαν στην έρευνα τους ότι τα νανοσωματίδια κάτω από λίγα νανόμετρα σε μέγεθος έχουν δομές και λειτουργίες υλικού που διαφέρει από τον όγκο των ξεχωριστών γεωμετρικών διαστάσεων του και της ισχυρής κβαντικής τους απομόνωσης. Με λίγα λόγια απέδειξαν ότι οι ιδιότητες σε μακρομοριακό επίπεδο διαφέρουν κατά πολύ σε σχέση με τις ιδιότητες του υλικού που φαίνονται στην

πραγματικότητα. Αυτές οι ιδιότητες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εφαρμογή σε συσκευές και εφαρμογές μοναδικές.

Στην έρευνα τους εστίασαν σε κάποια στοιχεία και βρήκαν για ποια μορφολογία αυτών των στοιχείων, δηλαδή για ποια αναλογία ατόμων σε ένα συστατικό επιτυγχάνεται η βέλτιστη σταθερότητα στη δομή του υλικού. Τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης για την δομή του υλικού που αποτελείται από Άνθρακα (C) και σελήνιο (Se) έδειξαν ότι οι πιο σταθερές δομές των δύο συστατικών αυτών είναι το CdSE33 και CdSE34. [42]

Οι ίδιοι επιστήμονες έχουν διεξάγει έρευνες και για τις παρακάτω δομές έχοντας εξάγει τις πιο σταθερές αναλογίες συστατικών.

- 1) CdS
- 2) CdTe
- 3) ZnS
- 4) ZnSe

Με την έρευνα τους απέδειξαν ότι τα μαζικά καθορισμένα και μακροσκοπικά παραγόμενα νανοσωματίδια, τα οποία μέχρι τώρα ήταν περιορισμένα στο στοιχείο του άνθρακα για τον ρόλο της ενδυνάμωσης, λόγω των αποδεδειγμένων ιδιοτήτων που έχει ο άνθρακας και χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, τώρα μπορούν να επεκταθούν σε μία μεγαλύτερη ποικιλία συνθετικών συστημάτων με καινούργια σωματίδια που έχουν ακόμα πιο σταθερή δομή.

Πλέον έχοντας τα τεχνολογικά μέσα για την ανάλυση αυτών των μακροσκοπικών δομών μπορούμε να δούμε τις ιδιότητες αυτών των σωματιδίων στο μικροσκόπιο και να κρίνουμε ποια σύσταση των υλικών είναι εν τέλει και η πιο ανθεκτική, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλες τάσεις, όπως αυτές που αναλύονται στην παρούσα διπλωματική.

Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την βελτίωση των ιδιοτήτων είναι η επιλεκτική μεταβολή της στερεάς κατάστασης ενός συστατικού, ώστε να βελτιωθεί η σκληρότητα του. Η μέθοδος επίτευξης αυτού ονομάζεται MOF (Metal-organicframework) μεταλλική-οργανική μορφοποίηση και έχει διεξαχθεί στο εργαστήριο από τους Atsuoetal.

Άλλη μία καινοτομία που διεξάγεται σε διάφορα εργαστήρια ανάλυσης της δομής των συστατικών είναι η διαδικασία ψύξης και η εκτίμηση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των μεταλλικών γυαλιών προκειμένου να αναλυθεί η μεταβολή τους σε σχέση με την

θερμοκρασία και να εξαχθεί τελικά η βέλτιστη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί το κάθε κράμα γυαλιού.

Πυρηνικός Συντονισμός πυρήνων (NMR -Nuclearmagneticresonance) για την εξαγωγή αναλογιών με μεγάλη σταθερότητα σε υλικά

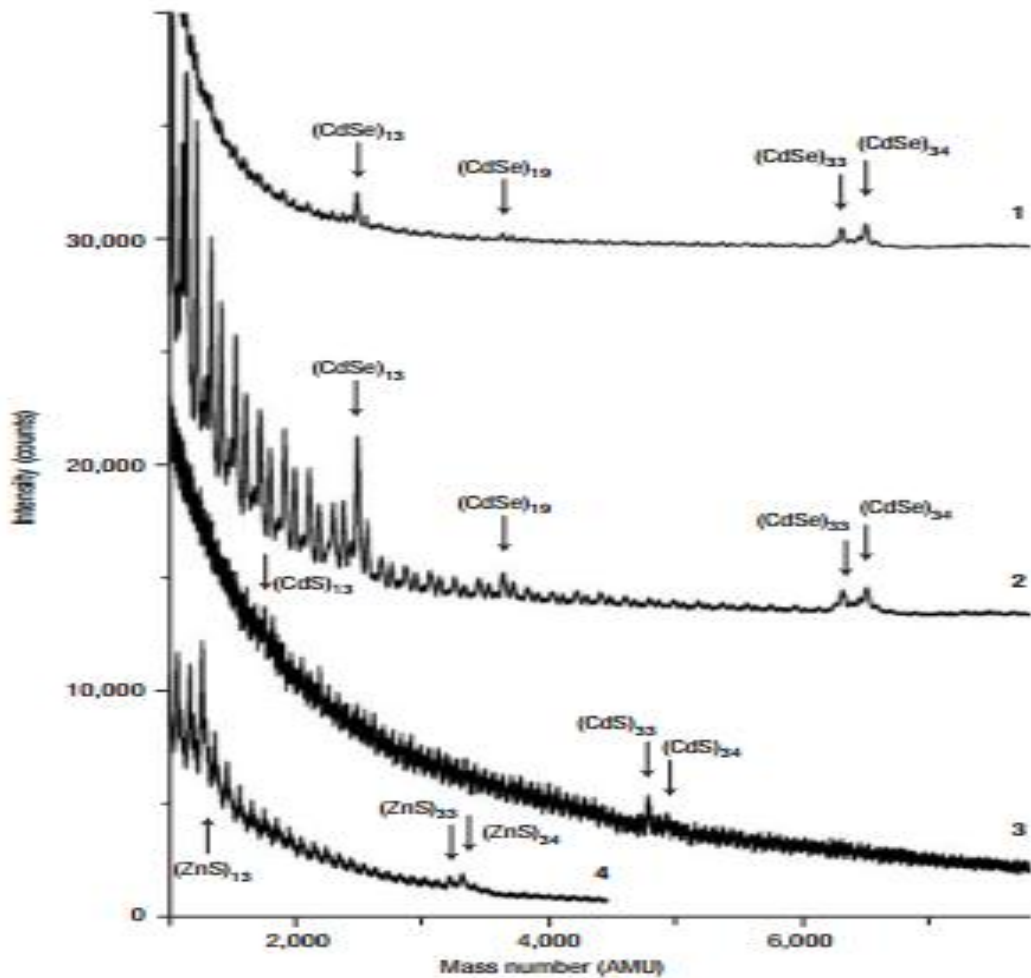
Στην Εικόνα 39 ύστερα από πείραμα, μετριέται η σταθερότητα αυτών των νανοσωματιδίων, με μέτρηση της μάζας φάσματος με διαχωρισμό των κρυσταλλικών δειγμάτων CdSe, CdS, ZnS και ZnS που αναφέρθηκαν παραπάνω σε πειράματα των Atsuoetal.

Στην ουσία στο διάγραμμα φαίνεται στο άξονα X , για ποια τιμή του μαζικού αριθμού αυτά τα σωματίδια δείχνουν αξιόλογες κορυφές στο διάγραμμα. Όπως φαίνεται αυτό συμβαίνει για $n=33$ (για το ZnS_{33} και ZnS_{34}) και $n=13,33$ (για το ZnS) , οπότε προκύπτει για αυτό το κρυσταλλικό δείγμα ότι οι ισχυρές δομές δημιουργούνται με μαζικούς αριθμούς $n=33$ και $n=13,33$. Αυτές οι κορυφές είναι που καθορίζουν και την αναλογία των ατόμων που δίνουν την πιο σταθερή δομή στο συστατικό

Με το ίδιο τρόπο προκύπτουν οι αναλογίες και για το κράμα $CdSe$ με τις αντίστοιχες κορυφές που δίνει η φασματογραφία. Σύμφωνα με τους επιστήμονες οι κορυφές αυτές είναι γνωστό ότι αντιστοιχούν σε κάποια αναλογία, συνεπώς αναζητώντας στην βιβλιογραφία μπορεί να φανεί ποια αναλογία αντιστοιχεί σε κάθε κορυφή (n).

Για το CdSe συγκεκριμένα έχουμε :

- 1) $n= 2,9$ που συμβαίνει διαδικασία βίαιης αφαίρεσης, και που αναμένεται θραύση στα συσσωματώματα σε σωματίδια χαμηλότερης μάζας.
.Αυτό υποδεικνύει την ακραία σταθερότητα του $(CdSe_{13})$
- 2) $n=3,3$ που συμβαίνει διαδικασία βίαιης αφαίρεσης, και που αναμένεται θραύση στα συσσωματώματα σε σωματίδια χαμηλότερης μάζας. Αυτό υποδεικνύει την ακραία σταθερότητα του $CdSe_{19}$
- 3) $n=4,4$ και $n=6$ που συμβαίνει διαδικασία βίαιης αφαίρεσης, και που αναμένεται θραύση στα συσσωματώματα σε σωματίδια χαμηλότερης μάζας.
Αυτό υποδεικνύει την ακραία σταθερότητα του $CdSe_{33}$ και $CdSe_{34}$



Εικόνα 39 Διαγραμματική απεικόνιση για οριακούς μαζικούς αριθμούς που συμβαίνει διαδικασία βίαιης αφαίρεσης σωματιδίων και μετατροπή σε σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας για εύρεση αναλογίας σταθερής δομής

Επεκτείνοντας την έρευνα οι Atsuoetal. έδειξαν πως γίνεται η απορρόφηση του μήκους κύματος από δύο συγκεκριμένες αναλογίες του C_dSe και συγκεκριμένα του C_dSe_{33} και του C_dSe_{34} . Αυτή η απορρόφηση παρουσιάζεται με δύο καμπύλες και φαίνεται για ποια μήκη κύματος μπορεί να γίνει απορρόφηση των νάνο-σωματιδίων, ώστε να γίνει η σκλήρυνση των υλικών. Όπως φαίνεται οι μεγάλες καμπύλες και για τις δύο περιπτώσεις εμφανίζονται στα 420 nm. Συνεπώς προκύπτει από την έρευνα ότι η παροχή των επιθυμητών νάνο-σωματιδίων στο συστατικό (κοκκοβολή) είναι επιθυμητό να γίνει κοντά σε εκείνο το μήκος κύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Εφαρμογές υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες

Ολοκληρώνοντας λοιπόν την ανάλυση του συνόλου των υλικών δηλαδή των

- 1) Κεραμικών υλικών
- 2) Μεταλλικών υλικών
- 3) Σύνθετων υλικών

αναλύσαμε τις ιδιότητες της κάθε βασικής κατηγορίας, κάνοντας εμβάθυνση στους τρόπους λειτουργίας της μικροδομής των ατόμων μέσα στα υλικά. Προέκυψαν πολλά ενδιαφέροντα αποτελέσματα από το θεωρητικό υπόβαθρο και τις έρευνες των επιστημόνων που παρουσιάστηκαν για τον τρόπο που τα συγκεκριμένα υλικά λειτουργούν κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Όπως φαίνεται σημαντικό στην μελλοντική έρευνα είναι η μεγαλύτερη προσαρμογή αυτών των υλικών σε εφαρμογές και διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας, καθώς εκεί υπάρχει η δυσκολία εύρεσης καινοτόμων υλικών που θα αντέχουν τις υψηλές καταπονήσεις και τις τριβές που αναπτύσσονται, με σκοπό να αποφεύγονται ανεπιθύμητα φαινόμενα με σημαντικότερο και κοινώς πιο γνωστό αυτό του ερπυσμού που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1, και αναλύθηκαν οι επιπτώσεις του.

Με σκοπό λοιπόν να αναλυθεί η λειτουργία αυτών των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες θα γίνει στο παρακάτω κεφάλαιο η παρουσίαση

- 1) Μηχανολογικών εφαρμογών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες
- 2) Ηλεκτρολογικών εφαρμογών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες

Συγκεκριμένα θα γίνει ανάλυση των υλικών που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές και θα σχολιαστεί ο λόγος που χρησιμοποιούνται τα συγκεκριμένα υλικά και οι ιδιότητες που τα κάνουν απαραίτητα για την διαδικασία.

5.2 Μηχανολογικές εφαρμογές υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες [43]

Η μηχανολογικές εφαρμογές και κατασκευές με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυξάνονται όλο και περισσότερο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ανάγκη από ανάπτυξη και των υλικών που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές εφαρμογές.

Η χρήση των υλικών στις μηχανολογικές εφαρμογές έχουν συνήθως ένα κοινό γνώρισμα. Αυτό είναι ότι η πλειοψηφία αυτών των εφαρμογών γίνονται υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι

- 1) Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αυτοκινητοβιομηχανία. Συγκεκριμένα υπάρχουν διάφορα υλικά που πρέπει να χρησιμοποιηθούν και να καλύψουν τον σκελετό του αυτοκινήτου που δέχεται καταπονήσεις, τον κινητήρα του αυτοκινήτου, με όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του που θέλουν εξειδικευμένη ανάλυση και επιλογή ανθεκτικών υλικών στις υψηλές θερμοκρασίες και στις κρούσεις των υψηλά ενεργοποιημένων σωματιδίων του καυσίμου στα τοιχώματα του κινητήρα (π.χ. κρούσεις των ατόμων του καυσίμου στα τοιχώματα του κινητήρα).
- 2) Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην Αεροναυπηγική και την αεροδιαστημική. Στον τομέα αυτόν οι ταχύτητες που αναπτύσσονται υπό την δράση της βαρύτητας για τα αεροπλάνα και για τα διαστημικά λεωφορεία κατά τη διάρκεια που εξέρχονται από την ακτίνα της βαρυτικής έλξης είναι πολύ υψηλές και οι τριβές που δημιουργούνται μεταξύ των υλικών και του αέρα είναι πολύ υψηλή. Συνεπώς απαιτούνται υλικά, τα οποία να έχουν μεγάλη αντοχή σε συνεχόμενες καταπονήσεις υψηλής θερμοκρασίες. Όσον αφορά τα αεροπλάνα υπάρχουν πολλά υλικά που πρέπει να αντέχουν όπως τα παράθυρα των αεροπλάνων, το υλικό κατασκευής του κάθε σημείου του αεροπλάνου με βάση την γεωμετρία του και τις πιέσεις που δέχεται βάση ανάλυσης της ρευστομηχανικής του αέρα που έρχεται σε επαφή με αυτό.
- 3) Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την ναυπηγία. Άλλος ένας κλάδος μηχανολογικών εφαρμογών είναι η δημιουργία των καλουπιών για την κατασκευή πλοίων, ώστε αυτά να είναι σωστά κατασκευασμένα και να μην υπάρχουν ατέλειες στην δομή του υλικού τους.
- 4) Ένας ακόμα παράγοντας που χρειάζονται υλικά υψηλής αντοχής που δεν παρουσιάζουν συνέπειες κόπωσης και πλαστικής παραμόρφωσης λόγω της θερμικής και καταπόνησης τάσης έχουν να κάνουν με τον μηχανολογικό

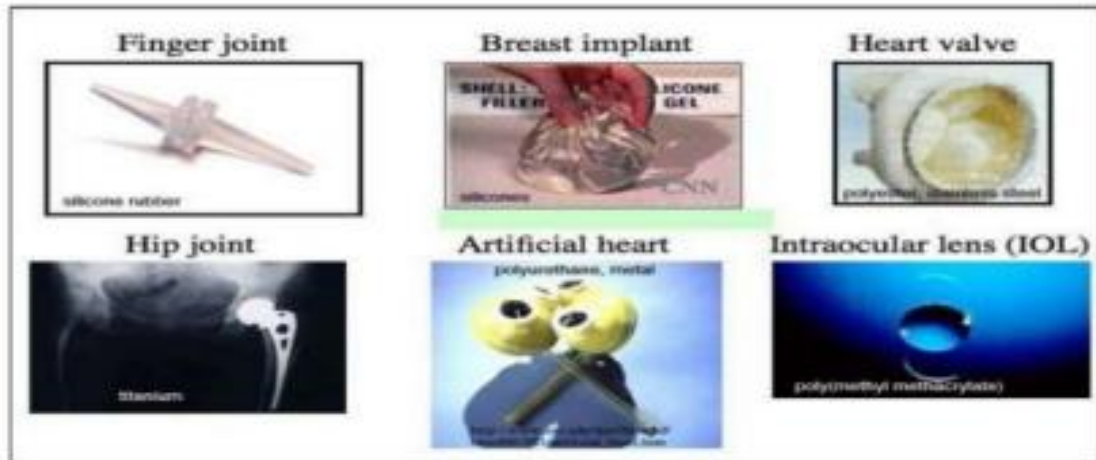
εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στην Ιατρική. Όπως γνωρίζουμε η ιατρική με την ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει θέσει πολλούς στόχους για προηγμένα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιούνται για την θεραπεία ασθενειών, την εύρεση ελαττωμάτων μέσα στον οργανισμό με ειδικά μηχανήματα που θα εντοπίζουν με κάμερα το πρόβλημα σε κάποιο όργανο. Πολύ σημαντική πλέον στην ιατρική είναι και η εμφύτευση διαφόρων οργάνων και μερών του σώματος, σε ασθενείς που έχουν ένα ποσοστό αναπηρίας και επιθυμούν να προβούν σε εγχείρηση για να βελτιωθεί η κατάσταση της υγείας τους. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 40 τέτοιες εμφυτεύσεις ολόκληρων οργάνων ή μέρους ενός οργάνου είναι :

- 1) Η εμφύτευση μέρους δακτύλου
- 2) Η εμφύτευση μαστού.
- 3) Η εμφύτευση και αποκατάσταση χαλασμένης βαλβίδας στην καρδιακή δίοδο
- 4) η εμφύτευση ολόκληρου ισχίου ή μέρους χόνδρου σε αρθρώσεις που είναι καταπονημένες λόγω της προχωρημένης ηλικίας όπως του γόνατου
- 5) Η τεχνητή καρδιά

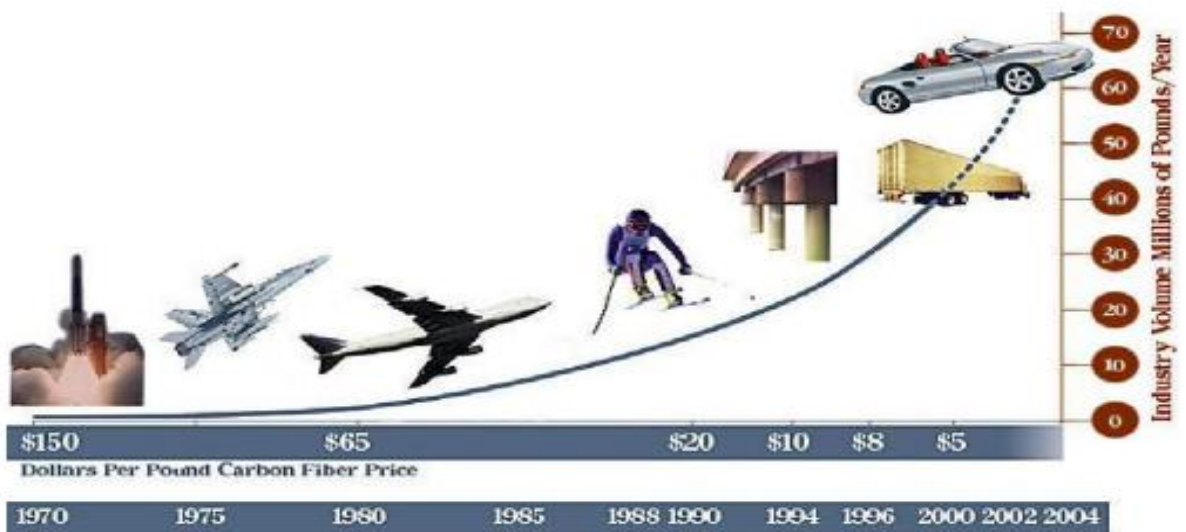
Στην Εικόνα 41 παρουσιάζονται τα ποσοστά παραγωγής σύνθετων υλικών για μηχανολογικές εφαρμογές που όπως φαίνεται το κόστος παραγωγής κατά αύξουσα σειρά είναι το εξής

- 1) σύνθετα υλικά για το αυτοκίνητο
- 2) Σύνθετα υλικά για την οικοδομή
- 3) Σύνθετα υλικά για "αξεσουάρ" αθλητισμού
- 4) Σύνθετα υλικά για επιβατικά αεροπλάνα
- 5) Σύνθετα υλικά για πολεμικά αεροπλάνα
- 6) Σύνθετα υλικά για την αεροδιαστημική και τα διαστημικά λεωφορεία.

Biomaterials



Εικόνα 40 Βιουλικά που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική για την βελτίωση της ποιότητας υγείας των ασθενών



Εικόνα 41 Βιομηχανικός όγκος παραγωγής σύνθετων υλικών ανά χρόνο και τιμή των σύνθετων υλικών για διάφορες κατασκευές και χρήστες

5.2.1 Αεροναυπηγική και αεροδιαστημική

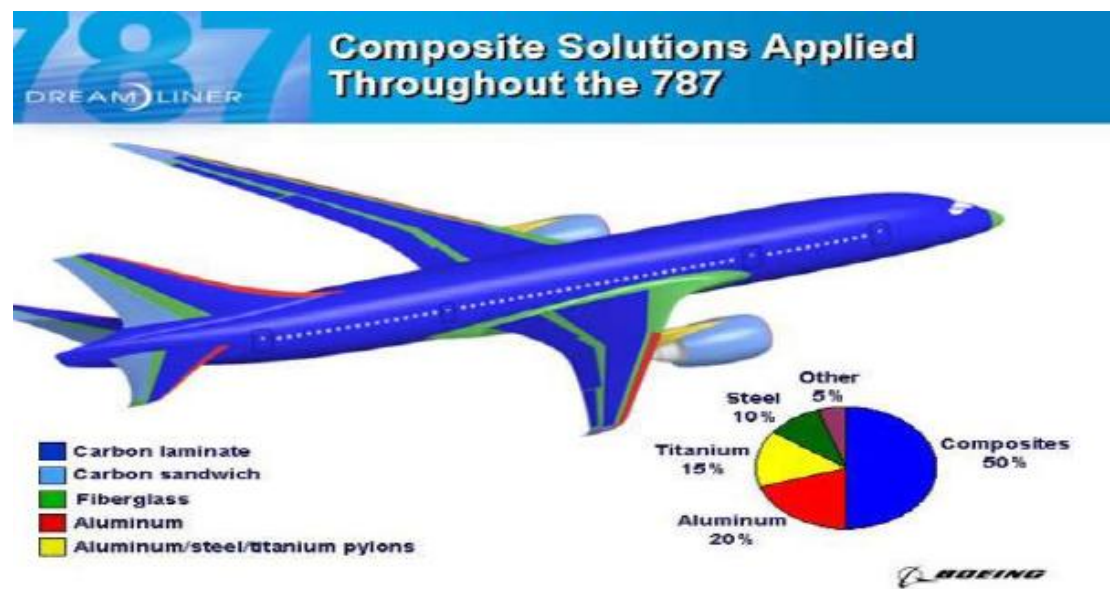
Στον τομέα της αεροναυπηγικής οι δυσκολίες που εμφανίζονται όσον αφορά την επιλογή υλικών έχουν να κάνουν με τις υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται στα τοιχώματα των αεροπλάνων και των διαστημόπλοιων λόγω των υψηλών ταχυτήτων

που αναπτύσσουν. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες είναι αποτέλεσμα των υψηλών τριβών που εμφανίζει ο αέρας με το τοίχωμα.

Οι συνθετικές κατασκευές μπορούν και αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα αρκετά ικανοποιητικά διότι έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα υλικά. Συγκεκριμένα η σωστή κατασκευή αυτών οδηγούν

- 1) σε λείες επιφάνειες
- 2) σε μειωμένες τριβές
- 3) καλύτερη αεροδυναμική
- 4) χαμηλότερες θερμοκρασίες στα τοιχώματα

Στην Εικόνα 42 φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση της χρήσης συνθετικών υλικών σε ένα επιβατικό αεροπλάνο. Όπως φαίνεται το 50% των τοιχωμάτων είναι κατασκευασμένο με συνθετικά υλικά.



Εικόνα 42 Σύνολο υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των τοιχωμάτων ενός επιβατικού αεροπλάνου τύπου Boeing

5.2.2 Κατασκευή μηχανών εσωτερικής καύσης [43],[44],[45],[46]

Θέλοντας να επικεντρωθούμε περισσότερο στο σημείο των μηχανολογικών κατασκευών που γίνεται η εφαρμογή των υψηλότερων εφαρμογών λόγω της καύσης θα αναφερθούμε στην κατασκευή μηχανών εσωτερικής καύσης σε διάφορους τομείς.

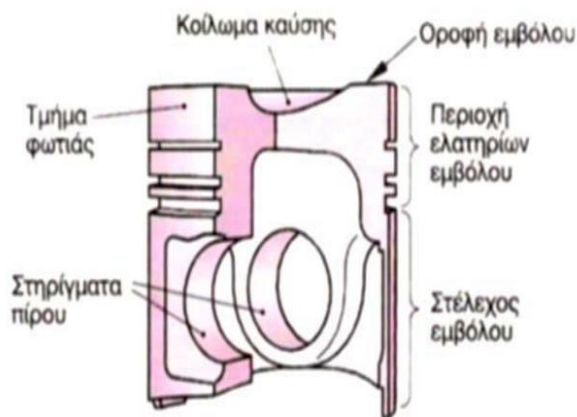
Σε αυτές τις μηχανές τα υλικά δέχονται μεγάλες θερμικές καταπονήσεις και στην κατηγορία αυτών των υλικών αποτελούνται υλικά όπως

- 1) Οι θάλαμοι καύσης
- 2) Οι βαλβίδες εξαγωγής
- 3) τα έμβολα
- 4) Ο διωστήρας

που η δομή του φαίνεται στις Εικόνα 43 α) , 43 β), 43 γ) και 43 δ) . Η χρησιμοποίηση κεραμικών για διάφορα τοιχώματα είναι πολύ συχνή λόγω κάποιων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζονται παρακάτω. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται όπως είναι φυσικό στον θάλαμο που γίνεται η καύση και την χρονική στιγμή, όπου ο όγκος εμβολισμού είναι πολύ μικρός και η πίεση πολύ μεγάλη, ώστε να υπάρχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα μετατροπής της θερμικής σε κινητική ενέργεια, σύμφωνα με τον 1ο νόμο της Θερμοδυναμικής .

Το κοίλωμα της καύσης πρέπει να αντέχει μεγάλες κρούσεις, διότι λόγω της αυξημένης πίεσης, κατά τη διάρκεια της καύσης υπάρχουν κρουστικοί μηχανισμοί από τα μικροσωματίδια του καυσίμου πάνω στο τοίχωμα, που οδηγούν σε ακόμα μεγαλύτερες τριβές του τοιχώματος. Όταν το τοίχωμα δεν είναι κατασκευασμένο με τα κατάλληλα υλικά μπορούν να παρουσιαστούν πολλά προβλήματα που περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, λόγω της αδυναμίας συγκράτησης των σωματιδίων που διαθέτουν υψηλό ενεργειακό φορτίο που προσπαθούν να εκτονώσουν στο περιβάλλον.

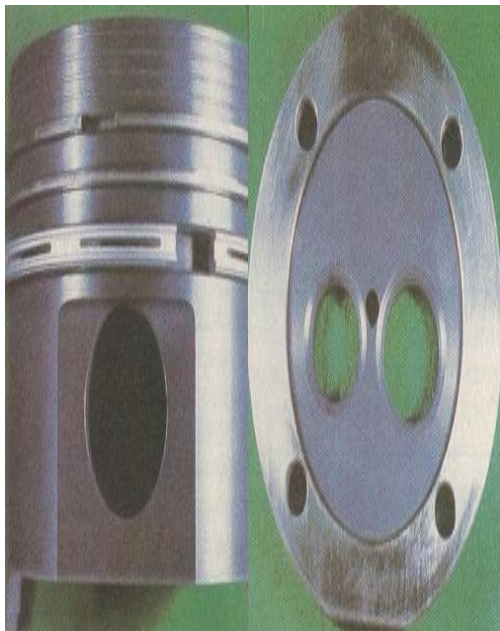
Όσον αφορά τις βαλβίδες εξαγωγής, αυτές είναι το μέσο στο οποίο περνάει το καύσιμο κατά την καύση αφού έχει υπερθερμανθεί. Συνεπώς οι βαλβίδες έχοντας μία πολύ εκλεπτυσμένη γεωμετρία, είναι πολύ ευαίσθητες σε φαινόμενα κόπωσης, ερπυσμού που μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπανόρθωτη φθορά. Για αυτόν τον λόγο οι βαλβίδες είναι από τα υλικά της μηχανής εσωτερικής καύσης που φτιάχνονται με τα πιο κοστοβόρα και τα πιο καινοτόμα υλικά από άποψη θερμικής και μηχανικής καταπόνησης. Αυτό συμβαίνει και για έναν ακόμα λόγο που είναι εξίσου σημαντικός. Επειδή οι βαλβίδες είναι το μέσο μεταξύ του οποίου γίνεται η καύση μέσα στο κουτί του κινητήρα και του περιβάλλοντος, αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε πρόβλημα προκύψει (θραύση, ράγισμα βαλβίδας), μπορεί να οδηγήσει σε εκτόνωση της ενέργειας του καυσίμου στο περιβάλλον που μπορεί να είχε επιπτώσεις στην λειτουργία του αυτοκινήτου και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην ανάφλεξη του καυσίμου (αν δεν γίνει ελεγχόμενη καύση μέσα στον κινητήρα του αυτοκινήτου και το καύσιμο οδηγηθεί, άκαυστο έξω από του κουτί καύσης).



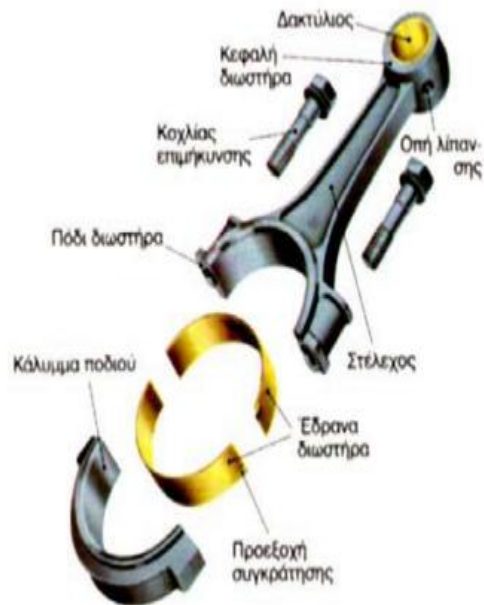
α)



β)



γ)



δ)

Εικόνα 43 α) Σχηματική αναπαράσταση ενός θαλάμου καύσης πριν την εισαγωγή των επιπλέον εξαρτημάτων, β) Βαλβίδες τιτανίου με υψηλή αντοχή σε θερμικές καταπονήσεις, γ) Πρόσοψη και κάτοψη κεραμικού εμβόλου, δ) Ποιοτική παράσταση διστήρα με τα διάφορα μέρη

Όπως είναι γνωστό οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές με σημαντικότερες και πιο δύσκολες από άποψη θερμικών καταπονήσεων να είναι οι εξής :

- 1) Η αυτοκινητοβιομηχανία
- 2) Η ναυπηγία

3) Η αεροναυπηγία

Όσον αφορά την ναυπηγία οι μηχανές είναι πολύ μεγάλου μεγέθους καθώς το έργο που πρέπει να παρθεί για την κίνηση των μεγάλων πλοίων μέσα στο νερό είναι πολύ μεγαλύτερο, από τι τα αντίστοιχα έργα που πρέπει να παραχθούν για την κίνηση ενός αυτοκινήτου και ενός αεροπλάνου.

Επίσης στην αεροναυπηγία υπάρχει το θετικό της ψύξης μέσω αέρα. Επειδή το μέσο μετακίνησης είναι ο αέρας υπάρχουν τεχνικές, ώστε ο κινητήρας να ψύχεται με φυσικό τρόπο μέσω του αέρα και τα τοιχώματα να δέχονται μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αντίστοιχα της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ναυπηγίας και της αεροναυπηγίας.

5.2.3 Υλικά για τις μηχανές εσωτερικής καύσης, για κατασκευές πολύ υψηλών θερμοκρασιών (Αεροδιαστημική), λοιπές εφαρμογές [48], [49]

Χωρίς να γίνει ιδιαίτερη επέκταση επί του θέματος, διότι σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των εφαρμογών αξίζει να σημειωθεί ότι η χρησιμοποίηση των μεταλλικών υλικών για κατασκευή θερμικών μηχανών κατά τα προηγούμενα χρόνια ήταν ατυχής. Αυτό συνέβη επειδή τα μέταλλα είναι σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας υλικά για τους κινητήρες θερμότητας και είναι επίσης καλοί θερμικοί αγωγοί, δύο ιδιότητες που είναι επιζήμιες για την αποδοτική καύση.

Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας πολλών μετάλλων είναι μικρότερη από 600 C, και έτσι οι μεταλλικοί κινητήρες πρέπει να λειτουργούν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες για να καούν πλήρως το καύσιμο. Επίσης, καθώς τα μέταλλα είναι καλά θερμικοί αγωγοί, η θερμότητα που παράγεται μέσα στο μεταλλικό θάλαμο καύσης οδηγείται εύκολα μέσω του μεταλλικού περιβλήματος. Συνεπώς, απαιτείται υγρή ψύξη για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του μεταλλικού κινητήρα και αυτό επιταχύνει την απώλεια θερμότητας (περίπου το 30% της παραγόμενης θερμότητας χάνεται στο νερό ψυκτικού ή καλοριφέρ). Επιπλέον, τα προκύπτοντα ατελή προϊόντα καύσης απορρίπτονται μέσω των καυσαερίων που προστίθενται στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

Αυτές οι αντισταθμίσεις θερμοκρασίας που απαιτούνται από τους μεταλλικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης οδηγούν σε χαμηλή καύση και χαμηλή θερμική απόδοση. Έτσι, οι μεταλλικές μηχανές εσωτερικής καύσης υποφέρουν κυρίως από τρία προβλήματα:

1. Χαμηλή απόδοση καύσης (λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας των μετάλλων),
2. Σημαντική απώλεια θερμότητας (λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των μετάλλων) και
3. Μερική φθορά Με αποτέλεσμα κάποια περιορισμένη διάρκεια μεταλλικών εξαρτημάτων).

Έτσι τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται στις μηχανές καύσης κεραμικά και σύνθετα υλικά που έχουν πιο υψηλές αντοχές σε θερμικές καταπονήσεις. Κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής :

1) Κεραμικά ζirkονίου.[50]

Αυτά τα κεραμικά μηχανικής ονομάστηκαν κάποτε «κεραμικοί χάλυβες», λόγω της πολύ υψηλής αντοχής τους κατά τη θραύση μεταξύ των κεραμικών.

Επίσης, τα κεραμικά ζirkονίου έχουν μία από τις υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας (~ 2000 C) μεταξύ όλων των κεραμικών και διατηρούν κάποια μηχανική αντοχή κοντά στο σημείο τήξης τους (2750 ° C). Ωστόσο, η χαμηλή αντίσταση ερπυσμού και η χαμηλή αντίσταση σε θερμικό σοκ ($\Delta T \sim 350C$) θα μπορούσαν να προκαλέσουν πρόβλημα. Τα κεραμικά ζirkονίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές λοιπόν που είναι μικρής χρονικής περιόδου αλλά με τεράστιες καταπονήσεις.

Μία τέτοια εφαρμογή είναι η προσθαλάσσωση του διαστημικού λεωφορείου όταν αυτό γυρνάει από διαστημικές αποστολές. Όπως είναι γνωστό λόγω της επιτάχυνσης της βαρύτητας, όταν η κάψουλα με τους αστροναύτες μπει στο βαρυτικό πεδίο της γης, δέχεται υψηλές θερμικές καταπονήσεις, λόγω της τριβής του αέρα στα τοιχώματα. Αυτό το κεραμικό χρησιμοποιείτε για την συγκεκριμένη εφαρμογής, καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι τεράστιες (Εικόνα 44)



Εικόνα 44 Φάση προσγείωσης διαστημικής κάψουλας τη στιγμή που εισέρχεται στο βαρυτικό πεδίο της γής και αναπτύσσει πολύ υψηλές θερμοκρασίες. [<http://www.spacex.com/media>]

Οι αεριωθούμενες μηχανές αεροσκαφών χρησιμοποιούν επί του παρόντος επικάλυψη με βάση την ζirkονίου για να αυξήσουν τις θερμοκρασίες εισόδου του στροβίλου για να βελτιώσουν την απόδοση.

- 2) Κεραμικά Aluminas. Είναι ένα πολύ χρησιμοποιημένο κεραμικό, που χρησιμοποιείται παρόλα αυτά κυρίως σαν ηλεκτρικός μονωτήρας και σπανίως θεωρήθηκε ως κατάλληλο υλικό για κινητήρες, πιθανώς λόγω της χαμηλής αντοχής τους στη θραύση και της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Ωστόσο, έχει υπάρξει πρόσφατο ενδιαφέρον για την κατασκευή εξαρτημάτων αλουμίνας για μικροκινητήρες. [52]
- 3) Καβίδια του πυριτίου. Ένα υλικό με πολύ υψηλή σκληρότητα, το καρβίδιο του πυριτίου έχει λάβει τα τελευταία χρόνια κάποια προσοχή από την κοινότητα Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) στην προσπάθειά τους να αναπτύξουν μια μικροσκοπική μηχανή. Εντούτοις, τα ίδια προβλήματα που προσβάλλουν το νιτρίδιο του πυριτίου θα ισχύουν και για το καρβίδιο του πυριτίου, και η σκληρότητα του θραύσματος του καρβιδίου του πυριτίου είναι ακόμη χαμηλότερη από εκείνη του νιτριδίου του πυριτίου. Το καρβίδιο του πυριτίου εξακολουθεί να έχει πολλές άλλες χρήσεις που δεν απαιτούν μηχανική ακεραιότητα και αντοχή.
- 4) Νιτρίδια του πυριτίου. Μεταξύ των διαφόρων τεχνικών κεραμικών που έχουν αναπτυχθεί εδώ και δεκαετίες, το νιτρίδιο του πυριτίου έχει λάβει την μεγαλύτερη προσοχή για χρήση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και στροβίλους. Έχει καλή θερμική αντίσταση ($\Delta T \sim 600$ C) και καλή αντίσταση

ερπυσμού. Αν και είναι πολύ επιθυμητό ως υλικό κινητήρα, η κακή μηχανική τους αντοχή (χαμηλή αντοχή σε θραύση) αποκλείει τη χρήση τους σε εφαρμογές φέροντες φορτία. Καθώς η ευθραυστότητα των κεραμικών με βάση το πυρίτιο θεωρείται εγγενές χαρακτηριστικό τέτοιων υλικών, λόγω της ισχυρής τους σύνδεσης, ομοιοπολικής και ιοντικής, πιστεύεται ότι είναι εφικτές μόνο περιορισμένες αυξήσεις στην αντοχή σε θραύση του νιτριδίου του πυριτίου. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών κεραμικού μήτρας (CMC) θεωρείται μια πιο ελκυστική εναλλακτική λύση, αλλά η επιτυχία σε αυτή την προσέγγιση ήταν περιορισμένη.[52]

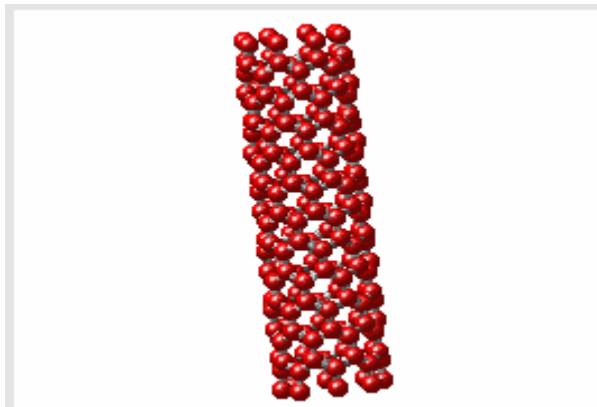
Παρόλο που έχει σημειωθεί κάποια πρόοδος με την πάροδο των ετών, η επεξεργασία του νιτριδίου του πυριτίου παραμένει πρόβλημα (αναφ. 20) και τα μεγαλύτερα δομικά στοιχεία νιτριδίου πυριτίου έχουν ακόμη κατασκευαστεί. Το νιτρίδιο του πυριτίου δεν μπορεί να θερμανθεί πάνω από 1850 ° C για να πυκνώσει επειδή διασπάται σε πυρίτιο και άζωτο. Επίσης, η ομοιοπολική σύνδεση του δεν επιτρέπει την εύκολη πυροσυσσωμάτωση και πλήρη συμπύκνωση.[54], [55]

Όπως φαίνεται τελικά, η προσπάθεια για βελτίωση αυτών των μηχανών, μέσω πειραματικών διατάξεων που αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε στοιχείου και τρόπους για ενδυνάμωση των ήδη υπάρχοντων είναι πολύ σημαντικοί για να εξελιχθούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης και να γίνουν πιο αποδοτικές με υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και συνεπώς και υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και μεγαλύτερα ποσά κινητικής ενέργειας για το ίδιο ποσό παροχή θερμότητας σε κάποιο καύσιμο.

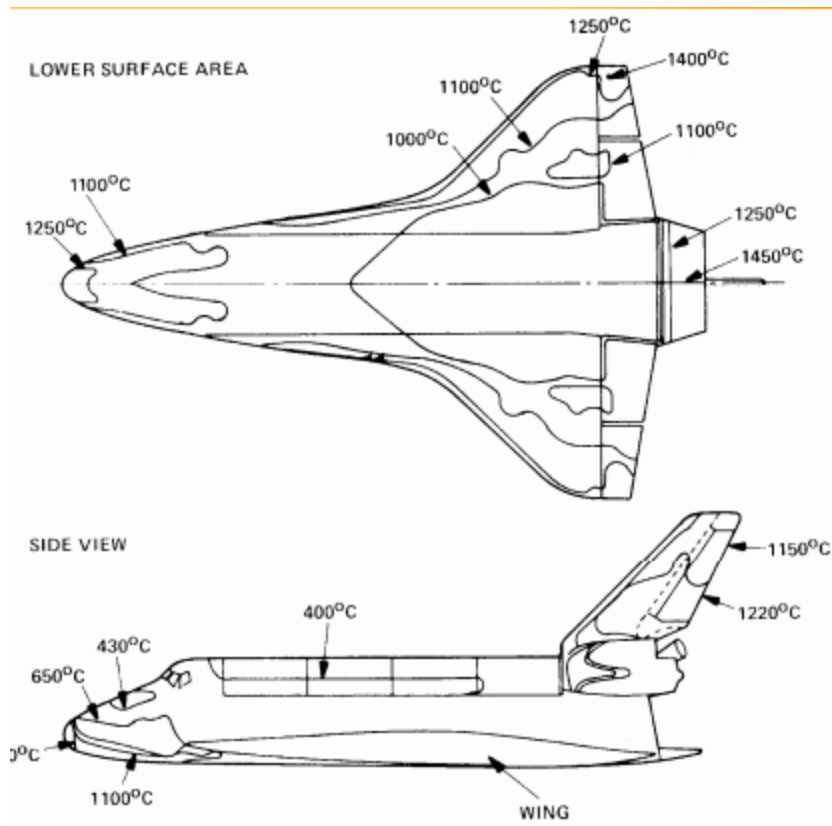
Γενικότερα η συνεχόμενη ανάπτυξη καινοτόμων υλικών φέρνει μια συνεχή επανάσταση στον χώρο της ναυτεχνολογίας υλικών και της τεχνολογίας πληροφοριών, οι οποίες συγκλίνουν ώστε να δώσουν στους επιστήμονες έναν άνευ προηγουμένου έλεγχο της ύλης σε μοριακή κλίμακα. Η σημερινή εστίαση βασίζεται σε εύρεση υλικών και συστατικών που θα μπορούν να είναι από την μία πιο αποδοτικά και με υψηλότερες αντοχές και από την άλλη να έχουν χαμηλό βάρος, ώστε να μπορούν να είναι πιο ανθεκτικά και με μεγαλύτερο χρόνο ζωής.

Σύμφωνα με το κατασκευαστικό ερευνητικό προσωπικό της NASA, τα σύνθετα υλικά, υπάρχουν υλικά που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην τεράστια αύξηση της αντοχής σε διάφορες εφαρμογές αεροδιαστημικής, για να μειωθεί το βάρος και η απόδοση του αεροσκάφους. Τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται αναφορικά σε ρακέτες τένις και σε άλλες δραστηριότητες. Στόχος είναι η εστίαση στην μικροδομή του σε μεγαλύτερο επίπεδο και η κατασκευή νανοσωλήνων, μέσα στο εργαστήριο ώστε να φανεί η αντοχή τους σε υψηλές τριβές και καταπονήσεις, που έχουν ως αποτέλεσμα της θερμική καταπόνηση μεγάλης διάρκειας. Σχηματικά παρουσιάζονται τέτοιοι νανοσωλήνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τοιχώματα σε αεροδιαστημικά σκάφη παρακάτω. (Εικόνα 45)

Επίσης με βάση τον πειραματικό υπολογισμό που αναπτύσσονται στα τοιχώματα ενός διαστημικού λεωφορείου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν επιτρέπεται χρήση μεταλλικών υλικών, αλλά μόνο σύνθετων κεραμικών SiC/SiC ή C/C . [55]



Εικόνα 45 Παραστατική αναπαράσταση νανοσωλήνων σύνθετων υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αεροδιαστημικά λεωφορεία στο μέλλον, σύμφωνα με εκπροσώπους της NASA[55]



Εικόνα 46 Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε ένα Διαστημικό λεωφορείο κατά την περιήγησή του στο Διάστημα [56]

5.3 Ηλεκτρικές - Ηλεκτρονικές εφαρμογές υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες

Σε αυτήν την κατηγορία εμφανίζονται τα υλικά που βοηθούν τις μηχανολογικές συσκευές, ώστε να γίνεται έλεγχος των λειτουργιών και να πραγματοποιούνται κάποιες λειτουργίες που είναι αδύνατον να συμβούν μηχανικά, λόγω των υψηλών απαιτήσεων των μηχανών. Συνεπώς για αυτές τις λειτουργίες χρησιμοποιούνται υλικά που χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό ρεύμα και συμβάλλουν και αυτά σε διάφορες συσκευές που λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία.

Μία εφαρμογή που χρησιμοποιείται ευρέως και είναι στην ουσία μία ηλεκτρονική εφαρμογή που βοηθάει στον συνεχή έλεγχο μηχανολογικών συσκευών, ώστε να μην

υπάρχει κάποιο πρόβλημα στις λειτουργίες σημαντικών μηχανολογικών εφαρμογών, όπως ο έλεγχος των προβλημάτων στα

- 1) Διαστημόπλοια
- 2) Αεροπλάνα
- 3) Αυτοκίνητα

5.3.1 Μικρό-ηλεκτρομηχανικές μικρό-συσσκευές σε διάφορες εφαρμογές [57]

Είναι οι Μικρό-ηλεκτρομηχανικές μικρό-συσσκευές (Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS)), που σύμφωνα με το μελλοντικό διαστημόπλοιο που προορίζεται να δημιουργηθεί, πρόκειται να φτιαχτούν με προηγμένα υλικά υψηλής αντοχής σε θερμικές καταπονήσεις μεγάλης διάρκειας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Εικόνα 48)

5.3.1.1 Μικρό-ηλεκτρομηχανικές μικρό-συσσκευές για την Αεροδιαστημική

Η προσπάθεια της Nasa να αναπτύξει υλικά συνεχώς καλύτερα για την δημιουργία αντοχής στα θερμικά σοκ είναι φανερή. Σύμφωνα με την Nasa όταν το διαστημόπλοιο περάσει στο διάστημα ο κυριότερος κίνδυνος θερμικών καταπονήσεων είναι η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία (GCR) που παράγεται σε μακρινές εκρήξεις του σουπερνόβα.

Παρόλα αυτά τέτοιες συσκευές χρησιμοποιούνται και σε πολλές άλλες εφαρμογές που και εκεί υπάρχουν όχι τόσο υψηλές θερμοκρασίες , όσο στα διαστημικά λεωφορεία, αλλά πάλι υπάρχουν θερμικές καταπονήσεις που θέτουν αναγκαία την ύπαρξη κάποιων υλικών, ώστε οι Μικρόελεγχτές να χρησιμοποιούνται σωστά, με σωστές ενδείξεις και να μην παρουσιάζουν προβλήματα ένδειξης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στα ηλεκτρονικά αυτά μηχανήματα ενδείξεων, καθώς αν η ένδειξη είναι λανθασμένη μπορεί να προκληθούν ανεπανόρθωτα προβλήματα στην κατασκευή που οι Μικρό-ηλεκτρομηχανικές μικρό-συσσκευές ελέγχουν, καθ'όλη τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

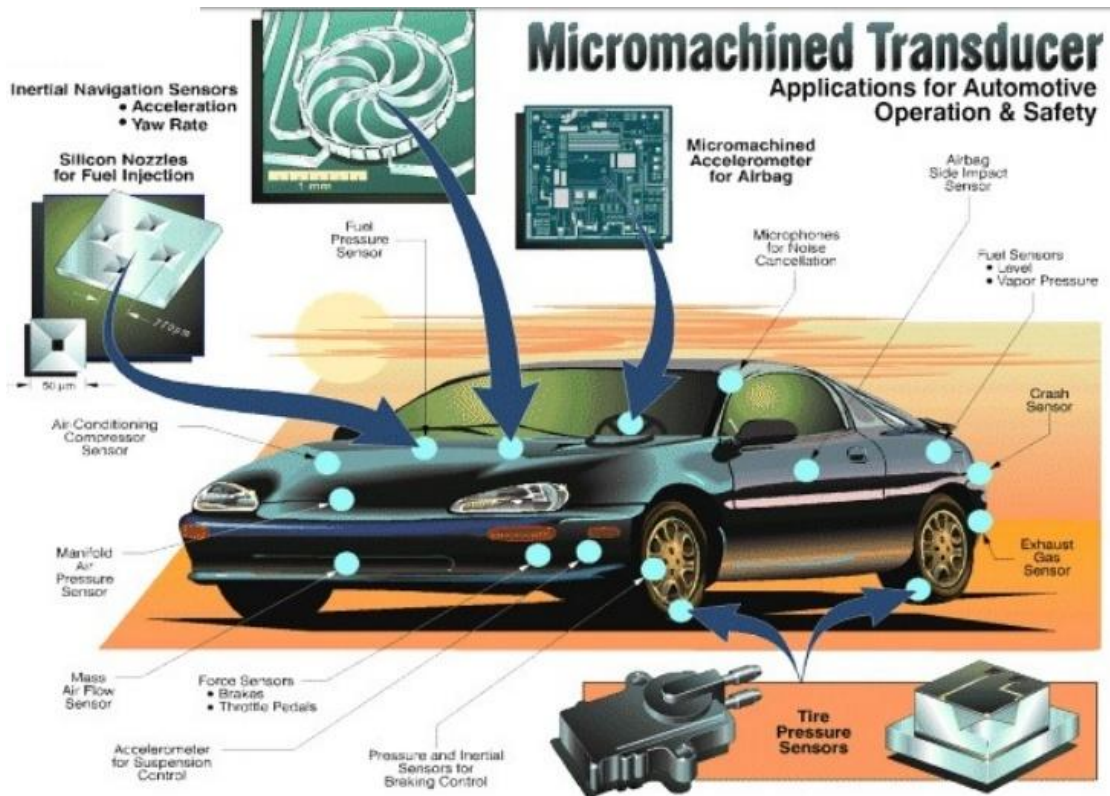
5.3.1.2 Μικρό-ηλεκτρομηχανικές μικρό-συσσκευές για τα αυτοκίνητα

Εφαρμογές των MEMS στα αυτοκίνητα είναι οι παρακάτω : Εικόνα 47

- 1) Αισθητήρας πίεσης παροχής καυσίμου
- 2) Αισθητήρας πίεσης ελαστικών
- 3) Αισθητήρας κλιματισμού του αυτοκινήτου
- 4) Αισθητήρας μικροεπιτάχυνσης για ενεργοποίηση του αερόσακου
- 5) Αισθητήρα ακροφυσίου σιλικόνης για έγχυση καυσίμου
- 6) Αισθητήρας εξώθησης καυσίμων

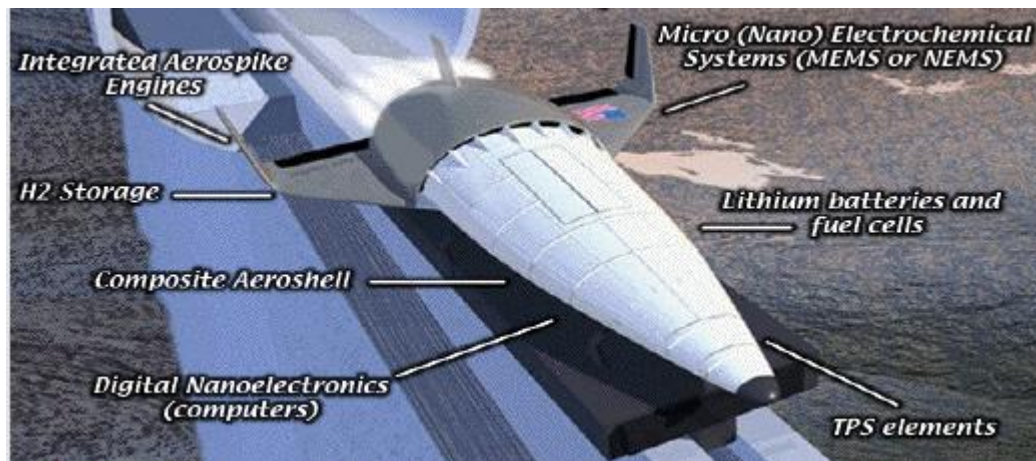
Όπως φαίνεται αυτοί οι αισθητήρες πρέπει να είναι πολύ ακριβής στους υπολογισμούς, καθώς είναι ζωτικής σημασία για ένα αυτοκίνητο. Κατά συνέπεια η προσπάθεια για συνεχή βελτίωση των πλακετών (βλέπε Εικόνα 47 Micro machined Accelerometer for Airbag) με καινούργια υλικά είναι αναγκαία, ώστε να υπάρχει σωστή λειτουργία των μηχανολογικών εφαρμογών κατ'επέκταση και να αποφεύγονται οι μηχανικές αστοχίες στις μηχανολογικές εφαρμογές λόγω λανθασμένων μετρήσεων. Η αντοχή αυτών των αισθητήρων έχει να κάνει με την Διηλεκτρική σταθερά του υλικού που είναι φτιαγμένα. Η επιδίωξη των επιστημόνων είναι η εύρεση υλικών ή συνθετικών που έχουν σχετικά υψηλή διηλεκτρική σταθερά και συνεπώς το ρεύμα δεν επηρεάζει πολύ τον ηλεκτρονικό αισθητήρα στην λειτουργία του.

Συνήθως ένα από τα πιο διαδεδομένα υλικά που χρησιμοποιείται σε αυτές τις εφαρμογές είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) το οποίο παίζει τον ρόλο του υποστρώματος της ηλεκτρονικής μικρο-συσκευής και προστατεύει από την θερμική καταπόνηση τα μικρο-κυκλώματα της ηλεκτρονικής συσκευής. Το στρώμα αυτό του οξειδίου ονομάζεται φωτόαντιστάκτης και υφίσταται μία διαδικασία ακτινοβόλησης, ώστε να γίνει η αφαίρεση των φωτό ευαίσθητων οξειδίων που υπάρχουν πάνω στο υλικό. Τελικά αυτό που απομένει είναι ένα λεπτό φιλμ πυριτίου που βοηθάει να υπάρχουν υψηλά επίπεδα ακρίβεια MEMS. Αυτή η διαδικασία δεν περιγράφεται σε αυτήν την φάση γιατί είναι ιδιαίτερα περίπλοκη.



Εικόνα 47 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρων MEMS σε ένα αυτοκίνητο[56]

[https://www.nasa.gov/vision/space/gettingtospace/16sep_rightstuff.html]



Εικόνα 48 Σχηματική αναπαράσταση για διαστημόπλοια επόμενης γενιάς σύμφωνα με την παρουσίαση από τη NASA[55]

Οι μικροελεγχτές παίζουν ρόλο και σε πολλές άλλες συσκευές που λειτουργούν σε μικρότερες θερμοκρασίες, αλλά είναι και εκεί σημαντική η σωστή λειτουργία τους

όπως είναι η λέβητες, τα συστήματα θέρμανσης γενικότερα, τα συστήματα ψύξης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί. Επίσης χρησιμοποιούνται εκτός από διαστημικά λεωφορεία και στους διαστημικούς σταθμούς στο διάστημα.

Η χρήση του πυριτίου σε αυτές τις συσκευές γίνεται λόγω των παρακάτω

- 1) ο πυρίτιο είναι άφθονο, φθινό και μπορεί να μεταποιηθεί σε απaráμιλλη καθαρότητα
- 2) Η ικανότητα του πυριτίου να εναποτίθεται σε λεπτά φιλμ είναι πολύ επιδεκτική στα MEMS.
- 3) ο υψηλός ορισμός και η αναπαραγωγή σχημάτων διάταξης πυριτίου με χρήση φωτολιθογραφίας είναι ιδανικό για υψηλά επίπεδα ακρίβειας MEMS
- 4) τα κυκλώματα μικροηλεκτρονικής πυριτίου είναι κατασκευασμένα κατά παρτίδες (ένα δισκίο πυριτίου περιέχει).

Άλλοι κρυσταλλικοί ημιαγωγών που περιλαμβάνουν το γερμάνιο (Ge) και το αρσενικό του γαλλίου (GaAs) είναι εξίσου υλικά που χρησιμοποιούνται ως υλικά υποστρώματος λόγω παρόμοιων εγγενών χαρακτηριστικών, αλλά το πυρίτιο διακρίνεται από τους άλλους ημιαγωγούς στο ότι μπορεί να οξειδωθεί εύκολα για να σχηματιστεί ένα χημικά αδρανές και ηλεκτρικά μονωτικό επιφανειακό στρώμα SiO₂ σε έκθεση στον ατμό.[58]

5.3.3 Μόνωση ηλεκτρικών καλωδίων

Μαζί με αυτές τις λειτουργίες υπεισέρχεται και η ανάγκη μόνωσης ηλεκτρικών καλωδίων για την ασφάλεια των ατόμων που χρησιμοποιούν τις συσκευές. Οι μονώσεις γίνονται με υλικά που έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται συνθετικά υλικά(PVC) που έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε θερμικές καταπονήσεις

5.3.4 Πυκνωτές κινητήρων μονίμου λειτουργίας[61],[62]

Μία ακόμη ηλεκτρολογική εφαρμογή που δέχεται υψηλές θερμικές καταπονήσεις και είναι ανάγκη να κατασκευάζεται από υλικά υψηλής αντοχής στην υψηλή θερμοκρασία είναι οι πυκνωτές κινητήρων μονίμου λειτουργίας. Αυτοί οι πυκνωτές λειτουργούν ως απομονωτές θερμότητας και ως ασφάλεια σε περίπτωση κάποιου βραχυκυκλώματος. Συνεπώς εκτός από τα φυσικά τους χαρακτηριστικά πρέπει να

έχουν και τα χαρακτηριστικά του υλικού που βοηθάει ακόμα περισσότερο στην απομόνωση. Η επιλογή των υλικών γίνεται με βάση την διηλεκτρική του αντοχή, ώστε να μη υπάρχει πρόβλημα στην συσκευή.

Ανάλογα με τον τύπο του πυκνωτή και τον τρόπο λειτουργίας καθορίζεται και το κατά πόσο αναγκαίο είναι να χρησιμοποιηθεί ένα πολύ καλό υλικό στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, ώστε να μην δέχεται θερμικές καταπονήσεις. Για παράδειγμα σε μία ηλεκτρολογική εφαρμογή που παρουσιάζει υψηλές θερμοκρασίες δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται πυκνωτές αλουμινίου διότι παρουσιάζουν διαρροές και μείωση της ονομαστικής του χωρητικότητας.

Συγκεκριμένα σε κυκλώματα μεγάλων συχνοτήτων, που είναι ιδιαίτερης σημασίας η σωστή λειτουργία του πυκνωτή για την ασφάλεια της εφαρμογής λειτουργίας χρησιμοποιούνται κεραμικά μεγάλων απωλειών, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος βραχυκυκλώματος.

Επίσης υπάρχουν οι λεγόμενοι υπέρ-πυκνωτές (super-capacitors), οι οποίοι δουλεύουν σε πολύ μεγάλες τάσεις σε εγκαταστάσεις ηλεκτρικού ρεύματος, σε αυτοκίνητα για την παροχή ρεύματος στις ηλεκτρονικές συσκευές κ.α.

6. Συμπεράσματα

Όπως προκύπτει από την παρούσα εργασία η σημαντικότητα επιλογής υλικών με την ανάπτυξη της τεχνολογίας κρίνεται αναγκαία. Φαίνεται ότι οι ανάγκες του σύγχρονου ανθρώπου και οι προσδοκίες του αυξάνονται και κατά συνέπεια είναι ανάγκη να αυξηθεί και η τεχνολογία που προσφέρεται με σκοπό την επίτευξη αυτών των πρακτικών.

Η κατασκευή των υλικών και η επιλογή τους πρέπει να επιλέγεται με βάση τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργήσουν κατά την χρήση ενός μηχανήματος. Κάποια από τα σημαντικότερα προβλήματα, όπως αναφέρεται είναι η φθορά του υλικού από τις υψηλές θερμοκρασίες, οι υψηλές τριβές, ο ερπυσμός, οι ατέλειες στην δομή του υλικού, όπως αυτά περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Φαίνεται επίσης ότι με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τα κεραμικά και τα σύνθετα υλικά φαίνεται να παίρνουν τον ρόλο των μεταλλικών υλικών σε εφαρμογές και μηχανές υψηλής θερμοκρασίας, τόσο σε μηχανολογικές, όσο και σε ηλεκτρολογικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές. Αυτό είναι απόρροια της λειτουργίας των συγκεκριμένων μηχανών σε μεγαλύτερες θερμικές και τασικές καταπονήσεις λόγω της εξέλιξης των μηχανολογικών μηχανών και της καλύτερης απόδοσης τους.

Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η ανακάλυψη νέων σύνθετων υλικών που θα μπορούν να ανταπεξέλθουν στα "θέλω" του μέλλοντος τόσο στον τομέα της μηχανολογίας όσο και της ηλεκτρολογίας, καθώς αυτοί είναι δύο κλάδοι που αλληλοσυνδέονται και η σωστή λειτουργία του ενός προϋποθέτει την σωστή λειτουργία και του άλλου.

Τα πειράματα που κάνουν οι επιστήμονες με πολύ εξελιγμένες τεχνικές νανοδιείσδυσης και παρατήρησης είναι αναγκαία για να ανακαλυφθούν ακόμα πιο δυνατές δομές που θα έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες από τις προηγούμενες.

7. Βιβλιογραφία

- 1) [J. F. Shackelford, Introduction to Material Science for Engineers, 5th ed., Prentice Hall, New Jersey (2000)]
- 2) <https://web.iit.edu/sites/web/files/departments/academic-affairs/academic-resource-center/pdfs/MaterialsCreep.pdf>
- 3) [Dowling N.E., «Mechanical Behaviour of Materials: Engineering methods for deformation, fracture & fatigue», Prentice Hall Europe, 1993]
- 4) [Vernon J., «Introduction to Engineering Materials», Palgrave McMillan, 2003 (4th ed.)]
- 5) [Χρυσουλάκης Γ. & Παντελής Δ., «Επιστήμη & Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Παπασωτηρίου, 1996 (1η έκδοση)]
- 6) [Πανδώρα Ψυλλάκη ,ΕΝΟΤΗΤΑ: ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Χημεία & Τεχνολογία Υλικών», 2005-06
- 7) Dowling, Norman E. Mechanical Behavior of Materials.3rd edition. 2007
- 8) V.A Bely, A.I Sviridenok, M.I Petrokovets, V.G. Savkin, Friction and Wear in Polymer-Based Materials
- 9) Γ. Χρυσουλάκη, Ι. Παντελή, Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα (1996)
- 10) technical university of Crete, Dept. of production engineering & management, micromachininig & manufacturing modeling laboratory
- 11) technical university of Crete, Dept. of production engineering & management, micromachininig & manufacturing modeling laboratory
- 12) [Michael Kassner Michael Kassner,Fundamentals of Creep in Metals and Alloys, 2nd Edition]
- 13) [Arthur J. McEvily, “Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention, Second Edition”, 5 SEP 2013]
- 14) [G. BERNASCONI and G. PIATTI, Creep of Engineering Materials and Structures]

- 15) [Δρ Γεωργαντζινός Κ. Στ, Αντοχή Υλικών Τμήμα Τεχνολογίας Αεροσκαφών, Σ.Τ.Ε., ΤΕΙ Χαλκίδας]
- 16) William D. Callister, JR, Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, 5η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα
- 17) Δρ.-Μηχ. Άγγελος Μαρκόπουλος, Λέκτορας ΕΜΠ Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών, ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
- 17α) Mehdi Mazaheri, Daniele Mari, Zohreh Razavi Hesabi, Robert Schaller, Gilbert Fantozzi “Multi-walled carbon nanotube/nanostructured zirconia composites: Outstanding mechanical properties in a wide range of temperature”, Composites Science and Technology (2011)
- 18) Mehdi Ma, High Temperature Behavior of Nano-Structured Ceramic Composites Studied by Mechanical Spectroscopy, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, THÈSE NO 5523 (2013)
- 18α) Δρ.-Μηχ. Άγγελος Μαρκόπουλος Λέκτορας ΕΜΠ, “ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ”, Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών
- 18β) <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/3%20MHXANIKH%20SYMPERIFORAw.pdf>
- 19) [J.S. Juan, Mechanical spectroscopy, Materials Science Forum 366-388 (2001) 32-73.]
- 20) [R. Schaller, A. Lakki, Grain boundary relaxations in ceramics, Materials Science Forum 366-368, (2001) 315-337.]
- 21) [[Κ. Χαριτίδης, http://mycourses.ntua.gr/courses/CHEM1044](http://mycourses.ntua.gr/courses/CHEM1044)]

- 22) [Κ-Δ. Μπουζάκης , ‘Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού ,2010 , Εκδόσεις Ζήτη, <http://www.ziti.gr/docs/pdf/1416.pdf>]
- 23) S.M. Allen, E.L. Thomas, The Structure of Materials, John Wiley & Sons, 1999
- 24) [S.M. Allen, E.L. Thomas, The Structure of Materials, John Wiley & Sons, 1999], D. V. Ragone, Thermodynamics of Materials, Vol.I & II, John Wiley & Sons, 1995 • H-G. Lee, Chemical Thermodynamics for Metals and Materials, Imperial College Press & World Scientific Publishing, 1999
- 25) [Sneha Samal, High-Temperature Oxidation of Metals]
- 26) [R. E. Hummel. Understanding materials science. Springer-Verlag New York, Inc., USA, 2004, p. 36.].
- 27) [E. Opila. High temperature materials corrosion challenges for energy conversion technologies. The electrochemical Society Interface, Winter 2013, pp. 69–73.].
- 27a) Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry, Prepared by BCS, Incorporated March 2008, USA ministry of Energy
- 27b) F. Cattant, D. Crusset, D. Feron. Corrosion issues in nuclear industry today. Mater. Today 2008,
- 28) [S.C.Kung, Formation of a chromium-carbide conversion coating on silicon carbide , Oxid. Met. 1999, 5,516, pp. 191–203.].
- 29) F. Cattant, D. Crusset, D. Feron. Corrosion issues in nuclear industry today. Mater. Today 2008, 11, 10

- 30) D. Freon, D. D. Macdonald. Prediction of long term corrosion behavior in nuclear waste system, EFC series 36. Maney/Woodhead, London, 2003
- 31) J. M. Boursier et al. A review of PWSCC, weldability, and thermal ageing of nickel weld metals in PWR primary water. Presented at EPRI International conference on PWSCC of alloy 600, Santa Anna Pubelo, USA, March 2005
- 32) [G. S. Was. Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and alloys. Springer Verlag, 2007, The materials information society. ASM international, Materials Park, OH 44073-0002, ISBN: 978-3-540-49471-3.]
- 33) M. Rühle, U. Salzberger and E. Schumann. High resolution transmission microscopy of metal/metal oxide interfaces. In microscopy of oxidation 2. Eds. S.B. Newcomb and M.J. Bennett, London, UK, The Institute of Materials, 1993, p.2.]
- 34) [A. Zahs, M. Spiegel, H. Grabbe, Chloridation and oxidation of iron, chromium, nickel and their alloys in chloridizing and oxidizing atmospheres at 400-700 °C, Corr. Sc. 2000, 42, 6, pp.1093–1122.]
- 35) Macroscopic Characteristics of Strain of Metallic Materials at High Temperatures, https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527313389_c01.pdf
- 36) Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, G. Sundararajan and Manish Roy, Triholog~~ International Vol. 30; No. 5, pp. 339-359, 1997
- 37) [W.G. Moffat G. W. Pearsall & J. Wulff, The Structure and Properties of Materials, vol. I, Structure, P. 51]
- 38) [[Kevlar K-29 AP Technical Data Sheet](http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/K23339_KevlarAP.pdf) – Dupont, http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/K23339_KevlarAP.pdf

- 39) [[How Kevlar® works: a simple introduction](#). Explainthatstuff.com (2009-12-07)],
- 40) [[R. Meredith](#), Fibrous polymers, Pages 43-58 | Published online: 20 Aug 2006
- 41) [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf]
- 42) Atsuo Kasuya¹, Rajaratnam Sivamohan, Yurii A. Barnakov, Igor M. Dmitruk, Takashi Nirasawa , Volodymyr R. Romanyuk, Vijay Kumar, , Sergiy V. Mamykin, Kazuyuki Tohji, Balachandran Jeyadevan, Kozo Shinoda, Toshiji Kudo, Osamu Terasaki, Zheng Liu, Rodion V. Belosludov, Vijayaraghavan Sundararajan & Yoshiyuki Kawazoe , Ultra-stable nanoparticles of CdSe revealed from mass spectrometry, Nature Materials 3, 99 - 102 (2004) , Published online: 25 January 2004
- 43) Προκοπάκης Γεώργιος, Μελέτη αντοχής σε θλίψη σύνθετου πολυμερούς (επόξυ – ρητίνης ενισχυμένης με υαλοϋφασμα). A study of compression strength of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites., ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, 2017]
- 44) Καραπάνος Χαράλαμπος, Κοτσιλιέρης Ανάργυρος, Κουντουράς Λίνος, ‘Μηχανές Εσωτερικής Κάυσης ΙΙ’, Α’ τεύχος Αθήνα 2001
- 45) [ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ, C. FERGUSON - A. KIRKPATRICK]
- 46) [ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ, Νικόλαος Α. Κυριάκης]
- 47) [Heywood J., Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, 1988
- 48) [W.Dworak and D.Fingerle 1987 Journal of Materials Science; Volume 86, pages 170-178 "*Ceramic Materials for Engines*".]
- 49) [W.Bunk and H.Hausner 1986 Proceedings of the Second International Symposium; 14 to 17 April, Lubeck-Travemunde, Germany "*Ceramic Materials and Components for Engines*".
- 50) [[R.C. Garvie](#), R.H. Hannink & R.T. Pascoe 1975 Nature, Volume 258, pages 703-704 "*Ceramic Steels?*"]
[M.M.Schwartz](#)^{*†} 1992 "Handbook of Structural Ceramics" McGraw-Hill Publishers, USA.
- 51) <http://www.spacex.com/media>

- 52) [[P. Jin](#), Y.L. Gao, N. Liu, J.B. Tan & Kyle Jiang 2006 Journal of Physics: Conference Series, Volume 48, pages 1471-1475 "*Design and Fabrication of Alumina Micro Reciprocating Engine*".]
- 53) [[N.Kondo et alia](#) - Journal of the Ceramic Society of Japan 2007 Volume 115 (4), pages 285-289 "*Fabrication of Thick Silicon Nitride by Reaction Bonding and Post-Sintering*"]
- 54) [[S.Dutta](#) (NASA Glenn, Cleveland, OH) - Bulletin of Materials Science 2001 Volume 24(2), pages 117-120 "*Fracture Toughness and Reliability in High Temperature Structural Ceramics and Composites: Prospects and Challenges for the 21st Century*".]
- 55) [https://www.nasa.gov/vision/space/gettingtospace/16sep_rightstuff.html]
- 56) (Dr. Γεώργιος Βεκίνης, ‘Προηγμένα κεραμικά υψηλής τεχνολογίας, 2005)
- 57) S.M. Spearing ,MATERIALS ISSUES IN MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS (MEMS), Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, USA (Received 1 June 1999; accepted 15 July 1999)
- 58) [PRIME Faraday Partnership, An introduction to MEMS, January 2002], <http://www.primetechnologywatch.org.uk/>.
- 59) [COMMON INSULATING MATERIALS AVAILABLE FROM PROFESSIONAL PLASTICS]
- 60) [Handbook on BS 7671: The IEE Wiring Regulations : a Handbook for Compliance, Trevor E. Marks
- 61) ‘‘Design guidelines for fire resistance of FRP-strengthened concrete structures’’, N Benichou, V.K.R Kodur, M.F. Green and L.A. Bisby
- 62) ‘‘Effect of bond degradation of fire resistance of FRP-strengthened reinforce concrete beams’’, A.Ahmed, V.K.R Kodur, Michigan state University.
- 63) Κρεμαστιώτη Αικατερίνη, ‘‘Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές’’, Πτυχιακή εργασία, 2008
- 64) Ζαχαρίας Γ. Πανδερμαράκης , ‘‘ Μελέτη της μείωσης της αντοχής ινοπλισμένων κονιαμάτων κατά την έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες’’, 2009
- 65) ‘‘Types of refractory materials’’, http://nptel.ac.in/courses/113104059/lecture_pdf/Lecture%209.pdf
- 66) ‘‘Introduction to refractories’’

, <http://www.cosmile.org/Manual/pdf/chapter12.pdf>

67) V. I. Zmii, S. G. Ruden'kii, N. F. Kartsev, and M. Yu. Bredikhin, "Complex Temperature-Resistant Protective Coatings for Carbon-Carbon Materials* ", National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Tech

68) "ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITES) "

http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf