

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ



PIRAEUS UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
TEI OF PIRAEUS

ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΑΠΟ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Σπουδαστής: ΜΥΛΩΝΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω, Αθήνα – Ελλάδα
Τηλ.: 210-5381488

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, «Οδοντωτοί τροχοί από πολυμερικά υλικά», παρουσιάζονται τα πολυμερή υλικά, η δομή τους καθώς και η μηχανική συμπεριφορά της εκάστοτε κατηγορίας τους, με σκοπό να αναδειχθεί η χρήση τους ως πρώτη ύλη στην κατασκευή γραναζιών. Γίνεται αναφορά στη συμπεριφορά τους στο βραχύχρονο εφελκυσμό, στην κόπωση, στον ερπυσμό, στη δυναμική μηχανική ανάλυση όπως επίσης και στην ιξωδοελαστική τους συμπεριφορά. Μετέπειτα, παρουσιάζονται τα πολυμερικά υλικά τα οποία πληρούν τις προδιαγραφές ώστε να κατασκευασθούν εξ αυτών οδοντωτοί τροχοί. Παρουσιάζονται οι μέθοδοι κατασκευής τους και γίνεται μία εκτενέστερη ανάλυση της παρασκευής γραναζιών με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ακολούθως, καταγράφονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των πολυμερικών γραναζιών καθώς και οι περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής παρουσίαση των μεθόδων δοκιμής των πολυμερικών οδοντωτών τροχών όπου γίνεται αναφορά σε τρεις συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τις δοκιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των οδοντωτών τροχών.

Abstract

This thesis, titled “Polymer gears”, presents polymer materials, their structure as well as the mechanical behavior of each category of polymers, in order for them to be connected consequently, as raw material in the manufacture of gears. Their behavior towards to short-term tensile is referred; towards to fatigue, creep, dynamic mechanical analysis and also reference is made to viscoelasticity. Thereinafter, polymer materials are presented, which fulfill the requirements in order for polymer gears to be manufactured by them. Construction methods of polymer gears are also presented and an extensive analysis of gear production using rapid prototyping (3D printing) is made. Subsequently, the characteristics and properties of polymer toothed wheels are cited as also the applications in which they are useful. Afterwards, an extensive presentation of methods of polymer gears testing follows, where three types of testing rigs are displayed in order for the mechanical properties of polymer gears to be tested.

Περιεχόμενα

1. Πολυμερή.....	1-4
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Δομή πολυμερών.....	1-4
2. Μηχανική συμπεριφορά πολυμερών.....	4-12
2.1 Συμπεριφορά πολυμερών σε βραχύχρονο εφελκυσμό.....	5-8
2.1.1 Ελαστομερή.....	6-7
2.1.2 Θερμοπλαστικά.....	7-8
2.2 Κόπωση.....	8-9
2.3 Ερπυσμός.....	9-10
2.4 Δυναμική μηχανική ανάλυση.....	10-11
2.5 Ιξωδοελαστική συμπεριφορά.....	11-12
3. Οδοντωτοί τροχοί από πολυμερικά υλικά.....	12-19
3.1 Υλικά κατασκευής και ιδιότητες υλικών κατασκευής.....	12-13
3.2 Μέθοδοι παραγωγής.....	13-17
3.2.1 Παραγωγή πολυμερικών οδοντωτών τροχών μέσω τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	14-17
3.3 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες.....	17-18
3.4 Χρήσεις και εφαρμογές.....	18-19
4. Δοκιμές και συσκευές δοκιμών μηχανικών ιδιοτήτων πολυμερικών οδοντωτών τροχών.....	19-30
4.1 Ιδιοσυσκευή δοκιμών πολυμερικών οδοντωτών τροχών Mk I.....	19-23
4.2 Ιδιοσυσκευή δοκιμών πολυμερικών οδοντωτών τροχών Mk II ή Mark II.....	24-27

4.3	Ιδιοσυσκευή δοκιμών πολυμερικών οδοντωτών τροχών FZG.....	27-30
5.	Έρευνες – Πειράματα.....	30-37
5.1	Friction and wear behavior of acetal and nylon gears.....	30-31
5.2	The wear and thermal contact behavior of machine cut polymer gears.....	31-32
5.3	An investigation on the wear behavior of dissimilar polymer gear engagements.....	33-34
5.4	Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears.....	34-36
5.5	Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity.....	37-38
6.	Επίλογος – συμπεράσματα.....	38-40
	Βιβλιογραφία.....	41-43
	Πηγές σχημάτων.....	44-46

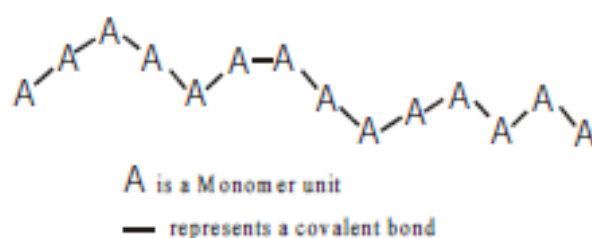
1. Πολυμερή

1.1 Εισαγωγή

Τα πολυμερή υλικά είναι ευρέως διαδεδομένα και απαραίτητα υλικά του σύγχρονου πολιτισμού. Οι ποικίλες εφαρμογές τους τόσο σε τομείς της βιομηχανίας όσο και στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων, καθώς και η ταχύτατη ανάπτυξη που γνώρισαν τα τελευταία χρόνια είναι αξιοσημείωτες και οφείλονται στις εξαιρετικές τους ιδιότητες. Χαρακτηριστικά των υλικών αυτών αποτελούν το χαμηλό ειδικό βάρος, η χημική αδράνεια και οι υψηλές μηχανικές αντοχές [1]. Ωστόσο, η οικονομία στους φυσικούς πόρους που προκύπτει από τη χρήση τους τα καθιέρωσε ως μια κατηγορία υλικών με ποικίλες κατασκευαστικές εφαρμογές, καθώς και καταναλωτικές χρήσεις.

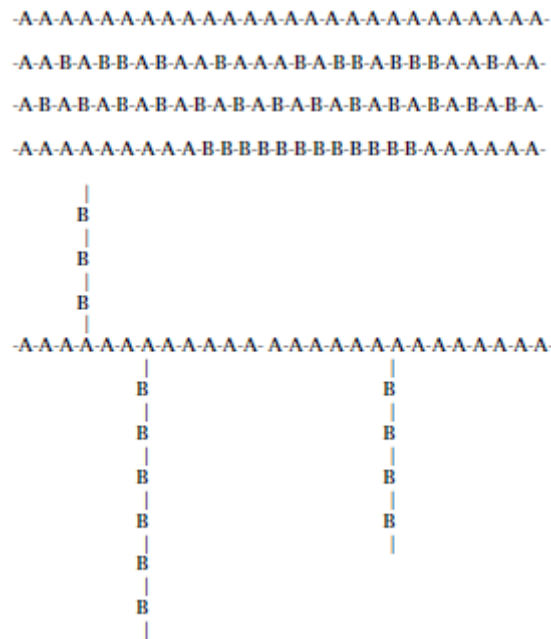
1.2 Δομή πολυμερών

Τα πολυμερή στη μοριακή τους δομή αποτελούνται από μακριές αλυσίδες ή ευρύτερους σχηματισμούς επαναλαμβανόμενων μορίων τα οποία ονομάζονται μονομερή και συνήθως συνδέονται μεταξύ τους μέσω ομοιοπολικών δεσμών [2]. Στην απλούστερη μορφή τους οι αλυσίδες αυτές ή μακρομόρια όπως αλλιώς ονομάζονται παρουσιάζονται ως εξής:



Σχήμα 1: Πολυμερής αλυσίδα

Το γράμμα «Α» αναπαριστά ένα μονομερές στοιχείο και η συνδετική γραμμή (παύλα) μεταξύ των γραμμάτων έναν ομοιοπολικό δεσμό μεταξύ των μονομερών. Σε διαφορετική περίπτωση τα πολυμερή θα μπορούσαν να σχηματιστούν αν στην αλυσίδα προστίθονταν και διαφορετικά μονομερή στοιχεία, καθώς και αν η αλυσίδα διακλαδίζοταν και προς άλλες κατευθύνσεις. Δηλαδή, κάθε μονομερές να είχε τη δυνατότητα να έχει περισσότερους από δύο δεσμούς [3].



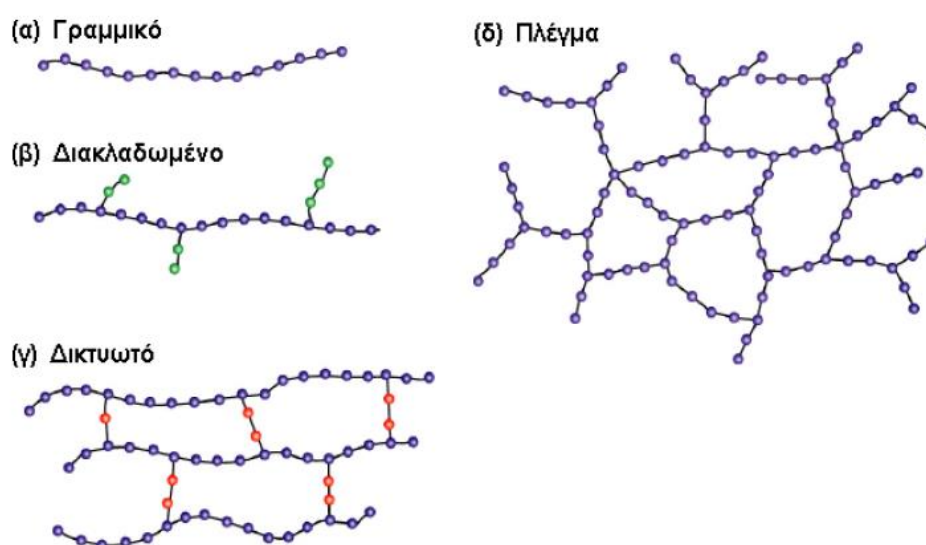
Σχήμα 2: Σύνθετη πολυμερής αλυσίδα

Η δημιουργία των μακρομοριακών αλυσίδων βασίζεται κατά κύριο λόγο στη διεργασία του πολυμερισμού. Κατά την υλοποίηση της διεργασίας αυτής διεξάγονται επαναλαμβανόμενες χημικές αντιδράσεις κατά τις οποίες τα μονομερή μόρια αντιδρούν και ενώνονται για το σχηματισμό πολυμερών [4].

Λόγω της παρουσίας διαφορετικών μονομερών ή και διαφορετικών συνδυασμών των ίδιων μονομερών κατά τη διεργασία του πολυμερισμού, δημιουργείται μεγάλος

αριθμός μακρομοριακών αλυσίδων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν οι διάφοροι τύποι και κατηγορίες των πολυμερών.

Συχνά τα μακρομόρια κατηγοριοποιούνται βάσει της αρχιτεκτονικής της μοριακής δομής της πολυμερικής αλυσίδας. Η ταξινόμηση γίνεται σε τέσσερις κατηγορίες: (α) τα γραμμικά πολυμερή, (β) τα διακλαδωμένα ή πολυκλαδικά, (γ) τα δικτυωτά ή διασταυρωμένης δομής πολυμερή και (δ) το πολυμερικό πλέγμα [5].



Σχήμα 3: Ταξινόμηση πολυμερών ανάλογα με την αρχιτεκτονική της πολυμερικής αλυσίδας

Επιπροσθέτως, εκτός του διαχωρισμού τους βάσει της αρχιτεκτονικής της αλυσίδας τους, τα πολυμερή κατηγοριοποιούνται και ανάλογα με τον τύπο τους, δηλαδή ανάλογα με τις ιδιότητες που αυτά παρουσιάζουν ως υλικά. Οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται κλάσεις και είναι τρεις: τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομερή πολυμερή υλικά [3]. Το καθένα από αυτά διαθέτει τα δικά του χαρακτηριστικά:

- Τα θερμοπλαστικά πολυμερή έχουν την ιδιότητα της τήξης και της επαναστερεοποίησης για περισσότερες από μια φορές, μέσω διαδικασιών παροχής θερμότητας και ψύξης, για κάθε διεργασία αντίστοιχα.
- Αντίθετα, τα θερμοσκληρυνόμενα σκληραίνουν με την παροχή θερμότητας και δεν υπάρχει δυνατότητα να επανατηχθούν και να περιέλθουν σε υγρή κατάσταση μετά την στερεοποίησή τους.
- Τέλος, τα ελαστομερή πολυμερή αποτελούνται από διασταυρωμένες δομές με δυνατότητα παραμόρφωσης και επανάκτησης της αρχικής τους μορφής, ιδιότητα η οποία οφείλεται στον υψηλό βαθμό ευκαμψίας και πυκνότητας εμπλοκής των μοριακών αλυσίδων του μακρομορίου [6].

Για την κατασκευή πολυμερών γρاناζιών, ιδίως μέσω της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα υλικά τα οποία τις περισσότερες φορές αναφέρονται και ως πλαστικά.

2. Μηχανική συμπεριφορά πολυμερών [7]

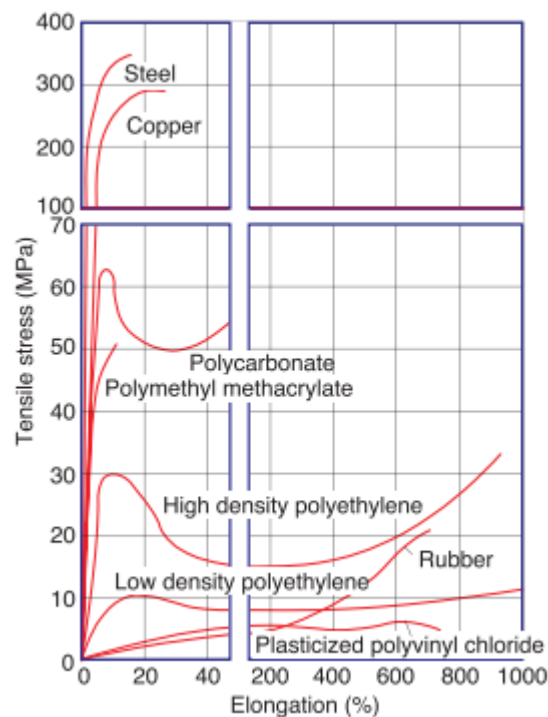
Η μηχανική συμπεριφορά που επιδεικνύουν τα πολυμερή υλικά, μηδεμίας κλάσης τους εξαιρουμένης, εξαρτάται ανά πάσα στιγμή από το χρονικό διάστημα που υφίστανται μια καταπόνηση, καθώς και από τη θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται εκείνη τη στιγμή. Ως εκ τούτου, ένα μακρομοριακό υλικό συμπεριφέρεται διαφορετικά στις βραχύχρονες απ' ό τι στις μακρόχρονες καταπονήσεις.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες ενός πολυμερούς καθώς και η ιξωδοελαστική ιδιότητά του, η οποία αποτελεί μια εκ των σημαντικότερων ιδιοτήτων. Ο λόγος για τον οποίο αναφέρονται εκτενέστερα οι ιδιότητες των πολυμερών υλικών είναι διότι βάσει αυτών δικαιολογείται η επιλογή των αντιστοίχων

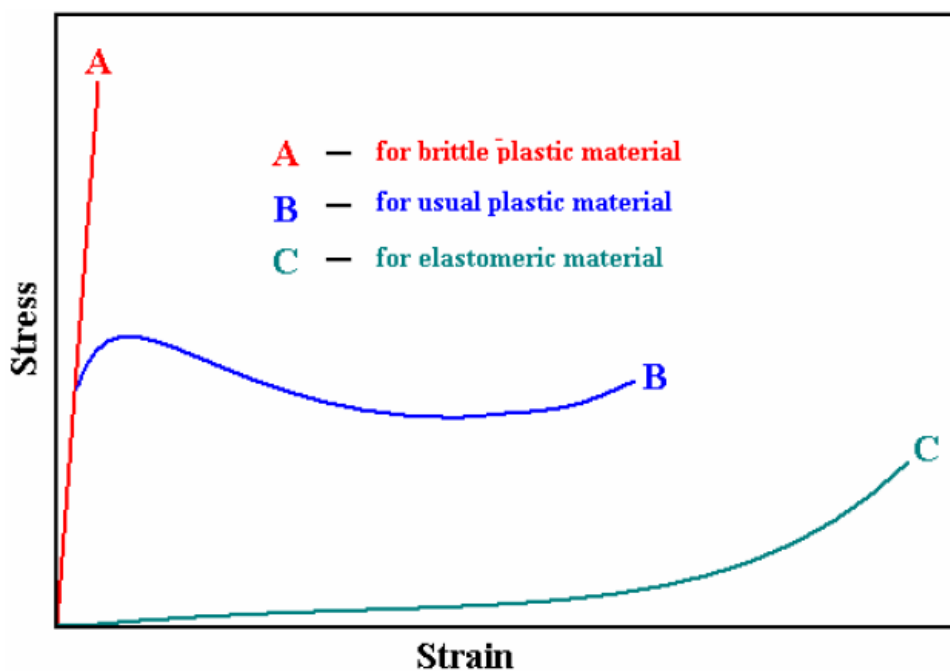
υλικών για την κατασκευή πολυμερών οδοντωτών τροχών. Τα υλικά αυτά είναι εκείνα που προσδίδουν στα γρανάζια τις απαιτούμενες ιδιότητες για την εκάστοτε χρήση τους.

2.1 Βραχύχρονος εφελκυσμός

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο ακόλουθο διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης πλαστικών, το οποίο για βοηθητικούς και συγκριτικούς σκοπούς εμπεριέχει και τα αποτελέσματα χαλκού και χάλυβα, τα πολυμερή υλικά παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή στον εφελκυσμό και μεγαλύτερη επιμήκυνση έναντι των μετάλλων. Το παραπάνω αποτελεί μια γενική παρατήρηση.



Σχήμα 4.1: Συγκριτικά διάγραμματα Τάσης (Tensile stress) – Ανηγμένης παραμόρφωσης (Elongation) διαφόρων υλικών



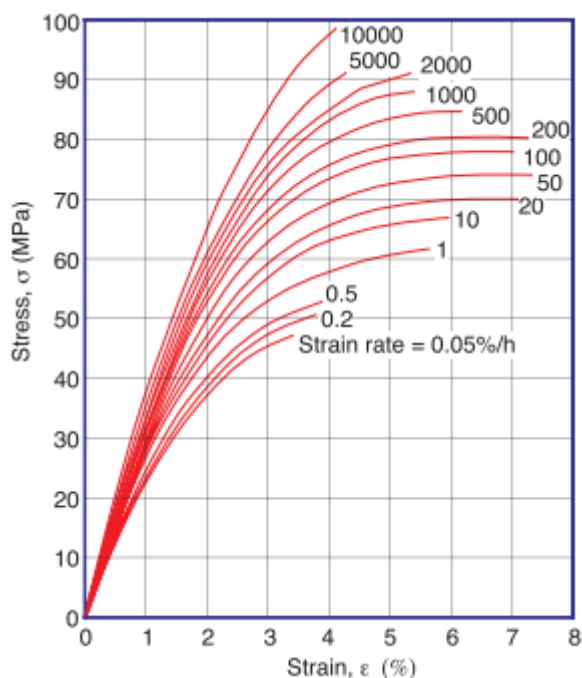
Σχήμα 4.2: Τυπικό διάγραμμα Τάσης (Stress) – Ανηγμένης παραμόρφωσης (Strain) πολυμερών

Για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά των πολυμερών σε βραχύχρονες εφελκυστικές δοκιμές, είναι αναγκαίο να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ ελαστομερών και θερμοπλαστικών υλικών, διότι η συμπεριφορά της διασταυρωμένης δομής των ελαστομερών διαφέρει από εκείνη της μη διασταυρωμένης δομής που παρουσιάζουν τα θερμοπλαστικά.

2.1.1 Ελαστομερή. Τα ελαστομερή υλικά χαρακτηρίζονται από την ιδιότητά τους, μετά την υποβολή σε μεγάλες παραμορφώσεις, να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση (βλ. Καμπύλη «C» του σχήματος 4.2). Η ιδιότητα αυτή, οφείλεται στην ελικοειδή μορφή της μακρομοριακής τους αλυσίδας στην οποία τα μόρια τεντώνονται αλλά δεν ξεπερνούν σε σειρά το ένα το άλλο. Συνεπώς, μετά το πέρας της εφαρμογής της δύναμης τα μόρια επανέρχονται στην αρχική τους θέση ισορροπίας. Κατά την παραμόρφωση του ελαστομερούς, η καμπύλη τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης

πέφτει χαρακτηριστικά, δηλαδή το πολυμερές παρουσιάζει μικρή αντίσταση στον εφελκυσμό καθώς και μεγάλη επιμήκυνση. Πειραματικά προκύπτει ότι περίπου στο 400% της παραμόρφωσης η μοριακή αλυσίδα του μακρομορίου είναι σε πλήρη έκταση. Κατά συνέπεια, η όποια περαιτέρω επιμήκυνση εφαρμοστεί θα είναι μη αναστρέψιμη.

2.1.2 Θερμοπλαστικά. Στα θερμοπλαστικά υλικά (βλ. Καμπύλη «B» του σχήματος 4.2) τα αποτελέσματα των εφελκυστικών δοκιμών επηρεάζονται από την ταχύτητα με την οποία μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση έως ότου μηδενιστεί. Το πρότυπο το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για τις εφελκυστικές δοκιμές θερμοπλαστικών είναι το ASTM D638 και υπόκειται στο ISO 527. Η χρησιμοποιούμενη ταχύτητα παραμόρφωσης και επαναφοράς είναι μοναδική. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο για σύγκριση μεταξύ υλικών.



Σχήμα 5: Διάγραμμα Τάσης (Stress) – Ανηγμένης παραμόρφωσης (Strain) PMMA (θερμοπλαστικού υλικού) εξαρτώμενο από το ρυθμό εφαρμογής της τάσης

Σε πολλές περιπτώσεις όταν επιζητείται αύξηση της ακαμψίας και της αντοχής του υλικού δημιουργούνται διάφορα μίγματα θερμοπλαστικών υλικών με προσθήκες συμπαγών στερεών μορίων, όπως για παράδειγμα μόρια ανθρακικού ασβεστίου ή αιθάλης. Η τεχνική προσθήκης στερεών μορίων χρησιμοποιείται και για τη βελτίωση της ποιότητας των πολυμερών οδοντωτών τροχών.

2.2 Κόπωση

Ως κόπωση αναφέρεται η δυναμική φόρτιση ενός υλικού, το οποίο μετά από ορισμένο αριθμό κύκλων οδηγείται σε αστοχία. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος της φόρτισης που απαιτείται ώστε ένα υλικό να οδηγηθεί σε αστοχία είναι αρκετά μικρότερο από το μέγεθος της μονοτονικής φόρτισης που χρειάζεται για το ίδιο αποτέλεσμα. Γι' αυτό το λόγο είναι σημαντική η μελέτη της συμπεριφοράς των πολυμερών υλικών σε κόπωση.

Οι βασικότερες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν το χρόνο και το μέγεθος της αστοχίας στα πολυμερή υλικά είναι οι εξής: το μέγεθος του φορτίου, η συχνότητα της φόρτισης, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, καθώς και το περιβάλλον, ως προς το βαθμό που συμβάλλει στη διάβρωση του υλικού. Οι επιφανειακές φθορές, όπως είναι τα ραγίσματα, παρατηρούνται περισσότερο σε μοντέλα τα οποία έχουν κατασκευαστεί με μηχανικές κατεργασίες. Αντίθετα, στα χυτά ή τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα δεν συμβαίνει αυτό, λόγω της σκληρότερης εξωτερικής επιφάνειας που έχουν αποκτήσει από τα διαφορετικά στρώματα πλαστικού που αποτελούν το μοντέλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η εξωτερική τους στρώση να είναι σκληρότερη και να λειτουργεί προστατευτικά. Στα μοντέλα αυτά είναι συνηθέστερη

η αστοχία και η εμφάνιση ραγισμάτων εκ των έσω, λόγω του ποικίλου προσανατολισμού των γραμμών συγκόλλησης που το αποτελούν.

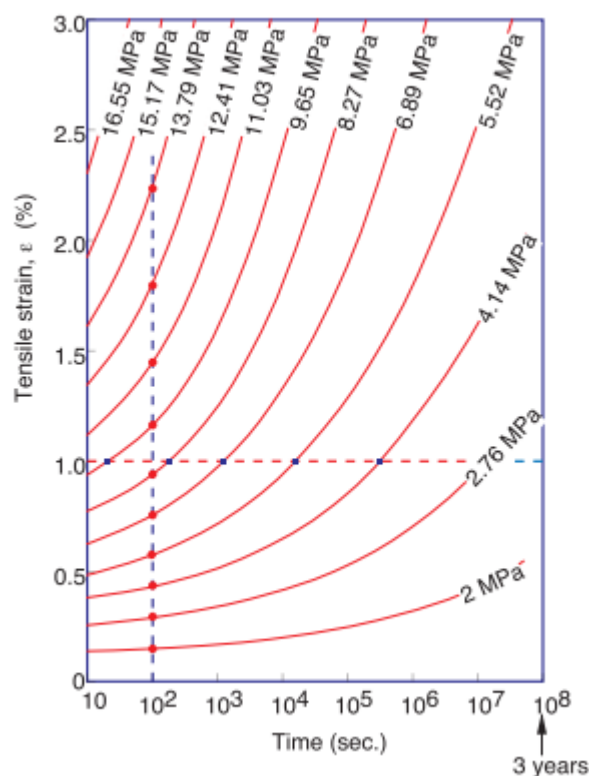
Ακόμη, έχει παρατηρηθεί ότι αστοχία μπορεί να επέλθει και από τη λεγόμενη «θερμική κόπωση» η οποία δημιουργείται από την αύξηση της συχνότητας φόρτισης ή του μεγέθους του φορτίου. Η αύξηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας, εξαιτίας των εσωτερικών τριβών στο μοντέλο, καθώς και την αργή εμφάνιση της θερμοκρασίας στα εξωτερικά του στρώματα, λόγω χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των πολυμερών. Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού είναι η θερμική κόπωση.

2.3 Ερπυσμός

Ο ερπυσμός, ο οποίος συχνά αναφέρεται και ως στατική κόπωση, είναι η καταπόνηση η οποία υφίσταται ένα πολυμερές υπό σταθερή τάση, μικρότερη του ορίου διαρροής του υλικού, για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το χρονικό διάστημα εφαρμογής της καταπόνησης σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι η χρονική περίοδος ενός ή και περισσότερων ετών.

Οι δοκιμές ερπυσμού αναφέρονται και ως μακροχρόνιες δοκιμές. Χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός υλικού, συγκεκριμένα των πολυμερών, υπό σταθερό φορτίο. Οι προαναφερόμενες δοκιμές μετρούν την ανηγμένη παραμόρφωση συναρτήσει της τάσης, του χρόνου υποβολής του φορτίου και της θερμοκρασίας. Στο διάγραμμα του σχήματος 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ερπυσμού ενός ελαστομερούς πολυμερούς σε δώδεκα διαφορετικές τάσεις και για χρονικό διάστημα τριών συνεχόμενων ετών. Τα ελαστομερή υλικά παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά ανηγμένης παραμόρφωσης - κάθετος άξονας- σε σχέση με τα θερμοπλαστικά. Το γεγονός αυτό αποτελεί έναν από

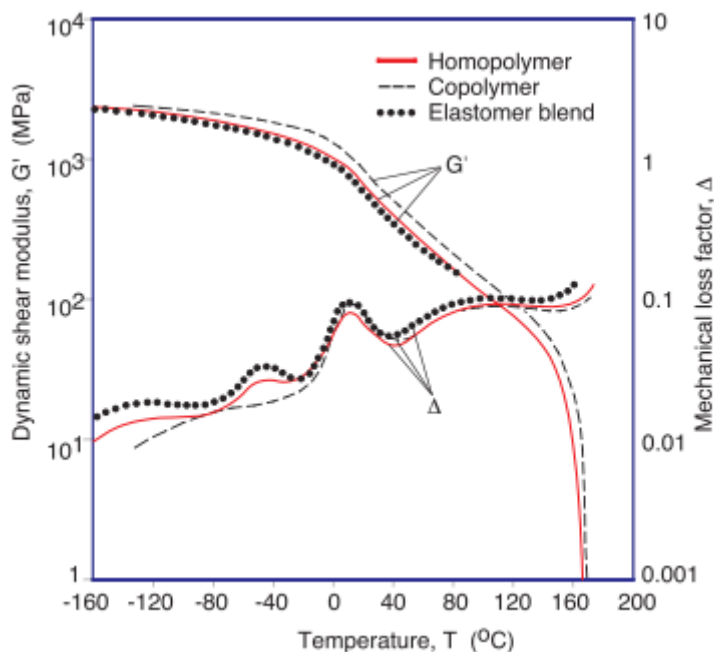
τους λόγους για τους οποίους τα ελαστομερή υλικά δεν χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πολυμερών γκραναζιών.



Σχήμα 6: Διάγραμμα Τάσης (Tensile strain) – Χρόνου (Time) πολυμερούς ελαστομερούς υλικού

2.4 Δυναμική μηχανική ανάλυση

Η δυναμική μηχανική ανάλυση (DMA) είναι μία εκ των πιο χρησιμοποιούμενων δοκιμών για πολυμερή υλικά. Κατά τη δοκιμή, το δείγμα υποβάλλεται σε χαμηλής συχνότητας τάση. Στους κάθετους άξονες καταγράφονται αριστερά το μέτρο αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο είναι η έκφραση της αναλογίας τάσης με ανηγμένη παραμόρφωση και η οποία καταγράφεται παράλληλα με το μέτρο απώλειας ενέργειας του υλικού λόγω της αναπτυσσόμενης θερμότητας -δεξιός κάθετος άξονας-, σε σχέση με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία.



Σχήμα 7: Διάγραμμα Μέτρο αποθήκευσης ενέργειας (G') – Θερμοκρασίας (T) – Μέτρο απώλειας ενέργειας λόγω θερμότητας (Δ ή G'') πολυμερούς υλικού

2.5 Ιξωδοελαστική συμπεριφορά

Η ιξωδοελαστικότητα είναι η ιδιότητα υλικών, παραδείγματος χάρη των πολυμερών, να παρουσιάζουν ελαστικά και ιξώδη χαρακτηριστικά κατά την υποβολή τους σε παραμόρφωση. Σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και σε συγκεκριμένο μοριακό βάρος ένα πολυμερές έχει τη δυνατότητα να συμπεριφέρεται είτε ως υγρό, είτε ως στερεό αναλόγα με την ταχύτητα με την οποία τα μακρομόρια παραμορφώνονται.

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών διακρίνεται σε: γραμμική και μη γραμμική. Στα πολυμερή μπορεί να παρουσιάσουν μια εκ των δυο συμπεριφορών. Στην περίπτωση της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας, η αντίδραση του πολυμερούς είναι αναμενόμενη. Οι παραμορφώσεις που υφίστανται είναι είτε ελάχιστες και δεν διαταράσσουν σε αξιοσημείωτο βαθμό την ισορροπία του μακρομορίου, είτε αναπτύσσονται σε αργούς ρυθμούς ώστε το πολυμερές, δρώντας βάσει των ιδιοτήτων του, τείνει να επανέλθει στην πρότερη κατάσταση ισορροπίας του. Αντίθετα, η μη

γραμμική ιξωδοελαστικότητα, είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη συμπεριφορών των πολυμερών όταν υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις, όπως αυτές που συναντάμε στη δημιουργία αντικειμένων μέσω χρήσης καλουπιών και των περισσότερων μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Βάσει αυτού, η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του εκάστοτε πολυμερούς, το οποίο χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την κατασκευή αντικειμένων, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιλογή της επεξεργασίας και της τεχνικής μορφοποίησης στην οποία θα υποβληθεί. Κατά συνέπεια όταν είναι γνωστό εκ των προτέρων το είδος της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς (γραμμική-μη γραμμική) ενός πολυμερούς, είναι δυνατή η δημιουργία αντικειμένων μη υστερούμενων των επιθυμητών χαρακτηριστικών.

3. Οδοντωτοί τροχοί από πολυμερικά υλικά

3.1 Υλικά κατασκευής και ιδιότητες υλικών κατασκευής

Τα κυριότερα υλικά για την παραγωγή πολυμερικών οδοντωτών τροχών είναι θερμοπλαστικά. Τα συνηθέστερα υλικά είναι το πολυαμίδιο (PA), το πολυαιθυλένιο (PE) και η πολυακετάλη (POM) και οι υποκατηγορίες τους. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα πολυμερή υλικά, κυρίως θερμοπλαστικά, όμως τα κυριότερα είναι τα παραπάνω. Σε αρκετές περιπτώσεις για τη δημιουργία γραναζιών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γίνονται προσμίξεις με την προσθήκη και άλλων υλικών [8].

Τα πολυαμίδια (PA), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως είναι τα αλιφατικά πολυαμίδια -γνωστά ευρέως και ως νάιλον-. Το νάιλον παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην τριβή, η οποία είναι μια ιδιότητα που μπορεί να ενισχυθεί αν ένα στοιχείο

κατασκευαστεί ως χυτό ή αν χρησιμοποιηθούν τρίτα υλικά ως προσμίξεις. Πρόκειται για ένα σκληρό και ανθεκτικό υλικό, με χαμηλό συντελεστή τριβής και καλή μηχανική αντοχή. Τα στοιχεία μηχανών τα οποία είναι κατασκευασμένα από πολυαμίδιο λειτουργούν είτε αυτολιπαινόμενα, είτε με χρήση ελαίου. Ακόμη, απορροφούν ελάχιστο έως μηδενικό ποσοστό υγρασίας από το περιβάλλον λειτουργίας τους. Παρόλα τα θετικά χαρακτηριστικά τους δεν ενδείκνυνται για κατασκευές αντικειμένων μεγάλης ακρίβειας.

Το πολυαιθυλένιο (PE) είναι ένα μη αγωγίμο υλικό, ανθεκτικό σε χημικές καταπονήσεις με χαμηλό συντελεστή τριβής, με μικρή όμως αντοχή στη μηχανική φθορά. Τα πολυαιθυλενικά στοιχεία μηχανών παρουσιάζουν μετά την κατασκευή τους μη παραμορφώσιμες διαστάσεις, δεν απορροφούν υγρασία, ενώ η αντοχή τους στη διάβρωση λόγω χημικών ουσιών είναι υψηλή. Η χρήση τους σε συστήματα στοιχείων είναι σημαντική διότι απορροφούν τους κραδασμούς σε υψηλό ποσοστό. Η χρήση τους ενδείκνυται για την κατασκευή αντικειμένων τα οποία χρησιμοποιούνται μόνο σε χαμηλά φορτία.

Τέλος, η πολυακετάλη (POM) είναι ένα πολυμερές υλικό το οποίο απορροφά μικρά ποσοστά υγρασίας, επιδεικνύει μεγάλη αντοχή στην τριβή ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ εμφανίζει αξιόλογες ηλεκτρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες. Είναι κατάλληλο για την κατασκευή γραναζιών ακριβείας, τα οποία είναι ικανά να ανταπεξέλθουν και να αντέξουν σε μεγάλα φορτία. Η αντοχή αυτή μπορεί να αυξηθεί ή και να βελτιωθεί με τη χρήση λιπαντικού ελαίου.

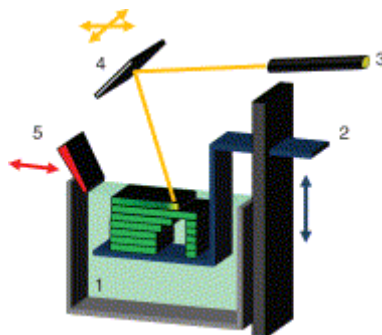
3.2 Μέθοδοι παραγωγής

Τα πολυμερικά στοιχεία μηχανών παράγονται με ποικίλες μεθόδους. Ενδέχεται να είναι χυτά τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις να επιδέχονται και κατεργασίες

μορφοποίησης. Τις περισσότερες φορές όμως, παράγονται κατά τον ίδιο τρόπο με τον οποίο παράγονται και τα μεταλλικά γρανάζια [8]. Δηλαδή, είτε με τη χρήση γραναζοκόπτη, όπου το κομμάτι στην αρχική του μορφή παρουσιάζεται ως δίσκος, ο οποίος κυλιέται σε κοπτικό αποφλοιώσης και με συνεχή περάσματα δημιουργούνται οι οδοντώσεις του γραναζιού, είτε μέσω φρεζαρίσματος με αυτοματοποιημένες μηχανές κατεργασίας, όπου ο οδοντωτός τροχός σχηματοποιείται με τη χρήση μετωπικού κοπήρα (κονδυλίου). Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι για την παραγωγή των μοντέλων. Οι κατεργασίες γίνονται: α) με πλάνισμα με κοπτικό κανόνα, όπου το κοπτικό εργαλείο παλινδρομεί και μετατοπίζεται στο μοντέλο, β) με πλάνισμα κύλισης, όπου το κοπτικό εργαλείο είναι ένας κοπτικός τροχός ο οποίος παλινδρομεί και περιστρέφεται και γ) με περιφερειακό φρεζάρισμα κύλισης (hobbing) όπου το κοπτικό εργαλείο είναι μια περιστρεφόμενη κοχλιοειδής φρέζα. Η μέθοδος στην οποία το γρανάζι διαμορφώνεται με τη χρήση μετωπικού κοπήρα αποτελεί μία εργασία για την οποία απαιτείται υψηλή ακρίβεια, κόστος και χρόνος, για αυτό και αποφεύγεται στην παραγωγή μεγάλου αριθμού τεμαχίων. Επιπλέον, είναι δυνατή η παραγωγή πολυμερικών οδοντωτών τροχών μέσω της χρήσης τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης.

3.2.1 Παραγωγή πολυμερικών οδοντωτών τροχών μέσω των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης [9]. Οι πιο διαδεδομένες και χρησιμοποιούμενες τεχνικές ταχείας προτυποποίησης -τρειςδιάστατη εκτύπωση- είναι η στερεολιθογραφία (Stereolithography–SLA), η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση υλικού με ακτίνα λέιζερ (Selective Laser Sintering–SLS) και η δημιουργία μοντέλων μέσω εναπόθεσης τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modelling–FDM).

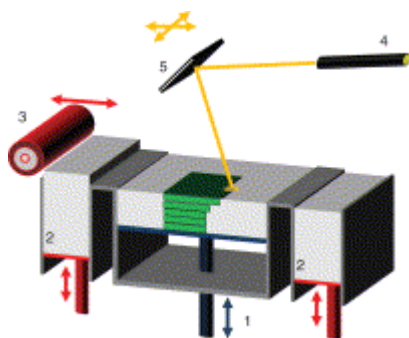
Αναλυτικότερα, στην τεχνική της στερεολιθογραφίας (SLA) χρησιμοποιείται μία δεξαμενή στην οποία εμπεριέχεται υγρό φωτοπολυμερές υλικό και μία πλατφόρμα, η οποία κινείται στον κάθετο άξονα ξεκινώντας από το ανώτατο σημείο. Εκτός της δεξαμενής, υπάρχει και μία κατασκευή εκπομπής ακτίνων laser, η οποία στερεοποιεί το φωτοπολυμερές σχηματίζοντας έτσι το αντικείμενο. Η πλήρης κατασκευή είναι συνδυασμός της πήξης του φωτοπολυμερούς από το laser και της κίνησης της πλατφόρμας, ώστε να δίνεται η διάσταση του ύψους στο αντικείμενο. Το παραγόμενο μοντέλο αποτελείται από μία πολύ καλή επιφάνεια, η οποία μπορεί να έχει σύνθετη γεωμετρία και αρκετά μεγάλη αντοχή. Παράλληλα όμως, με τη δημιουργία μοντέλων, και αναλόγως της πολυπλοκότητά τους, παράγονται και στηρίγματα. Κατά συνέπεια, το εκτυπωμένο αντικείμενο σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι έτοιμο προς χρήση αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, διότι εκκρεμεί ο καθαρισμός του από τα περιττά στηρίγματα.



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής της στερεολιθογραφίας (SLA)

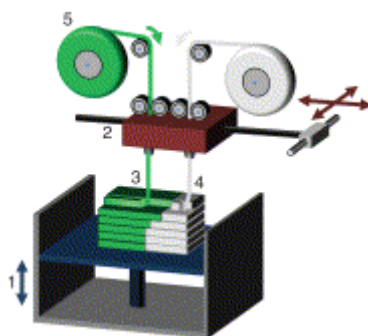
Η τεχνική της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης υλικού με ακτίνα λέιζερ (SLS) εφαρμόζεται σε δεξαμενή στην οποία τοποθετείται αρχικά η πρώτη στρώση του υλικού του μοντέλου σε μορφή κόκκων (σκόνης). Με τη χρήση μίας ακτίνας λέιζερ οι κόκκοι προσκολλώνται μεταξύ τους και παίρνουν ενιαία μορφή. Έπειτα, εισέρχεται στη δεξαμενή η επόμενη στρώση σκόνης για να δημιουργηθεί το επόμενο ενιαίο

στρώμα του αντικειμένου και κατ' αυτό τον τρόπο η διαδικασία συνεχίζεται. Μετά το πέρας της κατασκευής απομακρύνεται από το στερεό αντικείμενο η περιττή σκόνη. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και στην παραγωγή μηχανοκίνητων οχημάτων, όσον αφορά την παραγωγή τρισδιάστατα εκτυπωμένων καλουπιών για την κατασκευή των χυτών μερών των οχημάτων.



Σχήμα 9: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής της επιλεκτικής πυροσυσσώματωσης υλικού με ακτίνα λέιζερ (SLS)

Τέλος, η δημιουργία μοντέλων μέσω εναπόθεσης τηγμένου υλικού (FDM) γίνεται από τρισδιάστατο εκτυπωτή που αποτελείται από μία πλατφόρμα πάνω στην οποία χτίζεται το μοντέλο. Εμπριέχονται επίσης, δύο τύμπανα με υλικό κατασκευής και στήριξης -σε μορφή νήματος- καθένα από τα οποία καταλήγει σε ένα στόμιο, όπου θερμαίνεται και τήκεται. Τα στόμια κινούνται πάνω στους τρεις άξονες εξάγοντας έτσι υλικό και σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο.



Σχήμα 10: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής της δημιουργίας μοντέλων μέσω εναπόθεσης τηγμένου υλικού (FDM)

Από τα υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούν όλα να θεωρηθούν υλικά πρώτης ύλης σε διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή πολυμερικών γραναζιών. Στη δημιουργία μοντέλων μέσω εναπόθεσης τηγμένου υλικού (FDM) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και τα τρία υλικά, ενώ στη στερεολιθογραφία (SLA) και την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση υλικού με ακτίνα λέιζερ (SLS) το πιο διαδεδομένο υλικό είναι το πολυαμίδιο.

3.3 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες

Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί αποτελούν στοιχεία μηχανών τα οποία τα τελευταία χρόνια αξιοποιούνται όλο και περισσότερο σε διάφορες επιστίμες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη ραγδαία ανάπτυξης της τεχνολογίας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Κύριο χαρακτηριστικό των πολυμερικών οδοντωτών τροχών είναι η μεγάλη τους ανθεκτικότητα στη διάβρωση και η αντίστασή τους στη φθορά ακόμη και όταν λειτουργούν υπό ξηρές συνθήκες, γεγονός το οποίο μειώνει την ανάγκη για συντήρηση. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό τους είναι το χαμηλό βάρος, το οποίο επιφέρει χαμηλή αδράνεια, λόγω της μικρής μάζας του περιστρεφόμενου τροχού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυναμικής φόρτισης των οδόντων και την ελάττωση της παραγωγής ηχητικών εκπομπών [10]. Κατά τη λειτουργία των πολυμερικών γραναζιών, λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών των υλικών τους και της ελαστικότητάς τους, επιτυγχάνεται η καλύτερη επαφή μεταξύ των οδόντων τους, γεγονός το οποίο με τη σειρά του συμβάλλει από τη μια στην καλύτερη μετάδοση και πιο ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στα σημεία επαφής και από την άλλη στη μείωση των σφαλμάτων που μπορεί να επέλθουν κατά τη μετάδοση. Η ιδιότητα αυτή συμβάλλει επίσης, στην

απορρόφηση των κραδασμών του συστήματος και στη βελτίωση της σταθερότητάς του.

Τα πολυμερικά σε σχέση με τα μεταλλικά γρανάζια, αποτελούν οικονομικότερη λύση, καθώς η παραγωγή τους απαιτεί μικρότερες δυνάμεις κοπής, συνεπώς το κόστος μηχανημάτων μειώνεται. Χαμηλού επίσης κόστους είναι και η επιλογή των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σε κάθε περίπτωση η παραγωγή των πολυμερικών οδοντωτών τροχών έχει μικρότερο οικονομικό κόστος σε σχέση με τα μεταλλικά γρανάζια. Στην περίπτωση της επιλογής της κατεργασίας του φρεζαρίσματος, η παραγωγή τους επιτυγχάνεται και σε λιγότερο χρόνο σε σχέση με τα μεταλλικά, λόγω των μικρότερων δυνάμεων που απαιτούνται.

3.4 Χρήσεις και εφαρμογές

Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί αποτελούν εξαρτήματα τα οποία έχουν ευρύ φάσμα χρήσεων στη σημερινή εποχή. Χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από τη ρομποτική επιστήμη, καθώς αξιοποιούνται σε πληθώρα μηχανολογικών συστημάτων. Επίσης, λόγω της αντοχής τους στη διάβρωση και κατά συνέπεια λόγω της μη τοξικότητάς τους, έχουν βρει πολλές εφαρμογές και στην ιατρική αφού χρησιμοποιούνται σε διάφορα ρομποτικά μηχανήματα χειρουργικών επεμβάσεων. Πρόκειται για χειροκίνητα μηχανήματα, μηχανές εξετάσεων, όπου η μετάδοση της κίνησής τους γίνεται από πολυμερή γρανάζια αλλά και αυτόματα ρομπότ που χρησιμοποιούνται στα χειρουργεία.

Οι θερμοπλαστικοί οδοντωτοί τροχοί συναντώνται συχνά σε συσκευές γραφείου, όπως είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και οι περιφερειακές συσκευές τους, οι εκτυπωτές, τα μηχανήματα σάρωσης, οι μηχανές ψύξης, κ.α.. Επίσης, εφαρμογές

έχουν και σε διάφορες οικιακές συσκευές, όπως στους αποχυμωτές, στα μηχανήματα κοπής τροφίμων, στους αναδευτήρες μικρής και μεγάλης ισχύος.

Ακόμη, τα πολυμερικά γρανάζια χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές, σε ηλεκτροκινητήρες και γενικότερα για τη μεταφορά μικρών φορτίων ακόμη και ως εξαρτήματα σε εκτυπωτές τρισδιάστατων μοντέλων.

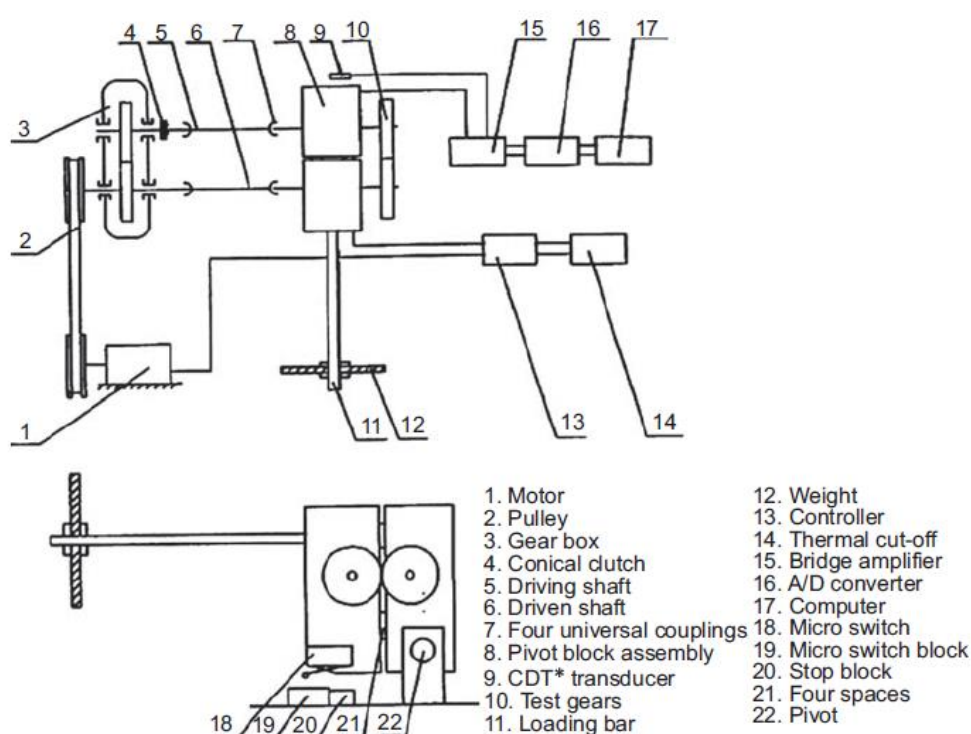
4. Δοκιμές και συσκευές δοκιμών μηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερικών οδοντωτών τροχών

Οι βασικότερες δοκιμές στις οποίες υποβάλλονται οι πολυμεροί οδοντωτοί τροχοί κατά τον ποιοτικό τους έλεγχο είναι οι εξής: έλεγχος εκπομπής θορύβων, αντοχής σε κόπωση, αποδοτικότητας και επίδοσης, παραγόμενης θερμοκρασίας λόγω της τριβής του συστήματος των γραναζιών και έλεγχος παραγωγής κραδασμών και δονήσεων στο σύστημα.

Οι έλεγχοι των πολυμερικών οδοντωτών τροχών γίνονται με τη χρήση ιδιοσυσκευών. Στη συνέχεια περιγράφονται οι συνηθέστερες. Όλες τους αποτελούνται από δύο μέρη: α) Το κύριο μέρος το οποίο παραμένει ίδιο σε όλες τις δοκιμές της κάθε συσκευής και είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση της κίνησης και της ροπής στα δοκιμαζόμενα γρανάζια και β) το μεταβλητό στο οποίο γίνεται η λήψη των αποτελεσμάτων και το οποίο υπόκειται σε διάφορες τροποποιήσεις προκειμένου οι εκάστοτε έλεγχοι να διεξάγονται με ορθότητα και ακρίβεια και ώστε να δοθεί η δυνατότητα να εξετασθούν γρανάζια διαφόρων οδοντώσεων.

4.1 Ιδιοσυσκευή δοκιμών πολυμερικών οδοντωτών τροχών Mk I

Η διάταξη δοκιμών Mk I αποτελεί την πρώτη ιδιοσυσκευή η οποία δημιουργήθηκε για την διεξαγωγή δοκιμών σε οδοντωτούς τροχούς κατασκευασμένους αποκλειστικά από πολυμερικά υλικά. Κατασκευάστηκε από τον Κ. Mao στο πανεπιστήμιο του Birmingham το 1993 προκειμένου να μελετηθεί η αντοχή και η φθορά της επιφάνειας των πολυμερών γραναζιών σε συνεχόμενες και σταθερές συνθήκες λειτουργίας υπό τη συνεχή επιβολή φορτίου.



Σχήμα 11: Σχηματική απεικόνιση συσκευής Mk I

(1. Ηλεκτροκινητήρας 2. Σύστημα μετάδοσης κίνησης- Τροχαλίες & μάντας
3. Κιβώτιο μεταλικών γραναζιών 4. Κωνικός συμπλέκτης 5. Οδηγούμενος άξονας
6. Οδηγός άξονας 7. Τέσσερις αρθρωτοί σύνδεσμοι 8. Διάταξη-συγκρότημα
περιστροφής 9. Χωρητικός μετατροπέας μετατοπίσεως 10. Υπό δοκιμή πολυμερή
γρανάζια 11. Μπάρα φόρτισης 12. Φορτίο - βάρος 13. Ηλεκτρονικός ελεγκτής
σήματος, 14. Θερμική ασφάλεια διακοπής συνδέσεως 15. Γέφυρα ενίσχυσης σήματος
16. Αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας 17. Υπολογιστής 18 & 19. Διακόπτης

ενεργοποίησης σφήνας 20. Σφήνα 21. Τέσσερα διαστήματα 22. Περιστροφική άρθρωση)

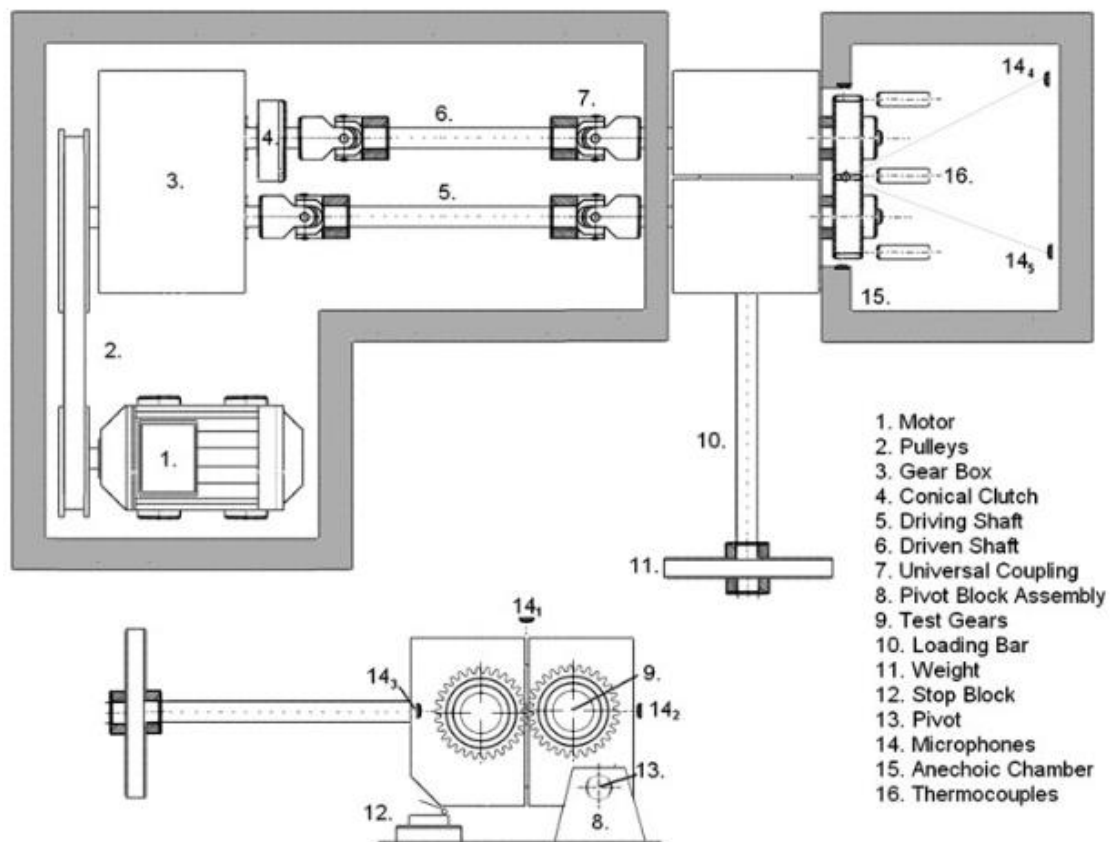
Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η πλήρης διάταξη της συσκευής δοκιμών Mk I, εξοπλισμένη με ηλεκτρονικά συστήματα ώστε η λήψη των δεδομένων να γίνεται άμεσα και τα αποτελέσματα να εμφανίζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής. Σχετικά με τη λειτουργία της, ξεκινώντας από τον ηλεκτροκινητήρα (1), επιλέγεται η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος και η κίνηση μεταδίδεται στο πρώτο κιβώτιο (3), το οποίο εμπεριέχει μεταλλικά γρανάζια, μέσω συστήματος δύο τροχαλιών και ενός ιμάντα (2). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα του ηλεκτροκινητήρα καταλήγουν επίσης στον η/υ (17), αφού πρώτα περάσουν από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή σήματος – controller (13), ώστε τα σήματα να αποτυπωθούν με ορθό τρόπο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μεσολαβεί ακόμη και μία ασφάλεια διακοπής του ηλεκτρονικού (14) συστήματος η οποία σε περίπτωση υπερθέρμανσης ενεργοποιείται και προστατεύει τον η/υ. Εν συνεχεία, τα γρανάζια του πρώτου κιβωτίου συνδέονται έκαστο με έναν άξονα. Ο άξονας ο οποίος συνδέεται με την τροχαλία αποτελεί τον κινητήριο - οδηγό άξονα (6), ενώ ο δεύτερος τον οδηγούμενο (5). Στον οδηγούμενο άξονα είναι τοποθετημένος ένας κωνικός συμπλέκτης (4) για την ασφάλεια του συστήματος σε περίπτωση υπερφόρτωσης και τη μέγιστη μεταφορά ροπής. Επιπλέον, οι άξονες συνδέονται με το υπόλοιπο σύστημα με τέσσερις αρθρωτούς συνδέσμους (7) δύο σε κάθε άξονα, προς απόσβεση κραδασμών του συστήματος, ούτως ώστε η συσκευή να μην κινδυνεύει να φθαρεί κατά τη λειτουργία του συγκροτήματος περιστροφής (8), το οποίο εφαρμόζει επάνω στους άξονες και μεσολαβεί μεταξύ των συνδέσμων και των υπο δοκιμή πολυμερών οδοντωτών τροχών (10). Στο συγκρότημα έχουν ληφθεί μέτρα με στόχο σε

περίπτωση αστοχίας των υπό δοκιμή οδοντωτών τροχών, όπου οι δυνάμεις δεν καταφέρουν να εξισορροπηθούν και το συγκρότημα περιστροφής τείνει να μετατοπιστεί εκτός ορίων, να ενεργοποιηθούν οι διακόπτες (18 & 19), οι οποίοι θέτουν σε λειτουργία σφήνα (20) αποτρέποντας περαιτέρω μετακινήσεις του συστήματος [11].

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά τη λειτουργία της ιδιοσυσκευής, όταν ο ηλεκτροκινητήρας δίνει κίνηση στο σύστημα, οι δυνάμεις αντίδρασης που αναπτύσσονται μεταξύ των υπό δοκιμή οδοντωτών τροχών εξισορροπούν την επιβαλλόμενη ροπή που επιφέρει η διάταξη περιστροφής, σε συνδυασμό με τη μπάρα και το φορτίο. Η μέθοδος αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή επιβολή σταθερής ροπής μεταξύ των γραναζιών που δοκιμάζονται, ανεξαρτήτως της φθοράς που έχει επέλθει στους οδόντες τους [12]. Ακόμη, η απόσταση μεταξύ των οδοντωτών τροχών μπορεί να μειωθεί αναλόγως της φθοράς που υπάρχει, χάρη στους αρθρωτούς συνδέσμους που επιτρέπουν την οριζόντια μετατόπιση των αξόνων. Στη μια πλευρά του συγκροτήματος είναι τοποθετημένος χωρητικός μετατροπέας μετατόπισης – CDT transducer (9), μέσω του οποίου μετράται η φθορά των γραναζιών ανάλογα με τη μεταξύ τους απόσταση. Το σήμα του ενισχύεται από την ηλεκτρονική γέφυρα (15) και μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό ώστε να μπορεί να εμφανιστεί στον η/υ. Εκτός της φθοράς, με το παρόν σύστημα γίνονται ακόμα τρεις μετρήσεις: της ροπής, της ταχύτητας περιστροφής και του χρόνου ζωής των πολυμερών γραναζιών [13].

Επιπλέον, υπάρχουν διάφορες μετατροπές που γίνονται στην συσκευή Mk I ούτως ώστε να λαμβάνονται διαφορετικές μετρήσεις [14]. Σε εφαρμογές όπου απαιτούνται γρανάζια υψηλής ακρίβειας, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία όπως και οι εκπομπές ήχων είναι πολύ σημαντικές και πάντοτε λαμβάνονται υπόψιν. Σύμφωνα με το

ακόλουθο σχήμα (σχήμα: 12), η συσκευή Mk I τροποποιείται προκειμένου να είναι δυνατή η καταγραφή των παραπάνω χαρακτηριστικών.

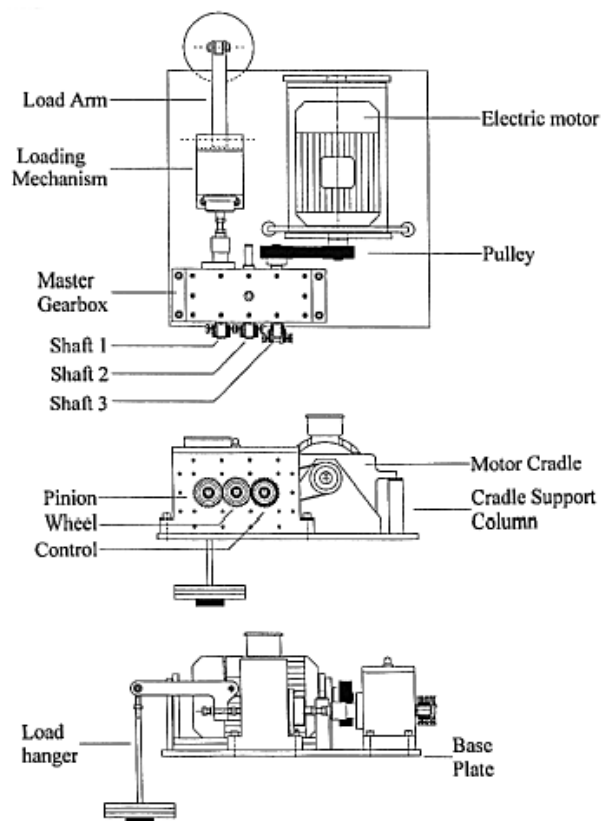


Σχήμα 12: Κάτοψη συσκευής Mk I για μέτρηση αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας και θορύβων μεταξύ των οδοντωτών τροχών
 (Τα στοιχεία 1 έως 13 παραμένουν τα ίδια όπως στο σχήμα 11.
 14. Μικρόφωνα 15. Ηχομονωμένος χώρος 16. Θερμοζεύγη)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 12, η διάταξη είναι ίδια με την προηγούμενη με τη διαφορά ότι αντί να λαμβάνονται μετρήσεις που αφορούν τη φθορά των γραναζιών, λαμβάνονται μετρήσεις σχετικά με τη θερμοκρασία και τις εκπομπές θορύβων. Για το λόγο αυτό, τα υπο δοκιμή γρανάζια τοποθετούνται σε ηχομονωμένο χώρο (15), εντός του οποίου υπάρχουν μικρόφωνα (14₁, 14₂, 14₃, 14₄ και 14₅) καθώς και θερμοζεύγη κοντά στην επαφή και στις οριζόντιες άκρες των γραναζιών [15].

4.2 Ιδιοσυσκευή δοκιμών πολυμερικών οδοντωτών τροχών Mk II ή Mark II

Η ιδιοσυσκευή Mk II ή Mark II αποτελεί εξέλιξη της Mk I. Κατασκευάστηκε από τον White το 1999 στο πανεπιστήμιο του Birmingham, με σκοπό να βελτιώσει και να εξαλείψει κάποιες αδυναμίες των προηγούμενων ιδιοσυσκευών δοκιμών πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Βασίζεται στις αρχές της ανακυκλοφορίας της ισχύος και αποσκοπεί τη βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς που παρουσιάζει ο μηχανισμός επιβολής φορτίου της προγενέστερης συσκευής.

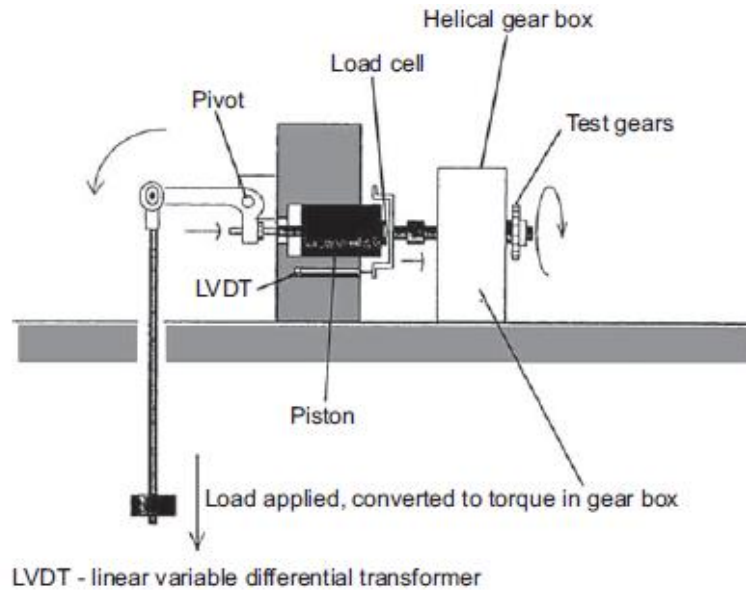


Σχήμα 13.1: Κάτοψη, εμπρόσθια και πίσω όψη ιδιοσυσκευής Mark II

Η συσκευή Mark II, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 13.1 συγκλίνει στη λογική της Mk I σε ότι αφορά τη διαδικασία δοκιμών, διαφέρει όμως, στον τρόπο με τον οποίο

μεταφέρεται η ροπή στο σύστημα των δοκιμαζόμενων πολυμερικών οδοντοτών γραναζιών.

Αρχικά, η συσκευή είναι τοποθετημένη πάνω σε βάση (έλασμα), με τον ηλεκτροκινητήρα να είναι πακτωμένος σε αυτή με τη βοήθεια στηρίξεων. Ο ηλεκτροκινητήρας, όπως και στη Mk I, καθορίζει την ταχύτητα περιστροφής του συστήματος και μεταδίδει την κίνηση μέσω συστήματος μάντα-τροχαλιών σε ένα ελικοειδές κιβώτιο γραναζιών, αποτελούμενο από τρεις άξονες, οι οποίοι καταλήγουν σε τρία γρανάζια αντίστοιχα: το γρανάζι ελέγχου, το υπό δοκιμή πινιόν και το υπό δοκιμή γρανάζι, άξονες 3, 2 και 1 αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η επιλογή του ελικοειδούς κιβωτίου είναι μια εκ των αναβαθμίσεων, διότι τα ελικοειδή γρανάζια είναι καταλληλότερα για την παραλαβή υψηλότερων φορτίων σε σχέση με τα μετωπικά, καθώς η μετάδοση της κίνησης είναι ομαλότερη και πιο ήσυχη. Η κίνηση μεταδίδεται στο δοκιμαζόμενο σύστημα μέσω του τρίτου άξονα (Shaft 3), του οποίου τα άκρα συνδέονται με την τροχαλία και το γρανάζι ελέγχου. Επίσης, στο κιβώτιο και κατά συνέπεια στο υπό δοκιμή σύστημα, μεταδίδεται ροπή από τον πρώτο άξονα (Shaft 1), βάσει του μηχανισμού που παρουσιάζεται στο σχήμα 13.2 [16].



Σχήμα 13.2: Σχηματική απεικόνιση ιδιοσυσκευής Mark II σε πλάγια όψη

Ο μηχανισμός φόρτισης αποτελείται από τη μπάρα φόρτισης όπου στο ένα της άκρο τοποθετούνται τα βάρη, ενώ το άλλο είναι συνδεδεμένο με βραχίονα περιστροφής. Μέσω του πιστονιού η ροπή μεταφέρεται στον άξονα περιστροφής. Το πιστόνι καταλήγει στον πρώτο άξονα του οποίου το ελικοειδές γρανάζι εξαναγκάζεται σε εμπλοκή με το ελικοειδές γρανάζι του δεύτερου άξονα και κατ' αυτό τον τρόπο μεταφέρεται η ροπή στο υπο δοκιμή σύστημα πολυμερικών οδοντωτών τροχών.

Επίσης, μέσω γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (LVDT) μετράται η μετατόπιση του άξονα 1, ο οποίος βρίσκεται στο μηχανισμό φόρτισης κάτω από το πιστόνι, καθώς και η δύναμη που μεταφέρει το πιστόνι στον άξονα με τη χρήση δυναμοκυψέλης (load cell).

Η φθορά που επέρχεται στους πολυμερείς οδοντωτούς τροχούς μετράται είτε έμμεσα με τη μέτρηση της αλλαγής της κλίσης του βραχίονα περιστροφής, είτε άμεσα με την περιοδική παύση της δοκιμής, ώστε οι οδοντωτοί τροχοί να απομακρύνονται από το σύστημα και να ζυγίζονται. Σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει

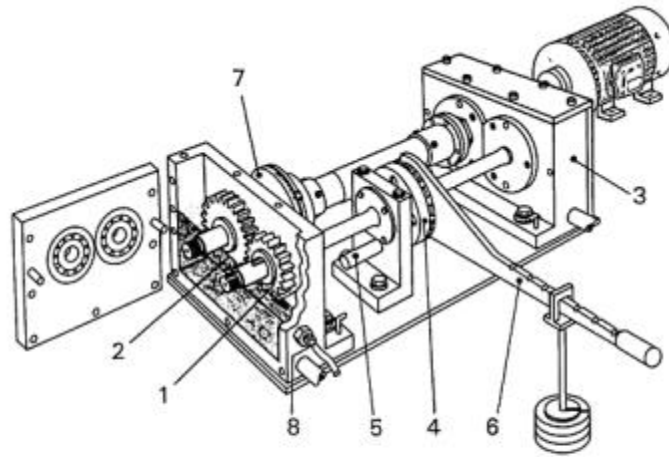
αδυναμίες, λόγω του γεγονότος ότι τα γρανάζια πρέπει να επανατοποθετούνται σε θέσεις οι οποίες να ταυτίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο με τις θέσεις που είχαν προτού αφαιρεθούν από τη συσκευή [17].

4.3 Ιδιοσυσκευή δοκιμών πολυμερικών οδοντωτών τροχών FZG

Η ιδιοσυσκευή FZG πήρε την ονομασία της από Τεχνολογικό Ινστιτούτο για τη Μελέτη των Οδοντωτών Τροχών και Μηχανισμών Κίνησης του Πολυτεχνείου του Μονάχου. Πιο συγκεκριμένα, τα αρχικά FZG αντιστοιχούν στο «Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau» το οποίο μεταφρασμένο είναι το όνομα του προαναφερθέντος γερμανικού ινστιτούτου.

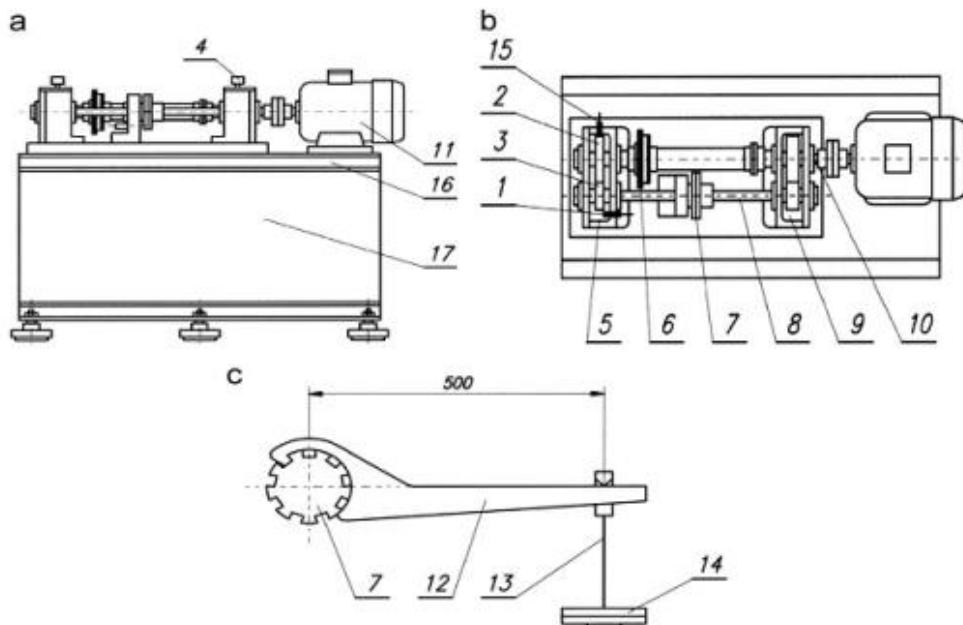
Αρχικά, χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για τη δοκιμή μεταλλικών οδοντωτών τροχών, μετέπειτα όμως, καθιερώθηκε η χρήση της και στη μελέτη πολυμερικών γραναζιών.

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 14.1, η αυθεντική της διάταξη συμπεριλαμβάνει μια δεξαμενή λιπαντικού ελαίου. Η χρησιμότητά της έγκειται στο γεγονός ότι μία εκ των δοκιμών που εκτελούνται από την ιδιοσυσκευή αυτή, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς διαφόρων λιπαντικών ελαίων με σκοπό την επιλογή του καταλληλότερου για το εκάστοτε σύστημα και σύμφωνα με τις όποιες συνθήκες λειτουργίας που ισχύουν κάθε φορά. Επίσης, ένας επιπλέον σκοπός ο οποίος εξυπηρετείται από την ιδιοσυσκευή δοκιμών οδοντωτών τροχών FZG είναι η παρατήρηση και η μέτρηση της επιφανειακής φθοράς των οδοντωτών τροχών στα σημεία της μεταξύ τους επαφής σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και η μέτρηση της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής.



- | | |
|---------------|---------------------------|
| 1 Test Pinion | 5 Locking Pin |
| 2 Test Wheel | 6 Load Lever and Weights |
| 3 Slave Gear | 7 Torque Measuring Clutch |
| 4 Load Clutch | 8 Temperature Sensor |

Σχήμα 14.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση ιδιοσυσκευής FZG με ημιτομή
 (1. Πινιόν υπό δοκιμή 2. Γρανάζι υπό δοκιμή 3. Εξαρτώμενο γρανάζι 4. Συμπλέκτης φορτίου 5. Πύρος ασφαλείας 6. Μπάρα-μοχλός εφαρμογής φορτίου και βάρος-φορτίο 7. Μετρητής ροπής-Δείκτης φοράς στρέψης του άξονα 8. Θερμοζεύγος)



Σχήμα 14.2: Ιδιοσυσκευή FZG - όψεις
 (a. εμπρόσθια όψη, b. κάτοψη, c. Εξοπλισμός φόρτισης άξονα)

Σύμφωνα με το σχήμα 14.1, η λειτουργία της συσκευής επιτελείται ως εξής: ο ηλεκτροκινητήρας δίνει κίνηση στο ένα εκ των δύο γραναζιών που υπάρχουν στο κιβώτιο. Από τη ρύθμιση του ηλεκτροκινητήρα επιλέγονται οι στροφές ανά λεπτό που θα παρέχονται στο υπό δοκιμήν σύστημα, καθώς και η φορά περιστροφής του. Η κίνηση μεταφέρεται στον άξονα, ο οποίος καταλήγει στο υπό δοκιμή σύστημα γρανάζι (2) – πινιόν (1) εντός της δεξαμενής λιπαντικού ελαίου στην άλλη άκρη της διατάξεως της ιδιοσυσκευής. Στη δεξαμενή είναι προσαρμοσμένο θερμοζεύγος με σκοπό τη λήψη των τιμών της θερμοκρασίας του ελαίου εντός αυτής. Στον άξονα που συνδέεται ο ηλεκτροκινητήρας είναι τοποθετημένος ένας μετρητής ροπής ο οποίος παράλληλα είναι και δείκτης φοράς στρέψης του άξονα (7). Στον επίσης περιστρεφόμενο δεύτερο άξονα είναι τοποθετημένο ένα σύστημα επιβολής φορτίου, το οποίο ρυθμίζεται ανάλογα με το μέγεθος της ροπής με την οποία ο χρήστης της συσκευής επιθυμεί να φορτίσει το σύστημα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν άξονα-μπάρα ρυθμιζόμενης κλίσης και πολλαπλών θέσεων επιβολής φορτίου (6) όπου όπως φαίνεται στο σχήμα 14.2-c τοποθετούνται βάρη, ενώ εφαρμόζει σε ένα συμπλέκτη, ώστε να είναι εφικτή η επιβολή του επιθυμητού φορτίου χωρίς αυτό να περιστρέφεται ταυτόχρονα με τον άξονα. Το μέρος του συμπλέκτη με το φορτίο είναι ασφαλισμένο και σταθερό -με ελάχιστες μετατοπίσεις λόγω λειτουργίας του συμπλέκτη-, ενώ το δεύτερο μέρος μεταφέρει τη ροπή στον άξονα με την τριβή η οποία αναπτύσσεται μεταξύ των φλαντζών των δυο μερών [18].

Τα κυριότερα δεδομένα που λαμβάνονται από τις δοκιμές σε μηχανές FZG αφορούν την επιφανειακή φθορά των επαπτόμενων μερών των οδόντων, εφαρμόζοντας σταθερές συνθήκες λειτουργίας σχετικά με την περιστροφή του συστήματος και το έλαιο της δεξαμενής και επιβάλλοντας διαφορετικές τιμές ροπών.

Τα αποτελέσματα λαμβάνονται με μετρήσεις της επιφάνειάς τους μετά τη διεξαγωγή του πειράματος [19].

5. Έρευνες – Πειράματα

5.1 Friction and wear behavior of acetal and nylon gears [20]

Η έρευνα «Friction and wear behavior of acetal and nylon gears», διεξήχθη το 2008 από τους K.Mao, W.Li, C.J.Hooke και D.Walton. Πρόκειται για μια εκτενή έρευνα σχετικά με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα πολυμερικά γρανάζια σε συνθήκες λειτουργίας μεταξύ τους. Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε η ιδιοσυσκευή Mk I και εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις όπου σε κάθε περίπτωση η ταχύτητα περιστροφής ήταν 1000 rpm και έγινε επιβολή πολλαπλών φορτίων από 7 έως 16,1 Nm για τους ακεταλικούς οδοντωτούς τροχούς, ενώ στα νάυλον γρανάζια το εύρος της επιβαλλόμενης ροπής ήταν από 5 έως 20 Nm. Στην πρώτη περίπτωση γρανάζι και πινιόν ήταν κατασκευασμένα από ακετάλη, ενώ στη δεύτερη από νάυλον. Στην τρίτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε πινιόν ακετάλης και γρανάζι νάυλον και στην τέταρτη το αντίστροφο.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων έδειξαν ότι για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος και συγκεκριμένων αριθμών κύκλων ο ρυθμός με τον οποίο οι οδοντωτοί τροχοί φθείρονται εξαρτάται από την επιβαλλόμενη ροπή και τη θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται μεταξύ των οδόντων. Αναλυτικότερα, από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι όταν και το γρανάζι και το πινιόν είναι από ακετάλη, τότε η τιμή της ροπής που μπορεί να επιβληθεί έχει ένα κρίσιμο σημείο όπου πριν

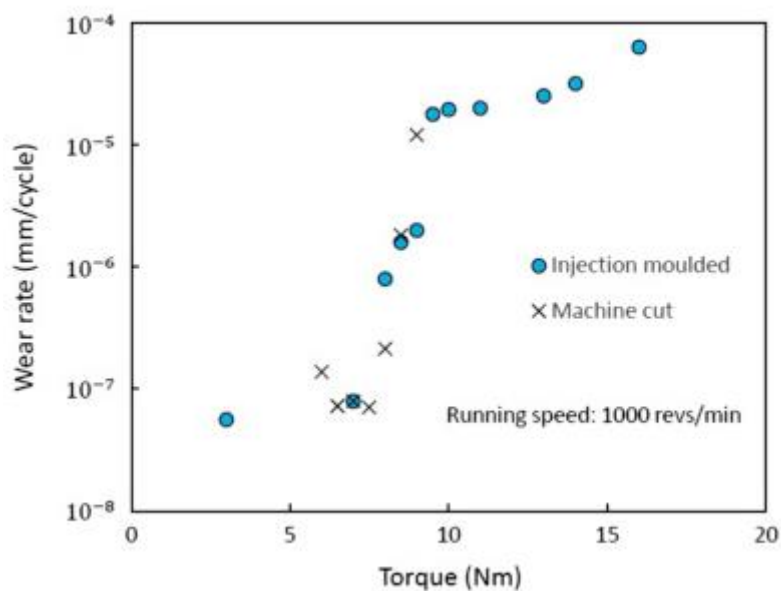
από αυτή την τιμή η φθορά είναι χαμηλή, ενώ μετά από την κρίσιμη τιμή της ροπής ο ρυθμός φθοράς αυξάνεται ραγδαία. Ομοίως συμβαίνει και στους νάυλον οδοντωτούς τροχούς, με τη διαφορά ότι η τριβή και η φθορά επιδρά στα νάυλον γρανάζια εντελώς ανόμοια από ότι στα ακεταλικά. Στα ακεταλικά η αστοχία προκαλείται από φθορές στο κάτω μέρος και στο μέσο του οδοντωτού τροχού σε αντίθεση με τα νάυλον όπου το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η επιφανειακή φθορά. Τέλος, από την έρευνα προέκυψε ότι όταν στο σύστημα συνδυάζονται οδοντωτοί τροχοί διαφορετικών υλικών η συμπεριφορά που προκύπτει σε φθορά και αστοχία διαφοροποιείται ανάλογα από το ποιος οδοντωτός τροχός μεταδίδει την κίνηση στον άλλο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για σύστημα οδοντωτών τροχών, με τον ακεταλικό τροχό να είναι οδηγός, είναι αρκετά καλύτερα από ότι στην περίπτωση όπου ο οδηγός τροχός είναι από νάυλον.

5.2 The wear and thermal contact behavior of machine cut polymer gears [21]

Η έρευνα «The wear and thermal contact behavior of machine cut polymer gears» πραγματοποιήθηκε το 2014 από τους K.Mao, P.Langlois, Z.Hu κ.α., οι οποίοι παρουσίασαν μια εργασία σχετικά με τη συμπεριφορά ακεταλικών οδοντωτών τροχών σε φθορά και σε θερμική μηχανική συμπεριφορά υλικού. Η έρευνα έγινε με σκοπό τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν για ακεταλικά γρανάζια κατασκευασμένα σε κοπτικό μηχάνημα, να συγκριθούν με αντίστοιχα αποτελέσματα ίδιων οδοντωτών τροχών κατασκευασμένων όμως με τη μέθοδο της χύτευσης με έκχυση υλικού. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για 1000 rpm και οι εξωτερικές φορτίσεις οι οποίες επιβλήθηκαν στο σύστημα ώστε να παρθούν οι κατάλληλες μετρήσεις ήταν από 6 έως 9 Nm, ανεβαίνοντας κατά 0,5 Nm ανά μέτρηση. Η

ιδιοσυσκευή που χρησιμοποιήθηκε στη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι η Mk I, η οποία χαρακτηρίζεται ως μια μοναδική ιδιοσυσκευή ικανή να εξετάσει και πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς σε συνθήκες επαφής των οδόντων με κλίση, προσδίδοντας παράλληλα συνεχές φορτίο στο σύστημα και διατηρώντας τη ροπή.

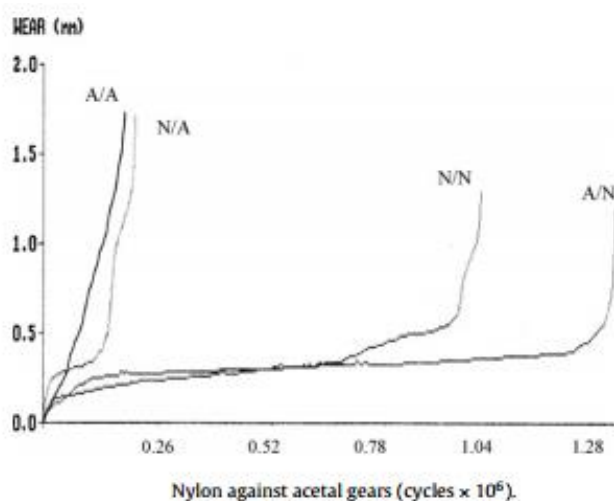
Όπως προέκυψε από την έρευνα και τη μετέπειτα σύγκριση των πολυμερικών οδοντωτών τροχών οι οποίοι είχαν κατασκευαστεί με διαφορετική μέθοδο, η φθορά που επέρχεται στα γρανάζια είναι ανεξάρτητη από την μέθοδο κατασκευής τους, όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 15: Διάγραμμα ρυθμού φθοράς – ροπής ακεταλικών γραναζιών κατασκευασμένων με τη μέθοδο της χύτευσης με έκχυση και κατασκευασμένων από κοπτικό μηχάνημα

5.3 An investigation on the wear behavior of dissimilar polymer gear engagements [22]

Η «An investigation on the wear behavior of dissimilar polymer gear engagements» έγινε το 2010, από τους W.Li, A.Wood, R.Weidig και K.Mao. Σκοπός της έρευνας αυτής ήταν η μελέτη της προκύπτουσας φθοράς σε σύστημα γραναζιών ανόμοιων υλικών καθώς και η εύρεση του λόγου για τον οποίο σε σύστημα γραναζιών νάυλον και ακετάλης, όταν ο ακεταλικός οδοντωτός τροχός μεταφέρει την κίνηση στο δεύτερο, το σύστημα έχει μεγαλύτερη απόδοση. Χαρακτηριστικό είναι το παρακάτω σχήμα στο οποίο φαίνεται ότι όταν η κίνηση μεταδίδεται από το νάυλον γρανάτζι στο ακεταλικό η φθορά στην επιφάνει του οδόντα είναι μεγαλύτερη από ότι στην αντίστροφη περίπτωση. Αναλογικά, η φθορά που προκαλείται στο σύστημα ακετάλης-νάυλον σε πενταπλάσιους κύκλους, είναι μικρότερη από τη φθορά που προκαλείται στο νάυλον-ακεταλικό σύστημα γραναζιών.



Σχήμα 16: Διάγραμμα φθοράς-περιστροφών συστημάτων πολυμερών οδοντωτών τροχών όμοιων και ανόμοιων υλικών

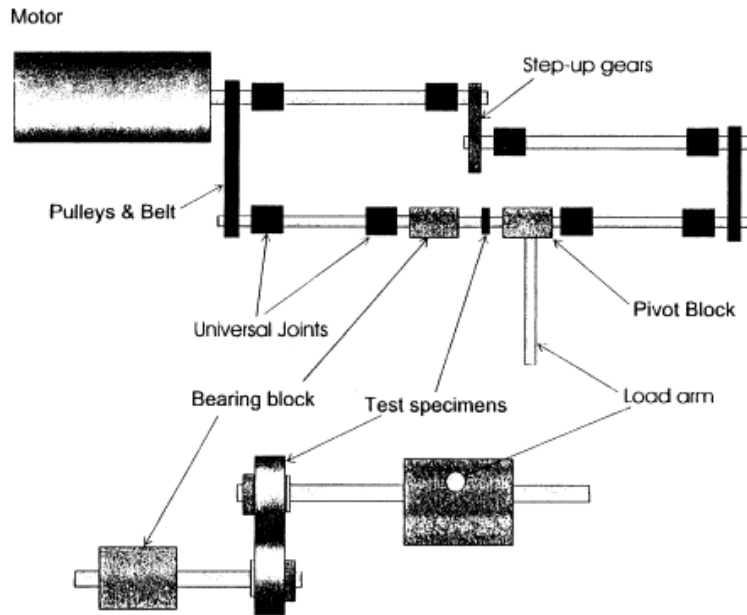
Οι τιμές που ελήφθησαν από την ιδιοσυσκευή Mk I, η οποία χρησιμοποιήθηκε, επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η δύναμη που αναπτύσσεται στο πρώτο σημείο επαφής των οδόντων είναι μεγαλύτερη από ότι στο τελευταίο. Κατά συνέπεια, η ρίζα του οδηγού γραναζιού και το άκρο του οδηγούμενου γραναζιού δέχονται την μεγαλύτερη φθορά. Όταν ο νάυλον οδοντωτός τροχός μεταδίδει την κίνηση στο σύστημα, τότε το άκρο του ακεταλικού γραναζιού δέχεται μεγαλύτερη δύναμη με αποτέλεσμα το σύστημα να αστοχεί γρηγορότερα λόγω της μεγάλης θερμικής φθοράς της ακετάλης. Στην αντίστροφη περίπτωση, η απόδοση και η διάρκεια ζωής του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερες λόγω της μεγαλύτερης αντοχής της ρίζας του ακεταλικού οδόντα σε θερμική φθορά σε σχέση με το άκρο του.

5.4 Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears [23]

Η έρευνα «Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears» πραγματοποιήθηκε από τους N.A.Wright και S.N.Kukureka και δημοσιεύτηκε το 2001. Σκοπός της έρευνας ήταν να μελετηθούν ενισχυμένα γρανάζια PMC (polymer matrix composite), δηλαδή γρανάζια τα οποία εμπεριέχουν ίνες -είτε μακριές είτε κοντές-, ενώ η μήτρα τους, η οποία και τις συγκρατεί, είναι κατασκευασμένη από πολυμερές υλικό. Οι οδοντωτοί τροχοί είναι κατασκευασμένοι από πολυαμίδιο και πιο συγκεκριμένα από PA66, ενώ οι ίνες από γυαλί ή άνθρακα. Για την πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε η ιδιοσυσκευή Mark II (Mk II), η

οποία περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.2. Στο τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης με άλλες τριβολογικές μελέτες διαφορετικών τεχνικών, οι οποίες όμως εξέταζαν το υλικό ως δίσκο και όχι ως γρανάζι, ώστε να εξακριβωθεί η αξιοπιστία τους, για τριβολογική εξέταση οδοντωτών τροχών.

Οι τεχνικές με τις οποίες συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης είναι η τεχνική pin-on-disk και η twin disk roll/slide. Όταν ένα υλικό εξετάζεται με την πρώτη μέθοδο (pin-on-disk), τότε ένας δίσκος που είναι κατασκευασμένος από το εξεταζόμενο υλικό περιστρέφεται. Πάνω στο συγκεκριμένο δίσκο ακουμπάει κύλινδρος ο οποίος του επιβάλλει φορτίο. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται με ζύγιση του δοκιμίου, μέτρηση του πάχους του και εξέταση της επιφάνειάς του. Κατά τη δεύτερη μέθοδο (twin disk roll/slide), δύο δίσκοι του εξεταζόμενου υλικού εφάπτονται μεταξύ τους και περιστρέφονται. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται με παρόμοιους τρόπους όπως και στην πρώτη περίπτωση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια εκ των συσκευών που χρησιμοποιούνται για πειράματα twin disk roll/slide, η οποία εμφανίζει όμοια λογική λειτουργίας με τις συσκευές εξέτασης πολυμερών οδοντωτών τροχών Mk I και FZG.

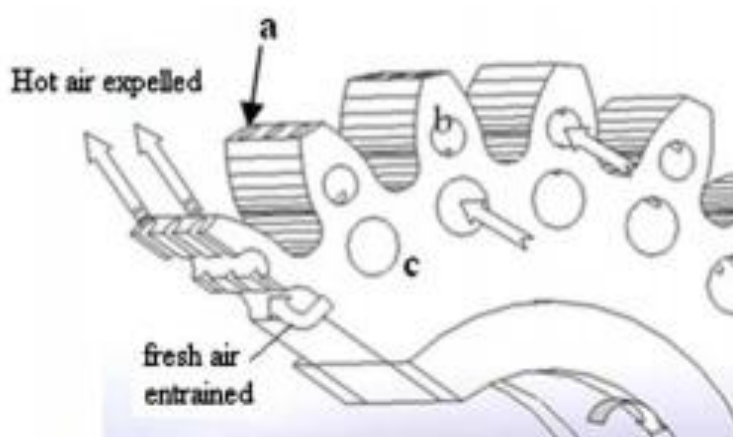


Σχήμα 17: Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής twin disk roll/slide

Από το πείραμα προέκυψε ότι τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν με τη συσκευή Mark II, ήταν σχετικά κοντά σε αυτά της μεθόδου twin disk roll/slide, όσον αφορά την απόδοση του υλικού, παρότι οι ρυθμοί φθοράς του υλικού είχαν αρκετά μεγάλη διαφορά. Από την άλλη, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της συσκευής pin-on-disk είχαν τεράστιες διαφορές και δεν υπήρχαν σημεία ταύτισης μεταξύ τους. Η έρευνα κλείνει αναφέροντας ότι πρέπει να γίνει περαιτέρω δουλειά με διάφορα υλικά τα οποία να εξεταστούν και ως δίσκοι με τη συσκευή twin disk roll/slide, αλλά και ως οδοντωτοί τροχοί.

5.5 Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity [24]

Η μελέτη σχετικά με την ανάπτυξη πολυμερικών οδοντωτών τροχών από πολυαμίδιο για τη δυνατότητα μεταφοράς μεγαλύτερων φορτίων δημοσιεύτηκε το 2009 από τον Hayrettin Duzkuloğlu. Η σχετική έρευνα αναφέρει ότι στα γρανάζια πολυαμιδίου αναπτύσσεται μεγάλη θερμοκρασία κατά τη λειτουργία τους, προκαλώντας φθορές στην επιφάνεια των οδόντων. Για τη διεξαγωγή της έρευνας αυτής, χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν συμπαγή γρανάζια πολυαμιδίου και γρανάζια πολυαμιδίου στα οποία δημιουργήθηκαν οπές στους οδόντες τους έτσι ώστε να ψύχονται και να αποφεύγεται η συσσώρευση θερμότητας.



Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ψύξης των γραναζιών πολυαμιδίου

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των παραπάνω πολυμερικών οδοντωτών τροχών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή FZG, λειτουργώντας με ταχύτητα περιστροφής 1750 rpm και για ροπές 6,12, 10,32, 16,53 και 23,3 Nm.

Από τη σύγκριση των δυο ειδών των οδοντωτών τροχών πολυαμιδίου, προκύπτει ότι οι οπές στο σώμα των οδόντων είναι επιτυχημένοι καταφέροντας να μειώσουν τη θερμοκρασία των γραναζιών, να αυξήσουν το μέγιστο φορτίο το οποίο το γρανάζι ήταν ικανό να μεταφέρει και τέλος να επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής τους, λύνοντας κατά αυτόν τον τρόπο το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζουν οι οδοντωτοί τροχοί πολυαμιδίου: τη μεταφορά μικρών φορτίων λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζεται συσσωρευμένη θερμότητα κατά τη μεταφορά μεγαλύτερων φορτίων. Παρόλα αυτά, σε πολύ μεγάλα φορτία παρατηρείτε αστοχία και των διατρητών οδόντων, λόγω συσσωρευμένων τάσεων περιμετρικά των οπών. Εν κατακλείδι, η μέθοδος αυτή αύξησε τη διάρκεια ζωής και την απόδοση των οδοντωτών τροχών πολυαμιδίου.

6. Επίλογος – συμπεράσματα

Τα πολυμερή αποτελούν πλέον μια κατηγορία υλικών με πολλαπλές χρήσεις. Σχετικά με την παραγωγή πολυμερικών οδοντωτών τροχών τα μακρομοριακά υλικά έχουν ήδη εδραιωθεί ως πρώτες ύλες, ενώ μοντελοποιούνται με διάφορους τρόπους. Αν και δεν είναι ακόμη τόσο διαδεδομένο, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονται και με τη χρήση μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή τους και επιπλέον, να είναι δυνατή η δημιουργία πολυπλοκότερων μοντέλων πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε μικρότερο χρονικό διάστημα και με λιγότερους οικονομικούς πόρους. Όμως, παρά τα πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών προτιμώνται ακόμη οι παλαιότερες μέθοδοι κατασκευής, όπως αυτές που κατασκευάζονται οι μεταλλικοί οδοντωτοί τροχοί.

Τα πολυμερικά γρανάζια χρησιμοποιούνται για ποικίλες εφαρμογές, ενώ οι δυνατότητές τους όχι μόνο καλύπτουν επαρκώς τους τομείς εφαρμογής τους, αλλά σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να συγκριθούν με τα μεταλλικά γρανάζια, δεδομένου ότι παρουσιάζουν θετικότερη συμπεριφορά, όπως για παράδειγμα στο γεγονός ότι συχνά δεν απαιτούν λίπανση, εκπέμπουν λιγότερους θορύβους, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται μικρότερη οικονομική επιβάρυνση και λιγότερος χρόνος για την παραγωγή τους.

Οι ιδιότητες των πολυμερικών οδοντωτών τροχών ελέγχονται είτε μέσω συσκευών οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εξέταση και μεταλλικών γραναζιών, όπως είναι η FZG, είτε μέσω συσκευών οι οποίες είναι κατασκευασμένες για τη διεξαγωγή δοκιμών αποκλειστικά σε πολυμερικά γρανάζια, όπως είναι οι συσκευές που κατασκευάστηκαν στο πανεπιστήμιο του Birmingham (Mk I και Mk II), οι οποίες με τροποποιήσεις μπορούν να αναλύσουν κάθε κατάσταση που προκύπτει κατά τη λειτουργία δύο πολυμερικών γραναζιών, όπως η ανάπτυξη θερμοκρασίας, η δημιουργία ηχητικών ρύπων, η αντοχή τους στη συχνή χρήση, η επιφανειακή τους φθορά και η διάρκεια ζωής τους.

Ήδη έχουν διεξαχθεί και δημοσιευτεί ποικίλες μελέτες και έρευνες με τις οποίες συγκρίνονται τα πολυμερικά γρανάζια με μεταλλικά, τροποποιούνται ούτως ώστε να βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά τους και τη διάρκεια ζωής τους και βρίσκονται οι βέλτιστοι συνδιασμοί υλικών κατασκευής πολυμερών γραναζιών ώστε από το σύστημα να αποκομίζεται η καλύτερη δυνατή λειτουργία. Επίσης, σε πειράματα γίνεται σύγκριση των συσκευών μελέτης πολυμερικών οδοντωτών τροχών, όπως αυτές που περιγράφησαν παραπάνω, με συσκευές μελέτης φθοράς πολυμερικών υλικών σε μορφή δίσκου, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα και να κριθούν αξιόπιστες ή μη και άλλες μέθοδοι εξέτασης των υλικών.

Εν κατακλείδι, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί είναι μια κατηγορία στοιχείων με πολλές τεχνολογικές εφαρμογές στο σύγχρονο κόσμο, σε τομείς όπως η ρομποτική, η μηχανική, η ιατρική κ.α., ενώ σταδιακά αναμένεται οι εφαρμογές τους να πολλαπλασιασθούν λόγω των εξαιρετικών χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων που παρουσιάζουν.

Βιβλιογραφία

- [1] Βουγιούκα Σ. *Μηχανική Πολυμερών*. Εσωτερικές εκδόσεις ΕΜΠ, Ελλάδα.
- [2] Koutsos, V. (2002). *Introduction to polymers*. University of Edinburgh. Edinburgh, Scotland.
- [3] Roberts J., Caserio M. (1977). *Basic Principals of Organic Chemistry (Second edition) – Chapter 29 Polymers*. California, USA: W.A. Benjamin Inc.
- [4] Kratochvil P. MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol. 1 – *Structure and Properties of Polymers*.
- [5] Μανωλάκος Δ. (2015). Εφαρμογες προηγμένων υλικών – *Πολυμερή Γενικά*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα.
http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1_Polimeri_Genika.pdf
- [6] Bhowmick A., (MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol. 1 – *Mechanical Properties of Polymers*.
- [7] Osswald, T. (2011). *Understanding Polymer Processing; Process and Governing Equations*. Munich, Germany: Hanser Publishers.
- [8] Walter R. (2004). *Engineering Principles for Plastic Gears*. GEAR SOLUTIONS.
<http://www.gearsolutions.com/article/detail/5621/engineering-principles-for-plastic-gears>

- [9] Upcraft S., Fletcher R. (2003). *The Rapid Prototyping Technologies*, Nottingham, England.
- [10] GE Plastics. (2006). *A Guide to Plastic Gearing*. General Electric Company.
- [11] Mao K. (2006). *A new approach for polymer composite gear design*. Brunel University. Brunel: UK.
- [12] Li W., Wood., Weidig R., Mao K. (2011). *Wear*. An investigation on the wear behavior of dissimilar polymer gear engagements. Elsevier B.V.
- [13] Breeds A.R., Kukureka S.N., Mao K., et al. (1993). *Wear*. Wear behavior of acetal gear pairs. Elsevier Sequoia.
- [14] Dearn K.D., Hoskins T.J., et al. (2013). *Wear*. Applications of dry film lubricants for polymer gears. Elsevier B.V.
- [15] Hoskins T.J., Dearn K.D., Kukureka S.N., Walton D. (2011). *Acoustic noise from polymer gears – A tribological investigation*. University of Birmingham. Birmingham, England.
- [16] Hoskins T.J. (2015). *The Mechanical and Tribological Properties of PEEK Gears*. University of Birmingham. Birmingham, England.

- [17] Wright N.A., Kukureka S.N. (2001). *Wear*. Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears. Elsevier Science B.V.
- [18] Fernandes C., Martins R., Seabra J. (2014). *Tribology International*. Torque loss of type C40 FZG gears lubricated with wind turbine gear oils. Elsevier Ltd.
- [19] Fernandes C., Battez H., Gonzalez R., et al. (2015). *Tribology International (Volume 90)*. Torque loss and wear of FZG gears lubricated with wind turbine gear oils using liquid as additive.
- [20] Mao K., Li W., Hooke C.J., Walton D. (2009). *Wear*. Friction and wear behavior of acetal and nylon gears. Elsevier B.V.
- [21] Mao K., Langlois P., Hu Z., et al. (2015). *Wear*. The wear and thermal contact behavior of machine cut polymer gears. Elsevier B.V.
- [22] Li W., Wood., Weidig R., Mao K. (2011). *Wear*. An investigation on the wear behavior of dissimilar polymer gear engagements. Elsevier B.V.
- [23] Wright N.A., Kukureka S.N. (2001). *Wear*. Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears. Elsevier Science B.V.
- [24] Duzcukoglu H. (2009). *Tribology International*. Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity. Elsevier Ltd.

Πηγές σχημάτων

[Σχήμα 1] Koutsos, V. (2002). *Introduction to polymers*. University of Edinburgh. Edinburgh, Scotland.

[Σχήμα 2] Koutsos, V. (2002). *Introduction to polymers*. University of Edinburgh. Edinburgh, Scotland.

[Σχήμα 3] Μανωλάκος Δ. (2015). Εφαρμογες προηγμένων υλικών – Πολυμερή Γενικά. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα.

http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1_Polimeri_Genika.pdf

[Σχήμα 4.1] Osswald, T. (2011). *Understanding Polymer Processing; Process and Governing Equations*. Munich, Germany: Hanser Publishers.

[Σχήμα 4.2] Kailas S. Chapter 11. Applications and processing of polymers, in: *Material Science*. India.

[Σχήμα 5] Osswald, T. (2011). *Understanding Polymer Processing; Process and Governing Equations*. Munich, Germany: Hanser Publishers.

[Σχήμα 6] Osswald, T. (2011). *Understanding Polymer Processing; Process and Governing Equations*. Munich, Germany: Hanser Publishers.

[Σχήμα 7] Osswald, T. (2011). *Understanding Polymer Processing; Process and Governing Equations*. Munich, Germany: Hanser Publishers.

[Σχήμα 8] Gurr M., Mulhaupt R. (2012). *Polymer Science:A Comprehensive Reference (Vol.8)*. Netherlands: Elsevier Science.

[Σχήμα 9] Gurr M., Mulhaupt R. (2012). *Polymer Science:A Comprehensive Reference (Vol.8)*. Netherlands: Elsevier Science.

[Σχήμα 10] Gurr M., Mulhaupt R. (2012). *Polymer Science:A Comprehensive Reference (Vol.8)*. Netherlands: Elsevier Science.

[Σχήμα 11] Mao K. (2006). *A new approach for polymer composite gear design*. Brunel University. Brunel: UK.

[Σχήμα 12] Hoskins T.J., Dearn K.D., Kukureka S.N., Walton D. (2011). *Acoustic noise from polymer gears – A tribological investigation*. University of Birmingham. Birmingham, England.

[Σχήμα 13.1] Hoskins T.J. (2015). *The Mechanical and Tribological Properties of PEEK Gears*. University of Birmingham. Birmingham, England.

[Σχήμα 13.2] Njuguma J. (2016). *Lightweight Composite Structures in Transport; Design, Manufacturing, Analysis and Performance*. UK: Woodhead Publishing.

[Σχήμα 14.1] Arun A.P., Senthil kumar A.P., Giriraj B., Faizur rahaman A. (2014). Gear Test Rig – A review. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol.14 No: 05*, India.

[Σχήμα 14.2] Arun A.P., Senthil kumar A.P., Giriraj B., Faizur rahaman A. (2014). Gear Test Rig – A review. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol.14 No: 05*, India.

[Σχήμα 15] Mao K., Langlois P., Hu Z., et al. (2015). *Wear*. The wear and thermal contact behavior of machine cut polymer gears. Elsevier B.V.

[Σχήμα 16] Li W., Wood., Weidig R., Mao K. (2011). *Wear*. An investigation on the wear behavior of dissimilar polymer gear engagements. Elsevier B.V.

[Σχήμα 17] Wright N.A., Kukureka S.N. (2001). *Wear*. Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears. Elsevier Science B.V.

[Σχήμα 18] Duzcukoglu H. (2009). *Tribology International*. Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity. Elsevier Ltd.