



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Διερεύνηση των μηχανολογικών εφαρμογών των πολυμερικών οδοντωτών τροχών

ΤΟΥ

ΜΑΚΡΗ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ  
(Α.Μ. 45274)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΡΤΙΟΣ, 2021

## ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ :

ΡΑΠΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ :

ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ :

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μακρής Διονύσιος του Τιμοθέου, με αριθμό μητρώου 45274 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια των προπτυχιακών μου σπουδών. Πιο συγκεκριμένα, ευχαριστώ όλο το διδακτικό προσωπικό του τμήματός μου, τους συμφοιτητές μου, τους φίλους μου και την οικογένειά μου, οι οποίοι στάθηκαν αρωγοί και μου παρείχαν κάθε υλική και ψυχολογική στήριξη στην προσπάθειά μου αυτή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα, τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, τον κύριο Τσολάκη Αντώνιο, καθώς επίσης και τον διδακτορικό φοιτητή του ΠΑ.Δ.Α. Παπαλέξη Χρήστο για την συνεισφορά τους.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη διερεύνηση των μηχανολογικών εφαρμογών όπου είναι δυνατή η χρήση πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Η χρήση πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε δυναμικά συστήματα έχει πολλά πλεονεκτήματα αφού οι τροχοί αυτοί έχουν σημαντικά μικρότερη πυκνότητα από τους μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς, απορροφούν καλύτερα τους κραδασμούς και συνήθως δεν απαιτούν καθόλου λίπανση. Το βασικό εμπόδιο στην ευρεία χρήση τους στις βιομηχανικές εφαρμογές είναι η μικρή φέρουσα ικανότητα φορτίου που έχουν σε σχέση με τους μεταλλικούς τροχούς. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται όλες οι εξελίξεις που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία σχετικά με την αύξηση της αντοχής των πολυμερικών οδοντωτών τροχών είτε με βελτιστοποίηση της γεωμετρίας τους, είτε με χρήση ενισχύσεων για το σχηματισμό σύνθετων υλικών. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων και των πειραματικών μετρήσεων δείχνουν ότι οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να φτάσουν σε αντοχές τους αντίστοιχους μεταλλικούς και για αυτό ήδη χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική και στη τεχνολογία τροφίμων. Με αυτό το ρυθμό εξέλιξης σύντομα οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί θα αποτελούν μια αξιόπιστη εναλλακτική στους μεταλλικούς τροχούς στις περισσότερες εφαρμογές μετάδοσης ισχύος.

## Abstract

The present thesis concerns an overview of mechanical applications where the use of polymer gears is possible. The use of polymer gears in dynamic systems has many advantages as these gears have significantly lower density than metal gears, absorb vibrations better and usually do not require any lubrication. The main obstacle to their widespread use in industrial applications is the low load-bearing capacity they have in relation to metal gears. This thesis presents all the developments that have been presented in the literature regarding the increase of the strength of polymer gears either by optimizing their geometry, or by using reinforcements for the formation of composite materials. The results from the finite element analysis and the experimental measurements show that the polymer gears can reach the strengths of their metal counterparts and for this reason they are already used in many applications such as automotive, aeronautics and food technology. At this rate, polymer gears will soon be a reliable alternative to metal gears in most power transmission applications.

Περιεχόμενα	
Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
1. Εισαγωγή .....	8
2. Γενικά στοιχεία πολυμερικών οδοντωτών τροχών.....	9
3. Εφαρμογές πολυμερικών οδοντωτών τροχών χαμηλής και μέσης ισχύος.....	11
4. Διερεύνηση εφαρμογών πολυμερικών οδοντωτών τροχών υψηλής ισχύος.....	31
4.1. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών .....	31
4.2. Εφαρμογές πολυμερικών οδοντωτών τροχών υψηλής ισχύος.....	91
5. Συμπεράσματα.....	100
6. Βιβλιογραφία .....	101

## 1. Εισαγωγή

Οι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα συστήματα μετάδοσης κίνησης και ισχύος σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται σε απαιτητικές από άποψη ισχύος εφαρμογές, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία και γενικά στη βαριά βιομηχανία, σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως σε συστήματα μεταφορών και αεροδιαστημικής, μέχρι και σε πολύ ειδικές εφαρμογές που απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια, όπως στην ωρολογοποιία. Παρά την ευρεία διάδοσή τους στο χώρο της βιομηχανίας, τα συστήματα οδοντωτών τροχών έτσι όπως είναι σχεδιασμένα σήμερα συνοδεύονται από μια σειρά μη ευνοϊκών χαρακτηριστικών, που δημιουργεί ανεπιθύμητα προβλήματα σε πολλές περιπτώσεις. Οι μεταλλικοί τροχοί που χρησιμοποιούνται κατεξοχήν σήμερα έχουν κατά κανόνα μεγάλη πυκνότητα και μεγάλη αδράνεια, χρειάζονται οπωσδήποτε σύστημα λίπανσης για την λειτουργία τους και έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, γεγονός που τους κάνει επιρρεπείς στη δημιουργία ταλαντώσεων και κραδασμών. Η πολύ καλή αντοχή τους όμως τους έχει καταστήσει αναντικατάστατους στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές.

Ένα από τα μεγαλύτερα πεδία έρευνας στον τομέα των οδοντωτών τροχών σήμερα είναι η χρήση πολυμερών ως υλικό κατασκευής τους. Τα πολυμερή, με τη χαμηλότερη πυκνότητα και το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας μπορούν να οδηγήσουν σε βαθμίδες οδοντωτών τροχών με πολύ μικρότερη αδράνεια και σχεδόν αθόρυβη λειτουργία. Ταυτόχρονα, τις περισσότερες φορές είναι αυτολιπαινόμενα, και κατά συνέπεια δεν χρειάζονται επιπλέον συστήματα λίπανσης, ενώ παρουσιάζουν πολύ καλές αντιτριβικές ιδιότητες. Για το λόγο αυτό έχουν ήδη αρχίσει να προτιμώνται σε πολλές εφαρμογές αντί των κλασικών μεταλλικών τροχών. Ωστόσο, έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα: έχουν σημαντικά χαμηλότερη φέρουσα ικανότητα από τους μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς. Για αυτό και σήμερα η χρήση πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε υψηλής ισχύος εφαρμογές είναι περιορισμένη. Ωστόσο, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών και ιδιαίτερα των σύνθετων υλικών και την εκτεταμένη έρευνα που γίνεται διεθνώς πάνω στους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς αναμένεται πολύ σύντομα να αρχίσουν να αντικαθιστούν τους μεταλλικούς τροχούς ακόμα και σε πολύ απαιτητικές εφαρμογές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τις εφαρμογές των πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και σε πρότυπες εφαρμογές, και παρουσιάζει την έρευνα που συμβαίνει σήμερα σχετικά με την τεχνολογία τους. Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για τους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς αλλά και για τα υλικά κατασκευής τους (πολυμερή και σύνθετα). Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται μία σειρά εφαρμογών χαμηλής και μέσης ισχύος, από διάφορους τομείς της βιομηχανίας, όπου μεταλλικοί τροχοί έχουν αντικατασταθεί από πολυμερικούς σε προϊόντα που βρίσκονται σήμερα στην αγορά. Στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται η σημερινή εξέλιξη των πολυμερικών οδοντωτών τροχών που αναμένεται να επιτρέψει τη χρήση τους και σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Μάλιστα, η χρήση αυτή έχει ήδη ξεκινήσει να γίνεται σε εφαρμογές που παρουσιάζονται στο ίδιο κεφάλαιο.



## 2. Γενικά στοιχεία πολυμερικών οδοντωτών τροχών

Οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί που κατασκευάζονται σήμερα αποτελούνται κατά κανόνα από πολυμερή υλικά ή σύνθετα υλικά σε μια προσπάθεια αύξησης της φέρουσας ικανότητάς τους. Προτού παρουσιαστούν οι λόγοι που οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί αποτελούν πεδίο έρευνας από την επιστημονική και βιομηχανική κοινότητα παρατίθενται κάποια βασικά στοιχεία και όροι για τα πολυμερικά και σύνθετα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στα υπόλοιπα κεφάλαια.

Πολυμερή ονομάζονται οι χημικές ενώσεις με μεγάλα μόρια, τα λεγόμενα μακρομόρια, που σχηματίζονται από τη σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων, που λέγονται "μονομερή". Τα πολυμερή προκύπτουν από τη χημική αντίδραση των μονομερών, που ονομάζεται πολυμερισμός. Τα πολυμερή ταξινομούνται ανάλογα με:

1. Την αρχιτεκτονική της πολυμερικής αλυσίδας (γραμμικό, διακλαδωμένο, δικτυωτό ή διασταυρούμενο και πλέγμα).
2. Το είδος των ατόμων που συμμετέχουν στη δομή της κύριας αλυσίδας (ομοαλυσωτά, ετεροαλυσωτά).
3. Την οργάνωση της κύριας αλυσίδας (ομοπολυμερή, συμπολυμερή).
4. Την προέλευση και τη χημική σύσταση τους (φυσικά, ημισυνθετικά, συνθετικά).
5. Τη χρήση τους (ευρείας χρήσης πολυμερή, τεχνικά πολυμερή, προηγμένα).
6. Τις μηχανοθερμικές ιδιότητές τους (θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά, ελαστομερή ή ελαστικά).

Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης σε ινώδη σύνθετα, στρωματικά σύνθετα και κοκκώδη σύνθετα. Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε μονοδιευθυντικά σύνθετα και πολυδιευθυντικά σύνθετα (σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης, σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης, σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση). Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο ( $l/d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες, ασυνεχείς ή κοντές ίνες, νηματίδια ή τριχίτες. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την ενίσχυση των σύνθετων υλικών είναι οι ίνες γυαλιού, άνθρακα, πολυμερούς, μεταλλικές, κεραμικές, τριχίτες και οι ίνες φυσικών ορυκτών. Οι μήτρες που χρησιμοποιούνται συνήθως στα σύνθετα υλικά είναι

οργανικές, μεταλλικές και κεραμικές. Η επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών σύνθετων υλικών γίνεται με γνώμονα τη γεωμετρία, το ποσοστό και τον προσανατολισμό των ινών ενίσχυσης καθώς και με τη συνάφεια ινών-μήτρας.

Για την κατασκευή των πολυμερικών οδοντωτών τροχών, χρησιμοποιούνται συνήθως για απλές εφαρμογές τα θερμοπλαστικά υλικά τα οποία τις περισσότερες φορές αναφέρονται και ως πλαστικά και για πιο δύσκολες εφαρμογές με περισσότερα φορτία χρησιμοποιούνται σύνθετα πολυμερικά υλικά συνήθως με κάποιο θερμοπλαστικό υλικό ως μήτρα και ίνες γυαλιού ή άνθρακα ως συστατικό ενίσχυσης [15-17].

Η χρήση των πολυμερικών οδοντωτών τροχών αυξάνεται καθώς οι σχεδιαστές κατανοούν καλύτερα τα οφέλη και τους περιορισμούς τους. Αυτοί οι οδοντωτοί τροχοί μπορούν να παραχθούν με μηχανικές-μηχανουργικές κατεργασίες, με χύτευση με έγχυση και με τρισδιάστατη εκτύπωση. Μερικά από τα βασικά οφέλη των πολυμερών στην παραγωγή οδοντωτών τροχών είναι [18-20]:

1. Το μειωμένο βάρος και η χαμηλότερη αδράνεια λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας του υλικού.
2. Η ικανότητα απορρόφησης κραδασμών λόγω της ελαστικότητας του υλικού.
3. Ο μειωμένος θόρυβος. Σε σύγκριση με τους μεταλλικούς, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί λειτουργούν πολύ πιο αθόρυβα. Ανάλογα με την εφαρμογή, το επίπεδο ήχου τους, συγκρινόμενο με αυτό των μεταλλικών οδοντωτών τροχών έχει ένα ή δύο αριθμούς AGMA υψηλότερη ποιότητα.
4. Οι καλές μηχανικές και τριβολογικές ιδιότητες, όπως ο χαμηλός συντελεστής τριβής.
5. Η αυτολίπανση στις περισσότερες περιπτώσεις.
6. Η δυνατότητα χρήσης σε υγρά περιβάλλοντα και χώρους προετοιμασίας τροφίμων.
7. Η εύκολη μορφοποίηση.
8. Το χαμηλό κόστος υλικού.
9. Η καλή αντοχή. Η χημική αντίσταση και η αντοχή στη διάβρωση συνήθως ξεπερνούν αυτήν των μεταλλικών οδοντωτών τροχών.
10. Η αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Με σταθερή ποιότητα υλικού και ακριβή έλεγχο της διαδικασίας χύτευσης, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να επιτύχουν υψηλή ακρίβεια, έως και την ποιότητα AGMA 10.
11. Η καλή αποδοτικότητα. Ένας χαμηλός συντελεστής τριβής σημαίνει λιγότερη υποδύναμη που σπαταλάται σε θερμότητα. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί προσφέρονται επίσης για αποτελεσματικές και καινοτόμες εφαρμογές, όπως τα πλανητικά συστήματα μετάδοσης κίνησης split-path.
12. Ο υψηλός λόγος μεγέθους-βάρους.
13. Οι υψηλοί ρυθμοί παραγωγής σε περίπτωση μαζικής παραγωγής.

#### 14. Η υψηλή ασφάλεια.

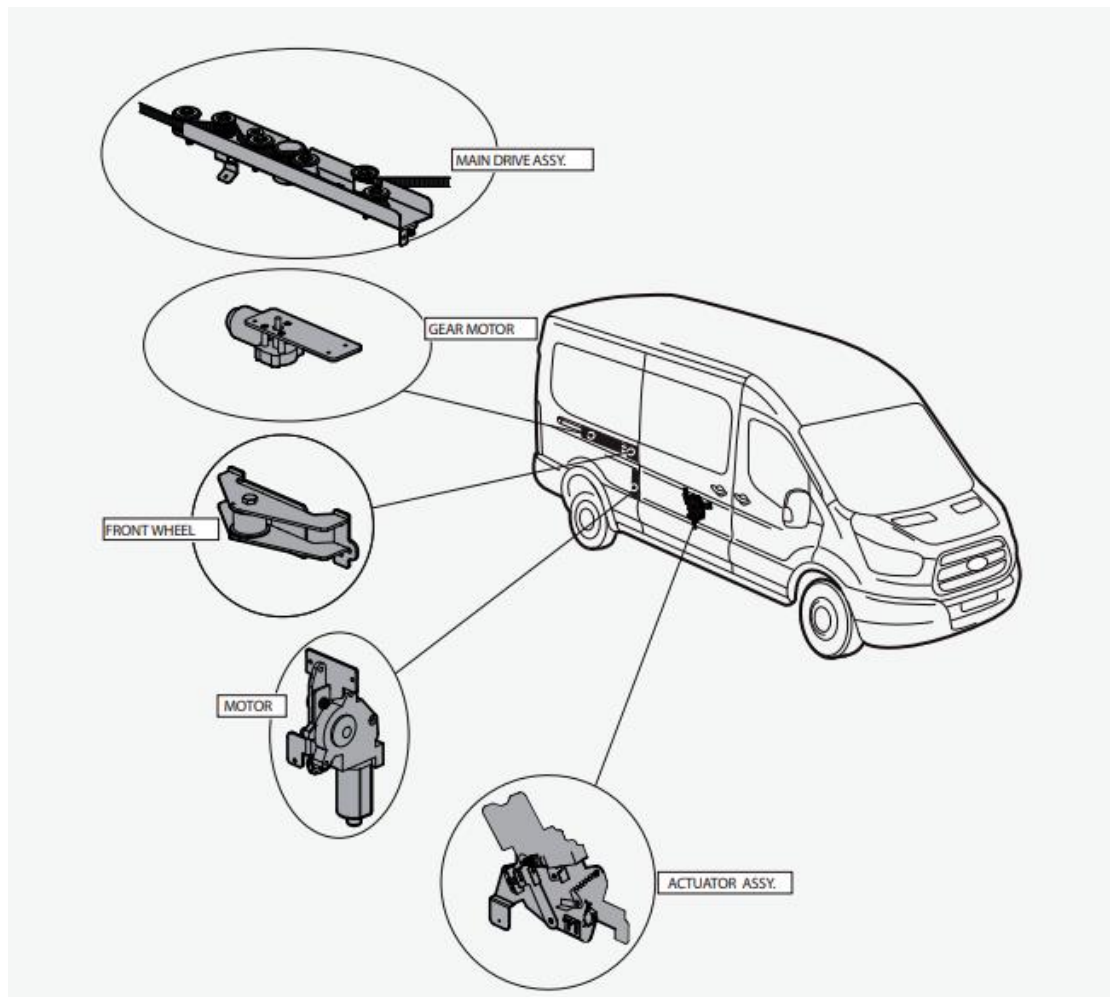
Ωστόσο, όπως και με όλα τα υλικά, υπάρχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα στη χρήση πολυμερικών υλικών σε οδοντωτούς τροχούς. Αυτά είναι:

1. Η μικρότερη φέρουσα ικανότητα φορτίου των πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε σύγκριση με τους μεταλλικούς παρόμοιου μεγέθους.
2. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί δεν μπορούν να κρατούν τις ίδιες υψηλές ανοχές σε σχέση με τους μεταλλικούς.
3. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί είναι λιγότερο σταθερών διαστάσεων από τους μεταλλικούς και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζουν οι διαστάσεις των οδοντωτών τροχών λόγω των συνθηκών αυξημένης θερμοκρασίας και υγρασίας.
4. Χρειάζεται οικονομική μελέτη πριν την χρήση των πολυμερικών οδοντωτών τροχών, διότι να μεν η πρώτη ύλη (τα υλικά) είναι φθηνή, αλλά τα ενισχυτικά υλικά, οι τρόποι παραγωγής και η συχνή αντικατάστασή τους λόγω φθοράς, μπορεί να μην καθιστούν βιώσιμη μια τέτοια επένδυση σε όλες της περιπτώσεις.
5. Η δυσκολία παραμονής και συγκράτησης των πολυμερικών οδοντωτών τροχών επάνω στους μεταλλικούς άξονες, λόγω των αλλαγών που γίνονται στις διαστάσεις τους, με αποτέλεσμα να μην εφαρμόζουν σωστά και έτσι οι οδόντες αλλά και οι ίδιοι οι οδοντωτοί τροχοί να φθείρονται πιο γρήγορα.

#### 3. Εφαρμογές πολυμερικών οδοντωτών τροχών χαμηλής και μέσης ισχύος

Τα πλεονεκτήματα των πολυμερικών οδοντωτών τροχών έχουν οδηγήσει στην χρήση τους σε πολλές εφαρμογές από διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών των πολυμερικών οδοντωτών τροχών για χαμηλή και μέση ισχύ, όπου αποτελούν και το μεγάλο ποσοστό των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται οι πολυμερικοί τροχοί.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής είναι η μετάδοση με πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς για μια συρόμενη πόρτα σε φορτηγό επιβατών (van) [22]. Οι ηλεκτρικές συρόμενες πόρτες σε αυτά τα φορτηγά επιβατών (van) χρησιμοποιούσαν αρχικά υψηλής ποιότητας, λιπαινόμενους με PTFE νάιλον οδοντωτούς τροχούς με χαμηλή απορρόφηση υγρασίας. Αργότερα, οι μηχανικοί άλλαξαν σε ένα υλικό κατά 40% χαμηλότερου κόστους, το αυτολιπαινόμενο νάιλον 6/6 ενισχυμένο με ίνες γυαλιού. Αυτό το υλικό παρέχει αποδεκτά χαμηλά ποσοστά φθοράς σε εύρος θερμοκρασιών από 240 έως 185 F και αντίσταση στη διάβρωση ή στη χημική προσβολή (chemical attack) από αλάτι στο δρόμο.

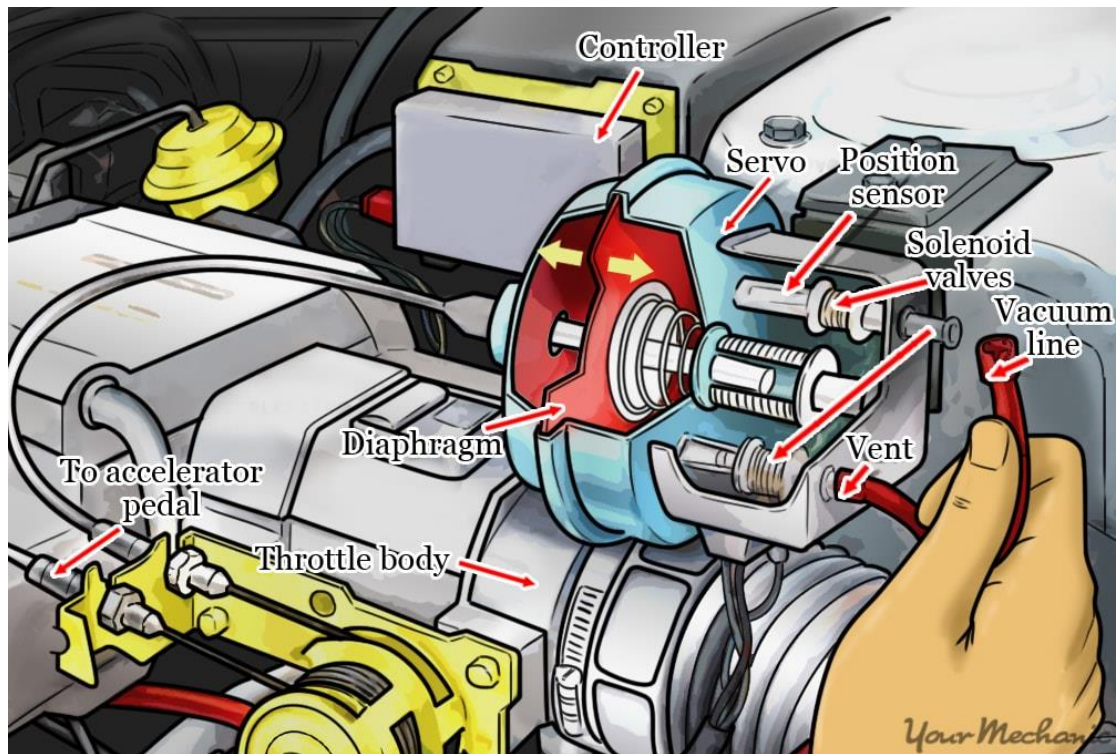


Σχήμα 1. Το αυτόματο ηλεκτρικό σύστημα συρόμενης πόρτας [23]



Σχήμα 2. Ο μηχανισμός αυτόματης ηλεκτρικής πόρτας με πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς του Ford Transit (μοντέλο 2014-2019) [24]

Οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν τη φθορά των περισσότερων θερμοπλαστικών ταχύτερα, περιορίζοντας σημαντικά την επιλογή υλικών [25]. Οι μηχανικές ιδιότητες υποβαθμίζονται επίσης καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία στο σημείο τήξης του υλικού ή στην θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης. Τα σύνθετα υλικά όπως το νάιλον και το PBT έχουν χρησιμοποιηθεί κατά διαστήματα σε θερμοκρασίες έως 300 F. Αλλά η αντοχή τους μειώνεται σοβαρά, ιδιαίτερα όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα βασικά υλικά για τις περισσότερες εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών περιορίζονται σε κρυσταλλικές ρητίνες PEEK, PPS και PPA, ή άμορφες ρητίνες PEI ή PES. Ένα παράδειγμα μιας εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιούνται πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί και απαιτείται αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες είναι σε ένα σύστημα ελέγχου ταχύτητας (cruise control system) από έναν σημαντικό κατασκευαστή αυτοκινήτων στις ΗΠΑ. Οι σχεδιαστές επέλεξαν, για τον ένα οδοντωτό τροχό, ένα υλικό PPS που έχει ενισχυθεί με ίνες γυαλιού και λιπαντικό PTFE για το 1/4 in. διαμέτρου λόγω της ικανότητάς του να ρέει και να γεμίζει το μικρό καλούπι. Για τον συνεργαζόμενο οδοντωτό τροχό, επέλεξαν το ενισχυμένο με ίνες από γυαλί PEI με λιπαντική επίστρωση από PTFE λόγω της ανάγκης για ακρίβεια. Αυτοί οι οδοντωτοί τροχοί λειτουργούν κάτω από το καπό όπου οι θερμοκρασίες υπερβαίνουν τους 300 F.



Σχήμα 3. Ο μηχανισμός cruise control [26]

Μια άλλη εφαρμογή πολυμερικών οδοντωτών τροχών είναι ο οδοντωτός τροχός κίνησης μιας παγομηχανής της Whirpool, ο οποίος λειτουργεί σε συνδυασμό με τις λεπίδες εκτόξευσης της παγομηχανής [27]. Ο οδοντωτός τροχός κίνησης συνδέεται με την κάμα για να περιστρέψει τον βραχίονα εκτοξευτή ώστε μετά να ωθήσει τον πάγο από την παγομηχανή στο δοχείο πάγου. Ο μηχανισμός μετάδοσης έχει διάμετρο περίπου 1 1/2", είναι λευκού χρώματος και είναι κατασκευασμένος από πλαστικό.



*Σχήμα 4. Η παγομηχανή της Whirlpool [28]*





*Σχήμα 5. Ο οδοντωτός τροχός κίνησης της παγομηχανής της Whirlpool [29]*

Η μετάδοση πλυντηρίου ρούχων με χαλύβδινους οδοντωτούς τροχούς παραδοσιακά ήταν θορυβώδης και πρόσθετε επιπλέον βάρος [30]. Μια καινοτόμος μετάδοση πλυντηρίου διπλής κίνησης που αναπτύχθηκε από την Maytag Herrin Manufacturing Facility στο Herrin, IL σχεδιάστηκε από την αρχή για να χρησιμοποιεί πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς οι οποίοι θα μειώσουν τον θόρυβο λειτουργίας και θα απλοποιήσουν τη συναρμολόγηση. Τοποθετημένη σε μια χυτευμένη μεταλλική έδραση πάνω από το  $\frac{3}{4}$  hp μοτέρ, η split power μετάδοση έχει δύο σετ οδοντωτών τροχών που οδηγούν σε κοινή έξοδο. Ένας πλαστικός οδοντωτός τροχός (πινιόν) εισόδου περιστρέφει δύο συνεργαζόμενους οδοντωτούς τροχούς με τον κάθε ένα να περιστρέφει μια δεύτερη βαθμίδα που αποτελείται από ένα σύστημα κορώνας-κανόνα. Αυτά οδηγούν τον οδοντωτό τροχό (πινιόν) εξόδου στον άξονα του αναδευτήρα. Οι χυτοί οδοντωτοί τροχοί πρέπει να διατηρούν τη δύναμη και τις διαστάσεις τους παρά τις θερμοκρασίες λειτουργίας που φτάνουν τους 190 ° F. Αυτοί επίσης πρέπει να αντέξουν το χημικό περιβάλλον που δημιουργείται από τη λίπανση του κιβώτιου. Οι απαιτήσεις της Maytag ήταν η μετάδοση να διαρκέσει τουλάχιστον 15 χρόνια για οικιακή χρήση. Το συμπολυμερές ακετάλη με 25 % ίνες γυαλιού Celcon® GC25A παρείχε την απαραίτητη αντοχή και αντοχή στην κόπωση. Στη βάση του dual drive, ο οδοντωτός τροχός (πινιόν) εισόδου που έχει τη λιγότερη φόρτιση έχει δύο εφαπτόμενα ελατήρια στις πλευρές του. Τα ενσωματωμένα ελατήρια συμπιέζονται και ολισθαίνουν όταν το καλάθι πλυσίματος ταλαντεύεται αλλά εκτείνονται και κλειδώνουν όταν ο κινητήρας αντιστρέφεται για περιστροφή. Το γενικής χρήσης, μη ενισχυμένο Celcon M90™ παρέχει επαρκή αντοχή και την απαραίτητη ανθεκτικότητα για αυτό το μέρος. Το νέο κιβώτιο με τους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς κάνει αθόρυβη μετάδοση και



σχεδόν δεν ακούγεται στους παρατηρητές. Επίσης μείωσε την αύξηση της θερμοότητας 10 έως 15% σε σύγκριση με το παλιό μεταλλικό κιβώτιο και υπάρχουν σαφείς ενδείξεις βελτιωμένης απόδοσης. Οι επιταχυνόμενες δοκιμές διάρκειας ζωής αποκάλυψαν πολύ λιγότερη φθορά στους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς από ό, τι στους χαλύβδινους της προηγούμενης μετάδοσης. Η χρήση του συμπολυμερούς μείωσε επίσης το βάρος κατά 6 κιλά και εξάλειψε 42 εξαρτήματα σε σύγκριση με την παλιά μεταλλική μονάδα και έτσι μειώνονται και τα λάθη στη συναρμολόγηση.



*Σχήμα 6. Το καινοτόμο κιβώτιο ταχυτήτων της whirlpool με τους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς [30]*

Η Hewlett-Packard και η molder UFE πήραν πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς με νέα πρότυπα ποιότητας κατασκευής και τα τοποθέτησαν στον έγχρωμο εκτυπωτή DeskJet 660 [31]. Οι οδοντωτοί τροχοί συμπολυμερούς ακετάλης κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ποιότητας της AGMA (American Gear Manufacturers Association) ποιότητας Q9. Η ακρίβεια ήταν απαραίτητη για την κίνηση του χαρτιού για να αποφευχθούν οι προφανείς παραλείψεις γραμμών ή η υπερβολική εκτύπωση. Για οδοντωτούς τροχούς 48-pitch, διαμέτρου 1,25 ιντσών, η AGMA Class Q9 υποδηλώνει συνολικό αθροιστικό σφάλμα (TCE) μόλις 0,0015 ίντσες και σφάλμα οδόντα προς οδόντα (TTT) 0,00071 ίντσες.



*Σχήμα 7. Οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιήθηκαν για τον εκτυπωτή hp DeskJet 660 [31]*

Το ηλεκτρονικό φρένο στάθμευσης σε οχήματα από αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η Audi, η Volkswagen, η Bentley, η Bugatti και η Lancia [32]. Αυτό το σύστημα περιέχει έναν οδοντωτό τροχό 30 mm κατασκευασμένο από σουλφίδιο πολυφαινυλενίου Fortron® (PPS). Ο οδοντωτός τροχός τροφοδοτείται από έναν μάντα μέσω ενός κινητήρα και οδηγεί ένα κιβώτιο που ενεργοποιεί τα πίσω φρένα. Το Fortron PPS επιλέχθηκε για τη διαστατική του σταθερότητα σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, καθώς και για τη χημική του αντοχή και τη δυνατότητα επεξεργασίας του.



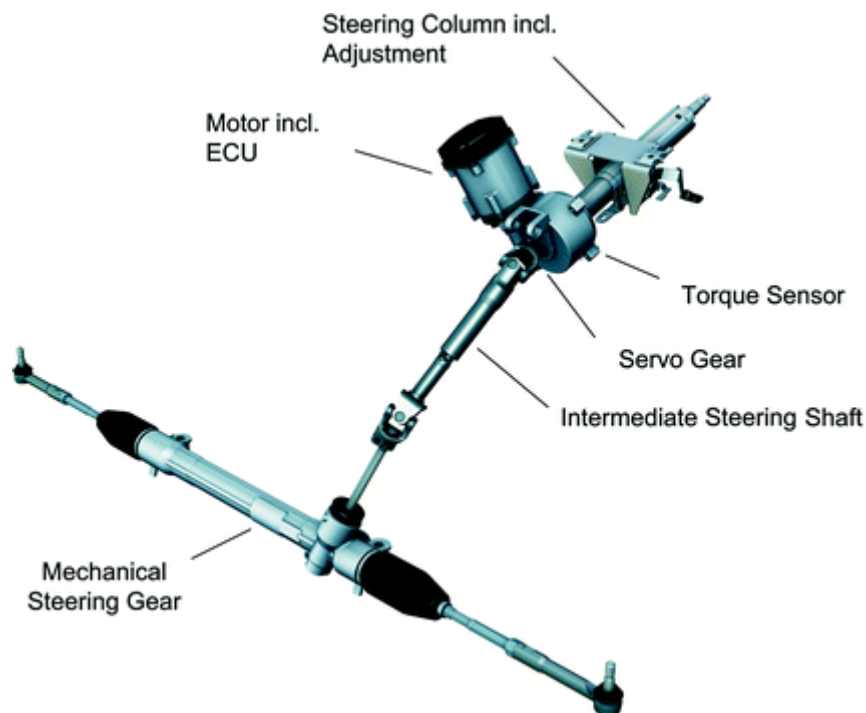
*Σχήμα 8. Ο ηλεκτρονικός ενεργοποιητής χειρόφρενου της bmw 7 series (για τα μοντέλα 2002-2008) [33]*

Οι κινητήρες ανύψωσης και κλίσης και τα ηλεκτρικά κυκλώματα της F1 Dental Chair είναι τύπου χαμηλής τάσης, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας [34]. Μια συνεργασία χαλύβδινων και πλαστικών οδοντωτών τροχών χρησιμοποιείται στους κινητήρες ανύψωσης και κλίσης. Αυτή η δομή δίνει στην καρέκλα μια ομαλή και ήσυχη λειτουργία και εξασφαλίζει μεγάλη διάρκεια ζωής του μηχανισμού. Όλα τα κύρια εξαρτήματα των κινητήρων της F1 Dental Chair είναι εύκολα προσβάσιμα για γρήγορη και εύκολη συντήρηση.



*Σχήμα 9. F1 Dental Chair [34]*

Ο κατασκευαστής συστημάτων αυτοκινήτων ZF Lenksysteme της Γερμανίας είναι η πρώτη εταιρεία που χρησιμοποίησε πολυμερικούς οδοντωτός τροχούς αντί για μεταλλικούς στο κιβώτιο ταχυτήτων του σερβοκινητήρα ενός ηλεκτρικά υποβοηθούμενου συστήματος διεύθυνσης, το οποίο τώρα τοποθετείται σε πολλά επιβατικά αυτοκίνητα [35]. Αυτό το πολυμερικό υλικό είναι το Ultramid A4H, ένα μη ενισχυμένο νάιλον 6,6 (PA66) με εξαιρετικές τριβολογικές ιδιότητες. Το πολυμερικό αυτό σύστημα ατέρμονα κοχλία-τροχού πρέπει να είναι ικανό να μεταδίδει μεγάλες δυνάμεις σε θερμοκρασίες μεταξύ -40 και +120 βαθμών Κελσίου για όλη τη διάρκεια ζωής του οχήματος. Χάρη στο υψηλό ιξώδες τήξης, η ρητίνη είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη χύτευση εξαρτημάτων με πυκνά τοιχώματα. Το Ultramid A4H χρησιμοποιείται σε εφαρμογές στις οποίες οι ιδιότητες τριβής και η θερμοκρασία είναι σημαντικοί παράγοντες.



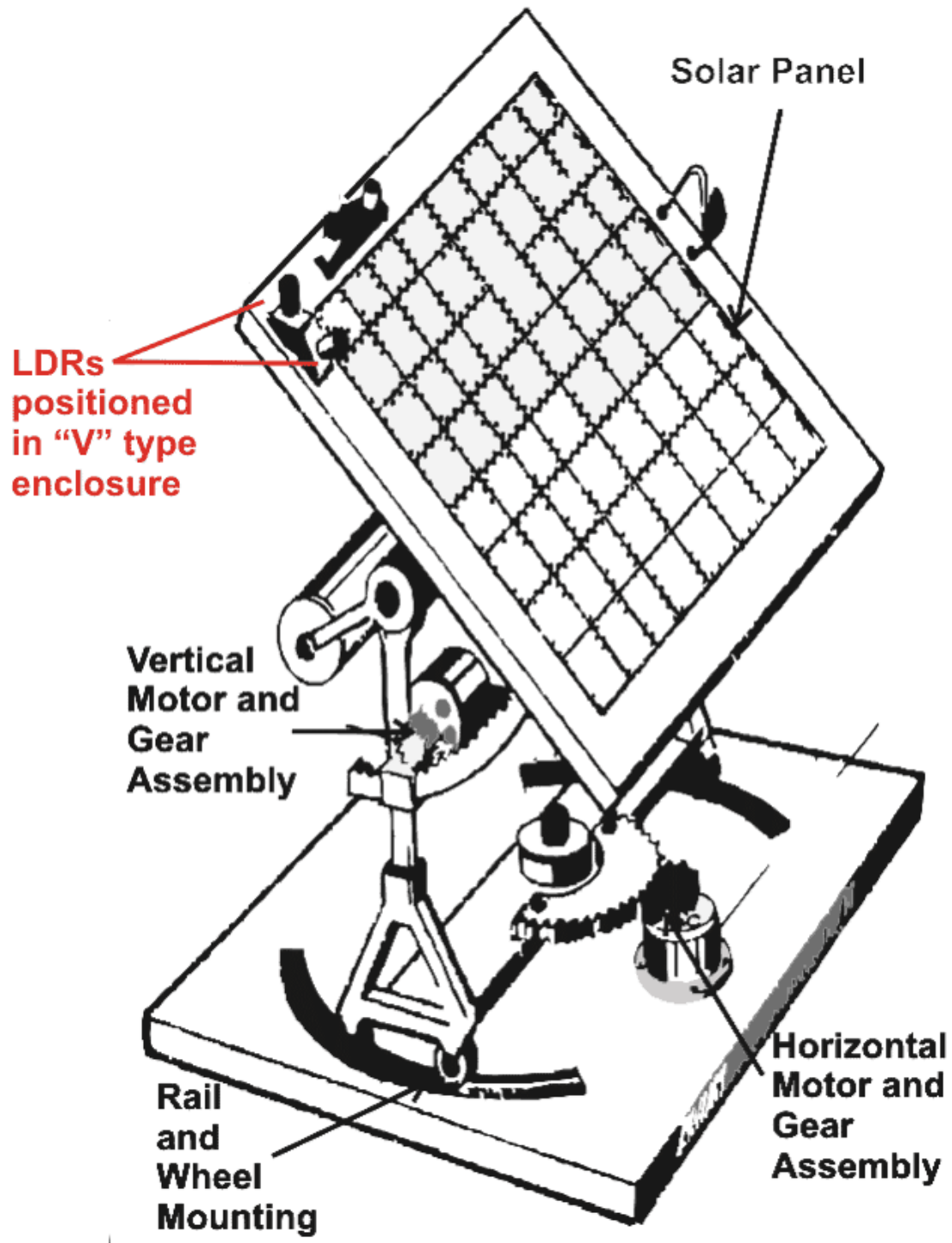
Σχήμα 10. Το ηλεκτρικά υποβοηθούμενο σύστημα διεύθυνσης [36]

Η έρευνα [37] έγινε το 2018 από τους Krishanu Gupta και Sushovan Chatterjee και παρουσιάζει τη γεωμετρική μοντελοποίηση και την υπολογιστική μελέτη των διαφορετικών στατικών φορτίων σε οδοντωτούς τροχούς διαφορετικών υλικών για ένα αυτόνομο μηχανικό solar tracker. Τα αναλυθέντα αποτελέσματα της στατικής καταπόνησης στο συμμετρικό ζεύγος των οδοντωτών τροχών με ενσωματωμένο προφίλ συγκρίνονται με βάση το υλικό και το καλύτερο αποτέλεσμα επιλέγεται για την εφαρμογή του στον μηχανισμό του solar tracker. Παρέχοντας τη πρέπουσα προσοχή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια είναι η κύρια πηγή ενέργειας που μπορεί να ικανοποιήσει τις ανθρώπινες ανάγκες για το μέλλον. Το εργαζόμενο με οδοντωτούς τροχούς μηχανικό σύστημα του solar tracker είναι φθινό, αυτόνομο, άρα δεν απαιτεί εργαζόμενο προσωπικό, είναι εύκολο στη συντήρηση και μπορεί να τοποθετηθεί σε λοφώδεις περιοχές, σε απομακρυσμένο χωμάτινο ή βροχερό μέρος για να βοηθήσει στην έλλειψη ηλεκτρικής ενέργειας σε αγροτικές περιοχές. Μπορεί επίσης να εγκατασταθεί εύκολα σε εκπαιδευτικά ιδρύματα, μεγάλα γραφεία εταιρειών ή και σε δημόσια κτήρια όπου υπάρχει μεγάλη ζήτηση ρεύματος, εξοικονομώντας έτσι μεγάλα ποσά μη ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι οδοντωτοί τροχοί είναι ένα από τα πιο επιτακτικά και κρίσιμα συστατικά μιας μηχανικής μονάδας μετάδοσης ισχύος και η ευρωστία τους, οδήγησε στην επιλογή τους ως μηχανικού εξαρτήματος στο solar tracker. Αφού το σύστημα είναι ανοιχτό στο περιβάλλον, η επιλογή του υλικού των οδοντωτών τροχών είναι ένα σημαντικό ζήτημα.

Σε αυτή την έρευνα, μελετήθηκαν τα στατικά φορτία, δηλαδή οι τάσεις κάμψης και επαφής ζευγών μετωπικών οδοντωτών τροχών εξειλιγμένης 25° με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων για να ανακαλυφθούν οι διαφορές στα αποτελέσματα μέτρησης των καταπονήσεων για τους διάφορους τύπους υλικών, δηλαδή, για τα μεταλλικά (ASTM Class 35 Χυτοσίδηρος και ASTM 1045 ή C45 Χάλυβας) και για τα πλαστικά (NYLON 6/6 και θειούχο πολυφαινυλένιο). Βρέθηκε ότι τόσο οι μεταλλικοί όσο και οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν τις τιμές τάσης τους πολύ κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια, και επίσης, οι τάσεις που προκαλούνται και στα δύο ζεύγη οδοντωτών τροχών είναι αρκετά κοντά. Έτσι, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι για ένα ανοιχτό περιβάλλον λειτουργίας στο οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί η αναφερθείσα διάταξη, μπορούν να εφαρμοστούν και τα δύο ζεύγη οδοντωτών τροχών εξίσου. Οπότε είναι μια εφαρμογή στην οποία μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν οι μεταλλικοί από τους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς.

Stress type	Metallic gear pair (MPa)	Plastic gear pair (MPa)
Bending Stress	2.8335	3.5529
Contact Stress	70.622	29.416

*Σχήμα 11. Τα αποτελέσματα των καταπονήσεων [37]*



Σχήμα 12. Το σύστημα μηχανισμού ενός solar tracker για έναν ηλιακό συλλέκτη [38]



Ο ηλεκτρονικός έλεγχος γκαζιού (ETC) είναι μια τεχνολογία στα αυτοκίνητα που "συνδέει" ηλεκτρονικά το πεντάλ γκαζιού με την πεταλούδα γκαζιού, αντικαθιστώντας μια μηχανική σύνδεση [39-40]. Ένα τυπικό σύστημα ETC αποτελείται από τρία κύρια μέρη: (α) μια μονάδα πεντάλ γκαζιού (ιδανικά με δύο ή περισσότερους ανεξάρτητους αισθητήρες), (β) μια βαλβίδα πεταλούδας που μπορεί να ανοίξει και να κλείσει από έναν ηλεκτροκινητήρα (μερικές φορές αναφέρεται ως ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό σώμα πεταλούδας (ETB)) και (γ) μια μονάδα ελέγχου συστήματος μετάδοσης κίνησης (PCM) ή μονάδα ελέγχου κινητήρα (ECM). Η ECM είναι ένας τύπος ηλεκτρονικής μονάδας ελέγχου (ECU), η οποία είναι ένα ενσωματωμένο σύστημα που χρησιμοποιεί ένα λογισμικό, για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης θέσης της πεταλούδας γκαζιού με υπολογισμούς από δεδομένα που μετρούνται από άλλους αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων, θέσης πεντάλ γκαζιού, ταχύτητας κινητήρα, ταχύτητας οχήματος και διακόπτες ελέγχου ταχύτητας (cruise control). Ο ηλεκτρικός κινητήρας στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να ανοίξει τη βαλβίδα πεταλούδας στην επιθυμητή γωνία μέσω ενός αλγορίθμου ελέγχου κλειστού βρόχου εντός της ECM. Ο μικρός οδοντωτός τροχός του κινητήρα οδηγεί έναν μεγαλύτερο οδοντωτό τροχό, ο οποίος στη συνέχεια μέσω του μικρού οδοντωτού τροχού που διαθέτει στο επάνω ή στο κάτω μέρος του, οδηγεί ένα τμήμα οδοντωτού τροχού το οποίο είναι προσαρτημένο στη πεταλούδα γκαζιού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια τεράστια ροπή από τον μικρό κινητήρα.



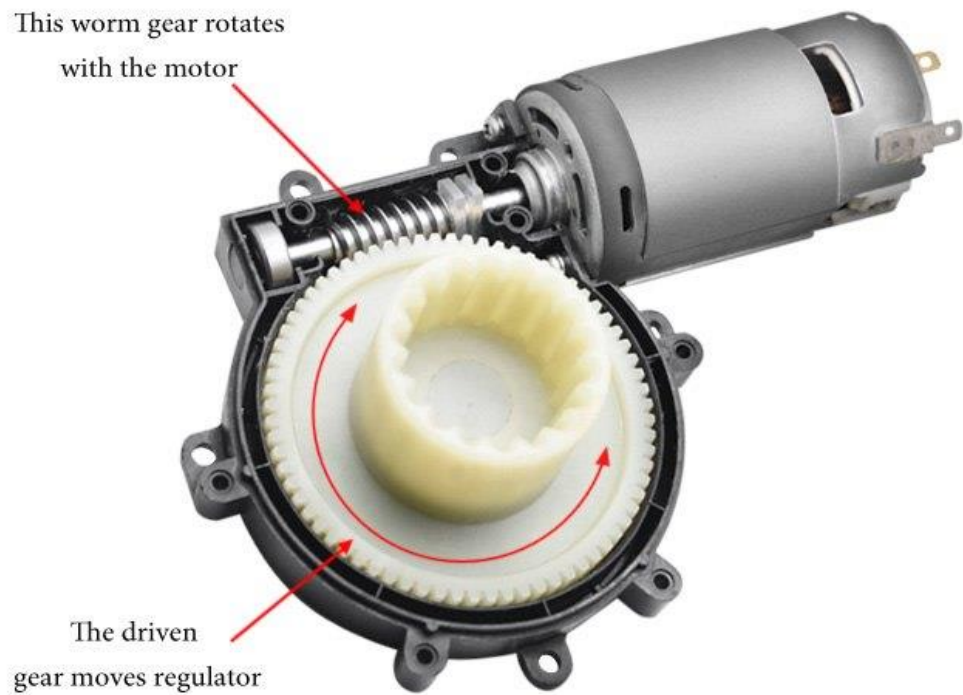
Σχήμα 13. Ο ηλεκτρονικός ενεργοποιητής της πεταλούδας γκαζιού [41]



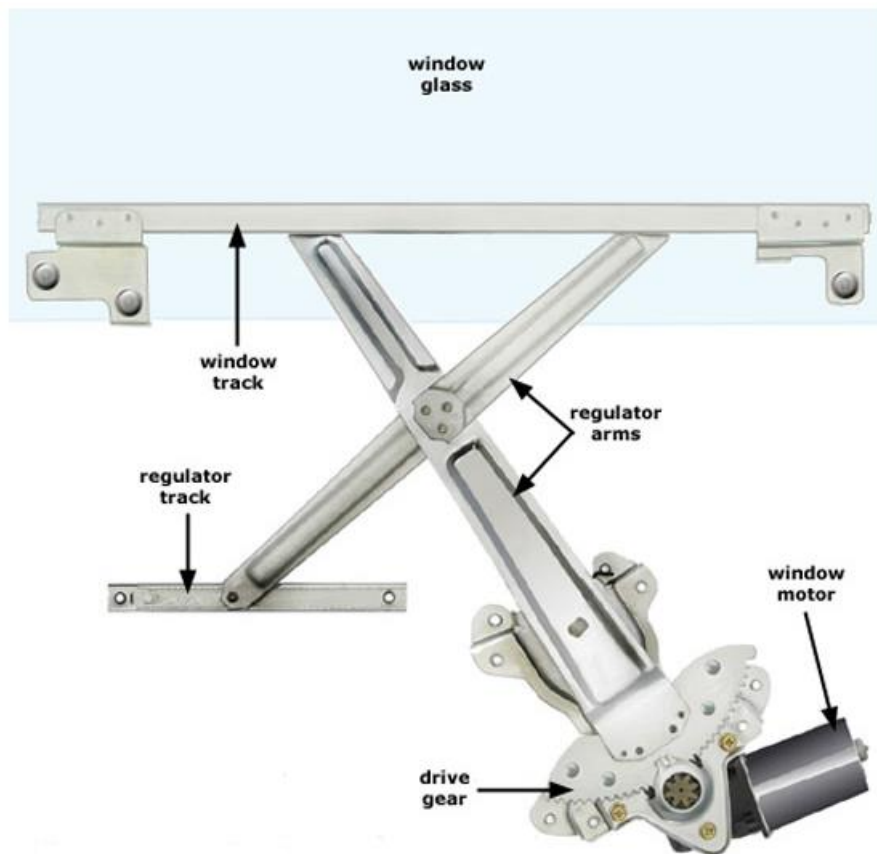
*Σχήμα 14. Ο εσωτερικός μηχανισμός του ηλεκτρονικού ενεργοποιητή της πεταλούδας γκαζιού με πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς από νάιλον ενισχυμένο με 20% ίνες άνθρακα. [42]*

Σε έναν μηχανισμό ηλεκτρικού παραθύρου, ένας συμπαγής ηλεκτρικός κινητήρας μεταφέρει την κίνησή του μέσω ενός συστήματος ατέρμονα κοχλία-τροχού [43]. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας μειωτήρας ο οποίος επιτρέπει σε έναν μικρό κινητήρα να παράγει αρκετή ροπή ώστε να ανεβάζει και να κατεβάζει ένα αρκετά βαρύ σύστημα (τζάμι-μηχανισμός) για αρκετές φορές σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι τα περισσότερα συστήματα ατέρμονα κοχλία-τροχού παρέχουν λειτουργία αυτο-κλειδώματος χάρη στη σχέση μετάδοσης του συστήματος αυτού και των γωνιών επαφής, για αυτό δεν είναι δυνατό να ανεβάσει ή να κατεβάσει κάποιος ένα ηλεκτρικό παράθυρο με τα χέρια του. Από τις αρχές αυτού του αιώνα, οι κυβερνητικοί κανονισμοί των ΗΠΑ απαιτούν οι ρυθμιστές ηλεκτρικών παραθύρων να διαθέτουν αισθητήρες που ανιχνεύουν εάν ένα αντικείμενο εμποδίζει τη διαδρομή του παραθύρου κατά το κλείσιμο (όπως κάποιο χέρι) και στη συνέχεια, το παράθυρο να σταματάει την ανοδική του πορεία (κλείσιμο) και να κατεβαίνει προς τα κάτω (άνοιγμα) μέχρι το εμπόδιο να απομακρυνθεί με ασφάλεια.



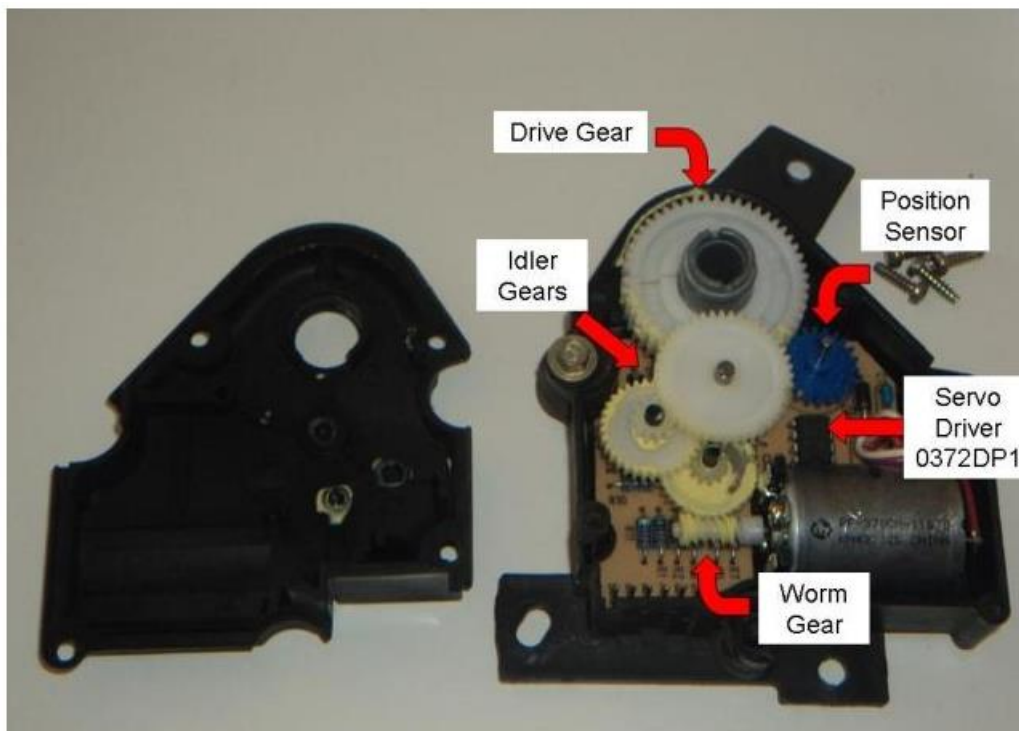


*Σχήμα 15. Ένας τυπικός μηχανισμός μετάδοσης κίνησης που βρίσκεται στους περισσότερους ρυθμιστές ηλεκτρικών παραθύρων [43]*



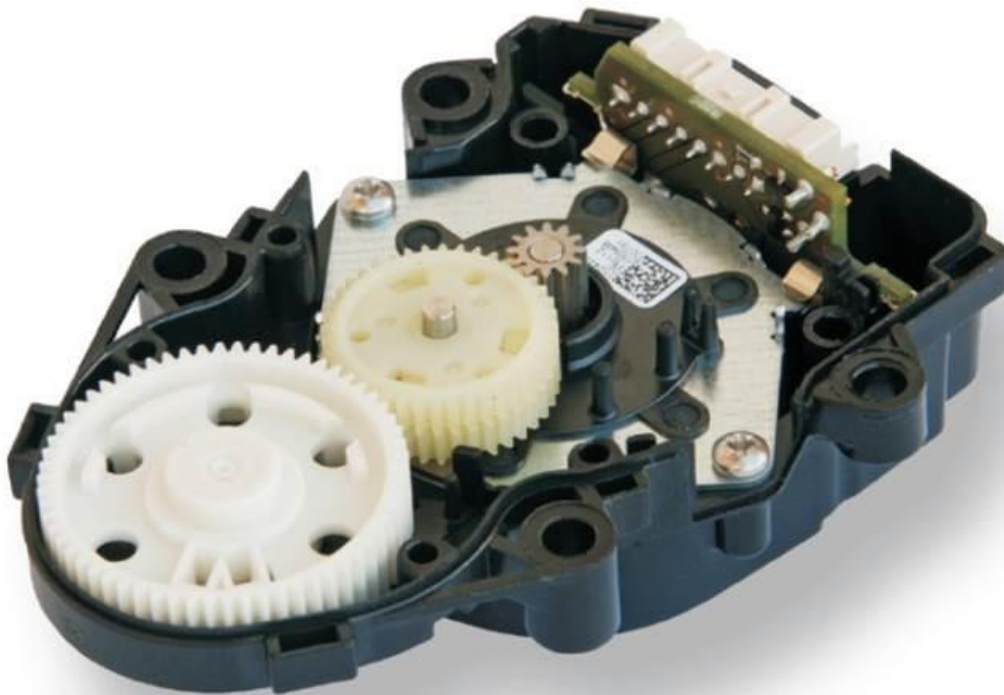
Σχήμα 16. Ένας τυπικός μηχανισμός ρύθμισης των περισσότερων ηλεκτρικών παραθύρων [44]

Το ρυθμιστικό στοιχείο, μοτέρ κλαπέτο μείζης είναι ένας μικρός ηλεκτρικός κινητήρας που διαθέτει αισθητήρες συνδεδεμένους στο σύστημα κλιματισμού του αυτοκινήτου σας [45]. Καθώς ρυθμίζετε τη θερμοκρασία πάνω-κάτω ή την ένταση της ροής του αέρα, τα σήματα περνούν από αυτόν τον ενεργοποιητή. Αυτός ελέγχει και άλλα πράγματα όπως την απόψυξη, καθώς και εάν θα περάσει ο αέρας μέσω των αεραγωγών δαπέδου ή των αεραγωγών μεσαίου επιπέδου και ούτω καθεξής. Το αυτοκίνητό μπορεί να έχει περισσότερους από έναν ενεργοποιητές εάν υπάρχει η δυνατότητα να ελέγχεται η θερμοκρασία σε διαφορετικές ζώνες. Τα περισσότερα σύγχρονα οχήματα έχουν τη δυνατότητα για τους πίσω επιβάτες ή τους μπροστινούς επιβάτες να αλλάξουν το προσωπικό τους κλίμα, πράγμα που σημαίνει ότι θα έχουν ένα ξεχωριστό ρυθμιστικό στοιχείο, μοτέρ κλαπέτο μείζης για τον έλεγχο αυτού. Ο HVAC ενεργοποιητής είναι ένα πολύ μικρό πλαστικό κουτί. Στο εσωτερικό του υπάρχει ένας σερβοκινητήρας, ένα κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο απαρτίζεται από ένα σύστημα ατέρμονα κοχλία-τροχού συνδεδεμένο με τον κινητήρα και οδοντωτούς τροχούς με ευθεία οδόντωση, τα ηλεκτρονικά και κάποιους αισθητήρες.



Σχήμα 17. Το ρυθμιστικό στοιχείο, μοτέρ κλαπέτο μείξης, εσωτερικά, όπου φαίνεται ο μειωτήρας από πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς. [46]

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για τον περιορισμό της κόπωσης του οδηγού και την αύξηση της ασφάλειας κατά τη νυχτερινή οδήγηση είναι η παροχή ενός καλά φωτισμένου οπτικού πεδίου [47-49]. Το Adaptive Front-Light System (AFS) βελτιστοποιεί την κατανομή του φωτός από τους προβολείς βάση των συνθηκών οδήγησης. Ανάλογα με την κλίση του δρόμου, την ταχύτητα του οχήματος και την κατεύθυνση του συστήματος διεύθυνσης του οχήματος, το σύστημα ρυθμίζει τα φώτα προς την κατεύθυνση που ο οδηγός σκοπεύει να κινηθεί. Τα προσαρμοστικά συστήματα εμπρόσθιου φωτισμού (AFS) προσπαθούν να προσαρμόσουν τους προβολείς του οχήματος έτσι ώστε ο οδηγός να έχει τη βέλτιστη νυχτερινή όραση χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια των άλλων οδηγών, αποφεύγοντας την άμεση αντανάκλαση στα επικείμενα οχήματα. Το AFS χρησιμοποιεί έναν γρήγορο, ακριβή και αξιόπιστο κινητήρα τύπου stepper για να ρυθμίσει σωστά τις θέσεις των λαμπτήρων ανάλογα με τις πληροφορίες που συλλέγονται από τους διάφορους αισθητήρες του οχήματος. Τα πλεονεκτήματά αυτού του κινητήρα είναι η υψηλή ροπή, η υψηλή ταχύτητα, η υψηλή αντίσταση σε μηχανικές καταπονήσεις, η λειτουργία του σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, η αντίσταση EMC - ESD και η μεγάλη διάρκεια ζωής του.



*Σχήμα 18. Ο ενεργοποιητής του προσαρμοστικού συστήματος μπροστινού φωτισμού (AFS) [47]*

Οι βιομηχανικοί ενεργοποιητές είναι ηλεκτρομηχανικές συσκευές σχεδιασμένες να αυτοματοποιούν τις διαδικασίες παραγωγής που σχετίζονται με τη γραμμική κίνηση [50-51]. Είναι η ίδια τεχνολογία ηλεκτρικού γραμμικού ενεργοποιητή που μπορεί να εκτελεί πιο περίπλοκους τύπους εργασιών σε σύγκριση με μίνι και μικρο-γραμμικούς ενεργοποιητές. Επίσης, όταν πρόκειται για την εφαρμογή του βιομηχανικού γραμμικού ενεργοποιητή, οι απαιτήσεις όπως η ακραία ακρίβεια κίνησης και η ακριβής απόδοση, συχνά ωθούνται από τις πιο σημαντικές προδιαγραφές του, όπως το μήκος διαδρομής, η αντοχή στις μεγάλες δυνάμεις που του ασκούνται και στα φορτία τα οποία έχει να διαχειριστεί, η ταχύτητα λειτουργίας που καθορίζει πόσο γρήγορα ο βιομηχανικός ενεργοποιητής θα μετακινηθεί από τη θέση Α (θέση συσσώρευσης), έως τη θέση Β (θέση πλήρους έκτασης). Σε μερικές περιπτώσεις οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται σε γραμμικούς ενεργοποιητές για βιομηχανική χρήση. Στη βιομηχανία οι συνθήκες λειτουργίας δεν είναι πάντα εύκολες, οπότε πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά η επιλογή του κατάλληλου ενεργοποιητή, δηλαδή αν θα λειτουργεί με πλαστικούς ή με μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς. Οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί είναι κατάλληλοι σε εφαρμογές όπου ο ενεργοποιητής δεν υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες. Επειδή το πλαστικό λιώνει στους 180 ° C, η χρήση γραμμικών ενεργοποιητών σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία. Όμως, κανένας ενεργοποιητής δεν αστοχεί, ούτε μειώνεται η διάρκεια ζωής

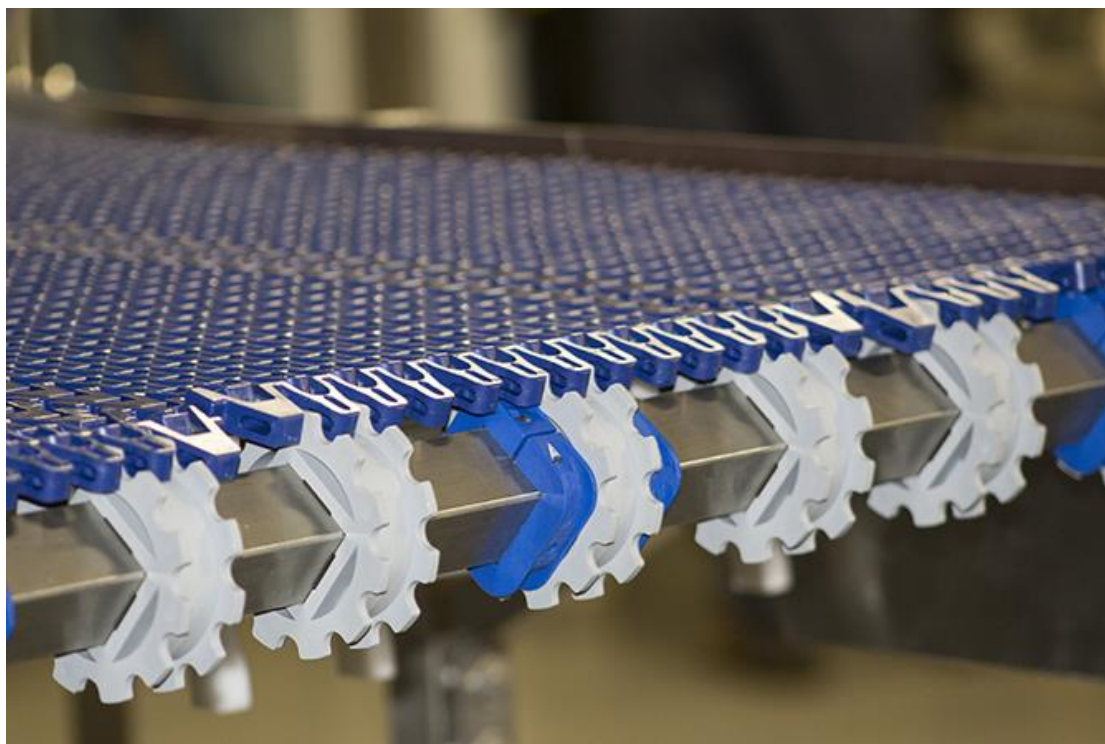
του, εάν ο ηλεκτρικός γραμμικός ενεργοποιητής χρησιμοποιείται σύμφωνα με τις προδιαγραφές θερμοκρασίας. Όταν ένας ηλεκτρικός γραμμικός ενεργοποιητής σταματά με τον διακόπτη τερματισμού, οι οδοντωτοί τροχοί του, λειτουργούν τέλεια και η διάρκεια ζωής τους δεν επηρεάζεται, καθώς ο διακόπτης απενεργοποιεί τον κινητήρα και η κίνηση σταματά. Ωστόσο, εάν ο ενεργοποιητής σταματήσει λόγω φραγής ή άλλου εμποδίου, οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί θα φθαρούν και θα επηρεαστεί τόσο η λειτουργία τους όσο και η διάρκεια ζωής τους. Επομένως, συνιστάται ιδιαίτερα, να χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής κινητήρα για την εκκίνηση ή τη διακοπή ενός ηλεκτρικού γραμμικού ενεργοποιητή με πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς. Όμως, οποιαδήποτε μικρή ζημιά που προκαλείται στους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς ενός ενεργοποιητή δεν θα την κάνει επικίνδυνη. Το σπάσιμο ενός ή δύο οδόντων θα κάνει τον ενεργοποιητή να καθυστερήσει λίγο αλλά μπορεί να τρέξει με χαμηλότερη ταχύτητα. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή ενός ενεργοποιητή με πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς είναι ότι μαζί με την περιβάλλουσα θερμότητα, η θερμότητα που παράγεται μέσα στον ενεργοποιητή πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή ενός ενεργοποιητή σε περιβάλλον με υψηλή θερμότητα. Το τεράστιο πλεονέκτημα των ενεργοποιητών με πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς, ειδικά εκείνων με σύστημα ατέρμονα κοχλία-τροχού, είναι να παρέχουν χαμηλότερο θόρυβο σε σχέση με τους μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς.



Σχήμα 19. Βιομηχανικοί γραμμικοί ενεργοποιητές [51]



Μια ακόμα εφαρμογή των πολυμερικών οδοντωτών τροχών στη βιομηχανία είναι στις μεταφορικές ταινίες και συγκεκριμένα στην κίνηση των αρθρωτών μεταφορικών ταινιών. Οι αρθρωτές μεταφορικές ταινίες αποτελούνται από μεμονωμένα πολυμερικά ή μεταλλικά (ερπύστριες) διάτρητα ή μη πλακίδια, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ράβδους άρθρωσης (ντίζες). Οι αρθρωτές ταινίες μεταφοράς κινούνται με την βοήθεια πολυμερικών οδοντωτών τροχών, οι οποίοι από τη μια πλευρά είναι τοποθετημένοι στη σειρά επάνω σε έναν άξονα (κινητήριος) συνδεδεμένο με έναν κινητήρα και από την άλλη πλευρά σε έναν άξονα τάνυσης. Οι οδοντωτοί τροχοί εμπλέκονται στις οπές της ταινίας από την κάτω πλευρά και την οδηγούν είτε προς τα εμπρός είτε προς τα πίσω (με οδοντωτούς τροχούς διπλής οδόντωσης). Τα πλεονεκτήματα των ταινιών αυτών είναι ότι δεν χάνουν την ευθυγράμμισή και την τάνυσή τους, καθαρίζονται εύκολα, είναι ανθεκτικές και μπορούν να αντέξουν σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες. Οι εφαρμογές αυτών των ταινιών είναι σε γραμμές συσκευασίας, κατεψυγμένων φαγητών (ψάρια, κρέατα, πουλερικά), σε γραμμές όπου το μεταφερόμενο προϊόν χρειάζεται στράγγιση (μέσω των οπών της ταινίας) ή στέγνωμα με τη βοήθεια ψύξης και ξήρανσης (ο αέρας μπορεί να διεισδύσει μέσω των οπών της ταινίας), και σε πολλές ακόμα.



*Σχήμα 20. Πολυμερική αρθρωτή ταινία μεταφοράς κινείται με την βοήθεια πολυμερικών οδοντωτών τροχών [52]*

#### 4. Διερεύνηση εφαρμογών πολυμερικών οδοντωτών τροχών υψηλής ισχύος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των πολυμερικών οδοντωτών τροχών είναι η μειωμένη αντοχή τους σε μηχανικές καταπονήσεις σε σύγκριση με τους μεταλλικούς τροχούς. Αυτός είναι και ένας από τους σημαντικότερους, αν όχι ο σημαντικότερος, παράγοντας που έχει αποτρέψει μέχρι σήμερα την ευρεία χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές μεγαλύτερων απαιτήσεων ισχύος. Για αυτό και τα παραδείγματα εφαρμογών πολυμερικών οδοντωτών τροχών στη βιβλιογραφία είναι περιορισμένα.

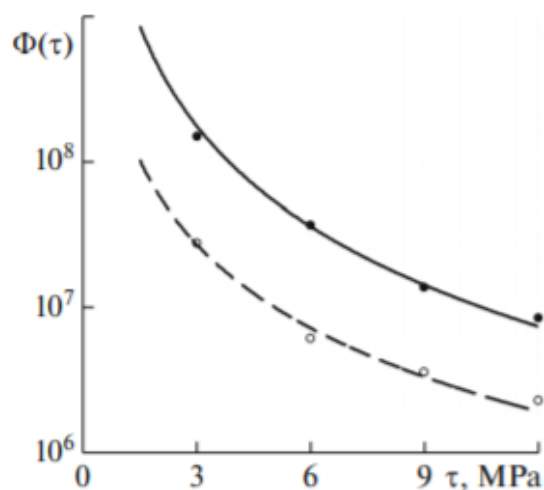
Καθώς, όμως, η τεχνολογία των υλικών εξελίσσεται και τα σύνθετα υλικά έχουν πλέον γίνει προσιτά από άποψη κόστους ακόμα και σε κοινές βιομηχανικές εφαρμογές, όλο και περισσότερο ο επιστημονικός και ο βιομηχανικός κόσμος στρέφεται στην έρευνα σχετικά με την αύξηση της φέρουσας ικανότητας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Αυτή η έρευνα έχει οδηγήσει σε πολλά ενδιαφέροντα και ελπιδοφόρα αποτελέσματα για τη χρήση των πολυμερικών οδοντωτών τροχών και είναι ενδεικτική για τις εφαρμογές που θα χρησιμοποιούν πολυμερικούς τροχούς στο εγγύς μέλλον. Για το λόγο αυτό στο κεφάλαιο αυτό, προτού παρουσιαστούν οι υπάρχουσες εφαρμογές μεγαλύτερης ισχύος των πολυμερικών οδοντωτών τροχών, θα παρατεθεί μια αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας που διενεργείται για την αύξηση της φέρουσας ικανότητάς τους.

##### 4.1. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών

Η έρευνα [1] έγινε το 2018 από τους M. V. Chernets, S. V. Shil'ko, M. I. Pashechko και M. Barshch και παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής σύνθετων πολυαμιδίων ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (PA6-L-CV30-1) και ίνες άνθρακα (UPA-6130UV), οι οποίες είναι πολλά υποσχόμενες για την παραγωγή μεταλλικών-πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά της αντοχής τους στη φθορά υπό τις ολισθαίνουσες συνθήκες τριβής. Η εκτίμηση του υπολογισμού της αντοχής των μεταλλικών-πολυμερικών κυλινδρικών οδοντωτών τροχών με οδοντωτούς τροχούς κατασκευασμένους από καθορισμένα αντιρρυπαντικά υλικά λαμβάνεται βάσει του κριτηρίου της ακραίας φθοράς.

Η διεξαχθείσα μελέτη της φθοράς δύο τύπων σύνθετων πολυαμιδίων υποδηλώνει σχεδόν τετραπλάσια υψηλότερη αντοχή στη φθορά του ενισχυμένου πολυαμιδίου με ανθρακονήματα σε σύγκριση με το ενισχυμένο πολυαμίδιο με υαλοβάμβακα, αν και τα χαρακτηριστικά αντοχής ( $\sigma_{\text{tens}}$ ,  $\tau_{\text{st}}$ ) είναι υψηλότερα όταν ενισχύεται με φίμπεργκλας. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα αντοχής στη φθορά των δυο αυτών σύνθετων υλικών, ο λόγος της αντοχής τους στη φθορά παραμένει περίπου σταθερός σε ένα ευρύ φάσμα πιέσεων (ειδικές δυνάμεις τριβής). Η υπολογισμένη εκτίμηση της αντοχής του μεταλλικού-πολυμερικού τροχού πινιόν με τον τροχό από σύνθετα υλικά έδειξε πολύ υψηλότερη (με συντελεστή 8,3 περίπου) ανθεκτικότητα των ανθρακούχων σύνθετων

υλικών σε σύγκριση με αυτά των ενισχυμένων με γυαλί, κάτι που είναι συνέπεια της σημαντικής διαφοράς (κατά συντελεστή περίπου 4) σε αντοχή στη φθορά αυτών των υλικών. Αυτή η αναλογία ισχύει επίσης για μετάδοση με πινιόν από σύνθετα υλικά και έναν χαλύβδινο τροχό. Η χρησιμοποιημένη τεχνική δοκιμής των υλικών, μαζί με τη μέθοδο υπολογισμού μετάδοσης οδοντωτών τροχών, μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε την ανθεκτικότητα των μεταλλικών-πολυμερικών οδοντωτών τροχών στο στάδιο του σχεδιασμού.



Σχήμα 21. Διάγραμμα αντοχής στη φθορά των ενισχυμένων με γυαλί (διακεκομμένη καμπύλη) και των ενισχυμένων με άνθρακα (καμπύλη γραμμική) σύνθετων πολυαμιδίων [1]

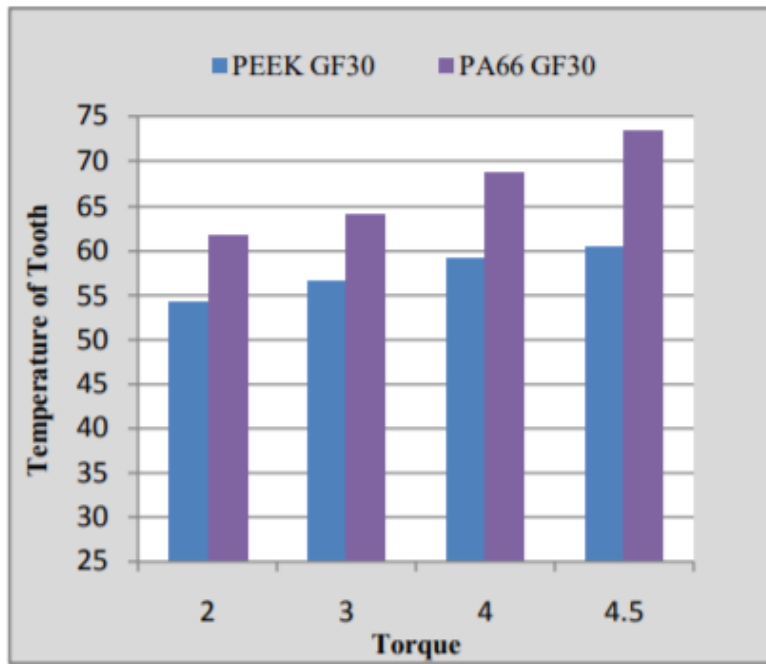
Η έρευνα [2] πραγματοποιήθηκε το 2013 από τους K. D. Dearn, T. J. Hoskins, D. G. Petrov, S. C. Reynolds και R. Banks και περιγράφει μια προσπάθεια ελέγχου της τριβής και της φθοράς μειώνοντας τις θερμοκρασίες λειτουργίας χρησιμοποιώντας μια σειρά επιστρώσεων στερεών λιπαντικών που εναποτίθενται στις πλευρές των οδόντων των πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς λίπανση, ωστόσο οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας οφείλονται σε υψηλή επαφή τριβής, αυτό σημαίνει ότι η διάρκεια ζωής αυτών των οδοντωτών τροχών, ειδικά σε εφαρμογές με μεσαία έως υψηλή μετάδοση ισχύος, τείνει να είναι χαμηλή και να περιορίζεται από τη φθορά. Επιλέχθηκαν τέσσερις πιθανές επικαλύψεις, δισουλφίδιο μολυβδαινίου (MoS<sub>2</sub>), νιφάδα γραφίτη, νιτρίδιο του βορίου (εξαγωνικό) και πολυ-τετρα-φθορο-αιθυλένιο (PTFE). Κάθε επίστρωση χρησιμοποιήθηκε με ενισχυμένη και μη ενισχυμένη πολυαιθέρα - αιθέρα - κετόνη (PEEK) και μη ενισχυμένο πολυαμίδιο (PA). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα εξής ζεύγη οδοντωτών τροχών, επικαλυμμένο-επικαλυμμένο, επικαλυμμένο-χαλύβδινο και επικαλυμμένο-μη επικαλυμμένο. Επίσης, καταγράφηκαν οι ρυθμοί φθοράς (με τη μορφή απώλεια βάρους) και οι θερμοκρασίες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το PTFE παρείχε τη μεγαλύτερη μείωση των δυνάμεων τριβής και ότι οι μηχανισμοί αστοχίας ήταν κατά κύριο λόγο η αποκόλληση των επιχρισμάτων και η λειαντική φθορά.

Η μελέτη αυτή περιγράφει μια προσπάθεια βελτίωσης των ιδιοτήτων επαφής μεταξύ των οδόντων των πολυμερικών οδοντωτών τροχών χρησιμοποιώντας μια ποικιλία



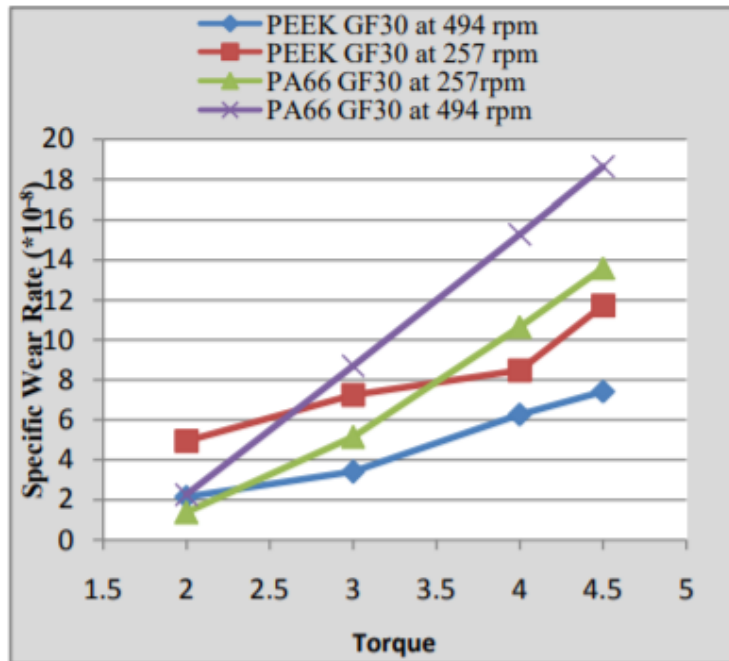
λιπαντικών ξηρού υμενίου. Η χρήση επιστρώσεων γραφίτη και PTFE μείωσε την τριβή, τις σχετικές θερμοκρασίες λειτουργίας και τη φθορά των πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Αυτές οι βελτιώσεις θα μπορούσαν ενδεχομένως να οδηγήσουν σε αύξηση της μετάδοσης ισχύος και της διάρκειας ζωής των υλικών. Το PTFE παρείχε τις σημαντικότερες βελτιώσεις στη διάρκεια ζωής με μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας κατά 30 ° C και μείωση της φθοράς άνω του 90% κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε σύγκριση με το μη επικαλυμμένο πολυαμίδιο ισοδύναμα. Η μείωση των υψηλών τοπικών θερμοκρασιών κοντά στην τροχιά επαφών θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει τη συχνότητα του σπασίματος στον κύκλο κύλισης. Στους οδοντωτούς τροχούς PEEK η αποτελεσματικότητα των λιπαντικών στεγνού φιλμ ήταν περιορισμένη, με επικαλύψεις που εναποτίθενται σε ενισχυμένο υπόστρωμα αποτυγχάνουν κυρίως λόγω της λειαντικής δράσης του πληρωτικού ενίσχυσης. Υπάρχουν περιορισμοί στη χρήση επίστρωσης λιπαντικού ξηρού υμενίου. Η φθορά είναι ένας αποδεκτός παράγοντας κατά τη χρήση πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Ωστόσο, η φθορά μπορεί να γίνει σημαντική εάν χρησιμοποιείται για τη μετάδοση υψηλών φορτίων. Επομένως είναι πιθανό η επικάλυψη να χάνει την αποτελεσματικότητά της με την πάροδο του χρόνου καθώς η φθορά υπερβαίνει το πάχος αυτής. Ωστόσο, ένα ποσοστό της επικάλυψης μπορεί να μεταφερθεί στο εξωτερικό στρώμα του οδοντωτού τροχού καθώς φθείρεται, ανασχηματίζοντας αποτελεσματικά το λιπαντικό στρώμα. Συμπερασματικά, η εφαρμογή ενός στεγνού λιπαντικού φιλμ έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής τόσο των πολυαμιδίων όσο και των PEEK οδοντωτών τροχών. Παρόμοιες ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση πληρωτικού λιπαντικού ωστόσο αυτό έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την ισχύ της μήτρας. Η χρήση μιας αποτελεσματικής εξωτερικής επίστρωσης με χαμηλό κόστος είναι πολύ πιο επιθυμητή.

Η έρευνα [3] έγινε το 2014 από τους A. D. Dighe, A. K. Mishra και V. D. Wakchaure και περιγράφεται στη συνέχεια. Οι οδοντωτοί τροχοί από πολυμερικά και σύνθετα πολυμερικά υλικά χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές λόγω του χαμηλού κόστους των υλικών κατασκευής, του χαμηλού βάρους τους και της αθόρυβης λειτουργίας τους σε σύγκριση με τους μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς. Γενικά, τα θερμοπλαστικά πολυμερή όπως τα πολυμερή ακετάλης και νάιλον χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές οδοντωτών τροχών. Αλλά οι οδοντωτοί τροχοί ακετάλης και νάιλον έχουν χαμηλή φέρουσα ικανότητα. Για να βελτιωθεί η απόδοση των οδοντωτών τροχών, θα πρέπει να γίνει τροποποίηση της γεωμετρίας τους, όπως με τροποποίηση του πλάτους των οδόντων και με οπές ψύξης στην επιφάνεια των οδόντων. Αλλά για εφαρμογές υψηλής ισχύος, αυτά τα υλικά δείχνουν χαμηλή απόδοση. Επομένως, είναι απαραίτητο να επιλέξετε το πολυμερές που έχει καλές μηχανικές ιδιότητες και καλή θερμική σταθερότητα. Η πολυ-αιθέρας-αιθέρας-κετόνη (PEEK) έχει υψηλά επίπεδα αντοχής και ακαμψίας, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής που απαιτείται για οδοντωτούς τροχούς. Σε αυτή τη μελέτη διερευνήθηκε η συγκριτική απόδοση κίνησης των οδοντωτών τροχών PA66 με 30% ίνες γυαλιού και PEEK με 30% ίνες γυαλιού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι οδοντωτοί τροχοί PEEK με γυαλί 30% έχουν υψηλότερη αντοχή στη φθορά και ικανότητα μετάδοσης υψηλότερης ροπής σε σύγκριση με τους οδοντωτούς τροχούς PA66 με 30% γυαλί.



Σχήμα 22. Διάγραμμα θερμοκρασίας οδόντων συναρτήσει της ροπής [3]

Τα πειραματικά αποτελέσματα των οδοντωτών τροχών PA66 GF30 και PEEK GF30 με διαφορετική ροπή και αριθμό περιστροφών συνοψίζονται παρακάτω. Παρατηρείται ότι, η θερμοκρασία των οδόντων αυξάνεται με την αύξηση της ροπής και η αυξανόμενη θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενδοτικότητας των οδόντων των οδοντωτών τροχών που αυξάνει περαιτέρω τον ρυθμό φθοράς. Σε υψηλή ροπή και υψηλή ταχύτητα, οι οδοντωτοί τροχοί PA66 GF30 αστόχησαν. Τα συγκριτικά αποτελέσματα των οδοντωτών τροχών PA66 GF30 και PEEK GF30 δείχνουν ότι, ο ρυθμός φθοράς του PA66 GF30 είναι πολύ υψηλότερος από το PEEK GF30 σε όλες τις ροπές και τις ταχύτητες. Ως εκ τούτου, η ικανότητα μετάδοσης της ροπής του PEEK GF30 είναι υψηλότερη από το PA66 GF30. Τα αποτελέσματα του SEM όλων των οδοντωτών τροχών από σύνθετα υλικά δείχνουν επίσης ότι, ο σχηματισμός ρηγμάτων κάτω από την επιφάνεια ή η θραύση επιφάνειας είναι υπεύθυνοι για τα αυξημένα ποσοστά φθοράς. Ο μηχανισμός αστοχίας στο PA66 GF30 ήταν η κόπωση θερμικού κύκλου που οφείλεται σε υψηλή θερμοκρασία και επαναλαμβανόμενη πίεση στην επιφάνεια επαφής των οδόντων.

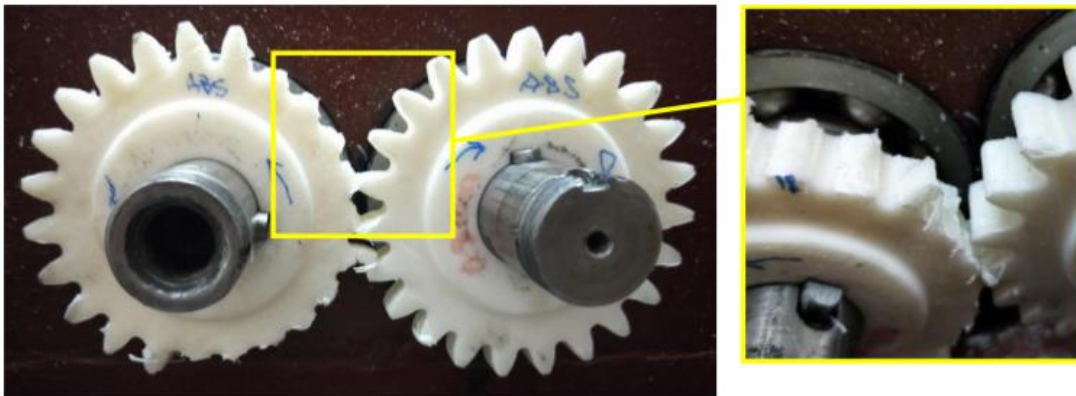


Σχήμα 23. Διάγραμμα του ειδικού ρυθμού φθοράς συναρτήσει της ροπής για διαφορετικές τιμές της γωνιακής ταχύτητας [3]

Η έρευνα [4] έγινε το 2018 από τους DIMIĆ Aleksandar , MIŠKOVIĆ Žarko , MITROVIĆ Radivoje , RISTIVOJEVIĆ Mileta , STAMENIĆ Zoran , DANKO Ján , BUCHA Jozef και MILESICH Tomáš και περιγράφεται στη συνέχεια. Η προηγμένη ανάπτυξη των πρόσθετων τεχνολογιών τα τελευταία χρόνια οδήγησε στο γεγονός ότι τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από αυτές τις τεχνολογίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές. Μία από τις πιο διάσημες και πιο εφαρμοσμένες πρόσθετες τεχνολογίες είναι η εκτύπωση 3D. Σε αυτή την έρευνα αναλύεται η επίδραση του τύπου του υλικού στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των οδοντωτών τροχών κίνησης που κατασκευάζονται από την τεχνολογία εκτύπωσης 3D, μετά τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε back-to-back διατάξεις μέτρησης οδοντωτών τροχών, στις προκαθορισμένες εργαστηριακές συνθήκες.



Σχήμα 24. Διάταξη πειραματικού ελέγχου οδοντωτών τροχών [4]



Σχήμα 25. Αστοχία στον κύκλο ποδός των οδοντωτών τροχών από ABS [4]

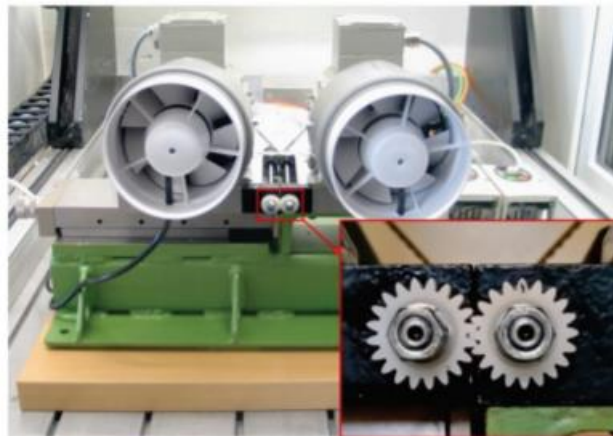
Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι τρισδιάστατοι οδοντωτοί τροχοί εκτύπωσης κατασκευασμένοι από πλαστικό PLA έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας από αυτούς οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από πλαστικό ABS. Έχοντας κατά νου ότι παρά την αρχή των περισσότερων εμπειρισταωμένων ερευνών, σε αυτή τη περίπτωση εξετάστηκαν μόνο δύο ζεύγη οδοντωτών τροχών κατασκευασμένοι από πλαστικά ABS και PLA. Είναι προφανές ότι, επαναλαμβάνοντας το πείραμα με περισσότερα δείγματα (περισσότερα ζεύγη οδοντωτών τροχών), χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους δοκιμής, θα ληφθούν και πιο στατιστικά ακριβή δεδομένα, το οποίο σχεδιάζεται να γίνει στη

συνέχεια της έρευνας. Στη μελλοντική πειραματική έρευνα θα έχει επίσης προγραμματιστεί να διαφοροποιηθεί το πάχος στρώσης των δειγμάτων τρισδιάστατων οδοντωτών τροχών, όπως επίσης και το ποσοστό πλήρωσης των κατασκευασμένων πρωτοτύπων.

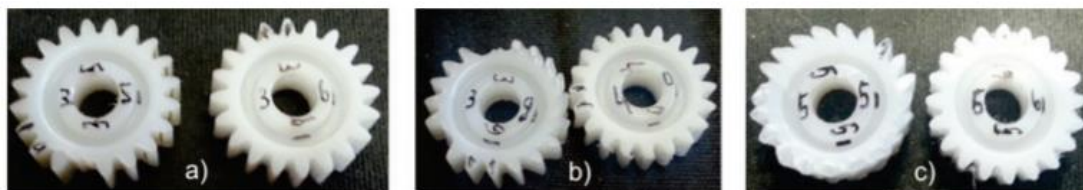
Η έρευνα [5] πραγματοποιήθηκε το 2016 από τους Jože Duhovnik, Damijan Zorko και Luka Sedej και παρουσιάζει μια εκτενή έρευνα σχετικά με δύο διαφορετικές κατατομές οδοντωτών τροχών, την εξειλιγμένη και τους S-gears. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο γεωμετριών παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής διάρκειας ζωής. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε ειδικό εξοπλισμό δοκιμής με απόσταση αξόνων 20 mm. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή των οδοντωτών τροχών ήταν το POM για τον οδοντωτό τροχό του οδηγού και το PA6 για τον οδηγούμενο οδοντωτό τροχό. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια μεγέθη και για τους δυο οδοντωτούς τροχούς ( $m = 1 \text{ mm}$ ,  $z = 20$ ). Οι οδοντωτοί τροχοί αυτού του μεγέθους είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για μετάδοση με μικρο-οδοντωτούς τροχούς. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και ροπές, μεταξύ  $0,8 \text{ N} \cdot \text{m}$  και  $1,5 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Κατά τη διάρκεια της δοκιμής η θερμική κατάσταση των οδοντωτών τροχών μετρήθηκε με μια θερμική κάμερα. Οι αναλύσεις τάσεων και παραμορφώσεων των δοκιμαστικών οδοντωτών τροχών πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας αριθμητικές προσομοιώσεις με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Έχοντας δοκιμάσει διαφορετικούς τύπους οδοντωτών τροχών, η εστίαση πρέπει να γίνει προς την ακριβή κατασκευή των οδοντωτών τροχών. Καθώς οι οδοντωτοί τροχοί πολυμερούς είναι κυρίως χυτοί με έγχυση, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, κατά το σχεδιασμό του εργαλείου, η συρρίκνωση του υλικού κατά την ψύξη. Παρατηρήθηκε ότι η συρρίκνωση επηρεάζει κυρίως τις διαστάσεις των διαμέτρων κεφαλής και ποδός. Δεδομένων των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων έγχυσης, από αυτό μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η γεωμετρία του πτερυγίου των οδόντων δεν έχει καμία σημαντική επίδραση στη συρρίκνωση. Πρέπει να ληφθεί υπόψη το αποτέλεσμα της συρρίκνωσης του πάχους των οδόντων κατά τον καθορισμό της ακρίβειας των οδόντων στο  $Q = 8$ . Οι τροχοί εξειλιγμένης έχουν δείξει καλύτερη απόδοση στις δοκιμές διάρκειας ζωής σε χαμηλότερες ροπές ( $1 \div 1,2 \text{ N} \cdot \text{m}$ ). Ωστόσο, η τάση των καμπυλών δείχνει ότι οι S-gears θα διαρκούσαν περισσότερο σε στιγμές που ξεπερνούσαν τα  $1,2 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι S-gears είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου μεταδίδονται υψηλότερα φορτία ροπής. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να αναμένεται ένας μεγάλος αριθμός κύκλων λειτουργίας. Το σφάλμα στην αξονική απόσταση επηρεάζει την κινηματική των S-gears. Οι δοκιμές διάρκειας ζωής αποκάλυψαν ότι οι οδοντωτοί τροχοί πολυμερούς αποτυγχάνουν με διαφορετικούς τρόπους. Ελαττώματα λόγω κόπωσης εμφανίζονται σε χαμηλότερα φορτία, ενώ τα υψηλότερα φορτία προκαλούν αστοχίες λόγω θερμοκρασίας. Κατά τη μετάβαση, εμφανίζεται ένας συνδυασμός αστοχιών λόγω θερμοκρασίας και κόπωσης, δηλαδή πλαστική παραμόρφωση σε συνδυασμό με αστοχία στον οδόντα. Η ανάλυση των τάσεων επιβεβαίωσε το πλεονέκτημα μιας κυρτής/κούλης επαφής των S-gears. Η τάση που υπολογίζεται στην κατατομή του οδόντος ήταν χαμηλότερη από εκείνη στους τροχούς εξειλιγμένης. Ήταν λίγο περίεργο το γεγονός ότι μεγαλύτερες τάσεις υπολογίστηκαν στον πόδα του τροχού για τους S-gears, ανεξάρτητα από το μεγαλύτερο πάχος που έχουν στον κύκλο ποδός. Οι πιθανοί

λόγοι εξηγήθηκαν. Η τοπική παραμόρφωση των οδόντων μπορεί να βρεθεί από τον υπολογισμό του σφάλματος μετάδοσης, το οποίο είναι το μεγαλύτερο στο εύρος μιας απλής επαφής οδόντων, όταν ο οδός υπόκειται στη μεγαλύτερη παραμόρφωση. Παρατηρήθηκε ότι οι S-gears έχουν μικρότερο σφάλμα μετάδοσης, χάρη στο ότι οι οδόντες έχουν μεγαλύτερο πάχος στον πόδα. Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας όταν η ταχύτητα περιστροφής αυξήθηκε και το φορτίο παρέμεινε το ίδιο. Μια σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων θερμοκρασιών έγινε σύμφωνα με τις συστάσεις VDI 2736 και τις καταγραφείσες θερμοκρασίες επιφανείας των οδοντωτών τροχών. Για την προτεινόμενη τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στον πόδα, δηλαδή,  $k_{\theta, f\beta} = 2100 \text{ K} \cdot (\text{m} / \text{s})^{0,75} \cdot \text{mm}^{1,75}$ , οι μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας επιφανείας δεν ταιριάζουν πολύ καλά. Περαιτέρω έρευνα σχετικά με τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν.



Σχήμα 26. Συσκευή δοκιμής πειραμάτων από το [5]



Σχήμα 27. Τύποι αστοχιών που προκύπτουν κατά τη διάρκεια των δοκιμών: a) οδός που αστόχησε στον πόδα, b) πλαστική παραμόρφωση και αστοχία στον πόδα λόγω μειωμένης ενδοτικότητας, c) πλαστική παραμόρφωση λόγω μειωμένης ενδοτικότητας [5]

Η έρευνα [6] έγινε από τον Hayrettin Düzcükoşlu το 2008 και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Υπό βαριά φόρτιση και μεγάλους αριθμούς στροφών, η συχνότερη φθορά στους οδοντωτούς τροχούς είναι η θερμική φθορά που προκαλείται από τη συσσώρευση θερμότητας στην επιφάνεια του οδόντος. Η μέγιστη πίεση επιφανείας εμφανίζεται στην περιοχή επαφής ενός ζεύγους οδόντων. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να καθυστερήσει ο σχηματισμός θερμικής βλάβης στην περιοχή μονής επαφής με μείωση της πίεσης στην περιοχή επαφής αυξάνοντας το πλάτος των οδόντων. Η φόρτιση του οδόντος  $F / b$  ( $\text{N} / \text{mm}$ ) μειώθηκε στη περιοχή επαφής μονού ζεύγους. Τα πειράματα δείχνουν ότι η εμφάνιση θερμικής βλάβης καθυστερεί για τους οδόντας οδοντωτού τροχού που έχουν τροποποιηθεί σε πλάτος σε σύγκριση με τους οδόντας που δεν έχουν τροποποιηθεί.



Οι επιδόσεις του οδοντωτού τροχού (πινιόν) με τροποποιημένο πλάτος οδόντων και αυτές του οδοντωτού τροχού (πινιόν) χωρίς τη συγκεκριμένη τροποποίηση διερευνήθηκαν με διαφορετικά φορτία και ρυθμούς περιστροφής, και οι δυο οδοντωτοί τροχοί είναι από PA 66 GFR30 και ο τροχός από AISI 8620 χάλυβα. Οι φθορές του τροποποιημένου οδοντωτού τροχού καθυστέρησαν περισσότερο σε σύγκριση με αυτές του μη τροποποιημένου, οι οποίες ήταν αποτέλεσμα εξισορρόπησης του λόγου του φορτίου «F / b» όλων των περιοχών συνεργασίας του τροποποιημένου τροχού. Η άνοδος της ταχύτητας περιστροφής και της φόρτισης των οδόντων αύξησαν την ποσότητα φθοράς και για τους δύο τύπους οδοντωτών τροχών, ωστόσο, η αύξηση της ποσότητας φθοράς των οδόντων ήταν μικρότερη για αυτούς του τροποποιημένου οδοντωτού τροχού σε σχέση με αυτούς του μη τροποποιημένου. Έτσι, η διάρκεια ζωής του οδοντωτού τροχού αυξήθηκε. Ταυτόχρονα, η έρευνα στοχεύει επίσης στην απομάκρυνση των επιπτώσεων των απότομων αλλαγών φορτίου στη γραμμή επαφών κατά την αλλαγή από μονή σε διπλή επαφή που σχηματίζεται στον μη τροποποιημένο οδοντωτό τροχό. Αντί να παράγουν οδοντωτούς τροχούς με διευρυμένο πλάτος για τη μείωση της επιφανειακής πίεσης Hertz στην περιοχή μονής επαφής, αυξάνοντας το μέγεθος της περιοχής μονής επαφής θα σωθεί το υλικό που παρήχθη με χύτευση με έγχυση. Μια μεγάλη τροποποίηση εξοικονόμησης υλικού κατά τη μαζική παραγωγή δημιουργήθηκε με την αύξηση του πλάτους της περιοχής μονής επαφής αντί της παραγωγής οδοντωτών τροχών πλήρους πλάτους. Αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική τροποποίηση λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των πλαστικών οδοντωτών τροχών και την ικανότητά τους να λειτουργούν σε μη λιπαντικά περιβάλλοντα. Η διάρκεια ζωής μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος φθοράς στα προφίλ των οδόντων. Αυτή η φθορά είναι αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας των οδόντων. Ωστόσο, η προαναφερθείσα φθορά καθυστέρησε όταν χρησιμοποιήθηκε οδοντωτός τροχός με τροποποιημένο πλάτος οδόντων. Η θερμοκρασία του οδόντος είναι υψηλή κοντά στον κύκλο κύλισης. Επομένως, η ψύξη ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών είναι αποτελεσματική. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί και βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη για να βρουν μεθόδους αφαίρεσης της συσσωρευμένης θερμότητας στους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς για να αυξήσουν τη ζωή τους. Επίσης, η στιγμή της βλάβης των οδόντων μπορεί να προσδιοριστεί με αισθητήρα θερμοκρασίας.



Σχήμα 28. Πειραματικοί οδοντωτοί τροχοί, (αριστερά) ο μη τροποποιημένος οδοντωτός τροχός και (δεξιά) ο τροποποιημένος οδοντωτός τροχός [6]

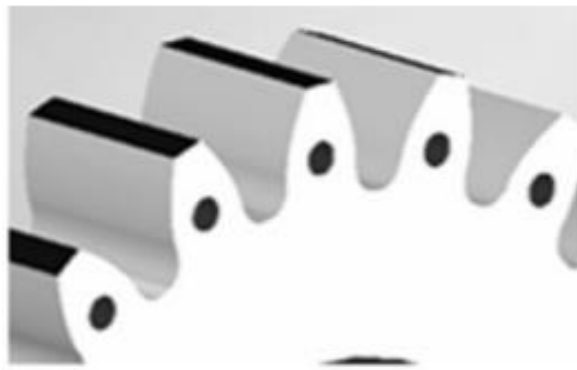
Η έρευνα [7] πραγματοποιήθηκε από τους Hayrettin Düzcükoğlu, Rifat Yakut και Eyyub Uysal, το 2010 και παρουσιάζει την ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου για τη μείωση της ποσότητας θερμικής βλάβης στην επιφάνεια επαφής των οδόντων των πλαστικών οδοντωτών τροχών. Ο κύριος στόχος αυτής της μεθόδου είναι να μειώσει την ποσότητα θερμικής βλάβης στην επιφάνεια των οδόντων μειώνοντας τη θερμότητα που συσσωρεύεται στους οδόντας κάτω από τις συνθήκες λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, ανοίγονται οπές για ψύξη με αέρα σε διαφορετικά σημεία επάνω στους οδόντας των πλαστικών οδοντωτών τροχών, με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας των οδόντων μεταφέροντας τη θερμότητα μακριά από τους οδόντας μέσω αυτών των οπών με μεταγωγή θερμότητας. Χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις οπών, ο αέρας και η θερμοκρασία στην περιοχή επαφής των οδόντων μετρήθηκε και συγκρίθηκε.

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της δοκιμαστικής λειτουργίας ήταν η μείωση της ποσότητας θερμικής βλάβης στην επιφάνεια των οδόντων των πλαστικών οδοντωτών τροχών (πινιόν) Ertalon polyamide (PA 6 + Oil) χρησιμοποιώντας οπές ψύξης επάνω στους οδόντας. Η μέγιστη φόρτιση των οδόντων σημειώθηκε στην περιοχή του κύκλου κύλισης. Η θερμική βλάβη ξεκίνησε στον οδοντωτό τροχό σε αυτήν τη ζώνη. Δύο διαμορφώσεις θεωρείται ότι μειώνουν την ποσότητα θερμότητας με σκοπό τη μείωση της φθοράς. Η θερμική βλάβη σημειώθηκε στην επιφάνεια των οδόντων του κανονικού οδοντωτού τροχού κάτω από όλα τα φορτία. Όσο το φορτίο αυξανόταν, η φθορά αυξανόταν επίσης. Σε υψηλά φορτία, η μηχανική βλάβη σημειώθηκε πριν το σύστημα φτάσει σε θερμική ισορροπία. Οι οπές ψύξης για τον πρώτο τύπο διαμόρφωσης των οδόντων επέτρεψε να περάσει αέρας από τις τρύπες και μείωσε τη θερμοκρασία των οδόντων σε σύγκριση με τον κανονικό οδοντωτό τροχό. Η χαμηλότερη θερμοκρασία επιφάνειας των οδόντων ελήφθη χρησιμοποιώντας τον δεύτερο τύπο διαμόρφωσης των οδόντων του οδοντωτού τροχού. Οι ακτινικές οπές σχηματίζονται στο δεύτερο τύπο διαμόρφωσης των οδόντων του οδοντωτού τροχού η οποία παρήγαγε επιπλέον κυκλοφορία αέρα γύρω από τον πλαστικό οδοντωτό τροχό και κόντρα στον μεταλλικό τροχό από χάλυβα AISI 8620. Αυτό το φαινόμενο είχε ως αποτέλεσμα χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας από αυτή που παρατηρήθηκε στην άλλη διαμόρφωση. Η θερμική καταπόνηση οδηγεί στη καταστροφή μετά από έναν αριθμό κύκλων, παρόλα αυτά ένα κανάλι ψύξης περί του κύκλου κύλισης μείωσε τη θερμοκρασία του οδόντος. Ωστόσο, για τη δεύτερη διαμόρφωση, δεν υπήρχε σχεδόν καμία φθορά σε σύγκριση με τις άλλες που λειτουργούσαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Η θερμοκρασία της ζώνης επαφής των οδόντων μειώθηκε με την επιτυχή εκπομπή της θερμότητας που συσσωρεύτηκε στους οδόντας του οδοντωτού τροχού μέσω μεταφοράς από τα κανάλια ψύξης τα οποία τρυπήθηκαν κάθετα στον άξονα των οδόντων και διαμέσου της μάζας αυτών. Οι οπές ψύξης μείωσαν όμως την αντοχή και την ακαμψία των οδοντωτών τροχών, αλλά αυτές οι αλλαγές αφορούν μελέτη πέραν του πεδίου αυτού. Οι οπές ψύξης έχουν δύο σημαντικά αποτελέσματα: τη μείωση της ακαμψίας και της αντοχής, καθώς και τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας και τον υποβιβασμό που οφείλεται στη συσσώρευση θερμότητας και στην αυξημένη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, ο τρόπος αστοχίας εξαρτάται από το ποια επίδραση κυριαρχεί και υπό ποιες συνθήκες δοκιμάστηκαν, οι οπές ψύξης βελτίωσαν την απόδοση των πλαστικών οδοντωτών τροχών.

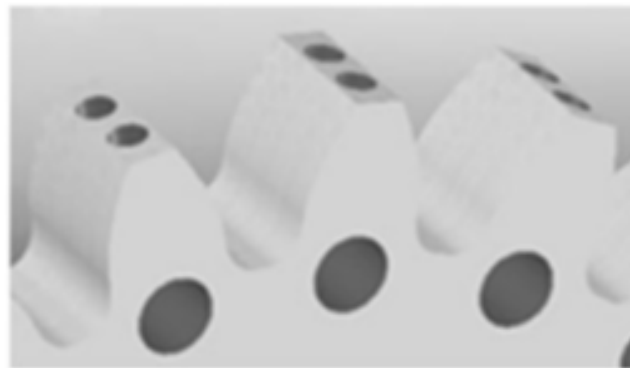




*Σχήμα 29. Κανονικός οδοντωτός τροχός χωρίς σπές ψύξης [7]*



*Σχήμα 30. Πρώτη διαμόρφωση σπών-ψύξης [7]*

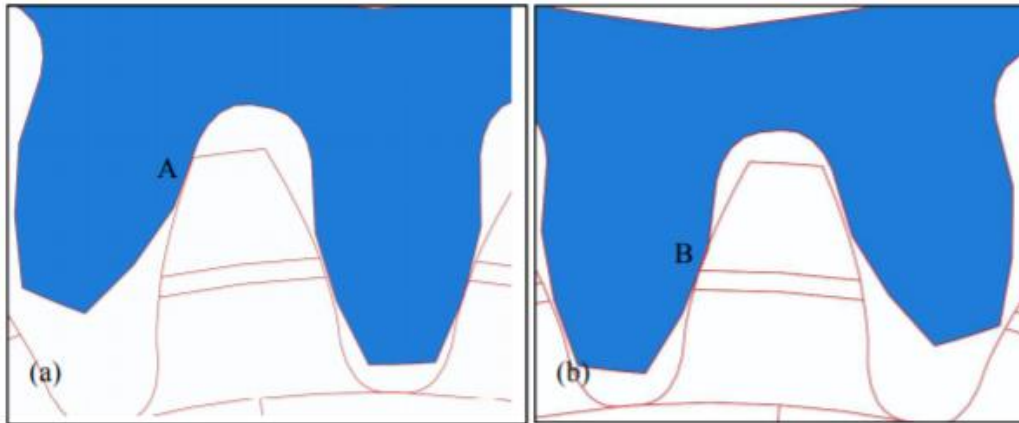


*Σχήμα 31. Δεύτερη διαμόρφωση σπών-ψύξης [7]*

Η έρευνα [8] έγινε το 2013 από τους Ji Ling Feng και Yi Qin και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Οι οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδόντωση είναι ο πιο κοινός τύπος οδοντωτών τροχών για τη βιομηχανία, λόγω της απλής κατασκευής και του χαμηλού κόστους παραγωγής. Υπό τις περίπλοκες συνθήκες φόρτισης, οι αστοχίες μπορούν εύκολα να εμφανιστούν υπό μορφή de-bonding, pitting, spalling ή αστοχίας των επικαλύψεων. Η αστοχία μπορεί να προέρχεται από την έναρξη ρωγμών, και από την ανάπτυξη και διάδοση αυτών, ωστόσο, ο βασικός μηχανισμός αστοχίας δεν είναι ακόμη σαφής. Για να διερευνήσει τον μηχανισμό αστοχίας της αστοχίας της δομής επίστρωσης για τους

οδοντωτούς τροχούς με ευθεία οδόντωση, αυτή η έρευνα παρουσιάζει κάποιες αντιλήψεις σχετικά με τη φθορά στην επίστρωση των κατατομών των οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση, με βάση πρωτότυπες διαδικασίες ανάλυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η διαδικασία μοντελοποίησης αναπτύχθηκε με βάση πολλές προσεγγίσεις μοντελοποίησης που περιλαμβάνουν: παραμετροποιημένη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, μοντέλο συνεκτικής ζώνης και τεχνική υπομοντελοποίησης. Το αριθμητικό μοντέλο του οδοντωτού τροχού βασίστηκε σε χάλυβα 42CrMo4 με επικάλυψη PVD (φυσική εναπόθεση ατμών) που εναποτίθεται ως TiN / CrN πολυστρωματικές δομές. Διαπιστώθηκε ότι η μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα φορτίου υφίσταται για οδοντωτούς τροχούς με ευθεία οδόντωση με την επικάλυψη νιτριδίου που εναποτίθεται στον χάλυβα 42CrMo4.

Τα αποτελέσματα από το μοντέλο FE σε αυτήν τη μελέτη συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από τη DGMK-FZG (Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der TU München) σύντομη δοκιμή micro-pitting. Σε τέτοιες δοκιμές, διαφορετικά επίπεδα φορτίων (ροπών) εφαρμόστηκαν στο σύστημα πινιόν / τροχού. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, τα κρίσιμα φορτία ορίστηκαν ως τα φορτία στα οποία ξεκινούν επιφανειακές ρωγμές, όπου οι ρωγμές ανιχνεύθηκαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) με επί τόπου παρατηρήσεις. Παρόμοια με τη διαδικασία δοκιμής, διαφορετικά επίπεδα φορτίων (ροπών) εφαρμόστηκαν επίσης στο παγκόσμιο μοντέλο (σύστημα πινιόν / τροχού). Η κατανομή πίεσης στην περιοχή επαφής (Σημείου A και Σημείου B) από το παγκόσμιο μοντέλο στη συνέχεια εισήχθη στο υπο-μοντέλο ως οριακή συνθήκη. Η φέρουσα ικανότητα φορτίου ορίστηκε ως το φορτίο στο οποίο ξεκίνησε η πρώτη ρωγμή. Το κρίσιμο φορτίο που προβλέφθηκε μέσω της προσομοίωσης FE συμφωνεί με εκείνο που παρατηρήθηκε από τις εικόνες SEM. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η μέση πίεση στο σημείο A ήταν μεγαλύτερη από εκείνη στο σημείο B και για τους δύο τύπους οδοντωτών τροχών αν και η κανονική δύναμη που δρούσε σε αυτήν την περιοχή είναι πολύ μικρότερη από ό, τι στην περιοχή γύρω από το σημείο B. Ο λόγος για αυτό είναι η μικρή ακτίνα καμπυλότητας του ενδιάμεσου προφίλ στον πόδα η οποία οδηγεί σε τοπική συγκέντρωση τάσεων και τελικά προκαλεί τη δημιουργία ρωγμών σε αυτήν την περιοχή. Βρέθηκε τόσο από πειραματικά όσο και από υπολογιστικά αποτελέσματα ότι η προθέρμανση με πλάσμα νιτριδίου βελτίωσε τις επιφανειακές ιδιότητες δραματικά, το κρίσιμο φορτίο το οποίο σχετίζεται με την έναρξη της πρώτης ρωγμής για το μοντέλο B είναι διπλάσιο από αυτό για το μοντέλο A. Το μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο με το TiN / CrN στο νιτριδιωμένο 42CrMo4 μπορεί να οφείλεται στις βελτιωμένες ιδιότητες της σκληρυμένης περίπτωσης.



Σχήμα 32. a) Το σημείο A αντιπροσωπεύει το σημείο, όπου το πινιόν άρχισε να εμπλέκεται με τον τροχό και b) Το σημείο B αντιπροσωπεύει το σημείο, όπου μόνο ένα ζεύγος οδόντων έρχεται σε επαφή [8]

Critical load for crack initiation	SCS		DDSa	
	Point A	Point C	Point A	Point C
Maximum pressure [MPa]	1438	1534	3768	3245
Average pressure [MPa]	1321	1279	3331	2918
Normal force [N]	1644	5014	4883	10588
Torque [Nm]	170		358	

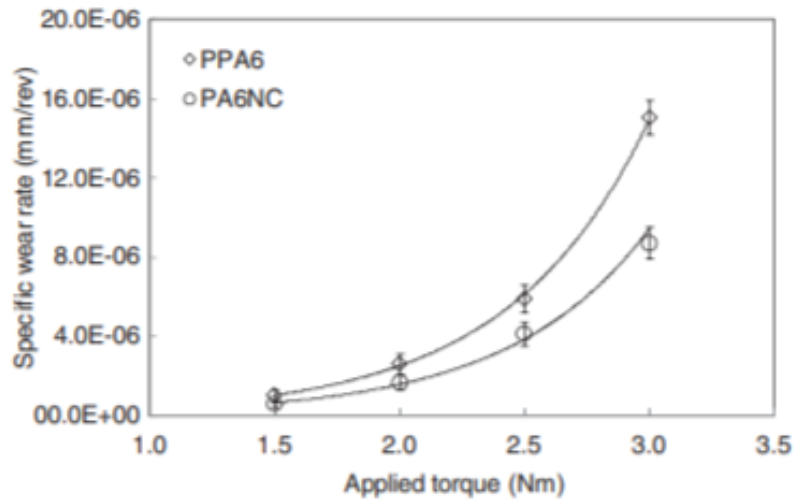
Πίνακας 1: Κρίσιμα φορτία για δύο τύπους επιφανειακών συστημάτων [8]

Η έρευνα [9] έγινε από τους C Gurunathan, S Kirupasankar και R Gnanamoorthy το 2010 και αναλύεται στη συνέχεια. Τα νανοσύνθετα πολυμερή έχουν λάβει σημαντική ερευνητική προσοχή τις προηγούμενες δεκαετίες λόγω της αξιοσημείωτης βελτίωσης στον εφέλκυσμό, στην κόπωση, και στα τριβολογικά χαρακτηριστικά τους. Αυτό το άρθρο αναφέρει τα χαρακτηριστικά φθοράς των οδοντωτών τροχών από Pristine polyamide 6 και Polyamide 6 + 5% nano-size clay. Το νανοσύνθετο κατασκευάστηκε μέσω χύτευσης και χύτευσης με έγχυση. Η αλληλεπίδραση σε μοριακό επίπεδο με ενισχύσεις νάνο-κλίμακας ενισχύει τις μηχανικές ιδιότητες του νανοσύνθετου πολυμερούς. Η απόδοση των οδοντωτών τροχών σε διαφορετικά επίπεδα ροπής μελετήθηκε με τη βοήθεια (συνεργαζόμενοι) με ένα τροχό από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 χρησιμοποιώντας μια διάταξη δοκιμής οδοντωτού τροχού τύπου απορρόφησης ισχύος. Η θερμοκρασία επιφανείας των οδόντων του οδοντωτού τροχού επηρεάζει το ρυθμό φθοράς και τη διάρκεια ζωής του. Οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες του PA6NC οδηγούν σε μειωμένη παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής και υστέρησης που σχετίζεται με λιγότερη φθορά και αυξημένη διάρκεια ζωής.

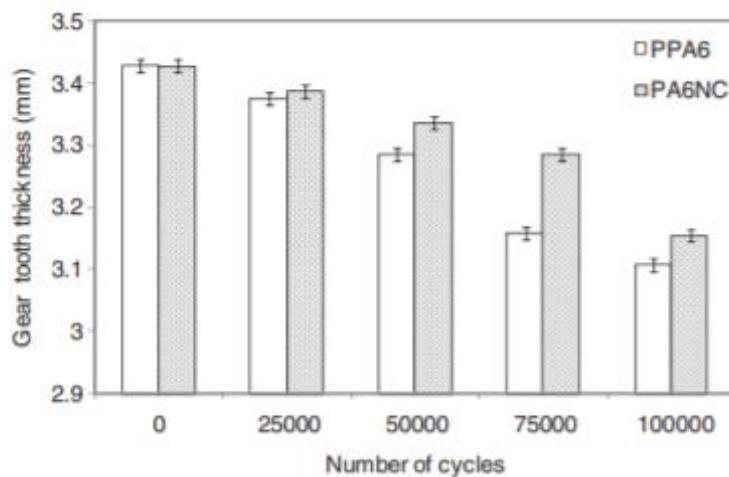
Με βάση τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στους οδοντωτούς τροχούς PPA6 και PA6NC, συνάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

1. Οι οδοντωτοί τροχοί PA6NC παρουσιάζουν ανώτερη απόδοση σε σύγκριση με τους οδοντωτούς τροχούς PPA6 λόγω της υψηλής αντοχής, της δυσθραυστότητας και του χαμηλού συντελεστή απόσβεσης.

2. Η μειωμένη παραμόρφωση οδόντος στους τροχούς PA6NC μειώνει το φθορά στην κατατομή.
3. Η αυξημένη σκληρότητα και κρυσταλλικότητα μειώνουν το ποσοστό φθοράς στους οδοντωτούς τροχούς PA6NC.
4. Η βελτιωμένη θερμική ιδιότητα επιτρέπει στο PA6NC να διατηρεί την αντοχή του οδοντωτού τροχού για μεγάλη διάρκεια και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.



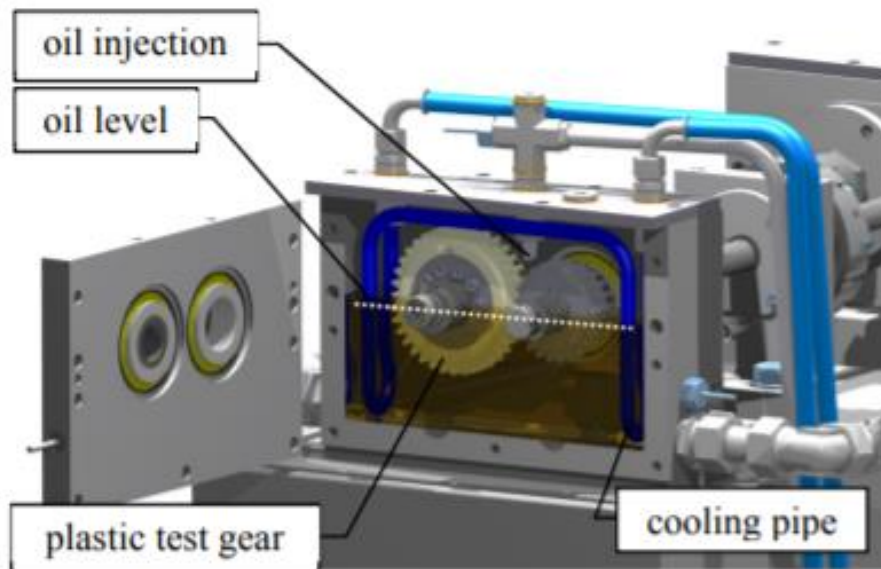
Σχήμα 33. Διάγραμμα ειδικού ρυθμού φθοράς για PPA6 και PA6NC οδοντωτών τροχών συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής [9]



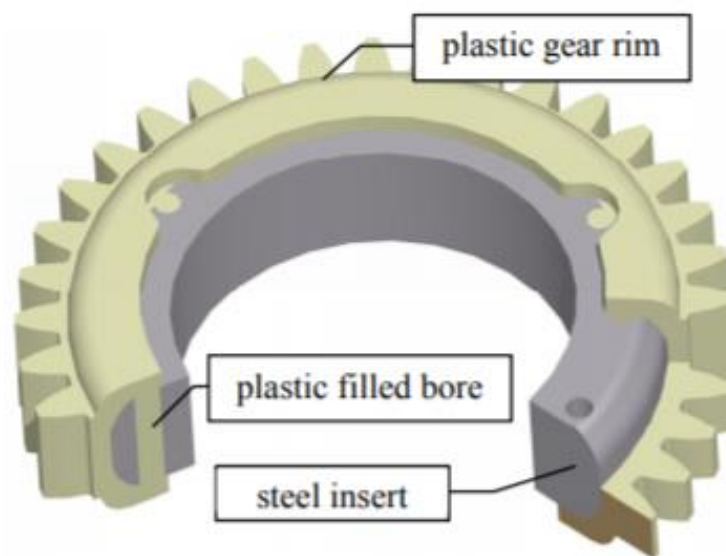
Σχήμα 34. Διάγραμμα του πάχους των οδόντων των PPA6 και PA6NC οδοντωτών τροχών συναρτήσει του αριθμού των κύκλων περιστροφής σε 1.5 Nm ροπή και 800 rpm [9]

Η έρευνα [10] έγινε από τους Christian HASL, Christopher ILLENBERGER, Peter OSTER, Thomas TOBIE και Karsten STAHL το 2017 και αναλύεται στη συνέχεια. Η αντοχή στην κάμψη των χυτευμένων με έγχυση οδοντωτών τροχών δοκιμής από πολυακετάλη ερευνήθηκε με back-to-back δοκιμές με χρήση λιπαντικού. Για να επικυρωθούν οι σύγχρονες μέθοδοι υπολογισμού, διερευνήθηκαν οι γεωμετρίες οδόντων με μεταβλητό αριθμό οδόντων, διατηρώντας μια σταθερή απόσταση μεταξύ των αξόνων και σταθερό λόγο μετάδοσης. Για να καταστεί δυνατή η δοκιμή σε σταθερό επίπεδο θερμοκρασίας των οδόντων για μεταβαλλόμενες ροπές και ταχύτητες, οι θερμοκρασίες των οδόντων που προκύπτουν μετρούνται και λαμβάνονται υπόψη στις τελευταίες δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι η δύναμη κάμψης των γεωμετριών των οδόντων με μεγαλύτερο αριθμό οδόντων ασκεί υψηλότερες τάσεις στον πόδα (VDI 2736). Μια τροποποιημένη μέθοδος για τον υπολογισμό των τάσεων στον πόδα λαμβάνει υπόψη τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από το φορτίο, επιτρέποντας τον εντοπισμό των αστοχιών των διαφορετικών γεωμετριών των οδόντων σε ένα κοινό επίπεδο πίεσης. Ως εκ τούτου, προτείνεται μια πιθανή προσέγγιση για να ληφθεί υπόψη ο πραγματικός λόγος επαφής για τον υπολογισμό των τάσεων στον πόδα των ζευγών χαλύβδινων πλαστικών οδοντωτών τροχών.

Καθώς η επιμήκυνση στην απόδοση των θερμοπλαστικών υλικών είναι περίπου δέκα φορές υψηλότερη σε σύγκριση με τον χάλυβα, η παραμέληση της επίδρασης της παραμόρφωσης που προκαλείται από το φορτίο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποτίμηση του δυναμικού μεταφοράς φορτίου των πλαστικών οδοντωτών τροχών, τουλάχιστον για συγκεκριμένες γεωμετρίες οδόντων. Για να επικυρώσετε τον προηγμένο υπολογισμό της αντοχής κάμψης (VDI 2736, 2014) - ειδικά για οδοντωτούς τροχούς υψηλής φόρτισης, λιπαινόμενους με λάδι - οι χυτευμένοι με έγχυση οδοντωτοί τροχοί δοκιμής με διαφορετικό αριθμό οδόντων διερευνώνται σε back-to-back δοκιμές. Η απόσταση μεταξύ των αξόνων και ο λόγος μετάδοσης διατηρούνται σταθεροί. Ως υλικό, χρησιμοποιείται το POM, το οποίο ήταν και εξακολουθεί να είναι κοινό υλικό για πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς για δεκαετίες και ως εκ τούτου θεωρείται κατάλληλο ως υλικό αναφοράς. Τα αποτελέσματα της δοκιμής επιβεβαιώνουν ότι οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από φορτία αποτελούν σημαντικό παράγοντα. Με τον αυξανόμενο αριθμό οδόντων η απόκλιση μεταξύ της πραγματικής κόπωσης και της υπολογισμένης κόπωσης (VDI 2736, 2014) αυξάνεται. Η δοκιμαστική ταχύτητα με τον μεγαλύτερο αριθμό οδόντων μεταφέρει περισσότερο από το διπλάσιο της αναμενόμενης ροπής (VDI 2736, 2014). Για να ληφθεί υπόψη αυτό το αποτέλεσμα, μια τροποποίηση του υπολογισμού των τάσεων στον πόδα σύμφωνα με (Fürstenberger, 2013) προτείνεται. Ο επανυπολογισμός των τάσεων στον πόδα όλων των δοκιμαστικών οδοντωτών τροχών που πραγματοποιήθηκαν, με βάση αυτήν την προσέγγιση, οδηγεί σε ένα κοινό επίπεδο πίεσης για όλες τις γεωμετρίες των οδόντων που εξετάστηκαν. Κατά συνέπεια, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα, ότι η μέθοδος είναι επαρκής για να ληφθεί υπόψη η επίδραση των εκτροπών που προκαλούνται από τα φορτία των ζευγών χάλυβα-POM βάσει ενός τυπικού προφίλ κανόνα (DIN 867, 1986).



Σχήμα 35. Πειραματική διάταξη FZG (DIN ISO 14635, 2006) [10]



Σχήμα 36. Σχεδιασμός του πλαστικού οδοντωτού τροχού δοκιμής [10]



Σχήμα 37. Θερμικός αισθητήρας μέτρησης της θερμοκρασίας των οδόντων [10]



Σχήμα 38. Επαγωγικό σύστημα τηλεμετρίας για μέτρηση της θερμοκρασίας των οδόντων [10]

Η έρευνα [11] πραγματοποιήθηκε το 2008 από τον Hüseyin İmrek και περιγράφεται στη συνέχεια. Οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι από Nylon 6 είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε αστοχία λόγω ακραίας συσσώρευσης θερμότητας στην περιοχή μονής επαφής, η οποία έχει ως αποτέλεσμα φθορές που συνεπώς μειώνουν τη διάρκεια ζωής των οδόντων και προκαλούνται σφάλματα μετάδοσης. Σε αυτήν την πειραματική μελέτη, το πλάτος των οδόντων των πλαστικών οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση από Nylon 6 τροποποιήθηκε και διερευνήθηκε. Οι τιμές του διαμοιρασμένου φορτίου,  $F/b$ , στις περιοχές μονής και διπλής επαφής εξισώνονται διευρύνοντας τη περιοχή μονής επαφής, και οι επιδόσεις τόσο τροποποιημένων όσο

και μη τροποποιημένων οδοντωτών τροχών μελετήθηκαν πειραματικά κάτω από τρεις διαφορετικές φορτίσεις. Παρατηρήθηκε ότι οι τροποποιημένοι οδοντωτοί τροχοί Nylon 6 εμφανίζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες στους οδόντας, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του ρυθμού φθοράς σε σύγκριση με τους μη τροποποιημένους οδοντωτούς τροχούς. Κατά συνέπεια, η τροποποίηση του πλάτους των οδόντων συμβάλλει στην αύξηση της απόδοσης του Nylon 6.

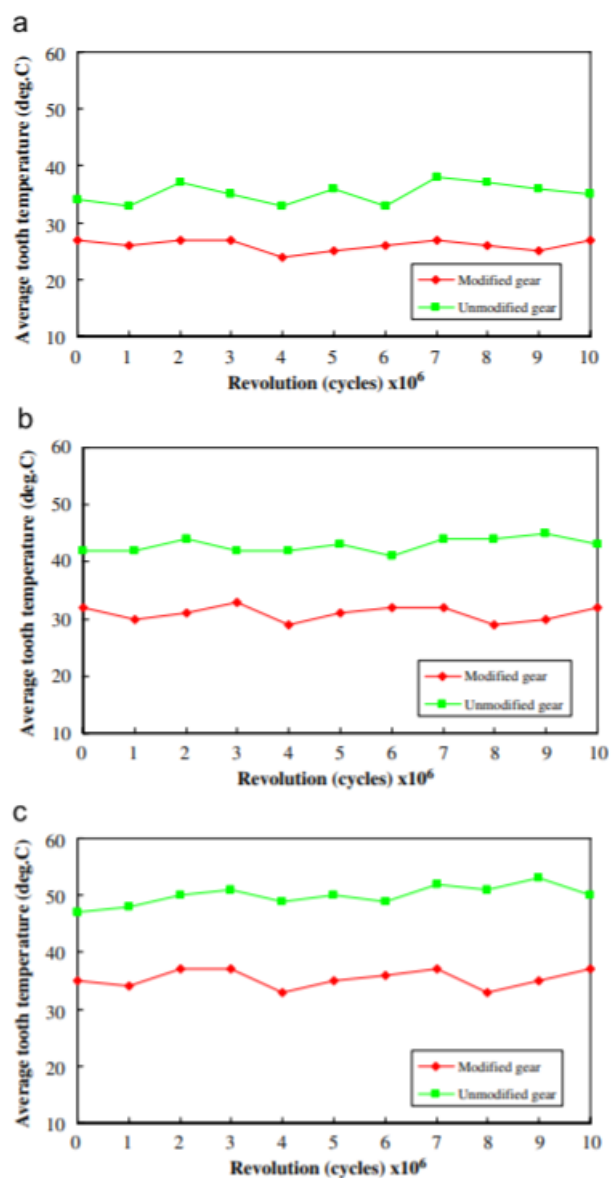
Σε αυτό το άρθρο, τα ακόλουθα αποτελέσματα ελήφθησαν από δοκιμές απόδοσης σε οδοντωτούς τροχούς Nylon 6.

- 1) Σε οδοντωτούς τροχούς με τροποποιημένο πλάτος οδόντων, παρατηρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας περίπου 10-15 ° C σε σύγκριση με τους μη τροποποιημένους οδοντωτούς τροχούς. Η αύξηση των εφαρμοζόμενων φορτίων αύξησε ελαφρώς αυτή τη διαφορά.
- 2) Η τροποποίηση του πλάτους των οδόντων βοήθησε στη μείωση των ποσοστών φθοράς στα προφίλ των οδόντων. Υπήρξε αύξηση στη διαφορά των ποσοστών φθοράς μεταξύ τροποποιημένων και μη τροποποιημένων οδοντωτών τροχών καθώς αυξήθηκαν τα φορτία.
- 3) Σε μη τροποποιημένους οδοντωτούς τροχούς Nylon 6, ενώ η θραύση των οδόντων λαμβάνει χώρα γύρω από την περιοχή επαφής, αυτές οι φθορές εμφανίζονται κοντά στον πόδα των οδόντων στους τροποποιημένους οδοντωτούς τροχούς.
- 4) Η μείωση της παραγωγής θερμότητας και η αύξηση της απαγωγής θερμότητας ως αποτέλεσμα της διεύρυνσης του πλάτους των οδόντων στους τροποποιημένους οδοντωτούς τροχούς απέτρεψαν τις πρόωρες αστοχίες και οδήγησαν σε αυξημένη διάρκεια ζωής του οδοντωτού τροχού. Οι τροποποιημένοι οδοντωτοί τροχοί δείχνουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τους μη τροποποιημένους.
- 5) Μπορεί να εφαρμοστεί τροποποίηση πλάτους για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των οδοντωτών τροχών Nylon 6.



Σχήμα 39. Μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας των οδόντων [11]





Σχήμα 40. Διαγράμματα διακύμανσης της θερμοκρασίας της επιφάνειας των οδόντων συναρτήσει του αριθμού των κύκλων περιστροφής του τροποποιημένου οδοντωτού τροχού από Nylon 6 και του μη τροποποιημένου οδοντωτού τροχού από Nylon 6: (a) σε 4.41 Nm ροπή, (b) σε 6.62 Nm ροπή, και (c) σε 8.82 Nm ροπή [11]

Η έρευνα [12] έγινε το 2019 από τους Mohit Jaina, Santosh Patil και S. S. Ghosh και αναλύεται στη συνέχεια. Η σημασία των πολυμερικών οδοντωτών τροχών αυξάνεται συνεχώς από την εμφάνισή τους στη δεκαετία του 1950 και αναπτύσσεται με πολύ γρήγορο ρυθμό λόγω κάποιων πλεονεκτημάτων τους έναντι των μεταλλικών οδοντωτών τροχών. Ωστόσο, λόγω των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων και της κακής θερμικής αγωγιμότητας, ο μηχανισμός αστοχίας τους παρατηρείται εντελώς διαφορετικός σε σύγκριση με τους μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς. Αυτό το άρθρο παρουσιάζει διαφορετικές συμπεριφορές αστοχιών που λαμβάνουν χώρα στους

πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς, όπως φθορά, θερμική αστοχία και κόπωση. Η ανασκόπηση των διαφόρων πολυμερικών υλικών όπως το Nylon και η Acetal εξετάζεται εδώ. Παρατηρείται ότι ο οδοντωτός τροχός ακετάλης αστοχεί λόγω φθοράς, ενώ ο οδοντωτός τροχός νάιλον αστοχεί λόγω θραύσης κάτω από τον κύκλο κύλισης κοντά στον πόδα. Παρατηρείται επίσης ότι οι μηχανικές ιδιότητες και η αντίσταση στη θερμική παραμόρφωση σύνθετων νάιλον οδοντωτών τροχών βελτιώνεται σε σημαντικό επίπεδο. Η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής έως 1200 σ.α.λ. στους κύκλους ζωής του οδοντωτού τροχού είναι αμελητέα έως το όριο της τάσης κάμψης των 15MPa. Ενώ η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής βρίσκεται αξιοσημείωτη πάνω από την τάση κάμψης των 20MPa και ως εκ τούτου ο τρόπος αστοχίας γίνεται με πλαστική παραμόρφωση. Παρατηρείται ότι προτιμάται ένας ασύμμετρος πολυμερικός οδοντωτός τροχός σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας όπου υπάρχει απαίτηση μεγάλης μεταφοράς φορτίου και σε περίπτωση φόρτισης μονής κατεύθυνσης. Η απόδοση σε κάμψη του πολυμερικού οδοντωτού τροχού βρίσκεται βελτιωμένη όταν η γωνία πίεσης στην πλευρά κίνησης αυξάνεται από 20° σε 34°, όπως στην περίπτωση ασύμμετρου οδοντωτού τροχού.

1. Η συμπεριφορά αστοχίας του πολυμερικού οδοντωτού τροχού είναι διαφορετική, ανάλογα με τον τύπο του υλικού και επίσης τον τύπο του οδηγού ή του οδηγούμενου οδοντωτού τροχού. Οι οδοντωτοί τροχοί από ακετάλη εμφανίζουν φθορά ενώ οι οδοντωτοί τροχοί από νάιλον εμφανίζουν κάμψη και θραύση. Για Acetal-A και Nylon-N ως οδηγό / οδηγούμενου οδοντωτού τροχού, η φθορά ποικίλλει με την ακόλουθη σειρά: A / A > N / A > N / N > A / N.
2. Η θερμοκρασία αποφασίζει τον τρόπο αστοχίας λόγω του υψηλού συντελεστή τριβής, του τριβολογικού ασυμβίβαστου υλικού, της υψηλής ροπής / φόρτισης και της υψηλής ταχύτητας περιστροφής. Η επίδραση της ροπής / φόρτισης στη θερμοκρασία της επιφάνειας των οδοντωτών τροχών βρίσκεται έως και 7-8 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της ταχύτητας περιστροφής.
3. Θα μπορούσε να συνοψιστεί ότι η συμπεριφορά της κόπωσης είναι αραιή για ασύμμετρους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς.
4. Η απόδοση σε κάμψη του ασύμμετρου πολυμερικού οδοντωτού τροχού βελτιώνεται με την αύξηση της γωνίας πίεσης όπως 20° / 20°, 200/340 και 34° / 20° σε αύξουσα σειρά.
5. Η φέρουσα ικανότητα φορτίου διαπιστώνεται αυξημένη για ασύμμετρο προφίλ οδόντος οδοντωτού τροχού έως και 28% σε σύγκριση με το συμμετρικό προφίλ οδόντος.
6. Οι σύνθετοι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί όπως το Nylon, βρίσκονται με βελτιωμένη τάση κάμψης από 8MPa έως 15 MPa και με ταχύτητα περιστροφής 600-1200 rpm. Πέρα από αυτές τις τιμές θα αστοχήσουν από ρωγμή στον πόδα.



Σχήμα 41. Διαφορετικοί τρόποι φθοράς των οδόντων ενός οδοντωτού τροχού [12]

Η έρευνα [13] έγινε το 2017 από τους M. Kalin και A. Kurec και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Οι διαδικασίες δοκιμής και η αναφερόμενη τριβολογική απόδοση των πολυμερικών οδοντωτών τροχών, οι οποίοι βλέπουν συνεχώς αυξανόμενη χρήση από τη βιομηχανία, εξακολουθούν να στερούνται συνοχής και λεπτομέρειας. Μία από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός πολυμερούς, τις συνθήκες της περιοχής επαφής και κατά συνέπεια, τη συμπεριφορά φθοράς και κόπωσης, είναι η θερμοκρασία. Η θερμοκρασία είναι γνωστό ότι έχει κρίσιμη επίδραση σε όλα τα πολυμερή, πολύ περισσότερο από ό, τι στα μέταλλα ή σε άλλα υλικά. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες ακόμη και για το ίδιο φορτίο και την ίδια ταχύτητα ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τις συσκευές δοκιμών, τα μεγέθη και τα σχήματα των οδοντωτών τροχών, το γύρω περιβάλλον, όπως και τους ρυθμούς ψύξης και θέρμανσης. Επιπλέον, η θερμοκρασία, είτε στον πόδα, είτε στην επιφάνεια επαφής, ποικίλλει επίσης με τις συνθήκες λειτουργίας, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και στα ίδια δεδομένα καμπύλης S-N για διαφορετικές τάσεις, λαμβάνουμε πραγματικά διαφορετικές θερμοκρασίες. Αυτό υποδηλώνει ότι τα αποτελέσματα από διαφορετικές δοκιμές και ακόμη και από διαφορετικά επίπεδα φορτίου, τα οποία δεν ελέγχονται από τη θερμοκρασία, δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα λόγω της σημαντικής επίδρασης της θερμοκρασίας στα πολυμερή. Αυτή η έρευνα παρουσιάζει τα αποτελέσματα των οδοντωτών τροχών POM που έχουν δοκιμαστεί έναντι οδοντωτών τροχών χάλυβα υπό καλά ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας, παρέχοντας διάφορες καμπύλες S-N που λαμβάνονται στους 30 ° C, 50 ° C και 70 ° C και διατηρήθηκαν σταθερές στον πόδα και τρεις τιμές ροπής (1,0 N m, 1,2 N m και 1,4 N m), και αυτά συγκρίνονται με δεδομένα που λαμβάνονται υπό συνθήκες που συνήθως θεωρούνται «θερμοκρασία δωματίου», που είναι στην πραγματικότητα μια ανεξέλεγκτη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των οδοντωτών τροχών POM, δηλαδή, όταν διατηρούνται σε χαμηλή θερμοκρασία (30 ° C), η διάρκεια ζωής των οδοντωτών τροχών POM βελτιώνεται σημαντικά.

Η επίδραση του φορτίου στο εύρος των 26,3-33,8 MPa της τάσης στον πόδα και της θερμοκρασίας, δηλαδή, της ανεξέλεγκτης «θερμοκρασίας δωματίου» ή της ελεγχόμενης θερμοκρασίας στο εύρος από 30 ° C έως 70 ° C στη διάρκεια ζωής και στη φθορά των πολυμερικών οδοντωτών τροχών (POM) σε επαφή με τους χαλύβδινους οδοντωτούς τροχούς διερευνήθηκαν και συγκρίθηκαν. Συνολικά, αυτή η μελέτη δείχνει ότι ο έλεγχος θερμοκρασίας του οδοντωτού τροχού δεν μπορεί να παραμεληθεί κατά τη δοκιμή φθοράς και κόπωσης των πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Η μελέτη αποκάλυψε αρκετά συγκεκριμένα συμπεράσματα:

1. Μια διάταξη δοκιμής πολυμερικών οδοντωτών τροχών επιτρέπει τη μελέτη των τριβολογικών ιδιοτήτων των οδοντωτών τροχών πολυμερούς υπό καλά ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας του οδοντωτού τροχού. για πολύ καλές συνθήκες φόρτισης.
2. Εάν η θερμοκρασία στον πόδα δεν ελέγχεται, οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε «θερμοκρασία δωματίου» εκτελούνται σε σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες, 20-40 ° C, ανάλογα με τη ροπή της παρούσας μελέτης. Επιπλέον, η θερμοκρασία αυξάνεται ακόμη και εντός της ίδιας δοκιμής (έως και 8 ° C σε αυτή τη μελέτη) εάν η ικανότητα ψύξης δεν είναι επαρκής.
3. Η θερμοκρασία - στο ίδιο φορτίο / ροπή - αλλάζει δραματικά τη διάρκεια ζωής: έως τέσσερις φορές στους 70 ° C και έως δύο φορές στους 50 ° C, σε σύγκριση με τους 30 ° C. Η διάρκεια ζωής είναι συνεπώς άμεση συνέπεια τόσο της ροπής / φορτίου όσο και της θερμοκρασίας, και έτσι η θερμοκρασία δεν μπορεί να παραμείνει ανεξέλεγκτη σε μελέτες κόπωσης πολυμερών.
4. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει επίσης την απόδοση (90-97%) έως και 9% σε αυτή τη μελέτη για το υψηλότερο φορτίο (34,8 MPa τάση στον πόδα στα 1,4 N m) στους 70 ° C. Ένα υψηλότερο φορτίο επίσης, άμεσα ή έμμεσα, μειώνει την απόδοση.
5. Το προκαθορισμένο φορτίο και οι θερμοκρασίες επηρεάζουν την παραμόρφωση (tooth tilting), τη φθορά και τις γεωμετρικές ιδιότητες (σχήμα οδόντος, ανοχές), καθώς και τον συντελεστή τριβής, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει τη θερμοκρασία και αλλάζει σημαντικά τις συνθήκες συνεργασίας άρα και τα αποτελέσματα.

Η έρευνα [14] έγινε το 2011 από τους Rod Kleiss και Frank J. Ferfecki και περιγράφεται στη συνέχεια. Πολλά έχουν γραφτεί σχετικά με την πρόοδο της μετάδοσης με πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς τα τελευταία χρόνια. Μετά την καλή εφαρμογή σε παιχνίδια και καταναλωτικά προϊόντα, ο σχεδιασμός και η ποιότητα αυτών των οδοντωτών τροχών βελτιώθηκαν δραματικά. Η πρόοδος των υλικών τα τελευταία 20 χρόνια ήταν επίσης σημαντική. Αυτή η έρευνα περιγράφει τη μεθοδολογία σχεδιασμού ενός καθαρού σχήματος χυτευμένου με έγχυση οδοντωτού τροχού από μιας καθαρού σχήματος PEEK για έναν άξονα εξισορρόπησης κινητήρα. Η μελέτη αυτή δείχνει ότι, σε σύγκριση με τους οδοντωτούς τροχούς σιδήρου υψηλής ποιότητας στο ίδιο σύστημα, ένας καθαρού σχήματος χυτευμένος με έγχυση πολυμερικός οδοντωτός τροχός από PEEK παρέχει μείωση θορύβου 3db, όσο και μείωση κατά 9% στην κατανάλωση ενέργειας, μείωση μάζας 69% και πληροί τις απαιτήσεις αντοχής της εφαρμογής. Η έρευνα περιγράφει το σχεδιασμό του μοναδικού προφίλ οδόντων ενός χυτευμένου με έγχυση οδοντωτού τροχού, την επιλογή υλικού, το σχεδιασμό εξαρτημάτων, το σχεδιασμό καλουπιού και τις μεθόδους επιθεώρησης. Η έρευνα επικεντρώνεται στις διαφορές στη σχεδίαση οδοντωτών τροχών και στις μεθόδους επιθεώρησης μεταξύ χυτευμένων με έγχυση οδοντωτών τροχών και των αντίστοιχων μεταλλικών.

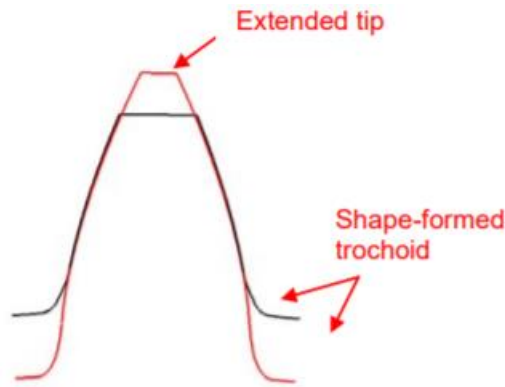
Το τελικό αποτέλεσμα αυτού του επανασχεδιασμού, της κατασκευής εργαλείων, της χύτευσης και της επαλήθευσης μεγέθους ήταν μια μετάδοση με χυτούς οδοντωτούς τροχούς. Οι χυτοί οδοντωτοί τροχοί δεν ήταν τόσο ακριβείς όσο οι συμβατικοί τροχοί, αλλά είχαν καλύτερη απόδοση. Τα πλαστικά πρέπει να προσεγγίζονται με τη γνώση ότι απαιτούν μια ελαφρώς διαφορετική άποψη για να μεγιστοποιήσουν τις δυνατότητές τους για επιτυχία. Υλικά όπως η PEEK επιτρέπουν στον σχεδιαστή χυτευμένων οδοντωτών τροχών να εργάζεται σε περιοχές που προηγουμένως ήταν εκτός ορίων για τα πλαστικά. Όταν προσεγγίζεται με τον σωστό τρόπο, αυτή η νέα τεχνολογία μπορεί να είναι εκπληκτικά αποτελεσματική.

Συνοπτικά:

1. Τα δεδομένα της δοκιμής έδειξαν ότι ο οδοντωτός τροχός PEEK παρέχει έως και 3 dB βελτίωση στο NVH σε σύγκριση με τον κλασικό τροχό από gray iron. Αυτό είναι δυνατό ακόμη και αν η γωνία ελίκωσης μειώνεται από 34.025 ° σε 5 °.
2. Ο οδοντωτός τροχός PEEK ανταποκρίθηκε επιτυχώς σε αρκετές δοκιμές αντοχής 300 ωρών με ταχύτητες οδοντωτού τροχού 12.000 σ.α.λ. και θερμοκρασίες 100 ° C και 150 ° C.
3. Ένας μεμονωμένος οδοντωτός τροχός PEEK έχει 69% μειωμένο βάρος και 78% μειωμένη αδράνεια σε σύγκριση με τον τροχό από gray iron. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μείωση κατά 30% στην αδράνεια του συστήματος και εξοικονόμηση περίπου 9% στη ροπή που απαιτείται για τη λειτουργία του άξονα εξισορρόπησης κινητήρα.
4. Η κεφαλαιακή επένδυση που απαιτείται για την παραγωγή χυτευμένων με έγχυση οδοντωτών τροχών PEEK είναι σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη για τους συμβατικούς οδοντωτούς τροχούς. Επίσης, ο χρόνος παράδοσης του εξοπλισμού για την κατασκευή PEEK είναι περίπου 3-4 μήνες έναντι 12-18 μήνες για την κατασκευή συμβατικών τροχών.



Σχήμα 42. Τροχοί εξωτερικής και εσωτερικής οδόντωσης (Ο εσωτερικής οδόντωσης τροχός χρησιμοποιείται ως καλούπι) [14]



Σχήμα 43. Σχεδιασμός οδόντωσης καλουπιού [14]



Σχήμα 44. Κλασσικός τροχός vs βελτιστοποιημένος τροχός [14]

Η έρευνα [53] έγινε το 2016 από τους Marimuthu Kodeeswaran, Arnika Verma, Rajamanickam Suresh, και Selvaraj Senthilvelan και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Οι οδοντωτοί τροχοί υπόκεινται γενικά σε μονοκατευθυντικά κυκλικά φορτία, ωστόσο, σε εφαρμογές όπως ενεργοποιητές δορυφορικών εκτοξευτών, οι οδοντωτοί τροχοί αντιμετωπίζουν αμφίδρομα κυκλικά φορτία λόγω της περιστροφής τους τόσο προς τα δεξιά όσο και προς τα αριστερά. Στην παρούσα μελέτη, αξιολογήθηκε η μονής και διπλής κατεύθυνσης συμπεριφορά τους σε κόπωση των χτυπημένων με έγχυση οδοντωτών τροχών από πολυαμίδιο 66 (PA) μη ενισχυμένο και ενισχυμένο με ίνες άνθρακα πολυαμίδιο 66 (PACF) με τη χρήση πειραματικής διάταξης που αναπτύχθηκε εργαστηριακά. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγραφόταν συνεχώς η ροπή και η γωνιακή μετατόπιση των οδοντωτών τροχών. Η καθαρή θερμοκρασία επιφάνειας που μετρήθηκε από μια υπέρυθρη κάμερα ήταν υψηλότερη για τους οδοντωτούς τροχούς

όταν υποβλήθηκαν σε αμφίδρομη φόρτιση σε σύγκριση με τη μονοκατευθυντική φόρτιση. Οι ενισχυμένοι οδοντωτοί τροχοί εμφάνισαν περίπου 84% χαμηλότερη θερμοκρασία από εκείνη των μη ενισχυμένων οδοντωτών τροχών, λόγω μικρότερης υστέρησης υλικού και καλύτερης θερμικής αγωγιμότητας. Η κόπωση των μη ενισχυμένων οδοντωτών τροχών εμφάνισε σχεδόν ευθείες ρωγμές στον πόδα και επιβεβαίωσε την όλκιμη θραύση. Η κόπωση των ενισχυμένων οδοντωτών τροχών παρουσίασε ελικοειδή διαδρομή ρωγμών λόγω της ύπαρξης ενισχυμένων ινών. Και για τους δύο τύπους φορτίσεων, οι οδοντωτοί τροχοί ενισχυμένοι με ίνες άνθρακα εμφάνισαν ανώτερη απόδοση κάμψης από ότι οι μη ενισχυμένοι οδοντωτοί τροχοί (2-51 φορές) λόγω των βελτιωμένων μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων τους. Σημαντική μείωση της διάρκειας ζωής (83-99%) των δοκιμασμένων οδοντωτών τροχών, παρατηρήθηκε όταν υποβλήθηκαν σε αμφίδρομη φόρτιση σε σύγκριση με εκείνη της μονόδρομης φόρτισης.

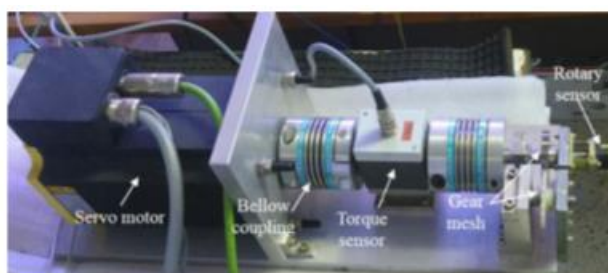
Η απόδοση σε καμπτική κόπωση διπλής κατεύθυνσης ( $R = -1$ ) και μονής κατεύθυνσης ( $R = 0$ ) των χυτευμένων με έγχυση οδοντωτών τροχών από πολυαμίδιο 66 (PA) μη ενισχυμένο και ενισχυμένο με ίνες άνθρακα πολυαμίδιο 66 (PACF), αξιολογήθηκε με τη χρήση ενός σερβοκινητήρα πειραματικής διάταξης που αναπτύχθηκε εργαστηριακά. Τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα προέκυψαν από την παρούσα έρευνα:

1. Οι δοκιμαστικοί οδοντωτοί τροχοί εμφάνισαν μειωμένη διάρκεια ζωής σε αμφίδρομη φορτία ( $R = -1$ ) σε σύγκριση με τα μονοκατευθυντικά φορτία ( $R = 0$ ).
2. Οι οδοντωτοί τροχοί από PA εμφάνισαν θερμική μηχανική αστοχία υπό αμφίδρομη υψηλότερη ροπή φόρτισης λόγω θερμικής υστέρησης. Οι οδοντωτοί τροχοί από PA εμφάνισαν κόπωση σε χαμηλότερα επίπεδα ροπής που οφειλόταν κυρίως στη παραγωγή θερμότητας υπό των φορτίων κάμψης, η οποία δεν ήταν αρκετή για να μαλακώσει το υλικό του οδοντωτού τροχού. Ενώ, οι οδοντωτοί τροχοί από PACF παρουσίασαν μόνο κόπωση.
3. Οι οδοντωτοί τροχοί PACF παρουσίασαν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα σε κάμψη και διάρκεια ζωής από τους οδοντωτούς τροχούς PA λόγω ανώτερων μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων.
4. Στους οδοντωτούς τροχούς από PA, λόγω της χαμηλότερης ακαμψίας τους, η κατεύθυνση των ρωγμών ήταν σχεδόν κάθετη στο τροχοειδές. Ο προσανατολισμός των ενισχυτικών ινών και οι αστοχίες τους ήταν υπεύθυνοι για την ελικοειδή διαδρομή των ρωγμών στην περίπτωση αστοχίας των οδόντων του οδοντωτού τροχού από PACF.





Σχήμα 45. Πειραματική διάταξη ελέγχου αντοχής οδοντωτών τροχών [53]



Σχήμα 46. Πειραματική συσκευή δοκιμής οδοντωτών τροχών [53]

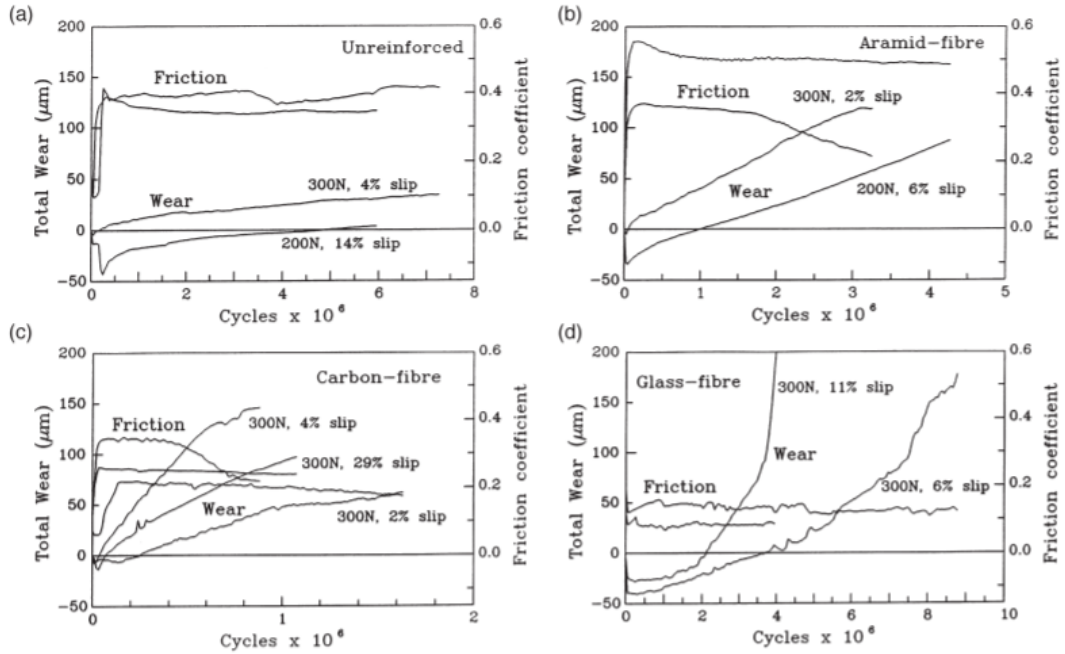


Σχήμα 47. Οδοντωτοί τροχοί από PA και PACF [53]

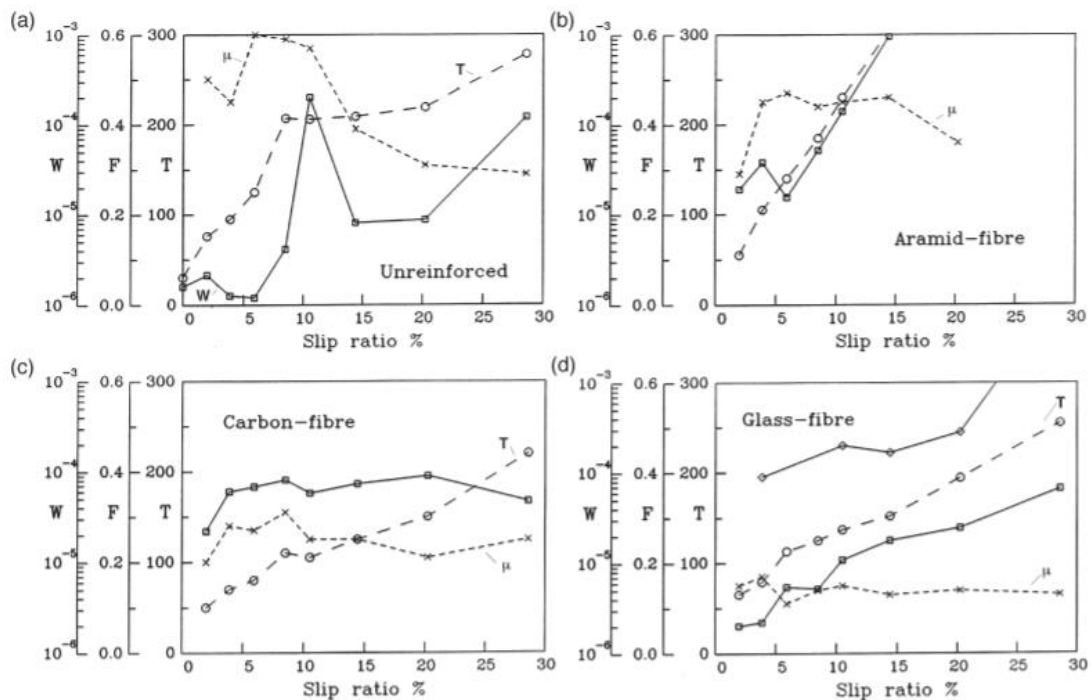
Η έρευνα [54] πραγματοποιήθηκε το 1999 από τους S.N. Kukureka, C.J. Hooke, M. Rao, P. Liao και Y.K. Chen και αναφέρεται σχετικά με την επίδραση της ενίσχυσης των ινών στην τριβή και στη φθορά του PA66 σε συνθήκες κύλισης-ολίσθησης. Εξετάστηκαν τρεις τύποι κοντών ινών από αραμιδίδιο, άνθρακα και γυαλί με τα σύνθετα υλικά να συνεργάζονται με πανομοιότυπα υλικά σε μια μηχανή twin disc. Διαπιστώθηκε ότι η ενίσχυση από ίνες αραμιδίου δεν άλλαξε σημαντικά την τριβή του υλικού μήτρας. Ωστόσο, τόσο η ενίσχυση από ίνες άνθρακα όσο και από ίνες γυαλιού μείωσε σημαντικά τον συντελεστή τριβής. Η φθορά των σύνθετων ινών άνθρακα αραμιδίου ήταν ουσιαστικά γραμμική με το χρόνο και γενικά περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτήν του μη ενισχυμένου υλικού. Η φθορά του σύνθετου υαλοβάμβακα ήταν πολύπλοκη με μια αρχική περίοδο όπου ο ρυθμός φθοράς ήταν παρόμοιος με αυτόν του μη ενισχυμένου υλικού. Μετά από ένα σημαντικό βάθος φθοράς, ο ρυθμός φθοράς άλλαξε σε μια τιμή παρόμοια με αυτήν, αλλά ελαφρώς υψηλότερη από αυτήν των άλλων ενισχυμένων υλικών. Φαίνεται ότι ένα από τα

σημαντικότερα οφέλη από την εισαγωγή ινών ενίσχυσης, ιδιαίτερα από γυαλί, είναι ότι μειώνει τον συντελεστή τριβής και επομένως επιτρέπει στο υλικό να χρησιμοποιείται για υψηλότερες φορτίσεις χωρίς να υπερβαίνει το όριο διαρροής της μήτρας. Αυτή η αύξηση του φορτίου είναι, ωστόσο, υπεύθυνη ενός αυξημένου ρυθμού φθοράς και μικρότερης διάρκειας ζωής.

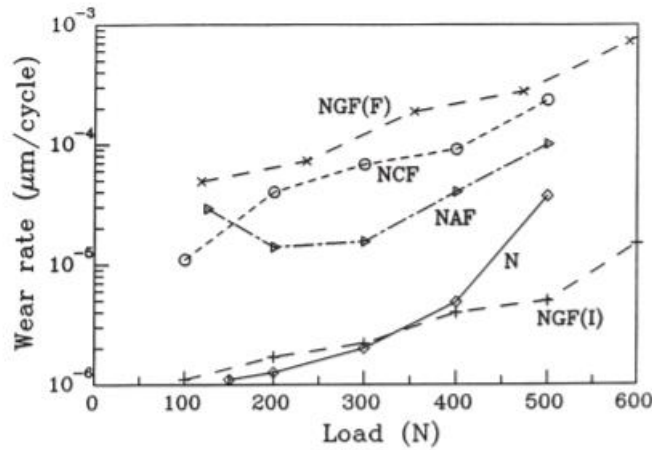
Η επίδραση των κοντών ινών ενίσχυσης στην τριβή και τη φθορά των σύνθετων με βάση το PA66 έχει διερευνηθεί σε συνθήκες επαφής κύλισης και ολίσθησης. Και οι τρεις ενισχύσεις αυξάνουν το ρυθμό φθοράς κατά ένα συντελεστή περίπου 10 έναντι του μη ενισχυμένου πολυμερούς, αν και αυτό το φαινόμενο τείνει να καλύπτεται από τις διαφορετικές επιφανειακές θερμοκρασίες που παράγονται. Οι ίνες άνθρακα και οι ίνες από γυαλί μειώνουν σημαντικά τον συντελεστή τριβής και αυτό επιτρέπει στην επαφή να μεταφέρει υψηλότερα φορτία πριν επιτευχθεί το σημείο τήξης της μήτρας. Αυτή η συμπεριφορά διαφέρει τελείως από εκείνη που βρέθηκε σε pin-on-disc δοκιμές φθοράς των σύνθετων σε μεταλλική υπόστρωση όπου η εισαγωγή ινών ενίσχυσης μείωσε σημαντικά τη φθορά. Με σκληρές επιφάνειες, η δημιουργία ινών προστατεύει το υποκείμενο υλικό και τείνει να αναστείλει τη φθορά. Όταν συνεργάζονται δυο οδοντωτοί τροχοί από σύνθετα πολυμερικά υλικά, μια συσσώρευση ινών μπορεί να αυξήσει τη φθορά λόγω της αλληλεπίδρασης των ινών. Η διαδικασία φθοράς φαίνεται να διαφέρει από εκείνη του μη ενισχυμένου νάιλον και περιλαμβάνει τον σχηματισμό και την αφαίρεση ενός λεπτού επιφανειακού στρώματος από νάιλον ή νάιλον και θραύσματα ινών. Τα ποσοστά φθοράς καθορίζονται από την ευκολία με την οποία αφαιρείται αυτό το επιφανειακό στρώμα. Ο συντελεστής τριβής του ενισχυμένου υλικού με ίνες γυαλιού ήταν περίπου ο μισός από αυτόν που βρέθηκε με ίνες άνθρακα. Παρόλο που, στις παρούσες δοκιμές, οι επιφανειακές θερμοκρασίες ήταν παρόμοιες λόγω της διαφορετικής κατασκευής των δειγμάτων, αυτό είναι απίθανο να συμβαίνει στα πραγματικά συστατικά και μπορεί να αναμένεται ότι η θερμοκρασία που αυξάνεται με τις ίνες άνθρακα να είναι διπλάσια από εκείνη με τις ίνες γυαλιού. Δεδομένου ότι ένα από τα σημαντικότερα οφέλη της ενίσχυσης φαίνεται να είναι η μείωση της θερμοκρασίας που παράγεται από τον χαμηλότερο συντελεστή τριβής, δεν φαίνεται να υπάρχουν τριβολογικά πλεονεκτήματα κατά τη χρήση ενισχυτικών ινών από αραμίδιο ή άνθρακα σε μη σύμμορφες επαφές. Από τα σύνθετα υλικά που δοκιμάστηκαν, το υλικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού φαίνεται να προσφέρει το μεγαλύτερο όφελος, μειώνοντας τον συντελεστή τριβής κατά ένα συντελεστή περίπου τέσσερα σε σχέση με αυτόν του μη ενισχυμένου πολυμερούς. Αυτή η μείωση θα μειώσει επίσης τις θερμοκρασίες των συστατικών επιτρέποντας τη διατήρηση υψηλότερων φορτίων. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση φαίνεται να είναι εις βάρος μιας αύξησης του υποκείμενου ρυθμού φθοράς του υλικού.



Σχήμα 48. Διαγράμματα μετρήσεων τριβής και φθοράς συναρτήσει των κύκλων περιστροφής για α). μη ενισχυμένο νάιλον, β). νάιλον με 20% (κατά βάρος) κοντές ίνες αραμιδίου, γ). νάιλον με 30% (κατά βάρος) κοντές ίνες άνθρακα, δ) νάιλον με 30% (κατά βάρος) κοντές ίνες γυαλιού [54]



Σχήμα 49. Διαγράμματα διακύμανσης του ρυθμού φθοράς, του συντελεστή τριβής και της μέγιστης θερμοκρασίας επιφανείας συναρτήσει του ποσοστού ολίσθησης: - □ - λόγος φθοράς (μm/cycle), - × - συντελεστής τριβής, - ○ - θερμοκρασία επιφανείας (°C). α). μη ενισχυμένο νάιλον, β). νάιλον με 20% (κατά βάρος) κοντές ίνες αραμιδίου, γ). νάιλον με 30% (κατά βάρος) κοντές ίνες άνθρακα, δ) νάιλον με 30% (κατά βάρος) κοντές ίνες γυαλιού [54]

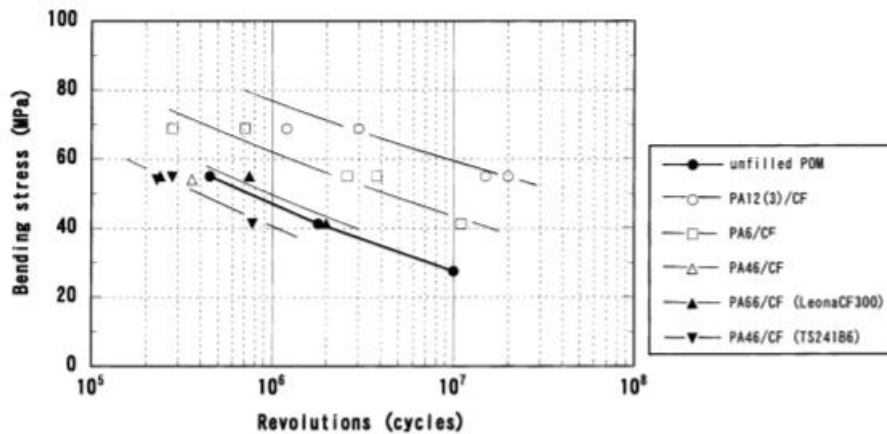


Σχήμα 50. Διάγραμμα διακύμανσης του ρυθμού φθοράς συναρτήσει του φορτίου. (Το NGF (I) είναι η αρχική φθορά για το NGF και NGF (F) είναι η τελική φθορά για το NGF) [54]

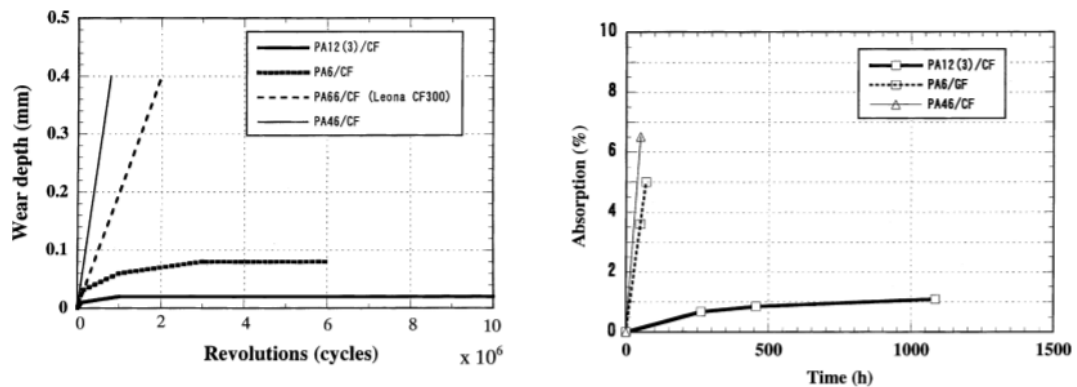
Η έρευνα [55] έγινε το 2003 από τους Masaya Kurokawa, Yoshitaka Uchiyama, Tomoaki Iwai και Susumu Nagai και παρουσιάζει την απόδοση του οδοντωτού τροχού από ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CF) πολυαμίδιο 12 (PA12), που παρασκευάστηκε με χύτευση με έγχυση, διερευνήθηκε σε σύγκριση με εκείνους από πολυαμίδια ενισχυμένα με CF όπως πολυαμίδιο 6 (PA6), πολυαμίδιο 66 (PA66) και πολυαμίδιο 46 (PA46). Διαπιστώθηκε ότι ο οδοντωτός τροχός PA12 / CF έχει εξαιρετική ιδιότητα φθοράς υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει λίπανση στην περιοχή σύμπλεξης. Ο οδοντωτός τροχός PA12 / CF έδειξε την υψηλότερη ικανότητα φόρτισης, την εξαιρετικά αθόρυβη ιδιότητα και τη χαμηλότερη απορρόφηση νερού μεταξύ όλων των πολυαμιδίων που ερευνήθηκαν.

Διαπιστώθηκε ότι ο οδοντωτός τροχός PA12 / CF έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Δείχνει μια αρκετά καλή φέρουσα ικανότητα φορτίου υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει λίπανση στην περιοχή σύμπλεξης και γινόταν ακόμα καλύτερη με την αύξηση του μοριακού βάρους του PA12.
2. Η ιδιότητα φθοράς του είναι ανώτερη από άλλους σύνθετους οδοντωτούς τροχούς PA / CF. Η φθορά του σύνθετου οδοντωτού τροχού PA12 / CF ήταν μικρή, όταν η τάση κάμψης στον πόδα του οδοντωτού τροχού ήταν 40 MPa και υπήρχε λίπανση στην περιοχή σύμπλεξης.
3. Δείχνει μια εξαιρετικά αθόρυβη ιδιότητα. Ποτέ δεν παρατηρήθηκε θόρυβος κάτω από όλες τις συνθήκες δοκιμής που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν τη μελέτη.
4. Η χαμηλότερη απορρόφηση νερού του PA12 / CF μεταξύ άλλων PA / CFs θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη σταθερότητα διαστάσεων στις πρακτικές χρήσεις.



Σχήμα 51. Χαρακτηριστικά φέρουσας ικανότητας των τροχών από PA/CF σε σύγκριση με εκείνον από καθαρό (χωρίς ενίσχυση) POM [55]



Σχήμα 52. (α). Διάγραμμα βάθους φθοράς συναρτήσει των κύκλων περιστροφής. (β). Διάγραμμα απορρόφηση νερού συναρτήσει του χρόνου [55]

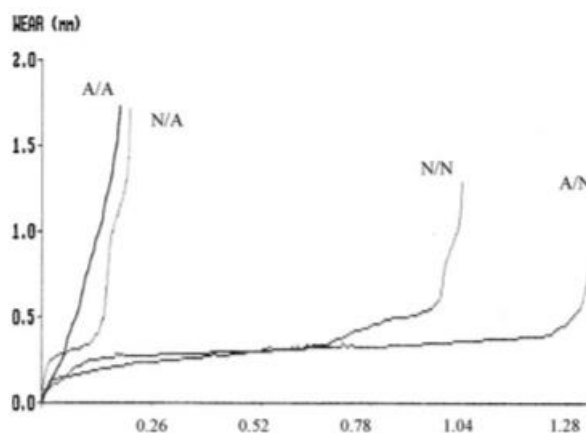
Η έρευνα [56] πραγματοποιήθηκε το 2011 από τους W. Li, A. Wood, R. Weidig και K. Mao και παρουσιάζει μια εκτενή διερεύνηση της ανόμοιας επαφής με τον πολυμερικό οδοντωτό τροχό, της τριβής και της συμπεριφοράς φθοράς. Επίσης παρουσιάζει σύντομα τη μοναδική πειραματική διάταξη των οδοντωτών τροχών που χρησιμοποιείται. Η πιο ενδιαφέρουσα παρατήρηση από την πειραματική έρευνα είναι η σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά φθοράς όταν συνεργάζεται ένας οδοντωτός τροχός ακετάλης με έναν οδοντωτό τροχό νάιλον, ειδικά ο χαμηλός ρυθμός φθοράς όταν ο οδοντωτός τροχός ακετάλης είναι ο κινητήριος. Για να κατανοήσουμε την ενδιαφέρουσα συμπεριφορά, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής έρευνα μοντελοποίησης για τη διερεύνηση των μηχανισμών σύμπλεξης ανόμοιων οδοντωτών τροχών καθώς και ποιος είναι ο κινητήριος. Η προηγμένη μη γραμμική μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της επαφής των οδόντων των οδοντωτών τροχών. Βρέθηκε ότι η δύναμη επαφής μεταξύ των οδόντων είναι μεγαλύτερη στην αρχή της εμπλοκής των οδόντων παρά στο τέλος της. Περαιτέρω έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί στις επαφές των οδοντωτών τροχών PEEK υψηλής απόδοσης, δηλαδή με τα ακόλουθα ζεύγη οδοντωτών τροχών PEEK-γάλυβα, γάλυβα-PEEK και PEEK-PEEK. Για να βελτιωθεί η υψηλή τριβή και η φθορά της κεφαλής του

οδοντωτού τροχού, χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος τροποποίησης της μικρογεωμετρίας, το tip relief, και επιτεύχθηκε σημαντική μείωση της δύναμης από την επαφή τριβής.

Είναι πολύ ενδιαφέρον να βλέπουμε τη διαφορετική συμπεριφορά φθοράς και αστοχίας κατά την εκτέλεση ανόμοιων υλικών, ειδικά όταν η ακετάλη ως κινητήριο τροχός συνεργάζεται με έναν οδοντωτό τροχό από νάιλον (οδηγούμενος) δείχνει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τους άλλους συνδυασμούς. Ένας από τους πιθανούς μηχανισμούς σύμπλεξης ανόμοιων οδοντωτών τροχών είναι η υψηλή τριβή και η φθορά της κεφαλής του κινητήριου οδοντωτού τροχού. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δείχνει ότι η δύναμη επαφής είναι υψηλότερη στην αρχή της εμπλοκής των οδόντων (access) σε σύγκριση με εκείνη στο τέλος της εμπλοκής των οδόντων (recess). Αυτή η υψηλότερη δύναμη επαφής στην αρχή της συνεργασίας θα προκαλέσει γρήγορη φθορά της κεφαλής και του ποδός του κινητήριου οδοντωτού τροχού. Όταν ο οδηγούμενος οδοντωτός τροχός είναι από ακετάλη, η υψηλή φθορά των κεφαλών θα προκαλέσει την αύξηση της γωνίας πίεσης των οδόντων και η φθορά των κεφαλών του οδοντωτού τροχού θα επιταχυνθεί λόγω της υψηλής θερμικής φθοράς της ακετάλης σε σύγκριση με το νάιλον, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός ενός κινητήριου οδοντωτού τροχού από νάιλον και ενός κινούμενου από ακετάλη να δίνει τη χειρότερη απόδοση. Αντίθετα, όταν ο κινητήριο οδοντωτός τροχός είναι από ακετάλη και ο κινούμενος από νάιλον δίνει καλύτερη απόδοση λόγω του ότι ο ρυθμός φθοράς στον πόδα είναι πολύ χαμηλότερος από αυτόν στην κεφαλή. Ομοίως, έχουν γίνει προσομοιώσεις για τα ακόλουθα ζεύγη οδοντωτών τροχών PEEK-χάλυβα, χάλυβα-PEEK και PEEK-PEEK και ένας σωστός σχεδιασμός των οδοντωτών τροχών PEEK και του tip relief θα βελτιώσει σημαντικά τη φθορά της κεφαλής του οδοντωτού τροχού.



*Σχήμα 53. Πειραματική διάταξη δοκιμής πολυμερικών οδοντωτών τροχών [56]*



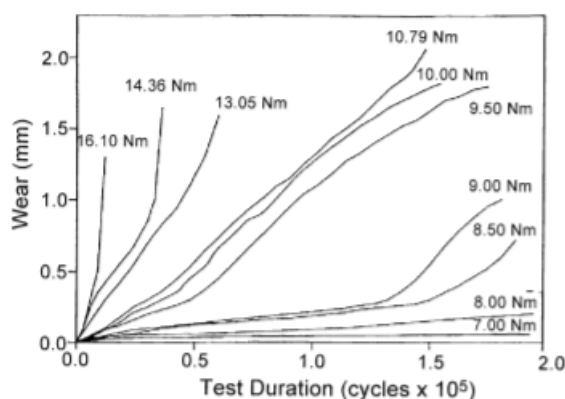
Σχήμα 54. Διάγραμμα φθοράς οδοντωτών τροχών από νάιλον συνεργαζόμενοι με οδοντωτούς τροχούς από ακετάλη συναρτήσει των κύκλων περιστροφής ( $\text{cycles} \times 10^6$ ) [56]

Η έρευνα [57] έγινε από τον Κ. Mao το 2007 και περιγράφει μια νέα μέθοδο σχεδιασμού για σύνθετους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού βασίζεται στη σχέση μεταξύ του ρυθμού φθοράς του πολυμερικού οδοντωτού τροχού και της θερμοκρασίας επιφάνειάς του. Βρέθηκε από τις δοκιμές ότι ο ρυθμός φθοράς του πολυμερικού (από ακετάλη) οδοντωτού τροχού θα αυξηθεί δραματικά όταν το φορτίο φτάσει μια κρίσιμη τιμή για μια συγκεκριμένη γεωμετρία. Η επιφάνεια του οδοντωτού τροχού θα φθαρεί αργά με χαμηλό ειδικό ρυθμό φθοράς εάν ο οδοντωτός τροχός έχει υποστεί φόρτιση χαμηλότερη από αυτή του κρίσιμου φορτίου. Ο πιθανός λόγος της ξαφνικής αύξησης του ρυθμού φθοράς οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του οδοντωτού τροχού φτάνει στο σημείο τήξης του υλικού υπό συνθήκες κρίσιμης φόρτισης. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοντωτού τροχού διερευνήθηκε λεπτομερώς μέσω τριών συστατικών: θερμοκρασίες ambient, bulk και flash. Μέσω εκτεταμένων πειραματικών ερευνών και μοντελοποίησης σχετικά με τις μεταβολές της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοντωτού τροχού, δημιουργήθηκε μια γενική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοντωτού τροχού και της φέρουσας ικανότητάς του. Η μέθοδος έχει συσχετιστεί με τα αποτελέσματα των δοκιμών σε διαφορετικές θερμοκρασίες (περιβάλλοντος) λειτουργίας και γεωμετρίες οδοντωτών τροχών. Επιτεύχθηκε καλή συμφωνία μεταξύ των προτεινόμενων μεθόδων πρόβλεψης και των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών. Πραγματοποιήθηκε επίσης πειραματική έρευνα σε σύνθετους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς από νάιλον ενισχυμένο με ίνες γυαλιού με PTFE ως εσωτερικό λιπαντικό και βρέθηκαν δύο μορφές αστοχίας, θραύση στον πόδα και στον κύκλο κύλισης.

Οι σύνθετοι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί μπορεί να αποτύχουν με δύο τρόπους: ο ένας είναι από κόπωση και ο άλλος λόγω φθοράς. Η κόπωση μπορεί να μετρηθεί άμεσα με δοκιμές διάρκειας ζωής, αλλά η φθορά πρέπει να καταγράφεται συνεχώς. Μια μοναδική πειραματική διάταξη, που επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της φθοράς, σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε επιτυχώς για την αξιολόγηση της απόδοσης των σύνθετων πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Η απόδοση των ακεταλικών οδοντωτών



τροχών βρέθηκε να εξαρτάται πλήρως από τα φορτία. Μια ξαφνική μετάβαση σε υψηλούς ρυθμούς φθοράς σημειώθηκε καθώς η μεταδιδόμενη ροπή αυξήθηκε σε κρίσιμη τιμή. Αυτό συνδέεται με τη θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού του οδοντωτού τροχού που φτάνει στο σημείο τήξης του. Ο οδοντωτός τροχός ακετάλης έχει σχεδιαστεί με βάση τις προβλέψεις θερμοκρασίας επιφανείας υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Δηλαδή για μια δεδομένη γεωμετρία οδοντωτού τροχού ακετάλης, μια κρίσιμη ροπή μπορεί να προκύψει από τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Αυτή η κρίσιμη ροπή είναι η φέρουσα ικανότητα για φθορά του οδοντωτού τροχού από ακετάλη, η επιφάνεια του οδοντωτού τροχού θα φθαρεί με επιταχυνόμενη ταχύτητα εάν φορτιστεί πάνω από αυτήν. Ωστόσο, η επιφάνεια του οδοντωτού τροχού θα φθαρεί αργά με συγκεκριμένο ρυθμό φθοράς όταν φορτίζεται κάτω από την κρίσιμη τιμή. Η μέθοδος σχεδιασμού για οδοντωτούς τροχούς ακετάλης έχει εφαρμοστεί σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας με διαφορετική γεωμετρία και έχει επιτευχθεί καλή συμφωνία μεταξύ της πρόβλεψης και των δοκιμών.

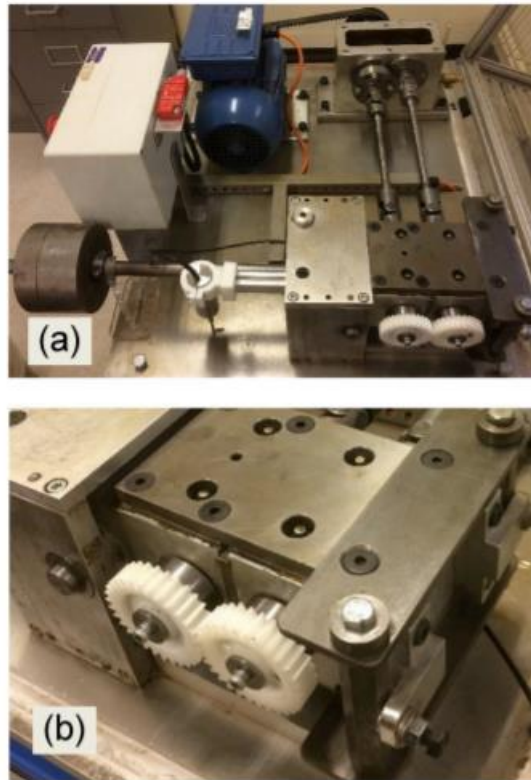


Σχήμα 55. Διάγραμμα φθοράς συναρτήσει των κύκλων περιστροφής για τους οδοντωτούς τροχούς από ακετάλη [57]

Η έρευνα [58] έγινε το 2019 από τους K. Mao, D.G. Chetwynd και M. Millson και παρέχει λεπτομέρειες σχετικά με ένα νέο σχεδιασμό πειραματικής διάταξης και μεθοδολογίας που προορίζονται και εφαρμόζονται επιτυχώς στη μέτρηση του ρυθμού φθοράς του οδοντωτού τροχού και της απόδοσης των πολυμερικών σύνθετων οδοντωτών τροχών σε ξηρές και λιπαινόμενες συνθήκες. Μία από τις μοναδικές συνεισφορές της είναι ότι μετρά συνεχώς το ρυθμό φθοράς του οδοντωτού τροχού, ένα χαρακτηριστικό απαραίτητο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των πολυμερικών οδοντωτών τροχών, ενώ μοιράζεται και κάποιες έννοιες με την παραδοσιακή διαμόρφωση δοκιμών back-to-back που χρησιμοποιείται για χαλύβδινους οδοντωτούς τροχούς. Η νέα μέθοδος εισάγει μια περιστροφική ελευθερία στο μπλοκ που εδράζονται οι υπό δοκιμή πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί. Αυτό το μπλοκ περιστρέφεται εάν μειωθεί το πάχος των οδόντων των οδοντωτών τροχών, κάτι που βοηθά στον έλεγχο του φορτίου δοκιμής. Ο ρυθμός φθοράς της επιφάνειας του οδοντωτού τροχού καταγράφεται συνεχώς χρησιμοποιώντας έναν μορφοτροπέα χωρητικότητας για τη μέτρηση της μετακίνησης του μπλοκ. Μια δεύτερη μοναδική συμβολή της νέας μεθόδου δοκιμής περιλαμβάνει τη διαχώριση του μπλοκ έτσι ώστε να μπορούν να εισαχθούν ελεγχόμενες συμπλέξεις οδοντωτών τροχών και να

μελετηθούν επακόλουθες αλλαγές στη συμπεριφορά φθοράς. Η μελέτη αυτή περιγράφει πρώτα τις έννοιες και το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης πριν συζητήσει με περισσότερες λεπτομέρειες τις αρχές μέτρησης του ρυθμού φθοράς του οδοντωτού τροχού, τις μεθόδους προσαρμογής της αξονικής απόστασης και την επίτευξη σχεδόν σταθερής φόρτισης των οδοντωτών τροχών. Τέλος, τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται συνοπτικά για την περαιτέρω επικύρωση της νέας μεθόδου δοκιμής και την απεικόνιση πιθανών εφαρμογών.

Πιο συγκεκριμένα, έχει αναπτυχθεί μια νέα πειραματική διάταξη και σχετική μεθοδολογία, και έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματική, για συνεχείς μετρήσεις φθοράς σύνθετων οδοντωτών τροχών και διάρκειας ζωής. Βασίζεται σε διαμόρφωση δοκιμής back-to-back, αλλά σε αντίθεση με την κλασική έκδοση που χρησιμοποιείται για χαλύβδινους οδοντωτούς τροχούς, το μπλοκ που εδράζει τους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς δοκιμής περιστρέφεται στη βάση του οργάνου. Αυτό το μπλοκ θα περιστραφεί ελαφρά καθώς μειώνεται το πάχος των οδόντων των οδοντωτών τροχών. Σε συνδυασμό με ένα βραχίονα και ρυθμιζόμενο βάρος για να παρέχει το δοκιμαστικό φορτίο, αυτή η τροποποίηση διατηρεί μια σχεδόν σταθερή ροπή στους οδοντωτούς τροχούς δοκιμής ανεξάρτητα από τη φθορά των οδόντων. Ακόμη πιο σημαντικό δεδομένης της θερμικής συμπεριφοράς των πολυμερικών οδοντωτών τροχών, είναι η φθορά της επιφάνειας του οδοντωτού τροχού που μπορεί να καταγράφεται συνεχώς χρησιμοποιώντας έναν χωρητικό ή επαγωγικό αισθητήρα για την παρακολούθηση της κίνησης του μπλοκ. Αν και αυτή η προσέγγιση μετρά τις παραμορφώσεις των οδόντων του οδοντωτού τροχού (κάμψη υστέρησης) παράλληλα με τη φθορά της επιφάνειας των οδόντων, ο ρυθμός φθοράς της επιφάνειας των οδόντων των οδοντωτών τροχών μπορεί να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια. Μια άλλη καινοτομία στη νέα διάταξη αφορά τη χρήση ενός διαχωριζόμενου μπλοκ έδρασης για την παροχή ελεγχόμενων ρυθμίσεων των σχετικών θέσεων των δύο οδοντωτών τροχών δοκιμής και έτσι επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης πρακτικών επιπέδων κακής ευθυγράμμισης σε ζεύγη πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Οι βασικές έννοιες και οι λεπτομέρειες του σχεδιασμού για αυτήν τη μοναδική μέθοδο δοκιμής έχουν περιγραφεί και αιτιολογηθεί. Ένα επεξηγηματικό φάσμα τυπικών δοκιμών σε επιδόσεις πολυμερικών οδοντωτών τροχών αποδεικνύει τις δυνατότητές του. Αυτά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πολυμερών (PC, HDPE, PA, POM, PEEK, GFR POM και PA) σε ξηρή και λιπαινόμενη λειτουργία σε φορτία έως 16 N m και ταχύτητες 500 rpm – 4275 rpm, παρόμοιες και ανόμοιες εμπλοκές, και μέτρηση θερμοκρασίας στο σώμα του τροχού χωρίς επαφή. Υποστηρίζουμε την ευρύτερη υιοθέτηση και πιθανή βελτίωση αυτής της νέας μεθόδου.

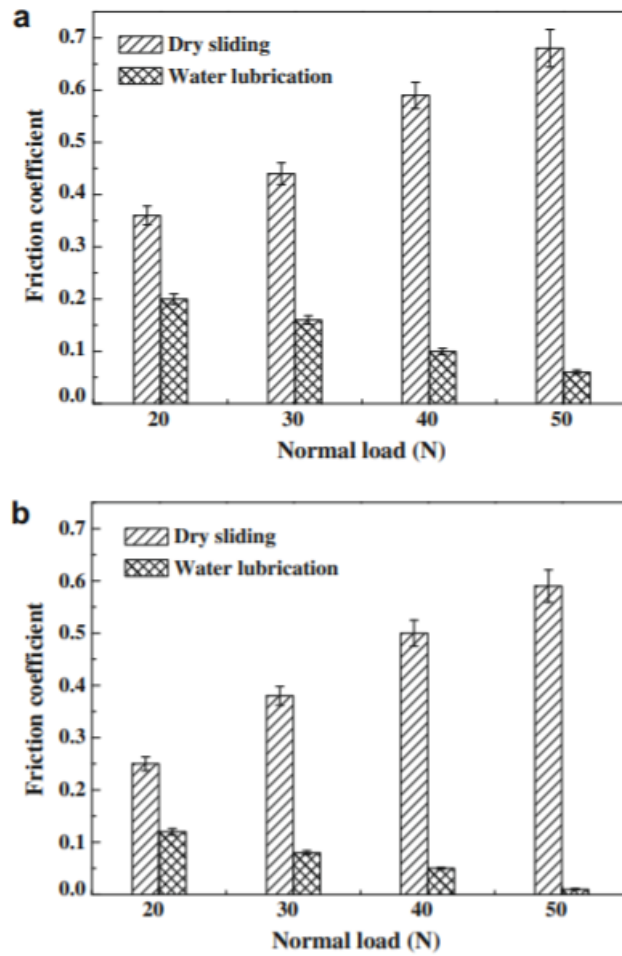


Σχήμα 56. Η πρωτότυπη πειραματική διάταξη [58]

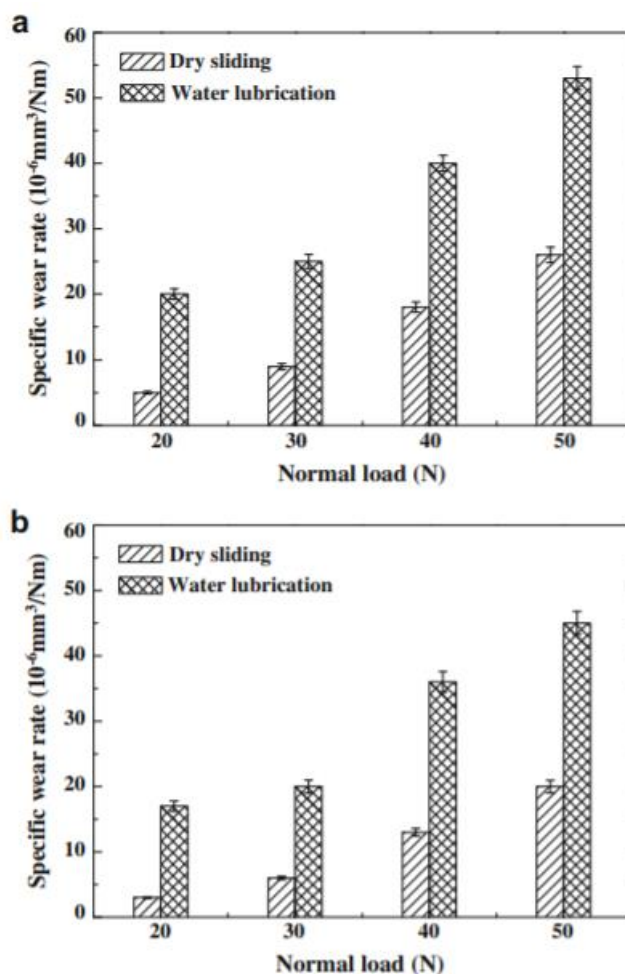
Η έρευνα [59] έγινε το 2009 από τους H. Meng, G.X. Sui, G.Y. Xie και R. Yang και περιγράφει τη συμπεριφορά τριβής και φθοράς των σύνθετων πολυαμιδίων 6 ενισχυμένων με νανοσωλήνα άνθρακα (PA6 / CNT) υπό ξηρή και λιπαινόμενη με νερό ολίσθηση, η οποία διερευνήθηκε συγκριτικά χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή φθοράς *rip-on-disc* σε διαφορετικά ονομαστικά φορτία. Οι μορφολογίες των φθαρμένων επιφανειών των σύνθετων υλικών παρατηρήθηκαν επίσης με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα CNTs θα μπορούσαν να βελτιώσουν την αντοχή στη φθορά και να μειώσουν σημαντικά τον συντελεστή τριβής του PA6 και στις δύο συνθήκες ολίσθησης, λόγω των αποτελεσματικών ενισχυτικών και αυτολιπαινόμενων επιδράσεων των CNTs στη μήτρα PA6. Τα σύνθετα εμφάνισαν χαμηλότερο συντελεστή τριβής και υψηλότερο ρυθμό φθοράς υπό συνθήκες λίπανσης με νερό από ό, τι υπό ξηρή ολίσθηση. Αν και το φαινόμενο ψύξης και οριακής λίπανσης του νερού συνέβαλε στη μείωση του συντελεστή τριβής των συνθέτων, το απορροφημένο νερό μείωσε την αντοχή των συνθέτων και ανέστειλε επίσης το σχηματισμό στρωμάτων μεταφοράς στις επιφάνειες επαφής με αποτέλεσμα μικρότερη αντίσταση στη φθορά. Με τα αυξανόμενα φορτία, ο συντελεστής τριβής των σύνθετων υλικών αυξήθηκε υπό ξηρή ολίσθηση και μειώθηκε υπό κατάσταση λίπανσης με νερό, λόγω ασυνεπών επιδράσεων της αντοχής διάτμησης και των πραγματικών περιοχών επαφής. Ο ειδικός ρυθμός φθοράς των σύνθετων υλικών αυξήθηκε και στις δύο συνθήκες ολίσθησης.

Έτσι, σε αυτή τη μελέτη, η συμπεριφορά τριβής και φθοράς των σύνθετων PA6 / CNT υπό ξηρή και λιπαινόμενη με νερό ολίσθηση διερευνήθηκε συγκριτικά. Από τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Τα CNTs ήταν μια αποτελεσματική ενίσχυση για το PA6, επομένως τα αντίστοιχα σύνθετα PA6 παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό, συντελεστή Young, κρυσταλλικότητα, μικρο-σκληρότητα και αντίσταση απορρόφησης νερού από εκείνα του PA6.
2. Ο συντελεστής τριβής και ο ειδικός ρυθμός φθοράς του PA6 μειώθηκαν με την προσθήκη CNTs σε ξηρή ολίσθηση και λίπανση με νερό όταν τα φορτία κυμαινόταν από 20 N έως 50 N, το οποίο αποδόθηκε στην επίδραση της ενίσχυσης, στην αυτο-λίπανση και στην εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα των CNTs στο PA6.
3. Το νερό δεν ήταν μόνο ένα είδος πολικού λιπαντικού για το PA6 για τη μείωση της επιφάνειας επαφής των σύνθετων πέρων από ανοξείδωτο χάλυβα, αλλά και ένα ψυκτικό υγρό για την απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται από την τριβή κατά τη διάρκεια της ολίσθησης. Έτσι, η τριβή του PA6 και των σύνθετων υλικών του ήταν χαμηλότερη στο νερό από αυτήν στην ξηρή ολίσθηση. Από την άλλη πλευρά, το νερό διαχέεται στις άμορφες περιοχές του PA6 και των σύνθετων υλικών του και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της σκληρότητας και της αντοχής, γεγονός που έκανε τα ινίδια PA6 να αποσπαστούν πιο εύκολα, προκαλώντας λιγότερη ανθεκτικότητα στη φθορά. Επιπλέον, η αναστολή του σχηματισμού στρωμάτων μεταφοράς του PA6 στις επιφάνειες επαφής και η αύξηση της φθοράς από χημική διάβρωση λόγω του προσροφημένου νερού οδήγησε σε υψηλότερο ρυθμό φθοράς στο νερό από ότι στην ξηρή ολίσθηση.
4. Με τα αυξανόμενα φορτία, οι συντελεστές τριβής του PA6 και των σύνθετων υλικών του αυξήθηκαν υπό ξηρή ολίσθηση και μειώθηκαν υπό συνθήκες λίπανσης με νερό. Επειδή υπό ξηρή ολίσθηση, η αύξηση της πραγματικής περιοχής επαφής ήταν κυρίαρχη, στο νερό η μείωση της διαμητρικής αντοχής ήταν κυρίαρχη. Ο ειδικός ρυθμός φθοράς των σύνθετων υλικών αυξήθηκε με τα αυξανόμενα φορτία και στις δύο συνθήκες ολίσθησης.



Σχήμα 57. Διαγράμματα επίδρασης του φορτίου στον συντελεστή τριβής (a) του PA6 και (b) των σύνθετων υλικών του PA6, σε ξηρή ολίσθηση και σε κατάσταση λίπανσης με νερό [59]



Σχήμα 58. Διαγράμματα επίδρασης του φορτίου στον ειδικό ρυθμό φθοράς (a) του PA6 και (b) των σύνθετων υλικών του PA6, σε ξηρή ολίσθηση και σε κατάσταση λίπανσης με νερό [59]

Η έρευνα [60] πραγματοποιήθηκε το 2011 από τους DIMITAR PETROV, KARL DEARN, DOUG WALTON και RICHARD BANCS και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι από διαφορετικά πολυμερικά υλικά (γενικής χρήσης πολυαμίδιο - PA 66, μη ενισχυμένη πολυ-αιθέρας-αιθέρας-κετόνη - PEEK 450G, 30% ενισχυμένη με ανθρακονήματα πολυ-αιθέρας-αιθέρας-κετόνη - PEEK 450CA30) και επικαλυμμένοι στις κατατομές τους με λεπτό στρώμα διαφορετικών στερεών λιπαντικών (MoS<sub>2</sub>, γραφίτης (C), BN και PTFE) ελέγχονται σε σχέση με τη θερμοκρασία φθοράς και τη θερμοκρασία σύμπλεξης σε συνθήκες παρατεταμένης ξηρής λειτουργίας. Δίδονται ορισμένα συμπεράσματα: η σειρά της φθοράς αυξάνεται ανάλογα με τον τύπο της επικάλυψης: PTFE (λιγότερη φθορά), χωρίς επίστρωση, γραφίτης, MoS<sub>2</sub>, BN με αναλογικές συσχετίσεις μεταξύ θερμοκρασιών φθοράς και σύμπλεξης.

Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί κατασκευασμένοι από σχετικά φθηνό υλικό PA66 και επικαλυμμένοι με λεπτό στρώμα ξηρού λιπαντικού (ειδικά στρώμα από PTFE ή από γραφίτη) έδειξαν πολύ λιγότερη φθορά από αυτούς που δεν ήταν επικαλυμμένοι.

Ήταν άχρηστο όμως να επικαλυφθούν με λεπτό στρώμα ξηρών λιπαντικών οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί από PEEK 450G και ειδικά από PEEK 450CA30, λόγω της υψηλής αντοχής στη φθορά των δύο τελευταίων πολυμερών που η αντίσταση αντιστοιχεί στην εξαιρετικά υψηλή τιμή τους. Αρκετές φορές ακριβότερη από την τιμή του ανοξειδώτου χάλυβα και περισσότερο από δέκα φορές ακριβότερη από την τιμή του νάιλον PA66. Έτσι, υπάρχει ένας ισχυρός λόγος για την επικάλυψη πολυμερικών οδοντωτών τροχών PA66 με λεπτό στρώμα ξηρού λιπαντικού (ειδικά από PTFE και με λιγότερη επιτυχία από γραφίτη, MoS<sub>2</sub> ή BN) για τη μείωση της φθοράς. Αξίζει να επικαλύψετε ακόμη και πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς κατασκευασμένους από PEEK450G αλλά με λεπτό στρώμα μόνο από PTFE. Και στο τέλος δεν υπάρχει κανένας λόγος για την επικάλυψη πολυμερικών οδοντωτών τροχών από PEEK450CA30 με στρώμα από οποιοδήποτε υλικό για τη μείωση της φθοράς. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι οδοντωτοί τροχοί με επίστρωση PTFE έδειξαν τα καλύτερα αποτελέσματα, ακολουθούμενοι από επικαλυμμένους με γραφίτη οδοντωτούς τροχούς με επικάλυψη στις περισσότερες περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν επίσης ότι στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάστηκαν, οι επικαλύψεις από το MoS<sub>2</sub> και από το BN παρουσίασαν χειρότερα αποτελέσματα από ότι από το PTFE ή το γραφίτη. Σε γενικές γραμμές, τα καλύτερα αποτελέσματα (σε χρήσιμη περίπτωση οδοντωτών τροχών από PA66) επιτεύχθηκαν από τη συνεργασία των πολυμερικών οδοντωτών τροχών με παρόμοιες επικαλύψεις, αλλά επίσης υπήρχαν οφέλη από τη συνεργασία επικαλυμμένων πολυμερικών οδοντωτών τροχών με χαλύβδινους και από τη συνεργασία μη επικαλυμμένων πολυμερικών οδοντωτών τροχών με επικαλυμμένους πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς. Κατά κανόνα, η εγγεγραμμένη θερμοκρασία σύμπλεξης ήταν συνήθως ανάλογη της έντασης φθοράς, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μικρότερη είναι η φθορά. Όλες οι περιγραφόμενες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με μία ταχύτητα και ένα φορτίο. Πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες για την εξερεύνηση μιας σειράς φορτίων και ταχυτήτων, καθώς και για την εξέταση της επίδρασης διαφορετικών βασικών πολυμερών και της επίδρασης της τραχύτητας της επιφάνειας του χαλύβδινου οδοντωτού τροχού σε μακροπρόθεσμο έργο.

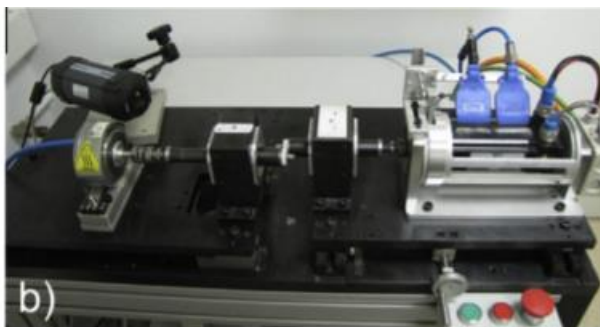
Η έρευνα [61] έγινε το 2015 από τους Aljaž Rogačnik και Jože Tavčar και παρουσιάζει μια νέα διαδικασία ταχείας δοκιμής για πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς που βασίζεται σε πολλά διαφορετικά επίπεδα δοκιμών. Η επαναληπτική διαδικασία δοκιμής ικανοποιεί αιτήματα από τη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων. Τα ακόλουθα κριτήρια λαμβάνονται υπόψη για δοκιμή: μειωμένος αριθμός δοκιμών, μικρότερος χρόνος δοκιμής και αξιόπιστα αποτελέσματα για διαφορετικές εφαρμογές. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε σε όλο το φάσμα σε ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών κατασκευασμένο από πολυακετάλη (POM) και πολυαμίδιο 6 (PA6). Για δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και φορτία ροπής, και συνεπώς διαφορετικές μεταφερόμενες δυνάμεις. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, παρακολούθηθηκε η θερμοκρασία των οδοντωτών τροχών και οι κύκλοι έως την αστοχία. Η έρευνα περιλαμβάνει επίσης μια σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και θεωρητικά υπολογισμένων θερμοκρασιών των οδοντωτών τροχών. Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής βάσει στατιστικών μεθόδων αποτελεί μέρος της προτεινόμενης



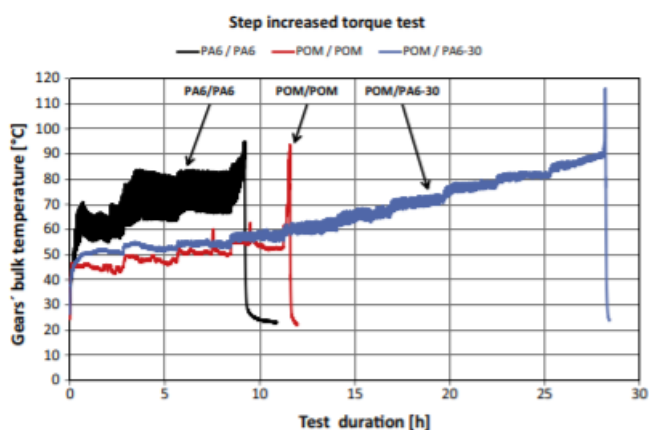
διαδικασίας δοκιμής. Η παρουσιαζόμενη διαδικασία επιτρέπει τη δοκιμή εντός αποδεκτών ορίων κατανάλωσης και χρόνου. Η μέθοδος δοκιμής μπορεί να αναπαραχθεί και να εφαρμοστεί σε πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς από διαφορετικά υλικά. Οι δοκιμές έδειξαν ότι οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί αστοχούν με δύο τυπικούς τρόπους: από κόπωση και από ξαφνική τήξη. Η αστοχία λόγω φθοράς μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο ζεύγος υλικών. Η κόπωση μπορεί να μετρηθεί με δοκιμές διάρκειας ζωής και είναι προβλέψιμη. Ωστόσο, η τήξη των οδοντωτών τροχών, η οποία είναι συνέπεια των υψηλών θερμοκρασιών των οδοντωτών τροχών, δεν είναι εύκολα προβλέψιμη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αστοχία λόγω τήξης συμβαίνει κατά τις πρώτες δοκιμές του οδοντωτού τροχού. Για αξιόπιστο και βέλτιστο σχεδιασμό οδοντωτών τροχών, δεν είναι δυνατή η αποφυγή των δοκιμών των οδοντωτών τροχών, επειδή η τριβολογική αλληλεπίδραση μεταξύ των οδοντωτών τροχών είναι συγκεκριμένη για κάθε συνδυασμό υλικών.

Το κύριο πλεονέκτημα της διαδικασίας των πολυεπίπεδων επιταχυνόμενων δοκιμών είναι ότι ακολουθεί τη διαδικασία ανάπτυξης των οδοντωτών τροχών. Κατά τη διάρκεια του πρώτου επιπέδου αυξημένου βηματικού φορτίου, τα αποτελέσματα έχουν περιορισμένη ακρίβεια, αλλά μπορούν να εκτελεστούν γρήγορα και να επιτρέψουν την έγκαιρη λήψη αποφάσεων για τις παραλλαγές του υλικού και του σχεδιασμού. Κατά τη λεπτομερή σχεδίαση, υπάρχει επιπλέον χρόνος για το δεύτερο επίπεδο και ακριβέστερες δοκιμές διάρκειας ζωής. Ο τελικός έλεγχος έγινε στους τροχούς όταν τοποθετήθηκαν στο τελικό συναρμολόγημα. Ο κύριος στόχος είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των οδοντωτών τροχών με χρήση μηχανουργικής κατεργασίας μόνο μια φορά. Το τεστ βηματικού φορτίου έχει αποδειχθεί ότι προσφέρει πολλές πληροφορίες. Λέει τα χαρακτηριστικά του ζεύγους υλικών, όπως τη θερμοκρασία που παράγεται σε διαφορετικά φορτία και επιτρέπει τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής. Οι πληροφορίες που αποκτήθηκαν από το τεστ βηματικού φορτίου για δοκιμασμένα υλικά είναι συγκρίσιμες με τις τριβολογικές δοκιμές. Οι συντελεστές τριβής των ζευγών υλικού επιτρέπουν ακριβέστερο προσδιορισμό των θερμοκρασιών των χύδην οδοντωτών τροχών και, στη συνέχεια, το αποδεκτό επίπεδο φορτίου. Καθορίζονται οι κατευθυντήριες γραμμές για τεστ βηματικού φορτίου των πλαστικών οδοντωτών τροχών. Μια νέα συμβολή της έρευνας αυτής είναι ο πραγματιστικός χειρισμός δεδομένων διάρκειας ζωής. Η διαδικασία που παρουσιάζεται δείχνει πώς να καθιερωθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης διάρκειας ζωής βασισμένο σε μια δοκιμή διάρκειας ζωής της μήτρας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν είναι το επίπεδο φορτίου και η ταχύτητα περιστροφής. Η παραγόμενη θερμοκρασία οδοντωτού τροχού ενσωματώνεται στο μοντέλο. Αυτό το άρθρο παρουσιάζει λεπτομερή αποτελέσματα της δοκιμής διάρκειας ζωής της μήτρας για το ζεύγος υλικών POM / PA6. Περιλαμβάνεται σύγκριση με κάποια άλλα τυπικά ζεύγη υλικών (PA6-30 / POM, PA6 / PA6, POM / POM και PA6- 30 / PA6-30). Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί συνήθως αποτυγχάνουν με δύο τρόπους: κόπωση ή ξαφνική τήξη. Η κόπωση μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας τις δοκιμές διάρκειας ζωής και είναι λίγο πολύ προβλέψιμη. Η τήξη των οδοντωτών τροχών είναι συνέπεια της υπερφόρτωσης και της αύξησης της θερμοκρασίας. Η φθορά αναγνωρίστηκε ως μηχανισμός αστοχίας μόνο για ορισμένα ζεύγη οδοντωτών τροχών (POM / POM, PA6-30 / POM). Αποφεύγοντας συνδυασμούς προβληματικών υλικών, ο τρόπος αστοχίας λόγω φθοράς μπορεί να εξαλειφθεί στις περισσότερες περιπτώσεις. Τα υπάρχοντα μοντέλα για υπολογισμούς θερμοκρασίας

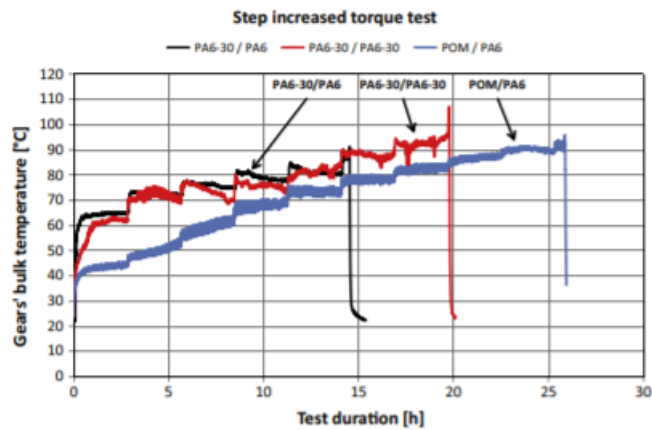
μπορούν να δώσουν μια πρόχειρη εκτίμηση, αλλά δεν παρέχουν αξιόπιστους υπολογισμούς. Το μοντέλο επιταχυνόμενης δοκιμής που παρουσιάζεται είναι μια αναβάθμιση σε υπάρχοντα μοντέλα χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέγονται με δοκιμές. Το αποτέλεσμα είναι η αυξημένη διάρκεια ζωής των οδοντωτών τροχών, η ακρίβεια και η αξιοπιστία του υπολογισμού της θερμοκρασίας. Η προτεινόμενη διαδικασία δοκιμών και υπολογισμών παρουσιάζεται χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα για μια μικρή συσκευή.



Σχήμα 59. Η πειραματική διάταξη της νέας διαδικασίας ταχείας δοκιμής πλαστικών οδοντωτών τροχών [61]



Σχήμα 60. Βηματικό τεστ για PA6 / PA6 POM / POM και POM / PA6-30 στις 1176 rpm. Το αρχικό φορτίο ήταν 0,30 Nm (17,0 MPa), το οποίο αυξήθηκε κατά 0,05 Nm (2,85 MPa) μετά από κάθε  $2 \cdot 10^5$  κύκλους φόρτισης [61]

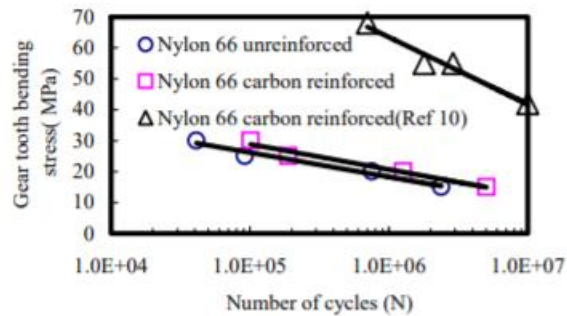


Σχήμα 61. Βηματικό τέστ για PA6-30 / PA6-30, POM / PA6 και PA6-30 / PA6 στις 1176 rpm. Το αρχικό φορτίο ήταν 0,30 N m (17,0 MPa), το οποίο αυξήθηκε κατά 0,05 N m (2,85 MPa) μετά από κάθε  $2 \cdot 10^5$  κύκλους φόρτισης [61]

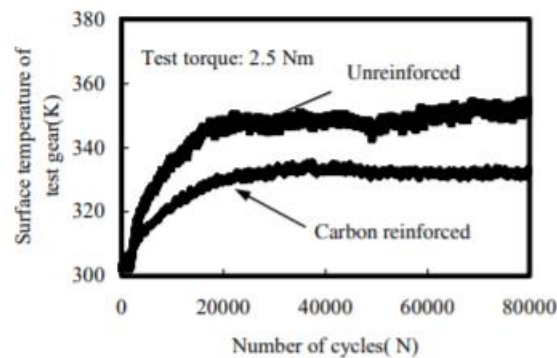
Η έρευνα [62] έγινε το 2004 από τους S. SENTHILVELAN και R. GNANAMOORTHY και περιγράφεται στη συνέχεια. Τα ενισχυμένα πολυμερή προσφέρουν ανώτερη αντοχή και συντελεστή που απαιτείται σε πολλές εφαρμογές. Οι ενισχυμένοι από θερμοπλαστικά πολυμερικά υλικά, οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται για κίνηση καθώς και σε εφαρμογές μετάδοσης ισχύος. Η απόδοση των ενισχυμένων οδοντωτών τροχών πρέπει να γίνει κατανοητή για τη διεύρυνση της εφαρμογής τους. Οι μη ενισχυμένοι και οι ενισχυμένοι με 20% κοντές ίνες άνθρακα κόκκοι νάιλον χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη οδοντωτών τροχών χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της χύτευσης με έγχυση. Οι δοκιμές των οδοντωτών τροχών διεξήχθησαν σε μια πειραματική διάταξη τύπου απορρόφησης ισχύος. Οι οδοντωτοί τροχοί δοκιμάστηκαν με σταθερή ταχύτητα περιστροφής 1000 σ.α.λ. και σε διαφορετικά επίπεδα ροπών έως 3 Nm. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν την ανώτερη αντοχή στην κόπωση των ενισχυμένων με άνθρακα Nylon οδοντωτών τροχών σε σύγκριση με τους μη ενισχυμένους Nylon οδοντωτούς τροχούς. Η βελτιωμένη θερμική αντίσταση, η υψηλή αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας συνέβαλαν στην καλύτερη απόδοση στην κόπωση των ενισχυμένων με άνθρακα νάιλον οδοντωτών τροχών. Παρατηρήθηκαν φθαρμένες και με αστοχία επιφάνειες χρησιμοποιώντας οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Παρατηρήθηκαν επίσης τρεις κύριοι τρόποι αστοχίας των οδοντωτών τροχών: από υπερβολική φθορά, σοβαρή παραμόρφωση και θραύση των οδόντων. Ο προσανατολισμός των ινών και η παρουσία σωματιδίων ινών μεταξύ των επιφανειών επαφής και της χαμηλής ποιότητας επιφανείας επηρεάζει την αντοχή στη φθορά των ενισχυμένων με άνθρακα Nylon οδοντωτών τροχών.

Το υψηλό μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή και η θερμική αγωγιμότητα του ενισχυμένου με άνθρακα νάιλον υλικού έχει ως αποτέλεσμα, την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του ενισχυμένου με άνθρακα οδοντωτού τροχού σε σύγκριση με τον μη ενισχυμένο. Ο προσανατολισμός των ινών στην επιφάνεια των οδόντων των οδοντωτών τροχών επηρεάζει τη φθορά των οδόντων. Η παράλληλη ευθυγράμμιση των ινών άνθρακα στην επιφάνεια επαφής δεν προσφέρει αντοχή στη φθορά των οδοντωτών τροχών. Τα

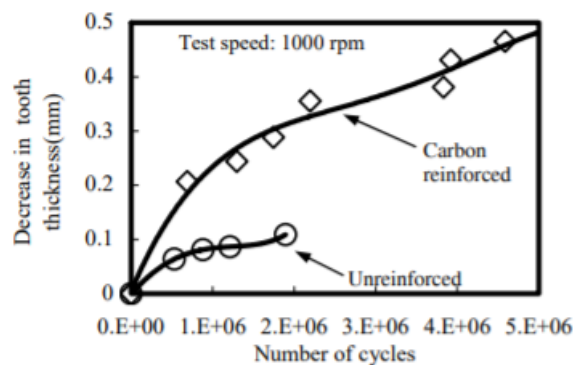
απομεινάρια φθοράς και το μετρούμενο πάχος των οδόντων των οδοντωτών τροχών υποδηλώνουν την κακή αντοχή στη φθορά των ενισχυμένων με ίνες άνθρακα Nylon οδοντωτών τροχών.



Σχήμα 62. Διάγραμμα καμπτικής τάσης των οδόντων των πολυμερικών οδοντωτών τροχών συναρτήσει του αριθμού των κύκλων ζωής τους [62]



Σχήμα 63. Διάγραμμα των θερμοκρασιών επιφανείας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών συναρτήσει του αριθμού των κύκλων ζωής τους σε υποβληθείσα ροπή 2.5 Nm [62]



Σχήμα 64. Διάγραμμα της μείωσης του πάχους των οδόντων των πολυμερικών οδοντωτών τροχών συναρτήσει του αριθμού των κύκλων ζωής τους υπό ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm [62]

Η έρευνα [63] πραγματοποιήθηκε το 2007 από τους S. Senthilvelan και R. Gnanamoorthy και αναλύεται στη συνέχεια. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιούνται για την κίνηση και τη μετάδοση ισχύος λειτουργούν υπό

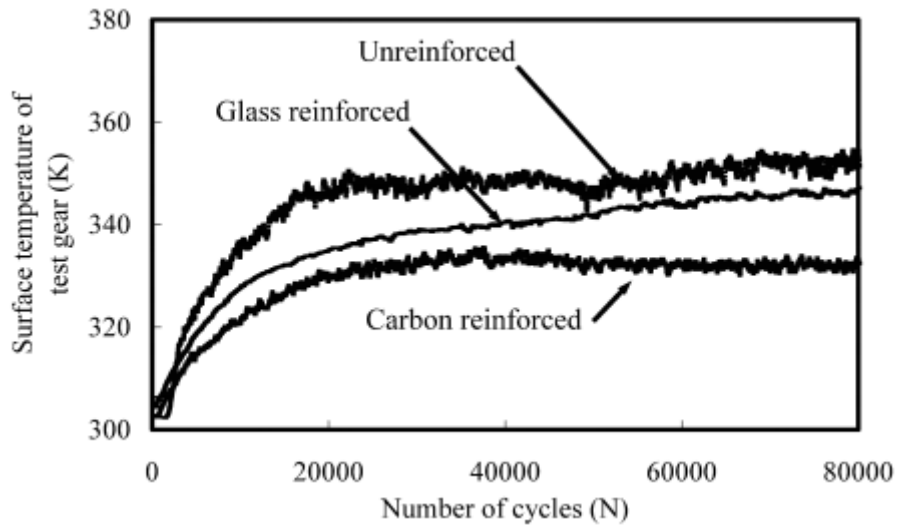
διαφορετικά φορτία και ταχύτητες. Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών επηρεάζονται σοβαρά από το ρυθμό φόρτισης σε σύγκριση με τα μέταλλα. Η ταχύτητα περιστροφής του οδοντωτού τροχού καθορίζει τη συχνότητα φόρτισης των οδόντων του πολυμερικού οδοντωτού τροχού, η οποία επηρεάζει τη θερμοκρασία που δημιουργείται και συνεπώς και την αντοχή του υλικού. Οι χυτευμένοι με έγχυση οδοντωτοί τροχοί από νάιλον 6 και οι οδοντωτοί τροχοί από Nylon 6 ενισχυμένο με 20% κοντές ίνες γυαλιού δοκιμάστηκαν σε διαφορετικές ταχύτητες και επίπεδα ροπών σε μια πειραματική διάταξη δοκιμής τύπου απορρόφησης ισχύος. Η ταχύτητα περιστροφής των οδοντωτών τροχών και από τα δυο υλικά επηρεάζει την απόδοσή τους μόνο σε υψηλές και όχι σε χαμηλές ταχύτητες λειτουργίας και επίπεδα ροπών. Έγινε μέτρηση της θερμοκρασίας επιφανείας και ανάλυση αστοχίας των υπό δοκιμή οδοντωτών τροχών για την κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας. Σε όλες τις ταχύτητες των οδοντωτών τροχών που διερευνήθηκαν, οι οδοντωτοί τροχοί από Nylon 6 ενισχυμένο με ίνες γυαλιού δείχνουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους οδοντωτούς τροχούς από το μη ενισχυμένο Nylon 6 λόγω καλύτερων μηχανικών αντοχών και αντοχών στη θερμική παραμόρφωση.

Η απόδοση των χυτευμένων με έγχυση οδοντωτών τροχών από Nylon 6 και των οδοντωτών τροχών από Nylon 6 ενισχυμένο με ίνες γυαλιού διερευνήθηκε σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής και επίπεδα εφαρμοζόμενης τάσης. Η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζει την απόδοση τόσο των οδοντωτών τροχών από Nylon 6 όσο και αυτών από Nylon 6 ενισχυμένο με ίνες γυαλιού σε υψηλά επίπεδα καταπονήσεων. Σε χαμηλά επίπεδα καταπονήσεων, η ρωγμή στον πόδα των οδόντων και η φθορά των οδοντωτών τροχών ήταν οι κυρίαρχοι τρόποι αστοχίας και δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση της ταχύτητας στη διάρκεια ζωής του οδοντωτού τροχού. Σε υψηλά επίπεδα καταπονήσεων, η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αποδυνάμωση του υλικού των οδοντωτών τροχών και μειώνει την απόδοση. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αυξάνει σημαντικά τη συχνότητα φόρτισης και αυξάνει τη θερμοκρασία επιφανείας των οδοντωτών τροχών, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της διάρκειας ζωής τους. Η εφαρμοζόμενη τάση επηρεάζει τον μηχανισμό αστοχίας των σύνθετων πολυμερικών οδοντωτών τροχών.

Η έρευνα [64] έγινε το 2004 από τους S. SENTHILVELAN και R. GNANAMOORTHY και αναλύεται στη συνέχεια. Η εφαρμογή θερμοπλαστικών υλικών ενισχυμένων με κοντές ίνες περιορίζεται σε χαμηλότερης λειτουργικής σημασίας εξαρτήματα λόγω ετερογενών χαρακτηριστικών του υλικού και ελλιπούς κατανόησης των εμπλεκόμενων μηχανισμών αστοχίας. Η ενίσχυση δεν επηρεάζει μόνο τις μηχανικές και τις ηλεκτρικές ιδιότητες αλλά και τους μηχανισμούς αστοχίας. Οι οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιούνται στη μετάδοση ισχύος / κίνησης ενδέχεται να αστοχίσουν με πολλούς τρόπους. Οι χυτευμένοι με έγχυση οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδόντωση από μη ενισχυμένο, ενισχυμένο με 20% ίνες γυαλιού και ενισχυμένο με 20% ίνες άνθρακα Nylon 66, δοκιμάστηκαν σε μια πειραματική διάταξη τύπου απορρόφησης ισχύος. Οι οδοντωτοί τροχοί που είχαν αστοχήσει παρατηρήθηκαν με οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης για να κατανοηθεί ο μηχανισμός φθοράς. Παρατηρήθηκαν διαφορετικοί τύποι αστοχιών, όπως φθορά των οδόντων, ρωγμές στην επιφάνεια των οδόντων, ρωγμές στον πόδα των οδόντων και σοβαρή

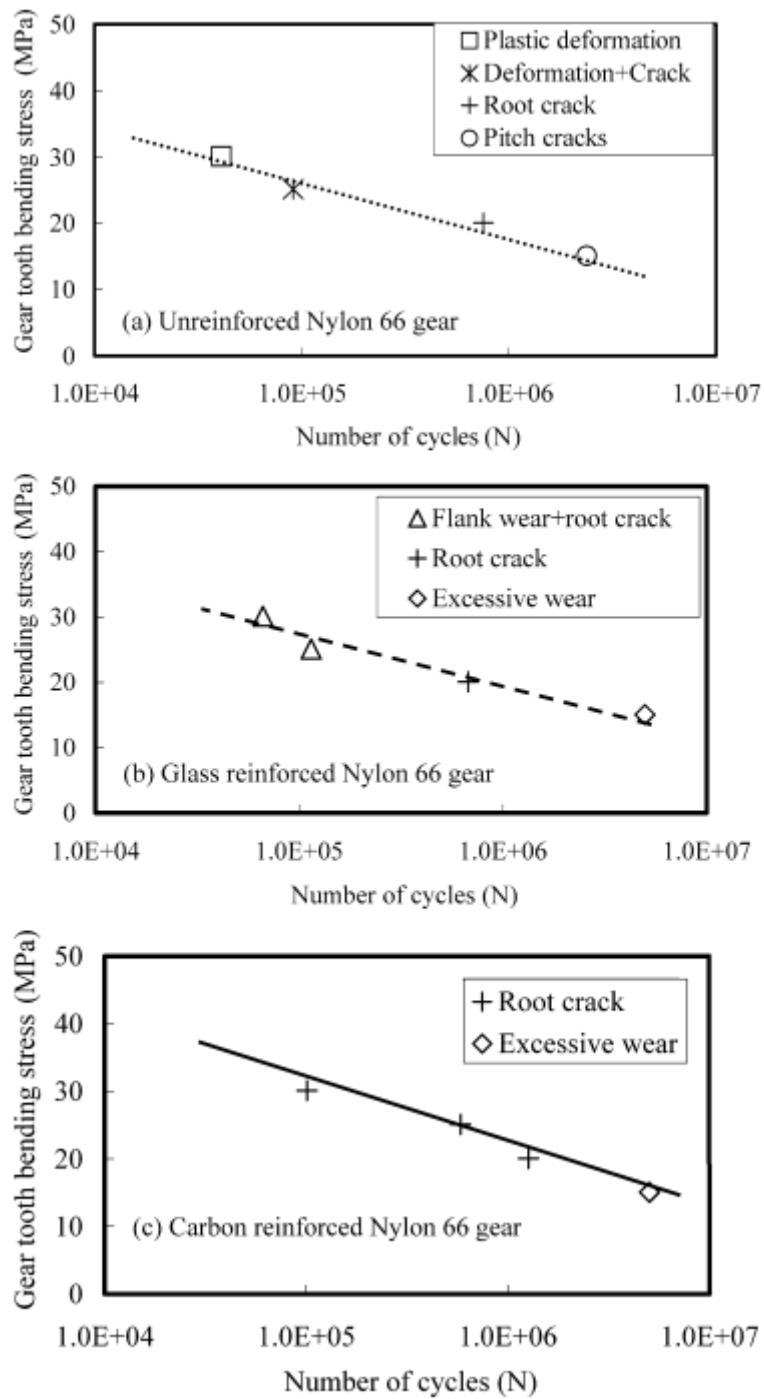
παραμόρφωση του σχήματος των οδόντων. Οι συνθέσεις των υλικών και η εφαρμοσμένη ροπή καθορίζουν τον τύπο του μηχανισμού αστοχίας. Η χαμηλή αντοχή μεταξύ ινών και μήτρας στους ενισχυμένους οδοντωτούς τροχούς προκαλεί αποκόλληση των ινών. Οι ενισχυμένοι οδοντωτοί τροχοί εμφάνισαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τον μη ενισχυμένο, λόγω μεγαλύτερης μηχανικής αντοχής και θερμικής αντίστασης.

Οι πολυμερικοί και οι σύνθετοι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί αστοχούν με διαφορετικούς τρόπους. Η αστοχία εξαρτάται από τη σύνθεση των υλικών και την εφαρμοσμένη ροπή. Η υπερβολική φθορά της επιφάνειας των οδόντων, η παραμόρφωση των οδόντων, η ρωγμή της επιφάνειας κοντά στην περιοχή του κύκλου κύλισης και η ρωγμή στην περιοχή του ποδός των οδόντων ήταν μερικές από τις σημαντικότερες αστοχίες που παρατηρήθηκαν. Οι επιφανειακές ρωγμές κυριάρχησαν στον μη ενισχυμένο οδοντωτό τροχό υπό χαμηλές τάσεις. Η αλλαγή της κατεύθυνσης ολίσθησης και η συσσώρευση θερμότητας στην επιφάνεια των οδόντων οδηγεί στο σχηματισμό πολλαπλών επιφανειακών ρωγμών στην κατατομή του οδόντος. Οι μη ενισχυμένοι οδοντωτοί τροχοί εμφάνισαν σοβαρή παραμόρφωση στους οδόντας σε υψηλότερα επίπεδα τάσεων που ερευνήθηκαν. Στρώματα λειωμένου υλικού σε επιφάνεια που είχε υποστεί θραύση παρατηρήθηκαν στο μη ενισχυμένο υλικό λόγω της χαμηλής θερμικής αντοχής του. Η προσθήκη ανθρακονήματος στη μήτρα νάιλον βελτίωσε τη θερμική αντοχή του σύνθετου υλικού. Δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη παραμόρφωση του σχήματος του οδόντος, ούτε σχηματισμός στρώματος λειωμένου υλικού στις επιφάνειες που είχαν υποστεί θραύση, στον οδοντωτό τροχό από ενισχυμένο με ίνες άνθρακα νάιλον στις εξεταζόμενες συνθήκες δοκιμής. Ο ενισχυμένος με ίνες γυαλιού οδοντωτός τροχός εμφάνισε φθορά στην κατατομή του οδόντος κάτω από υψηλότερες καταπονήσεις. Η σχετικά χαμηλή θερμική αντίσταση του ενισχυμένου με ίνες γυαλιού υλικού σε σύγκριση με το ενισχυμένο με ίνες άνθρακα υλικό προκάλεσε θερμικό softening των οδόντων του πρώτου οδοντωτού τροχού. Η μέθοδος κατασκευής και η γεωμετρία των οδόντων των οδοντωτών τροχών επηρεάζουν τον προσανατολισμό των ινών. Ο προσανατολισμός των ινών παράλληλα προς την ολισθαίνουσα κατεύθυνση προσφέρει χαμηλή αντίσταση στη φθορά. Τόσο οι οδοντωτοί τροχοί από ενισχυμένο με ίνες γυαλιού νάιλον 66 όσο και από ενισχυμένο με ίνες άνθρακα νάιλον 66 εμφάνισαν χαμηλή αντοχή στη φθορά σε σύγκριση με τον μη ενισχυμένο οδοντωτό τροχό υπό τις συνθήκες της έρευνας.



Σχήμα 65. Διάγραμμα των μετρήσεων των θερμοκρασιών επιφανείας των υπό δοκιμή οδοντωτών τροχών υπό καμπτική τάση 25 MPa συναρτήσει του αριθμού των κύκλων περιστροφής τους [64]



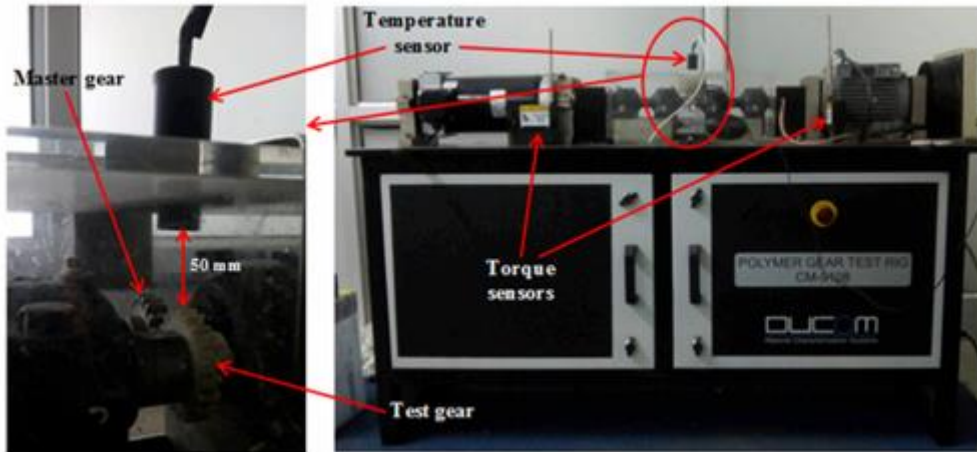


Σχήμα 66. Διαγράμματα των αστοχιών των υπό δοκιμή οδοντωτών τροχών από: (a) μη ενισχυμένο Nylon 66, (b) ενισχυμένο με γυαλί νάιλον 66 και (c) ενισχυμένο με άνθρακα νάιλον 66 συναρτήσει του αριθμού των κύκλων περιστροφής τους [64]

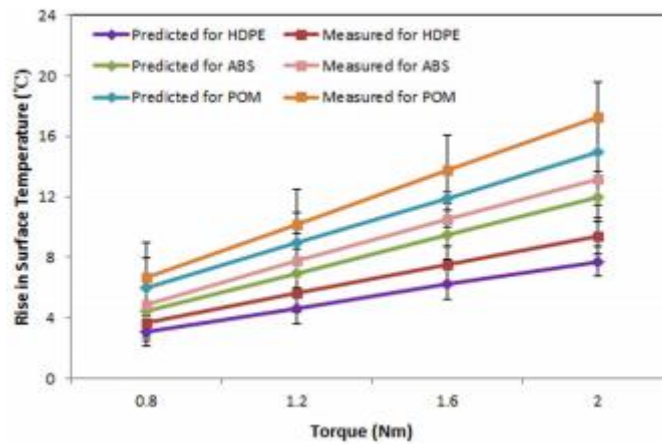
Η έρευνα [65] πραγματοποιήθηκε το 2018 από τους Prashant Kumar Singh, Siddhartha και Akant Kumar Singh και διερευνά τις δυνατότητες τριών διαφορετικών θερμοπλαστικών υλικών, τα οποία είναι το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) και το πολυοξυμεθυλένιο (POM) για χρήση σε εφαρμογές πλαστικών οδοντωτών τροχών. Οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονται με τη διαδικασία της χύτευσης με έγχυση. Η θερμική συμπεριφορά και η συμπεριφορά φθοράς αυτών των οδοντωτών τροχών εξετάζονται σε διαφορετικά επίπεδα ροπών 0.8, 1.2, 1.6 και 2.0 Nm μαζί με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής 600, 800, 1000 και 1200 σ.α.λ.. Επίσης, η ανάλυση μόνιμης κατάστασης των οδοντωτών τροχών πραγματοποιείται με ροπή 1,4 Nm και ταχύτητα περιστροφής 900 rpm για τη μέτρηση χαρακτηριστικών όπως η ανθεκτικότητα και οι μηχανισμοί αστοχίας που εμφανίζονται σε αυτούς τους οδοντωτούς τροχούς. Ο οδοντωτός τροχός από ABS αστοχεί λόγω υπερβολικής φθοράς των οδόντων του, ενώ ο οδοντωτός τροχός από HDPE λόγω ρωγμής στον πόδα των οδόντων του. Οι οδοντωτοί τροχοί από ABS και HDPE ολοκληρώνουν 0,5 και 1,1 εκατομμύρια κύκλους αντίστοιχα, πριν να αστοχήσουν, ενώ ο οδοντωτός τροχός από POM ολοκληρώνει 2 εκατομμύρια κύκλους χωρίς κανένα σημάδι φθοράς.

Το δυναμικό των τριών πολυμερικών υλικών (ABS, HDPE και POM) διερευνήθηκε με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πλαστικών οδοντωτών τροχών. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν σε αυτήν την έρευνα συνάγονται ως εξής:

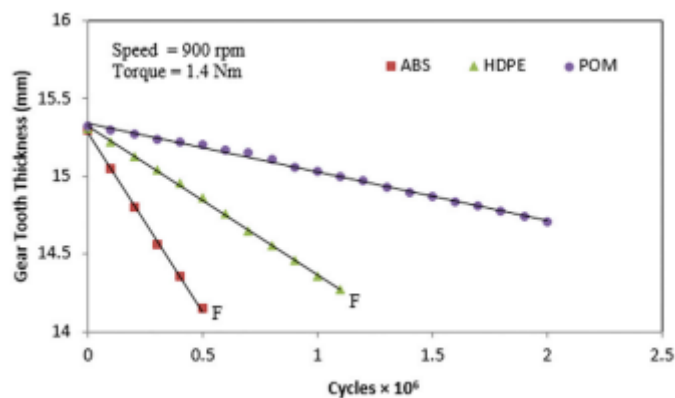
1. Η θερμική συμπεριφορά και η συμπεριφορά φθοράς και των τριών πολυμερικών οδοντωτών τροχών (ABS, HDPE και POM) διερευνήθηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες ταχύτητας και ροπής. Βρέθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας είναι μέγιστη για POM και ελάχιστη για HDPE σε όλα τα επίπεδα ροπών. Επίσης, ο ειδικός ρυθμός φθοράς είναι μέγιστος για ABS και ελάχιστος για POM.
2. Η συμβολή της ροπής στην αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών είναι 7-8 φορές πιο σημαντική σε σύγκριση με εκείνη της ταχύτητας περιστροφής.
3. Ο ειδικός ρυθμός φθοράς των πολυμερικών οδοντωτών τροχών αυξάνεται με τη ροπή αλλά μειώνεται με την ταχύτητα περιστροφής. Μια υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής αυξάνει τον ρυθμό παραμόρφωσης που βελτιώνει την αντοχή στη φθορά του υλικού του οδοντωτού τροχού. Αυτό οδηγεί σε μειωμένο ρυθμό φθοράς των οδόντων των οδοντωτών τροχών σε υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής.
4. Οι μετρούμενες πειραματικές τιμές της αύξησης της θερμοκρασίας επιφάνειας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών συγκρίνονται με τις προβλεπόμενες τιμές που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο Mao. Διαπιστώνεται ότι ο οδοντωτός τροχός από ABS έχει την μικρότερη απόκλιση (μέγιστη απόκλιση 8%) με το μοντέλο Mao ακολουθούμενο από τον οδοντωτό τροχό από HDPE και POM με τη μέγιστη απόκλιση 10% και 11% αντίστοιχα.



Σχήμα 67. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα έρευνα [65]



Σχήμα 68. Διάγραμμα αύξησης της θερμοκρασίας της επιφάνειας των οδόντων των τριών πολυμερικών οδοντωτών τροχών: Προβλεπόμενες και μετρούμενες τιμές συναρτήσει της ροπής [65]



Σχήμα 69. Διάγραμμα μείωσης του πάχους των οδόντων των τριών πολυμερικών οδοντωτών τροχών συναρτήσει των αυξανόμενων κύκλων φόρτισης [65]

Η έρευνα [66] έγινε το 2020 από τους Mariusz Sobolak, Piotr Połowniak, Mariusz Cieplak, Mariusz Oleksy και Katarzyna Bulanda και αναφέρεται στην αύξηση του πεδίου εφαρμογής των πρόσθετων τεχνολογιών στην κατασκευή μηχανημάτων για την παραγωγή οδοντωτών τροχών με προφίλ εξειλιγμένης και ημιτονοειδές προφίλ από πολυμερικά υλικά. Σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη με τη χρήση της οποίας διεξήχθη μια σειρά προκαταρκτικών δοκιμών κόπωσης των πολυμερικών οδοντωτών τροχών που κατασκευάστηκαν με ημιτονοειδές προφίλ και προφίλ εξειλιγμένης. Οι οδοντωτοί τροχοί που δοκιμάστηκαν κατασκευάστηκαν με την τεχνολογία της ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων με τη μέθοδο FFF (Fused Filament Fabrication) (κατασκευή συντηγμένων ινών) από σύνθετα πολυμερή που παρήχθησαν με τη μορφή νήματος με βάση το ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο). Με βάση τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία στην περιοχή σύμπλεξης των οδοντωτών τροχών εξειλιγμένης είναι υψηλότερη από ό, τι για τους ημιτονοειδείς οδοντωτούς τροχούς, ανεξάρτητα από τον τύπο του σύνθετου υλικού από το οποίο κατασκευάστηκαν οι οδοντωτοί τροχοί. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στο εύρος του ονομαστικού φορτίου, το επίπεδο έντασης του ήχου στην περιοχή σύμπλεξης είναι επίσης χαμηλότερο για οδοντωτούς τροχούς με ημιτονοειδές προφίλ από ό, τι για οδοντωτούς τροχούς με εξειλιγμένη. Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε αύξηση της έντασης του ήχου στην περίπτωση των οδοντωτών τροχών που κατασκευάστηκαν από επιλεγμένα σύνθετα υλικά, σε σύγκριση με τον οδοντωτό τροχό που κατασκευάστηκε από μη ενισχυμένο ABS. Ωστόσο, στην περίπτωση των οδοντωτών τροχών που κατασκευάστηκαν από δοκιμασμένα σύνθετα υλικά, παρατηρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Τα πιο ευνοϊκά αποτελέσματα αυτών των δοκιμών ελήφθησαν για τον οδοντωτό τροχό με ημιτονοειδές προφίλ από σύνθετο ABS + P2, ο οποίος δείχνει να έχει τη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ελαφρώς χειρότερα αποτελέσματα λήφθηκαν για ενδιάμεσες ταχύτητες.

Με βάση τη βιβλιογραφία και τα διεξαγόμενα ερευνητικά αποτελέσματα, μπορεί να δηλωθεί ότι λόγω της ανάπτυξης κατάλληλης μεθοδολογίας για το σχεδιασμό και την κατασκευή στοιχείων μηχανών που κατασκευάζονται πρόσθετα από πολυμερικά υλικά, επιτρέπει την αύξηση του πεδίου εφαρμογών των πολυμερικών οδοντωτών τροχών τόσο για προφίλ εξειλιγμένης όσο και για ημιτονοειδές προφίλ. Η υλοποίηση μεταγενέστερης έρευνας χρησιμοποιώντας την ανεπτυγμένη μεθοδολογία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων θα αποτελέσει το αρχικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων με τις ιδιότητες του υλικού και τις δομές του ως δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και τον υπολογισμό των πρόσθετων στοιχείων μηχανών.



*Σχήμα 70. Η πρωτότυπη γραμμή παραγωγής νήματος σχεδιασμένη για την έρευνα [66]*



*Σχήμα 71. Διάταξη για δοκιμές πολυμερικών οδοντωτών τροχών [66]*

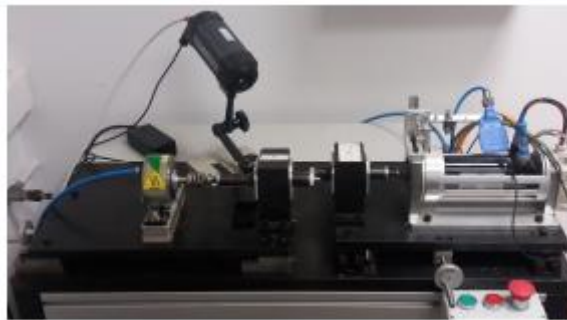
Η έρευνα [67] έγινε το 2018 από τους Jože TAVČAR, Gašper GRKMAN και Jože DUHOVNIK και περιγράφεται στη συνέχεια. Τα κύρια πλεονεκτήματα των πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε σύγκριση με τους μεταλλικούς είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής τους για μαζική παραγωγή, η απόσβεση κραδασμών και ότι δεν υπάρχει επιτακτική ανάγκη για λίπανση. Στη βιβλιογραφία και τις οδηγίες, δίδονται τα επιτρεπόμενα όρια αντοχής των οδοντωτών τροχών από πολυαμίδια (PA) και πολυακετάλες (POM) για τάσεις κάμψης και επαφής. Διατίθεται μεγάλος αριθμός κατάλληλων υλικών για πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς, αλλά τα πρότυπα προσφέρουν λίγη υποστήριξη για τους υπολογισμούς διάρκειας ζωής των πολυμερικών οδοντωτών τροχών από άλλα υλικά. Επομένως, οι δοκιμές στη γεωμετρία των οδοντωτών τροχών και στον συνδυασμό υλικών δεν μπορούν να αποφευχθούν για το σχεδιασμό μιας βέλτιστης μετάδοσης κίνησης. Ωστόσο, οι δοκιμές ταχύτητας είναι πολύ χρονοβόρες και ακριβές, ειδικά όταν δοκιμάζονται διάφοροι συνδυασμοί υλικών σε διαφορετικές συνθήκες δοκιμής. Εφαρμόζοντας την αναβαθμισμένη διαδικασία επιτάχυνσης δοκιμών, ο χρόνος δοκιμής των οδοντωτών τροχών και το κόστος μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Για τον ακριβή υπολογισμό των πλαστικών οδοντωτών τροχών απαιτείται ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας τους κατά τη διάρκεια της συνεργασίας τους. Το παρουσιαζόμενο μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας διορθώθηκε και βελτιώθηκε με παραμέτρους εισόδου, οι οποίες καθορίστηκαν από τα αποτελέσματα της δοκιμής. Διεξήχθησαν επιταχυνόμενες δοκιμές με διαφορετικούς συνδυασμούς ενισχυμένων και μη ενισχυμένων εμπορικά διαθέσιμων υλικών: PA6, PA66, POM και PPS. Οι ίνες γυαλιού και άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν για ενίσχυση. Ο σκοπός της έρευνας είναι ο χαρακτηρισμός διαφορετικών ζευγών υλικών με τον συντελεστή τριβής, την αντοχή στον χρόνο και στη φθορά και τον μηχανισμό αστοχίας σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης και το επίπεδο των φορτίων. Η συμβολή της έρευνας είναι μερικές γενικές οδηγίες για την επιλογή πολυμερικών υλικών για οδοντωτούς τροχούς, όπως ότι η ενίσχυση ινών βελτιώνει το επιτρεπόμενο επίπεδο των τάσεων για μερικά εκατομμύρια κύκλους φόρτισης, τα μη ενισχυμένα πολυμερή είναι καλύτερα για μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης. Επίσης, το PTFE μειώνει σημαντικά το συντελεστή τριβής εάν προστεθεί στα πολυμερή PA και είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε συνδυασμό με το POM.

Το αναβαθμισμένο μοντέλο για ταχεία δοκιμή οδοντωτών τροχών επιτρέπει γρήγορη επιλογή σωστά συνδυαζόμενων ζευγών υλικών στο πρώτο επίπεδο της δοκιμής και αξιόπιστο χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των υλικών (συντελεστής τριβής, ανθεκτικότητα σε συγκεκριμένο επίπεδο φορτίου) στο δεύτερο επίπεδο. Η έρευνα παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας ευρείας γκάμας πολυμερικών υλικών που διατίθενται στο εμπόριο και τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται σε διάφορους γενικούς κανόνες για την επιλογή ζεύγους υλικών και ενίσχυσης.

1. Η εφαρμογή του λιπαντικού (PTFE) στη μήτρα καθαρού πολυαμιδίου (PA) αντανakλά γενικά σε χαμηλότερο συντελεστή τριβής. Κατά συνέπεια, οι οδοντωτοί τροχοί λειτουργούν σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και / ή υψηλότερη ροπή μετάδοσης του ζεύγους οδοντωτών τροχών με βάση το πολυμερές. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του PTFE σε συνδυασμό με την ακετάλη (POM) δεν βελτιώνει σημαντικά την τριβολογική απόδοση των οδοντωτών τροχών. Το πραγματικά ευεργετικό

αποτέλεσμα του λιπαντικού PTFE παρατηρείται όταν χρησιμοποιείται σε ενισχυμένους με ίνες πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς από πολυαμίδιο. Περισσότερο από 60% μείωση του συντελεστή τριβής και 41% χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ζεύγη αυτολιπαινόμενων οδοντωτών τροχών από PTFE.

2. Ο συντελεστής τριβής προσδιορίζεται με βάση τη μέτρηση της θερμοκρασίας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται στο μοντέλο. Ο ακριβέστερος προσδιορισμός της θερμοκρασίας των οδοντωτών τροχών στην εφαρμογή επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους. Αυτή η έρευνα παρουσιάζει έναν συντελεστή τριβής για πολλά ζεύγη ενισχυμένων και μη ενισχυμένων υλικών.
3. Μια σημαντική συμβολή της έρευνας είναι ένα ευρύ φάσμα δοκιμών από υψηλά έως χαμηλά επίπεδα φόρτισης με τα αποτελέσματα να δίνονται στη συνέχεια. Η ενίσχυση από ίνες γυαλιού των πολυμερικών οδοντωτών τροχών αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε υψηλότερα επίπεδα φορτίου. Σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης, το επιτρεπόμενο επίπεδο τάσεων μειώνεται πιο αργά σε μη ενισχυμένα πολυμερή σε σύγκριση με τα ενισχυμένα. Είναι επίσης καλύτερο από οικολογική άποψη.



*Σχήμα 72. Η πειραματική διάταξη με την οποία έγιναν οι ταχείες δοκιμές για τη διάρκεια ζωής κάποιων πολυμερικών οδοντωτών τροχών [67]*

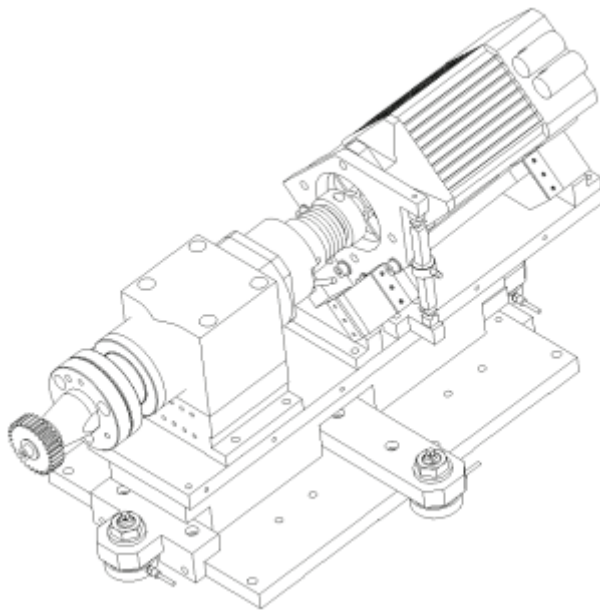


Η έρευνα [68] έγινε το 2002 από τους D Walton, A B Cropper, D J Weale και P Klein Meuleman και αναλύεται στη συνέχεια. Λίγα έχουν δημοσιευτεί σχετικά με την αποτελεσματικότητα των πλαστικών οδοντωτών τροχών παρά το γεγονός ότι οι πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες σε μια ποικιλία μηχανημάτων. Μεταξύ των πολλών εφαρμογών όπου χρησιμοποιούνται πλαστικοί οδοντωτοί τροχοί, σε κάποιες περιπτώσεις πρέπει να αποφεύγεται οποιασδήποτε μορφής λίπανση, όπως σε εκτυπωτές και σε μονάδες επεξεργασίας τροφίμων, αλλά η λειτουργία χωρίς λίπανση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή τριβή και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Καθώς η έρευνα μεγαλώνει στο πεδίο των πλαστικών οδοντωτών τροχών, όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ισχύος όπου αυτά τα προβλήματα παρουσιάζονται περισσότερο. Καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες πρέπει να αποφεύγονται με πλαστικά, η γνώση της αποτελεσματικότητας και της τριβής είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση των πλαστικών οδοντωτών τροχών. Αυτή η έρευνα εξετάζει την αποτελεσματικότητα των πλαστικών οδοντωτών τροχών που κατασκευάζονται από μια σειρά πολυμερών και σύνθετων πολυμερών. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε ομοειδείς και ανόμοιες διαμορφώσεις υλικών για πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς καθώς και για συνδυασμούς πλαστικού-χάλυβα. Διεξήχθησαν επίσης δοκιμές για να εκτιμηθεί η επίδραση της λίπανσης με γράσο. Μια πειραματική διάταξη αναπτύχθηκε για τη μέτρηση της απώλειας επαφής με ακρίβεια και αυτή η εγκατάσταση αναφέρεται σε αυτήν την έρευνα. Η απόδοση αποδείχθηκε ότι εξαρτάται τόσο από το φορτίο όσο και από την ταχύτητα. Χρησιμοποιώντας εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας, προσδιορίστηκαν οι μέσοι συντελεστές τριβής για τη συνεργασία των τροχών για συγκεκριμένα υλικά και συνθήκες λειτουργίας από τις μετρηθείσες αποδόσεις. Αυτοί οι συντελεστές συγκρίθηκαν με τιμές που ελήφθησαν από κλασικές τριβολογικές δοκιμές.

Η έρευνα εξέτασε τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας των πλαστικών οδοντωτών τροχών και, από αυτές τις μετρήσεις, έχουν προκύψει οι συντελεστές τριβής. Συνολικά, η απόδοση των πλαστικών οδοντωτών τροχών σε λειτουργία χωρίς λίπανση είναι χαμηλότερη από τους συμβατικούς λιπαινόμενους οδοντωτούς τροχούς από χάλυβα. Τα κύρια συμπεράσματα ήταν:

1. Η επίδραση της επιλογής υλικού στην απόδοση των πλαστικών οδοντωτών τροχών δεν μπορεί να υποτιμηθεί. Για παράδειγμα, ορισμένα υλικά όπως το POM επηρεάζονται σημαντικά από το φορτίο, αλλά πέρα από μια συγκεκριμένη ταχύτητα η απόδοση παρέμεινε ανεξάρτητη από την ταχύτητα. Για άλλα υλικά, όπως το νάιλον, η επίδραση του φορτίου ήταν αμελητέα, αλλά η επίδραση της ταχύτητας ήταν κυρίαρχη.
2. Όταν συνεργάστηκαν ανόμοια υλικά μεταξύ τους, η συμπεριφορά αποδοτικότητας έδειξε χαρακτηριστικά και των δύο υλικών.
3. Η λίπανση με γράσο αύξησε σημαντικά την απόδοση, εξαλείφοντας αποτελεσματικά την εξάρτηση από το φορτίο και την ταχύτητα.
4. Το αποτέλεσμα των ινών γυαλιού σε μια νάιλον μήτρα είναι αμελητέο, αυξάνοντας ελαφρά την απόδοση.
5. Η επίδραση του λιπαντικού στερεάς φάσης σε ένα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού νάιλον εξαρτιόταν από το φορτίο που δεν είχε παρατηρηθεί σε δοκίμια από

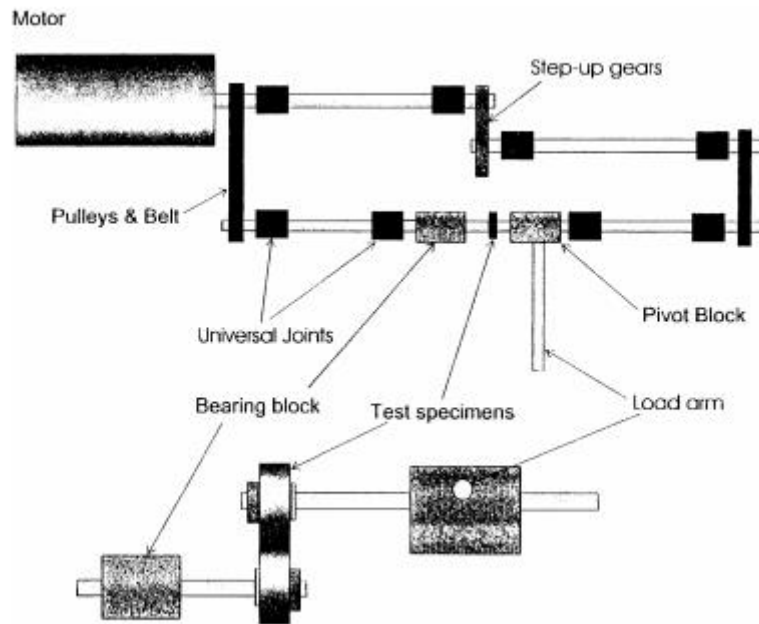
- καθαρό νάιλον ή σε νάιλον με ίνες γυαλιού. Η απόδοση μειώθηκε επίσης, κατά 4%.
6. Η επίδραση των ινών άνθρακα σε μια μήτρα νάιλον με λιπαντικό στερεάς φάσης δεν διέφερε σημαντικά από τις ίνες γυαλιού. Παρουσιάστηκαν οι ίδιες εξαρτήσεις από το φορτίο και την ταχύτητα όπως και στις άλλες περιπτώσεις.
  7. Όταν ένας τροχός από σύνθετο νάιλον συνεργάστηκε με ένα χαλύβδινο πινιόν, οι αποδόσεις χαμηλής ταχύτητας βρέθηκαν να είναι χειρότερες από την ισοδύναμη συνεργασία δυο οδοντωτών τροχών από σύνθετα πολυμερικά υλικά. Ωστόσο, η απόδοση σε υψηλές ταχύτητες ήταν παρόμοια.
  8. Οι οδοντωτοί τροχοί από χύτευση διπλής φάσης δεν έδειξαν εξάρτηση από το φορτίο και σε αντίθεση με τους δοκιμασμένους από σύνθετο νάιλον, έδειξαν ότι η συμπερίληψη λιπαντικού στερεάς φάσης ήταν ευεργετική.
  9. Η αποδοτικότητα φαίνεται να χειροτερεύει με την αύξηση του χρόνου λειτουργίας.
  10. Από όλα τα υλικά που δοκιμάστηκαν, το PEEK ήταν το πιο αποτελεσματικό και το POM το λιγότερο. Με ροπή 5 Nm και για οποιαδήποτε δεδομένη ταχύτητα, όλες οι αποδόσεις μειώθηκαν σε απόλυτο εύρος ζώνης 4%.
  11. Οι συντελεστές τριβής ακολούθησαν το αντίστροφο των καμπυλών απόδοσης για οποιοδήποτε δεδομένο υλικό.
  12. Οι συντελεστές τριβής βρέθηκαν να είναι σημαντικά μεγαλύτεροι από τις τιμές που αναφέρονται στους καταλόγους των προμηθευτών υλικών, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν κοντά στις τιμές που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας διατάξεις κύλισης/ολίσθησης (roll/slide).
  13. Κατά κανόνα, οι συντελεστές τριβής για όλα τα πλαστικά που δοκιμάστηκαν ήταν μεταξύ 0,3 και 0,5 για το εύρος των ταχυτήτων που ενδέχεται να λειτουργήσουν οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί χωρίς λίπανση.



Σχήμα73. Η πειραματική διάταξη με την οποία έγιναν οι δοκιμές [68]

Η έρευνα [69] έγινε το 2001 από τους N.A. Wright και S.N. Kukureka και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Οι χυτευμένοι με έγχυση οδοντωτοί τροχοί από σύνθετα ενισχυμένα με ίνες θερμοπλαστικά συχνά παρουσιάζουν αυξημένη απόδοση σε σύγκριση με αυτά που κατασκευάζονται από μη ενισχυμένα πολυμερή. Γενικά, τα υλικά επιλέγονται για λόγους κόστους ή απόδοσης. Οι πτυχές της απόδοσης των πολυμερικών οδοντωτών τροχών έχουν μελετηθεί από έναν αριθμό εργαζομένων και έχουν καταβληθεί προσπάθειες για την προσομοίωση των συνθηκών επαφής κατά τη λειτουργία τους. Ωστόσο, μέχρι τώρα δεν έχει μελετηθεί συστηματικά η επίδοση των σύνθετων οδοντωτών τροχών από πολυμερική μήτρα, στη φθορά. Ενώ τέτοια υλικά έχουν μελετηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές μέτρησης της φθοράς, όπως pin-on-disc ή twin disc roll/slide, δεν έχει γίνει ποτέ καμία προσπάθεια να συγκριθούν άμεσα τα αποτελέσματα από τέτοιες μελέτες με αυτά των δοκιμών των οδοντωτών τροχών. Αυτή η έρευνα επιχειρεί να εξηγήσει τις συγκριτικές μεθόδους μέτρησης των οδοντωτών τροχών από διάφορα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα και να συσχετίσει την επίδοσή τους με αποτελέσματα που λαμβάνονται σε πειράματα προσομοίωσης επαφών από άλλους εργαζόμενους. Οι μέθοδοι δοκιμής φθοράς συγκρίνονται, μαζί με ηλεκτρονική μέτρηση (μετατόπισης), απώλεια βάρους και απευθείας μέτρηση. Παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος περιγραφής της φθοράς των οδοντωτών τροχών, η οποία σχετίζεται με τις πραγματικές συνθήκες επαφής και τη φθορά των οδόντων. Αυτή η τεχνική μέτρησης είναι ικανή να παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τους ρυθμούς φθοράς των οδοντωτών τροχών συναρτήσει της γωνίας κύλισης, και επομένως του φορτίου, της ταχύτητας ολίσθησης και του λόγου ολίσθησης. Επιτρέπει συγκρίσεις μεταξύ δοκιμών οδοντωτών τροχών και απλούστερης διαμόρφωσης δοκιμών, όπως τη δοκιμή twin disc roll/slide. Τα συμπεράσματα από την έρευνα αυτή έχουν ενδιαφέρουσες εμπορικές επιπτώσεις για τους παραγωγούς και τους τελικούς χρήστες των σύνθετων πολυμερικών οδοντωτών τροχών και για εκείνους που συμμετέχουν στις δοκιμές τους.

Η συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών twin disc και των δοκιμών των τροχών δεν είναι ιδιαίτερα καλή, με τους ρυθμούς φθοράς να διαφέρουν κάπως σε μέγεθος. Ωστόσο, η απόδοση κάθε τύπου υλικού είναι παρόμοια. Αντίθετα, στην περίπτωση pin-on-disc δοκιμής είναι σαφές ότι υπάρχει πολύ μικρή συσχέτιση και τα αποτελέσματα pin-on-disc δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οδηγός για την επαφή ολίσθησης που συναντάται στους οδοντωτούς τροχούς. Περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να συνεχιστεί με μια ποικιλία υλικών που έχουν δοκιμαστεί από twin disc δοκιμές καθώς και σε οδοντωτούς τροχούς.

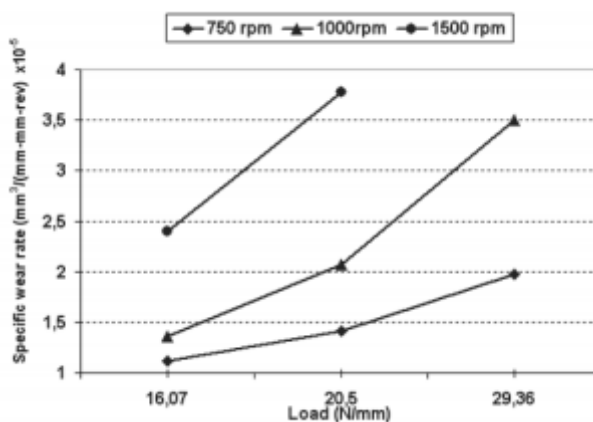


Σχήμα 74. Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής twin disc roll/slide [69]

Η έρευνα [70] έγινε το 2009 από τους R. Yakut, H. Düzcükoğlu και M.T. Demirci και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Πρόσφατα, το πολυαμίδιο 66 και το Teflon ως πλαστικά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην κατασκευή οδοντωτών τροχών. Σκοπός της έρευνας είναι να εξεταστεί η φέρουσα ικανότητα φορτίου των οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση από PC / ABS και η διερεύνηση της φθοράς τους. Σε αυτή τη μελέτη, διερευνήθηκε η χρηστικότητα των σύνθετων πλαστικών υλικών PC / ABS σε οδοντωτούς τροχούς. Οι οδοντωτοί τροχοί από PC / ABS δοκιμάστηκαν εφαρμόζοντας τρία διαφορετικά φορτία σε δύο διαφορετικούς αριθμούς στροφών στο σετ πειραμάτων FZG. Ως αποτέλεσμα των πειραμάτων, η φέρουσα ικανότητα φορτίου των υλικών PC / ABS φαινόταν αρκετά υψηλή, εάν ένας οδοντωτός τροχός από ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών είναι από χάλυβα (AISI 8620). Στην πραγματικότητα, τα υλικά PC / ABS είναι ανθεκτικά έναντι της φλόγας, του αέρα και της υπεριώδους ακτινοβολίας και συγκρατούν χαμηλότερη υγρασία σε σχέση με το υλικό PA66 GFR 30. Η χρήση τους προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε πολλές βιομηχανίες.

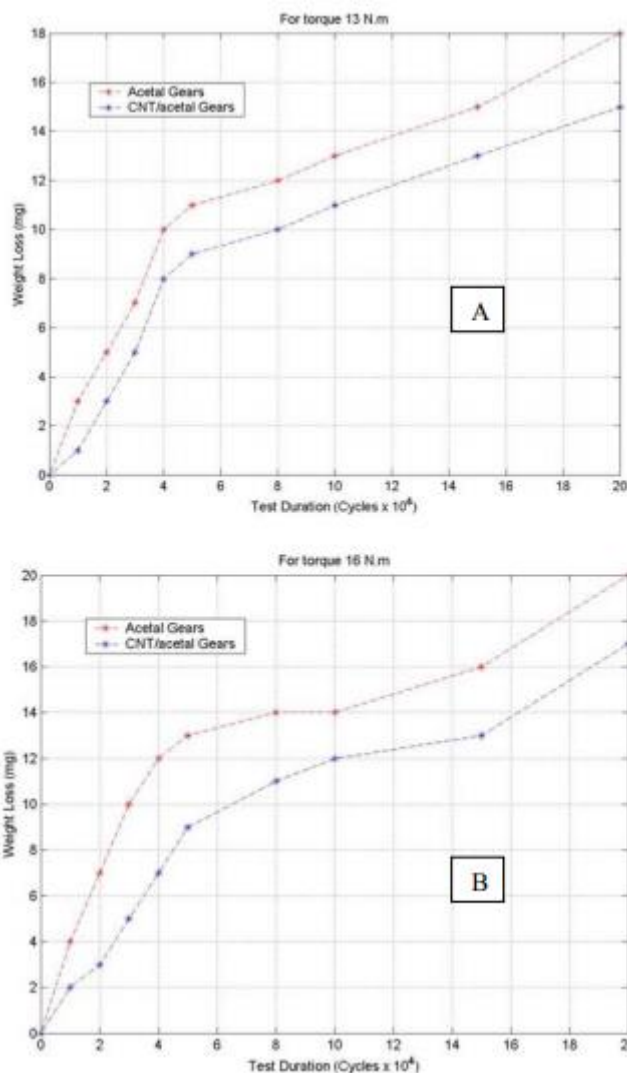
Τα πειραματικά αποτελέσματα των οδοντωτών τροχών από PC / ABS που δοκιμάστηκαν σε διαφορετικά φορτία και διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής συνοψίζονται παρακάτω. Ιδιαίτερα, οι οδοντωτοί τροχοί από PC / ABS πρέπει να χρησιμοποιούνται ευρέως, σε ανοιχτές και υγρές περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε αυτή τη μελέτη, βρέθηκε ότι οι καλές συνθήκες λειτουργίας παρέχονται σε χαμηλό αριθμό περιστροφών και φορτίσεων. Εάν ο κινητήριος οδοντωτός τροχός είναι από χάλυβα AISI 8620, η συσσωρευμένη θερμότητα θα εξαπλωθεί εύκολα. Ωστόσο, όταν αυξήθηκε το φορτίο των οδόντων, σημειώθηκαν θερμικές φθορές, θραύση στους οδόντας και τήξη της επιφάνειας λόγω της άμεσης αύξησης της θερμοκρασίας. Πρόσθετα υλικά πρέπει να προστεθούν στα PC / ABS για αύξηση της αντοχής. Οι κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να καθορίζονται με τον καθορισμό του αριθμού των στροφών και του φορτίου των οδόντων των οδοντωτών τροχών. Οι

οδοντωτοί τροχοί από PC / ABS πρέπει να προτιμώνται για τροχούς με λίγους οδόντες και όχι σε εφαρμογές υψηλής ισχύος.



Σχήμα 75. Διάγραμμα της διακύμανση του ειδικού ποσοστού φθοράς του PC / ABS συναρτήσει του φορτίου [70]

Η έρευνα [71] έγινε το 2013 από τους Samy Yousef, A. khattab, M. Zaki και T. A. Osman και αναλύεται στη συνέχεια. Την τελευταία δεκαετία, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν βρει μεγάλες εφαρμογές σε βιομηχανικούς τομείς. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματά τους όπως στη μείωση θορύβου, στα χαρακτηριστικά αυτολίπανσης, στη μείωση βάρους, στην εξοικονόμηση κόστους καθώς και στα χαμηλότερα τριβολογικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την τριβή και τη φθορά. Ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας είναι να μελετήσει τη συμπεριφορά φθοράς των οδοντωτών τροχών με ευθεία οδόντωση που καθιστά το πολυμερές ακετάλη ενισχυμένο με νανοσωλήνες άνθρακα. Αυτό έγινε χρησιμοποιώντας κατάλληλο κολλώδες έλαιο (παραφίνη) κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της χύτευσης με έγχυση για την παραγωγή παχιών φλαντζών με διάμετρο 134 mm και πάχος 29 mm. Οι νανοσωλήνες άνθρακα παρήχθησαν από ένα πλήρως αυτόματο σύστημα με τη χρήση τεχνολογιών βολταϊκού τόξου με πολλαπλά ηλεκτρόδια. Οι φλάντζες από σύνθετη CNT / ακετάλη περιέχουν 1% νανοσωλήνες άνθρακα κατά βάρος. Οι φλάντζες καταργάστηκαν χρησιμοποιώντας κέντρο κατεργασιών CNC για την παραγωγή οδοντωτών τροχών. Ο διασκορπισμός των νανοσωλήνων άνθρακα στο πολυμερές εξετάστηκε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με ταχύτητα λειτουργίας 1420 rpm και με ροπές 13 και 16 Nm. Επιπλέον, έχουν δοκιμαστεί οι μηχανικές ιδιότητες του CNT / ακετάλης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντίσταση στη φθορά των οδοντωτών τροχών από CNT / ακετάλη αυξήθηκε με την προσθήκη CNT. Η αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας Young και η ακαμψία αυξήθηκαν επίσης, ενώ η σκληρότητα δεν επηρεάστηκε από την προσθήκη CNT.



Σχήμα 76. Διαγράμματα φθοράς της ακετάλης και της CNT/ακετάλης για: A). 13Nm ροπή και B). 16Nm ροπή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων περιστροφής [71]

Η έρευνα [72] έγινε το 2019 από τους Ye Zhang, Chris Pursell, Ken Mao και Simon Leigh και αξιολογεί τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή πολυμερικών οδοντωτών τροχών από νάιλον. Πιο συγκεκριμένα, οι οδοντωτοί τροχοί με ευθεία οδοντωση από Nylon εκτυπώθηκαν 3D χρησιμοποιώντας Nylon 618, Nylon 645, Nylon κράμα 910, μαζί με ιδιόκτητα υλικά όπως τα νάιλον Onyx και Markforged και υποβλήθηκαν σε δοκιμές ρυθμού φθοράς που πραγματοποιήθηκαν σε μια ειδικά σχεδιασμένη πειραματική διάταξη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το Nylon 618 παρείχε την καλύτερη απόδοση φθοράς μεταξύ των 5 διαφορετικών τρισδιάστατων υλικών εκτύπωσης που δοκιμάστηκαν. Υποτίθεται ότι οι διαφορετικές μηχανικές αποδόσεις μεταξύ νάιλον και ινών προκλήθηκαν από διαφορές στην κρυσταλλικότητα και τη μοναδικότητα της διαδικασίας Fused Deposition Modeling (FDM). Η ηλεκτρονική μικροσκοπία SEM αποκάλυψε δραματικά διαφορετική συμπεριφορά φθοράς για τους 3D τυπωμένους οδοντωτούς τροχούς σε σύγκριση με τις βιβλιογραφικές αναφορές οδοντωτών τροχών κατασκευασμένων με τη διαδικασία της χύτευσης με έγχυση. Η παρακολούθηση με θερμική κάμερα κατά τη διάρκεια δοκιμών φθοράς

χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της θερμικής απόδοσης των οδοντωτών τροχών κατά τη διάρκεια δοκιμών φθοράς και μαζί με το SEM χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση μηχανισμών αστοχίας των οδοντωτών τροχών. Τα αποτελέσματα απόδοσης έδειξαν ότι οι οδοντωτοί τροχοί που εκτυπώθηκαν 3D χρησιμοποιώντας το Nylon 618 στην πραγματικότητα είχαν καλύτερη απόδοση από τους οδοντωτούς τροχούς από νάιλον 66 κατασκευασμένους με τη διαδικασία της χύτευσης με έγχυση όταν εφαρμόστηκε χαμηλή έως μέση ροπή.

Σε αυτή την έρευνα, δοκιμάστηκαν πέντε διαφορετικά τυπωμένα υλικά 3D, συμπεριλαμβανομένων των Nylon 618, Nylon 645, Nylon κράμα 910, Onyx και Markforged nylon. Πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των τιμών βιβλιογραφίας για τους χυτευμένους με έγχυση οδοντωτούς τροχούς από νάιλον 66 και των πέντε τυπωμένων 3D οδοντωτών τροχών. Το Nylon 618 παρείχε καλύτερα αποτελέσματα όταν του εφαρμόστηκε χαμηλή έως μέση ροπή σε σύγκριση με τους χυτευμένους με έγχυση οδοντωτούς τροχούς. Διαφορετική συμπεριφορά φθοράς και μοτίβα φθοράς στον οδοντωτό τροχό καταγράφηκαν από το SEM. Είναι ενδιαφέρον ότι η φθορά εμφανίστηκε μόνο στη γραμμή επαφής των τρισδιάστατα εκτυπωμένων οδοντωτών τροχών. Τμήματα της επιφάνειας των τυπωμένων οδοντωτών τροχών από Nylon 618 τήχθηκαν, αλλά δεν υπήρχε φθορά (ξεφλούδισμα) στους οδόντας, ενώ τα άλλα τέσσερα τυπωμένα υλικά το παρουσίασαν το φαινόμενο αυτό. Σε δοκιμές DSC, τα Nylon 66 και Nylon 618 παρουσίασαν σχετικά καλύτερη θερμική συμπεριφορά όσον αφορά τις υψηλότερες θερμοκρασίες υαλώδους μετάβασης, τις υψηλότερες θερμοκρασίες τήξης και την υψηλότερη κρυσταλλικότητα σε σύγκριση με τα άλλα υλικά που δοκιμάστηκαν. Επομένως, υποτίθεται ότι η ανώτερη απόδοση τριβής και φθοράς Nylon 618 (σε σύγκριση με τα άλλα τυπωμένα υλικά) εξαρτάται κυρίως από τη θερμική συμπεριφορά και την επίδραση της σύντηξης μεταξύ κάθε στρώματος.

Material/ Load	Nylon 66 (Injection mould) [1]	Nylon 618	Onyx	MF nylon	Nylon 645	Alloy 910
5Nm	2.4 Million cycles	2.4 Million cycles	2.4 Million cycles	0.018 Million cycles	0.014 Million cycles	0.0078 Million cycles
7Nm	2.4 Million cycles	2.4 Million cycles	0.96 Million cycles	N/A*	N/A*	N/A*
10Nm	1 Million cycles	1.5 Million cycles	0.006 Million cycles	N/A*	N/A*	N/A*
12Nm	Tested 0.504 Million cycles	0.78 Million cycles	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
15Nm	0.08 Million cycles	0.012 Million cycles	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*

Σχήμα 77. Τα αποτελέσματα φθοράς από την πειραματική διάταξη [72]



Η έρευνα [73] έγινε το 2013 από τους J. Cathelin, J.-P. de Vaujany, M. Guingand και L. Chazeau και παρουσιάζει μια πρωτότυπη μέθοδο για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς υπό φόρτιση των ενισχυμένων (με ίνες) πολυμερικών οδοντωτών τροχών. Αν και οι θερμοπλαστικοί οδοντωτοί τροχοί είναι ακατάλληλοι για εφαρμογές με υψηλές ροπές, η προσθήκη ινών μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοσή τους. Η συγκεκριμένη περίπτωση πολυαμιδίου 6 + 30% ινών γυαλιού μελετάται σε αυτήν την έρευνα.

Αυτή η μελέτη παρουσιάζει μια γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδο για την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς στη σύμπλεξη οδοντωτών τροχών πολυαμιδίου 6+30% GF. Οι ιξωδο-ελαστικές ιδιότητες προσομοιώνονται με το γενικευμένο μοντέλο Kelvin. Αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα, τη θερμοκρασία, την υγρασία και τον προσανατολισμό των ινών. Με την ιξωδο-ελαστική μετατόπιση και τους συντελεστές μεθόδου επιρροής που υπολογίζονται σε ολόκληρη την επιφάνεια του οδόντος, είναι δυνατόν να επιλυθεί το πρόβλημα κατανομής φορτίου. Ο χρόνος υπολογισμού είναι λογικός δηλαδή, 40 λεπτά για 17 ψευδο-στατικές κινηματικές θέσεις (quasistatic kinematics positions). Επίσης, αυτό το μοντέλο επιτρέπει την προσομοίωση της ποσότητας των ινών και την επίδραση του προσανατολισμού τους. Μονοκατευθυντικά μοντέλα σε σύγκριση με ομοιογενείς εκδόσεις και βασισμένα σε κανόνα μείγματος και ρεαλιστικά μοντέλα προσανατολισμού των ινών αποκαλύπτουν μια διαφορά μικρότερη από 8% σχετικά με το εύρος σφάλματος μετάδοσης και λιγότερο από 3% σχετικά με την πίεση επαφής και τις τάσεις στον πόδα των οδόντων. Τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν επιβεβαίωσαν ότι οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στο ιστορικό της μετατόπισης, και έτσι πρέπει να ληφθούν υπόψη σε οποιοδήποτε μοντέλο αφιερωμένο στους πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς.

#### 4.2. Εφαρμογές πολυμερικών οδοντωτών τροχών υψηλής ισχύος

Η αξιοπιστία και η αθόρυβη λειτουργία των πυλών ανύψωσης ισχύος της Ford έχουν αποδοθεί στο κιβώτιο Hi-Lex Controls, το οποίο καθοδηγείται από πλαστικούς άξονες και οδοντωτούς τροχούς, υψηλής ακρίβειας που αναπτύχθηκαν από μια ομάδα που περιελάμβανε η Ticona, η θυγατρική εταιρεία της Engineering Polymers Business της Celanese Corporation [74]. Η μετάδοση Hi-Lex εμφανίστηκε για πρώτη φορά στο SUV Ford Expedition 2005 και στη συνέχεια εμφανίστηκε σε όλες τις πύλες ανύψωσης ισχύος της Ford. Ο διβάθμιος μειωτήρας στροφών χρησιμοποιεί χαλύβδινα ρουλεμάν ακριβείας τοποθετημένα σε πλαστικούς άξονες και πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς διαμέτρου 2,5 ιντσών, για την επίτευξη της απαιτούμενης μείωσης μεταξύ του ηλεκτρικού κινητήρα και ενός εύκαμπτου στρεπτικού καλωδίου. Ο οδοντωτός τροχός και ο άξονας της πρώτης βαθμίδας, ο πλαστικός οδοντωτός τροχός εξόδου και ο άξονας εξόδου της δεύτερης βαθμίδας είναι χυτοί με έγχυση από συμπολυμερές ακετάλης Celcon (POM) και από πλαστικά ενισχυμένα με συνεχείς ίνες Celstran (LFRT), όλα από την Ticona. Το κιβώτιο Hi-Lex με πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς μειώνει το κόστος, το βάρος και τον θόρυβο. Η μείωση του NVH (θόρυβος / κραδασμοί /

σκληρότητα) ήταν ένας συγκεκριμένος στόχος μιας ομάδας με επικεφαλής τον Fred Eberle, Gearing and Gear Drives Technical Specialist and Six-Sigma Master Black Belt with Hi-Lex in Rochester Hills, Michigan. Η ομάδα καθόρισε, ανέλυσε και βελτιστοποίησε το σχεδιασμό για να επωφεληθεί από μια σειρά από συγκεκριμένα θέματα μετάδοσης με πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς, τα οποία είναι πολύ πιο περίπλοκα από αυτά για τους τυπικούς μεταλλικούς οδοντωτούς τροχούς. Η απόφαση λήφθηκε για να προχωρήσει με τον διβάθμιο μειωτήρα στροφών, ο οποίος βασίστηκε σε πλαστικούς άξονες πρώτης και δεύτερης βαθμίδος που συνδέονται με πλαστικούς οδοντωτούς τροχούς σε κιβώτιο ταχυτήτων με ονομαστική ικανότητα ροπής εξόδου περίπου 12Nm (106 lb (48kg) / ίντσες). Μόλις ορίστηκαν οι απαιτήσεις, η ομάδα εντόπισε υλικά για οδοντωτούς τροχούς και άξονες που θα διατηρούσαν τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες και τη σταθερότητα των διαστάσεων, ακόμη και σε αυξημένες θερμοκρασίες. Με την ανάγκη που γεννήθηκε για εξισορρόπηση της δυσκαμψίας, η υπεύθυνη για τους οδοντωτούς τροχούς ομάδα επέλεξε το Celcon M90, γενικής χρήσης, μη ενισχυμένο POM, για τον οδοντωτό τροχό και τον άξονα πρώτης βαθμίδος και το Celcon GC25T, ένα POM ενισχυμένο με 25% ίνες γυαλιού για τον οδοντωτό τροχό εξόδου της δεύτερης βαθμίδος. Τέλος το Celstran PA66-GF50-02, ένα PA66 ενισχυμένο με 50% συνεχείς ίνες γυαλιού που προσφέρει υψηλή αντοχή και ακαμψία σε συνδυασμό με υψηλή εκτροπή θερμότητας επιλέχθηκε για τον άξονα εξόδου της δεύτερης βαθμίδος. Η ομάδα ανέφερε ότι το κιβώτιο ταχυτήτων Hi-Lex προσφέρει μια λύση χαμηλότερου κόστους που ικανοποιεί ακραίους θερμοκούς περιορισμούς και επιτυγχάνει των μετρήσεων απόδοσης NVH που ορίζονται από τον πελάτη.



*Σχήμα 78. Το Ford Expedition 2005 στο οποίο τέθηκε σε λειτουργία για πρώτη φορά το κιβώτιο ταχυτήτων της Hi-Lex [74]*



*Σχήμα 79. Τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται το κιβώτιο ταχυτήτων της Hi-Lex [74]*

Η BPG Werks με έδρα τη Βοστώνη και το Τορόντο δημιούργησε έναν καινοτόμο τρόπο προσωπικής μεταφοράς, που ονομάστηκε «Shredder» [75]. Το όχημα all-terrain stand-on dual tracked vehicle DTV επιτρέπει στους χρήστες να μεταβαίνουν από το μηδέν στην τελική ταχύτητα των 40 km/h, ακόμη και σε απότομα ανώμαλα εδάφη ή μέσω νερού, σε λίγα δευτερόλεπτα. Αυτή τη στιγμή χρησιμοποιείται για extreme sports, αν και άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν γεωργικές και δασικές εργασίες με τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως προσωπικό σύστημα μεταφοράς για στρατεύματα. Μία από τις δυνατές τεχνολογίες για το DVT είναι η κατοχυρωμένη με συνεχόμενη μεταβλητή μετάδοση «CV-track-biasing» που επιτρέπει την επιτάχυνση, την απόκριση ροπής και την ευελιξία. Ένα βασικό μέρος αυτού είναι ο οδοντωτός τροχός του άξονα μετάδοσης κίνησης που κατασκευάστηκε αρχικά από ορείχαλκο με επίστρωση. Ωστόσο, προβλήματα γύρω από την ανθεκτικότητα σύντομα έγιναν εμφανή καθώς η ισχύς από τον τετράχρονο κινητήρα 13-ίπων, μεταφερόταν στις ελαστικές ερπύστριες, γρήγορα οι οδοντωτοί τροχοί από ορείχαλκο οδηγήθηκαν σε αστοχία. Καθώς ο οδοντωτός τροχός του άξονα μετάδοσης κίνησης ήταν καθοριστικής σημασίας για τη συνολική απόδοση του κιβωτίου ταχυτήτων και του DTV συνολικά, η BPG χρειάστηκε να αντικαταστήσει τον επικαλυμμένο ορείχαλκο με ένα υλικό που θα παρέχει βελτιωμένη αντοχή και χαρακτηριστικά φθοράς. Επιπλέον, χρειάστηκε να προσφέρει σταθερή και αξιόπιστη απόδοση σε στροφές κινητήρα πάνω από 5000 σ.α.λ. και επίπεδα ροπής έως 20Nm για κάθε ερπύστρια, για όλη τη διάρκεια ζωής του οχήματος. Μετά από κάποια

αρχική έρευνα, η BPG συνεργάστηκε με προμηθευτές πολυμερικών υλικών Victrex και China Array Plastics με έδρα τις ΗΠΑ. Η BPG Werks επέλεξε να καθορίσει ένα πολυμερές υψηλής απόδοσης για να αντικαταστήσει τον ορείχαλκο καθώς ήταν σε θέση να παρέχει όλες τις απαραίτητες μηχανικές επιδόσεις και ήταν πιθανό να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τις απαιτητικές εφαρμογές που θα θέσει το όχημα. Το πλαστικό μηχανολογικής χρήσης έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της εύκολης επεξεργασίας με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Μετά από κάποια αρχική εξέλιξη, η ομάδα μπόρεσε να κατασκευάσει ένα τμήμα μετάδοσης κίνησης με άξονα κίνησης χρησιμοποιώντας μια πολυαρυλαιθεροκετόνη (PAEK) η οποία ήταν αρκετά ανθεκτική για να αντικαταστήσει τον επικαλυμμένο ορείχαλκο. Η ομάδα χρησιμοποίησε ένα πολυμερές Victrex WG για δύο εξαρτήματα στη βαθμίδα οδοντωτών τροχών και συγκεκριμένα στα sliders και στα insert keys. Παρά την έκθεση σε φυγοκεντρικές και γραμμικές δυνάμεις σε υψηλές θερμοκρασίες, το θερμοπλαστικό προσφέρει μια πολύ πιο ανθεκτική και ελαφριά λύση. Το επικαλυμμένο πολυμερές Victrex WG, αν και σε συνεχή επαφή με τον ιμάντα, βοηθά στην παροχή σταθερών χαρακτηριστικών επιτάχυνσης και ροπής, με εξαιρετική τριβή και θερμική αντίσταση. Αυτό οφείλεται στην ανθεκτικότητα, στην πρόσκρουση και στην αντοχή σε εφελκυσμό του πολυμερούς. Τα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν αποτελούν κρίσιμο στοιχείο του συστήματος μετάδοσης, ολισθαίνοντας μπροστά και πίσω χιλιάδες φορές εντός του συστήματος μετάδοσης ενώ είναι υπό φόρτιση. Το θερμοπλαστικό προσφέρει υψηλή αντοχή στη φθορά διατηρώντας παράλληλα την ακεραιότητα των διαστάσεων, με αποτέλεσμα συμπαγή συγχρονισμό. Αυτό οδήγησε σε βελτίωση της μακροζωίας του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς και στη συνολική εμπειρία οδήγησης.



*Σχήμα 80. Το BPG Werks shredder DTV σε γεωργικές εργασίες [76]*



Το Ultra Light Urban Vehicle (ULUV) είναι ένα πρότυπο ηλεκτροκίνητο τρίτροχο όχημα αστικής χρήσης το οποίο κατασκευάστηκε από μια πανεπιστημιακή ομάδα με επικεφαλής τον Dr. Martin Morris καθηγητή στο τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του Bradley University της Αμερικής με τη βοήθεια μιας ομάδας μηχανικών της εταιρείας Winzeler Gear [77-78]. Το ULUV μπορεί να το οδηγήσεις με δίπλωμα οδήγησης για μοτοσυκλέτες, έχει δυνατότητα να μεταφέρει δυο άτομα με τις αποσκευές τους και το αρχικό του βάρος ήταν 160 κιλά, αλλά ύστερα από κάποιες τροποποιήσεις ανέβηκε στα 195 κιλά, έχει αναγεννητική πέδηση, τελική ταχύτητα 73 km/h και αυτονομία περίπου 65 km εντός πόλης (με κίνηση). Το κόστος ταξιδιού είναι περίπου 0,3 €/km. Ο Mike Cassata, μηχανικός σχεδιασμού της Winzeler Gear, επιβεβαιώνει, "η υψηλή απόδοση ενός ομοπολυμερούς ακετάλης μπορεί να διαχειριστεί τη ροπή και το φορτίο, ενώ παράλληλα προσφέρει χαμηλή τριβή, μειωμένο θόρυβο, χαμηλό κόστος και μειώνει το βάρος του οχήματος." Πρόσθεσε ότι οι οδοντωτοί τροχοί του πλανητικού μηχανισμού μετάδοσης από ακετάλη (πολυοξυμεθυλένιο Delrin<sup>®</sup> POM) πρέπει να αντέχουν στη ροπή που παράγεται από έναν ηλεκτροκινητήρα 25 ίππων στις 6.000 σ.α.λ.. Αυτό το έργο μας επέτρεψε να αναπτύξουμε μια βαθύτερη γνώση της μετάδοσης ισχύος σε μικρά οχήματα. Το συγκεκριμένο κιβώτιο ταχυτήτων με κάποιες τροποποιήσεις φυσικά, μπορεί να εφαρμοστεί και σε μεγαλύτερα οχήματα ιπποδύναμης. Στο μέλλον θα μπορούσαν όλες οι βιομηχανίες αυτοκινήτων να χρησιμοποιήσουν αυτόν τον εναλλακτικό τρόπο μετάδοσης.



*Σχήμα 81. Το Ultra Light Urban Vehicle (ULUV) [77-78]*



Σχήμα 82. Το κιβώτιο μετάδοσης του Ultra Light Urban Vehicle (ULUV) [77-78]

Μια ακόμα πρότυπη εφαρμογή αντικατάστασης των μεταλλικών οδοντωτών τροχών με πολυμερικούς, είναι ένας άξονας εξισορρόπησης κινητήρα εσωτερικής καύσης [79]. Ο άξονας εξισορρόπησης έχει σαν σκοπό την εξομάλυνση των ταλαντώσεων του κινητήρα, έτσι ώστε να μην δημιουργούνται κραδασμοί και να μην αυξάνεται ο θόρυβος της λειτουργίας του κινητήρα. Η κατασκευάστρια εταιρεία Metaldyne έριξε στη μάχη για την αύξηση της απόδοσης των αυτοκινήτων τη PEEK της εταιρείας Victrex, ένα δυνατό πολυμερές για να αντικαταστήσει τα μεταλλικά υλικά. Η αντικατάσταση αυτή είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές μειώσεις στην αδράνεια, στο βάρος και στην κατανάλωση ισχύος, καθώς επίσης και στη βελτίωση της απόδοσης του θορύβου (κατά 3db), των κραδασμών και της σκληρότητας (NVH) των οχημάτων. Με τις δοκιμές που έχουν γίνει έχει διαπιστωθεί ότι μπορούμε να εξοικονομήσουμε περίπου 70% μείωση της μάζας και σχεδόν 80% μείωση της αδράνειας. Ο συνδυασμός οδηγεί σε 3% έως 9% μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, άρα και του καυσίμου. Τα πολυμερή συνήθως δεν χρησιμοποιούνται σε μια μονάδα άξονα εξισορρόπησης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που φτάνει ο κινητήρας (περίπου 155 °C). Το PEEK είναι μοναδικό για την απόδοσή του σε περιβάλλοντα ακραίας θερμοκρασίας, στα οποία τα περισσότερα πλαστικά δεν είναι ικανά να επιβιώσουν. Το PEEK διαθέτει δυναμική αντίσταση κόπωσης σε θερμοκρασίες άνω των 120 °C. Άλλες βασικές ιδιότητες περιλαμβάνουν, υψηλή αντοχή και ακαμψία, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, αντοχή σε χημικές ουσίες, διαλύτες, λιπαντικά και καύσιμα, υψηλές τιμές PV για χρήση σε απαιτητικά τριβολογικά περιβάλλοντα, καθώς επίσης και χαμηλή απορρόφηση υγρασίας. Ακόμα έχει πολύ καλές ιδιότητες αντοχής και επιμήκυνσης. Μπορεί να αντέξει τις υψηλές τάσεις επαφής που παρατηρούνται σε εφαρμογές οδοντωτών τροχών. Σχετικά με τα πολυμερή, βρίσκεται στην κορυφή της κατάταξης. Τέλος οι οδοντωτοί τροχοί από PEEK έχουν ακόμα ένα πλεονέκτημα σε σχέση με άλλους πολυμερικούς από την άποψη της απόδοσης του υλικού, γιατί δεν χρειάζονται

δευτερεύουσες λειτουργίες όπως σκλήρυνση ή ανόπτηση. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης του PEEK είναι η μείωση του κόστους παραγωγής λόγω του ότι κατασκευάζονται μέσω χύτευσης με έγχυση και δεν χρειάζονται επιπλέον μηχανική κατεργασία. Η Victrex κάνει όλες τις δοκιμές των υλικών για οποιοδήποτε είδος εφαρμογής στο κέντρο εφαρμοσμένης τεχνολογίας της στο Ηνωμένο Βασίλειο, το οποίο διαθέτει μια πρόσφατα αποκτηθείσα πειραματική διάταξη για δοκιμές μετάδοσης κίνησης με οδοντωτούς τροχούς. Η πειραματική διάταξη διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά: μέγιστη ταχύτητα περιστροφής έως και 6.000 σ.α.λ., ροπή 40 Nm, ρυθμιζόμενη κεντρική απόσταση από 50 έως 150 mm OD, ευέλικτη διαμόρφωση για οδοντωτούς τροχούς με ευθεία και κεκλιμένη οδόντωση καθώς και για ατέρμονα κοχλία-τροχό σε ξηρές και λιπαινόμενες δοκιμές με θερμοκρασία λαδιού έως 150°C. Ακόμα διαθέτει μετατροπείς ροπής, βηματικούς κινητήρες με κωδικοποιητές στους άξονες εισόδου και εξόδου, δυναμική φόρτιση της οδοντωτής μετάδοσης και μετρητές σύνθετου σφάλματος, αποτελεσματικότητας, δυσκαμψίας και backlash. Από τα προαναφερθέντα καταλαβαίνουμε ότι οι δοκιμές έγιναν σε συνθήκες λειτουργίας χαμηλής ισχύος, αλλά γενικά δεν υπάρχουν ακόμα οχήματα παραγωγής υψηλής ισχύος στα οποία να έχει τοποθετηθεί αυτός ο άξονας εξισορρόπησης με πολυμερικούς οδοντωτούς τροχούς από PEEK.



*Σχήμα 83. Ο άξονας εξισορρόπησης της εταιρείας Metaldyne με οδοντωτούς τροχούς από PEEK [79]*





*Σχήμα 84. Η πειραματική διάταξη της εταιρείας Victrex [79]*

Οι χημικές ουσίες μπορούν να προκαλέσουν ρωγμές ή σε σοβαρές περιπτώσεις, να διαλύσουν τις θερμοπλαστικές ρητίνες [80]. Γενικά, οι κρυσταλλικές ρητίνες αντιστέκονται σε χημικές ουσίες καλύτερα από τις άμορφες ρητίνες. Οι άμορφες ρητίνες είναι επιρρεπείς σε χημική προσβολή (chemical attack) από αρκετούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες και ορισμένες αντιμετωπίζουν σπάσιμο λόγω πίεσης παρουσία λαδιών και γράσων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι προμηθευτές υλικών μπορεί να είναι σε θέση να προτείνουν ένα χημικά συμβατό γράσο ή μια εναλλακτική χημικά ανθεκτική ρητίνη για το πλαστικό μέρος. Οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν τη χημική προσβολή (chemical attack) στα θερμοπλαστικά. Σε σοβαρές περιπτώσεις, μια χημική ουσία που είναι αβλαβής σε κανονικές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει πίεση στη ρωγμή ή ακόμη και να διαλύσει ένα υλικό σε υψηλή θερμοκρασία. Σε κάθε ομάδα (κρυσταλλική ή άμορφη), οι ρητίνες με υψηλότερες θερμοκρασίες τήξης τείνουν να είναι πιο χημικά ανθεκτικές. Σε μία τυπική εφαρμογή των χημικά ανθεκτικών πολυμερικών υλικών, ένα αυτοκινούμενο χλοοκοπτικό χρησιμοποιεί δύο εμπρόσθιους κινητήριους τροχούς. Ένας εσωτερικός οδοντωτός τροχός κατασκευασμένος από χυτευμένο με έγχυση πολυπροπυλένιο με ενίσχυση από συνεχείς ίνες γυαλιού είναι φορμαρισμένος σε κάθε τροχό κίνησης. Οι συνεχείς ίνες παρέχουν μεγαλύτερη αντοχή στην κόπωση από τις κοντές ίνες. Το πολυπροπυλένιο αντιστέκεται στη χημική προσβολή (chemical attack) από λιπάσματα και φυτοφάρμακα στο γκαζόν και δεν σκουριάζει. Η χαμηλή απορρόφηση της υγρασίας βοηθά στη διατήρηση της ακρίβειας των διαστάσεων ακόμη και σε υγρό γρασίδι. Επίσης, η αυτο-λίπανσή του, επιτρέπει στον τροχό να τρέχει χωρίς γράσο που διαφορετικά θα μπορούσε να συλλέξει βρωμιά και άλλα λειαντικά υπολείμματα που μπορεί να προκαλέσουν πρόωρη αστοχία.



Σχήμα 85. Ένα σετ μετάδοσης για αυτοκινούμενο χλοοκοπτικό από Stanyl® TW200F6, ένα ενισχυμένο με 30% ίνες γυαλιού πολυαμίδιο 4/6 (PA46) [81]

Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τρία μέρη: έναν κινητήριο οδοντωτό τροχό, ένα μηχανικό συμπλέκτη και ένα πιρούνι απελευθέρωσης του συμπλέκτη [81]. Η υψηλότερη κρυσταλλικότητα και ο γρηγορότερος ρυθμός κρυστάλλωσης δίνουν στο Stanyl ένα τεχνικό πλεονέκτημα έναντι των μηχανολογικών πλαστικών όπως τις PA6, PA66, πολυεστέρες και άλλες ανθεκτικές στη θερμότητα ρητίνες όπως τα ημι-αρωματικά πολυαμίδια (PPA), PPS και LCP. Σε σύγκριση με αυτά, οι βαθμοί Stanyl δείχνουν καλύτερη αντοχή στη θερμότητα, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, καλύτερη συμπεριφορά φθοράς και τριβής, και καλύτερη απόδοση που απαιτείται για τον χειρισμό των δυνάμεων εμπλοκής και τη μεταφορά ενέργειας από τον κινητήρα στους κινητήριους τροχούς του χλοοκοπτικού.

## 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν μια σειρά πλεονεκτημάτων, όπως το γεγονός πως έχουν χαμηλή λίπανση, χρειάζονται μικρή ή καθόλου λίπανση, παράγουν χαμηλά επίπεδα θορύβου και η κατασκευή τους είναι στις περισσότερες περιπτώσεις ευκολότερη και φθηνότερη. Ωστόσο, έχουν σημαντικά χαμηλότερη αντοχή από τους κλασικούς μεταλλικούς τροχούς που χρησιμοποιούνται κατεξοχήν σήμερα.

Το χαρακτηριστικό αυτό οδήγησε τους μηχανικούς ερευνητές και παραγωγής, να χρησιμοποιήσουν τους πολυμερικούς τροχούς και να εκμεταλλευτούν τις ιδιότητές τους σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος. Κατ' εξοχήν στην αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά και σε άλλες εφαρμογές όπως σε μεταφορικές ταινίες, σε ηλιακούς συλλέκτες, σε συστήματα υπολογιστών και σε ιατρικά εργαλεία, οι πολυμερικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν αντικαταστήσει τους μεταλλικούς τροχούς και έχουν βελτιώσει τα χαρακτηριστικά της οδοντωτής μετάδοσης κίνησης. Μάλιστα, αν κανείς προσέξει τις ημερομηνίες κυκλοφορίας των εφαρμογών θα παρατηρήσει ότι η αύξησή τους με το πέρασμα το χρόνου είναι εκθετική.

Η μειωμένη αντοχή των πολυμερικών τροχών δεν έχει επιτρέψει την ευρεία χρήση των πολυμερικών οδοντωτών τροχών σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Τα αποτελέσματα όμως από την έρευνα που πραγματοποιείται σήμερα διεθνώς πάνω στον τομέα των πολυμερικών οδοντωτών τροχών δείχνει πως πολύ σύντομα θα μπορούν να χρησιμοποιούνται ακόμα και στις πιο απαιτητικές εφαρμογές. Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των πολυμερικών οδοντωτών τροχών και η εξέλιξη στον τομέα των σύνθετων υλικών έχουν επιτρέψει την επίτευξη αντοχών στο επίπεδο των μεταλλικών τροχών. Για αυτό το λόγο ήδη υπάρχουν κάποιες πρωτότυπες εφαρμογές υψηλής ισχύος κυρίως από το χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας όπου οι μεταλλικοί οδοντωτοί τροχοί έχουν αντικατασταθεί από πολυμερικούς. Οι ερευνητές συμφωνούν ότι μέσα στην επόμενη δεκαετία η χρήση των πολυμερικών οδοντωτών τροχών θα αυξηθεί δραματικά και για αυτό έχει μεγάλη αξία η έρευνα που πραγματοποιείται πάνω σε αυτούς, καθώς η συμπεριφορά τους σε δυναμικά συστήματα και σε συνθήκες κόπωσης είναι ακόμα και σήμερα λίγο-πολύ άγνωστη.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Chernets, M. V., Shil'ko, S. V., Pashechko, M. I., & Barshch, M. (2018). Wear resistance of glass-and carbon-filled polyamide composites for metal-polymer gears. *Journal of Friction and Wear*, 39(5), 361-364.
- [2] Dearn, K. D., Hoskins, T. J., Petrov, D. G., Reynolds, S. C., & Banks, R. (2013). Applications of dry film lubricants for polymer gears. *Wear*, 298, 99-108.
- [3] Dighe, A. D., Mishra, A. K., & Wakchaure, V. D. (2014). Investigation of wear resistance and torque transmission capacity of glass filled polyamide and PEEK composite spur gears. *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, 3(3), 299-303.
- [4] Aleksandar, D. I. M. I. C., Zarko, M., & Radivoje, M. (2018). The influence of material on the operational characteristics of spur gears manufactured by the 3d printing technology. *J Mech Eng Strojnícky ĀCasopis*, 68(3), 261-270.
- [5] Duhovnik, J., Zorko, D., & Sedej, L. (2016). The effect of the teeth profile shape on polymer gear pair properties. *TehniĀki vjesnik*, 23(1), 199-207.
- [6] DüzçükoĀlu, H. (2009). PA 66 spur gear durability improvement with tooth width modification. *Materials & Design*, 30(4), 1060-1067.
- [7] DüzçükoĀlu, H., Yakut, R., & Uysal, E. (2010). The use of cooling holes to decrease the amount of thermal damage on a plastic gear tooth. *Journal of failure analysis and prevention*, 10(6), 545-555.
- [8] Feng, J. L., & Qin, Y. (2014). Load bearing capacity investigation and coating failure mechanism for coated spur gears. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 446, pp. 491-496). Trans Tech Publications Ltd.
- [9] Gurunathan, C., Kirupasankar, S., & Gnanamoorthy, R. (2011). Wear characteristics of polyamide nanocomposite spur gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 225(5), 299-306.
- [10] Hasl, C., Illenberger, C., Oster, P., Tobie, T., & Stahl, K. (2018). Potential of oil-lubricated cylindrical plastic gears. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 12(1), JAMDSM0016-JAMDSM0016.
- [11] İmrek, H. (2009). Performance improvement method for Nylon 6 spur gears. *Tribology International*, 42(3), 503-510.
- [12] Jain, M., Patil, S., & Ghosh, S. S. (2019, September). A review on failure characteristics of polymeric gears. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2148, No. 1, p. 030057). AIP Publishing LLC.
- [13] Kalin, M., & Kupec, A. (2017). The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears. *Wear*, 376, 1339-1346.
- [14] Kleiss, R., & Ferfecki, F. J. (2011, January). Designing a Polymer Gear for Use in the Environment of an Internal Combustion Engine. In *International Design*

*Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 54853, pp. 515-521).

[15] Available in:

[http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1\\_Polimeri\\_Genika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1_Polimeri_Genika.pdf)

[16] Available in:

[http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)

[17] Available in:

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CF%85%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%AD%CF%82>

[18] Available in: [https://www.machinedesign.com/motors-](https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21833583/plastic-gears-more-durable-than-ever-plastics-get-in-gear)

[drives/article/21833583/plastic-gears-more-durable-than-ever-plastics-get-in-gear](https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21833583/plastic-gears-more-durable-than-ever-plastics-get-in-gear)

[19] Available in:

<https://www.machinedesign.com/materials/article/21836156/plastic-gears-are-the-future>

[20] Available in: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-92897-5\\_8292](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-92897-5_8292)

[21] Available in: <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21827920/getting-more-life-from-plastic-gears>

[22] Available in : <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21827920/getting-more-life-from-plastic-gears>

[23] Available in : <https://www.sprinterstore.com/product/ford-transit-van-automatic-electric-sliding-door-system-free-shipping/>

[24] Available in : <https://www.modifero.com/en/automatic-door-systems/66-ford-transit-automatic-sliding-door-kit.html>

[25] Available in : <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21827920/getting-more-life-from-plastic-gears>

[26] Available in : <https://www.yourmechanic.com/article/how-to-replace-a-cruise-control-vacuum-bleed-switch-by-timothy-charlet>

[27] Available in :

<https://www.easyapplianceparts.com/PartInfo.aspx?inventory=11743316&SourceCode=1&SearchTerm=ECKMF83&ModelNum=ECKMF83>

[28] Available in : <https://www.amazon.com/Whirlpool-IceMaker-Kit-ECKMFEZ2-Connect/dp/B00R8AEL9Q>

[29] Available in : <https://hdsupplysolutions.com/p/whirlpool-refrigerator-icemaker-drive-gear-p566659>

[30] Available in :

[http://hipolymers.com.ar/pdfs/celcon/aplicaciones/AP97\\_01%20Washing%20Machin e%20Transmission.PDF](http://hipolymers.com.ar/pdfs/celcon/aplicaciones/AP97_01%20Washing%20Machin e%20Transmission.PDF)

- [31] Available in : <https://gearsolutions.com/features/exploiting-the-potential-of-plastic-gears/>
- [32] Available in : <https://gearsolutions.com/features/a-plastic-gear-design-update/>
- [33] Available in : <http://www.imcparts.net/images/pdf/bmwpdf.pdf>
- [34] Available in : <https://www.empire dental.com.au/home/wp-content/uploads/2017/09/F1-User-Guide-EN.pdf>
- [35] Available in : <https://www.theengineer.co.uk/power-steering-with-plastic-wheels/>
- [36] Available in : [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05449-0\\_15](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05449-0_15)
- [37] Gupta, K., & Chatterjee, S. (2018). Analysis of design and material selection of a spur gear pair for solar tracking application. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 789-795.
- [38] Available in : <https://www.homemade-circuits.com/mppt-solar-tracker-difference/>
- [39] Available in : [https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_throttle\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_throttle_control)
- [40] Available in : <https://slideplayer.com/slide/12987336/>
- [41] Available in : <https://www.youtube.com/watch?v=nNVtnpVwDfw>
- [42] Available in : <https://vagrepaircenter.com/products/throttle-body-gear-repair-kit-vdo-audi-vw-seat-skoda-vw-tdi-sdi-tfsi>
- [43] Available in : <https://www.carid.com/articles/all-about-window-regulators-motors.html>
- [44] Available in : <https://mechanics.stackexchange.com/questions/32694/what-stops-a-car-window-from-falling-down>
- [45] Available in : <https://www.cashcarsbuyer.com/blend-door-actuator-symptoms/>
- [46] Available in : <https://www.silveradosierra.com/how-to-articles/how-to-fix-mode-blend-door-actuator-problems-t67473.html>
- [47] Available in : <https://www.iskra-mehanizmi.si/en/products/automotive/applications>
- [48] Available in : [https://www.mazda.com/en/innovation/technology/safety/active\\_safety/afs/](https://www.mazda.com/en/innovation/technology/safety/active_safety/afs/)
- [49] Available in : <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/adaptive-front-lighting-systems-afs/>
- [50] Available in : <https://www.loctekmotion.com/linear-actuator-insider/how-different-types-of-gears-in-a-linear-actuator-impact-its-life-and-performance/>
- [51] Available in : <https://t2conline.com/industrial-linear-actuators-as-the-automation-tool/>



[52] Available in : <https://www.motioncontroltips.com/differences-conventional-beltting-plastic-modular-beltting-conveying/>

[53] Kodeeswaran, M., Verma, A., Suresh, R., & Senthilvelan, S. (2016). Bi-directional and uni-directional bending fatigue performance of unreinforced and carbon fiber reinforced polyamide 66 spur gears. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(8), 1025-1033.

[54] Kukureka, S. N., Hooke, C. J., Rao, M., Liao, P., & Chen, Y. K. (1999). The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. *Tribology International*, 32(2), 107-116.

[55] Kurokawa, M., Uchiyama, Y., Iwai, T., & Nagai, S. (2003). Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced polyamide 12. *Wear*, 254(5-6), 468-473.

[56] Li, W., Wood, A., Weidig, R., & Mao, K. (2011). An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements. *Wear*, 271(9-10), 2176-2183.

[57] Mao, K. (2007). A new approach for polymer composite gear design. *Wear*, 262(3-4), 432-441.

[58] Mao, K., Chetwynd, D. G., & Millson, M. (2020). A new method for testing polymer gear wear rate and performance. *Polymer Testing*, 82, 106323.

[59] Meng, H., Sui, G. X., Xie, G. Y., & Yang, R. (2009). Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition. *Composites Science and Technology*, 69(5), 606-611.

[60] Petrov, D., Dearn, K., Walton, D., & Bancs, R. (2011). Some Experimental Results Concerning The Influence Of Surface Coatings From Solid Lubricants On The Wear Of Polymeric Gears. *Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv Fundamental Sciences and Applications*, 16, 6.

[61] Pogačnik, A., & Tavčar, J. (2015). An accelerated multilevel test and design procedure for polymer gears. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 961-973.

[62] Senthilvelan, S., & Gnanamoorthy, R. (2004, January). Performance and Failure Analysis of Injection Molded Carbon Reinforced Nylon Gears. In *Engineering Systems Design and Analysis* (Vol. 41731, pp. 331-335).

[63] Senthilvelan, S., & Gnanamoorthy, R. (2007). Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and glass fiber reinforced Nylon 6 spur gears. *Materials & design*, 28(3), 765-772.

[64] Senthilvelan, S., & Gnanamoorthy, R. (2004). Damage mechanisms in injection molded unreinforced, glass and carbon reinforced nylon 66 spur gears. *Applied Composite Materials*, 11(6), 377-397.

[65] Singh, P. K., & Singh, A. K. (2018). An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears. *Tribology International*, 118, 264-272.



- [66] Sobolak, M., Połowniak, P., Cieplak, M., Oleksy, M., & Bulanda, K. (2020). Application of polymeric materials for obtaining gears with involute and sinusoidal profile. *Polimery*, 65(7-8), 563-567.
- [67] Tavčar, J., Grkman, G., & Duhovnik, J. (2018). Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 12(1), JAMDSM0006-JAMDSM0006.
- [68] Walton, D., Cropper, A. B., Weale, D. J., & Meuleman, P. K. (2002). The efficiency and friction of plastic cylindrical gears Part 1: Influence of materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 216(2), 75-78.
- [69] Wright, N. A., & Kukureka, S. N. (2001). Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears. *Wear*, 251(1-12), 1567-1578.
- [70] Yakut, R., Düzcükoğlu, H., & Demirci, M. T. (2009). The load capacity of PC/ABS spur gears and investigation of gear damage. *Archives of Materials Science*, 42, 42.
- [71] Yousef, S., Khattab, A., Zaki, M., & Osman, T. A. (2013). Wear characterization of carbon nanotubes reinforced polymer gears. *IEEE transactions on nanotechnology*, 12(4), 616-620.
- [72] Zhang, Y., Pursell, C., Mao, K., & Leigh, S. (2020). A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears. *Tribology International*, 141, 105953.
- [73] Cathelin, J., de Vaujany, J. P., Guingand, M., & Chazeau, L. (2014). Loaded behavior of gears made of fiber-reinforced PA6. *Gear Technol*, 31, 54-60.
- [74] Available in : <https://www.plastics.gl/automotive/ford-gets-a-lift-from-plastic-gears/>
- [75] Available in : <https://www.materialsforengineering.co.uk/engineering-materials-features/polymers-find-use-in-engine-transmissions/61985/>
- [76] Available in : [https://medium.com/@dtvshredder\\_global/dtv-shredder-dealer-in-barrington-one-stop-trailer-shop-c43f044ed6f9](https://medium.com/@dtvshredder_global/dtv-shredder-dealer-in-barrington-one-stop-trailer-shop-c43f044ed6f9)
- [77] Available in : <https://www.geartechnology.com/issues/0910x/vehicle.pdf>
- [78] Available in : <https://www.dupont.com/knowledge/acetel-gears-lighter-drivetrains.html>
- [79] Available in : <https://www.geartechnology.com/issues/0610x/victrex.pdf>
- [80] Available in : <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21827920/getting-more-life-from-plastic-gears>
- [81] Available in : [https://www.pressreleasefinder.com/DSM\\_Engineering\\_Materials/DSMPR120/en/](https://www.pressreleasefinder.com/DSM_Engineering_Materials/DSMPR120/en/)