



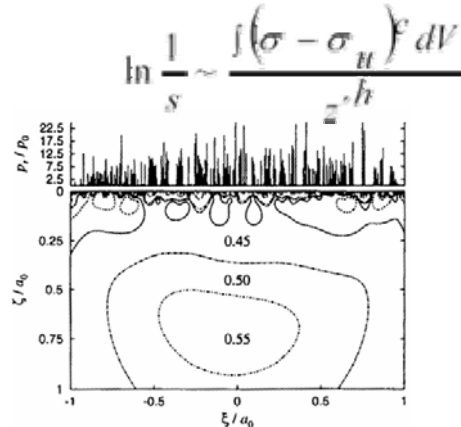
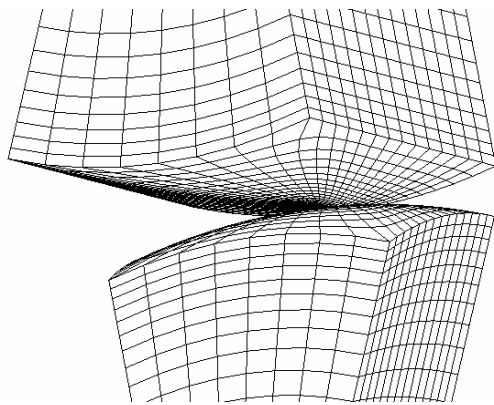
Ε.Μ.Π.

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική εργασία

Εκτίμηση διάρκειας ζωής υψηλώς φορτισμένων στοιχείων κύλισης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων



Φαφούτης Βασίλειος 02102042

Επιβλέπων καθηγητής: Κος Προβατίδης Χριστόφορος

Ιούλιος 2008

Abstract

Due to low frictional losses rolling contacts are often used in various applications e.g. in bearings, gears, rail wheel contacts and in cam-roller contacts of high pressure pumps. Beside the technological demand of high reliability under high loads, the lubrication with low viscosity lubricants, e.g. Diesel fuels, is a great challenge. Under such lubrication, the creation of only a marginal insufficient film thickness is achieved. Therefore, even with good surface finishing, a complete separation of the contacting bodies is not possible. During operation under mixed lubrication, micro contacts between asperities of the contacting surfaces are responsible for high local stresses and friction forces. Consequently, a reduction of the overall lifetime is expected. Interactions between lubricant and material under complex loading condition open a wide research field.

In highly loaded rolling contacts, surface fatigue is an unavoidable lifetime-limiting failure mechanism. For lifetime calculations many approaches are found in literature. Comparing stresses with material strength, local concepts and integral concepts that consider the whole stressed volume, fracture mechanics approaches etc. This work investigates the adaptability of the Weibull-statistics based rolling bearing fatigue life model according to Ioannides & Harris (ISO 281) through FEM simulations. Comparisons between experimental results obtained by a newly created test rig and simulations indicate the ability of the model to describe the influence of different mechanically introduced residual stresses and roughness profiles to the overall lifetime of highly loaded rolling contacts.

Keywords:

Rolling contact fatigue, FEM simulation, mechanically induced residual stresses, rough surfaces

Σύνοψη

Λόγω των πολύ χαμηλών απωλειών τριβής, στοιχεία κύλισης (rolling elements-contacts) χρησιμοποιούνται σε ένα πλήθος εφαρμογών, πχ. σε ρουλεμάν, τροχούς, επαφές κυλίνδρου έκκεντρου σε αντλίες Diesel υψηλής πίεσης κλπ. Εκτός από την τεχνολογική απαίτηση για αξιοπιστία ενός μηχανισμού ακόμη και σε συνθήκες μεγάλων φορτίων, η λίπανση με λιπαντικά χαμηλού ιξώδους π.χ. Diesel καύσιμα, αποτελεί μια σημαντική πρόκληση. Σε λειτουργία υπό τέτοιες συνθήκες λίπανσης, μόνο η δημιουργία ενός ανεπαρκούς οριακού λιπαντικού φιλμ είναι δυνατή. Για το λόγο αυτό, ανεξαρτήτως βαθμού επιφανειακής αποπεράτωσης, ο πλήρης διαχωρισμός των εφραπτόμενων στοιχείων δεν είναι δυνατός (μικτές συνθήκες - οριακή λίπανση). Κατά τη διάρκεια λειτουργίας κάτω από μικτές συνθήκες λίπανσης, οι μικρο-επαφές μεταξύ των επιφανειακών ανωμαλιών των τραχέων επιφανειών είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη υψηλών τοπικών τάσεων και δυνάμεων τριβής. Συνεπώς η μείωση της ολικής διάρκειας ζωής είναι αναμενόμενη. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του λιπαντικού και του υλικού των στοιχείων, σε συνθήκες σύνθετης φόρτισης, ανοίγουν ένα ευρύ τομέα έρευνας.

Στα υψηλώς φορτιζόμενα στοιχεία κύλισης η επιφανειακή κόπωση (rolling contact fatigue) είναι ένας αναπόφευκτος μηχανισμός περιορισμού της διάρκειας ζωής τους. Για την εκτίμησή της, πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία: Σύγκριση της μέγιστης ονομαστικής τάσης με το όριο αντοχής του υλικού, τοπικές και ολοκληρωτικές έννοιες, μέθοδοι μηχανικής θραύσης κλπ. Η παρούσα διπλωματική εξετάζει την προσαρμοστικότητα, στο εξεταζόμενο πρόβλημα, του εμπειρικού μοντέλου -βασισμένου στη θεωρία Weibull- πρόβλεψης διάρκειας ζωής εδράνων κυλίσεως Ioannides & Harris (ISO281) μέσω FEM. Συγκρίσεις μεταξύ τιμών αντοχής που αποκτήθηκαν από μια νέα πειραματική διάταξη δύο υψηλώς φορτιζόμενων δίσκων σε σχετική κύλιση και αποτελεσμάτων FEM προσομοίωσης αυτών, υποδεικνύουν τη δυνατότητα του μοντέλου να περιγράφει την επιρροή μηχανικώς προδιδόμενων παραμενουσών τάσεων, που προέρχονται από επιφανειακές κατεργασίες σκλήρυνσης, καθώς και διαφόρων προφίλ επιφανειακής τραχύτητας στη συνολική διάρκεια ζωής των δοκιμίων.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στο μάθημα «Ανάλυση μηχανολογικών κατασκευών», που διδάσκει ο κ. Καθηγητής Προβατίδης Χριστόφορος στο 4^ο εξάμηνο σπουδών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Τμήμα της εργασίας αυτής εκπονήθηκε στο τμήμα έρευνας και ανάπτυξης της εταιρείας Robert BOSCH GmbH, CR/ARU2 Struktur & Kontakt Dynamik στο Schillerhöhe, Stuttgart. Μέρους των αποτελεσμάτων δημοσιεύτηκαν στο συνέδριο Friction, Wear and Wear Protection, που οργανώθηκε από τη Deutsche Gesellschaft fuer Materialkunde , στο Aachen, Γερμανία, 9-11 Απριλίου 2008 (πιτλ. «*Fatigue life in rolling contacts with rough surfaces*»).

Θα ήθελα κατ αρχήν να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Καθηγητή μου κ. Προβατίδη, που μου έδωσε τη δυνατότητα να πραγματοποιήσω τη διπλωματική μου υπό την επίβλεψή του. Το ενδιαφέρον του, οι επιστημονικές παρατηρήσεις και οι υποδείξεις του συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση του παρόντος έργου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα μηχανολόγο μηχανικό του πανεπιστημίου Otto von Guericke Universitaet, Magdeburg κ. Michael Gleß, ερευνητή στο τμήμα CR-ARU2, Robert BOSCH GmbH - Schillerhöhe, Stuttgart, τμήμα της διδακτορικής διατριβής του οποίου αποτελεί το πειραματικό μέρος που επεξεργάζεται στην εργασία αυτή. Η πολύ καλή μας συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου, η εμπειρία του και η διαρκής προθυμία του να υποστηρίξει την προσπάθειά μου αυτή ήταν πολύτιμη. Ευχαριστώ επιπλέον τους Dr. Gernot Rephunn διευθυντή του τμήματος Diesel Systems - Entwicklung Technologie Diesel, Dr. Harald Schorr διευθυντή CR-ARU2 Kontakt Dynamik und Tribologie και Dr. Wienfried Keiper διευθυντή τμήματος CR-ARU Struktur und Kontakt Dynamik για τη συμβολή τους στη διεκπεραίωση της διπλωματικής μου. Ευχαριστώ τέλος τα υπόλοιπα μέλη του τμήματος CR-ARU2 καθώς και τους υπόλοιπους συνεργάτες του τομέα R&D της εταιρείας.

Η διπλωματική μου εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου που όλα τα χρόνια των σπουδών μου με στήριξε με πολύ αγάπη.

Περιεχόμενα

Abstract	2
Σύνοψη	3
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	5
1 Εισαγωγή	7
1.1 Παρουσίαση του προβλήματος	7
1.2 State of art	8
1.2.1 Κόπωση του υλικού	8
1.2.2 Μοντέλα πρόβλεψης διάρκειας ζωής	9
1.2.3 Εφαρμογή FEM στην τριβολογία	10
1.3 Στόχος και τρόπος προσέγγισης προβλήματος	12
2 Θεωρητική μελέτη τριβολογικών συστημάτων	13
2.1 Ομοιομορφία επιφανείας	13
2.1.1 Εισαγωγή – Ορισμός	13
2.1.2 Τραχύτητα επιφανείας	14
2.1.3 Σκληρότητα	18
2.1.4 Παραμένουσες τάσεις	19
2.2 Τριβή – Φθορά	22
2.2.1 Η έννοια της τριβής	22
2.2.2 Η έννοια της φθοράς	26
2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την τριβή και τη φθορά - Λίπανση	28
2.3 Πίεση Επιφανείας – Τάσεις Hertz	32
2.3.1 Πίεση επιφανείας - Τάσεις σε σημειακές / γραμμικές επαφές	33
2.3.2 Επίδραση της τραχύτητας	39
2.3.3 Ανταγωνιστικοί μηχανισμοί κόπωσης	41
3 Μοντέλα πρόβλεψης αντοχής	46
3.1 Εισαγωγή	46
3.2 Θεωρία του Weibull	47
3.3 Θεωρία των Lundberg & Palmgren	48
3.4 Μοντέλο των Ioannides & Harris	50
4 Πείραμα – Πρόβλεψη διάρκειας ζωής μέσω FEM	53
4.1 Περιγραφή του πειράματος	53
4.1.1 Πειραματική διάταξη	53
4.1.2 Μέτρηση μεγεθών	54
4.1.3 Δισκοειδή δοκίμια	55
4.1.4 Συνθήκες δοκιμών	55
4.2 Μοντελοποίηση FEM	57
4.2.1 3D Μοντέλο FEM	57
4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 3D	66
4.2.3 2D Μοντέλο FEM	70
4.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης 2D	77
4.3 Εκτίμηση διάρκειας ζωής	79
4.3.1 Εφαρμογή του μοντέλου Ioannides,-Harris	79
4.3.2 Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα	82

5	Επίλογος	89
5.1	Επισκόπηση.....	89
5.2	Μελλοντικοί στόχοι.....	90
	Παράρτημα	91
1	Κώδικας 3D μοντέλου.....	91
2	Κώδικας 2D μοντέλου.....	103
3	Κώδικας εφαρμογής μοντέλου IH.....	113
3.1	Για 3D προσομοίωση.....	113
3.2	Για 2D προσομοίωση.....	115
4	Κώδικας ανάγνωσης επιφανειακής πίεσης.....	117
	Βιβλιογραφία	119

1 Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση του προβλήματος

Τα στοιχεία κύλισης, λόγω κυρίως του υψηλού βαθμού απόδοσης και αξιοπιστίας τους και της παράλληλης δυνατότητας που προσφέρουν για αποφυγή εμφάνισης υψηλών τιμών τριβής, χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση υψηλών φορτίων σε ένα πλήθος εφαρμογών όπως π.χ. σε έδρανα κύλισης (ρουλεμάν), μηχανικά συστήματα έκκεντρου-κυλίνδρου κλπ. [1]. Όσο ευρύ όμως είναι και το πεδίο εφαρμογής τους, τόσο ποικίλα είναι και τα προβλήματα ως προς τη λειτουργία τους που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

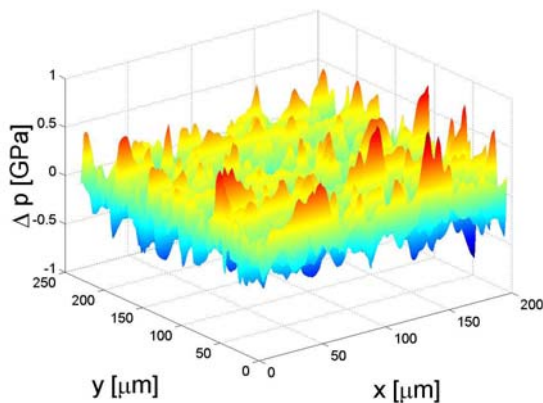


Σχήμα 1.1 : Παραδείγματα εφαρμογών μηχανισμών κύλισης

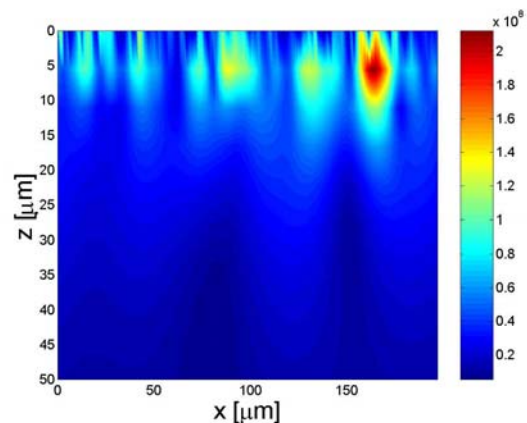
Η παρούσα εργασία μελετά, μέσω μοντελοποίησης σε περιβάλλον FEM, ένα πειραματικό ανάλογο μηχανισμού έκκεντρου-κυλίνδρου αντλίας Diesel υψηλής πίεσης. Τα εξεταζόμενα δοκίμια υποβάλλονται σε διάφορες επιφανειακές κατεργασίες σκλήρυνσης, με σκοπό τη μηχανική πρόσδοση παραμενουσών τάσεων σε αυτά και σε διάφορους βαθμούς επιφανειακής αποπεράτωσης, με σκοπό το καθορισμό της επιρροής αυτών των μεταβαλλόμενων παραγόντων στη συνολική αντοχή τους.

Ως λιπαντικό στις πειραματικές δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε καύσιμο Diesel, το οποίο αποτελεί και το μέσο στο οποίο εργάζεται το σύστημα έκκεντρου-κυλίνδρου της αντλίας. Εκτός των απαιτήσεων λοιπόν που τίθενται, για μεγάλη διάρκεια ζωής του τριβολογικού αυτού συστήματος σε υψηλά φορτία, στροφές και έντονες δυναμικές καταπονήσεις, η λειτουργία του με καύσιμο ως λιπαντικό αποτελεί μια επιπλέον τεχνολογική πρόκληση.

Ακριβέστερα, ιδιαίτερο πρόβλημα προξενούν οι κακές ιδιότητες του Diesel, σε σύγκριση με τα συχνά χρησιμοποιούμενα λιπαντικά υψηλού ιξώδους, που είναι συνήθως βελτιωμένα και με πρόσθετα [2]. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας των τριβολογικών συστημάτων, προτείνεται η χρήση λιπαντικών συγκεκριμένης τιμής ιξώδους για την επίτευξη της επιθυμητής διάρκειας ζωής τους [3]. Αν η συγκεκριμένη αυτή ιδιότητα του ρευστού είναι χαμηλή, τότε το πάχος του υδροδυναμικού φιλμ λίπανσης που δημιουργείται δεν είναι αρκετό για να διαχωρίσει πλήρως τις ανταγωνιστικές επιφάνειες. Έτσι ακόμη και σε περιπτώσεις υψηλού βαθμού αποπεράτωσης των επιφανειών, υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση λόγω των τραχυτήτων (μικτές συνθήκες λίπανσης) [4]. Οι μικρο-επαφές που δημιουργούνται είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη υψηλών τοπικών τάσεων, έντονων δυνάμεων τριβής και για την εμφάνιση άλλων ζημιωγόνων φαινομένων (π.χ. τριβοχημικά φαινόμενα κλπ). Έτσι, οι επιφάνειες καταπονούνται από έντονες δυναμικές φορτίσεις που προκαλούν την αστοχία του υλικού ακόμη και μετά από μικρό αριθμό κύκλων λειτουργίας [5].



Σχήμα 1.2 : Παράδειγμα επιφανειακών τοπικών πιέσεων λόγω τραχύτητας σε φορτισμένη επαφή πηγή: [1]



Σχήμα 1.3 : Παράδειγμα κατανομής ελαστικών υπό-επιφανειακών τάσεων λόγω τραχύτητας πηγή: [1]

Συμπερασματικά, η συμπεριφορά των μηχανισμών φθοράς λόγω των υψηλών επιφανειακών φορτίων και της αλληλεπίδρασης υλικού και λιπαντικού σε συνθήκες μικτής λίπανσης καθώς και ο τρόπος μείωσης της αρνητικής τους επίδρασης στη συνολική αντοχή του συστήματος ανοίγουν ένα ευρύ φάσμα έρευνας.

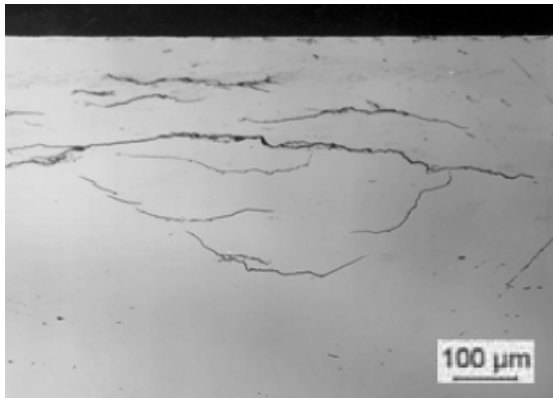
1.2 State of art

1.2.1 Κόπωση του υλικού

Σε υψηλώς φορτιζόμενα στοιχεία κυλίσεως, ακόμη και αν οι συνθήκες λειτουργίας τους είναι ιδανικές (σωστή λίπανση, πλήρης απουσία διαβρωτικών υλικών, αποφυγή δονήσεων), η φθορά λόγω κόπωσης θεωρείται ως ο αναπόφευκτος μηχανισμός μείωσης της διάρκειας ζωής τους [6].

Ως κόπωση ορίζεται η θραύση που προκύπτει κατόπιν εναλλασσόμενης, περιοδικής και συνεχιζόμενης φόρτισης ενός δοκιμίου, ακόμη και αν οι τιμή της μέγιστης τάσεως που αναπτύσσεται είναι μικρότερη της ονομαστικής τιμής της τάσης διαρροής. Υπό δυναμική καταπόνηση πραγματοποιούνται ποικίλες μικροπλαστικές διαδικασίες και μετατροπές, οι οποίες δρουν συγκεντρωτικά με το χρόνο. Κατόπιν αυτής της ακόμη «καθαρής» από οποιαδήποτε μακροσκοπική ρωγμή φάσης, ακολουθεί το στάδιο ανάπτυξης μικρο-ρωγμών που εμφανίζονται διάσπαρτες στον καταπονούμενο όγκο. Από αυτές δυνητικά θα προκύψει η ανάπτυξη του ελαττώματος (μακροσκοπική ρωγμή) που θα αποφέρει και την τελική θραύση. Η κόπωση εκ κύλισης εκδηλώνεται υπό τη μορφή εκκοιλάνσεων (pittings) στην επιφάνεια κύλισης.

Για την εκτίμηση της αντοχής σε κόπωση έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος μεθόδων. Αυτές κυρίως αφορούν στην εκτίμηση και περιγραφή των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω φόρτισης. Έτσι εμφανίζεται ένα πλήθος μοντέλων που βασίζονται από τη σύγκριση της μέγιστης ονομαστικής τάσης με το όριο αντοχής του υλικού [7], έως ολοκληρωματικές έννοιες που λαμβάνουν υπόψη συνολικά το πεδίο τάσεων [8]. Άλλες μέθοδοι είναι φυσικά τα μοντέλα της θραυστομηχανικής [9] που εξετάζουν την κατανομή των ελαττωμάτων στον υπό εξέταση όγκο, και πώς αυτά επιδρούν στη διάδοση και ανάπτυξη της ρωγμής.



Σχήμα 1.4 : Ρωγμές κόπωσης, υπό την επιφάνεια κύλισης που θα οδηγήσουν στην εμφάνιση pittings.
πηγή: SKF - Auslegekriterien fuer Waelzlager im Antriebsstrang von Windkraftanlagen



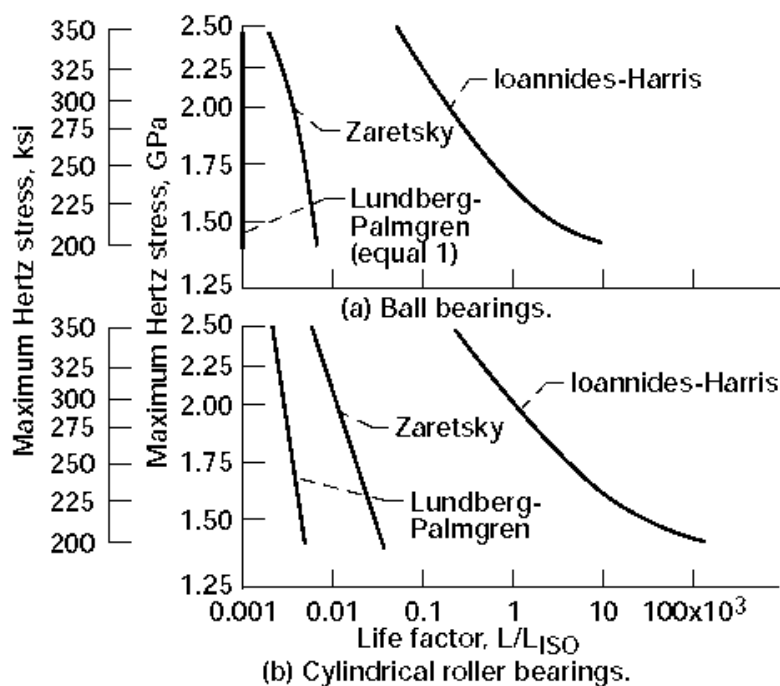
Σχήμα 1.5 : Pitting σε επιφάνεια κύλισης,
πηγή: FAG - Waelzlagerschaden

1.2.2 Μοντέλα πρόβλεψης διάρκειας ζωής.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα εμπειρικά μοντέλα που περιγράφουν την αντοχή εκ κύλισης και βασίζονται στην στατιστική θεωρία του Weibull. Αυτός από το 1939 είχε δείξει πως η κόπωση δοκιμίων μπορεί να περιγραφεί από μια διπαραμετρική κατανομή (κατανομή Weibull – weakest link model) [10]

Για το λόγο αυτό οι κατοπινοί του Lundberg και Palmgren εφάρμοσαν και επέκτειναν τη θεωρία του για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής σε εφαρμογές επιφανειακής κόπωσης στοιχείων κύλισης [11],[12]. Το αποτέλεσμα της έρευνας τους ήταν η ακόμη και σήμερα ισχύουσα θεωρία για την εκτίμηση διάρκειας ζωής τριβέων κύλισης.

Ακολούθησε πλήθος βελτιώσεων των συγκεκριμένων μοντέλων, όπως πχ με την εργασία του Tallian [13], Ioannides και Harris [14], κλπ με σκοπό την ακριβέστερη εκτίμηση της αντοχής στοιχείων όπως και την περιγραφή της επιρροής σε αυτήν διαφόρων επιπρόσθετων παραγόντων εκτός του φορτίου. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συμβολή του Ioannides, στην μοντελοποίηση της επίδρασης της επιφανειακής τραχύτητας και τριβολογικών αποβλήτων στη συνολική διάρκεια ζωής [15],[16]. Οι αναλυτικές εξισώσεις ισχύουν τελικά ως νόρμες κατά ISO 281 [17]. Περισσότερες λεπτομέρειες θα παρουσιαστούν σε κατοπινό κεφάλαιο (κεφ.3).

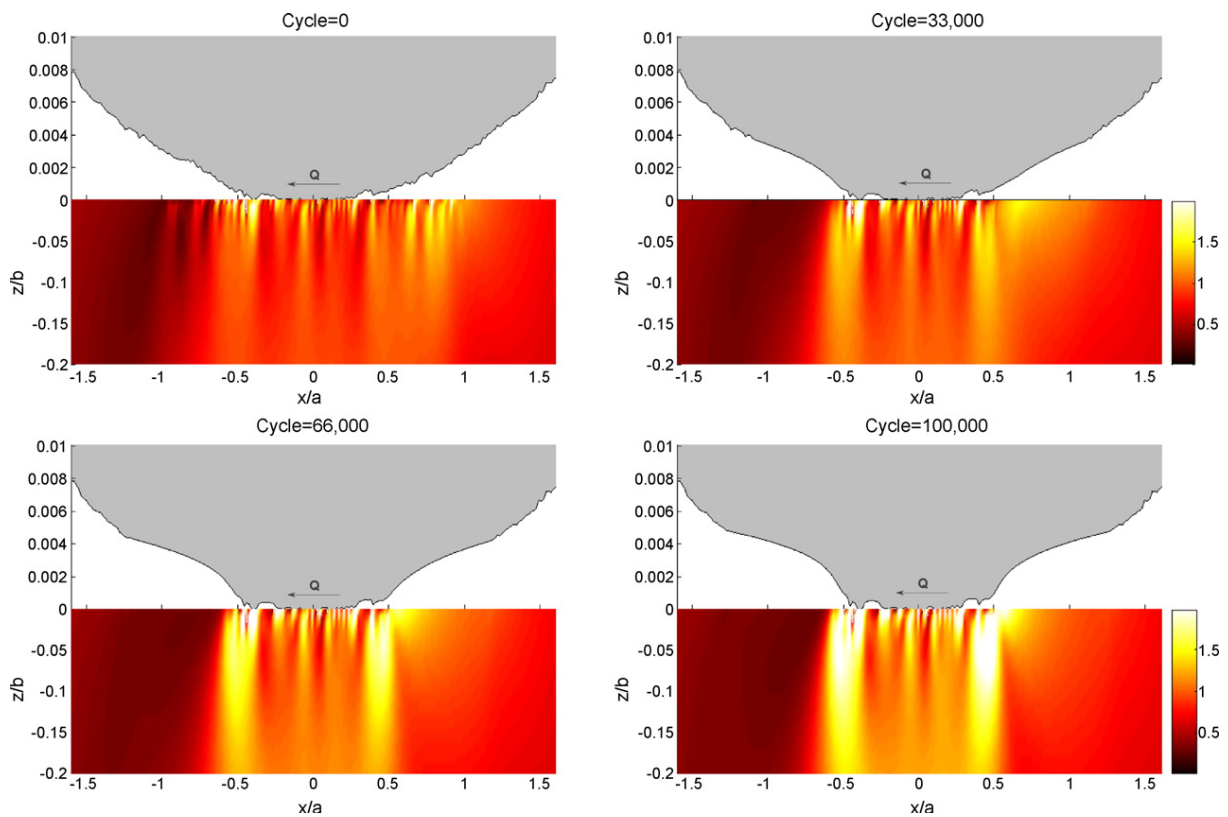


Σχήμα 1.6 : Σύγκριση μερικών θεωριών πρόβλεψης διάρκειας ζωής, πηγή [18]

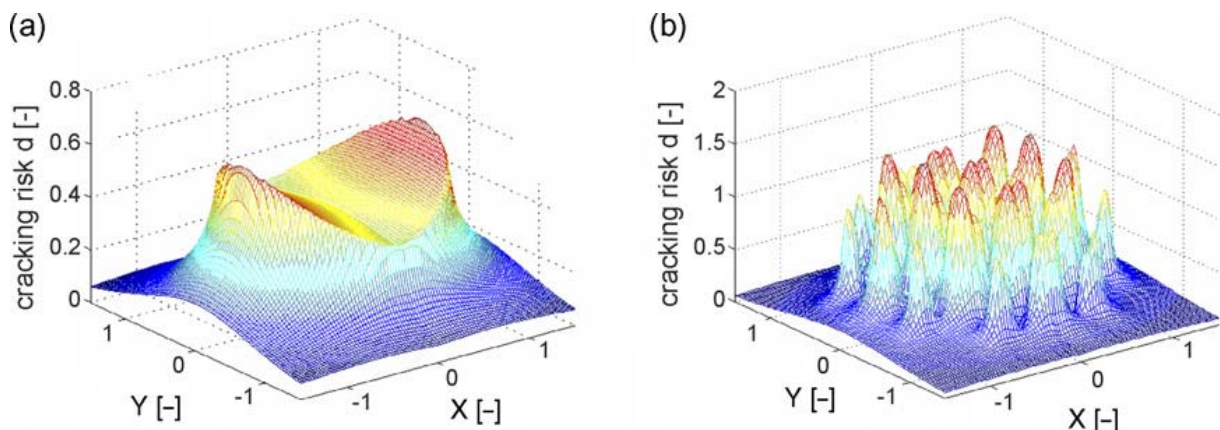
1.2.3 Εφαρμογή FEM στην τριβολογία

Λόγω της πολυπλοκότητας των τριβολογικών φαινομένων που οδηγούν σε κόπωση κατά τη διάρκεια κύλισης, οι αναλυτικές λύσεις που έχουν ως τώρα προταθεί πχ για τον υπολογισμό επιφανειακής πίεσης σε πραγματικές τραχείες επιφάνειες, κρίνονται ανεπαρκείς Έτσι τόσο σε επίπεδο ερευνητικό όσο και παραγωγής, επιστήμονες καταφεύγουν στην δημιουργία και εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης FEM.

Το προτέρημα που προσφέρουν τα πεπερασμένα στοιχεία είναι η δυνατότητα περιγραφής της ελαστοπλαστικής κυκλικής συμπεριφοράς των υλικών. Η βασική δυσκολία της μελέτης της επιφανειακής φθοράς είναι τα πολλαπλά επίπεδα που δρουν οι μηχανισμοί της [19]. Υπάρχουν άλλωστε θεωρίες που εξετάζουν τα φαινόμενα σε μοριακό επίπεδο (τριβοχημεία, μοριακή μηχανική) [20], σε μικροσκοπικό (μελέτη αλληλεπίδρασης μικροεπαφών λόγω τραχύτητας) [21] και μακροσκοπικά (ανάπτυξη – διάδοση ρωγμών κλπ.) [22],[9]. Η πλήρης κατανόηση των λόγων που προκαλούν την αστοχία των στοιχείων κύλισης γίνεται μόνο με το συνδυασμό των διαφόρων θεωριών σε όλες τις κλίμακες. Η τεράστια όμως υπολογιστική ισχύς που θα απαιτούσε ένα τέτοιο εγχείρημα καθιστά την όποια τέτοια προσπάθεια ακόμη απαγορευτική. Έτσι στη βιβλιογραφία [23],[24] συναντούνται προσπάθειες που εξετάζουν περιπτώσεις, με σημαντικές απλοποιήσεις (πχ. μελέτη φαινομένων σε απλοποιημένες 2D εφαρμογές, απουσία περιγραφής κυκλικής ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, μη περιγραφή επιρροής παραμενουσών τάσεων κλπ.). Η εφαρμογή λοιπόν των FEM στο συγκεκριμένο τομέα προσφέρει μεγάλα περιθώρια ανάπτυξης.



Σχήμα 1.7 : Von Mises τάσεις για τραχεία επιφάνεια $R_q=1$ πηγή: [22]



Σχήμα 1.8 : Πιθανότητα εμφάνισης ρωγμής α) απολύτως λείας επιφάνειας β) τραχείας επιφάνειας $R_q=2 \mu\text{m}$, $F=3300\text{N}$ πηγή [23]

1.3 Στόχος και τρόπος προσέγγισης προβλήματος

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η μοντελοποίηση στο περιβάλλον FEM ANSYS, πειραματικής διάταξης που αποτελείται από δυο υψηλώς φορτιζόμενα στοιχεία κύλισης σε μικτές συνθήκες λίπανσης. Σκοπός είναι, μέσω της επιπρόσθετης εφαρμογής εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης διάρκειας ζωής τριβέων κύλισης (Ioannides&Harris ISO281), η περιγραφή της επιρροής διαφόρων κατεργασιών επιφανειακής σκλήρυνσης και βαθμών επιφανειακής αποπεράτωσης στην αντοχή τους. Τελικώς θα επαληθευτούν τα αποτελέσματα μέσω σύγκρισης με πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα.

Τα κυριότερα βήματα είναι:

1. 3D μοντελοποίηση του συστήματος, υπό την επίδραση αξονικού φορτίου και τριβής εκ κυλίσεως και παράλληλη προσομοίωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού
2. Μοντελοποίηση της επίδρασης στο εντατικό πεδίο των δοκιμίων των μηχανικώς προσδιδόμενων παραμενουσών τάσεων προερχόμενων από επεξεργασίες shot peening (σφαιροβολής) και deep rolling
3. Προσέγγιση και μοντελοποίηση σε απλοποιημένη 2D προσομοίωση της επίδρασης επιφανειακής τραχύτητας σε 3 βαθμούς αποπεράτωσης
4. Εφαρμογή του εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης διάρκειας ζωής Ioannides & Harris (ISO 281)
5. Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι κώδικες των παραπάνω βημάτων δίδονται στο παράρτημα.

2 Θεωρητική μελέτη τριβολογικών συστημάτων

Τριβολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και/ή σχετική κύλιση μεταξύ τους. Ασχολείται κυρίως με τρία θέματα, την τριβή, τη φθορά και τη λίπανση. Η πρώτη είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αντιμετωπίζεται από τη μηχανική και, από τεχνικής απόψεως, από τη μηχανολογία. Η φθορά αποτελεί αντικείμενο μελέτης της επιστήμης των υλικών και της μεταλλουργίας, ενώ η λίπανση είναι κλάδος της χημείας, της χημικής τεχνολογίας και της ρευστομηχανικής. Επομένως η τριβολογία συνιστά ένα σύνθετο κλάδο, ο οποίος για να μελετηθεί απαιτούνται γνώσεις περισσότερων επιστημών.

2.1 Ομοιομορφία επιφανείας

2.1.1 Εισαγωγή – Ορισμός

Τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο, τόσο οι σχεδιαστές, όσο και οι κατασκευαστές φορτιζόμενων δομικών στοιχείων, δίνουν ιδιαίτερο βάρος στη μελέτη και την αναθεώρηση των βασικών αρχών και αλληλεπιδράσεων των μεθόδων παραγωγής, τόσο με τις μηχανικές ιδιότητες όσο και με τη λειτουργική συμπεριφορά των παραγόμενων επιφανειών.

Η ποιότητα μιας κατεργασμένης επιφάνειας καθίσταται ολοένα και σημαντικότερος παράγοντας, προκειμένου να επιτευχθεί η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η μεγαλύτερη, όσο το δυνατόν, διάρκεια ζωής μίας κατασκευής. Η συμβολή της επιφάνειας στη λειτουργική συμπεριφορά της κατασκευής γίνεται ουσιωδέστερη, εάν συνυπολογιστούν η τάση για μείωση του μεγέθους των κατασκευών και οι ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες μηχανικής και θερμικής φόρτισης.

Παρόλο που με τον όρο ποιότητα επιφανείας υπονοούνται τόσο τα γεωμετρικά, όσο και τα φυσικά, χημικά και κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά μιας κατεργασμένης επιφάνειας, στην πράξη ο όρος είχε ταυτιστεί με τη διαστατική ακρίβεια και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μορφολογία, τραχύτητα) της κατεργασμένης επιφάνειας. Έχει διαπιστωθεί ότι επιφάνειες με τα ίδια τοπογραφικά ή διαστατικά χαρακτηριστικά αλλά κατασκευασμένες με διαφορετικές κατεργασίες, παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά σε μηχανικές καταπονήσεις, διάβρωση, τριβή κλπ. Κατά συνέπεια, προκειμένου να συνδεθούν οι ιδιότητες μιας επιφάνειας με την κατεργασία από την οποία προήρθε και τη συμπεριφορά της σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, φόρτισης και περιβάλλοντος, κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή της έννοιας της πιστότητας ή ομοιομορφίας επιφανείας [25].

Ο όρος «ομοιομορφία επιφανείας» συσχετίζει τις φυσικές ιδιότητες και τη λειτουργική συμπεριφορά μιας επιφάνειας και εμπεριέχει πληροφορίες σχετικά με την επιφανειακή τοπογραφία και τη μεταλλουργία της επιφανείας. Ο όρος μεταλλουργία της επιφάνειας αναφέρεται στη μελέτη των ιδιοτήτων και των αλλαγών του επιφανειακού στρώματος που δημιουργείται στο υλικό, σαν αποτέλεσμα μιας κατεργασίας κοπής ή διαμόρφωσης. Περιλαμβάνει όλους τους τύπους επιφανειακών αλλαγών, όπως πλαστική παραμόρφωση, μεταβολή σκληρότητας, μετασχηματισμούς φάσεων, αλλαγή μικροδομής, πιθανή δημιουργία ρωγμών, παραμένουσες τάσεις, και τα μικροελλατώματα, εγγενή της κατεργασίας.

Γενικά η ομοιομορφία επιφάνειας καθορίζεται από μηχανικές θερμικές και χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του εργαλείου σε συσχέτισμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους της κατεργασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πλειονότητα των κατεργασιών, οι μηχανικές, οι θερμικές και οι χημικές φορτίσεις δρουν ταυτόχρονα. Η συσχέτιση επομένως των αλλαγών στο επιφανειακό στρώμα με κάθε συνιστώσα της φόρτισης είναι πολύ δύσκολη.

Η εκτίμηση της ομοιομορφίας της επιφάνειας γίνεται με χρήση παραμέτρων τριών επιπέδων, ανάλογα με τις υπάρχουσες απαιτήσεις σχεδιασμού και πραγματοποίησης μιας κατασκευής, πρόβλεψης και εκτίμησης μιας αστοχίας.

- Το πρώτο και **ελάχιστο επίπεδο** αφορά μεταλλογραφικές παρατηρήσεις, είναι το φθηνότερο να πραγματοποιηθεί και περιλαμβάνει εκτιμήσεις της **τραχύτητας της επιφάνειας, της μακροδομής** του επιφανειακού στρώματος και της **μικροδομής του** (μικρορωγμές, πλαστική παραμόρφωση, μετασχηματισμός φάσεων, ζώνες μειωμένων επιφανειακών ιδιοτήτων)

-Το δεύτερο και **τυπικό επίπεδο** περιλαμβάνει τις εκτιμήσεις του πρώτου επιπέδου και επιπλέον ενδεικτικές **δοκιμές κόπωσης, δοκιμές διάβρωσης υπό τάση και μέτρηση παραμενουσών τάσεων**

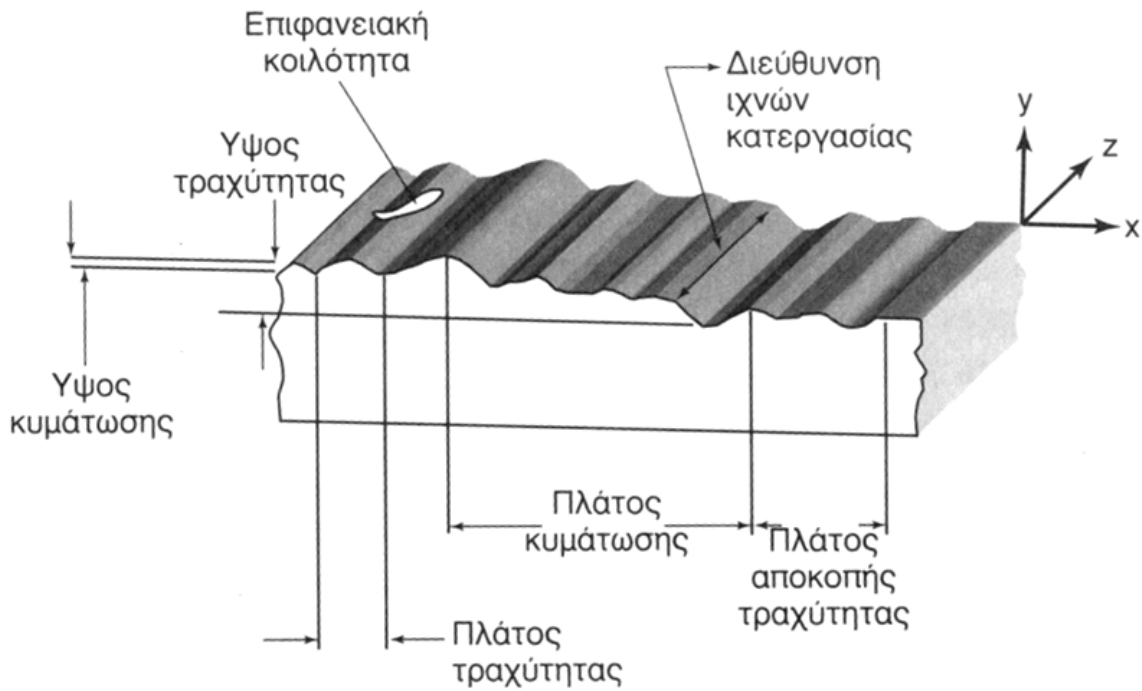
-Το τρίτο και **πλήρες επίπεδο** υλοποιείται σε περιπτώσεις έρευνας ανάπτυξης σχεδιασμού και παραγωγής και περιλαμβάνει τις εκτιμήσεις του τυπικού επιπέδου και επιπλέον **πλήρες δοκιμές κόπωσης, μηχανικές δοκιμές (εφελκυσμού, ερπυσμού, θραύσης)** και άλλες ειδικές δοκιμές κατά περίπτωση.

Οι κυριότερες παράμετροι της ομοιομορφίας επιφάνειας (τραχύτητα, σκληρότητα και παραμένουσες τάσεις) και οι αντίστοιχες μετρητικές δοκιμές παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.1.2 Τραχύτητα επιφανείας

Στη σύγχρονη τεχνολογία των μηχανουργικών κατασκευών η τραχύτητα επιφανείας παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση και ασφάλεια λειτουργίας των επιφανειών συναρμογής διαφόρων στοιχείων μηχανών και μηχανουργικών κατασκευών (ολισθήρες άξονες τρύματα οδοντωτοί τροχοί κλπ). Για τη σχεδίαση τεμαχίων, εκτός από τον προσδιορισμό των ανοχών των διαστάσεων, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του βαθμού τραχύτητας των αντίστοιχων επιφανειών.

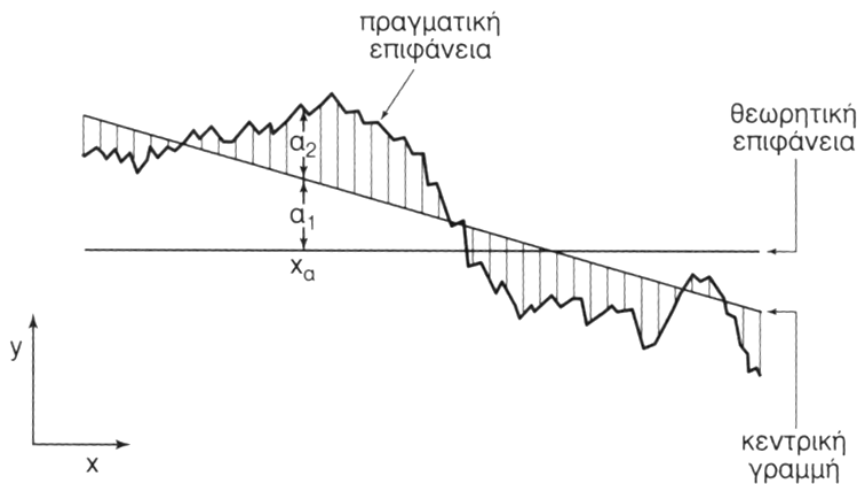
Ο όρος τραχύτητα της επιφανείας αναφέρεται στις επιφανειακές ανωμαλίες – εσοχές και εξοχές – που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της επιφανειακής κατεργασίας του υλικού. Η πλήρης ανάλυση των ανωμαλιών της κατεργασμένης επιφάνειας πρέπει να γίνεται σε τρεις διαστάσεις αφού θεωρητικά το ύψος z πάνω από τη θεωρητική λεία επιφάνεια του σώματος είναι της μορφής $z=z(x,y)$. Επειδή όμως στις περισσότερες μηχανουργικές κατεργασίες προκύπτει επιφάνεια με προσανατολισμένα χαρακτηριστικά (σχήμα 2.1) αρκεί η δισδιάστατη απεικόνιση της τοπογραφίας, δηλαδή $z=z(y)$.



Σχήμα 2.1 : Χαρακτηριστικά μεγέθη της τοπογραφίας μιας επιφάνειας

Γενικά η κάθετη τομή ενός υλικού κοντά στην επιφάνεια, παρουσιάζει τη μορφή του σχήματος 2.2. Σε τυχαία θέση x_a , η απόκλιση της πραγματικής από τη θεωρητική επιφάνεια δίνεται ως άθροισμα:

- α) Της απόκλισης a_1 μιας κεντρικής γραμμής της πραγματικής από τη θεωρητική επιφάνεια, λόγω κακής ρύθμισης της κατεργασίας και
- β) της απόκλισης a_2 λόγω ύπαρξης τοπικών εσοχών και εξοχών.



Σχήμα 2.2 : Απόκλιση της πραγματικής από τη θεωρητική επιφάνεια

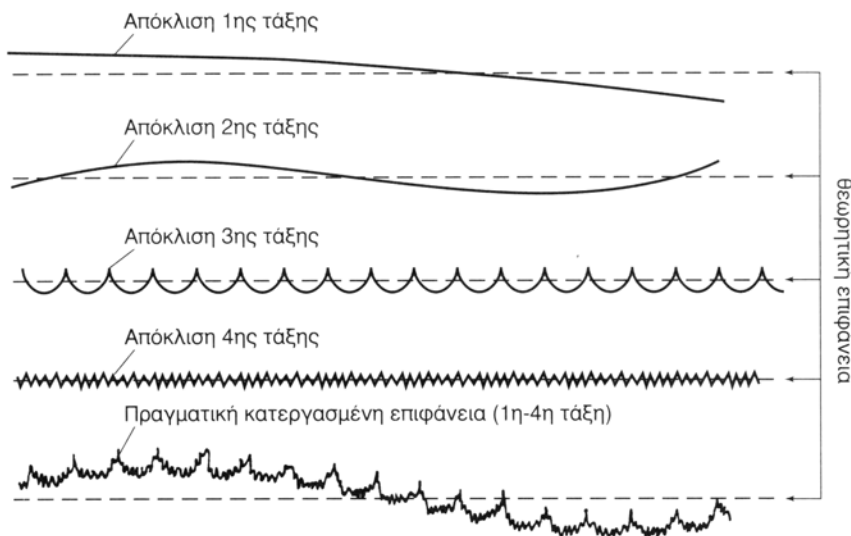
Λεπτομερέστερα η απόκλιση α_2 αποτελεί άθροισμα

α) Ανωμαλιών μεγάλου μήκους κύματος με τάξη μεγέθους 0,5-100 mm που αποκαλούνται κυμάτωση.

β) Ανωμαλιών μέσου μήκους κύματος με τάξη μεγέθους 1-100 μ m που καλούνται τραχύτητα.

γ) Ανωμαλιών μικρού μήκους κύματος, με τάξη μεγέθους 0,01-1 μ m, που καλούνται μικροτραχύτητα.

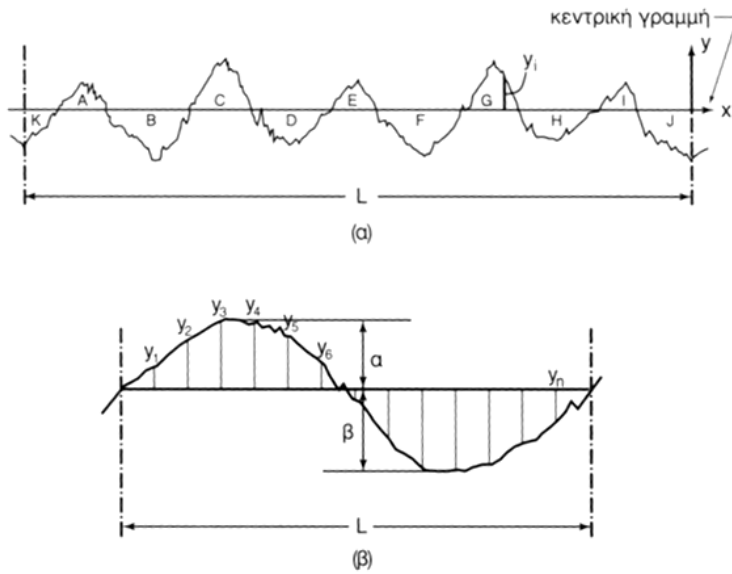
Αν ληφθούν και τα σφάλματα μορφής, οι επιφανειακές ανωμαλίες κατατάσσονται σε τέσσερις ομάδες ή τάξεις. Η πραγματική επιφάνεια προκύπτει από την υπέρθεση των αποκλίσεων 1^{ης} τάξης έως 4^{ης} τάξης (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 : Σύνθεση της πραγματικής επιφάνειας από αποκλίσεις 1^{ης} – 4^{ης} τάξης

Για τη περιγραφή των μικρογεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας και τη μέτρηση της τραχύτητας σε τομή κάθετη στην πραγματική επιφάνεια, έχουν προταθεί περισσότερες από 50 παράμετροι. Αυτές μπορούν να καταταγούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: παράμετροι ύψους, παράμετροι μήκους και υβριδικές παράμετροι. Στην πράξη για μια πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιούνται κυρίως οι παράμετροι ύψους οι οποίες αναφέρονται στις αποστάσεις μεταξύ κορυφών και κοιλάδων, χωρίς μνεία για τη μεταξύ του απόσταση.

Για τη μέτρηση της τραχύτητας ορίζεται κατ αρχήν ένα μήκος μέτρησης ή μήκος δειγματοληψίας. Στη συνέχεια ορίζεται μια γραμμή αναφοράς παράλληλη προς τη γενική διεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας βάσει της οποίας καθορίζονται οι κάθετες τοπικές αποκλίσεις y_1 . Η γραμμή αναφοράς καλείται και κεντρική γραμμή και βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε το αποκοπτόμενο εμβαδόν μεταξύ αυτής και του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας προς τα άνω να ισούται με το αποκοπτόμενο εμβαδόν μεταξύ αυτής και το πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας προς τα κάτω, για το προκαθορισμένο μήκος δειγματοληψίας (σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4 : Μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας α) Ορισμός της κεντρικής γραμμής ή γραμμής αναφοράς β) Προσδιορισμός των παραμέτρων ύψους

Με βάση τα προηγούμενα οι παράμετροι που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι

Η μέση τραχύτητα R_a :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad \text{ή} \quad R_a = \frac{|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n|}{n} \quad \text{εξ. 2.1}$$

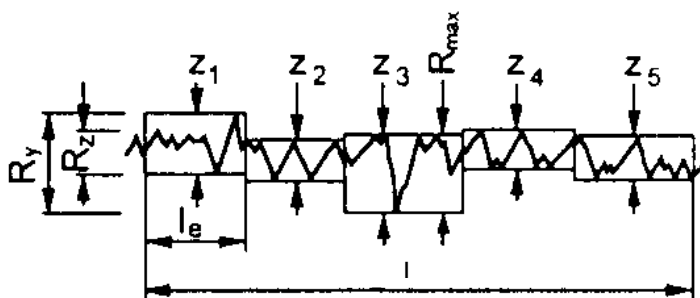
Η ενδεικνύμενη τραχύτητα R_q R_{RMS}

$$R_q = \left(\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx \right)^{1/2} \quad \text{ή} \quad R_q = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}} \quad \text{εξ. 2.2}$$

Τέλος ορίζεται ως R_{zDIN} (μέσο βάθος τραχύτητας) το μέγεθος

$$R_{zDIN} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 z_i \right), \quad \text{εξ. 2.3}$$

που αντιστοιχεί στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5 : Μέτρηση μέσου βάθους τραχύτητας

Παρόλο που οι προηγούμενες παράμετροι αρκούν για τον καθορισμό της τραχύτητας επιφανείας, το θέμα της αξιολόγησης της τραχύτητας της επιφανείας παρουσιάζει κενά και ελλείψεις εξαιτίας κυρίως της στοχαστικής φύσης των μικρογεωμετρικών χαρακτηριστικών και παραμένει ανοιχτό σε περαιτέρω έρευνα.

2.1.3 Σκληρότητα

Η μέτρηση της σκληρότητας, που ορίζεται ως η προβαλλόμενη από το σώμα αντίσταση στη διείσδυση σκληρότερου υλικού, χρησιμοποιείται συνήθως για τη μελέτη της κατάστασης των επιφανειακών στρωμάτων κατεργασμένου τεμαχίου σε συνάρτηση με τις παραμέτρους της κατεργασίας.

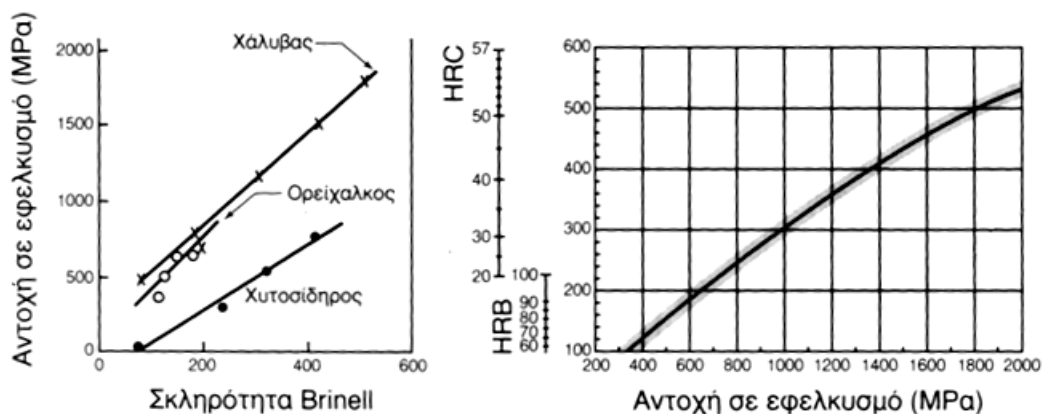
Συνήθως στις δοκιμές σκληρότητας εφαρμόζουμε σταθερή δύναμη σε μια αιχμή για καθορισμένο χρόνο. Το πηλίκο της δύναμης που χρησιμοποιήθηκε προς την επιφάνεια του αποτυπώματος που προκλήθηκε μας δίνει το μέτρο σκληρότητας.

Οι τιμές σκληρότητας χρησιμοποιούνται ως κριτήριο για τη σύγκριση των υλικών μεταξύ τους, το σχεδιασμό μηχανών και θερμικών κατεργασιών τους, τον έλεγχο της ποιότητας και τις τιμές των άλλων ιδιοτήτων τους.

Η σκληρότητα συνδέεται μάλιστα και με τις λοιπές μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού. Ωστόσο:

-Το όριο διαρροής (σ_y) των χαλύβων με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, συνδέεται με την σκληρότητα H με τη σχέση $H=3 \sigma_y$. Μια απλή μέτρηση της σκληρότητας μας επιτρέπει λοιπόν να εκτιμήσουμε το όριο διαρροής ενός τέτοιου χάλυβα με εύκολο και άμεσο τρόπο.

-Για ορισμένα κράματα έχει βρεθεί μια σχέση η οποία επιτρέπει την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής τους σε εφελκυσμό (σ_{TS}), γνωρίζοντας την τιμή της σκληρότητας με ακρίβεια 5-10% (σχήμα 2.6)

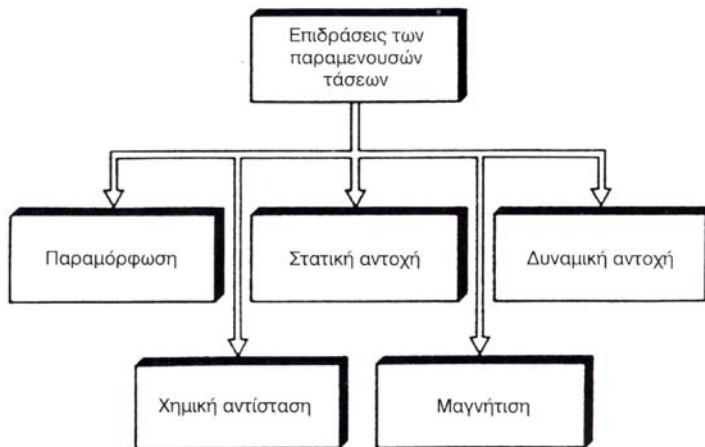


Σχήμα 2.6 : α) Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (σ_{TS}) σε συνάρτηση με τη σκληρότητα για τρία διαφορετικά κράματα : χάλυβα, ορείχαλκο και χυτοσίδηρο. β) Μεταβολή της σκληρότητας κοινών και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων σε συνάρτηση με την αντοχή που προβάλλουν σε εφελκυσμό. Πηγή [26]

Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, με διαφορετικό υλικό διεισδυτή, κλίμακα επιβαλλόμενων φορτίων και μετρούμενα μεγέθη. Οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης σκληρότητας είναι οι: Brinell, Vickers, Rockwell C and B, Knoop (μικροσκληρομέτρησης)

2.1.4 Παραμένουσες τάσεις

Ως παραμένουσες τάσεις ορίζονται οι αυτοίσοροπούμενες τάσεις που υπάρχουν σε ένα υλικό ή μια κατασκευή, όταν απουσιάζουν οι εξωτερικές δυνάμεις και ροπές. Σήμερα είναι γενικά παραδεκτό ότι στην πράξη δε μπορεί να υπάρξει υλικό ή κατασκευή χωρίς παραμένουσες τάσεις. Οι παραμένουσες αυτές τάσεις είναι συνάρτηση των θερμικών και μηχανικών δράσεων που εμφανίζονται κατά την διάρκεια των κατεργασιών κοπής, διαμόρφωσης, συγκόλλησης ή αποπεράτωσης και επηρεάζουν πάρα πολύ τη λειτουργική συμπεριφορά της κατεργασμένης επιφάνειας. Για την εκτίμηση της επίδρασής τους δε συγκεκριμένα στην κόπωση εκ κύλισης εμφανίζεται στη βιβλιογραφία ένα πλήθος προσπαθειών. [27],[28],[29]



Σχήμα 2.7 : Επίδραση των παραμενουσών τάσεων στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των κατεργασμένων υλικών *Πηγή [25]*

Οι παραμένουσες τάσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες [30]:

Οι **μάκρο-παραμένουσες τάσεις** είναι σταθερές κατά μέτρο και διεύθυνση σε μια σχετικά μεγάλη περιοχή του υλικού, -πολλοί κόκκοι- και αθροιζόμενες στο συνολικό όγκο του υλικού ή της κατασκευής, βρίσκονται σε ισορροπία. Δηλαδή, η συνισταμένη δύναμη και η συνισταμένη ροπή πρέπει να είναι μηδέν σε κάθε τομή του υλικού:

$$\int \sigma_R dA = 0 \quad \text{και} \quad \int dM = 0 \quad \text{εξ. 2.4}$$

Με βάση τις πιο πάνω συνθήκες, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της ορθότητας των αποτελεσμάτων κατανομών παραμενουσών τάσεων, προερχόμενων είτε από πειραματικές μετρήσεις είτε από μαθηματικούς υπολογισμούς.

Οι **Μίκρο-παραμένουσες τάσεις** είναι ομογενείς σε μικρά τμήματα του υλικού –σ ένα κόκκο ή σε μέρος αυτού- και δεν επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλικού ή της κατασκευής, μακροσκοπικά. Από τεχνολογική άποψη, ενδιαφέρον παρουσιάζουν κυρίως οι μάκρο-τάσεις.

Παραμένουσες τάσεις σε μεταλλικές κατασκευές δημιουργούνται σε διάφορα στάδια κατεργασίας των υλικών: κατά τη διάρκεια ψυχρής και θερμής μορφοποίησης, κατά την επιφανειακή μηχανική κατεργασία, κατά τη θερμική κατεργασία, σε συγκολλήσεις, σε (κακές) συναρμογές. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι παραμένουσες τάσεις αναπτύσσονται λόγω ανομοιόμορφης κατανομής μη ελαστικών, μόνιμων παραμορφώσεων και μπορεί να έχουν θετική ή και αρνητική επίδραση στην στατική/δυναμική αντοχή, τη χημική αντίσταση ενός δοκιμίου κλπ.

Έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος μηχανικών, θερμικών, θερμοχημικών τεχνικών επιφανειακής σκλήρυνσης (άρα και πρόσδοσης παραμενουσών τάσεων). Τα δοκίμια που προσομοιώθηκαν έχουν υποστεί δύο ειδών κατεργασίες οι οποίες και παρουσιάζονται παρακάτω.

Σφαιροβολή (shot peening)

Πρόκειται ίσως για την κυριότερη τεχνική μηχανικής επιφανειακής σκλήρυνσης. Κατά τη σφαιροβολή, δέσμη ταχέως κινούμενων σφαιριδίων, -συνήθως από χάλυβα, γυαλί ή κεραμικό- προσκρούει στην προς σκλήρυνση επιφάνεια και προκαλεί την πλαστική παραμόρφωση των επιφανειακών στρωμάτων του υλικού, γεγονός που οδηγεί σε μεταβολή του πεδίου των τάσεων.

Η εκτόξευση των σωματιδίων επιταχύνεται με επιτάχυνσή τους μέσα σε ρευστό μέσον και μετά την πρόσκρουσή τους στη μεταλλική επιφάνεια ανακυκλώνονται, προκειμένου να επαναληφθεί η σφαιροβολή.

Οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπ όψιν κατά τη σφαιροβολή είναι: το υλικό και η διάμετρος των σφαιριδίων, η κινητική τους ενέργεια κατά την εκτόξευση, και η γωνία πρόσπτωσής τους. Με την κατάλληλη επιλογή των τιμών των ανωτέρω παραμέτρων εισάγονται στα επιφανειακά στρώματα των μεταλλικών επιφανειών θλιπτικές εσωτερικές τάσεις, οι οποίες προκαλούν αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας, βελτίωση της αντοχής του υλικού σε κόπωση και αύξηση της αντοχής του σε διάβρωση υπό τάση [31],[32].

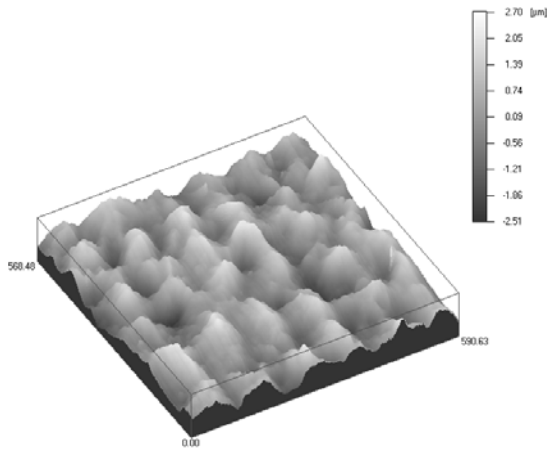
Deep rolling

Κατά τη κατεργασία deep rolling, σφαίρα ή καμπύλο ραούλο, συνήθως από χάλυβα ή κεραμικό, κυλίνεται υπό υψηλό φορτίο στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, παραμορφώνοντας την πλαστικά και προσδίδοντάς της θλιπτικές παραμένουσες τάσεις.

Οι κυριότερες παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπ όψιν κατά την κατεργασία αυτή είναι η διάμετρος της σφαίρας, το υλικό της, το φορτίο το οποίο ασκείται και ο βαθμός σχετικής της ολίσθησης στην επιφάνεια.

Στην περίπτωση του deep rolling, το βάθος επηρεασμού (περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης) είναι μεγαλύτερο από αυτό της σφαιροβολής.

Τέλος να σημειωθεί πως το είδος του εντατικού πεδίου που προκύπτει από τις παραπάνω κατεργασίες, παρότι δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά, βασίζεται στα φαινόμενα που περιγράφει η θεωρία του Hertz (κεφ.2.3)



Σχήμα 2.8 : Παράδειγμα επιφάνειας μετά από κατεργασία shot peening ενός εξεταζόμενου από την παρούσα εργασία δοκιμίου. Διακρίνονται τα ίχνη των σφαιρών που προσέκρουσαν στην επιφάνεια.



Σχήμα 2.9 : Παράδειγμα διάταξης κατεργασίας Deep Rolling. Στην εικόνα διακρίνονται δυο ραούλα και το κυλινδρικό κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Μέτρηση των παραμενουσών τάσεων

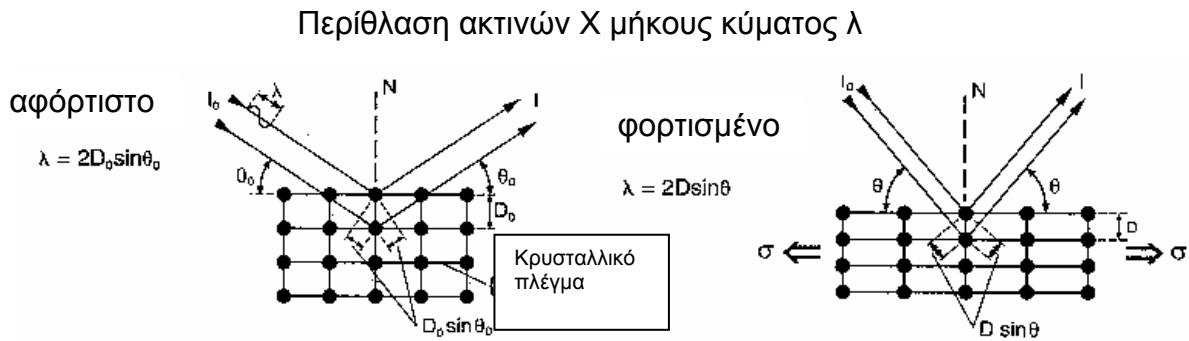
Εκτός ειδικών πολύ απλών περιπτώσεων, οι παραμενουσες τάσεις δεν μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά, ιδιαίτερα σε στην περίπτωση σύνθετων μηχανουργικών κατεργασιών. Κατά συνέπεια, και δεδομένης της σημασίας και της επίδρασής τους στη δομική ακεραιότητα των κατασκευών, ο ασφαλέστερος τρόπος για την εκτίμηση των παραμενουσών τάσεων είναι ο πειραματικός προσδιορισμός και η μέτρησή τους, χωρίς να επηρεάζεται κατά το δυνατόν η τελική λειτουργικότητα του υλικού ή του εξαρτήματος, - μη καταστροφική μέτρηση παραμενουσών τάσεων.

Από το σύνολο των μεθόδων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [25] για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων, στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί η μόνο η ομάδα που πραγματοποιείται με τεχνικές περίθλασης ακτίνων X, που άλλωστε χρησιμοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης των δοκιμίων.

Η μέθοδος των ακτίνων X βασίζεται στη μέτρηση της μεταβολής των αποστάσεων των ατομικών επιπέδων, της πλαστικής παραμόρφωσης δηλαδή, που οφείλεται στην ολίσθηση των πλεγματικών επιπέδων μεταξύ τους, κάτω από την επίδραση εσωτερικών ή εξωτερικών δυνάμεων. Σε κάθε περίπτωση, η μεταβολή της ενδοατομικής απόστασης είναι ανάλογη της επιβαλλόμενης τάσης.

Η τεχνική μέτρησης παραμενουσών τάσεων με ακτίνες X είναι δυνατή επειδή το μήκος κύματος των ακτίνων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενδοατομική απόσταση στους μεταλλικούς κρυστάλλους. Το μικρό μήκος κύματος των ακτίνων X καθιστά δυνατή τη διείσδυσή τους στ κρυσταλλικό πλέγμα, κατά ένα ποσοστό, και την ανάκλασή τους πάνω στα πλεγματικά επίπεδα (σχήμα 2.9). Η ένταση των διαθλωμένων ακτίνων καταγράφεται είτε με φωτογραφική μέθοδο, είτε με τη χρήση ειδικά κατασκευασμένου περιθλασίμετρου ακτίνων X.

Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα εύκαμπτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την εργοστασιακή in situ μέτρηση τάσεων με φορητό εξοπλισμό, μέχρι τον πλήρη εργοστασιακό καθορισμό του τανυστή τάσεων. Όταν, όμως, υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις για ακρίβεια και πλήρη καθορισμό τάσεων, η μέθοδος καθίσταται χρονοβόρα και δαπανηρή.



Αρχή υπολογισμού

$$\varepsilon = \frac{D - D_0}{D_0} = -(\theta - \theta_0) \cot \theta_0$$

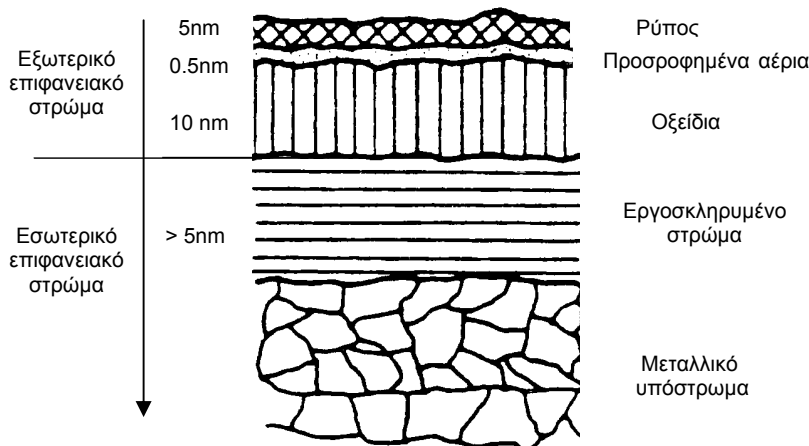
Σχήμα 2.10 : Αρχή μέτρησης παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X

2.2 Τριβή – Φθορά

2.2.1 Η έννοια της τριβής

Εξωτερική τριβή ή απλούστερα τριβή (friction) λέγεται το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο σε δύο επαπτόμενα σώματα το ένα ανθίσταται στην κίνηση ή την τάση να κινηθεί του άλλου. Αντιδιαστέλλεται δε προς την εσωτερική τριβή των υλικών που αναφέρεται στην τριβή των μορίων ενός σώματος μεταξύ τους κατά την παραμόρφωσή του.

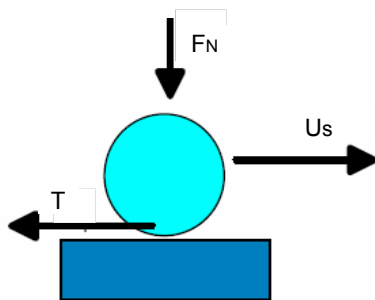
Η τριβή των στερεών είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που δρουν στο τριβολογικό σύστημα και μάλιστα στην πραγματική επιφάνεια επαφής και στα στρώματα του υλικού που βρίσκονται κάτω από αυτή και σε μικρό σχετικά βάθος [33].



Σχήμα 2.11 : Στρωματική σύνθεση της μεταλλικής επιφάνειας

Με τον ίδιο όρο τριβή αδιάκριτα, χαρακτηρίζεται και η αναπτυσσόμενη λόγω του φαινομένου της τριβής, εφαπτομενική δύναμη τριβής T που ανθίσταται στην σχετική κίνηση δυο σωμάτων και κατά συνέπεια έχει διεύθυνση αντίθετη προς τη διεύθυνση της σχετικής τους ταχύτητας U_s (σχήμα 2.12)

Συντελεστής τριβής ορίζεται ο λόγος της δύναμης της τριβής προς την κάθετη προς τη διεύθυνση της κίνησης συνιστώσα των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν στο σύστημα:



$$\mu = \frac{T}{F_N} \quad \text{εξ. 2.5}$$

Σχήμα 2.12 : Θεωρητικό τριβολογικό μοντέλο

Ανάλογα με το είδος της σχετικής κίνησης των δύο επαπτόμενων σωμάτων (δηλαδή των στοιχείων του τριβικού συστήματος) διακρίνεται η τριβή σε τριβή ολίσθησης και τριβή κύλισης. Στην τριβή κύλισης το ένα από τα δύο στοιχεία του τριβολογικού συστήματος περιστρέφεται γύρω από ένα στιγμιαίο κέντρο περιστροφής που βρίσκεται επί της επιφάνειας επαφής των δυο σωμάτων και η οποία συνεχώς μεταβάλλεται.

Σχετικά με τη φύση του φαινομένου της τριβής αναπτύχθηκαν κατά καιρούς διάφορες θεωρίες που παρουσιάζονται στη συνέχεια [25]:

Μηχανική θεωρία : σύμφωνα με αυτή, το έργο της τριβής αναλώνεται για την ανύψωση των επιφανειών ανωμαλιών της μιας επιφάνειας πάνω από τις ανωμαλίες της άλλης. Είναι η παλιότερη επιστημονική ερμηνεία του μηχανισμού της τριβής και θεωρείται ότι μπορεί να αποδώσει με καλή προσέγγιση την πραγματικότητα μόνο για πολύ τραχείες και απαραμόρφωτες επιφάνειες, αλλά και πάλι δεν μπορεί να εξηγήσει τη δια τριβής παραγόμενη θερμότητα.

Μοριακή θεωρία : Σύμφωνα με αυτή, τα έργα της τριβής αναλώνεται για την υπερνίκηση των δυνάμεων που οφείλονται σε μοριακή έλξη μεταξύ των δύο στερεών. Η μοριακή έλξη μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα και τη δημιουργία δεσμών συγκόλλησης (δηλαδή θερμικών δεσμών που προέρχονται από τη σύντηξη των επιφανειών λόγω των τοπικά αναπτυσσόμενων υψηλών θερμοκρασιών) μεταξύ των επιφανειακών ανωμαλιών των δυο επιφανειών που η τριβή πρέπει να υπερνικήσει(δηλαδή να θραύσει τους δεσμούς) για να υπάρξει σχετική κίνηση.

Η μοριακή θεωρία παρουσιάζει τις εξής αδυναμίες:

- Οδηγεί ουσιαστικά σε τριβή ανεξάρτητη της ταχύτητας πράγμα που έχει ελεγχθεί πειραματικά σαν ανακριβές.
- Δεν μπορεί να εξηγήσει την ανάπτυξη θερμικών δεσμών όταν η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος είναι τόσο χαμηλή ώστε να μην μπορεί να γίνει η λεγόμενη ενδοδιάχυση των επιφανειακών ατόμων που είναι ο κύριος μηχανισμός πρόσφυσης κατά τη μοριακή Φυσική.
- Επίσης δεν εξηγεί πως τα ψαθυρά αμέταλλα υλικά, που δεν παρουσιάζουν καθόλου πλαστική παραμόρφωση πριν την αστοχία.
- Οι θεωρητικές τιμές τριβής που προκύπτουν από την μοριακή θεωρία είναι, τις περισσότερες φορές, σημαντικά διαφορετικές από τις πειραματικά μετρούμενες.

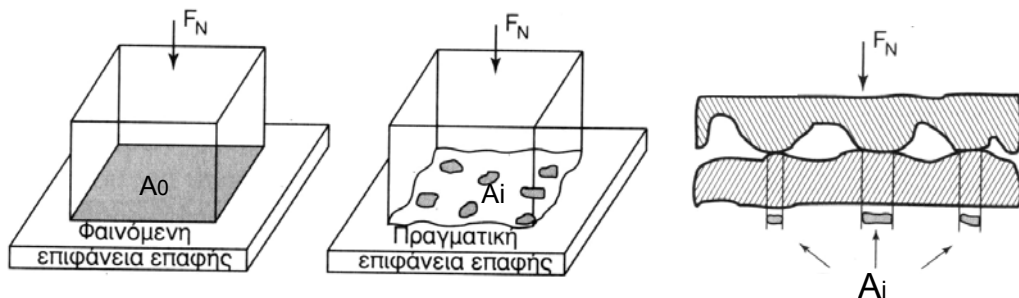
Θεωρία διείσδυσης : Το έργο της τριβής αναλώνεται για να παραμορφωθεί (πλαστικά) ορισμένος όγκος του ενός σώματος εξ αιτίας της διείσδυσης των επιφανειακών ανωμαλιών του άλλου σώματος μέσα στη μάζα του.

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, αφού μετά από κάθε πείραμα τριβής παρουσιάζεται στην επιφάνεια, του μαλακότερου από τα δυο στοιχεία του συστήματος, ίχνος ολίσθησης με μορφή αύλακος και χείλη από πλαστικά παραμορφωμένο υλικό, θα πρέπει οι ανωμαλίες του σκληρότερου υλικού να διείσδυναν μέσα στη μάζα του μαλακότερου και να δημιουργήσαν κατά την ολίσθηση αύλακα. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται μηχανισμός άρωσης.

Προφανώς η θεωρία αυτή δεν μπορεί να ερμηνεύσει την τριβή, όταν η διείσδυση είναι αμελητέα (πολύ λείες επιφάνειες και κατά συνέπεια μεγάλη πραγματική επιφάνεια επαφής A , ίδια σκληρότητα των στοιχείων του τριβολογικού συστήματος κλπ)

Μοριομηχανική θεωρία : Αποτελεί συνδυασμό των τριών παραπάνω και σήμερα γίνεται γενικά αποδεκτή δεδομένου ότι ερμηνεύει ικανοποιητικά τα παρατηρούμενα φαινόμενα.

Αν θεωρήσουμε ένα τριβολογικό σύστημα ολίσθησης με πραγματικές επιφάνειες (σχήμα 2.13), η θεωρία αυτή δέχεται ότι:

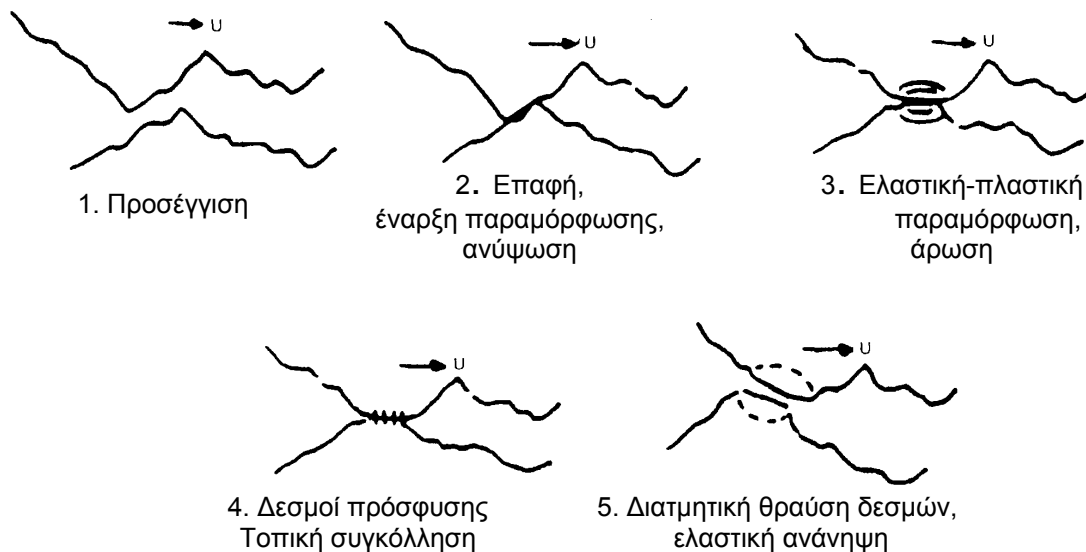


Σχήμα 2.13 : Πραγματική επιφάνεια επαφής

- Η πραγματική επιφάνεια επαφής, περιορίζεται σε μικρό αριθμό μικροσημείων (μικροεπαφές) και είναι πολύ μικρότερη της ονομαστικής επιφάνειας επαφής A_0 .
- Το φορτίο παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από την πραγματική επιφάνεια επαφής.
- Σε κάθε μικροεπαφή παρατηρείται είτε μόνο ελαστική παραμόρφωση είτε ελαστική και στη συνέχεια πλαστική.
- Στις μικροεπαφές αναπτύσσονται δεσμοί πρόσφυσης που οφείλονται σε δυνάμεις μοριακές, ιοντικές ή χημικού δεσμού (ανάλογα με τη φύση του υλικού)

Η τριβή οφείλεται αποκλειστικά σε αλληλεπίδραση των επιφανειακών ανωμαλιών. Η αλληλεπίδραση αυτών μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω στάδια σχήμα 2.12:

- Προσέγγιση και επαφή των επιφανειακών ανωμαλιών. Έναρξη ελαστικής παραμόρφωσης της επιφανειακής ανωμαλίας και/ή ανύψωσή της πάνω από τις ανωμαλίες της άλλης επιφάνειας.
- Πλαστική παραμόρφωση της επιφανειακής ανωμαλίας.
- Άρωση
- Διατμητική θραύση των δεσμών πρόσφυσης



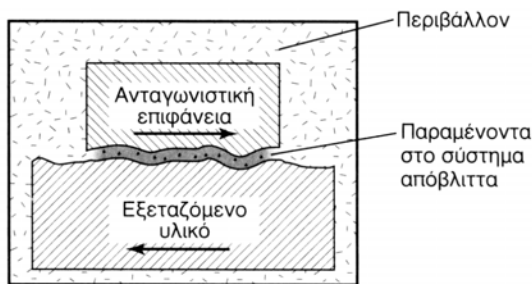
Σχήμα 2.12 : Στάδια αλληλεπίδρασης επιφανειακών ανωμαλιών

Ακόμη μέθοδος ακριβούς συσχετισμού της μακροσκοπικής συμπεριφοράς του τριβολογικού συστήματος με τη συμπεριφορά της κάθε μικροεπαφής δεν υπάρχει. Παράλληλα, οι παραπάνω διαδικασίες δεν είναι όλες ανεξάρτητες μεταξύ τους και κατά συνέπεια δεν μπορούν να απομονωθούν και να μελετηθούν ξεχωριστά.

2.2.2 Η έννοια της φθοράς

Με τον όρο φθορά περιγράφεται η διαδικασία απομάκρυνσης υλικού από το ένα ή και τα δύο σώματα τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση.

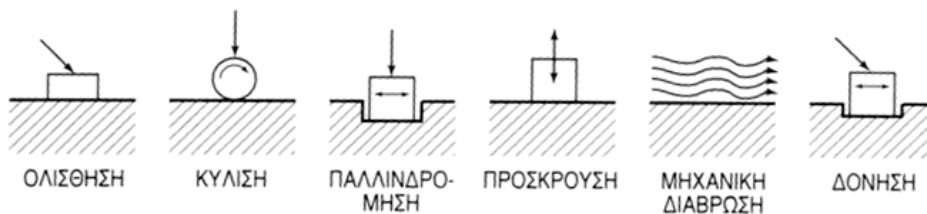
Η φθορά ενός υλικού μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους και δεν αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό ενός υλικού, αλλά εξαρτάται από όλα τα στοιχεία του τριβολογικού συστήματος, τα οποία είναι α) το εξεταζόμενο υλικό, β) το υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) ως προς το οποίο μελετάται η φθορά του εξεταζόμενου, γ) τα παραμένοντα προς το σύστημα προϊόντα της φθοράς και δ) το περιβάλλον, - υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση κλπ. (σχήμα 2.13)



Σχήμα 2.13 : Το τριβολογικό σύστημα

Δύο είναι οι κύριες ομάδες τύπων φθοράς των υλικών:

Ανάλογα με τον **τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών σε επαφή** διακρίνουμε (σχήμα 2.14)



Σχήμα 2.14 : Κατηγορίες φθοράς διεπιφανειών ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης

α) **Φθορά λόγω ολίσθησης** παρατηρείται όταν οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή, ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη, με ή χωρίς την παρουσία, στη διεπιφάνεια, αποξεστικών σωματιδίων ή λιπαντικού. Είναι ο τύπος φθοράς που συναντάται, συνήθως σε μηχανές ή όργανα, των οποίων ορισμένα μέρη βρίσκονται σε σχετική κίνηση.

β) **Φθορά λόγω κύλισης** συναντάται κατά την κύλιση μιας σφαίρας ή ενός κυλίνδρου σε μια στερεή επιφάνεια. Η φθορά αυτού του τύπου ευθύνεται για την καταστροφή εδράνων των οποίων η λειτουργικότητα εξαρτάται από κίνηση ρουλεμάν.

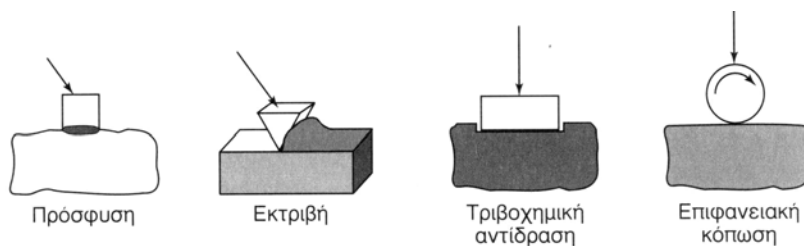
γ) Η **φθορά λόγω παλινδρόμησης** οφείλεται σε παλινδρομικές κινήσεις υψηλής συχνότητας και μικρής έντασης. Πρόκειται για κινήσεις που απαντώνται σε οποιαδήποτε κοινή μηχανή.

δ) Η **φθορά λόγω πρόσκρουσης** προκαλεί καταστροφή της επιφάνειας λόγω πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων, σταγόνων ή υγρών εκτοξευμάτων. Η παρουσία ηλεκτρολυτών επιταχύνει τη φθορά του μεταλλικού υλικού, λόγω της συνδρομής δράσης φαινομένων χημικής διάβρωσης.

ε) Η **φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης** προκαλείται στην επιφάνεια του υλικού, από στερεά σωματίδια μεταφερόμενα από κάποιο ρευστό, υγρό ή αέριο.

στ) Η **φθορά λόγω δόνησης** προκαλείται στις διεπιφάνειες των εν επαφή υλικών όταν αυτά σε ταυτόχρονη φόρτιση παλινδρόμησης και ολίσθησης. Στις κατ'αυτόν το μηχανισμό φθειρόμενες επιφάνειες εμφανίζονται κοιλότητες και εσοχές οι οποίες περιβάλλονται από τα προϊόντα της φθοράς. Συνήθως, η φθορά λόγω δόνησης επιτείνεται από φαινόμενα διάβρωσης. Τότε οι μεταλλικές επιφάνειες οξειδώνονται, σχηματίζοντας ενδιάμεσο στρώμα οξειδίου το οποίο θραύεται ψαθυρά, προϊούσης της τριβής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συσσώρευση μεταξύ των φθειρόμενων επιφανειών, οξειδίων τα οποία παρεμβαίνουν στο μηχανισμό φθοράς ως υλικά απόξεσης. Πρόκειται για ένα μηχανισμό φθοράς που συναντάται πολύ συχνά μεταξύ των επιφανειών, οι οποίες συνδέονται εν ξηρώ, όπως είναι οι άξονες και τα έδρανα συνδετικών δακτυλίων.

Ανάλογα με το **μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο της φθοράς**, διακρίνουμε 4 τύπους φθοράς (σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15 : Μηχανισμοί φθοράς

α) **Φθορά λόγω πρόσφυσης** παρατηρείται όταν δύο ομαλές επιφάνειες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη, ενώ τμήματα της μιας αποκόπτονται και προσφύονται στην άλλη. Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, μεταξύ των ατόμων στη διεπιφάνεια των δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή, εμφανίζονται δυνάμεις πρόσφυσης και αναπτύσσονται χημικοί δεσμοί, οι οποίοι καταστρέφονται και επαναδημιουργούνται. Με τον τρόπο αυτό, τμήματα του ενός υλικού μεταφέρονται στο άλλο, και εν συνεχεία αποβάλλονται ως παραπροϊόντα της διεργασίας επαφής. Τα τελευταία έχουν την ίδια χημική σύσταση με τα φθειρόμενα υλικά, αλλά λόγω των φαινομένων ενδοτράχυνσης, πολλές φορές εμφανίζουν υψηλότερη σκληρότητα από αυτά.

β) **Φθορά λόγω εκτριβής** προκαλείται όταν μια επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με σκληρά σωματίδια, τα οποία αποτελούν είτε το ανταγωνιστικό υλικό, είτε τα προϊόντα φθοράς των δύο επιφανειών. Ο τόπος αυτός της φθοράς συναντάται συχνά σε εξαρτήματα μηχανών κατεργασίας υλικών – όπως είναι τα πτερύγια, τα λειαντικά άκρα, οι αποξεστήρες κλπ- και σε περιπτώσεις ακούσιας εισαγωγής αποξεστικών σωματιδίων, μεταξύ κινούμενων επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή. Πολλές φορές, η φθορά λόγω εκτριβής επιδιώκεται προκειμένου να επιτευχθεί απομάκρυνση υλικού, όπως συμβαίνει σε κατεργασίες λείανσης επιφανειών.

γ) **Λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων** είναι δυνατόν να παραχθούν στη διεπιφάνεια επαφής προϊόντα διαφορετικής χημικής σύστασης από τα υλικά που βρίσκονται σε επαφή. Πρόκειται για μηχανισμό που διέπει τη φθορά τριβολογικών συστημάτων υλικών, τα οποία υπόκεινται εύκολα σε οξείδωση (πχ. κοινοί χάλυβες)

δ) **Η φθορά επιφανειακής κόπωσης** υφίσταται ιδιαίτερα στην τριβή κυλίσεως και είναι και το είδος που απασχολεί την παρούσα εργασία. Είναι η τυπική μορφή φθοράς των ρουλεμάν. Επέρχεται εξ αιτίας της επαναλαμβανόμενης φόρτισης, όπως για παράδειγμα στους τριβείς, όπου όταν υπερβούν ένα ορισμένο χρόνο λειτουργίας εμφανίζουν σημάδια κόπωσης είτε πάνω είτε κάτω από την επιφάνεια και στη συνέχεια ρωγμές στην επιφάνεια και απόβλητα φθοράς. Οι ρωγμές αυτές λόγω της κυκλικής φόρτισης, και σε συνδυασμό πολλές φορές των επιδράσεων από το λιπαντικό, διευρύνονται και δημιουργούνται οι λεγόμενες εκκοιλάνσεις ή εξελκώσεις (pittings).

2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την τριβή και τη φθορά - Λίπανση

Ο συντελεστής τριβής, όπως αναφέρθηκε δεν χαρακτηρίζει, γενικά, ένα υλικό, αλλά εκφράζεται, πάντοτε, ως προς μια επιφάνεια αναφοράς, -ανταγωνιστικό υλικό- και για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, -υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και το ανάγλυφο των επιφανειών ο οποίες βρίσκονται σε κίνηση. Ακολουθούν οι κυριότεροι παράγοντες επηρεασμού της φθοράς και της τριβής [33] σε αντίστροφη σειρά σημαντικότητας.

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν αποτελεί από τις κύριες παραμέτρους της διεργασίας της τριβής. Ωστόσο η θερμοκρασία της τριβής, η θερμοκρασία δηλαδή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια κατά τη διάρκεια της τριβής, - είναι καθοριστική. Ανάλογα με τις συνθήκες τις τριβής, επιβαλλόμενο φορτίο και σχετική ταχύτητα κίνησης, - η θερμοκρασία επαφής μπορεί να πάρει διάφορες τιμές. Για χαμηλές τιμές επιβαλλόμενου φορτίου και σχετικής ταχύτητας, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή για να επέμβει στο μηχανισμό φθοράς. Για υψηλές τιμές επιβαλλόμενου φορτίου και σχετικής ταχύτητας, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια μπορεί να προκαλέσει ακόμη και τοπική τήξη των ανταγωνιστικών υλικών.

Το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η τριβή, επηρεάζει κυρίως, την τριβοχημική συμπεριφορά του συστήματος. Υλικά τα οποία παρουσιάζουν τάση για οξείδωση, πχ. σιδηρούχα κράματα, κατά την τριβή εμφανίζουν αυξημένη την τάση αυτή. Η επιβολή φορτίου προκαλεί την πλαστική παραμόρφωση της επιφάνειας τέτοιων υλικών, δημιουργώντας ταυτόχρονα σημειακές ατέλειες. Τις θέσεις αυτές μπορούν να καταλάβουν άτομα οξυγόνου επιταχύνοντας την οξείδωση. Είναι προφανές, ότι σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας, η επιφανειακή οξείδωση των ανταγωνιστικών υλικών παρεμβαίνει στο μηχανισμό της τριβής.

Κατά την έναρξη της τριβής των δύο επιφανειών, προκαλείται επιλεκτική οξείδωση των εξοχών της επιφάνειας. Η οξείδωση επεκτείνεται σε όλη την διεπιφάνεια, δημιουργώντας στρώμα οξειδωμένου υλικού. Το στρώμα των οξειδίων είναι σχετικά εύθραυστο δημιουργώντας απόβλητα, τα οποία παρεμβαίνουν στην τριβή με τον τρόπο που θα αναφερθεί στη συνέχεια. Ο κύκλος δημιουργίας και καταστροφής του στρώματος των οξειδίων συνεχίζεται καθ όλη τη διάρκεια τριβής.

Τα παραγόμενα απόβλητα της τριβής επηρεάζουν σημαντικά το μηχανισμό της τριβής και πολλές φορές αναφέρονται με τον όρο «το τρίτο σώμα του τριβοσυστήματος». Κατά την τριβή ένα μέρος τους απομακρύνεται από τη διεπιφάνεια επαφής λόγω της σχετικής κίνησης των ανταγωνιστικών επιφανειών. Ένα μέρος τους παραμένει στη διεπιφάνεια και παρεμβαίνει στη διεργασία με τρεις τρόπους:

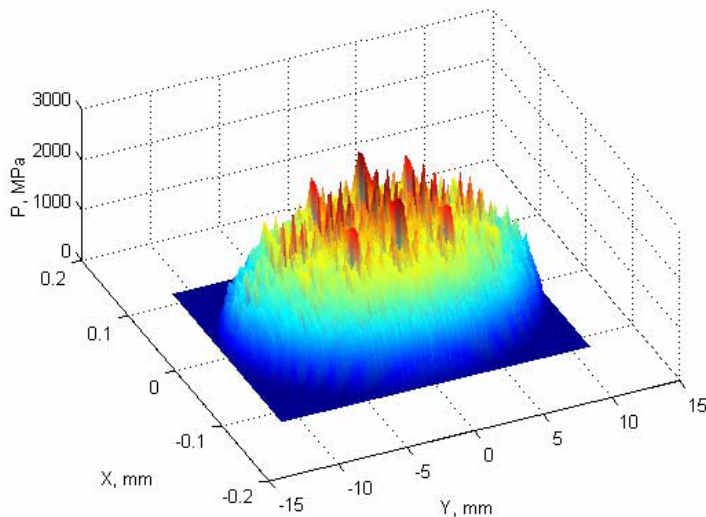
α) Αν τα παραγόμενα απόβλητα έχουν μικρή σκληρότητα, μεγάλη πλαστικότητα και παρουσιάζουν την τάση να προσκολληθούν μηχανικά στις ανταγωνιστικές επιφάνειες, τότε παρεμποδίζουν την ελεύθερη ολίσθησή τους, με αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή τριβής.

β) Αν τα παραγόμενα απόβλητα έχουν μέτρια σκληρότητα και ομαλό σχήμα με στρογγυλεμένες επιφάνειες, διευκολύνουν την τριβή και δρουν ως «λιπαντικά», δημιουργώντας νέες επιφάνειες ολίσθησης, με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή τριβής.

γ) Αν τα παραγόμενα απόβλητα έχουν υψηλή σκληρότητα και ακανόνιστο σχήμα, συνήθως συνεργούν στη φθορά των ανταγωνιστικών υλικών, δρώντας ως αποξεστικά. Στην περίπτωση αυτή αυξάνεται ο συντελεστής φθοράς του υλικού.

Το ανταγωνιστικό υλικό και ειδικότερα η σκληρότητά του, καθορίζει πολλές φορές το μηχανισμό με τον οποίο η διεργασία της τριβής προκαλεί φθορά του υλικού και απώλεια μάζας.

Η τοπογραφία της επιφάνειας των δυο υλικών, καθορίζει την πραγματική επιφάνεια επαφής και, επομένως, επηρεάζει και το μηχανισμό φθοράς τους κατά την τριβή. Η ύπαρξη προεξοχών μειώνει την επιφάνεια στην οποία διανέμεται το επιβαλλόμενο φορτίο, με αποτέλεσμα την έντονη αύξηση της τάσης στα σημεία αυτά (σχήμα 2.16). Έτσι εμφανίζεται τοπικά μεγαλύτερος βαθμός φθοράς και έντονη επιφανειακή κόπωση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρορωγμών. Αυτές δυνητικά, κατά την κύλιση ή και ολίσθηση των επιφανειών, μπορούν να αυξηθούν σημαντικά με αποτέλεσμα την τελική αστοχία του δοκιμίου. Η επιρροή της τραχύτητας μπορεί να μεταβληθεί, μέσω της λίπανσης όπως θα αναφερθεί παρακάτω



Σχήμα 2.16 : Κατανομή επιφανειακής πίεσης σε πραγματική ελλειπτικού τύπου επαφή [1]. Παρατηρούνται οι «κορυφές» πίεσης, που οφείλονται στην ύπαρξη επιφανειακών ανωμαλιών

Η λίπανση ως τεχνολογική πράξη είναι προφανώς πολύ σημαντική, αφού με αυτήν επιτυγχάνεται μείωση της τριβής και της φθοράς των υλικών. Μολονότι σήμερα υπάρχει ένας τεράστιος όγκος τεχνολογικής εμπειρίας στην παραγωγή και χρήση των λιπαντικών, η πραγματική επιστημονική σπουδή της λίπανσης και των σχετικών φαινομένων άρχισε μόλις προ εκατό περίπου ετών.

Ως λίπανση ορίζεται η παρεμβολή μεταξύ των δύο στοιχείων του τριβοσυστήματος τρίτου κατάλληλου σώματος, του λιπαντικού, για τον περιορισμό της τριβής και της συνεπακόλουθης φθοράς. Με τη χρήση λοιπόν των λιπαντικών ουσιών δημιουργούνται δυο νέες επιφάνειες τριβής (επιφάνεια 1-λιπαντικό, επιφάνεια 2-λιπαντικό), στις οποίες οι δυνάμεις, επομένως και η θερμοκρασία, που αναπτύσσονται, είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες που αναπτύσσονται κατά την ξηρά τριβή.

Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται είναι είτε στερεά –συνήθως λεπτά στρώματα πολυμερών ή σκόνης γραφίτη,- είτε υγρά – συνήθως ορυκτέλαια. Προκειμένου για τα υγρά λιπαντικά, αυτά θα πρέπει να εκπληρώνουν ορισμένες προδιαγραφές που αφορούν τη ρευστότητα και τη σταθερότητα της τιμής του ιξώδους τους, στις συγκεκριμένες θερμοκρασιακές περιοχές χρήσης τους. Ακολουθούν λεπτομέρειες σχετικά με υγρή λίπανση που αφορά και την παρούσα εργασία.

Ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας του τριβοσυστήματος, (πίεση επιφανείας, ιξώδες λιπαντικού, σχετική ταχύτητα κύλισης/ολίσθησης), μπορούμε να διακρίνουμε τους εξής σημαντικότερους τύπους λίπανσης [4]:

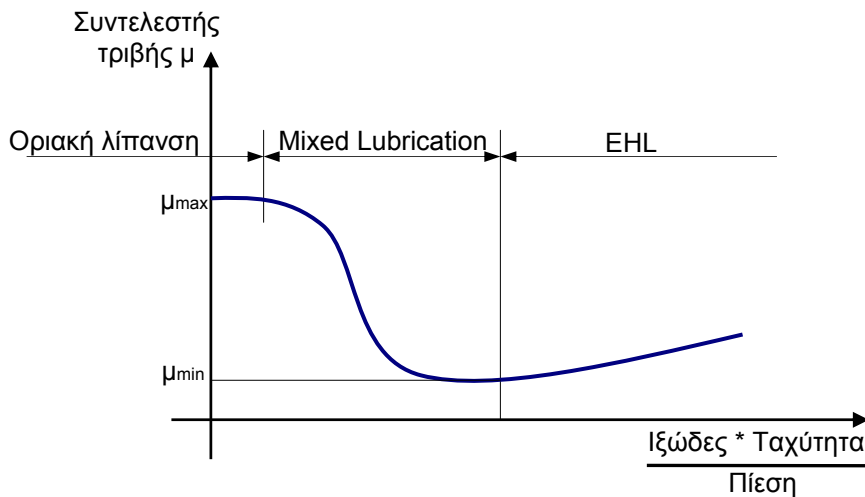
- **Υδροδυναμική λίπανση (Hydrodynamic lubrication)**, όταν το πάχος του λιπαντικού στρώματος οφείλεται σε ανάπτυξη υδροδυναμικών δυνάμεων που τείνουν να διαχωρίσουν τις επιφάνειες του τριβοσυστήματος. Στην περίπτωση αυτή η φυσικοχημική δράση του λιπαντικού είναι αμελητέα και ο κύριος παράγοντας καθίσταται το ιξώδες του λιπαντικού και η γεωμετρία και η σχετική ταχύτητα των επιφανειών. Για την περιγραφή της απαιτείται η χρήση των εξισώσεων Reynolds.

- **Ελαστουδροδυναμική λίπανση (Elastohydrodynamic lubrication EHL)** που εμφανίζεται κυρίως σε υψηλά φορτισμένες σημειακές επαφές, όπου ακόμη όμως το πάχος του σχηματιζόμενου στρώματος λίπανσης επαρκεί για να διαχωρίσει τις ανταγωνιστικές επιφάνειες. Λόγω υψηλού επιφανειακού φορτίου, και ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών, προκαλείται αλλαγή στο ιξώδες του λιπαντικού, ελαστική παραμόρφωση των επιφανειών, αλλαγή συνεπώς του πάχους του υδροδυναμικού φιλμ και επομένως αλλαγή στην κατανομή της επιφανειακής πίεσης. Για την περιγραφή του απαιτείται η ταυτόχρονη λύση εξισώσεων Reynolds, ενέργειας και ελαστικότητας (θεωρία επαφών κατά Hertz).

- **Οριακή λίπανση (Boundary lubrication)**. Δημιουργείται όταν το λιπαντικό στρώμα είναι ανεπαρκές εξ αιτίας διαφόρων παραγόντων (μικρή επιφάνεια επαφής, μικρή ταχύτητα κύλισης, μικρή ποσότητα λιπαντικού, μεγάλο φορτίο, μικρή συνεκτικότητα λιπαντικού λόγω μεγάλης θερμοκρασίας). Στη περίπτωση αυτή εμφανίζεται πολύ έντονη επίδραση λόγω των επιφανειακών ανωμαλιών (τραχύτητας), που έρχονται πια σε επαφή. Η μετάπτωση από την υδροδυναμική στην οριακή λίπανση δεν είναι απότομη, αλλά σταδιακή. Στα ενδιάμεσα στάδια συνυπάρχουν και οι δυο τρόποι οπότε έχουμε τις μικτές συνθήκες λίπανσης (**mixed lubrication**).

- **Υδροστατική λίπανση (Hydrostatic lubrication)**. Αυτή η μορφή λίπανσης προκύπτει διά εισαγωγής λιπαντικού στην περιοχή εργασίας του τριβικού συστήματος, υπό πίεση αρκετά υψηλή, που μπορεί να κρατήσει τις ανταγωνιστικές επιφάνειες χωριστά και να φέρει το κάθετο στην κύλιση/ολίσθηση φορτίο.

Οι παραπάνω καταστάσεις, σε συνάρτηση με το συντελεστή τριβής και τις βασικές παραμέτρους του τριβικού συστήματος (σχετική ταχύτητα κίνησης επιφανειών, συνεκτικότητα και φορτίο) μπορούν να απεικονιστούν στο ονομαζόμενο διάγραμμα Stribeck, ένα βασικό για τους μηχανικούς/τριβολόγους εργαλείο.



Σχήμα 2.17 : Διάγραμμα Stribeck

2.3 Πίεση Επιφανείας – Τάσεις Hertz

Κατά τη λειτουργία των στοιχείων κύλισης, τα όποια φορτία ασκούνται, συγκεντρώνονται σε μία μικρή περιοχή, την λεγόμενη περιοχή επαφής (contact area) των ανταγωνιστικών επιφανειών. Ως αποτέλεσμα αυτού, ακόμη και για μέσες τιμές φορτίων, αναπτύσσονται ιδιαίτερα έντονες τάσεις σε ένα περιορισμένο όγκο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η καταπόνηση και τελικά αστοχία της επιφάνειας, και άρα καταστροφή της λειτουργικής ικανότητας του στοιχείου.

Το πρόβλημα μελέτης των τάσεων που αναπτύσσονται σε μια επαφή, είναι αρκετά νέο. Πρώτος ο Hertz το 1881 με τη μελέτη του [34] πρότεινε τις εξισώσεις που διέπουν την παραμόρφωση δυο ελαστικών κυκλικών φακών που εφάπτονται υπό τη σταθερή εφαρμογή κατακόρυφου σε αυτούς φορτίου. Η θεωρία του είχε εφαρμογή αποκλειστικά σε πλήρως ελαστικά σώματα σε επαφή, χωρίς την παρουσία τριβής. Ήταν όμως στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, που το βιομηχανικό και επιστημονικό ενδιαφέρον, ειδικά για την μελέτη εδράνων κύλισης, και συστημάτων τροχών-σιδηροτροχιών κλπ., ώθησε την έρευνα να επεκτείνει τη θεωρία του Hertz και υπερκεράσει τους περιορισμούς της. Έτσι έχει επιτευχθεί η μελέτη της συμπεριφορά στοιχείων και του εντατικού πεδίου που αναπτύσσεται σε αυτά κατά τη λειτουργία τους, λαμβάνοντας υπ όψιν φαινόμενα πλαστικότητας, τριβής κλπ. Τιμητικά, οι τάσεις αυτές ονομάζονται τάσεις του Hertz. Ακολουθούν οι βασικές εξισώσεις που αφορούν την παρούσα εργασία (εξισώσεις ελαστικού σώματος) [35].

2.3.1 Πίεση επιφανείας - Τάσεις σε σημειακές / γραμμικές επαφές

Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας του Hertz είναι:

1. Τουλάχιστον μια από τις διαστάσεις της επιφάνειας επαφής είναι πολύ μικρότερη από τις εξωτερικές διαστάσεις των επαπτόμενων σωμάτων συμπεριλαμβάνοντας και σε αυτές και τις ακτίνες καμπυλότητας στη θέση επαφής τους
2. Η αναπτυσσόμενη μέγιστη επιφανειακή πίεση δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερη από το όριο ελαστικότητας των υλικών των σωμάτων
3. Στην επιφάνεια της διαπλάτυνσεως των σωμάτων δεν επιτρέπεται να εφαρμόζονται διατμητικές τάσεις
4. Τα υλικά των σωμάτων πρέπει να είναι ομοιογενή
5. Οι επιφάνειες των επαπτόμενων σωμάτων πρέπει να είναι απόλυτα λείες

Αν και οι παραδοχές αυτές δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, η επιφανειακή πίεση κατά Hertz είναι μέχρι σήμερα το μοναδικό κριτήριο που υπάρχει για την εξέταση της επαφής πάρα πολλών πρακτικών εφαρμογών.

Αν τα δύο σώματα αποτελούνται από διαφορετικά υλικά με μέτρα E_1 και E_2 και σταθερές Poisson ν_1 και ν_2 τότε για τους τύπους υπολογισμού που ακολουθούν ισχύει:

$$\frac{1-\nu^2}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad \text{εξ. 2.6}$$

Ανάλογα με τη γεωμετρία των σωμάτων, μπορούν να διακριθούν βασικά **δύο είδη επαφών**, σε συνθήκες μηδενικής φόρτισης:

Γραμμική επαφή αν οι δύο επιφάνειες καμπυλότητας r_1, r_2 αγγίζουν η μία την άλλη κατά μήκος μιας ευθείας ή καμπυλωμένης γραμμής, μηδενικού πάχους. Προφανώς υπό εφαρμογή κατακόρυφου φορτίου παρουσιάζεται αύξηση του πάχους της περιοχής επαφής, όπως φαίνεται από το σχήμα 2.18.

Η προβολή της επαφής αυτής σε ένα επίπεδο κάθετο προς την αξονική απόσταση των δυο κυλίνδρων έχει το σχήμα ενός ορθογωνίου παραλληλόγραμμου με μήκος L (=μήκος επικάλυψης κυλίνδρων) και πλάτος $2b$. Η επιφανειακή πίεση p έχει ελλειπτική κατανομή και αυξάνεται από τις επιμήκειες πλευρές της διαπλάτυνσεως προς το μέσο της μικρής της πλευράς όπου και αποκτά λόγω φορτίου F τη μέγιστη τιμή $p_{\text{μεγ}}$:

$$p_{\text{μεγ}} = \frac{2F}{\pi b L} = \sqrt{\frac{FE}{\pi L(1-\nu^2)} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad \text{εξ. 2.7}$$

Όπου b το μισό πλάτος της γραμμικής επαφής, ίσο με

$$b = \sqrt{\frac{4F(1-\nu^2)}{\pi LE \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad \text{εξ. 2.8}$$

Η αντίστοιχη μέση επιφανειακή πίεση υπολογίζεται με τον τύπο

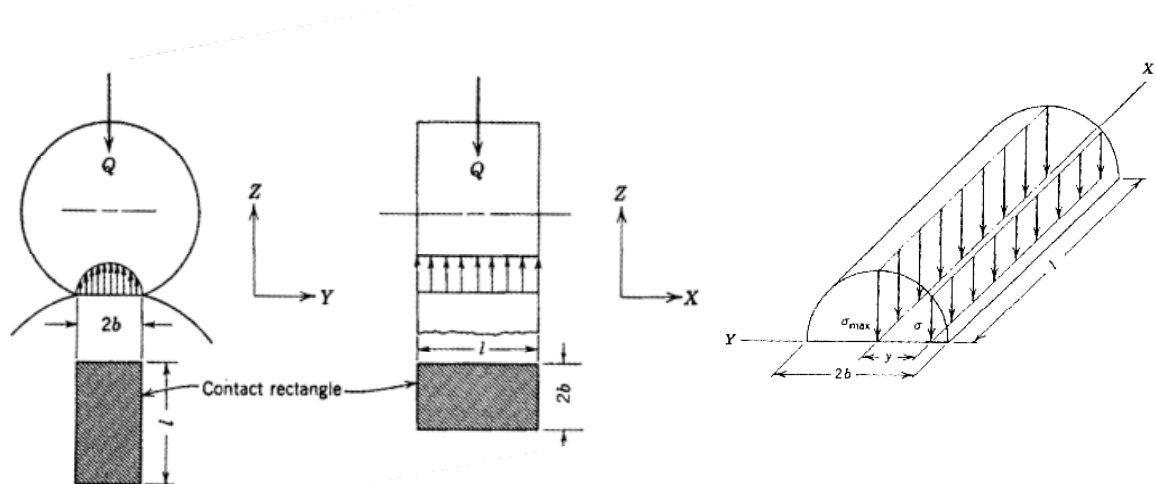
$$p_m = \frac{F}{2bL} = \frac{\pi}{4} p_{\max} \quad \text{εξ. 2.9}$$

$$p(x, y) = p_{\max} \left(1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{εξ. 2.10}$$

Λόγω δε της ελαστικής τους παραμόρφωσης, οι άξονες των δυο κυλίνδρων πλησιάζουν ο ένας τον άλλον ως προς την απόσταση

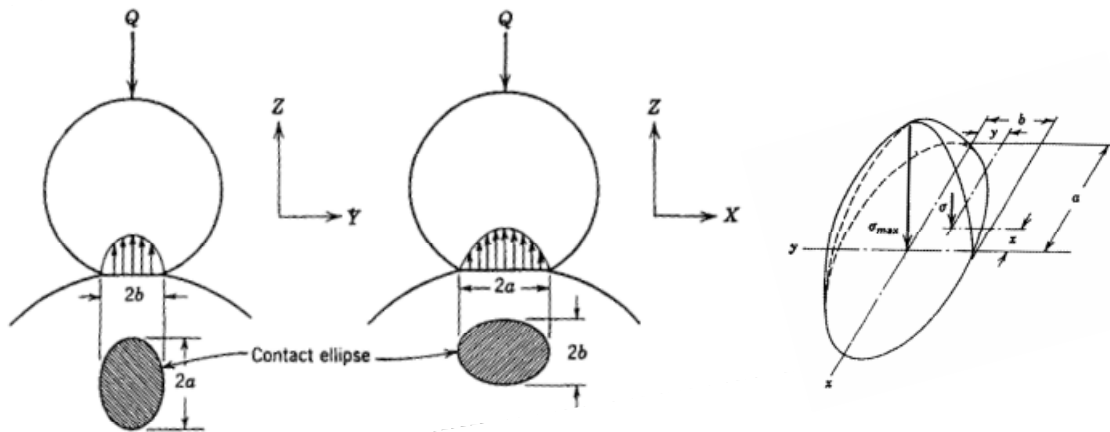
$$u = \frac{2F}{\pi L} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} \left(\ln \frac{d_1}{b} + 0.407 \right) + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \left(\ln \frac{d_2}{b} + 0.407 \right) \right] \quad \text{εξ. 2.11}$$

Η περίπτωση επαφής ενός κυλίνδρου ακτίνας r_1 και μιας επίπεδης επιφάνειας υπολογίζεται επίσης με τους παραπάνω τύπους, εάν όπου $r_2 = \infty$. Ακόμη αν μια από τις δυο επιφάνειες είναι κοίλη τότε η αριθμητική τιμή της ακτίνας καμπυλότητάς της τοποθετείται σε όλους τους παραπάνω τύπους με αρνητικό πρόσημο.



Σχήμα 2.18 : Γραμμική επαφή και η αντίστοιχη κατανομή θλιπτικών τάσεων σε αυτή

Σημειακή επαφή, δυο επιφάνειες εφάπτονται σε ένα μόνο σημείο. Η επαφή αυτή μπορεί να γίνει κυκλική (αν τα δυο σώματα είναι τελείως σφαιρικά) ή ελλειπτική (αν τα σώματα έχουν διαφορετική καμπυλότητα σε διαφορετικές διευθύνσεις) σε φόρτιση, όπως φαίνεται από το σχήμα 2.19. Η προβολή σημειακής επαφής με σχήμα έλλειψης εμφανίζει μεγάλη διάμετρο $2a$ και μικρή διάμετρο $2b$, όπως παριστάνεται και από το σχήμα 2.19. Η κατανομή της επιφανειακής πίεσης σε οποιαδήποτε διάμετρο αυτής της ελλειπτικής διαπλάτυνσης έχει ελλειπτική μορφή και αυξάνεται από την περιφέρεια μέχρι το κέντρο της ελλειπτικής αυτής διαπλάτυνσεως, όπου αποκτά τη μέγιστη τιμή της p_{\max} .



Σχήμα 2.19 : Σημειακή επαφή και η αντίστοιχη κατανομή θλιπτικών τάσεων σε αυτή

$$p_{\max} = \frac{1,5F}{\pi ab} = \frac{1}{\xi\eta} \sqrt[3]{\frac{3FE^2(\Sigma k)^2}{8\pi^3(1-\nu^2)^2}} \quad \text{και} \quad p_m = \frac{F}{2ab} = \frac{2}{3} p_{\max} \quad \text{εξ. 2.12}$$

Με διαστάσεις επαφής

$$a = \xi \sqrt[3]{\frac{3F(1-\nu^2)}{E \Sigma k}} \quad \text{εξ. 2.13}$$

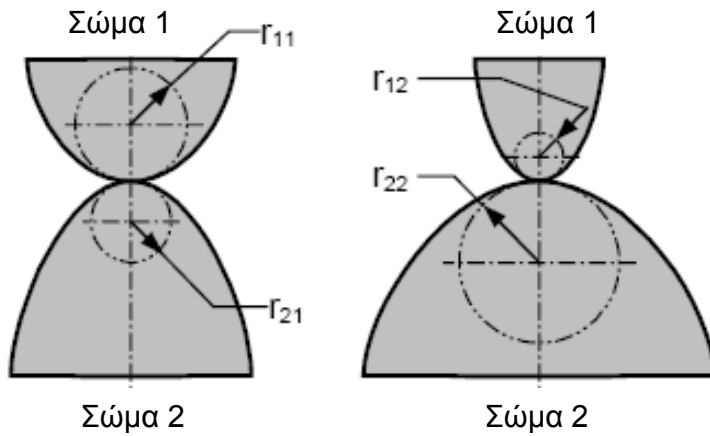
$$b = \eta \sqrt[3]{\frac{3F(1-\nu^2)}{E \Sigma k}} \quad \text{εξ. 2.14}$$

$$p(x, y) = p_{\max} \left(1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 - \left(\frac{y}{a} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{εξ. 2.15}$$

Λόγω δε της ελαστικής τους παραμόρφωσης, το ένα σώμα πλησιάζει το άλλο κατά

$$u = \frac{\psi}{\xi} \sqrt[3]{\frac{9F^2(1-\nu^2)^2 \Sigma k}{8E^2}} \quad \text{εξ. 2.16}$$

Για όλες τις παραπάνω εξισώσεις τα ξ, ψ, η, k είναι βοηθητικά μεγέθη που υπολογίζονται ως εξής:



Σχήμα 2.20 : Κατεύθυνση των κυρίων επιπέδων καμπυλότητας E των σωμάτων K

Έτσι για το κάθε σώμα $K=1,2$ στο επίπεδο $E=1,2$ ισχύει

$$k_{KE} = \frac{1}{r_{KE}} \quad \text{εξ. 2.17}$$

$$\text{και } \sum k_{KE} = k_{11} + k_{12} + k_{21} - k_{22} \quad \text{εξ. 2.18}$$

και τελικά ορίζεται η βοηθητική συνάρτηση

$$\cos \tau = \frac{k_{11} + k_{12} + k_{21} - k_{22}}{\sum k}, \quad \text{εξ. 2.19}$$

μέσω της οποίας από πίνακες υπολογίζονται τα παρακάτω μεγέθη (Σχήμα 2.21)

COS τ	ξ	η	ξ·η	ψ/ξ	COS τ	ξ	η	ξ·η	ψ/ξ	COS τ	ξ	η	ξ·η	ψ/ξ
0,9995	23,95	0,163	3,91	0,171	0,9770	5,63	0,338	1,90	0,476	0,928	3,55	0,428	1,52	0,630
0,9990	18,53	0,185	3,43	0,207	0,9765	5,58	0,339	1,89	0,478	0,926	3,51	0,431	1,51	0,634
0,9985	15,77	0,201	3,17	0,230	0,9760	5,53	0,340	1,88	0,481	0,924	3,47	0,433	1,50	0,638
0,9980	14,25	0,212	3,02	0,249	0,9755	5,49	0,342	1,88	0,483	0,922	3,43	0,436	1,50	0,642
0,9975	13,15	0,220	2,89	0,266	0,9750	5,44	0,343	1,87	0,486	0,920	3,40	0,438	1,49	0,646
0,9970	12,26	0,228	2,80	0,279	0,9745	5,39	0,345	1,86	0,489	0,918	3,36	0,441	1,48	0,650
0,9965	11,58	0,235	2,72	0,291	0,9740	5,35	0,346	1,85	0,491	0,916	3,33	0,443	1,47	0,653
0,9960	11,02	0,241	2,65	0,302	0,9735	5,32	0,347	1,85	0,493	0,914	3,30	0,445	1,47	0,657
0,9955	10,53	0,246	2,59	0,311	0,9730	5,28	0,349	1,84	0,495	0,912	3,27	0,448	1,46	0,660
0,9950	10,15	0,251	2,54	0,320	0,9725	5,24	0,350	1,83	0,498	0,910	3,23	0,450	1,45	0,664
0,9945	9,77	0,256	2,50	0,328	0,9720	5,20	0,351	1,83	0,500	0,908	3,20	0,452	1,45	0,667
0,9940	9,46	0,260	2,46	0,336	0,9715	5,16	0,353	1,82	0,502	0,906	3,17	0,454	1,44	0,671
0,9935	9,17	0,264	2,42	0,343	0,9710	5,13	0,354	1,81	0,505	0,904	3,15	0,456	1,44	0,674
0,9930	8,92	0,268	2,39	0,350	0,9705	5,09	0,355	1,81	0,507	0,902	3,12	0,459	1,43	0,677
0,9925	8,68	0,271	2,36	0,356	0,9700	5,05	0,357	1,80	0,509	0,900	3,09	0,461	1,42	0,680
0,9920	8,47	0,275	2,33	0,362	0,9690	4,98	0,359	1,79	0,513	0,895	3,03	0,466	1,41	0,688
0,9915	8,27	0,278	2,30	0,368	0,9680	4,92	0,361	1,78	0,518	0,890	2,97	0,471	1,40	0,695
0,9910	8,10	0,281	2,28	0,373	0,9670	4,86	0,363	1,77	0,522	0,885	2,92	0,476	1,39	0,702
0,9905	7,93	0,284	2,25	0,379	0,9660	4,81	0,365	1,76	0,526	0,880	2,86	0,481	1,38	0,709
0,9900	7,76	0,287	2,23	0,384	0,9650	4,76	0,367	1,75	0,530	0,875	2,82	0,485	1,37	0,715
0,9895	7,62	0,289	2,21	0,388	0,9640	4,70	0,369	1,74	0,533	0,870	2,77	0,490	1,36	0,721
0,9890	7,49	0,292	2,19	0,393	0,9630	4,65	0,371	1,73	0,536	0,865	2,72	0,494	1,35	0,727
0,9885	7,37	0,294	2,17	0,398	0,9620	4,61	0,374	1,72	0,540	0,860	2,68	0,498	1,34	0,733
0,9880	7,25	0,297	2,15	0,402	0,9610	4,56	0,376	1,71	0,543	0,855	2,64	0,502	1,33	0,739

Σχήμα 2.21 : Πίνακας βοηθητικών τιμών ξ, η, ψ (1° μέρος)

0,9875	7,13	0,299	2,13	0,407	0,9600	4,51	0,378	1,70	0,546	0,850	2,60	0,507	1,32	0,745
0,9870	7,02	0,301	2,11	0,411	0,9590	4,47	0,380	1,70	0,550	0,840	2,53	0,515	1,30	0,755
0,9865	6,93	0,303	2,10	0,416	0,9580	4,42	0,382	1,69	0,553	0,830	2,46	0,523	1,29	0,765
0,9860	6,84	0,305	2,09	0,420	0,9570	4,38	0,384	1,68	0,556	0,820	2,40	0,530	1,27	0,774
0,9855	6,74	0,307	2,07	0,423	0,9560	4,34	0,386	1,67	0,559	0,810	2,35	0,537	1,26	0,783
0,9850	6,64	0,310	2,06	0,427	0,9550	4,30	0,388	1,67	0,562	0,800	2,30	0,544	1,25	0,792
0,9845	6,55	0,312	2,04	0,430	0,9540	4,26	0,390	1,66	0,565	0,750	2,07	0,577	1,20	0,829
0,9840	6,47	0,314	2,03	0,433	0,9530	4,22	0,391	1,65	0,568	0,700	1,91	0,607	1,16	0,859
0,9835	6,40	0,316	2,02	0,437	0,9520	4,19	0,393	1,65	0,571	0,650	1,77	0,637	1,13	0,884
0,9830	6,33	0,317	2,01	0,440	0,9510	4,15	0,394	1,64	0,574	0,600	1,66	0,664	1,10	0,904
0,9825	6,26	0,319	2,00	0,444	0,9500	4,12	0,396	1,63	0,577	0,550	1,57	0,690	1,08	0,922
0,9820	6,19	0,321	1,99	0,447	0,9480	4,05	0,399	1,62	0,583	0,500	1,48	0,718	1,06	0,938
0,9815	6,12	0,323	1,98	0,450	0,9460	3,99	0,403	1,61	0,588	0,450	1,41	0,745	1,05	0,951
0,9810	6,06	0,325	1,97	0,453	0,9440	3,94	0,406	1,60	0,593	0,400	1,35	0,771	1,04	0,962
0,9805	6,00	0,327	1,96	0,456	0,9420	3,88	0,409	1,59	0,598	0,350	1,29	0,796	1,03	0,971
0,9800	5,94	0,328	1,95	0,459	0,9400	3,83	0,412	1,58	0,603	0,300	1,24	0,824	1,02	0,979
0,9795	5,89	0,330	1,94	0,462	0,9380	3,78	0,415	1,57	0,608	0,250	1,19	0,850	1,01	0,986
0,9790	5,83	0,332	1,93	0,465	0,9360	3,73	0,418	1,56	0,613	0,200	1,15	0,879	1,01	0,991
0,9785	5,78	0,333	1,92	0,468	0,9340	3,66	0,420	1,55	0,618	0,150	1,11	0,908	1,01	0,994
0,9780	5,72	0,335	1,92	0,470	0,9320	3,63	0,423	1,54	0,622	0,100	1,07	0,938	1,00	0,997
0,9775	5,67	0,336	1,91	0,473	0,9300	3,59	0,426	1,53	0,626	0,050	1,03	0,969	1,00	0,999
										0	1	1	1	1

Σχήμα 2.21 : Πίνακας βοηθητικών τιμών ξ,η,ψ (2^ο μέρος)

Για περιπτώσεις επαφής με κοίλα σώματα ή επίπεδες επιφάνειες ισχύει ότι και στις γραμμικές επαφές (δηλ, $r < 0$ $r=\infty$ αντίστοιχα)

Για την πλήρη περιγραφή του πεδίου των τάσεων, είναι απαραίτητη η επίλυση με αριθμητικές μεθόδους των εξισώσεων ελαστικότητας [36]. Έχει γίνει ήδη ωστόσο δυνατή η εύρεση των τάσεων κάτω και επί της επιφάνειας επαφής και με αναλυτικές εξισώσεις για κυκλικές και γραμμικές επαφές [37],[38]. Ακόμη όμως δεν είναι κάτι τέτοιο πλήρως δυνατό για του ελλειπτικού τύπου [39]. Ακολουθούν οι προσεγγιστικοί τύποι υπολογισμού της μέγιστης ονομαστικής τάσης που αναπτύσσεται κάτω από μια επιφάνεια και του βάθους όπου αυτή εμφανίζεται [40]:

Ομάδα Εξισώσεων 2.20	Σημειακή επαφή	Γραμμική επαφή
Μέγ. ορθ. διατμητική τάση	$\tau_{\max}=0,31 p_{\max}$	$\tau_{\max}=0,3 p_{\max}$
Θέση μέγ. ορθ. διατμ. τάσης	$z=0.47a$	$z=0.78a$
Μεγ. ισοδύναμη τάση Mises	$\sigma_{V,Mises}=0.62 p_{\max}$	$\sigma_{V,Mises}=0.56 p_{\max}$
Θέση μεγ. ισοδύναμης τάσης Mises	$z=0.47a$	$z=0.71a$
Μεγ. ισοδύναμη τάση Tresca	$\sigma_{V,Tresca}=0.62 p_{\max}$	$\sigma_{V,Tresca}=0.60 p_{\max}$
Θέση μεγ. ισοδύναμης τάσης Tresca	$z=0.47a$	$z=0.78a$

Όπου

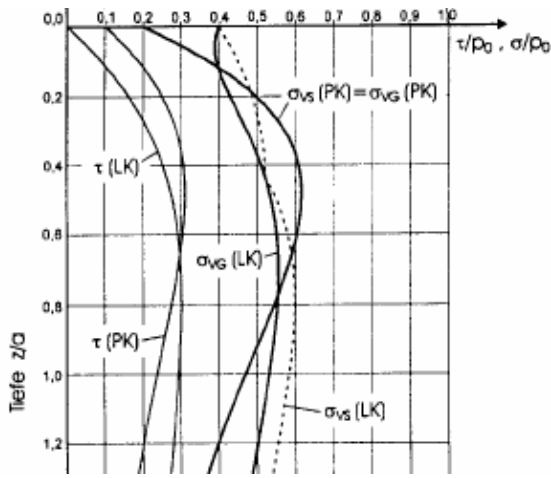
$$\sigma_{V,Tresca} = 2\tau_{\max} = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad \text{εξ. 2.21}$$

και

$$\sigma_{V,Mises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad \text{εξ. 2.22}$$

με $\sigma_{1,2,3}$ τις κύριες τάσεις.

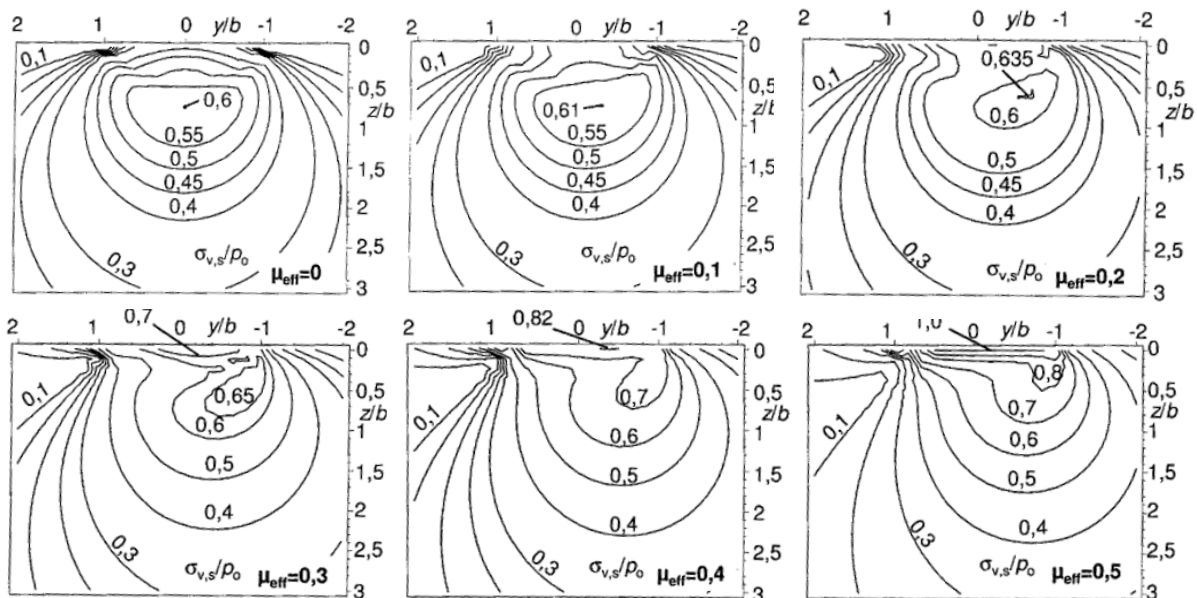
Στο σχήμα 2.22 φαίνεται το διάγραμμα των ανηγμένων προς τη μέγιστη επιφανειακή πίεση p_0 ισοδύναμων τάσεων, σε συνάρτηση με το βάθος z από την επιφάνεια, ανηγμένο προς την ακτίνα της ελλειπτικής επαφής a



Σχήμα 2.22 : Συνάρτηση ισοδύναμων τάσεων σ προς το βάθος από την επιφάνεια z . Όπου δείκτης LK-γραμμική επαφή, PK σημειακή επαφή, G-τάσεις Mises, S-τάσεις Tresca

Επίδραση της τριβής

Η τριβή δρα ως μια διατμητική τάση στην επιφάνεια του στοιχείου κύλισης. Αποτέλεσμα της αύξησής της, όπως αναφέρεται από τη βιβλιογραφία και προκύπτει από τις εξισώσεις [36],[38] είναι η διαρκής αύξηση της ισοδύναμης τάσης κοντά στην επιφάνεια και η μετακίνηση του μεγίστου που προβλέπεται από τη θεωρία Hertz προς αυτήν. Χαρακτηριστικά, για τιμές συντελεστή τριβής μεγαλύτερες του 0,2, η επιφανειακή τάση ξεπερνά και την μέγιστη τάση χωρίς παρουσία τριβής.



Σχήμα 2.23 : Ισοτασικές γραμμές ισοδύναμης τάσης Tresca σε επαφή Hertz υπό διαφορετικές τιμές τριβής μ_{eff}

2.3.2 Επίδραση της τραχύτητας

Τα όσα περιγράφηκαν παραπάνω ισχύουν φυσικά και για τις μικροσκοπικές επαφές, που δημιουργούνται κατά την επαφή των επιφανειακών ανωμαλιών (τραχύτητας) στις πραγματικές επιφάνειες. Λόγω μάλιστα του μικρού τους μεγέθους και του μεγάλου φορτίου που καλούνται να αναλάβουν είναι αυτές οι μικρο-επαφές υπεύθυνες για την ανάπτυξη τοπικώς πολύ υψηλών τάσεων. Βασικός παράγοντας επηρεασμού της επίδρασης της τραχύτητας είναι η λίπανση (κεφ. 2.2.3). Ο στοχαστικός της δε χαρακτήρας, προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα.

Για τη μελέτη του ρόλου της τραχύτητας έχουν αναπτυχθεί οι παρακάτω ομάδες μεθόδων:

1. Την εισαγωγή **στατιστικών μεγεθών** από μετρήσεις της τραχύτητας, και άλλων **παραμέτρων**, δηλαδή:

- **Σχέσης συνεκτικότητας κ:** Οι κατασκευαστές εδράνων κύλισης, για στοιχεία με συγκεκριμένη τραχύτητα επιφανείας, μέσω του λόγου της πραγματικής συνεκτικότητας προς την προτεινόμενη (λόγος κ), περιγράφουν τις συνθήκες λίπανσης. Από αυτήν την παράμετρο, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η επίδραση στη συνολική διάρκεια ζωής εδράνων κύλισης, a_{CL} , του ορίου αντοχής του υλικού P_u , της καθαρότητάς του η_c , του λιπαντικού και του φορτίου P (**ISO 281 [16],[17]**). Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο κεφ. 3.4

$$\kappa = \frac{v}{v_1} \quad \text{εξ. 2.23}$$

Όπου v : πραγματική κινηματική συνεκτικότητα του λιπαντικού στη θερμοκρασία λειτουργίας

v_1 : απαιτούμενη κινηματική συνεκτικότητα του λιπαντικού για επαρκή λίπανση στη θερμοκρασία λειτουργίας, σε συνάρτηση προς την ταχύτητα περιστροφής και τη μέση διάμετρο του εδράνου. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων μπορούν να βρεθούν σε διαγράμματα κατασκευαστριών εταιριών εδράνων κύλισης βλ. SKF.

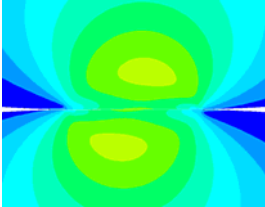
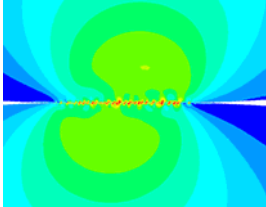
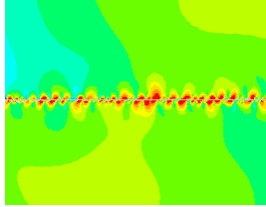



- **Παράμετρο λίπανσης Λ** , εξαρτάται από το ύψος του σχηματιζόμενου φιλμ λίπανσης και τη μετρούμενη μέση τραχύτητα R_q . Πιο συγκεκριμένα:

$$\Lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}} \quad \text{εξ. 2.24}$$

Όπου

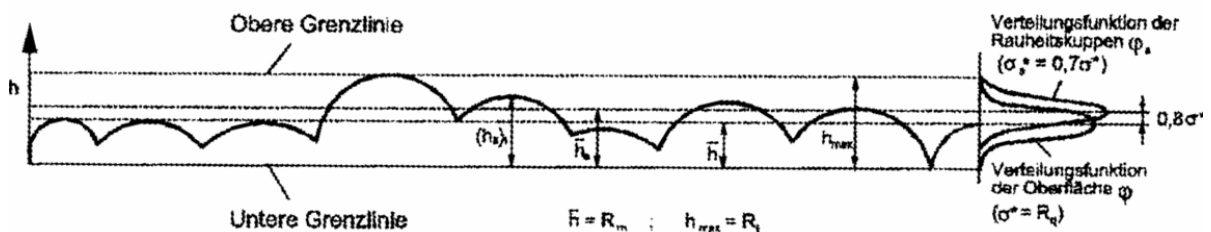
Λ , παράμετρος λίπανσης, $\Lambda \leq 3$ μικτές συνθήκες λίπανσης, οριακή λίπανση
 h , Πάχος λιπαντικού φιλμ κατά Hamrock και Dowson [41]
 R_q Ενδεικνυόμενη τραχύτητα κάθε επιφάνειας

Είναι μάλιστα συχνά χρησιμοποιούμενο από τη βιβλιογραφία μέγεθος, το οποίο φανερώνει τις συνθήκες λίπανσης ($0.3 < \Lambda < 3$ μικτές συνθήκες λίπανσης) [42]. Έχει δε χρησιμοποιηθεί και σε προσπάθειες αναλυτικής μελέτης της καταπόνησης μιας επαφής σε μικτές συνθήκες λίπανσης και ως παράγων διαχωρισμού του συνολικού κατακόρυφου φορτίου που ασκείται σε μια επιφάνεια, στο υδροδυναμικό της μέρος (το οποίο μεταφέρεται μέσω του λιπαντικού) και το οριακής λίπανσης (το οποίο μεταφέρεται από τις μικροεπαφές) [43].

Κατάσταση λίπανσης	Υδροδυναμική λίπανση	Μικτές συνθήκες	Οριακή λίπανση
Μηχ. Σύστημα	Έδρανα κύλισης	Οδ. Τροχοί, έδρανα μέτριας λίπανσης	Τροχός - σιδηροτροχιά
Παράμετρος λίπανσης $\Lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}$	$\Lambda > 3$	$\Lambda < 3$	$\Lambda \sim 0$
Κατανομή τάσεων			
Μηχανισμός αστοχίας	Κόπωση Hertzian μέγιστο	Κόπωση Hertzian μέγιστο	Κόπωση + Φθορά
Μορφή αστοχίας			

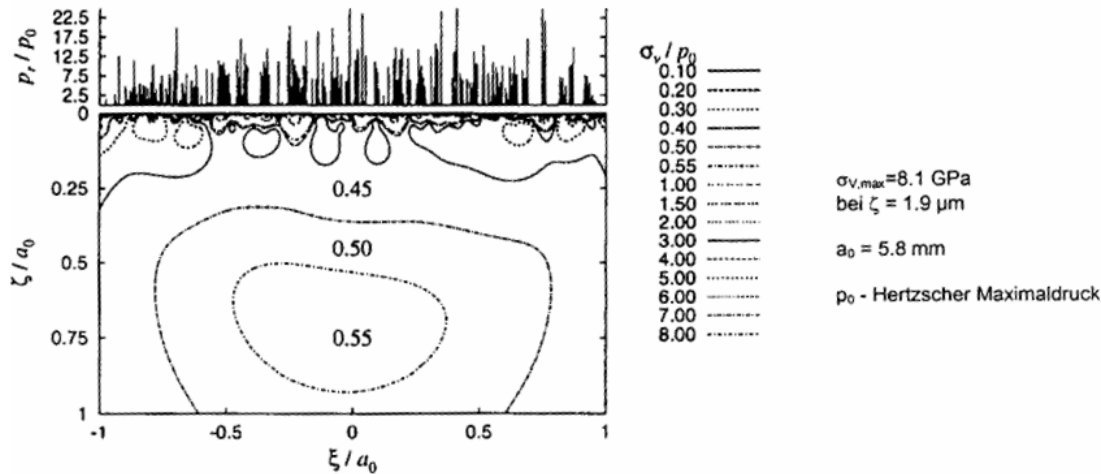
Σχήμα 2.25 : Επισκόπηση των τριών βασικών καταστάσεων λίπανσης σε συνάρτηση με την παράμετρο Λ .

- Γεωμετρική προσέγγιση των μετρούμενων πραγματικών επιφανειών. Η βιβλιογραφία βρίθει από μοντέλα προσέγγισης τραχύτητας, [45], [44], [35], [08] όπως για παράδειγμα μέσω χρήσης ημιτονοειδών συναρτήσεων, ή ημικυκλίων, μέσω των οποίων προσεγγίζεται η μέση τραχύτητα και η κυμάτωση της επιφάνειας. Κατόπιν αυτής της μετατροπής, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται στις μικροεπαφές μέσω των αναλυτικών εξισώσεων Hertz.

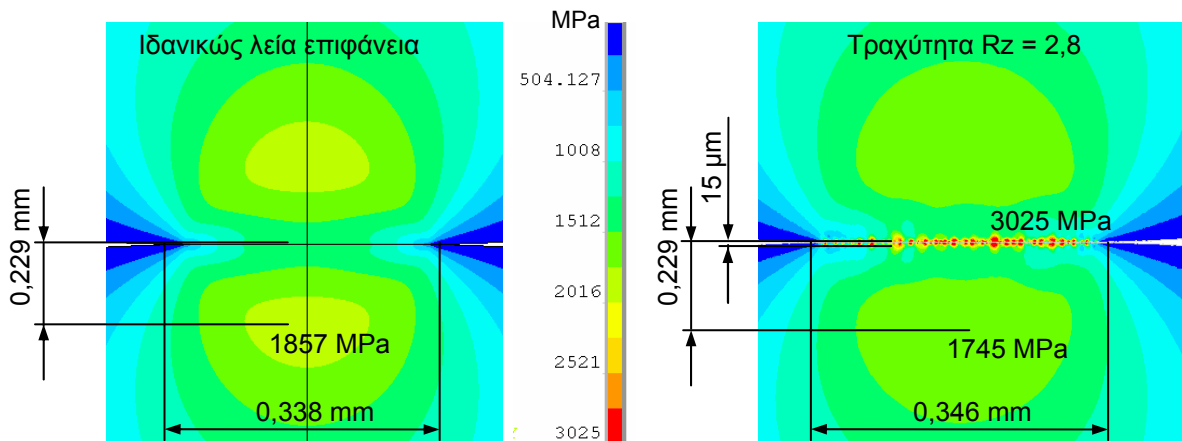


Σχήμα 2.26 : Προσέγγιση πραγματικού προφίλ τραχύτητας με ημικύκλια και αντιμετώπισή τους ως μικροεπαφών Hertz. [45]

2. Μέσω ντετερμινιστικών προσεγγίσεων που συνδυάζουν την απεικόνιση πραγματικών επιφανειών και προσομοιώσεις FEM. Η τάση αυτή είναι φυσικά νεότερη, λόγω της αυξημένης υπολογιστικής δύναμης των σημερινών συστημάτων, που επιτρέπουν την περιγραφή των εντατικών πεδίων και σε μικροσκοπικό επίπεδο πχ.[46],[22]. Παράδειγμα της μεθόδου αυτής αποτελεί η παρούσα εργασία (κεφ.4.2)



Σχήμα 2.27 : Κατανομή επιφανειακών πιέσεων και τάσεων Mises σε τραχεία επιφάνεια/ πλήρως ελαστική παραμόρφωση [45]



Σχήμα 2.28 : Κατανομή τάσεων Mises σε ιδανικώς λείες (α) και τραχείες (β) κυλινδρικές επιφάνειες ($R_z=0.3 \mu\text{m}$). Παρατηρείται η μεγάλη αύξηση των τάσεων λόγω των ανωμαλιών της τραχύτητας. Οριακές συνθήκες: Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση, φορτίο $F=1554\text{N}$, ακτίνα $R=7.94\text{mm}$, μήκος επαφής $L=0.934\text{mm}$ / Μοντέλο βλ. κεφ. 4 ή παράρτημα

2.3.3 Ανταγωνιστικοί μηχανισμοί κόπωσης

Η κόπωση του υλικού όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, είναι ο μοναδικός αναπόφευκτος μηχανισμός αστοχίας που περιορίζει τη διάρκεια ζωής σε υψηλά φορτιζόμενες επαφές κύλισης. Η διαδικασία κόπωσης για πολύ υψηλά φορτία επιφάνειας, μπορεί να διαχωριστεί σε ορισμένες φάσεις, κατά τη διάρκεια των οποίων λαμβάνουν χώρα μη αναστρέψιμες μετατροπές στο υλικό. Αυτές είναι [47]:

1. Έναρξης κύλισης / (shakedown)

Η φάση έναρξης σε επαφές στοιχείων κύλισης διαρκεί λίγους κύκλους λειτουργίας και κυριαρχείται από τη πλαστική παραμόρφωση ή/και τη απόξεση (abrasion) των εξοχών της τραχύτητας. Αποτέλεσμα αυτών των παραμορφώσεων είναι η δημιουργία παραμενουσών τάσεων κοντά στην επιφάνεια, με σημαντική επίδραση στη διαδικασία κόπωσης του υλικού. Το τέλος της διαδικασίας αυτής έρχεται με την λείανση των επιφανειακών ανωμαλιών που προκαλούν εκτριβή υλικού και την μείωση των όποιων υψηλών επιφανειακών πιέσεων λόγω της ομαλοποίησης της επιφάνειας [23].

Μετά από μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες εναλλαγές φόρτισης στιγμιαίες τοπικές υπερφορτίσεις (που οφείλονται στις ανομοιογένειες του υλικού) προκαλούν ίχνη πλαστικής μικροπαραμόρφωσης σε ολόκληρο το υλικό. Οι κατανεμημένες αταξίες ολισθαίνουν και συγκεντρώνονται στις λεγόμενες γραμμές/ζώνες ολίσθησης (μετάθεση ατομικών επιπέδων των κρυστάλλων). Η δημιουργία των γραμμών και λωρίδων ολίσθησης, οφείλεται στο μέγεθος του εύρους της δυναμικής τάσεως. Η αυξομείωση του εξωτερικού δυναμικού φορτίου, προκαλεί την αυξομείωση της ελαστικής παραμόρφωσης των κρυστάλλων και της πλαστικής παραμόρφωσης στις γραμμές ολίσθησης.

Επίσης από πειράματα έχει διαπιστωθεί, ότι το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης μειώνεται συνεχώς με την αύξηση του αριθμού του κύκλου φορτίσεως. Οι κινήσεις των αταξιών μειώνονται συνεχώς σε αριθμό και μέγεθος μέχρις ότου οι αταξίες δημιουργώντας γραμμές ολισθήσεως ή φτάνοντας σε όρια κρυστάλλων που δεν μπορούν να διαπεράσουν. Το μακροσκοπικό φαινόμενο του περιορισμού και του τελικού μηδενισμού της πλαστικής παραμόρφωσης ενός υλικού με την αύξηση του αριθμού των φορτίσεων ονομάζεται δυναμική κράτυνση (shakedown) [48].

2. Φάση σταθερής κατάστασης (steady state phase)

Με την ολοκλήρωση της δυναμικής κράτυνσης τερματίζεται η πρώτη φάση της κόπωσης. Η δεύτερη φάση αρχίζει κατά προτίμηση στις γραμμές ολίσθησης, στην (ήδη καταπονημένη) επιφάνεια επαφής ή γενικότερα σε όποια σημεία οι τοπικές μικροτάσεις είναι μεγάλες. Δυνατότητα πια ολισθήσεως των ατομικών επιπέδων και επομένως εκφορτίσεως του υλικού δεν υπάρχει πια και έτσι το υλικό παθαίνει διάσειση με αποτέλεσμα την τοπική θραύση αποχωρισμού και τη δημιουργία αρχικών **μικρορωγμών** της κόπωσης

Ανάλογα της θέσης τους στο υλικό και με τη μορφή της κρυσταλλικής δομής του υλικού οι αρχικές μικρορωγμές μπορούν κατά τη συνέχιση της δυναμικής φορτίσεως να ξεπεράσουν ή όχι τα όρια των κρυστάλλων και έτσι να έχουν την εξής εξέλιξη:

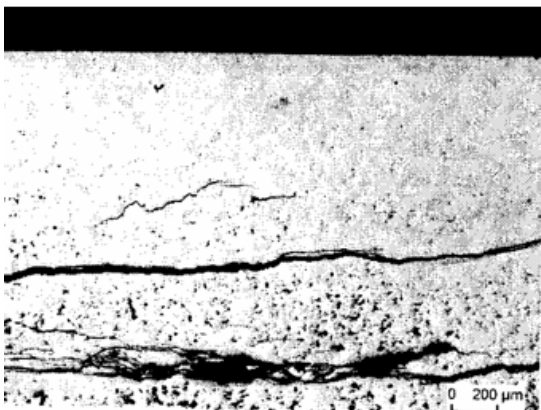
Μερικές από αυτές βρίσκονται σε απομονωμένες θέσεις και οδηγούν στην εκφόρτιση του κρυσταλλικού πλέγματος στο οποίο ανήκουν. Έτσι δεν εξελίσσονται και γι αυτό ονομάζονται **στάσιμες αρχικές μικρορωγμές**. Άλλες πάλι που δεν εκφορτίζουν αρκετά το κρυσταλλικό τους περιβάλλον, αυξάνονται σε μήκος, διαπερνούν τα όρια των κρυστάλλων και συνενώνονται με γειτονικές μικρορωγμές. Κατά τον ίδιο τρόπο, όπως και προηγουμένως, οι περισσότερες απ αυτές τις μακρορωγμές εκφορτίζουν το υλικό, απομονώνονται και μετά από έναν αριθμό φορτίσεων σταματούν να μεγαλώνουν. Αυτές ονομάζονται **στάσιμες μακρορωγμές (damage accumulation)**.

Όταν η φόρτιση είναι στην περιοχή δυναμικής αντοχής του υλικού, τότε όλε οι μακρορωγμές μετά από ένα αριθμό φορτίσεων μετατρέπονται σε στάσιμες.

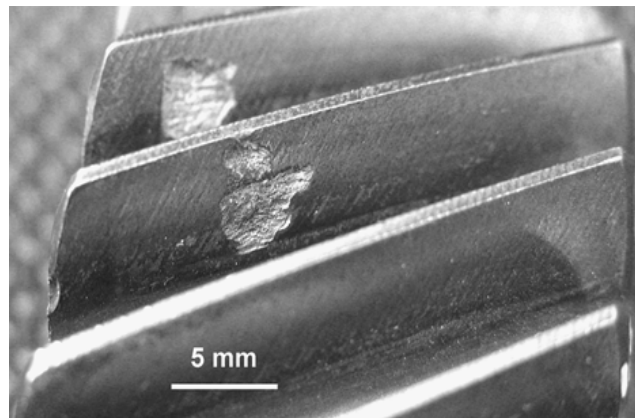
3. Φάση αστάθειας

Όταν η φόρτιση βρίσκεται στην περιοχή κοπώσεως του υλικού τότε αρχίζει η τρίτη φάση της κοπώσεως, κατά την οποία πολύ λίγες από τις μακρορωγμές συνενώνονται με άλλες λόγω θέσεως τους, για να δημιουργήσουν τις **ρωγμές κοπώσεως (crack initiation)** των οποίων το μήκος αυξάνεται συνεχώς με χαμηλή βέβαια ταχύτητα. Όταν συμπληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός φορτίσεων, μια από τις ρωγμές κοπώσεως, που ονομάζεται **κύρια ρωγή κοπώσεως**, θα διαδοθεί ταχύτατα (**crack propagation**) και θα προκαλέσει τη βίαιη θραύση της φορτιζόμενης διατομής (εκκοίλλανση – pitting).

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, υπό χαμηλότερα φορτία (<2GPa), ο χρόνος σχηματισμού της κύριας ρωγμής κόπωσης αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι της συνολικής διάρκειας ζωής, και για το λόγο αυτό συχνά ταυτίζεται με αυτήν.



Σχήμα 2.29 : Παράδειγμα τομής ρωγμής κόπωσης που αναπτύσσεται κάτω από την επιφάνεια κύλισης [42]



Σχήμα 2.30 : Pitting σε ελικοειδή οδοντωτό τροχό λόγω επιφανειακής κόπωσης

Η κόπωση του υλικού εμφανίζει δε και την παρακάτω διαφοροποίηση ως προς την περιοχή από την οποία εκκινείται [49].

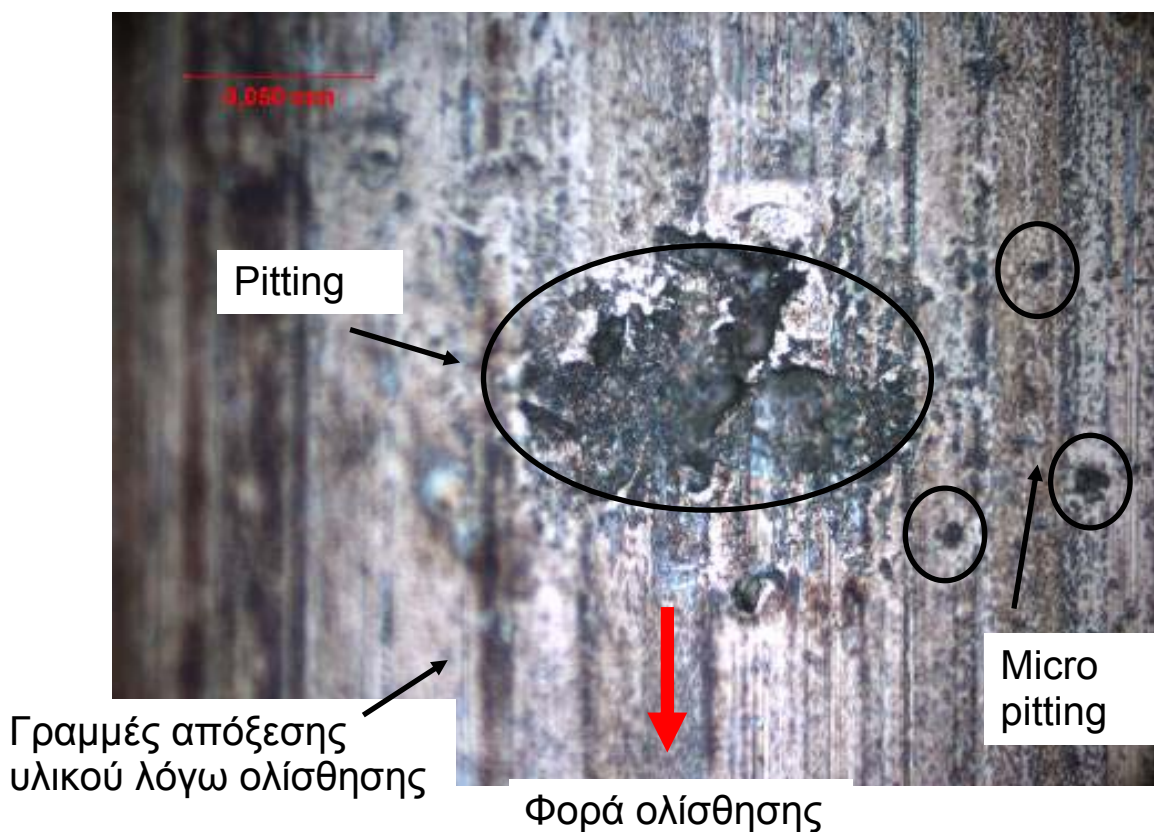
1 . Αστοχία που ξεκινά μακριά από την επιφάνεια κύλισης

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία κόπωσης σε στοιχεία κύλισης, κάτω από την επιφάνεια κύλισης, στο βάθος που εμφανίζεται η μέγιστη τάση που προβλέπει ο Hertz, δημιουργείται ρωγή (που ενισχύεται από την ύπαρξη ελαττωμάτων – εγκλεισμάτων) η οποία και θα διαδοθεί ως την επιφάνεια [11]. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία εκκοιλάνσεων (pittings), άρα και η αστοχία του υλικού.

2 . Αστοχία από την επιφάνεια

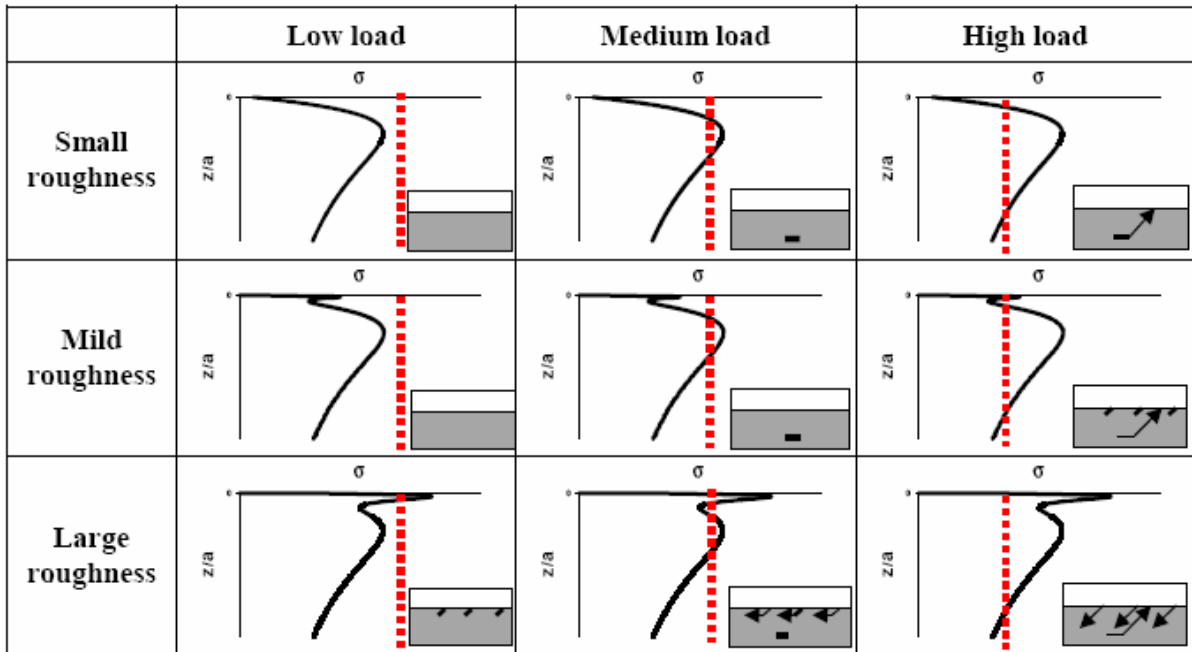
Ωστόσο, οι κατασκευαστές στοιχείων κύλισης και τριβέων (πχ SKF) και συγγραφείς (πχ[44],[50],[9]) θεωρούν ως κύριο λόγο καταστροφής του υλικού, την επιφανειακή κόπωση και φθορά λόγω μη επαρκούς λίπανσης και παρουσίας αποβλήτων.

Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν, για τιμές $\Lambda < 0.3$, δείχνουν πολύ μικρές διάρκειες ζωής και εμφανίζουν μεγάλη διασπορά. Ο λόγος είναι οι πολύ υψηλές τάσεις που εμφανίζονται λόγω των μικροεπαφών μεταξύ των εξοχών της τραχύτητας, που ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού. Επακόλουθο αυτών είναι η δημιουργία παραμενουσών τάσεων και η μετατροπή της δομής του υλικού. Τα ελαττώματα όμως που δημιουργούνται εξ αιτίας αυτών είναι ποικίλα. Έτσι είναι δυνατόν να δημιουργηθούν επιφανειακές ρωγμές, που όμως δεν θα εξαπλωθούν σε όλο τον όγκο του υλικού (micro pittings), ή και ρωγμές που λόγω των υψηλών τάσεων μπορεί να διαδοθούν και να επιφέρουν την καταστροφή του δοκιμίου.



Σχήμα 2.30 : Επιφανειακή θραύση – εικόνα σε μεγέθυνση- δοκιμίου που εξετάζεται από την παρούσα διπλωματική. Επισημαίνονται ορισμένα είδη φθοράς.

Σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται ένας «ανταγωνισμός» μεταξύ παραπάνω μηχανισμών [51]. Παρατηρείται δηλαδή ταυτόχρονα ανάπτυξη ρωγμών που μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία, τόσο από την επιφάνεια, όσο και μακριά από αυτή.



Σχήμα 2.31 : Ανταγωνισμός μηχανισμών αστοχίας (ρωγμές από επιφάνεια / ρωγμές από το βάθος της μέγιστης τάσης Hertz). Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται το όριο αντοχής του υλικού [51]

Οι Hertzian-ές τάσεις, η αλληλεπίδραση τραχύτητας, τα επιφανειακά ελαττώματα, οι παραμένουσες τάσεις, οι μετατροπές στη δομή του υλικού κλπ. καθιστούν σαφή το λόγο για τον οποίο εμφανίζεται η τάση να αντιμετωπίζεται η κόπωση εκ κύλισης ως πολύπλοκο στοχαστικό μέγεθος.

3 Μοντέλα πρόβλεψης αντοχής

3.1 Εισαγωγή

Για την πρόβλεψη της αντοχής μηχανολογικών κατασκευών ακολουθούνται κάποιες συνήθεις διαδικασίες. Πέραν της μεθόδου της κλασσικής αντοχής υλικών [7], χρησιμοποιούνται και μοντέλα που προτείνονται από κατασκευαστές συγκεκριμένων στοιχείων μηχανών, όπως ρουλεμάν, οδοντωτούς τροχούς κλπ [DIN 3979], [DIN 3990], [DIN ISO 281], [VDI 2142]. Τα δεύτερα μάλιστα, αν και βασίζονται συνήθως στην απλοποιημένη μελέτη της καταπόνησης (πχ. θεώρηση μόνο της μέγιστης ονομαστικής τάσης που αναπτύσσεται σε μια διατομή), έχουν επαληθευτεί τόσο σε επίπεδο πειράματος όσο και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Ωστόσο, με τις παραπάνω μεθόδους δεν είναι δυνατόν να μελετηθεί πλήρως ο πολύπλοκος μηχανισμός κόπωσης σε κύλιση και να προβλεφθεί η διάρκεια ζωής στοιχείων που αστοχούν λόγω αυτής. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλοί τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού. Έτσι συναντώνται μέθοδοι που:

- εξετάζουν τις **φυσικές ιδιότητες** δοκιμών και πως αυτές μεταβάλλονται, υπό διαφορετικές παραμέτρους (γεωμετρία, υλικό, βαθμός ομοιογένειας, παραμένουσες τάσεις κλπ) που επιδρούν στην αντοχή [52],[53].
- μελετούν τη συσσωρευόμενη πλαστική παραμόρφωση, κράτυνση και γενικότερη συμπεριφορά του υλικού (**shakedown, ratchetting**) σε κόπωση ολιγοκυκλικής καταπόνησης (LCF), και με κατάλληλες παραδοχές ανάγουν τα αποτελέσματα για πολυκυκλική κόπωση [54].
- βασίζονται στη **μηχανική θραύσης** και εξετάζουν την τρισδιάστατη διάδοση της ρωγμής σε συνάρτηση με το εντατικό πεδίο, λαμβάνοντας υπ όψιν και την επίδραση ανομοιογενειών στη δομή του υλικού, της λίπανσης, παραμενουσών τάσεων κλπ. [55-58].
- μελετούν **συνδυαστικά** τη κόπωσης με το σύνολο των τριβολογικών φαινομένων (άρωση, εκτριβή υλικού λόγω τραχύτητας κλπ) που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια κύλισης (Fretting Fatigue) [23].
- προσεγγίζουν την κόπωση ως **στοχαστικό φαινόμενο**, και προβλέπουν τη διάρκεια ζωής με εμπειρικά-στατιστικά μοντέλα. Το παρόν κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στο συγκεκριμένο είδος. Αναφέρεται στη θεωρία του Weibull και στην μετεξέλιξή της από τους Lundberg & Palmgren και Ioannides & Harris. Η επιτυχία των μελετών τους ήταν τέτοια, ώστε να γίνει το μοντέλο τους αποδεκτό από τη βιομηχανία κατασκευής τριβέων κύλισης και να ισχύσει ως στάνταρ κατά DIN ISO.

3.2 Θεωρία του Weibull

Η καλή λειτουργία των σύγχρονων τεχνολογικών κατασκευών εξαρτάται από την αξιοπιστία ενός πλήθους συνιστωσών ή εξαρτημάτων που τις συγκροτούν. Όμοια εξαρτήματα, που λειτουργούν κάτω από τις ίδιες συνθήκες μπορεί να αστοχούν σε διαφορετικούς και κατά κανόνα απροσδιόριστους χρόνους, λόγω πολλών παραγόντων όπως π.χ. ανομοιογένειες υλικού, διαφοροποιήσεις και τυχαίες μεταβολές κατά την κατεργασία τους κλπ. Λόγω του γεγονότος αυτού, είναι απαραίτητη μια στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ο Weibull, γνωστός από τη στατιστική του θεωρία, ανέπτυξε το ονομαζόμενο «μοντέλο του πιο αδύναμου συνδέσμου», **weakest link model**, για την περιγραφή αυτού του φαινομένου. Βάση αυτού, είναι η υπόθεση ότι στον όγκο ενός υλικού υπάρχουν στατιστικώς κατανεμημένα ελαττώματα από τα οποία, υπό από εναλλασσόμενο φορτίο είναι δυνατόν να σχηματιστεί μια ρωγμή κόπωσης (crack initiation) και να αστοχήσει (κατά την λογική μιας αλυσίδας που θα σπάσει, όταν αστοχήσει ο πιο αδύναμος κρίκος της). Επειδή μάλιστα δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η διαδικασία διάδοσης της ρωγμής (crack propagation), το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις όπου η «συνεισφορά» της στην ολική διάρκεια ζωής του είναι ήσσονος σημασίας [59]. Η θεωρία του Weibull έχει βρει ευρύτατη εφαρμογή για την εκτίμηση της αντοχής υλικών συμπεριλαμβανομένης φυσικά και της αντοχής σε κόπωση εκ κύλισης.

Το μοντέλο του Weibull [10] δίνει την πιθανότητα αστοχίας ενός δοκιμίου/στοιχείου σε συνάρτηση προς μια χαρακτηριστική του υλικού $n(\sigma)$ και τον καταπονούμενο όγκο του.

$$\log\left(\frac{1}{S}\right) = -\int_V n(\sigma) dV \quad \text{εξ. 3.1}$$

S η πιθανότητα μη αστοχίας του δοκιμίου
 $n(\sigma)$ χαρακτηριστική του υλικού
 V ο καταπονούμενος όγκος

Η σχέση μεταξύ των αναπτυσσόμενων τάσεων, της διάρκειας ζωής και του ορίου αντοχής χρησιμοποιήθηκε επίσης από τον Weibull για την προσέγγιση της καμπύλης Wöhler. Θεώρησε μάλιστα το μοντέλο του κατάλληλο να προβλέψει κόπωση εκ κύλισης και πρότεινε στους Lundberg Palmgren και Zaretsky [11],[12],[18] τη περιγραφή της χαρακτηριστικής του υλικού με τη σχέση $n(\sigma) = \tau^c N^e$

$$\log\left(\frac{1}{S}\right) = -N^e \int_V \tau^c dV \quad \text{εξ. 3.2}$$

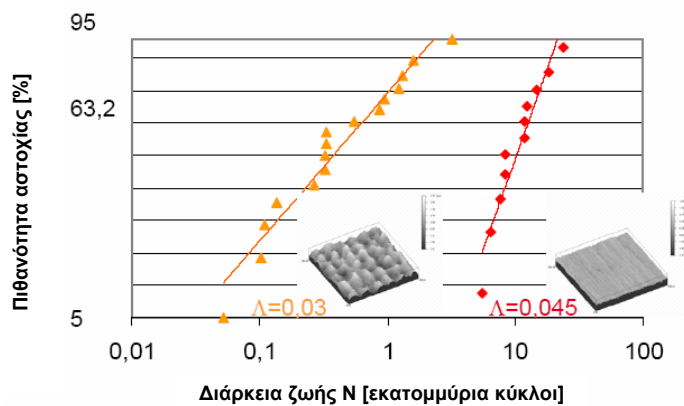
$n(\sigma) = \tau^c N^e$ η χαρακτηριστική του υλικού κατά Weibull
 τ : ισοδύναμη τάση
 c : εκθέτης εξαρτώμενος από το κριτήριο
 N : αριθμός κύκλων λειτουργίας
 e : εκθέτης Weibull
 S : η πιθανότητα μη αστοχίας του δοκιμίου
 V : ο καταπονούμενος όγκος

Ο Weibull μάλιστα κατέληξε, πως η κατανομή της διάρκειας ζωής ή διαφορετικά ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μιας ομογενούς ομάδας από στοιχεία κύλισης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{S} \right) = e \ln N + \ln A \quad \text{εξ. 3.3}$$

N αριθμός κύκλων λειτουργίας
e εκθέτης Weibull
S η πιθανότητα μη αστοχίας του δοκιμίου
A σταθερά

Αν δε, παραστεί η κατανομή της πιθανότητας γραφικά σε συνάρτηση προς τον κύκλο φόρτισης, προκύπτει η ευθεία Weibull, της οποίας η κλίση αντιστοιχεί στον εκθέτη e



Σχήμα 3.1 : Διάγραμμα Weibull για τις πειραματικές τιμές διάρκειας ζωής για παραμέτρους $\Lambda=0.03$ (shot peened επιφάνεια $R_q=0.5$), $\Lambda=0.045$ (αποπερατωμένη $R_q=0.3$)

Η θεωρία του Weibull έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε μια ευρεία γκάμα προβλημάτων για την πρόβλεψη του ορίου αντοχής [59] και την επίδραση σε αυτό διαφόρων κατεργασιών [60] ή βελτιστοποίηση συστημάτων [61] κλπ. Για την περιγραφή της κόπωσης και της εκτίμησης διάρκειας ζωής εδράνων κύλισης εφαρμόστηκε το μοντέλο του Weibull από τους Lundberg και Palmgren:

3.3 Θεωρία των Lundberg & Palmgren

Βασισμένοι στην εργασία του Weibull [10], οι Lundberg & Palmgren [11],[12] ανέπτυξαν μια θεωρία για την πρόβλεψη της ζωής των εδράνων κύλισης. Το μοντέλο τους βασίζεται σε μια εμπειρική συσχέτιση μεταξύ της πιθανότητας μη αστοχίας S, της μέγιστης ορθογωνικής διαμητικής τάσης, των αριθμών κύκλων φόρτισης ως την αστοχία N, τον καταπονούμενο όγκο και το βάθος z_0 , στο οποίο αναπτύσσεται η μέγιστη διαμητική τάση:

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) \propto \frac{N^e \tau_0^c V}{z_0^h} \quad \text{εξ. 3.4}$$

S η πιθανότητα μη αστοχίας του δοκιμίου
 N αριθμός κύκλων λειτουργίας
 e εκθέτης Weibull
 τ_0 ορθογωνική διατμητική τάση
 c εκθέτης κριτηρίου
 V ο καταπονούμενος όγκος
 z_0 βάθος που εμφανίζεται η μέγιστη διατμητική τάση
 h εκθέτης βάθους

Η επιτυχία της θεωρίας τους ήταν τέτοια, που από αυτήν προέκυψε η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για τον αναλυτικό προσδιορισμό της διάρκειας ζωής των ρουλεμάν:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad \text{εξ. 3.5}$$

L_{10} : ονομαστική διάρκεια ζωής σε 10^6 περιστροφές, στις οποίες θα αντέξει το 90% των εδράνων
 C: δυναμική ικανότητα φορτίσεως
 P: ισοδύναμο φορτίο εδράνου
 p: εκθέτης, =3 για ένσφαιρους τριβείς, =10/3 για τις άλλες περιπτώσεις

Η υπόθεση Hertzian-ών συνθηκών επαφής καθιστά δυνατή την αντικατάσταση των παραμέτρων τ_0 , z_0 V με το ισοδύναμο φορτίο του εδράνου P. Ο δε αριθμός των κύκλων φόρτισης N μπορεί να πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό στροφών/sec n από όπου προκύπτει ο χρόνος ζωής L_{10} .

Επίδραση του βάθους z_0 όπου αναπτύσσεται η μέγιστη ορθογωνική διατμητική τάση

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του συγκεκριμένου μοντέλου και αυτού του Weibull είναι η εισαγωγή του όρου z_0 . Η θεωρία του Weibull στηρίζεται στην υπόθεση ότι η πρώτη ρωγμή οδηγεί στη θραύση. Κατά τη διάρκεια δοκιμών όμως οι Lundberg & Palmgren παρατήρησαν την ανάπτυξη ρωγμών παράλληλες στην κατεύθυνση της κύλισης, κάτω από την επιφάνεια, που όμως δεν κατάληγαν σε αυτή. Γι αυτό το λόγο κατά την κατάστρωση της εξίσωσης λήφθηκε υπ όψιν, ότι η πιθανότητα ανάπτυξης ρωγμής κόπωσης εξαρτάται από το βάθος z_0 στο οποίο εμφανίζονται οι επικίνδυνες ορθογωνικές διατμητικές τάσεις. Γίνεται φανερό από την εξίσωση, πως όσο μικρότερο το βάθος που αναπτύσσονται οι τ_0 τόσο μεγαλύτερη και η πιθανότητα αστοχίας.

3.4 Μοντέλο των Ioannides & Harris

Το 1985 οι Ioannides & Harris [14] δημοσίευσαν ένα νέο μοντέλο πρόβλεψης διάρκειας ζωής εδράνων κύλισης, το οποίο βασίζεται στη θεωρία των Lundberg & Palmgren και αποτελεί επέκτασή της. Πυρήνας της νέας αυτής μεθόδου είναι η υπόθεση μιας στατιστικής εξάρτησης μεταξύ της πιθανότητας αστοχίας και της εντατικής κατάστασης κάθε ενός στοιχειώδους όγκου, στους οποίους διαιρείται το υπό εξέταση στοιχείο κύλισης. Στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν δύο κριτήρια κόπωσης (για την περιγραφή της εντατικής κατάστασης), αυτό του Tresca και του Von Mises. Στο μοντέλο βέβαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα επίσης κριτήρια. Χαρακτηριστικά, σε κατοπινή του δημοσίευση ο Ioannides χρησιμοποιεί το κριτήριο Dang Van, [16], οποίο αναπτύχθηκε ειδικά για την περιγραφή κόπωσης εκ κύλισης [62]. Ενδιαφέρουσα είναι επίσης και η επιτυχία χρήσης του μοντέλου και σε πρόβλεψη κόπωσης λόγω στρέψης [14]. Παρακάτω παρουσιάζεται η εξίσωση του μοντέλου, και εξηγούνται οι βασικοί του όροι:

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) = AN^e \int_V \frac{(\sigma - \sigma_u)^c}{z^{th}} dV \quad \text{εξ. 3.6}$$

S : η πιθανότητα μη αστοχίας του δοκιμίου

N : αριθμός κύκλων λειτουργίας

V : ο εξεταζόμενος όγκος

A : σταθερά (προσδιορίζεται πειραματικά, όπως και το σ_u)

e : εκθέτης Weibull, $e=10/9$ για ελλειπτικού τύπου επαφές

c : εκθέτης κριτηρίου $c=31/3$

h : εκθέτης σταθμισμένου μέσου ύψους, $h=7/3$ ή $h=0$ για πραγματικές τραχειές επιφάνειες

z^t : σταθμισμένο προς τις τάσεις κρίσιμο βάθος

σ_u : όριο αντοχής

σ : κριτήριο κόπωσης (το μοντέλο δεν περιορίζεται στη χρήση ενός μοναδικού)

$$\text{Von Mises: } \sigma_{V,Mises} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad \text{εξ. 3.7}$$

$$\text{Tresca: } \tau_{\max} = \frac{\max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)}{2} \quad \text{εξ. 3.8}$$

$$\text{Dang Van: } \sigma_{Dang\ Van} = \tau_{\max} - k_{hyd} p_{hyd} \quad \text{εξ. 3.9}$$

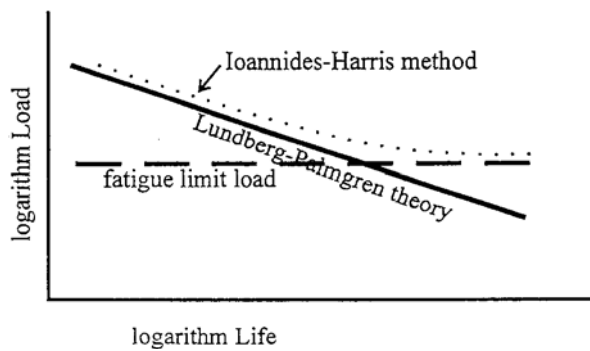
$$- p_{hyd} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad \text{και} \quad \text{εξ. 3.10}$$

$$- k_{hyd} = 0.3 \quad \text{για να είναι σύμφωνο με την έρευνα Dang Van [16]}$$

Όριο αντοχής σ_u

Μια σημαντική προσθήκη είναι η εισαγωγή του ονομαζόμενου ορίου κόπωσης “fatigue limit” σ_u , διαφορετικό για κάθε υλικό. Κατά την ολοκλήρωση, αν ο όρος $(\sigma - \sigma_u) < 0$, τότε το κλάσμα μηδενίζεται. Ως υπεύθυνοι λοιπόν για την κόπωση και τελική αστοχία του δοκιμίου θεωρούνται μόνο οι στοιχειώδεις όγκοι στους οποίους η τοπικώς αναπτυσσόμενη τάση ξεπερνάει το όριο αυτό. Έτσι είναι δυνατόν το μοντέλο να παραστήσει και την περιοχή του ορίου αντοχής της καμπύλης Wöhler που εμφανίζουν οι μοντέρνοι χάλυβες. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό, είναι πως όταν η τάση στον υπό εξέταση όγκο υπερβεί το όριο διαρροής του υλικού σ_D , το σ_u μειώνεται γραμμικά και τελικά μηδενίζεται αν η τάση φτάσει στο όριο θραύσης του σ_F . Έτσι «ενισχύεται» η αρνητική επίδραση των πλαστικών τάσεων απεικονίζεται σωστά το πρώτο τμήμα της καμπύλης Wöhler, στην περιοχή της ολιγοκυκλικής κόπωσης. Με διαφορετικές τιμές του ορίου λοιπόν μπορούν να παρασταθεί η επίδραση φαινομένων πλαστικότητας, καθαρότητας υλικού κλπ.

Τέλος να σημειωθεί πως με τη χρήση ως κριτηρίου κόπωσης τη μέγιστη ορθογωνική διατμητική τάση και με όριο $\sigma_u = 0$, το μοντέλο Ioannides & Harris μεταπίπτει το μοντέλο των Lundberg & Palmgren.

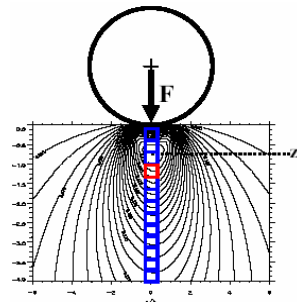


Σχήμα 3.2 : Σύγκριση μοντέλων IH και LP σε λογαριθμικό διάγραμμα φορτίου-διάρκειας ζωής [63]

Αντικατάσταση του βάθους z_0 με το βάθος z'

Καθώς πια εξετάζεται η ολική κατανομή τάσεων στον υπό εξέταση όγκο, ο όρος z που αντιστοιχούσε στην τοποθεσία της μέγιστης ορθογωνικής διατμητικής τάσης για το μοντέλο LP, αντικαθίσταται από το σταθμισμένο (σύμφωνα με τις τάσεις) μέσο z'

$$z' = \frac{\int_0^{z_{\max}} (\sigma_i - \sigma_u) z_i dz}{\int_0^{z_{\max}} (\sigma_i - \sigma_u) dz} \text{ για κάθε } dV_i$$



εξ.3.11

Με τη χρήση του όρου αυτού συνοπλογίζεται η έντονη επίδραση των τάσεων που δημιουργούνται λόγω της τραχύτητας, όταν το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του εντατικού πεδίου του Hertz είναι απλοποιημένο, δηλαδή δεν μοντελοποιείται η πραγματική τεχνική επιφάνεια. Αν ωστόσο παρασταθεί η τραχύτητα και οι μικρο- Hertzian-ες επαφές, που δημιουργούνται λόγω αυτής, τότε ο όρος αυτός απομακρύνεται μέσω του μηδενισμού του εκθέτη h , όπως προτείνει και ο Ioannides et al. [64]

Τέλος να σημειωθεί πως οι εκθέτες c , h , e είναι εμπειρικά προσδιορισμένοι για χάλυβα AISI 52100.

DIN ISO 281

Οι όποιες προεκτάσεις του παρόντος μοντέλου σε σχέση με των L&P περιγράφηκαν αναλυτικά [16] και καθιερώθηκαν στην πράξη κατά ISO [17] μέσω των συντελεστή a_{CL} , (συνάρτηση των κ , n_c , P , P_u) αποτελώντας στην ουσία γενίκευση των όρων a_2 , a_3 στη γνωστή εξίσωση υπολογισμού της διάρκειας ζωής :

$$L_{10} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P} \right)^p \Rightarrow L_{10} = a_1 a_{CL} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad \text{εξ.3.12}$$

L_{10} : ονομαστική διάρκεια ζωής σε 10^6 περιστροφές, στις οποίες θα αντέξει το 90% των εδράνων

C : δυναμική ικανότης φορτίσεως

P : ισοδύναμο φορτίο εδράνου

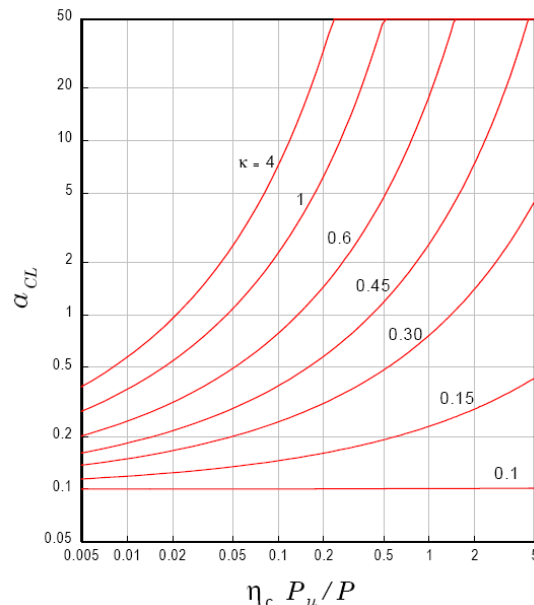
p : εκθέτης, =3 για ένσφαιρους τριβείς, =10/3 για τις άλλες περιπτώσεις

a_1 : συντελεστής εμπιστοσύνης

a_2 : συντελεστής υλικού

a_3 : συντελεστής συνθηκών λειτουργίας

a_{CL} : νέος συντελεστής ISO 281, σε συνάρτηση προς τη σχέση συνεκτικότητας κ (κεφ. 2.3.2), το συντελεστή καθαρότητας n_c , το φορτίο P και το όριο αντοχής του υλικού P_u .



Σχήμα 3.3 : Συντελεστής a_{CL} σε συνάρτηση με το συντελεστή κ , n_c , P , P_u [17]

Παράλληλα με τη θεωρία Ioannides & Harris έχουν προταθεί και άλλα εμπειρικά μοντέλα βασισμένα στη μελέτη του Weibull, όπως των Yu, Harris, [65] ή Zaretsky [17] τα οποία όμως πρέπει ακόμη να δοκιμαστούν. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να εξεταστεί η δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου Ioannides & Harris για πρόβλεψη κόπωσης από κύλιση, λόγω της ως τώρα επιτυχημένης εφαρμογής στη βιομηχανία των εδράνων κύλισης, της καθιέρωσης του ως ISO, και της χρήσης ίδιου τύπου χάλυβα στα πειράματα των Ioannides & Harris και αυτών που θα περιγραφούν στη συνέχεια.

4 Πείραμα – Πρόβλεψη διάρκειας ζωής μέσω FEM

4.1 Περιγραφή του πειράματος

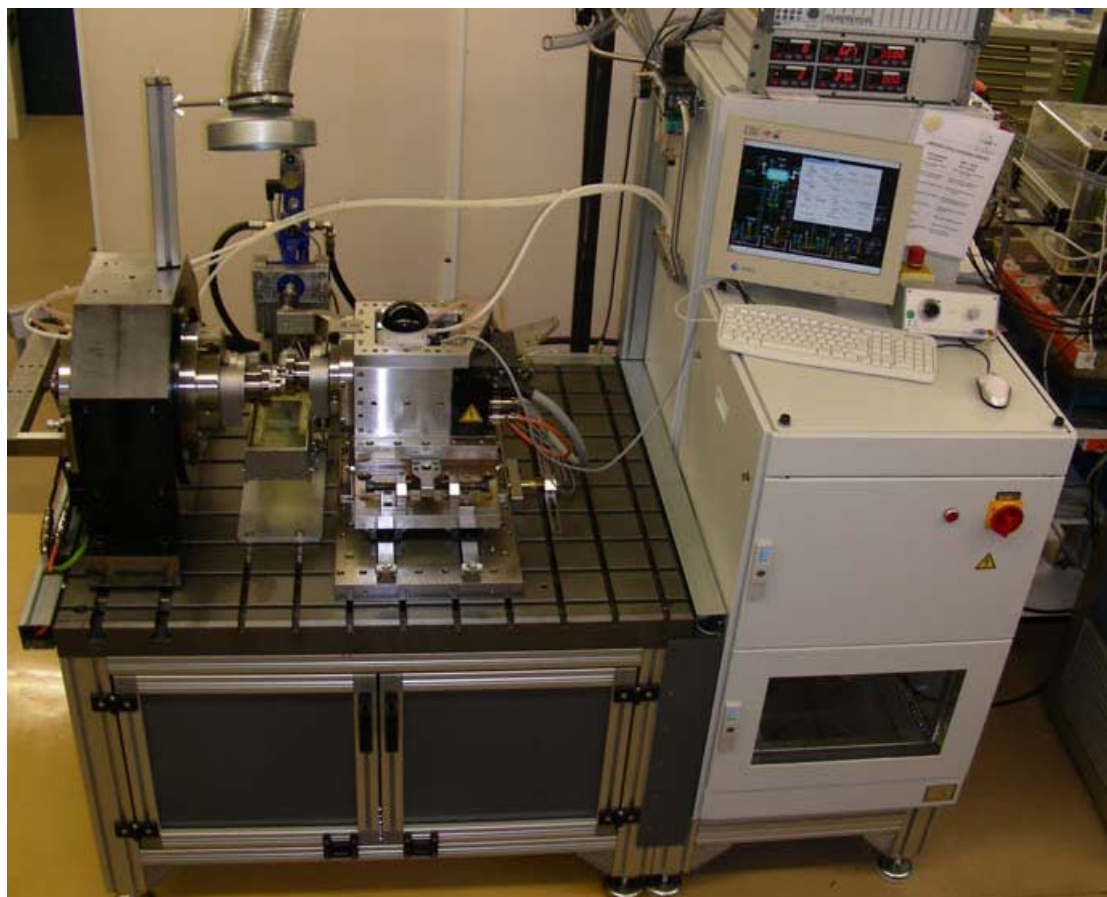
Για την εκπόνηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μια νέο αναπτυχθείσα πειραματική διάταξη. Αυτή επιτρέπει τη μελέτη συστημάτων σε σχετική κύλιση/ολίσθηση, στη συγκεκριμένη περίπτωση δισκοειδών δοκιμίων, υπό απλοποιημένες και ελεγχόμενες συνθήκες λειτουργίας. Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν απαραίτητες για:

- την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων σε τριβολογικές επαφές
- την ανάπτυξη / δοκιμή μοντέλων πρόβλεψης αντοχής
- την κατανόηση και περιγραφή των βασικότερων παραγόντων που επιδρούν στην αντοχή των δοκιμίων

4.1.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική / τριβομετρική διάταξη «Zwei-Scheibenprüfstand» (πειραματική διάταξη δυο δίσκων) του τμήματος CR/ARU2, Robert BOSCH GmbH - Schillerhöhe, Stuttgart, αποτελείται από δυο ανεξάρτητες παράλληλες κινητήριες ατράκτους, στις οποίες τοποθετούνται τα δισκοειδή δοκίμια και τίθενται σε λειτουργία. Η ταχύτητα περιστροφής της κάθε ατράκτου μπορεί να ρυθμιστεί ξεχωριστά. Με αυτό τον τρόπο είναι κατ' αρχήν δυνατόν να επιτευχθούν διαφορετικοί βαθμοί ολίσθησης των δυο δοκιμίων. Η μία από τις δύο κινητήριες ατράκτους είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση του κάθετου προς την κύλιση φορτίου, το οποίο δημιουργείται μέσω ειδικού υδραυλικού συστήματος. Η άτρακτος επιπλέον είναι ελεύθερη να κινείται σε κατακόρυφη μόνο κατεύθυνση. Το σύστημα της δεύτερης ατράκτου και κινητήρα αποτελεί στην ουσία τον στροφέα εδράνου ολισθήσεως, μετατρέποντας την λόγω ολίσθησης των δοκιμίων παραγόμενη τριβή σε ροπή, που τελικά μετράται με ειδικές μετρητικές διατάξεις.

Με τη συγκεκριμένη διάταξη μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες περιστροφής μέχρι και 24000 rpm, και άρα ένα μεγάλος αριθμός κυκλικών φορτίσεων σε ένα πολύ μικρό χρόνο.



Σχήμα 4.1 : Η πειραματική διάταξη. Στη φωτογραφία φαίνονται οι άτρακτοι και οι μετρητικές συσκευές

Συνθήκες και εύρος λειτουργίας

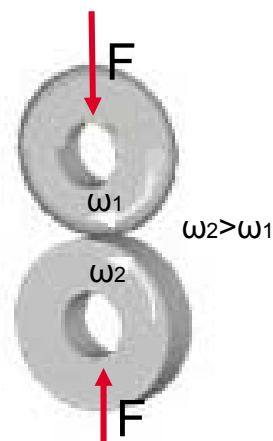
Ταχύτητα περιστροφής	Έως και 24.000 στροφές/λεπτό
Ισχύς	15 kW, 14,3Nm ροπή έकाστης ατράκτου
Κάθετο φορτίο	Έως 2000N
Διάμετρος δισκοειδών δοκιμίων	25-120mm
Μέσο λίπανσης	Diesel, FVA λάδια

4.1.2 Μέτρηση μεγεθών

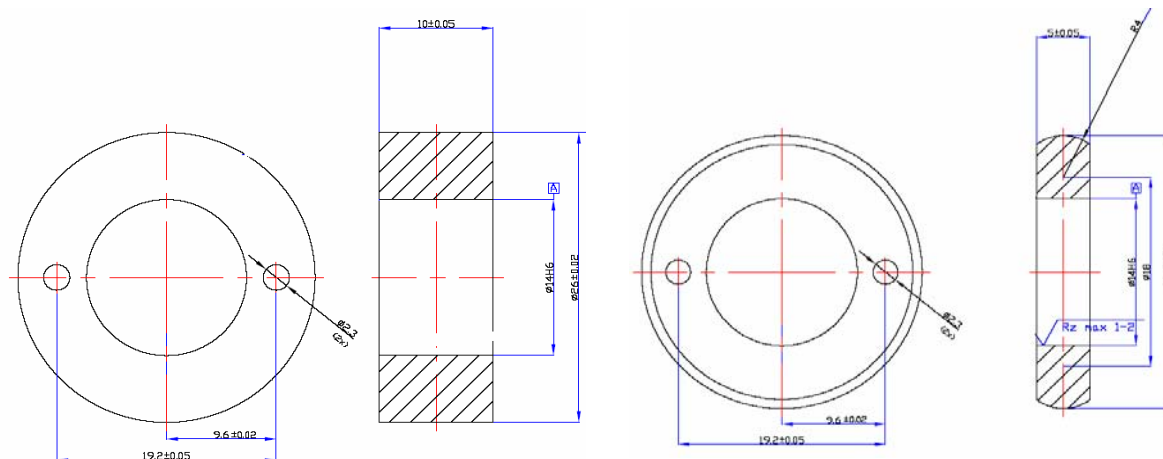
Το πιο σημαντικό προτέρημα της τριβομετρικής διάταξης είναι ευπροσάρμοστη και ακριβής ανάκτηση των μετρούμενων μεγεθών. Έτσι μπορούν να παρακολουθούνται αδιάκοπα οι συνθήκες λειτουργίας. Τα φορτία μετράται μέσω ειδικών δυναμόμετρων, η ταχύτητα περιστροφής μέσω ειδικών μετρητικών οδοντωτών τροχών, οι θερμοκρασία μέσω θερμοστοιχείων. Τέλος η επιτήρηση της κατάστασης των δοκιμίων και η αυτόματη διακοπή του πειράματος όταν επέλθει η κόπωση, γίνεται μέσω της παρακολούθησης του παραγόμενου από την κύλιση θορύβου. Τα όποια μεταβαλλόμενα μεγέθη (τριβή, θόρυβος κλπ) αξιολογούνται ταχύτατα σε περιβάλλον υπολογιστή, με τη μέθοδο DSA (Dynamic Signal Analysis).

4.1.3 Δισκοειδή δοκίμια

Η γεωμετρία των δοκιμίων φαίνεται στα παρακάτω σχέδια. Πρόκειται για δίσκους διαμέτρου 26 mm. Ο ένας εκ των δυο είναι κυλινδρικός ενώ ο δεύτερος έχει διαφορετική ακτίνα καμπυλότητας κατά την κάθετη προς την κύλιση κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία σημειακού (ελλειπτικού) τύπου επαφής και εμφανίζεται αυξημένη επιφανειακή πίεση κατά Hertz σε σχέση με μια πιθανή γραμμική, για το ίδιο κατακόρυφο φορτίο. Για να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση οποιασδήποτε διαφοροποίησης λόγω τυχαίων διαδικασιών κατά την παραγωγή των δοκιμίων, πριν την εκτέλεση οποιουδήποτε πειράματος ελέγχονται και καταγράφονται οι σημαντικότερες παράμετροι τους, όπως η σκληρότητα, οι διαστάσεις και η τραχύτητα.



Σχήμα 4.2 : Αρχή λειτουργίας των δοκιμίων



Σχήμα 4.3 : Γεωμετρία των δισκοειδών δοκιμίων.

4.1.4 Συνθήκες δοκιμών

Η βασική σειρά δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε και ως το σημείο αναφοράς για τη μελέτη διαφόρων επιδράσεων (στην παρούσα εργασία μας απασχολεί μόνο η επίδραση της τριβής, του φορτίου, των παραμενουσών τάσεων και της τραχύτητας) χαρακτηρίζεται από τις εξής συνθήκες:

- Υλικό όλων των δοκιμίων: 100Cr6 (SAE 52100) μπαινιτικός, σκληρότητας 730 ± 50 HV10
- Κατεργασία επιφανειακής σκλήρυνσης: σφαιροβολή
- Ποιότητα επιφάνειας: Αποπερατωμένη μέσης τραχύτητας $R_q=0,3\mu\text{m}$, $R_z=1\mu\text{m}$
- Κάθετο φορτίο: $F_N = 1220$ N

- Επιφανειακή ταχύτητα: $v_1=7,027$ m/s; $v_2=7,1$ m/s, Βαθμός ολίσθησης=1 %, με το καμπυλωμένο δοκίμιο να έχει αρνητική ολίσθηση

’- Λιπαντικό Diesel κατά DIN EN 590, Θερμοκρασία= $20^{\circ}\text{C}\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, (μηχανικώς ελεγχόμενη), συνεκτικότητα $\eta=2\text{mPa s}$

Με την αλλαγή κάθε συνθήκης ξεχωριστά γίνεται ο έλεγχος της επίδρασης της. Για τον έλεγχο της επίδρασης των παραμενουσών τάσεων, η βασική σειρά συγκρίθηκε με δοκίμια που δεν είχαν υποστεί καμία ειδική κατεργασία επιφανειακής σκλήρυνσης και deep rolled δοκίμια. Για τον έλεγχο της επίδρασης της τραχύτητας, η βασική σειρά συγκρίθηκε με επίσης σφαιροβολημένα δοκίμια, που όμως είτε δεν είχαν αποπερατωθεί μετά τη διαδικασία σφαιροβόλησής τους, ή λειάνθηκαν.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύψαν κατά τον έλεγχο της επιρροής του φορτίου και της τριβής, των παραμενουσών τάσεων και της τραχύτητας σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, θα παρουσιαστούν στην παράγραφο 4.3.2

4.2 Μοντελοποίηση FEM

Για την ανάλυση FEM δημιουργήθηκαν δυο μοντέλα.

Ένα 3D μοντέλο για την περιγραφή των επιδράσεων των :

- **Φορτίου και τριβής**
- **Επιφανειακής κατεργασίας σκλήρυνσης**

Ένα 2D μοντέλο για την περιγραφή της επίδρασης της :

- **επιφανειακής τραχύτητας**

Η συμπεριφορά του υλικού μοντελοποιήθηκε ως ελαστική-πλαστική σύμφωνα με δεδομένα που προήλθαν από δοκιμή θλίψης (κατά DIN 50106), $E \text{ module} = 136 \text{ GPa}$, $\nu = 0.26$, $\sigma_{\Delta} = 2.4 \text{ GPa}$ (σελ 73).

Όλα τα μοντέλα δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον ANSYS και γράφθηκαν σε APDL, τη γλώσσα δηλαδή προγραμματισμού του. Η γλώσσα αυτή παρέχει κατ' αρχάς εντολές, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες λειτουργίες του προγράμματος. Επιπλέον, η δομή της είναι όμοια με αυτή της FORTRAN, επιτρέποντας παραμετρικό προγραμματισμό, δημιουργία βρόχων if-do, πράξεις μεταξύ πινάκων, αλληλεπίδραση με εξωτερικά αρχεία κλπ. Έτσι μπορεί κανείς να προγραμματίσει ολόκληρη τη διαδικασία της ανάλυσης σε FEM, από το σχεδιασμό της γεωμετρίας, την δημιουργία πλέγματος κλπ, μέχρι και την τελική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Παρακάτω θα αναλυθούν οι βασικές αρχές των μοντέλων. Ο ακριβής τρόπος υλοποίησης των όσων θα παρουσιαστούν, περιέχεται στο παράρτημα, υπό μορφή κώδικα APDL. Να σημειωθεί, πως τα βασικότερα μεγέθη, όπως πχ. διαστάσεις, τιμές παραμενοσών τάσεων, φορτίου, συντελεστή τριβής, τιμές τραχύτητας κλπ εισάγονται στον κώδικα ως παράμετροι. Έτσι είναι δυνατόν να καθορίζεται εύκολα η επίδραση κάθε παραμέτρου, απλά δίνοντάς της καινούρια τιμή, και εκτελώντας ξανά το πρόγραμμα.

4.2.1 3D Μοντέλο FEM

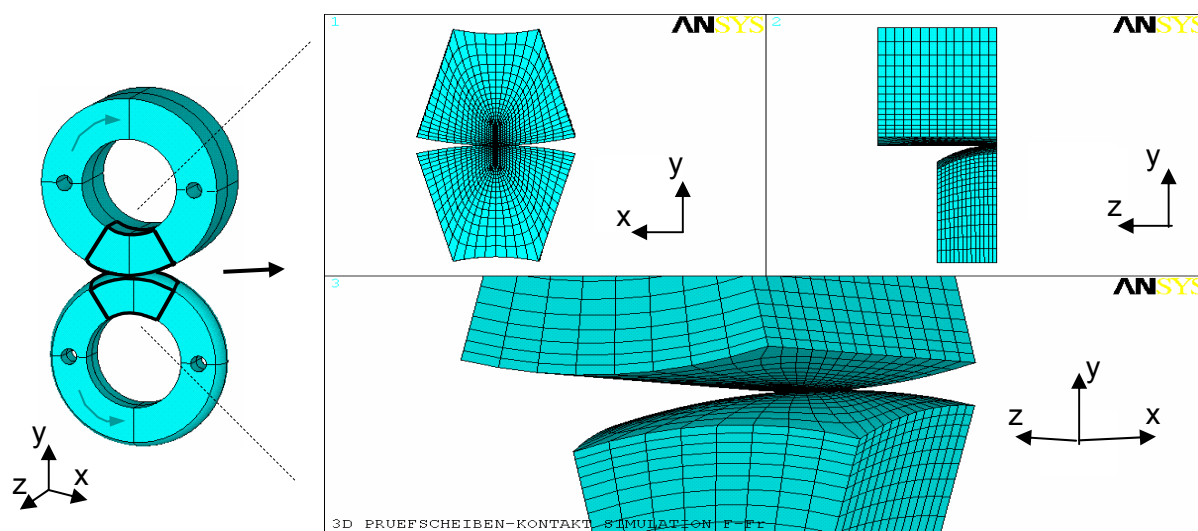
Το πρόβλημα που εξετάζεται παρουσιάζει την εξής δυσκολία: Η 3-διάστατη γεωμετρία, η μη γραμμική συμπεριφορά των προβλημάτων επαφής (contact simulation) και η αναγκαία μεγάλη πυκνότητα πλέγματος σε ένα πολύ μικρό όγκο ($\sim 1 \text{ mm}^3$), δημιουργούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό στην ακόλουθη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η τεχνική δημιουργίας μοντέλου/υπομοντέλου (submodelling technique). Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Δημιουργία γενικού μοντέλου (κατάστρωση γεωμετρίας, πλέγματος, καθορισμός οριακών συνθηκών) και επίλυσή του.
- Δημιουργία της γεωμετρίας του υπομοντέλου, που αποτελεί στην ουσία το τμήμα του όγκου του γενικού μοντέλου για το οποίο απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Δημιουργία πλέγματος υπομοντέλου και χρήση των αποτελεσμάτων του γενικού μοντέλου, που αντιστοιχούν στα όρια της γεωμετρίας του υπομοντέλου, ως οριακές συνθήκες του τελευταίου.
- Επίλυση του υπομοντέλου, επαλήθευση των αποτελεσμάτων, και επεξεργασία τους.

Σε κάθε περίπτωση, πραγματοποιήθηκε steady state τύπος ανάλυσης

4.2.1.1 Γενικό μοντέλο (coarse model)

Η περιοχή του ενδιαφέροντος, όπου η ισοδύναμη τάση λόγω φορτίου $\sigma > 0$, περιορίζεται σε μια μικρή έκταση γύρω από το σημείο επαφής. Μια ενδεχόμενη όμως δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε ολόκληρο τον όγκο του δοκιμίου, θα προξενούσε προβλήματα υπολογιστικού φόρτου. Για να γίνει το μοντέλο λοιπόν πιο «ελαφρύ», δημιουργείται πλέγμα μόνο σε μια περιορισμένη περιοχή, γύρω από το σημείο επαφής, που αντιστοιχεί σε τόξο γωνίας 30° (βλ. σχήμα 4.4). Το μέγεθος της καθορίστηκε μέσω διαδοχικών δοκιμών επίλυσης της προσομοίωσης (trial-error) μέχρι να βρεθεί το βέλτιστη γεωμετρία, που 1. δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ομαλού πλέγματος και αποφυγής ελαττωματικών στοιχείων και 2. να διατηρεί ανεπηρέαστα τα αποτελέσματα. Επιπλέον λήφθηκε υπ όψιν και η συμμετρία της γεωμετρίας και της φόρτισης.



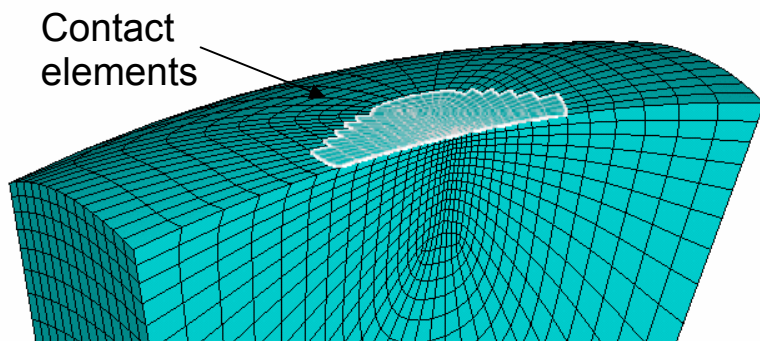
Σχήμα 4.4 : Μορφή γεωμετρίας και πλέγματος coarse 3D μοντέλου

Για να επιτευχθεί **μεγαλύτερη πυκνότητα** πλέγματος στην περιοχή γύρω από την **επαφή**, όπου και υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για ακρίβεια αποτελεσμάτων, ακολουθήθηκε ειδικό πρότυπο μετάβασης (**transition pattern** – ANSYS 10.0 Manual 7.4.2.2.2.), που προτείνεται από το ίδιο το πρόγραμμα. Το συνολικό δικτύωμα αποτελείται από 20 894 εξαεδρικά στοιχεία των 20 κόμβων (solid elements / SOLID95)

Contact area

Η περιοχή στο σημείο που εφάπτονται τα δυο δοκίμια και γύρω από αυτό, καλύπτεται από συνδυασμό contact και target στοιχείων. Ως contact body θεωρήθηκε ο καμπυλωμένος δίσκος, καθώς αποτελεί τον όγκο του ενδιαφέροντος (στο πείραμα είναι πάντα ο πρώτος που αστοχεί). Σε περιοχή λοιπόν περί των 2 mm^2 δημιουργήθηκαν 300 contact elements (CONTACT174). Τα προβλήματα επαφής είναι ιδιαίτερος πολύπλοκα και ευαίσθητα σε σφάλματα π.χ. φαινόμενο κίνησης απολύτως στερεού σώματος, μη σύγκλιση κλπ. Καθορίστηκαν γι αυτό το λόγο οι κατάλληλοι παράμετροι και περιορισμοί, όπως προτείνεται και από το manual (ANSYS 10.0 contact technology guide, 3.8) του προγράμματος, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Χρησιμοποιείται επίσης το κλασσικό μοντέλο τριβής του Coulomb, και ο συντελεστής τριβής ορίζεται ίσος με $\mu = 0.1$, σύμφωνα με τις τιμές που προκύπτουν από το πείραμα. Ως contact algorithm χρησιμοποιείται ο

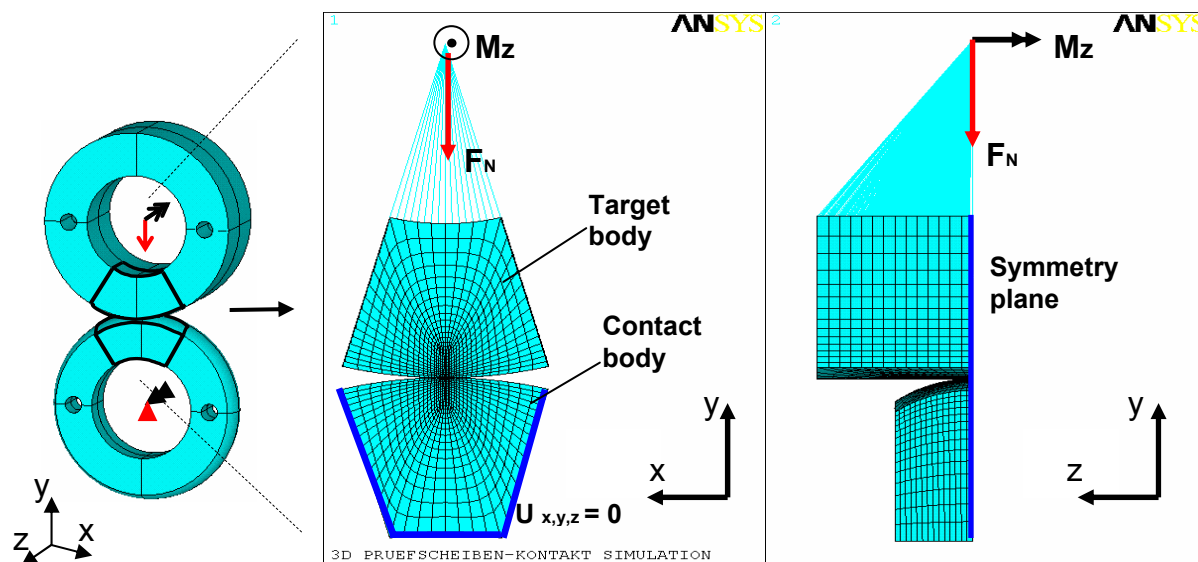
Augmented. Στον κώδικα του παραρτήματος περιλαμβάνονται οι εντολές που πραγματοποιούν τα παραπάνω.



Σχήμα 4.5 : Περιοχή επαφής για το καμπυλωτό coarse δοκίμιο (contact body)

Boundary conditions / Οριακές συνθήκες

Η εφαρμογή των φορτίων γίνεται μέσω multi point constraints **m.p.c.** στο απόλυτα κυλινδρικό δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας δημιουργείται κόμβος στο γεωμετρικό του κέντρο και ενώνεται με στοιχεία MPC185 (rigid beams) με κάθε έναν από τους κόμβους των επιφανειών του, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Το δε ανταγωνιστικό σώμα, περιορίζεται με μηδενική μετατόπιση προς όλες τις κατευθύνσεις, προσομοιώνοντας έτσι τη διαδικασία της αρνητικής σχετικής του ολίσθησης. Τέλος λαμβάνεται υπ όψιν και η συμμετρία της γεωμετρίας.

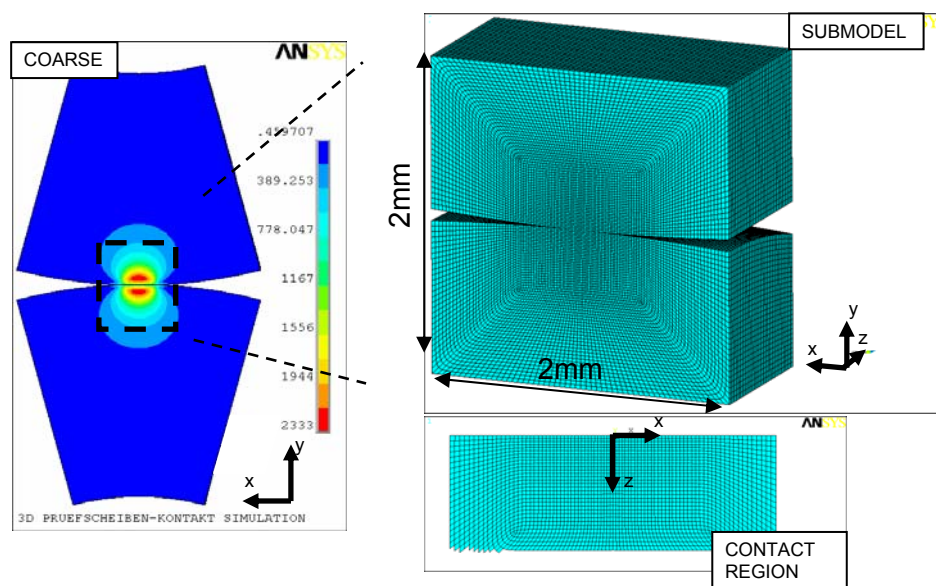


Σχήμα 4.6 : Οριακές συνθήκες coarse model

Για την επίλυση του χρησιμοποιείται ο PCG solver και η επίλυση διαρκεί περίπου 75 min σε υπολογιστή Pentium 4, 3GHz, 2 GB RAM. Τόσο στο γενικό όσο και στο υπομοντέλο, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες παράμετροι επίσης (πχ. substeps, ακρίβεια υπολογισμού), ώστε να πραγματοποιηθεί γρήγορη και ακριβής σύγκλιση του μη γραμμικού αυτού προβλήματος.

4.2.1.2 Υπομοντέλο (submodel)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του γενικού μοντέλου, η γεωμετρία του υπομοντέλου κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περικλείει τις σημαντικότερες αναπτυσσόμενες τάσεις. Ως σημαντικότερες τάσεις στην συγκεκριμένη περίπτωση θα θεωρήσουμε όσες έχουν τιμή μεγαλύτερη από την τιμή του σ_u που ορίζεται από τη θεωρία του Ioannides & Harris για χάλυβα 100Cr6 (V.Mises $\sigma_u = 606$ MPa). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μέγιστη μείωση του όγκου του υπομοντέλου, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση πυκνότερου πλέγματος (άρα και απόκτησης ακριβέστερων αποτελεσμάτων) σε μικρότερη περιοχή.



Σχήμα 4.7 : Γεωμετρία, πλέγμα, contact region submodel

Πλέγμα

Για τη δημιουργία πλέγματος χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι 1. Η απαιτούμενη ακρίβεια αποτελεσμάτων 2. Η προσθήκη των παραμενουσών τάσεων (οι οποίες και θα υλοποιηθούν ως αρχική εντατική κατάσταση –initial stress condition- σε κάθε στοιχείο). Έτσι, χρησιμοποιούνται 351 232 εξαεδρικά στοιχεία των 8 κόμβων SOLID45 (Η χρήση στοιχείων με 20 κόμβους αποκλείεται λόγω περιορισμών hardware). Εφαρμόζεται ξανά ειδικό transition pattern ώστε η πυκνότητα του πλέγματος να είναι μεγαλύτερη στην περιοχή γύρω από το σημείο επαφής. Τέλος, η περιοχή επαφής ($\sim 0.7 \times 0.5 \text{ mm}^2$) καλύπτεται με περίπου 2494 στοιχεία Contac174. Με το μεγάλο αυτό αριθμό στοιχείων επαφής, την κατάλληλη ρύθμιση αυτών, όπως και του τρόπου επίλυσης (βλ. κώδικα), επιτυγχάνεται σύγκλιση, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Ο συνολικός χρόνος επίλυσης φτάνει τις ~ 5 ώρες σε υπολογιστή που περιγράφηκε παραπάνω

Οριακές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι οριακές συνθήκες του υπομοντέλου είναι οι κομβικές μετατοπίσεις του γενικού μοντέλου, που βρίσκονται ακριβώς στα όρια της γεωμετρίας του υπομοντέλου (cut – boundary areas) και παρεμβάλλονται γραμμικά σε αυτές. Λαμβάνεται τέλος υπ' όψιν και η συμμετρία το προβλήματος στο επίπεδο xy.

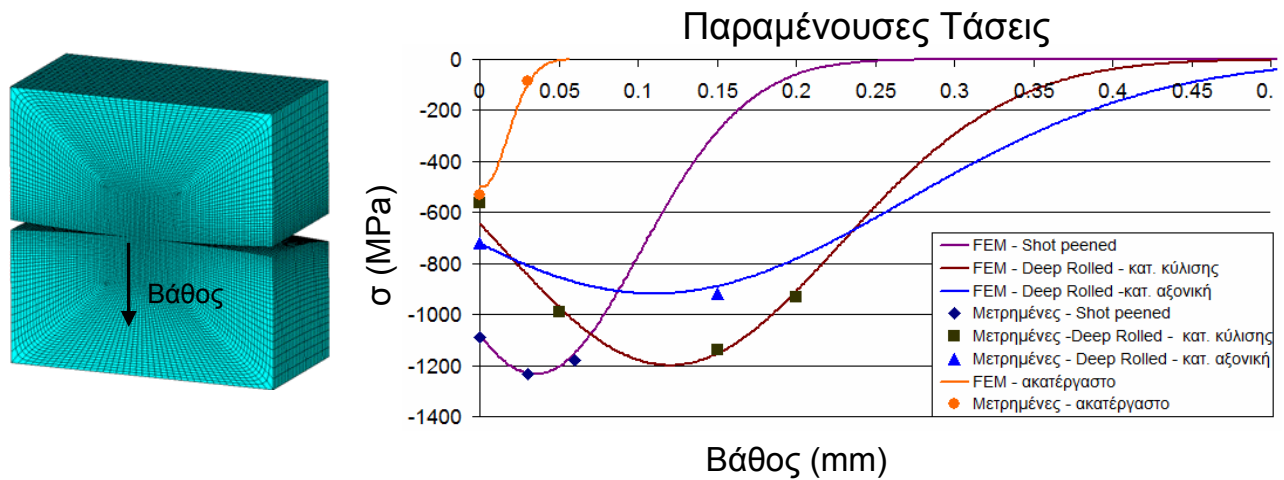
Παραμένουσες τάσεις

Οι πραγματικές παραμένουσες τάσεις στα δοκίμια μετρήθηκαν με τη μέθοδο της περίθλασης ακτινών Χ. Οι τιμές που αποκτήθηκαν αντιστοιχούν σε 4 διαφορετικά βάθη (το κόστος επιπλέον μετρήσεων ήταν απαγορευτικό). Στην περίπτωση του shot peened και του απλού δοκιμίου, οι τάσεις κατά την παράλληλη προς την κύλιση κατεύθυνση είναι ίσες με αυτές προς αυτήν του άξονα περιστροφής. Για τον άλλο τύπο, οι τάσεις στους δύο άξονες παίρνουν διαφορετικές τιμές. Η πραγματική τους κατανομή προσεγγίζεται μέσω μιας εκθετικής συνάρτησης $\sigma_{\pi} = f(\text{βάθος})$ και την κατάλληλη επιλογή τιμών για τους συντελεστές της. Στο σχήμα 4.8 που ακολουθεί φαίνονται οι μετρημένες πραγματικές τιμές και οι καμπύλες παρεμβολής.

$$\sigma_{\pi} = f(\text{Depth}) = A \cdot e^{\left(\frac{-(\text{Depth}-B)}{C}\right)^2} + D \quad \text{εξ. 4.1}$$

Με συντελεστές:

Απλό $A=-500, B=0, C=1.8E-06, D=5E-10$
 Shot peened: $A=-1234.5, B=0, C=3.5E-05, D=9E-09$
 Deep rolled => Κατεύθυνση κύλισης $A=-1200, B=0, C=1.2E-04, D=2.3E-08$
 Αξονική κατεύθυνση $A=-919, B=0, C=1.1E-04, D=5E-08$



Σχήμα 4.8: Μετρημένες παραμένουσες τάσεις (σημεία) και οι καμπύλες παρεμβολής τους

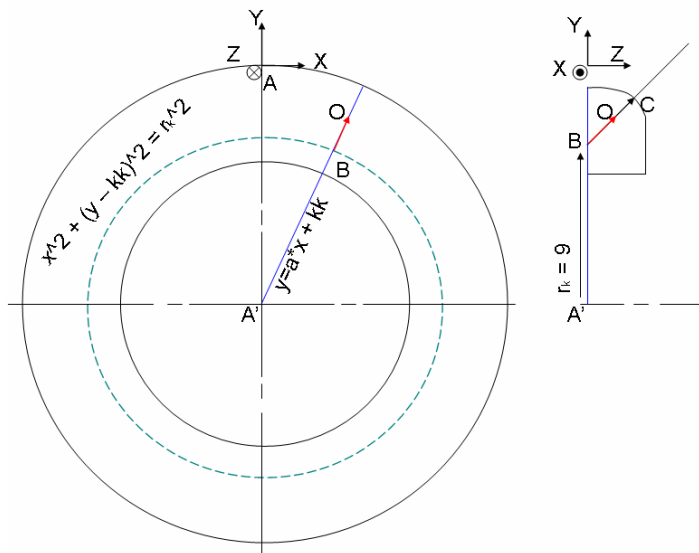
Οι παραμένουσες τάσεις προστίθενται στο μοντέλο ως αρχική εντατική κατάσταση των στοιχείων (initial stresses). Initial stresses με μεταβαλλόμενες τιμές για κάθε στοιχείο μπορούν να προσδοθούν, είτε με τη σύνταξη ειδικής ρουτίνας σε FORTRAN, είτε με ανάγνωση αρχείου .txt, ειδικού format (ANSYS 10.0 Manual 2.5.13.2), που θα περιλαμβάνει τις επιθυμητές τιμές τάσεων για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Ο δεύτερος τρόπος είναι αυτός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Έτσι αποφεύγεται η χρήση επιπλέον προγραμμάτων, compilers κλπ. Σαφώς, το .txt αρχείο που περιλαμβάνει τα initial stresses, πρέπει να δημιουργηθεί και η όλη διαδικασία γράφεται ως μακροεντολή σε APDL.

Το μέγιστο βάθος από την επιφάνεια, που θα φτάνουν οι παραμένουσες τάσεις είναι 0.6 mm. Ο λόγος είναι πως πέραν του βάθους αυτού, οι τάσεις αυτές θεωρούνται πως έχουν απόλυτη τιμή που τείνει στο μηδέν. Έτσι η πιθανή εφαρμογή τους θα είχε μικρή επιρροή στο εντατικό πεδίο, αλλά μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Η γενική διαδικασία αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Το πρόγραμμα διαβάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε στοιχείου.
2. Αν το βάθος του σε σχέση με την επιφάνεια είναι < 0.6 mm, τότε εφαρμόζεται η εξίσωση των παραμενουσών τάσεων και υπολογίζεται μια τιμή.
3. Η τιμή αυτή καταγράφεται ακολουθώντας συγκεκριμένο format (βασισμένο σε FORTRAN) σε αρχείο .txt.
4. Αφού σαρωθούν όλα τα στοιχεία, με χρήση κατάλληλης εντολής το ANSYS διαβάζει από το αρχείο .txt τις τιμές, ως initial stresses. Το μοντέλο τέλος επιλύεται και υπολογίζεται η επίδραση των παραμενουσών τάσεων.

Ένα από τα προβλήματα για την εκτέλεση του κώδικα αυτού, ήταν πώς θα εκφραζόταν το βάθος που βρίσκεται κάθε στοιχείο, ώστε να παρασταθεί σωστά η κατανομή των τάσεων. Η δυσκολία έγκειται στο ότι η επιφάνεια που εξετάζεται έχει διαφορετική καμπυλότητα προς την κατεύθυνση της κύλισης και διαφορετική προς την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής. Εκτός αυτού, οι τιμές X,Z,Y του κάθε στοιχείου εκφράζονται ως προς την αρχή των αξόνων, που εντοπίζονται στο μέσον της περιοχής επαφής (σημείο A). Τελικώς η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την εύρεση του βάθους κάθε στοιχείου είναι η εξής :



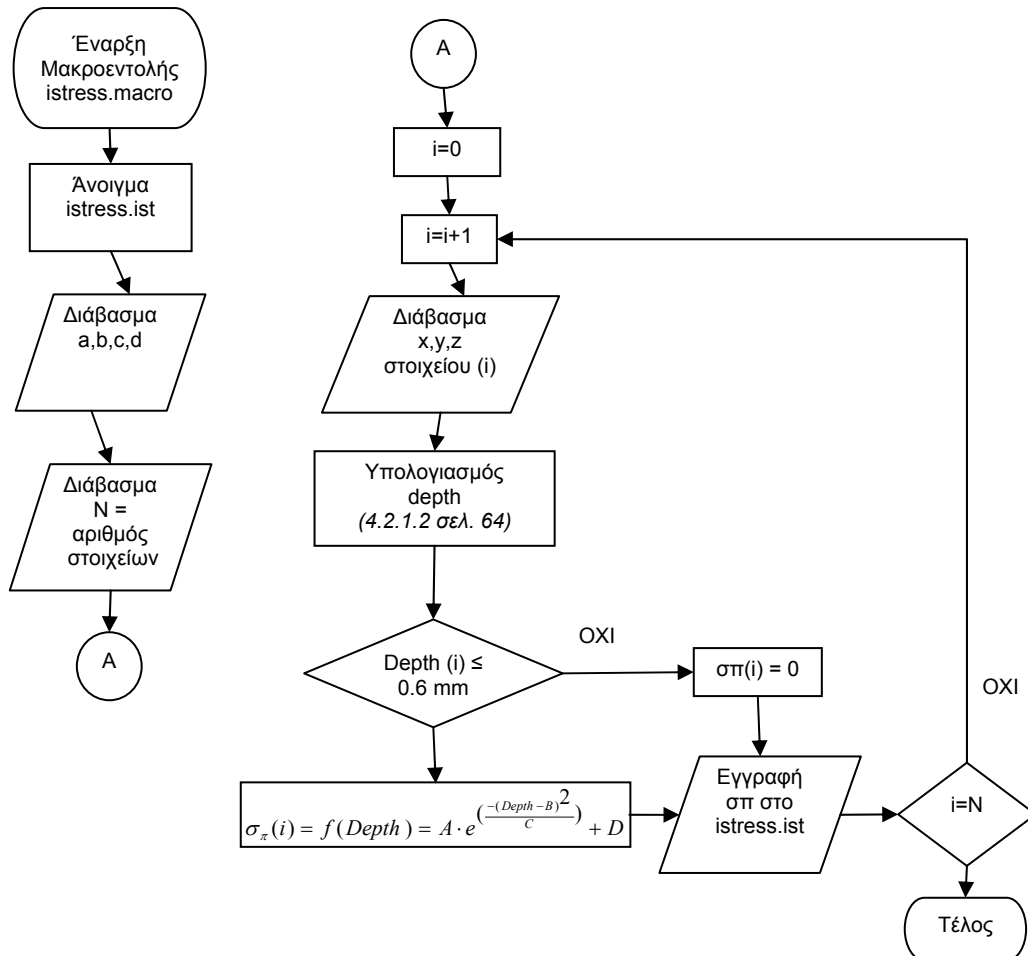
Σχήμα 4.9 : Αρχή υπολογισμού βάθους από την επιφάνεια του κάθε στοιχείου, για την εφαρμογή των παραμενουσών τάσεων.

Έστω ένα σημείο O , γεωμετρικό κέντρο τυχαίου στοιχείου, με τιμές X_{in} , Y_{in} , Z_{in} (ως προς A'). Το βάθος του ισούται $|OC| = |BC| - |BO|$, όπου $|BC| = 4$ mm (από τα σχέδια του δοκιμίου). Γνωστό είναι επίσης το O , άρα απομένει να εκφραστεί το B .

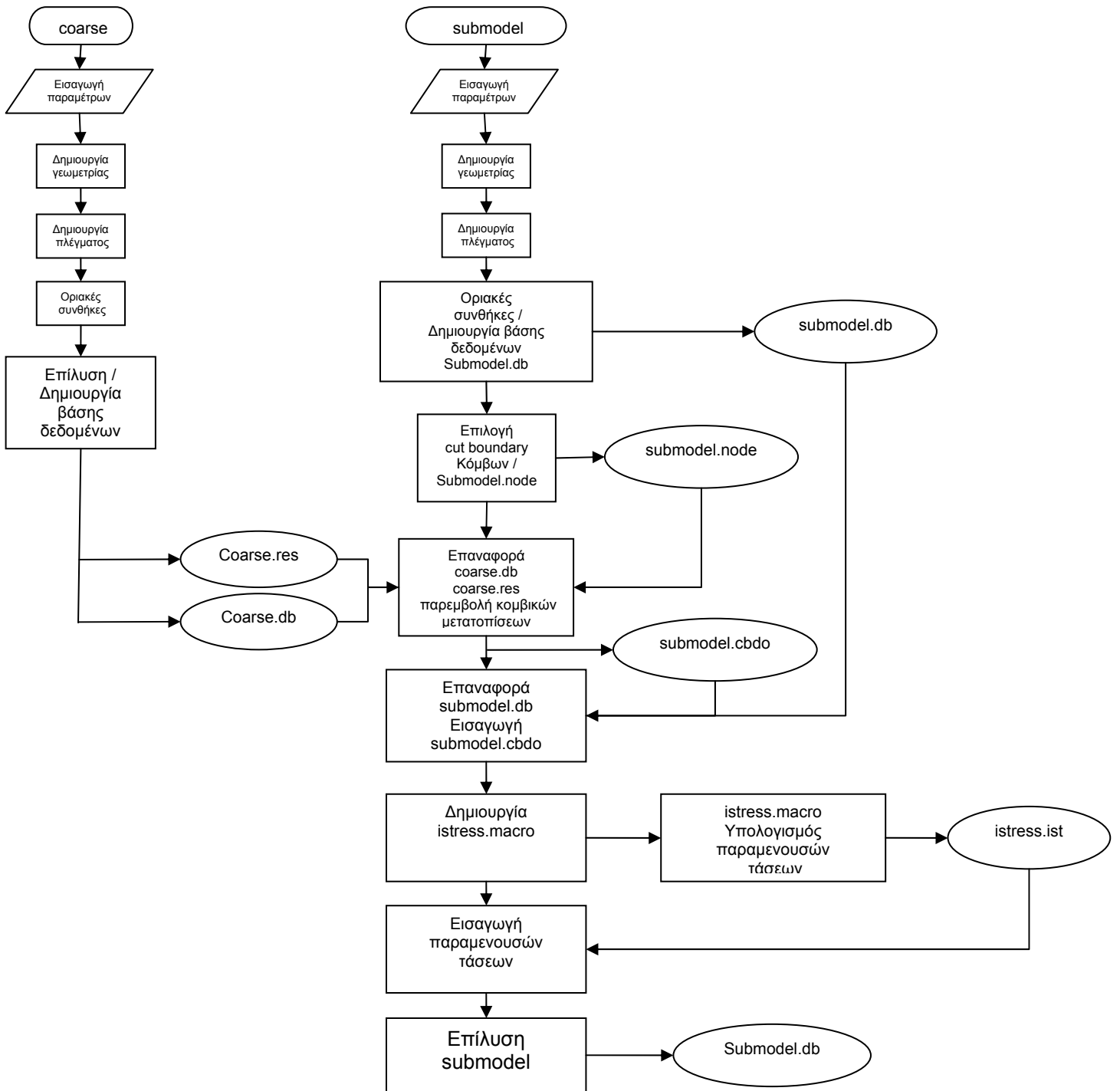
Τα σημεία X_{in} , Y_{in} ανήκουν στην ευθεία $y=a*x + kk$, με $kk=13$ (ακτίνα δοκιμίου) και $a = (Y_{in} - kk)/X_{in}$ που περνάει από το σημείο A' . Το σημείο λοιπόν B αποτελεί το σημείο τομής της ευθείας αυτής και του κύκλου $x^2 + (y - kk)^2 = r_k^2$, με $r_k=9$ mm και κέντρο το A' , σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια. Αφού βρεθεί το σημείο B , υπολογίζεται το μέτρο $|BO|$ και εκφράζεται τελικά το βάθος του εκάστοτε στοιχείου.

Το είδος της ρουτίνας επίλυσης είναι PCG με την κατάλληλη επιλογή ακρίβειας και αριθμού `substeps`, ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση με μεγάλη ακρίβεια σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο Η υλοποίηση όλων των παραπάνω σε κώδικα APDL, μαζί με όλες τις λεπτομέρειες και σχόλια δίνεται στο παράρτημα.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ροής εφαρμογής των παραμενουσών τάσεων και της λογικής χρήσης μεθόδου `coarse / submodel`.



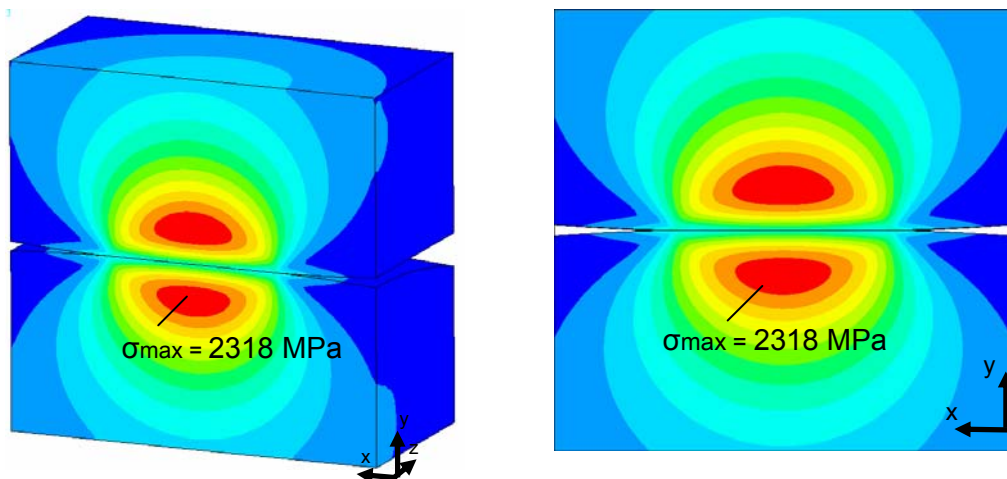
Σχήμα 4.10: Ροή κώδικα / istress macro – μακροεντολή εγγραφής αρχικών (παραμενουσών) τάσεων



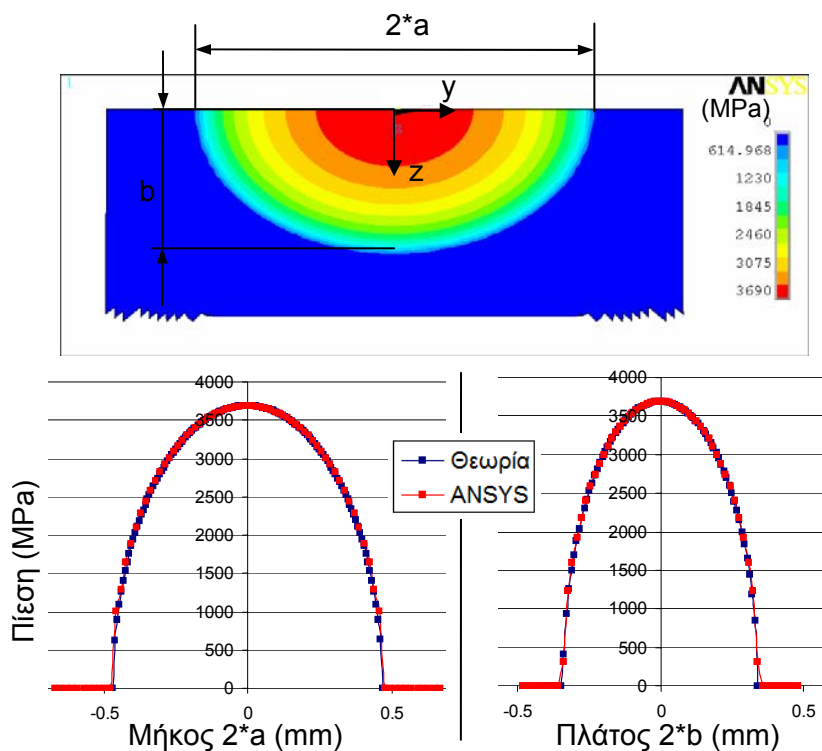
Σχήμα 4.11 : Ροή κώδικα / Γενικά βήματα. Η ίδια λογική χρησιμοποιήθηκε και για το 2d μοντέλο κεφ. 4.2.3

4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 3D

Το πρώτο βήμα πριν από τη χρήση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι η επαλήθευση του μοντέλου με αναλυτικές λύσεις, όπου είναι αυτό δυνατόν. Για συνθήκες λοιπόν απουσίας τριβής και παραμενουσών τάσεων, καταγράφεται η υπολογιζόμενη από την ανάλυση FEM επιφανειακή πίεση και μέγιστη ισοδύναμη τάση (βλ. παράρτημα post processing 3d). Κατόπιν συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των αναλυτικών εξισώσεων 2.12-2.20.



Σχήμα 4.12 : Τάσεις Von Mises την περίπτωση της απλής κύλισης



Σχήμα 4.13 : Κατανομή επιφανειακής πίεσης στη σημειακή επαφή. Σύγκριση θεωρητικών και υπολογιζόμενων τιμών.

	ANSYS	Θεωρία	Διαφορά %
P_{max} (MPa)	3690	3679	-0,3%
σ_{Vmises} (MPa)	2318	2281,1	-1,6%
ημιμήκος επαφής a (mm)	0,4669	0,4670	0,02%
ημιπλάτος επαφής b(mm)	0,33148	0,3390	2,2%

Τα αποτελέσματα φαίνεται να συμφωνούν σχεδόν 100 %, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ορθότητας του μοντέλου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, ενώ οι τάσεις που απεικονίζονται προέρχονται από τη χρήση του κριτηρίου Dang Van (εξ.3.9). Ενώ οι τάσεις από τα κριτήρια Tresca και V. Mises, μπορούν να απεικονιστούν με ενσωματωμένη στο ANSYS λειτουργία, για τις τάσεις Dang Van γράφθηκε κώδικας, που παρουσιάζεται στο παράρτημα. Ο λόγος χρησιμοποιούνται οι συγκεκριμένες τάσεις, είναι ότι σε μεταγενέστερη δημοσίευσή του, ο Ioannides et al. [16], προτείνει τη χρήση του κριτηρίου αυτού (που έχει δοκιμαστεί ειδικά σε κόπωση εκ κύλισης), ως το πιο κατάλληλο για χρήση με το εμπειρικό του μοντέλο και για την παράσταση της επιρροής παραμενουσών τάσεων στη διαδικασία της κόπωσης.

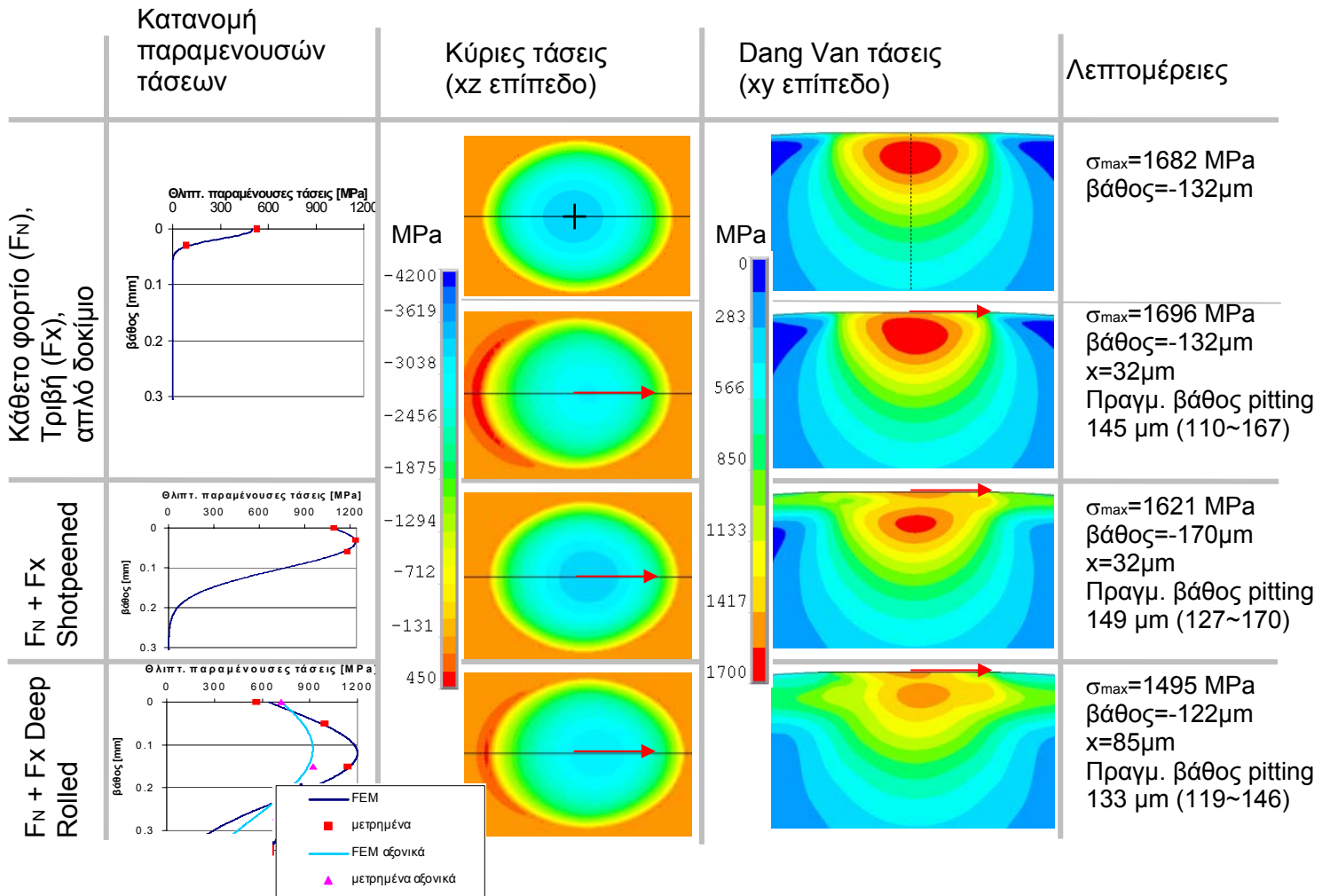
Ο πίνακας που ακολουθεί (σχήμα 4.13) αποτελείται από πέντε στήλες και τέσσερις σειρές.

Στήλες :

1. Είδος εξωτερικής φόρτισης
2. Κατανομή παραμενουσών τάσεων
3. Κύριες τάσεις κατά τη φορά της κύλισης/ολίσθησης, με έμφαση στις ελκτικές τάσεις, που θεωρούνται από τη θραυστομηχανική ως η κύρια αιτία έναρξης και διάδοσης ρωγμής.
4. Τάσεις κατά Dang Van
5. Γενικά χαρακτηριστικά

Σειρές :

1. Απλή κύλιση, χωρίς μηχανικώς προσδιδόμενες παραμένουσες τάσεις
2. Ολίσθηση με τριβή $\mu = 0.1$, μηχανικώς προσδιδόμενες παραμένουσες τάσεις
3. Ολίσθηση με τριβή και shot peened επιφάνεια
4. Ολίσθηση με τριβή και deep rolled επιφάνεια



Σχήμα 4.14 : Πίνακας αποτελεσμάτων 3D μοντέλου (με κόκκινο βέλος ορίζεται η φορά της τριβής)

Σχολιασμός

Στην πρώτη περίπτωση, αυτή της απλής κύλισης, διακρίνουμε στο επίπεδο XZ τη μορφή των κύριων τάσεων, που αντιστοιχεί στην ελλειπτική μορφή της επαφής. Οι ελκτικές τάσεις που ασκούνται, σύμφωνα με τη κλίμακα σε MPa, κυμαίνονται σε χαμηλές τιμές. Οι ισοδύναμες κατά Dang Van τάσεις, παρουσιάζουν μια συμμετρία, όπως αναμενόταν, ενώ η μέγιστη τιμή είναι 1682 MPa σε ένα βάθος των 132 μ m.

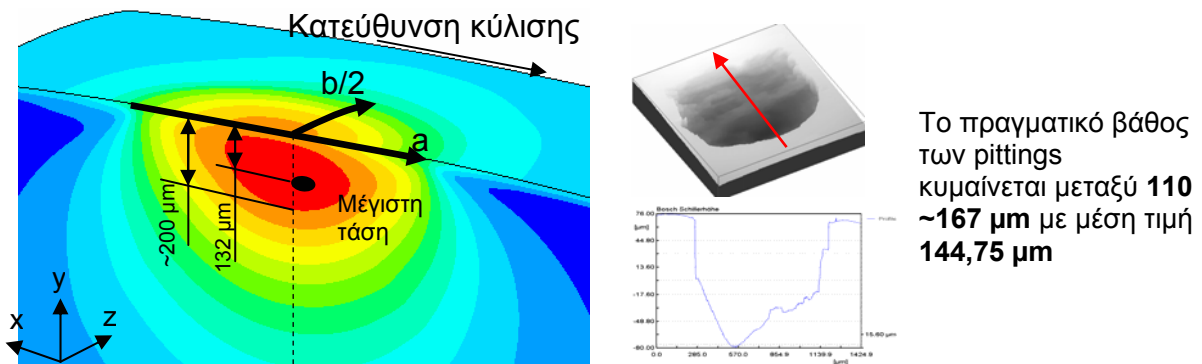
Στη δεύτερη περίπτωση, όπου έχουμε την εμφάνιση τριβής $\mu = 0.1$, με κατεύθυνση αυτή του κόκκινου βέλους, εμφανίζεται κατ αρχήν μια απότομη αύξηση των επιφανειακών ελκτικών τάσεων αντίθετα από την κατεύθυνση της ολίσθησης, που αγγίζει τα 450 MPa. Ωστόσο, μεγάλη διαφορά δεν υπάρχει στις τάσεις Dang Van αυτής της περίπτωσης, όπου το μέγιστο αυξάνεται κατά μόλις 14 MPa και μετακινείται ελαφρώς προς την φορά της δύναμης της τριβής, δηλαδή κατά 32 μ m.

Στην τρίτη περίπτωση, με τριβή $\mu = 0.1$ και επεξεργασία shot peening, παρατηρείται μια μεγάλη μείωση των ελκτικών τάσεων, που επανέρχονται σχεδόν στα επίπεδα της απλής κύλισης. Παράλληλα εμφανίζεται μια διαφοροποίηση του εντατικού κατά

Dang Van πεδίου: Η μέγιστη τάση μειώνεται στα 1621 MPa και να μετατοπίζεται βαθύτερα, στα 170 μm , ενώ συνολικά η περιοχή των πιο καταστρεπτικών τάσεων (με κόκκινο) να μειώνεται σε μέγεθος.

Στην **τέταρτη περίπτωση**, με τριβή $\mu = 0.1$ και επεξεργασία **deep rolling**, κατ αρχήν οι ελκτικές κύριες τάσεις παρουσιάζουν μια μικρή μείωση, όχι όμως της τάξης της περίπτωσης του σφαιροβολημένου δοκιμίου. Το πεδίο όμως Dang Van παρουσιάζει μια δραματική μεταβολή, με μείωση της μέγιστης τάσης κατά ~ 200 MPa, περιορισμός της περιοχής των καταστρεπτικών τάσεων και ελάττωση του βάθους της μέγιστης στα 85 μm . (Η διαφορά σε σχέση με τις παραπάνω περιπτώσεις είναι τόσο μεγάλη που χαρακτηριστικά οι μέγιστη τάση κατά Mises μειώνεται κατά ~ 500 MPa).

Το αρκετά επίσης ενδιαφέρον σημείο και σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, είναι ότι το βάθος μέγιστης τάσεως συμφωνεί, κατά ένα μεγάλο βαθμό, με το βάθος των pittings που μετρήθηκαν πειραματικά από τα δοκίμια που αστόχησαν.



Σχήμα 4.15 : Συμφωνία μεταξύ βάθους pitting και βάθους μέγιστης τάσης Dang Van στην περίπτωση του απλού ακατέργαστου δοκιμίου, με ύπαρξη τριβής. Παρατίθεται και παράδειγμα εικόνας pitting όπως ελήφθη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

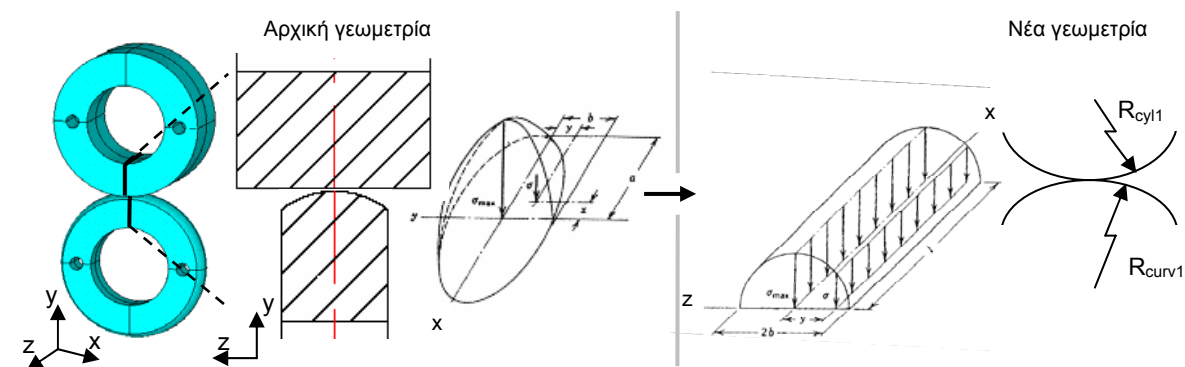
Η πρακτική αξία των αποτελεσμάτων αυτών, θα φανεί στο κεφάλαιο 4.3.2, όπου και με την εφαρμογή του μοντέλου Ioannides & Harris, θα φανεί η επίδρασή τους στη διαδικασία της κόπωσης.

4.2.3 2D Μοντέλο FEM

Επόμενος στόχος της εργασίας αυτής είναι η εκτίμηση της επιρροής της τραχύτητας στη διαδικασία κόπωσης από κύλιση. Οι επιφανειακές ανωμαλίες θα θεωρηθούν ότι συμπεριφέρονται ως μικροεπαφές Hertz. Αυτές όμως οι μικροεπαφές μπορεί να κυμαίνονται σε μεγέθη το πολύ μερικών μm , ενώ ο εξεταζόμενος όγκος και η μακροεπαφή έχει μέγεθος έως και 1000 φορές μεγαλύτερο. Η δυσκολία λοιπόν του εγχειρήματος αυτού είναι ότι για την ολοκληρωμένη 3-διάστατη προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτής των μικροεπαφών και της επίδρασής τους στο μακροσκοπικό εντατικό πεδίο, απαιτείται η δημιουργία ιδιαίτερα πυκνού πλέγματος, που είναι υπολογιστικά απαγορευτικό και σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να λυθεί σε προσωπικό υπολογιστή. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η απλοποίηση του προβλήματος: Η 3D γεωμετρία, θα ελαττωθεί κατ αρχήν σε μια 2D με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω.

Η βασική ιδέα είναι μετατροπή της σημειακής επαφής ελλειπτικού τύπου σε μια γραμμική επαφή (ιδανική επαφή δυο κυλίνδρων) με το ακριβώς ίδιο τριβολογικό φορτίο. Ο λόγος είναι ότι η ιδανική γραμμική επαφή μπορεί να αντιμετωπιστεί ως 2-διάστατο πρόβλημα επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης [35] και άρα να επιλυθεί με λιγότερο υπολογιστικό κόστος.

Ως βασικά χαρακτηριστικά του αρχικού τριβουστήματος θεωρούνται η μέση επιφανειακή πίεση και οι διαστάσεις a, b της επαφής. Αυτά θα μείνουν αμετάβλητα κατά τη μετατροπή της ελλειπτικής σε γραμμική επαφή, ώστε να διατηρηθεί το τριβολογικό φορτίο ίδιο και στις δυο περιπτώσεις. Θα μεταβληθούν όμως το κάθετο φορτίο (δύναμη F) και φυσικά οι ακτίνες καμπυλότητας των επιφανειών.



Σχήμα 4.16 : Μετατροπή σημειακής επαφής σε γραμμική

Εξισώνοντας τις εξισώσεις 2.9 και 2.12, με άγνωστους τα $F_{\gamma_{\text{ραμ.}}}$ και $R_{\text{cyl1}} = R_{\text{curv1}}$, μέσω επαναληπτική διαδικασία καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα:

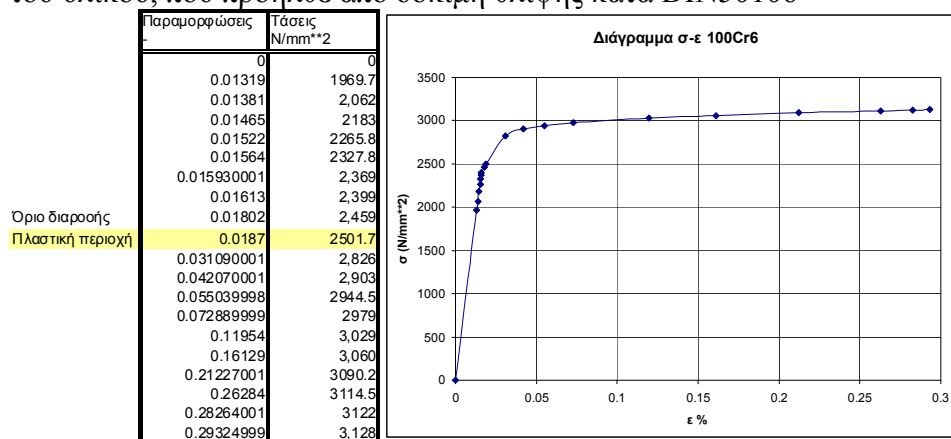
	3D Model	2D Model
Ακτίνα καμπυλότητας στην αξονική διεύθυνση R_{curv1} [mm]	4	7,94
Ακτίνα καμπυλότητας στην κατεύθυνση κύλισης R_{curv2} [mm]	13	---
Ακτίνα καμπ. κυλινδρικού δοκιμίου στην αξονική. διεύθυνση R_{cyl1} [mm]	---	7,94
Ακτίνα καμπ. κυλινδρικού δοκ. στη διεύθυνση κύλισης R_{cyl2} [mm]	13	---
Κατακόρυφο φορτίο F_N [N]	1220	1554,1
Μέση πίεση επιφάνειας P_m [MPa]	2452,8	2454
Ημιμήκος επαφής a [mm]	0,46702	0,46702
Ημιπλάτος επαφής b [mm]	0,33901	0,33901

Τα νέα αυτά χαρακτηριστικά θα χρησιμοποιηθούν ως οριακές συνθήκες στο νέο 2-διάστατο μοντέλο. Η τριβή δεν θα ληφθεί υπ όψιν, μιας και: 1. όπως φάνηκε και στη προηγούμενη παράγραφο, ότι δεν επιδρά σημαντικά στο εντατικό πεδίο, 2. το επίπεδο που επιλέγεται, λόγω συνθηκών επίπεδης παραμορφωσιακής κατάσταση που επικρατεί σε αυτό, είναι κάθετο στην κύλιση, άρα και κάθετο στην κατεύθυνση της τριβής.

Ωστόσο η απλοποίηση αυτή δεν είναι ακόμη αρκετή για να «ελαφρύνει» το μοντέλο. Θα ακολουθηθεί λοιπόν για μια ακόμη φορά η μέθοδος μοντέλο/υπομοντέλο και θα ληφθεί υπ όψιν και η οποία συμμετρία παρουσιάζει το πρόβλημα. Η τραχύτητα θα απεικονιστεί απευθείας στο υπομοντέλο.

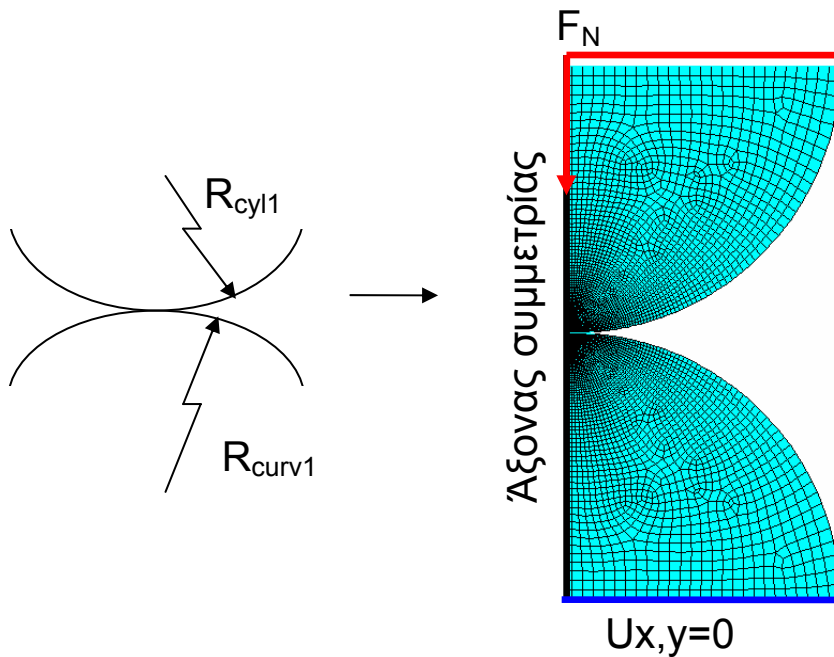
Συμπεριφορά υλικού

Οι πολύ υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται τοπικά στις μικροεπαφές λόγω τραχύτητας, προκαλούν έντονη πλαστική παραμόρφωση στ υλικό. Για το λόγο αυτό, πρέπει στο μοντέλο να συμπεριληφθεί και η πλαστικότητα. Στο ANSYS υπάρχει ένα πλήθος επιλογών ως προς τα μοντέλα συμπεριφοράς υλικών, που μπορεί να περιγράψουν υπερπλαστικότητα, ισοτροπική ή κινηματική κράτνωση υλικού κλπ. Η περίπτωση που εξετάζεται αφορά αποκλειστικά ένα κύκλο φόρτισης, γεγονός που δίνει ευχέρεια στην επιλογή ελαστο-πλαστικού μοντέλου (στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται το KINH – ANSYS 10.0 Manual 8.4-). Η πλαστική συμπεριφορά του υλικού, δίνεται καταχωρώντας με κατάλληλες εντολές, τιμές από πραγματικά σημεία της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων του υλικού, που προήλθε από δόκιμη θλίψης κατά DIN50106



4.2.3.1 Γενικό μοντέλο

Το σύστημα έχει ελαττωθεί σε πρόβλημα επαφής δυο κυλίνδρων (από όπου προκύπτει η γραμμική επαφή). Η προσομείωσή του θα γίνει με τη δημιουργία πλέγματος στοιχείων με λειτουργία επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης σε ημικυκλικές διατομές. Λόγω δε της συμμετρίας της φόρτισης και γεωμετρίας, θα μειωθεί το πρόβλημα περισσότερο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.17 : Άποψη του coarse 2D μοντέλου

Για το πλέγμα, χρησιμοποιήθηκαν σύνολο 11286 στοιχεία PLANE82, με plane strain λειτουργία. Σαφώς το πλέγμα είναι πυκνότερο στη περιοχή γύρω από την επιφάνεια επαφής. Για τη δημιουργία αυτής χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία contac172 – target169, των οποίων οι παράμετροι ρυθμίστηκαν κατάλληλα για την επιτυχή επίλυση του προβλήματος.

Ως οριακή συνθήκη εφαρμόζεται το φορτίο ως **m.p.c.** στην άνω επιφάνεια του άνω ημικυκλίου και στο δεύτερο σώμα επιβάλλεται μηδενική μετατόπιση προς όλες τις κατευθύνσεις. Τέλος εφαρμόζεται και συνθήκη συμμετρίας και στα δυο σώματα.

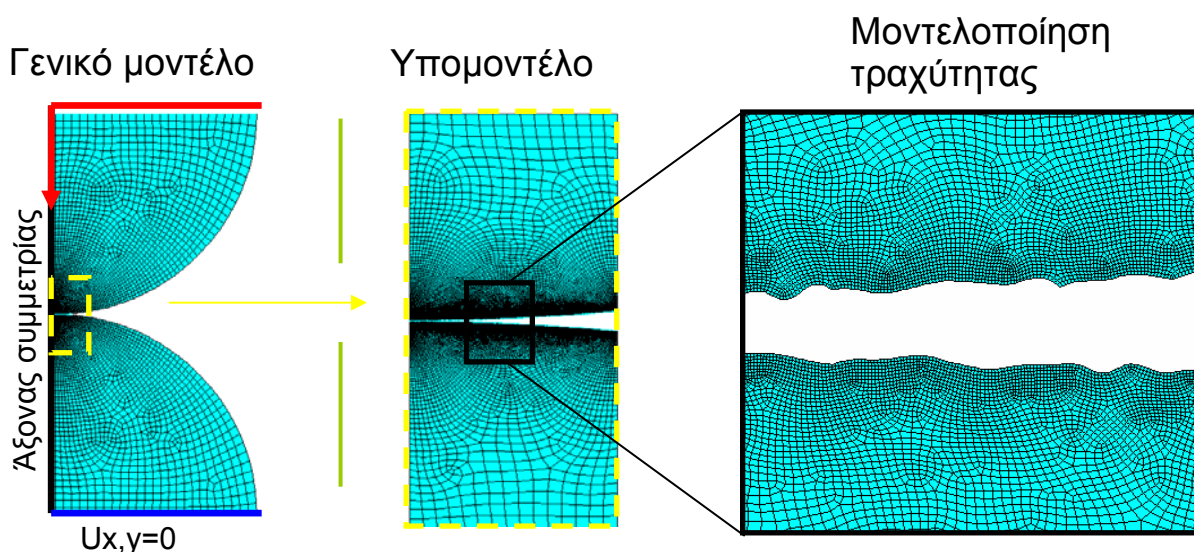
Για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκε ο PCG solver

4.2.3.2 Υπομοντέλο

Η γεωμετρία του υπομοντέλου κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα όριά του να περιλαμβάνουν τις σημαντικότερες τάσεις που υπολογίζονται από το γενικό μοντέλο. Η συμπεριφορά του υλικού και το είδος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για το πλέγμα και την περιοχή επαφής είναι τα ίδια με του γενικού μοντέλου. Οι οριακές συνθήκες είναι κομβικές μετατοπίσεις των κόμβων του γενικού μοντέλου, που αντιστοιχούν στα όρια του υπομοντέλου. Το είδος της ρουτίνας επίλυσης παραμένει το ίδιο (PCG) με την κατάλληλη επιλογή ακρίβειας και αριθμού substeps, ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση με μεγάλη ακρίβεια σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο.

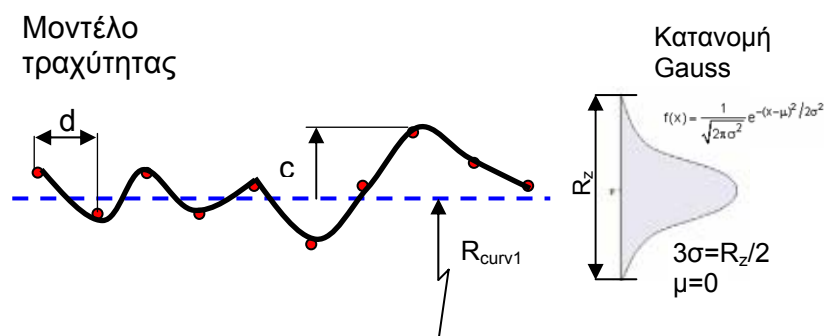
Τραχύτητα

Όπως και στην περίπτωση των παραμενουσών τάσεων, δεν έχει οριστεί συγκεκριμένη διαδικασία προσομοίωσης της συμπεριφοράς της επιφανειακής τραχύτητας σε μικροσκοπικό επίπεδο σε περιβάλλον ANSYS. Λόγω της στοχαστικής φύσης της τραχύτητας και με παράδειγμα το μοντέλο που προτείνει ο Greenwood & Williamson [67] για την περιγραφή της, η τραχύτητα θα μοντελοποιηθεί ως στατιστική κατανομή μικροσκοπικών κοιλάδων/κορυφών το βάθος/ύψος των οποίων καθορίζεται από μετρημένες τιμές R_q , R_z κατά DIN. Η βασική αυτή ιδέα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα και η διαδικασία υλοποίησης της σε κώδικα περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.18 : Μετάβαση από το μοντέλο στο υπομοντέλο.

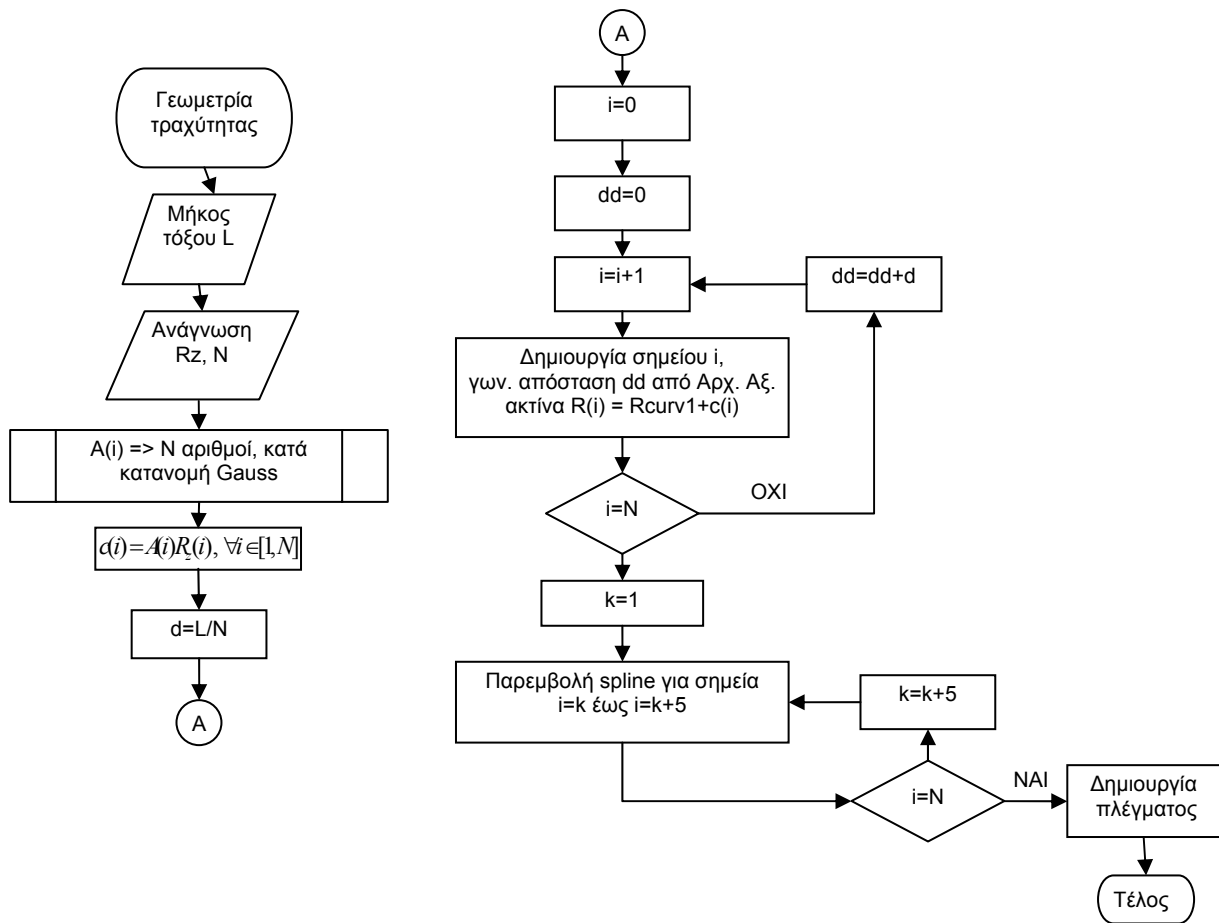
Η κατασκευή της γεωμετρίας της τυχαίας αυτής επιφάνειας πραγματοποιείται με την ένωση με splines συγκεκριμένου αριθμού γεωμετρικών σημείων, τα οποία παρουσιάζουν μεταξύ τους «υψομετρική» διαφορά που καθορίζεται στατιστικά κατά τις μετρημένες τιμές R_z πραγματικών επιφανειών. Τα βήματα, πιο συγκεκριμένα, που ακολουθούνται είναι:



Σχήμα 4.19 : Θεωρητική αρχή μοντέλου τραχύτητας

1. Επιλογή αριθμού σημείων «N» που θα δημιουργηθούν. Ο αριθμός τους είναι ανάλογος της ακρίβειας απεικόνισης των επιφανειακών ανωμαλιών. Για τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν, επιλέχθηκαν να δημιουργηθούν 200 σημεία σε επιφάνεια μήκους 300 μm , που θα αντιστοιχούσε σε μέτρηση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ακρίβειας 1.5 μm .
2. Χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών που ακολουθεί κανονική κατανομή Gauss, με μέσο όρο μηδενική τιμή ($\mu=0$) και εύρος ± 1 ($\sigma=0.314$) και τη δημιουργία «N» τιμών .
3. Πολλαπλασιασμός της κάθε παραπάνω τιμής με $R_z/2$, δημιουργώντας έτσι νέα κατανομή στοιχείων c , με μέσο όρο $\mu=0$ και εύρος R_z , δηλ. $c \in [-R_z, R_z]$
4. Επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία:
 - i. Το τόξο της επιφάνειας του ημικυκλίου χωρίζεται σε N ίσα στοιχειώδη τμήματα ($d_i = d_{i+1}$)
 - ii. Το πρώτο σημείο δημιουργείται με ακτίνα ίση με το άθροισμα της ακτίνας του ημικυκλίου και της πρώτης τιμής από το τυχαίο σύνολο. δηλ. $R_i = R_{curv1} + c_i$
 - iii. Δημιουργία του δεύτερου σημείου σε γωνιακή απόσταση ίση με όση αντιστοιχεί σε ένα στοιχειώδες τόξο, δηλ d . Η ακτίνα του νέου σημείου προέρχεται ξανά από το άθροισμα της μακροσκοπικής ακτίνας και της δεύτερης τιμής από το τυχαίο σύνολο. $R_{i+1} = R_{curv1} + c_{i+1}$
 - iv. Με αντίστοιχο τρόπο, δημιουργία όλων των σημείων της επιφάνειας κατά τη διάρκεια σάρωσης ολόκληρης της κυκλικής επιφάνειας του υπομοντέλου.
 - v. Ένωση των δημιουργημένων σημείων **κατά ομάδες με splines** (στο ANSYS υπάρχει όριο αριθμού σημείων που συνδέονται με splines) και **καθορισμός του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων σε αυτές.**

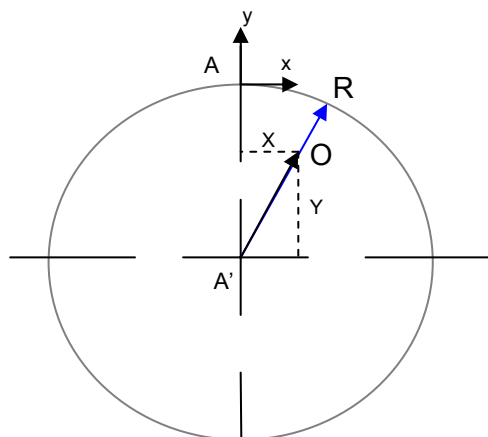
Το σύνολο των τιμών που προέρχονται από τη γεννήτρια των τυχαίων αριθμών μπορεί να αντικατασταθεί και από πραγματικές μετρημένες τιμές τραχύτητας. Η ανάγνωσή τους γίνεται με ειδική ρουτίνα. **Μπορεί δηλαδή να και γίνει ανάγνωση τιμών c_i από ASCII αρχείο.** Ακολουθεί διάγραμμα ροής, ενώ ο κώδικας δίνεται στο παράρτημα.



Σχήμα 4.20 : Ροή κώδικα / Δημιουργία γεωμετρίας τραχείας επιφάνειας

Παραμένουσες τάσεις

Όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της επίδρασης της επιφάνειας είχαν υποστεί επίσης κατεργασία σφαιροβολής. Οι παραμένουσες τάσεις λοιπόν λήφθηκαν υπ όψιν και εφαρμόστηκαν στο μοντέλο, με τον τρόπο που περιγράφηκε και στην προηγούμενη παράγραφο (παρ. 4.2.1.2, σχήμα 4.10). Φυσικά η 2-διάστατη περίπτωση είναι απλούστερη καθώς η έκφραση του βάθους ως προς την επιφάνεια δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα: Βάθος στοιχείου $i = (R_{\text{μακροσκοπική}} + R_z/2) - (X^2 + Y^2)$, με X, Y από το γεωμετρικό κέντρο της ημικυκλικής επιφάνειας (σημείο A').



Σχήμα 4.21: Βάθος στοιχείου από την επιφάνεια = OR

Λίπανση

Για την ολοκληρωμένη θεώρηση της επίδρασης της τραχύτητας θα ήταν απαραίτητη και η προσομοίωση της λίπανσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το λιπαντικό δεν λήφθηκε υπ όψιν γιατί:

- Λόγω υψηλού φορτίου και χαμηλής συνεκτικότητας του Diesel δημιουργείται ένα στοιχειώδες στρώμα λιπαντικού, το πάχος του οποίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερό και στις τρεις περιπτώσεις και άρα να εξαιρεθεί
- Η προσέγγιση που πραγματοποιείται βασίζεται αποκλειστικά στη θεώρηση της συμπεριφοράς των ανωμαλιών της τραχύτητας ως μικροεπαφών Hertz και δεν εξετάζει τριβοχημικά φαινόμενα.

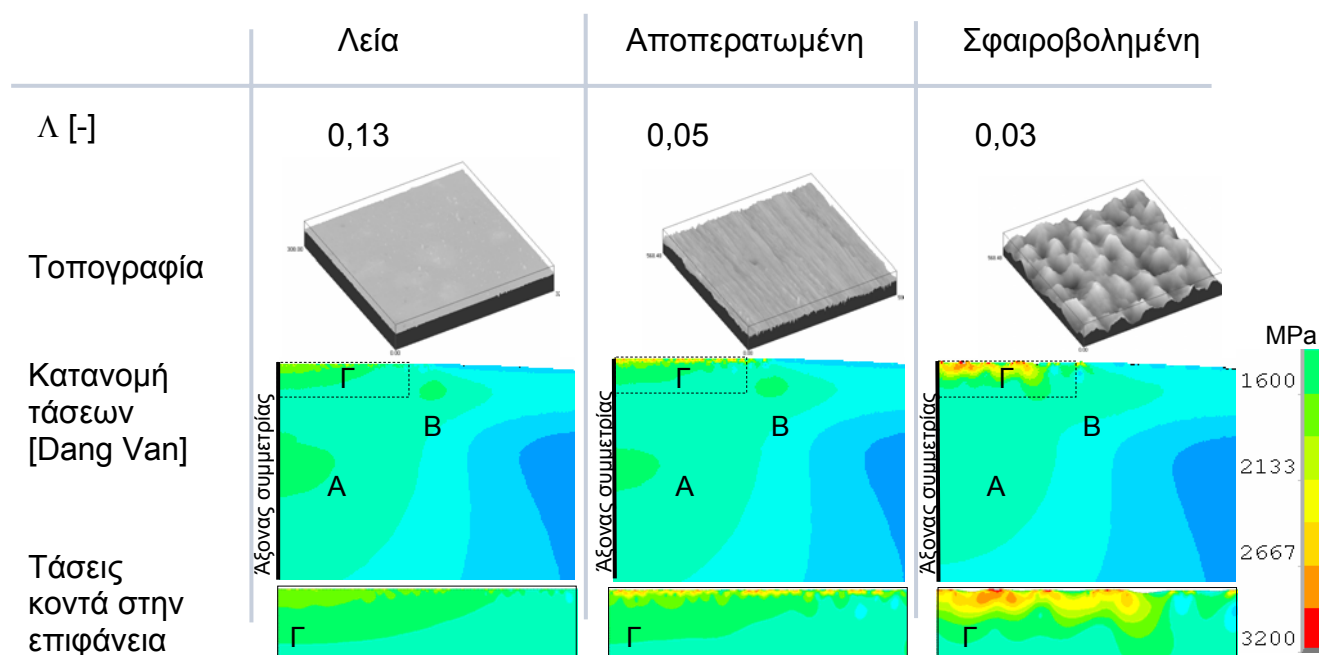
Ο κώδικας, μαζί με όλες τις λεπτομέρειες και σχόλια, που πραγματοποιεί όλα τα παραπάνω περιέχεται στο παράρτημα.

4.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης 2D

Πειραματικώς εξετάστηκαν 3 είδη επιφάνειας. Σε κάθε περίπτωση και οι δυο ανταγωνιστικές επιφάνειες είχαν υποστεί την ίδια επεξεργασία.

- Τορνευμένη, σφαιροβολημένη και τελικώς πλήρως λειασμένη $R_z=0.2 \mu\text{m}$, $R_q=0.1 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.125$
- Τορνευμένη, σφαιροβολημένη και τελικώς αποπερατωμένη $R_z=1 \mu\text{m}$, $R_q=0.3 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.044$
- Τορνευμένη και τελικώς σφαιροβολημένη $R_z=2.8 \mu\text{m}$, $R_q=0.5 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.032$

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για κάθε περίπτωση με τη σειρά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Και εδώ, επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν οι τάσεις κατά Dang Van.



Σχήμα 4.22 : Πίνακας αποτελεσμάτων 2D μοντέλου

Σχολιασμός

Στην κάθε στήλη διακρίνουμε τον αριθμό R_q , την τιμή Λ (βλ. θεωρία) και ένα δείγμα της επιφάνειας όπως έχει απεικονιστεί από ειδικό μικροσκόπιο. Παρατηρούμε επίσης τρεις περιοχές (A,B,Γ): Η **περιοχή A** αναφέρεται στη περιοχή που έχουμε την ανάπτυξη του Hertzian-ού μέγιστου, λόγω της μακροεπαφής. Η **περιοχή B**, οφείλεται στην επίδραση των παραμενουσών τάσεων στο μακροσκοπικό εντατικό πεδίο. Στη **περιοχή Γ** φαίνεται η επίδραση της τραχύτητας, η οποία γίνεται ακόμη πιο σαφής στις μεγεθυμένες εικόνες. Γίνεται φανερό, πως η επίδραση είναι τόσο μεγάλη που ακόμη και στο πλήρως λεία επιφάνεια, οι αναπτυσσόμενες τάσεις πλησιάζουν το όριο διαρροής του υλικού. Ειδικότερα σε στην τρίτη περίπτωση, της επιφάνειας με τη χειρότερη ποιότητα, οι τάσεις καταλήγουν να ξεπερνούν κατά πολύ το όριο διαρροής του υλικού και να προκαλούν έντονες πλαστικές παραμορφώσεις. Οι τάσεις αυτές είναι δε έως και διπλάσιες των μακροσκοπικών τάσεων Hertz (περιοχή A).

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, όπου και θα εφαρμοστεί το μοντέλο Ioannides,-Harris και θα πραγματοποιηθεί σύγκριση αποτελεσμάτων FEM με τα πειραματικά αποτελέσματα, θα περιγραφθεί ακριβέστερα η επίδραση της τραχύτητας. Εκ πρώτης όψεως, λόγω των τεράστιων διαφοροποιήσεων των τάσεων μεταξύ των τριών περιπτώσεων, μπορεί να ειπωθεί πως η επιρροή της είναι σημαντικότερη στη διαδικασία της κόπωσης από αυτή των παραμενουσών τάσεων.

4.3 Εκτίμηση διάρκειας ζωής

4.3.1 Εφαρμογή του μοντέλου Ioannides,-Harris

Όπως παρουσιάστηκε και στο κεφ. 3.4 το μοντέλο Ioannides,-Harris (IH) αυτό αποτελεί ένα εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης αστοχίας από κόπωση, το οποίο θεωρεί τη συνολική εντατική κατάσταση ενός φορτιζόμενου όγκου (damage accumulation model).

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) = AN^e \int_V \frac{(\sigma - \sigma_u)^c}{z'^h} dV \quad \Rightarrow \quad N = \left(\frac{1}{A} \ln\left(\frac{1}{S}\right)\right)^{\frac{1}{e}} \left(\frac{1}{\int_V \frac{(\sigma - \sigma_u)^c}{z'^h} dV} \right)^{\frac{1}{e}} \quad \text{εξ. 4.2}$$

Εφόσον το μοντέλο είναι εμπειρικό, πρέπει να «καλιμπραριστεί» σύμφωνα με τις πειραματικές τιμές, σε διάγραμμα Wöhler, της ομάδας πειραμάτων με τη μικρότερη διασπορά, ώστε να εκτιμηθούν οι παράμετροι A, σ_u , και να γίνει δυνατή η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής σε άλλες συνθήκες φόρτισης. Το όριο κόπωσης είναι γνωστό από την πρωτότυπη δημοσίευση, αφού αναφέρεται σε ίδιο τύπο υλικού. Παράλληλα, εφόσον το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί (όπως θα περιγραφεί παρακάτω), ως συγκριτική μέθοδος, η σταθερά A δεν είναι αναγκαίο να υπολογιστεί.

Τρόπος εφαρμογής του μοντέλου

Έστω N_1 ο γνωστός αριθμός κύκλων ζωής για την πειραματική σειρά αναφοράς και N_2 ο αριθμός κύκλων ζωής που ζητείται να εκτιμηθεί.

$$\text{Έστω } L_i = \int_V \frac{(\sigma - \sigma_u)^c}{z'^h} dV \quad \text{εξ. 4.3}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\left(\frac{1}{A} \ln\left(\frac{1}{S}\right)\right)^{\frac{1}{e}} \left(\frac{1}{L_2}\right)^{\frac{1}{e}}}{\left(\frac{1}{A} \ln\left(\frac{1}{S}\right)\right)^{\frac{1}{e}} \left(\frac{1}{L_1}\right)^{\frac{1}{e}}} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{1}{e}} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{1}{e}}, \text{ αφού } A, S, e \text{ σταθερές} \quad \text{εξ. 4.4}$$

Γίνεται φανερό, ότι το πρόβλημα ελαττώνεται σε πρόβλημα εκτίμησης των ογκικών (και στη δισδιάστατη περίπτωση των επιφανειακών) ολοκληρωμάτων. Με γνωστές τις παραμέτρους $\mathbf{c} = \mathbf{31/3}$, $\mathbf{e} = \mathbf{1.1}$, συντάσσεται κώδικας APDL, ο οποίος πραγματοποιεί τη παρακάτω διαδικασία:

Εκτελείται σάρωση όλων των στοιχείων του πλέγματος με μια επαναληπτική διαδικασία. Για κάθε στοιχείο υπολογίζεται το γινόμενο

$$(\sigma_i - \sigma_u) dV_i \quad \text{εξ. 4.5}$$

Όπου σ_i η ονομαστική ισοδύναμη τάση του στοιχείου. Δοκιμάστηκαν τα κριτήρια Von Mises το οποίο μπορεί να υπολογιστεί αυτόματα, και τα κριτήρια Tresca και Dang Van τα οποία υπολογίζονται με από την εφαρμογή των εξισώσεών τους.

Όπου dV_i είναι ο στοιχειώδης όγκος (ή επιφάνεια για την 2D περίπτωση) του κάθε στοιχείου, όπως υπολογίζεται από το ANSYS.

Όπου σ_u το όριο αντοχής του υλικού, όπως ορίζεται για τις τάσεις Von Mises, Tresca και Dang Van. Να σημειωθεί πως αν η αναπτυσσόμενη τάση σ_i είναι μικρότερη από το όρια αυτό δηλ. $\sigma_i < \sigma_u$, τότε το υπολογιζόμενο γινόμενο $(\sigma_i - \sigma_u) dV_i$ μηδενίζεται. Αν η τάση βρίσκεται μεταξύ του ορίου αντοχής και της τάσης αντοχής τότε το σ_u είναι σταθερό. Αν η τάση ξεπερνά την τάση διαρροής σ_e , τότε μειώνεται γραμμικά (σ_u') και αποκτά την τιμή μηδέν αν η ισοδύναμη τάση είναι ίση με την τάση θραύσης σ_f δηλ:

$$\sigma_u = \text{σταθ} \quad \text{για} \quad \sigma(i) < \sigma_e$$

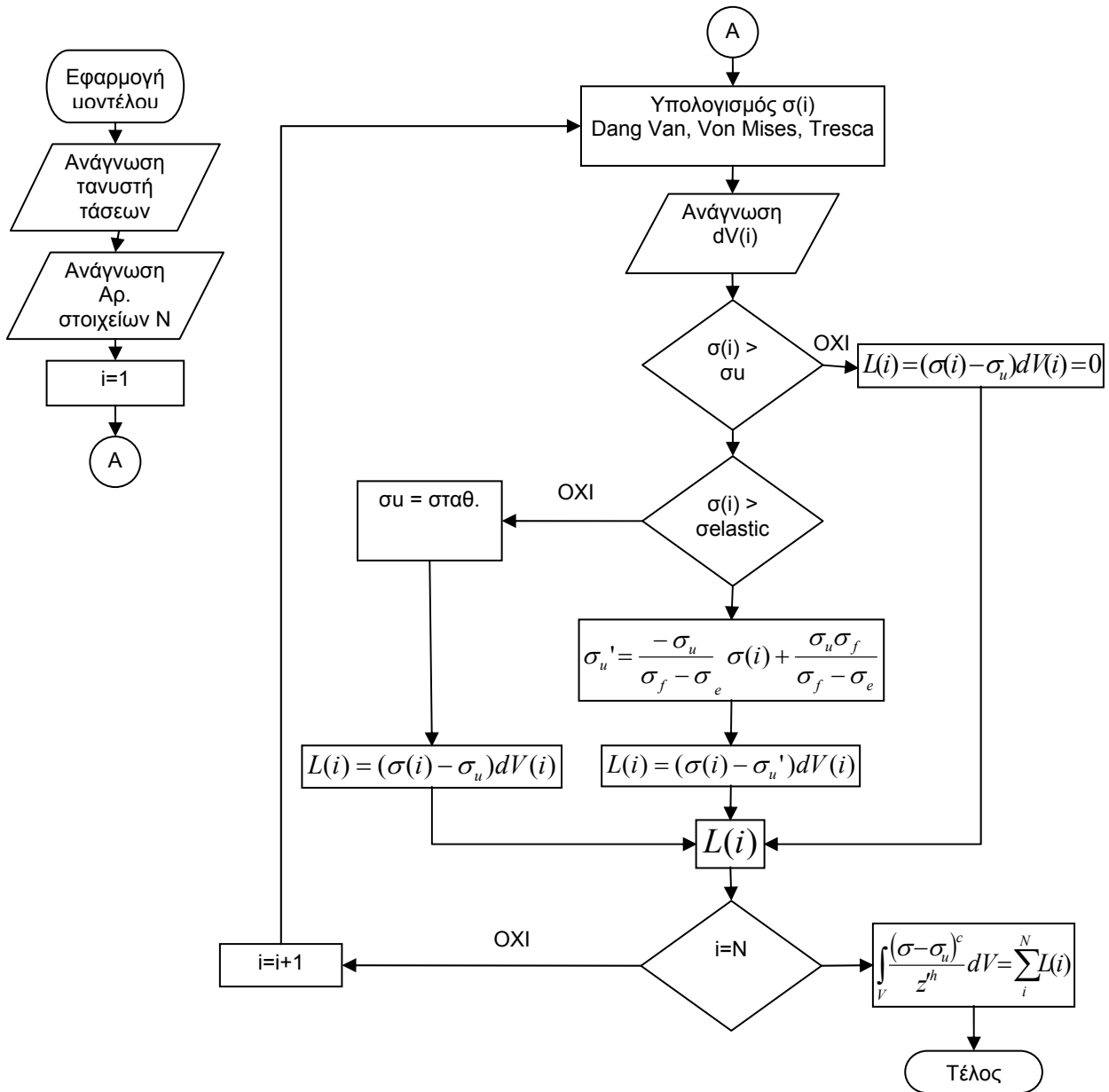
$$\sigma_u' = \frac{-\sigma_u}{\sigma_f - \sigma_e} \sigma(i) + \frac{\sigma_u \sigma_f}{\sigma_f - \sigma_e} \quad \text{για} \quad \sigma(i) > \sigma_e \quad \text{εξ. 4.6}$$

Η παράμετρος $\mathbf{h} = \mathbf{0}$, άρα δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του όρου z' . Ο λόγος που λαμβάνει μηδενική τιμή είναι ότι:

1. Στην μεν περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου, θεωρείται ότι τα τρία δοκίμια έχουν όμοιες, ιδανικές επιφάνειες και το μόνο που ενδιαφέρει είναι η επιρροή των παραμενουσών τάσεων. Έτσι η επίδραση της τραχύτητας «απαλείφεται»
2. Για το 2d μοντέλο, σύμφωνα με τη θεωρία, (κεφ. 3.4), όταν θεωρούνται πραγματικές επιφάνειες, το $h = 0$

Τέλος, αφού όλες οι τιμές που υπολογίστηκαν για κάθε πεπερασμένο στοιχείο αποθηκευτούν σε πίνακα, προστίθενται και το άθροισμά τους δίνει το ζητούμενο ολοκλήρωμα.

Ο κώδικας των παραπάνω παρουσιάζεται στο παράρτημα και το παράρτημα ακολουθεί.



Σχήμα 4.23 : Ροή κώδικα / Εφαρμογή μοντέλου ΙΗ

4.3.2 Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Για τη σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα υπολογίστηκαν τα ολοκληρώματα των τάσεων με ισοδύναμη τάση Von Mises, Tresca και Dang Van, για τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Περίπτωση ολίσθησης με $\mu = 0.1$ για επιφανειακό φορτίο $p_{m1} = 2452.8$ MPa, $p_{m2} = 2174.4$ MPa ($F=850$ N) για τρεις περιπτώσεις δοκιμίων: shot peened, deep rolled, χωρίς μηχανικώς προσδιδόμενες τάσεις.
2. Περίπτωση απλής κύλισης και ολίσθησης με $\mu = 0.1$ για επιφανειακό φορτίο $p_{m1} = 2452.8$ MPa σε σφαιροβολημένο δοκίμιο
3. Περίπτωση τριών δοκιμίων με ξεχωριστή επιφανειακή κατεργασία για $p_{m1} = 2452.8$ MPa

Ως ζωή αναφοράς N_1 για την εκτίμηση της αντοχής θεωρήθηκαν οι κύκλοι λειτουργίας της ομάδας των πειραματικών τιμών με τη μικρότερη διασπορά, δηλαδή την περίπτωση του deep rolled δοκιμίου σε μέση πίεση επιφανείας $p_{m1} = 2452.8$ MPa, $N_1 = L_{63.2} = 11.39$ Million Load Cycles (*Mio LC*). Για τη μετάβαση από το 3d στο 2d μοντέλο, χρησιμοποιείται ως αναφορά η ζωή που προβλέπεται από την προσομοίωση για την περίπτωση του 3d σφαιροβολημένου δοκιμίου για $p_{m1} = 2452.8$ MPa, το οποίο άλλωστε αποτελεί και τη βασική πειραματική σειρά (βλ. κεφ. 4.1.4)

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των ογκικών ολοκληρωμάτων, των υπολογισμένων διαρκειών ζωής αρχικά σε μορφή πινάκων και κατόπιν σε διαγράμματα, όπου και θα γίνει ο σχολιασμός τους. Η διάρκεια ζωής $L_{63.2}$ (μέση τιμή στατιστικής κατανομής Weibull) ορίζεται σε εκ. κύκλους λειτουργίας (*Mio. LC*), με περιθώρια στατιστικού σφάλματος L_{90} (+) και L_{10} (-). Όλα τα αποτελέσματα αφορούν στο καμπυλωμένο δοκίμιο – δίσκο. Με μπλε χρώμα τονίζεται η βασική πειραματική σειρά και με κίτρινο το σημείο αναφοράς.

Ογκικά / επιφανειακά ολοκληρώματα $\left(\int_V \frac{(\sigma - \sigma_u)^c}{z'^h} dV \right)^{\frac{1}{e}}$

3-διάστατο μοντέλο

	Απλό δοκίμιο	Shot Peened $p_{m1}=2453$ MPa	Rolled
Απλή κύλιση, $\mu=0$			
Tresca	1.71E+25	9.90E+24	5.21E+23
Von Mises	1.25E+28	1.14E+28	8.18E+26
Dang Van	1.26E+27	6.78E+26	4.14E+26

Ολίσθηση, $\mu=0.1$		$\rho_{m1}=2453 \text{ Mpa}$	
Tresca	1.90E+25	1.10E+25	9.44E+23
Von Mises	1.39E+28	1.26E+28	1.37E+27
Dang Van	1.47E+27	8.59E+26	5.85E+26
		$\rho_{m2}=2174.4 \text{ Mpa}$	
Tresca	2.48E+24	1.08E+24	1.51E+23
Von Mises	2.00E+27	1.43E+27	2.48E+26
Dang Van	2.38E+26	1.39E+26	1.02E+26

2-διάστατο μοντέλο

$\Lambda [-]$	0.032	0.044	0.125
		$\rho_{m1}=2453 \text{ MPa}$	
Tresca	4.53E+24	2.34E+26	1.16E+27
Von Mises	2.12E+27	4.12E+28	1.88E+29
Dang Van	1.06E+27	1.39E+28	8.10E+28
		$\rho_{m3}=1390 \text{ MPa}$	
Tresca		3.41E+24	
Von Mises		6.10E+26	
Dang Van		4.66E+26	
		$\rho_{m4}=1065 \text{ MPa}$	
Tresca		4.33E+23	
Von Mises		8.05E+25	
Dang Van		1.07E+26	

Πειραματικές τιμές διάρκειας ζωής (σε εκατομμύρια κύκλους λειτουργίας Mio. LC)

$\mu=0.1$		Απλό δοκίμιο		
ρ_m [MPa]	L63.2 (Mio LC)	L63.2-L10 (Mio LC)	L90-L63.2 (Mio LC)	
2452.00	17.13	16.13	23.206	
2174.00	28.00	20.46	17.467	

$\mu=0.1$		Shot peened		
ρ_m [MPa]	L63.2 (Mio LC)	L63.2-L10 (Mio LC)	L90-L63.2 (Mio LC)	
2452.00	13.47	8.17	5.56	
2174.00	45.12	27.71	19.1	

$\mu=0.1$		Deep Rolled		
ρ_m [MPa]	L63.2 (Mio LC)	L63.2-L10 (Mio LC)	L90-L63.2 (Mio LC)	
2452.00	11.40	2.31	0.997	
2174.00	71.14	20.72	9.68	

$\rho_{m1} = 2453 \text{ MPa}$		Shot peened	
Συντ. τριβής μ	L63.2 (Mio LC)	L63.2-L10 (Mio LC)	L90-L63.2
0	57.90	45.85	45.71
0.1	13.47	8.17	5.562

$\mu=0.1$		Shot peened	
$\Lambda [-]$	L63.2 (Mio LC)	L63.2-L10	L90-L63.2
0.032	0.72	0.64	0.96
0.044	13.47	8.16	5.56
0.125	215.11	114.70	70.23

Αποτελέσματα προσομοίωσης σε Mio. LC

$\mu=0.1$		Dang Van	
ρ_m [MPa]	Απλό	Shot peened	Deep rolled
2453	4.48	7.76	11.39
2174	27.43	47.93	65.31

$\mu=0.1$		Tresca	
ρ_m [MPa]	Απλό	Shot peened	Deep rolled
2453	0.57	0.98	11.39
2174	4.33	9.97	71.10

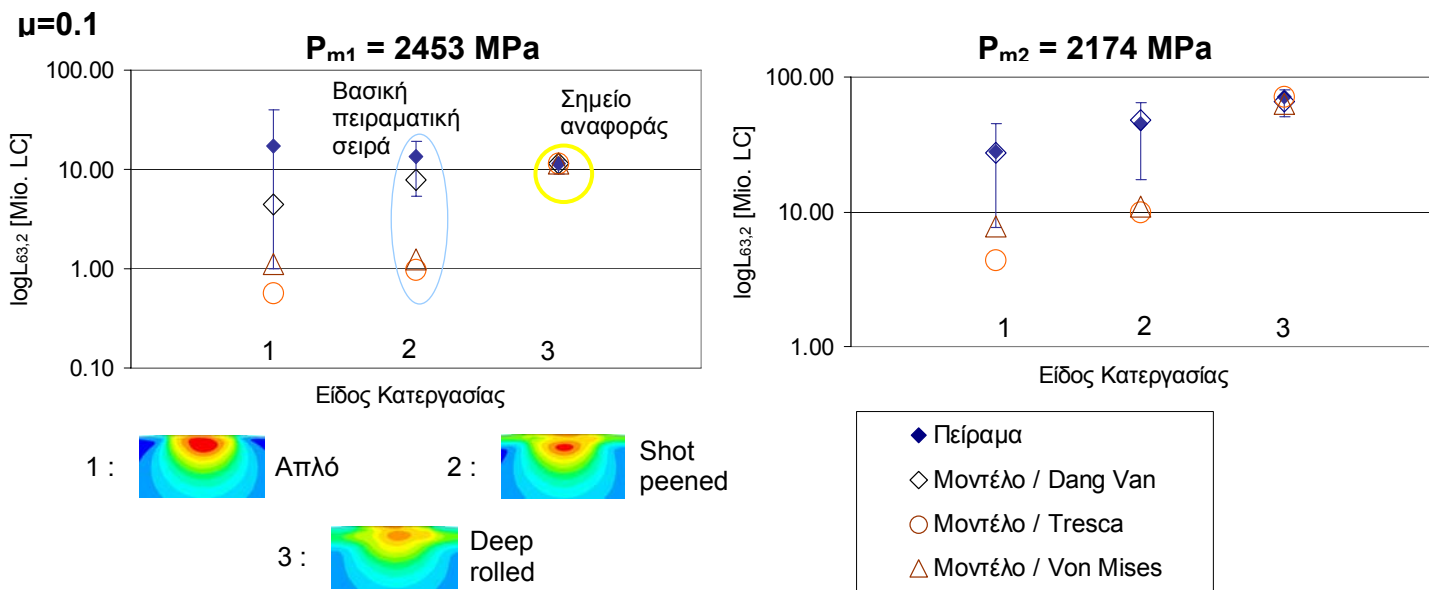
$\mu=0.1$		Von Mises	
ρ_m [MPa]	Απλό	Shot peened	Deep rolled
2453	1.12	1.23	11.39
2174	7.79	10.86	62.73

$\rho_{m1} = 2453 \text{ MPa}$		Shot peened	
Συντ. τριβής μ	Dang Van	Tresca	Mises
0	9.09	1.09	1.36
0.1	7.76	0.98	1.23

$\mu=0.1,$ $\rho_{m1} = 2453 \text{ MPa}$		Shot peened	
$\Lambda [-]$	Dang Van	Tresca	Mises
0.032	1.33	1.97E-01	2.70E-01
0.044	7.76	0.98	1.23
0.125	101.81	50.63	2.39E+01

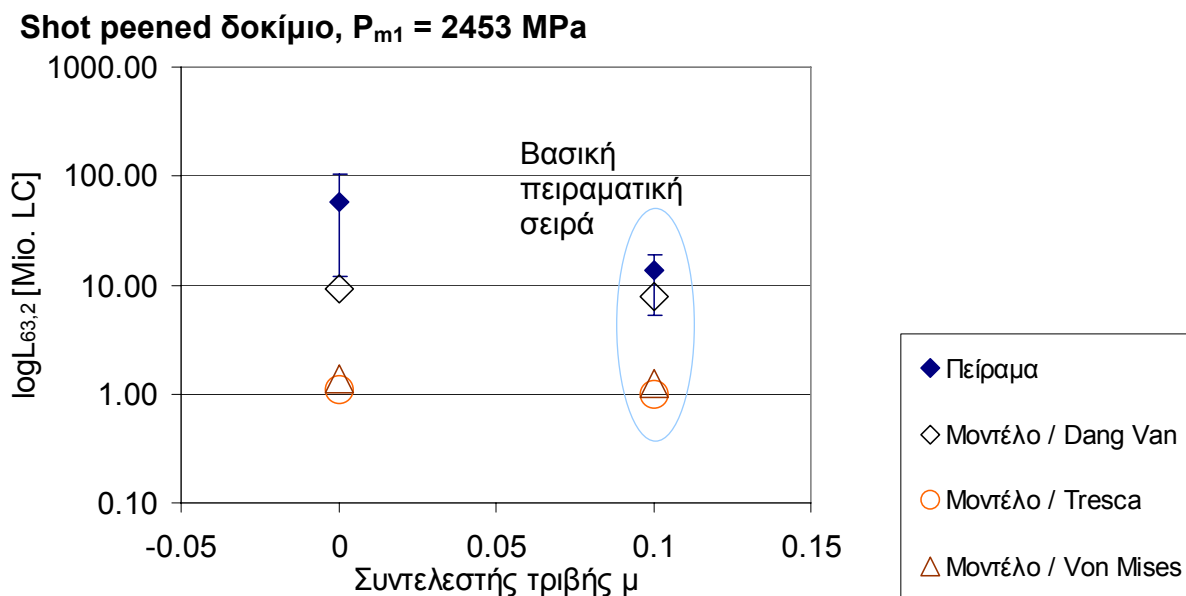
$\mu=0.1$	Shot peened / Αποπερατωμένο		
p_m [MPa]	Dang Van	Tresca	Von Mises
2452	7.76	0.98	1.23
1389	231.95	67.20	82.97
1065	1013.05	530.37	629.09

1^η περίπτωση / επίδραση παραμενουσών τάσεων



Σχήμα 4.24 : Διάγραμμα πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών – Παραμένουσες τάσεις / Ημιλογαριθμική κλίμακα

Κατ αρχήν στα διαγράμματα φαίνεται το σημείο αναφοράς που χρησιμοποιείται και η βασική πειραματική σειρά. Παρατηρείται γενικά καλή συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών διάρκειας ζωής των αποτελεσμάτων που προέρχονται από τη χρήση του κριτηρίου Dang Van καθώς σε κάθε περίπτωση, τα σημεία βρίσκονται τουλάχιστον εντός ορίων σφάλματος (ειδικότερα για μέση πίεση $p_{m2} = 2174$ MPa, σχεδόν ταυτίζονται!). Προσοχή χρειάζεται το σημείο όπου, ενώ οι πειραματικές τιμές δείχνουν μια δυσμενή επίδραση στην αντοχή με τη πρόσδοση των παραμενουσών τάσεων για $p_{m1} = 2452,8$ MPa, το μοντέλο την παριστάνει ως θετική. Σαφώς, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, οι πειραματικές τιμές εμφανίζουν σημαντική διασπορά ενώ κάθε σημείο αντιστοιχεί σε 3 μόνο πειραματικές δοκιμές. Είναι αναγκαία λοιπόν η περαιτέρω πειραματική μελέτη του φαινομένου, για μεγαλύτερη στατιστική ασφάλεια και για τη διεξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων. Τα άλλα δυο κριτήρια αντίθετα, φαίνεται να παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα, με τις τιμές τους να βρίσκονται κατά πολύ έξω των ορίων διασποράς και να υπερεκτιμούν την επίδραση των παραμενουσών τάσεων πχ. για $p_{mean} = 2452,8$ MPa μεταξύ *deep rolled* και *απλού* δοκιμίου λαμβάνεται πειραματικά αύξηση ~50% της διάρκειας ζωής, ενώ το μοντέλο με Tresca, προβλέπει μείωση ~95%.

2^η περίπτωση / επίδραση τριβής

Σχήμα 4.25 : Διάγραμμα πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών – Τριβή / Ημιλογαριθμική κλίμακα

Στη προσπάθεια να περιγραφεί η επίδραση της τριβής, όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, το μοντέλο IH αποτυγχάνει.

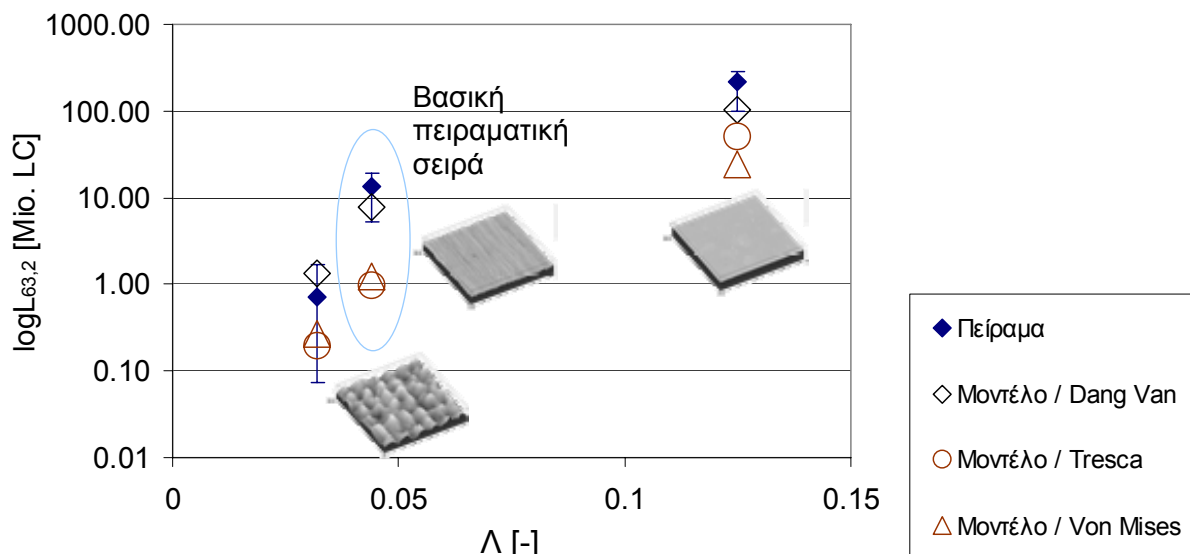
Πιο συγκεκριμένα: Οι τιμές κατ' αρχήν του μοντέλου για την περίπτωση της $\mu=0.1$ προέρχονται από τη μελέτη της 1ης περίπτωσης. Όπως λοιπόν φάνηκε και στο προηγούμενο διάγραμμα, οι τιμές Tresca, Von Mises εμφάνισαν πολύ μεγάλη απόκλιση από τις πειραματικές και μόνο η τιμή Dang Van βρέθηκε εντός διασποράς. Δεύτερον, η διαφορά όπως προβλέπεται από το μοντέλο με κάθε κριτήριο, για τις δυο συνθήκες ($\mu=0$, $\mu=0.1$), είναι της τάξης ~11-17%, ενώ πειραματικά λαμβάνεται έως και 5 φορές μεγαλύτερη αντοχή για συνθήκες απλής κύλισης σε σχέση με την ολίσθηση.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η περίπτωση ανήκει εκτός των περιορισμών που τίθενται από τη θεωρία του. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφ,3 το μοντέλο IH, καθώς βασίζεται τη θεωρία του Weibull, δεν λαμβάνει υπ όψιν του φαινόμενα διάδοσης ρωγμής. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αντοχής σε περιπτώσεις όπου ο χρόνος διάδοσης μιας ρωγμής κόπωσης ως την αστοχία είναι ελάχιστος σε σχέση με τη συνολική διάρκεια ζωής, η τουλάχιστον ως συγκριτική μέθοδος σε περιπτώσεις όπου ο χρόνος διάδοσης ρωγμής είναι σχεδόν ίσος μεταξύ τους.

Όπως αναφέρεται όμως και στη βιβλιογραφία [55], λόγω επίδρασης λιπαντικού / ελκτικών τάσεων, μεταξύ περιπτώσεων απλής κύλισης και ολίσθησης με $\mu = 0.1$, εμφανίζεται μεγάλη διαφορά στο χρόνο διάδοσης της ρωγμής. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση της απλής κύλισης, στο παρόν πείραμα, υπό υψηλό φορτίο, ο χρόνος διάδοσης της ρωγμής κόπωσης είναι πολύ σημαντικός

3^η περίπτωση / επίδραση τραχύτητας

$\mu = 0.1$, Shot peened δοκίμιο , $P_{m1} = 2453$ MPa



Σχήμα 4.26 : Διάγραμμα πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών – Τραχύτητα / Ημιλογαριθμική κλίμακα

Και στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται καλή συμφωνία μεταξύ της προβλεπόμενης αντοχής κατά Dang Van και των πειραματικών τιμών. Τα υπόλοιπα κριτήρια, Von Mises και Tresca, φαίνεται να υποτιμούν τη διάρκεια ζωής. Ο λόγος είναι σαφώς ότι οι τιμές του μοντέλου για $\Lambda = 0.44$ προέρχονται από την πρόβλεψη για το σφαιροβολημένο δοκίμιο της 1^{ης} εξεταζόμενης περίπτωσης (3D μελέτη επίδρασης παραμενουσών τάσεων), όπου τα κριτήρια Tresca και Von Mises είχαν παρουσιάσει μεγάλη απόκλιση από τις πειραματικές τιμές. Πολύ ενδιαφέρον ωστόσο είναι το γεγονός πως παράλληλα παριστούν ορθά τη μεγάλη μεταβολή που προκαλούν στην αντοχή οι τρεις διαφορετικοί βαθμοί επιφανειακής αποπεράτωσης (όπου η διάρκεια ζωής για $\Lambda = 0.125$ μπορεί να είναι έως και 200 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή για $\Lambda = 0.032$).

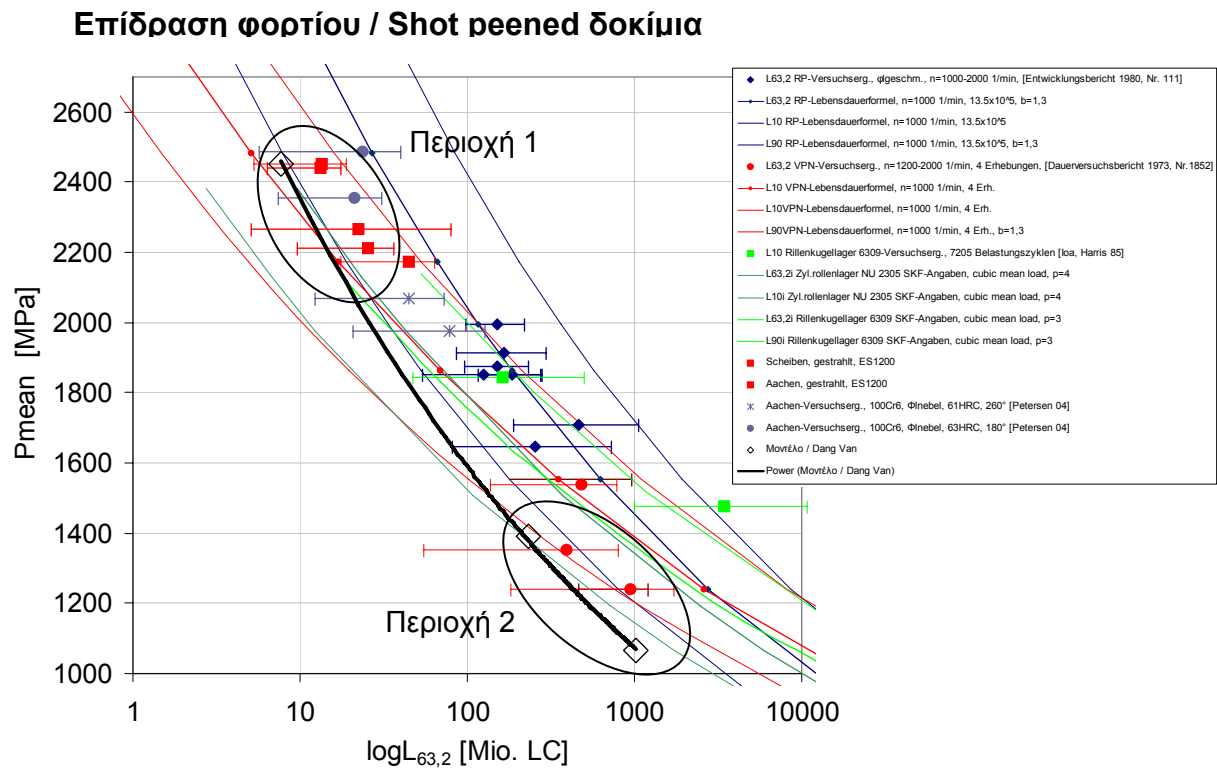
Γενικά σχόλια

Με την εφαρμογή του μοντέλου IH στα αποτελέσματα της προσομοίωσης φάνηκαν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του. Από τα αποτελέσματα γίνεται κατανοητό πως η χρήση το κριτήριο Dang Van έχει καθολικότερη ισχύ, καθώς περιγράφει επιτυχώς τόσο την επίδραση των παραμενουσών τάσεων όσο και της τραχύτητας. Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι τόσο από το πείραμα, όσο και από τις προσομοιώσεις, για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, προκύπτει ότι η επίδραση της τραχύτητας εμφανίστηκε πολύ σημαντικότερη των άλλων (μεταβολή έως και 200 φορές της αντοχής μεταξύ των ακραίων συνθηκών).

Ακολουθεί ένα ακόμη διάγραμμα, όπου φαίνεται το δυναμικό του μοντέλου IH για την περιγραφή της επίδρασης διαφορετικών τιμών επιφανειακής φόρτισης. Υπολογίστηκαν 2 ακόμη σημεία με το 2d μοντέλο με αποπερατωμένη επιφάνεια, για μέσες πιέσεις $p_{m3} = 1389.9$ MPa ($F = 282.5$ N) και $p_{m4} = 1065.03$ MPa ($F = 127.5$ N) εκ των οποίων προκύπτει η μαύρη καμπύλη τάσης. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται γραφικά τιμές διάρκειας ζωής

ενός πλήθους μηχανισμών στοιχείων κύλισης (από έδρανα κύλισης, έως παλιότερα προϊόντα της εταιρείας Robert BOSCH GmbH), από το ίδιο υλικό με τα δοκίμια που μελετά η παρούσα διπλωματική. Στην περιοχή 1 βρίσκονται οι πειραματικές τιμές ζωής των δοκιμίων, ενώ στην περιοχή 2, τιμές διάρκειας ζωής σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης και λειτουργίας. Η καμπύλη διάρκειας ζωής που υπολογίζεται από το μοντέλο IH, λαμβάνοντας υπ όψιν την επίδραση της τραχύτητας και χρησιμοποιώντας το κριτήριο Dang Van, φαίνεται ότι προσεγγίζει τις πραγματικές τιμές σε συνθήκες υπηρεσίας.

Δινητικά λοιπόν, οι προσομοιώσεις, σε συνδυασμό με το μοντέλο IH και με τη λήψη δεδομένων από βραχύχρονες πειραματικές δοκιμές αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τον μηχανικό: Ήδη από τα πρώτα στάδια της μελέτης ενός προϊόντος, δίνεται μια εκτίμηση της συμπεριφοράς του σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Σαφώς, πριν την εξαγωγή ακλόνητων συμπερασμάτων, είναι αναγκαία η εφαρμογή και δοκιμή του μοντέλου και σε άλλες περιπτώσεις και η διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων για μεγαλύτερη στατιστική ασφάλεια.



Σχήμα 4.27 : Διάγραμμα πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών – Επίδραση φορτίου / Ημιλογαριθμική κλίμακα

5 Επίλογος

5.1 Επισκόπηση

Στην παρούσα διπλωματική έγινε μια προσπάθεια εκτίμησης της επίδρασης μηχανικώς προσδιδόμενων παραμενουσών τάσεων και επιφανειακής τραχύτητας στη διάρκεια ζωής δισκοειδών δοκιμίων σε σχετική μεταξύ τους κύλιση.

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε:

1. Βιβλιογραφική έρευνα και συνοπτική παρουσίαση των τριβολογικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε σχετική κύλιση υπό σταθερό φορτίο. Εξετάστηκαν το φαινόμενο της φθοράς, της κόπωσης εκ κύλισης και των μέσων που προτείνονται από την βιβλιογραφία για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής (πχ. Weibull – weakest link model).
2. 3D μοντελοποίηση σε περιβάλλον FEM (ANSYS) του εξεταζόμενου τριβολογικού συστήματος, υπό την επίδραση αξονικού φορτίου και τριβής εκ κυλίσεως και παράλληλη προσομοίωση και της ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Τα αποτελέσματα της απλής περίπτωσης (ύπαρξη μόνο αξονικού φορτίου) συγκρίθηκαν με αναλυτικές λύσεις δείχνοντας ταύτιση σχεδόν 100%. Το γεγονός αυτό δηλώνει την ορθότητα του μοντέλου.
3. Μοντελοποίηση της επίδρασης στο εντατικό πεδίο των δοκιμίων των μηχανικώς προσδιδόμενων παραμενουσών τάσεων προερχόμενων από επεξεργασίες shot peening και deep rolling. Η προσθήκη των παραμενουσών τάσεων πραγματοποιήθηκε με τη σύνταξη ειδικής μακροεντολής που εφαρμόστηκε στο υπομοντέλο της γενικής περίπτωσης.
4. Προσέγγιση και μοντελοποίηση σε απλοποιημένη 2D προσομοίωση της επίδρασης επιφανειακής τραχύτητας σε 3 βαθμούς αποπεράτωσης, λαμβάνοντας υπ όψιν και την ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Αυτό πραγματοποιήθηκε με σύνταξη πολύπλοκου κώδικα που περιγράφηκε συνοπτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ δίνεται στο παράρτημα.
5. Εφαρμογή του εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης διάρκειας ζωής εδράνων κύλισης Ioannides & Harris (ISO 281). Αυτό έγινε μέσω σύνταξης ειδικής post processing ρουτίνας.
6. Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα και εξαγωγή συμπερασμάτων για την ικανότητα των προσομοιώσεων και μαθηματικών μοντέλων να περιγράφουν την επίδραση των παραμενουσών τάσεων και της τραχύτητας επιφανείας στην κόπωση λόγω κύλισης / ολίσθησης.

5.2 Μελλοντικοί στόχοι

Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, φάνηκε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και πειραματικών τιμών. Ωστόσο πρέπει να ληφθούν υπ όψιν και οι απλοποιήσεις που έγιναν στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Από την σκοπιά του πειράματος, λόγω των υψηλών συνθηκών φόρτισης και των προφανώς μικρών ζών, δεν ήταν δυνατόν να εξετασθούν μακροπρόθεσμα φαινόμενα, που δυνητικά αποτελούν αιτία καταστροφής μηχανισμών κύλισης, όπως τριβοχημικά φαινόμενα κλπ. Επιπλέον είναι σαφές ότι οι πειραματικές τιμές, λόγω του περιορισμένου αριθμού πειραματικών δοκιμών, πάσχουν από άποψη στατιστικής ασφάλειας.

Από τη σκοπιά των προσομοιώσεων, λόγω των απλοποιήσεων κατ αρχάς στο δισδιάστατο μοντέλο, η τραχύτητα κατά την κατεύθυνση της κύλισης δεν μοντελοποιείται. Επιπλέον οι παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται λόγω της παραμόρφωσης των επιφανειακών ανωμαλιών και της μακροσκοπικής πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού (shakedown/ratchetting), τα φαινόμενα άρωσης και οι διάφορες μικροδομικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε πραγματικές συνθήκες κυκλικής φόρτισης δεν προσομοιώνονται.

Τέλος το εμπειρικό μοντέλο των Ioannides & Harris, θεωρεί ότι ο χρόνος διάδοσης της κύριας ρωγμής κόπωσης ως την τελική αστοχία είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό της ολικής διάρκειας ζωής. Αν και κάτι τέτοιο ισχύει σε συνθήκες υψηλής φόρτισης, ίσως σε πραγματικές συνθήκες κάποια χαρακτηριστικά να μεταβάλλονται.

Για τους παραπάνω λόγους απαιτείται προφανώς περαιτέρω εξέταση του μοντέλου, βελτίωση των προσομοιώσεων και πιο εκτεταμένη πειραματική μελέτη, ώστε να ελεγχθεί η εγκυρότητα των παραπάνω προσεγγίσεων και αποτελεσμάτων.

Παράρτημα

Στο παρόν παράρτημα δίνονται οι κώδικες δημιουργίας του 3διάστατου μοντέλου (προσομοίωση παραμενουσών τάσεων), του 2διάστατου (επίδραση τραχύτητας) και οι αντίστοιχες post processing ρουτίνες για την εφαρμογή της μεθόδου IH. Κατόπιν αυτών δίνεται και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την ανάγνωση της υπολογιζόμενης επιφανειακής πίεσης.

Οτιδήποτε ακολουθεί θαυμαστικό, αντιμετωπίζεται από το πρόγραμμα ως σχόλιο.

1 Κώδικας 3D μοντέλου

```

/TITLE,3D Test disks- Contact simulation F-Fr
!*****
!
!=====
!
!filename,coarse
!*****
!PARAMETERS
!*****

!=====
!control parameters
!=====

!Friction application
!if mpc=1 then MPC184 elements are used for applying the force + friction
mpc=1

!FRICTION
!if friction=1 then friction is added
friction=1

!PLASTICITY
!1=plastic behaviour
plastic=0

!FKN, KEYOPT, TAUMAXcontrol                    !contact elements' cotrol parameters
FKN=1
keyop10=0
keyop6=0
TAUMAXC=0

!=====

!disk1                                           !Material E module, Poisson's ratio
E1=136465.0444                                  ! and basic geometrical dimensions
V1=0.25999999
r1=13
r1in=7
w1=5

!disk2
E2=136465.0444
V2=0.25999999
r2=13
r2c=9
r2f=4
r2in=7
w2=2.5

F=850                                           !Load
M=0.1                                           !Friction coefficient

```

```

pi=acos(-1)
ita=0.856304762                                !analytical calculation of contact pressure

ksi=1.18047619
Sk=0.403846154
Ered=(1/2)*((1-v1**2)/E1+(1-v1**2)/E1)
breite=ita*((3*F*Ered)*(1/Sk))**(1/3)
laenge=ksi*((3*F*Ered)*(1/Sk))**(1/3)
Pmaximal=(1/(ita*ksi))*((3*F*(Sk**2)*((1/Ered)**2))/(8*(pi**3)))**(1/3)

TAUMAX=M*Pmaximal
!2328/sqrt(3)

int=breite*0.5e-4                               !geometrical penetration for contact
                                                !establishment

*afun,deg
ang=15                                           !coarse model angle

!Sub Geometry                                  !Geometrical characteristics of submodel
!width of sub
z=1
!height
y=1
!length
x=1
!height red factor
yr=1

parsav,scalar,'param','txt'                    !saving parameters for use on submodel

!Mesh Transition pattern                        !Parameters controlling the mesh trans. pattern
a1=14
b1=14
c1=14
d1=4
ratu=14
rat=4

!For residual stresses implication, check submodel parameters

!=====
!=====
!PREPROCESSOR
!=====
!=====

/PREP7

!*****
!***** ELEMENT TYPES
!*****

et,1,solid95                                    !solid elements
et,2,targe170                                  !Target elements
et,3,conta174                                  !contact elements

!*****
!***** MATERIAL PROPERTIES
!*****

!disk1
mp,ex,1,E1                                     !basic material properties application
mp,prxy,1,V1
mp,mu,1,M

*if,plastic,eq,1,then                           !If plasticity par. active, plastic behaviour is applied
tb,kinh,1,1,13,                               !Not necessary, max stress < elastic limit
tbtemp,0
tbpt,,0,0
tbpt,,0.01802,2459
tbpt,,0.0187,2501.7
tbpt,,0.031090001,2826.3999
tbpt,,0.042070001,2902.6001

```

```

tbpt,,0.055039998,2944.5
tbpt,,0.072889999,2979
tbpt,,0.11954,3029
tbpt,,0.16129,3060
tbpt,,0.21227001,3090.2
tbpt,,0.26284,3114.5
tbpt,,0.28264001,3122
tbpt,,0.29324999,3128
*endif

!disk2
!mp,ex,2,E2
!mp,prxy,2,V2
!mp,mu,2,M

!*****
!***** GEOMETRY DESIGN
!*****

k,1,0,r1-r1in-int,0                !keypoints
k,2,,r1-r1in-int,w1
k,3,0,-int,0
k,4,-int,w1
k,5,-r2*sin(ang),-r2+r2*cos(ang),0
g=(r2c+r2f*cos(asin(w2/r2f)))
k,6,-g*sin(ang),-r2+g*cos(ang),w2
k,7,-r2c*sin(ang),-r2+r2c*cos(ang)
k,8,-r2in*sin(ang),-r2+r2in*cos(ang),0
k,9,-r2in*sin(ang),-r2+r2in*cos(ang),w2

!lines
l,1,2
l,1,3
l,2,4
l,4,3
l,8,7
l,7,5
l,9,8
l,9,6
larc,6,5,7,r2f

!areas
al,1,2,3,4
al,5,6,7,8,9
lcomb,5,6,0

k,100001,0,r1-int,0
k,100002,,r1-int,w1
k,100003,0,-r2,0
k,100004,,-r2,w2

!cyl
vrot,1,,,,,100001,100002,-ang      !volume

!r4
vrot,2,,,,,100003,100004,-ang
allsel

!*****
!***** MESH
!*****

!*****
!upper volume
!*****

!element number definition following trans. pattern
!sel,s,,3
!sel,a,,,10
!sel,a,,,12
!esize,all,,,a1,1/rat
!allsel
!sel,s,,1
!sel,a,,,6
!sel,a,,,11
!esize,all,,,b1,
!allsel

```

```

Isel,s,,2
lesize,all,,a1+c1,1/ratu
allsel
Isel,s,,4
lesize,all,,b1+c1,1/ratu
allsel
Isel,s,,15
Isel,a,,14
Isel,a,,13
lesize,all,,d1,
!ratu
allsel
Isel,s,,16
lesize,all,,c1+d1,ratu
allsel

vmesh,1                                !Volume mesh
allsel
vsymm,x,1
vsel,s,,1,3,2,1
numcmp,all
nummrg,all,
vglue,1,3

!*****
!second volume
!*****

!Transition pattern
a2=b1
b2=a1
c2=c1
d2=d1
ratd=ratu

Isel,s,,20                              !element number definition
Isel,a,,7
Isel,a,,9
lesize,all,,a2,
allsel
Isel,s,,19
Isel,a,,8
Isel,a,,5
lesize,all,,b2,1/rat
allsel
Isel,s,,18
lesize,all,,a2+c2,1/ratd
allsel
Isel,s,,17
lesize,all,,b2+c2,1/ratd
allsel
Isel,s,,21
Isel,a,,24
Isel,a,,23
lesize,all,,d2,
allsel
Isel,s,,22
lesize,all,,c2+d2,1/ratd
allsel

vmesh,2                                !volume mesh
allsel
vsymm,x,2
vsel,s,,2,4,2,1
numcmp,all,
nummrg,all,
vglue,2,4
allsel

!*****
!contact surface
!*****

!contact

```

```

asel,s,,9
asel,a,,19
nsla,r,1
nsl,r,loc,y,-0.08,1
type,3
esurf,top
allsel

!target
asel,s,,5
asel,a,,15
nsla,r,1
nsl,r,loc,y,0.08,-1
nsl,r,loc,z,-0.4,0.8
type,2
esurf,top
allsel

!assigning material                                !code section applying different material properties
!vsel,s,,2                                          !if necessary
!eslv,r
!mpchg,2,all

!*****
!contact conditions
!*****

*if,TAUMAXC,eq,1,then                               !contact properties
r,1,,,FKN,,
rmore,int*1e-02,int*1e-6,TAUMAX,,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*else
r,1,,,FKN,,
rmore,int*1e-02,int*1e-6,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*endif

!*****
!*****                                BOUNDARY CONDITIONS
!*****

allsel                                              !zero displacement to target body
asel,s,,21
asel,a,,11
asel,a,,2
asel,a,,22
nsla,r,1
d,all,all,0
allsel

asel,s,,16                                          !symmetry b.c.
asel,a,,6
asel,a,,17
asel,a,,8
da,all,symm
allsel

*if,mpc,eq,1,then                                   !load application through M.P.C. , if m.p.c. control par. active
et,4,mpc184
keyopt,4,1,1
n,1000000,0,r1
npilot=ndnext(999999)
allsel
asel,s,,3
asel,a,,13
asel,a,,18
asel,a,,7
nsla,r,1

```

```

type,4
*get,nanz,node,,count
narb=0
*do,i,1,nanz
narb=ndnext(narb)
e,npilot,narb
*enddo
allsel
!friction application, if friction active
*if,friction,eq,1,then
f,npilot,mz,(((F/2)*M)*r1)
*endif
f,npilot,fy,(-F/2)
d,npilot,ux,0
allsel

*else
!load application through c.p. constraints if m.p.c. control par. inactive
asel,s,,13
asel,a,,3
asel,a,,18
asel,a,,7
nsla,r,1
cp,1,all,all
allsel
lsel,s,,1
nsl,r,1
*get,nnum,node,,count
f,all,fy,(-F/2)/nnum
*if,friction,eq,1,then
f,all,fx,((-F/2)*M)/nnum
*endif
allsel
*endif

=====
!SOLUTION
=====
/sol

antype,static
nsubst,50,200,1
nigeom,on
outres,all,last
neqit,1000
time,0
autots,-1
eqslv,pcg,1e-8

!analysis type
!load substep num. for accuracy and convergence
!non linearity on
!calculation of all possible data
!max. num. of equilibrium eq.
!starting time
!solver accuracy

save
solve
finish
!saving results for future use for submodel

!*****
!=====
!*****
!
!
!=====
!*****

/out,asdfg
/clear
/out
/filename,submodel
!*****
!PARAMETERS
!*****

parres,new,'param','txt'
*afun,deg
!restoring parameters from coarse

!!INITIAL STRESSES CONTROL PARAMETER
initials=1

```



```
aa=-1200          !Residual stresses par. rolling direction (for the exp. equation) current values - Deep rolled
dd=-0
bb=1.2E-04
cc=2.3E-08
```

```
aa1=-919         !residual stresses par. axial direction – Deep rolled
dd1=-0
bb1=1.1E-04
cc1=5E-08
```

```
!Mesh transition pattern
a1=28
b1=28
c1=36
d1=20
ratu=2
```

```
!=====
!=====
!PREPROCESSOR
!=====
!=====
```

```
/PREP7
```

```
!*****
!***** ELEMENT TYPES
!*****
et,1,solid45          !8-node solid elements and the appropriate contact elements
et,2,targe170
et,3,conta173
```

```
!*****
!***** MATERIAL PROPERTIES
!*****
!disk1
mp,ex,1,E1          !material definition (E modul, Poisson ratio)
mp,prxy,1,V1
mp,mu,1,M
```

```
*if,plastic,eq,1,then
tb,kinh,1,1,13,
tbtemp,0
tbpt,,0,0
tbpt,,0.01802,2459
tbpt,,0.0187,2501.7
tbpt,,0.031090001,2826.3999
tbpt,,0.042070001,2902.6001
tbpt,,0.055039998,2944.5
tbpt,,0.072889999,2979
tbpt,,0.11954,3029
tbpt,,0.16129,3060
tbpt,,0.21227001,3090.2
tbpt,,0.26284,3114.5
tbpt,,0.28264001,3122
tbpt,,0.29324999,3128
*endif
```

```
!disk2
!mp,ex,2,E2
!mp,prxy,2,V2
!mp,mu,2,M
```

```
!*****
!***** GEOMETRY DESIGN
!*****
```

```
k,1,0,r1-r1in-int,0          !keypoints
k,2,,r1-r1in-int,w1
k,3,0,-int,0
k,4,,-int,w1
```

```

k,5,-r2*sin(ang),-r2+r2*cos(ang),0
g=(r2c+r2f*cos(asin(w2/r2f)))
k,6,-g*sin(ang),-r2+g*cos(ang),w2
k,7,-r2c*sin(ang),-r2+r2c*cos(ang)
k,8,-r2in*sin(ang),-r2+r2in*cos(ang),0
k,9,-r2in*sin(ang),-r2+r2in*cos(ang),w2

l,1,2                                !lines
l,1,3
l,2,4
l,4,3
l,8,7
l,7,5
l,9,8
l,9,6
larc,6,5,7,r2f

al,1,2,3,4                            !areas
al,5,6,7,8,9
lcomb,5,6,0

k,100001,0,r1-int,0
k,100002,,r1-int,w1
k,100003,0,-r2,0
k,100004,,,-r2,w2

!cyl
vrot,1,,,,,100001,100002,-ang

!r4
vrot,2,,,,,100003,100004,-ang
allsel

!creation of volume3 (upper)          !creation of submodel geometry
block,40,-40,y/yr,50,-40,40
vsbv,1,3
!creation of volume4 (lower)
block,40,-40,-y,-50,-40,40
vsbv,2,1
block,-10,10,-50,50,z,40
flst,2,2,6,orde,2
fitem,2,3
fitem,2,-4
vsbv,p51x,1
block,-x,-10,-50,50,40,-40
flst,2,2,6,orde,2
fitem,2,5
fitem,2,2
vsbv,p51x,1

!*****
!***** MESH
!*****

!*****
!upper volume
!*****

l,sel,s,,48                            !element number definition
l,sel,a,,42
l,sel,a,,39
lesize,all,,a1,4*ratu
allsel
l,sel,s,,49
l,sel,a,,46
l,sel,a,,38
lesize,all,,b1,
allsel
l,sel,s,,37
lesize,all,,a1+c1,ratu
allsel
l,sel,s,,27
lesize,all,,b1+c1,ratu
allsel

```

```

lsel,s,,,36
lsel,a,,,43
lsel,a,,,40
lesize,all,,,d1,
!ratu
allsel
lsel,s,,,34
lesize,all,,,c1+d1,ratu
allsel

```

```

vmesh,4                !volume mesh
allsel
vsymm,x,4
vsel,s,,,1,4,3,1
numcmp,all
nummrg,all,
vglue,1,3

```

```

!*****
!second volume
!*****

```

```

!Transition pattern
a2=b1
b2=a1*yr
c2=c1
d2=d1
ratd=ratu

```

```

lsel,s,,,22            !element number definition
lsel,a,,,19
lsel,a,,,15
lesize,all,,,a2,
allsel
lsel,s,,,18
lsel,a,,,16
lsel,a,,,24
lesize,all,,,b2,4*ratd
allsel
lsel,s,,,17
lesize,all,,,a2+c2,ratd
allsel
lsel,s,,,26
lesize,all,,,b2+c2,ratd
allsel
lsel,s,,,23
lsel,a,,,21
lsel,a,,,14
lesize,all,,,d2,
allsel
lsel,s,,,13
lesize,all,,,c2+d2,1/ratd
allsel

```

```

vmesh,2                !volume mesh
allsel
vsymm,x,2
vsel,s,,,2,4,2,1
numcmp,all,
nummrg,all,
vglue,2,4
allsel

```

```

!*****
!contact surface
!*****

```

```

!contact
asel,s,,,7
asel,a,,,19
nsla,r,1
nset,r,loc,x,-0.7,0.7
nset,r,loc,z,-1,0.5

```

```

type,3
esurf,top
allsel

!target
asel,s,,4
asel,a,,13
nsla,r,1
nset,r,loc,x,-0.7,0.7
nset,r,loc,z,-1,0.5
type,2
esurf,top
allsel

!assigning material
!vsel,s,,2
!eslv,r
!mpchg,2,all

!*****
!contact conditions                !contact properties
!*****

*if,TAUMAXC,eq,1,then
r,1,,,FKN,,
rmore,int*1e-02,int*1e-6,TAUMAX,,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*else
r,1,,,FKN,,
rmore,int*1e-02,int*1e-6,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*endif

!*****
!*****      NODE SELECTION FOR RESULTS INTERPOLATION
!*****

allsel

!UPPER VOLUME
asel,s,,16
asel,a,,3
asel,a,,1
asel,a,,17
asel,a,,15
asel,a,,2

!SECOND VOLUME
asel,a,,12
asel,a,,9
asel,a,,20
asel,a,,18
asel,a,,22
asel,a,,10

nsla,r,1
nwrite
allsel

save
finish

!*****
!*****      INTERPOLATION
!*****

resume,coarse,db

```

```

/post1
file,coarse,rst
set,last
cbdof
finish

|*****
|***** SUBMODEL SOLUTION
|*****

resume

/solu
antype,static                      !solution options
nsubst,50,200,1
nlgeom,on
outres,all,last
neqit,1000
time,0
autots,-1
eqslv,pcg,1e-8

|*****
|***** BOUNDARY CONDITIONS
|*****

/input,submodel,cbdo              !submodel b.c.

asel,s,,6                          !symmetry b.c.
asel,a,,14
asel,a,,23
asel,a,,11
da,all,symm
allsel

|*****
|***** RESIDUAL STRESSES ROUTINE
|*****

*if,initials,eq,1,then            !residual stresses implication if res. stresses par. active

*create,istress_macro             !Macro creation
*cfopen,istress,ist              !Initial stresses file opening

eis='eis'

vsel,s,,1                          !element counting
vsel,a,,3
eslv,r
*get,elnum1,elem,,num,max
allsel
vsel,s,,2
vsel,a,,4
eslv,r
*get,elnum2,elem,,num,max
allsel
*get,elnum,elem,,num,max
allsel

*dim,sxei,array,elnum2,1,1,,      !array creation
*dim,syei,array,elnum2,1,1,,
*dim,szei,array,elnum2,1,1,,
*dim,sxyci,array,elnum2,1,1,,
*dim,syzei,array,elnum2,1,1,,
*dim,sxzei,array,elnum2,1,1,,

*do,i,1,elnum1,1                  !giving zero initial stresses for cylindrical test disk
*vwrite,eis,i
(A8,','F8.0)
*vwrite,0,0,0,0,0,0
(F8.0,','F8.0,','F8.0,','F8.0,','F8.0,','F8.0)
*enddo

```

```

*do,i,elnum1+1,elnum2,1                                !repetitive implication of res stresses

*get,x,elem,(i),cent,x                                  !reading geom. characteristics of each element
*get,y,elem,(i),cent,y
*get,z,elem,(i),cent,z

rr=4                                                     !expressing the surface depth of every element
rk=r2c
kk=-13
a=(y-kk)/x
x1=((rk**2)/(1+a**2))**(1/2)
y1=a*x1+kk
x2=-((rk**2)/(1+a**2))**(1/2)
y2=a*x2+kk
*if,x,ge,0,and,x1,ge,0,then
xx=x1
yy=y1
*elseif,x,ge,0,and,x1,lt,0,then
xx=x2
yy=y2
*elseif,x,lt,0,and,x1,lt,0,then
xx=x1
yy=y1
*elseif,x,lt,0,and,x1,ge,0,then
xx=x2
yy=y2
*endif
rr1=sqrt((x-xx)**2+(y-yy)**2+(z)**2)
t=(rr-rr1)*1e-03

*if,t,le,0.0006,then                                    !if depth<600µm write stresses
sxei(i,1)=(aa*EXP(-1.0*(t-bb)**2/cc)+dd)                !stress in rolling direstion
szei(i,1)=(aa1*EXP(-1.0*(t-bb1)**2/cc1)+dd1)           !stress in axial direction
sxeii=sxei(i,1)
szeii=szei(i,1)
*vwrite,eis,i                                           !writing results in initial stresses file
(A8,',',F8.0)
*vwrite,sxeii,0,szeii,0,0,0
(F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0)
*else
*vwrite,eis,i
(A8,',',F8.0)
*vwrite,0,0,0,0,0,0
(F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0)
*endif                                                  !end of depth check

*enddo                                                  !end of repetitive implication
*cfclos                                                !closing istress file
*end                                                    !ending macro

*use,istress_macro                                     !using macro to write initial stresses file

vsel,s,,,1
vsel,a,,,3
vsel,a,,,2
vsel,a,,,4
eslv,r                                                !element selection
isfile,read,istress,ist,                             !initial stresses file reading
allsel

*endif                                                !end of residual stresses routine

save
solve                                                !solving the model
finish

```

2 Κώδικας 2D μοντέλου

```

/TITLE,2D TEST DISKS-CONTACT SIMULATION - Roughness
!*****
!COARSE MODEL
!=====

/filename,coarse2d
!*****
!PARAMETERS
!*****

!=====
!control parameters
!=====

!Initial stresses and roughness control, check submodel parameters

!PLASTICITY
!1=plastic behaviour
plastic=1

!FKN, KEYOPT, TAUMAXcontrol           !contact elements' cotrol parameters
FKN=100      !default=1
keyop10=0
keyop6=0
TAUMAXC=0

!=====

!disk1                                 !Material E module, Poisson's ratio
E1=136465.0444                         !and basic geometrical dimensions
V1=0.25999999
r1=7.94
w1=5

!disk2
E2=136465.0444
V2=0.25999999
r2=7.94
w2=2.5

f1=1220                                 !Reference load
F=1554.1                                !Model load, calcyated from analytical sol (ch.4)
M=0.1
*afun,rad
pi=acos(-1)
ita=0.856304762                         !analytical calculation of contact pressure
ksi=1.18047619
Sk=0.403846154
Ered=1/((1-v1**2)/E1+(1-v1**2)/E1)
breite=ita*((3*F1/(2*Ered))*(1/Sk))**(1/3)
laenge=ksi*((3*F1/(2*Ered))*(1/Sk))**(1/3)
Pmaximal=(1/(ita*ksi))*((3*F1*(Sk**2)*((2*Ered)**2))/(8*(pi**3)))**(1/3)

TAUMAX=M*Pmaximal
!2328/sqrt(3)

int=breite*0.5e-4                       !geometrical penetration for contact
                                           !establishment

*afun,deg
ang=90

!sub area                               !submodel geometry dimensions
yyy=0.75
xxx=0.75

```

```

chord=1.5

sspline=1                !if =0 interpolation with simple lines

parsav,scalar,'param2d','txt'

!=====
!=====
!PREPROCESSOR
!=====
!=====

/PREP7

!*****
!***** ELEMENT TYPES
!*****

et,1,plane82              !plane elements
keyopt,1,3,2
et,2,targe169             !Target elements
et,3,conta172             !contact elements

!*****
!***** MATERIAL PROPERTIES
!*****

!disk1                    !basic material properties application
mp,ex,1,E1
mp,prxy,1,V1
mp,mu,1,M

*if,plastic,eq,1,then    !If plasticity par. active, plastic behaviour is applied
tb,kinh,1,1,13,
tbtemp,0
tbpt,,0,0
tbpt,,0.01802,2459
tbpt,,0.0187,2501.7
tbpt,,0.031090001,2826.3999
tbpt,,0.042070001,2902.6001
tbpt,,0.055039998,2944.5
tbpt,,0.072889999,2979
tbpt,,0.11954,3029
tbpt,,0.16129,3060
tbpt,,0.21227001,3090.2
tbpt,,0.26284,3114.5
tbpt,,0.28264001,3122
tbpt,,0.29324999,3128
*endif

!disk2
!mp,ex,2,E2
!mp,prxy,2,V2
!mp,mu,2,M

!*****
!***** GEOMETRY DESIGN
!*****

cyl4,0,R1,R1,270,,270+ang,

!*****
!***** MESH
!*****

el=150                    !element number
rat=30                    !element size ratio

allsel
lsel,s,,1
lesize,all,,el,rat
allsel
lsel,s,,2
lesize,all,,el/4,

```



```

allsel
lsel,s,,,3
lesize,all,,,el,1/rat
allsel

amesh,all                !area meshing
arsym,y,all
allsel

!*****
!contact surface
!*****

!contact
lsel,s,,,4
nsl,r,1
nsl,r,loc,x,-0.7,0.7
type,3
esurf,top
allsel

!target
lsel,s,,,1
nsl,r,1
nsl,r,loc,x,-0.7,0.7
type,2
esurf,top
allsel

!*****
!contact conditions
!*****

*if,TAUMAXC,eq,1,then
r,1,,,FKN,,
rmore,int*1e-02,int*1e-6,TAUMAX,,,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*else
r,1,,,FKN,,
rmore,int*1e-02,int*1e-6,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*endif

!*****
!*****                BOUNDARY CONDITIONS
!*****

allsel                !zero displacement
lsel,s,,,5
nsl,r,1
d,all,all,0
allsel

allsel                !symmetry b.c.
lsel,s,,,3,6,3
dl,all,,symm
allsel

et,4,mpc184                !load application through m.p.c.
keyopt,4,1,1
ksel,s,,,3
nslk,r
*get,npilot,node,0,num,max
!npilot=ndnext(999999)
allsel
lsel,s,,,2
nsl,r,1
type,4

```

```

*get,nanz,node,,count
narb=0
*do,i,1,naanz
narb=ndnext(narb)
*if,narb,eq,npilot,cycle
e,npilot,narb
*enddo
allsel
friction=0
*if,friction,eq,1,then
f,npilot,mz,((-F/(2*laenge))*M)*r1
*endif
f,npilot,fy,(-F/(4*laenge))
d,npilot,ux,0
allsel

!=====
!=====
!SOLUTION
!=====
!=====
/sol

antype,static                                !analysis type
nsubst,10,200,1                              !load substep num. for accuracy and convergence
nlgeom,on                                    !non linearity on
outres,all,last                              !calculation of all possible data
neqit,1000                                  !max. num. of equilibrium eq.
time,0                                       !starting time
autots,-1
eqslv,pcg,1e-8                               !solver accuracy

save                                          !saving results for future use for submodel
solve
finish

!*****
!=====
!*****
!
!
!=====
!=====
SUBMODEL
!=====
!=====

/out,asdf
/clear
/out
/filename,submodel2d
!*****
!PARAMETERS
!*****

parres,new,'param2d','txt'                  !restoring parameters

dx=5e-02                                    !element size
!Lower volume
!division factor for dx
d1=70
!number of el on specific 'contact' lines
el1=70
!size ratio
rat1=50
!Upper volume
!division factor for dx
d2=70
!number of el on specific 'contact' lines
el2=70
!size ratio
rat2=50

a=(180/acos(-1))*2*asin((chord/2)/r1)       !angle referring to the x dimension "chord" of the ending point of the 1st surface
b=(180/acos(-1))*2*asin((chord/2)/r2)       !... the same for the second body
arc1=r1*acos(-1)*(a/2)/180                 !arc of the corresponding angle
arc2=r2*acos(-1)*(b/2)/180                 !...

dev1=0.3413

```

```

dev2=0.3413
rzmax1=0.0028/2          !roughness Rz
rzmax2=0.001/2          !..
aspdens1=200/arc1        !asperity density on surface
aspdens2=200/arc2        !..
arc2=arc2+1/aspdens2
kn1=(aspdens1*arc1)+1    !keypoint numbers, 1st surface
kn2=(aspdens1*arc1)+(aspdens2*arc2) !keypoint numbers for the 2nd surface
ln=kn2-1

```

```

!Initial stress state control parameter / if =1, res. stresses applied
initials=1

```

```

aa=-1234.5                !res. stress data for axial direction – Shot peened
dd=-0
bb=3.5E-05
cc=9E-09

```

```

aa1=-1234.5              !stress data for rolling direction – Shot peened
dd1=-0
bb1=3.5E-05
cc1=9E-09

```

```

!=====
!=====
!PREPROCESSOR
!=====
!=====

```

```

/PREP7
!*****
!***** ELEMENT TYPES
!*****

```

```

et,1,plane82              !plane elements
keyopt,1,3,2
et,2,targe169             !target elements
et,3,conta172             !contact elements

```

```

!*****
!***** MATERIAL PROPERTIES
!*****

```

```

!disk1                    !material definition
mp,ex,1,E1
mp,prxy,1,V1
mp,mu,1,M

```

```

*if,plastic,eq,1,then    !plasticity
tb,kinh,1,1,13,
tbtemp,0
tbpt,,0.0
tbpt,,0.01802,2459
tbpt,,0.0187,2501.7
tbpt,,0.031090001,2826.3999
tbpt,,0.042070001,2902.6001
tbpt,,0.055039998,2944.5
tbpt,,0.072889999,2979
tbpt,,0.11954,3029
tbpt,,0.16129,3060
tbpt,,0.21227001,3090.2
tbpt,,0.26284,3114.5
tbpt,,0.28264001,3122
tbpt,,0.29324999,3128
*endif

```

```

!disk2
!mp,ex,2,E2
!mp,prxy,2,V2
!mp,mu,2,M

```

```

!*****
!***** GEOMETRY DESIGN
!*****

!Lower cylinder roughness

local,11,1,0,-r1-rzmax1/2,0

*dim,surfkpy1,array,arc1*aspdens1+1,1      !Array creation
!creation of random surface
*vfill,surfkpy1,gdis,0,dev1,                !random number generator
*voper,surfkpy1,surfkpy1,mult,rzmax1        !random surface roughness

!read real data                             !reading real roughness data code section
!*CREATE,ansuitmp
!*VREAD,surfkpy1(1),'surf1','txt',' ',1, , , , ,
!(ES10.0)
!*END
!/INPUT,ansuitmp

*do,i,0,arc1*aspdens1                       !keypoint creation
k,r1+surfkpy1(i+1,1),90-a/2+(1/aspdens1)*i*180/(r1*acos(-1))
*enddo

*if,sspline,eq,0,then                       !interpolation of keyponoints with roughness
*do,i,1,kn1-1
l,i,i+1
*enddo
*else
*do,i,1,kn1-1,5
splin,i,i+1,i+2,i+3,i+4,i+5
*enddo
*endif
wpave,0,0,0
csys,4

!Upper cylinder roughness

local,12,1,0,r2+rzmax2/2,0

*dim,surfkpy2,array,arc2*aspdens2+1,1      !array creation
!creation of random surface
*vfill,surfkpy2,gdis,0,dev2,                !random number creation
*voper,surfkpy2,surfkpy2,mult,rzmax2        !random roughness data creation

!read real surface data                     !real surface data reading code section
!*CREATE,ansuitmp
!*VREAD,surfkpy2(1),'surf2','txt',' ',1, , , , ,
!(ES10.0)
!*END
!/INPUT,ansuitmp

*do,ii,0,arc2*aspdens2-1                    !keypoints creation
k,r2+surfkpy2(ii+1,1),270+(1/aspdens2)*ii*180/(r2*acos(-1))
*enddo

*if,sspline,eq,0,then                       !keypoints interpolation
*do,ii,kn1+1,kn2
l,ii,ii+1
*enddo
*else
*do,i,kn1+1,kn2,5
splin,i,i+1,i+2,i+3,i+4,i+5
*enddo
*endif

csys,0
wpave,0,0,0
csys,4
csdele,11,12,1

allsel

!area creation
k,100004,chord/2,chord/2,0

```

```

k,100001,chor2,-chor2,0
k,100002,0,-chor2,0
k,100003,0,chor2,0
lstr,1,100001
lstr,100001,100002
lstr,kn1,100002
lstr,kn1+1,100003
lstr,100003,100004
lstr,kn2+1,100004
lsel,s,,ln+1
lsel,a,,ln+2
lsel,a,,ln+3
*DO,ii,1,kn1-2
LSEL,a,,ii,(ii+1)
*ENDDO
al,all
allsel
lsel,s,,ln+4
lsel,a,,ln+5
lsel,a,,ln+6
*DO,ii,kn1,ln-1
LSEL,a,,ii,(ii+1)
*ENDDO
al,all
allsel

!*****
!***** MESH
!*****

!Lower disk                                !lower disk element number definition
lsel,s,,1
*DO,ii,2,kn1-1
lsel,a,,ii,
*ENDDO
lesize,all,dx/d1
lsel,s,,ln+1
lesize,all,,el1,rat1
lsel,s,,ln+3
lesize,all,,el1*1.5,rat1*1.5
lsel,s,,ln+2
lesize,all,dx
allsel

!upper disk                                !upper disk element number definition
lsel,s,,kn1
*DO,ii,kn1,ln
LSEL,a,,ii,
*ENDDO
lesize,all,dx/d2
lsel,s,,ln+6
lesize,all,,el2,rat2
lsel,s,,ln+4
lesize,all,,el1*1.5,rat1*1.5
lsel,s,,ln+5
lesize,all,dx
allsel

!                                **plane meshing**
type,1
lmsshape,1,2d
amesh,all
allsel

!                                **contact**
lsel,s,,1
*DO,ii,2,kn1-1
LSEL,a,,ii,
*ENDDO
nsll,r,1
type,3
esurf,,top
allsel

```

```

!                               **target**
lsel,s,,kn1
*DO,ii,kn1,ln
LSEL,a,,ii,
*ENDDO
nsl,r,1
type,2
esurf,,top
allsel

!assigning material
lase1,s,,2
!esla,r
!mpchg,2,all
!allsel

!*****
!*****      NODE SELECTION FOR RESULTS INTERPOLATION
!*****

allsel                          !symmetry b.c.
lsel,s,,ln+4
lsel,a,,ln+3
dl,all,,symm
allsel

lsel,s,,ln+1                      !node selection for interpolation
lsel,a,,ln+2
lsel,a,,ln+5
lsel,a,,ln+6
nsl,r,1
nwrite
allsel
save
finish

!*****
!*****      INTERPOLATION
!*****

resume,coarse2d,db               !resuming coarse model
/post1
file,coarse2d,rst
set,last
cbdof
finish

!*****
!*****      SUBMODEL SOLUTION
!*****

resume

/solu                            !solution options
antype,static
nsubst,100,200,100
ngeom,on
outres,all,last
neqit,1000
time,0
autots,-1
eqslv,pcg,1e-8

/input,submodel2d,cbdo           !interpolating results from coarse model

/prep7

!*****
!contact conditions
!*****
*if,TAUMAXC,eq,1,then
r,1,,FKN,,6

```

```

rmore,int*1e-02,int*1e-06,TAUMAX,,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*else
r,1,,,FKN,,,6
rmore,int*1e-02,int*1e-06,
keyopt,3,10,keyop10
*if,keyop10,gt,0,then
keyopt,3,6,keyop6
*endif
*endif
cncheck

/solu

!*****
!***** RESIDUAL STRESSES ROUTINE
!*****

*if,initials,eq,1,then                !res. stress implication if control par active

*create,istress_macro                 !macro cration
*cfopen,istress1,ist                 !file in. stress creation

eis='eis'

asel,s,,,1                            !element counting
esla,r
*get,elnum1,elem,,num,max
allsel
asel,s,,,2
esla,r
*get,elnum2,elem,,num,max
allsel

*dim,sxei,array,elnum2,1,1,,,        !array creation
*dim,syei,array,elnum2,1,1,,,
*dim,szei,array,elnum2,1,1,,,
*dim,sxiei,array,elnum2,1,1,,,
*dim,syzei,array,elnum2,1,1,,,
*dim,sxzei,array,elnum2,1,1,,,

*do,i,1,elnum1,1                      !rep implication of initial stresses

*get,x,elem,(i),cent,x                !reading geometry char. of each element
*get,y,elem,(i),cent,y

r=r1                                   !expressing surface depth of each element
xk=0.0
yk=-r1-rzmax2
xx=x-xk
yy=y-yk
rr=sqrt(xx**2+yy**2)
t=(r-rr)*1e-03

*if,t,le,0.0006,then                  !if depth<600µm write stresses
sxei(i,1)=(aa*EXP(-1.0*(t-bb)**2/cc)+dd) !stress in rolling direstion
szei(i,1)=(aa1*EXP(-1.0*(t-bb1)**2/cc1)+dd1) !stress in axial direction
sxeii=sxei(i,1)
szeii=szei(i,1)
*vwrite,eis,i                          !writing results in istress file
(A8,',',F8.0)
*vwrite,sxeii,0,szeii,0,0,0
(F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0)
*else
*vwrite,eis,i
(A8,',',F8.0)
*vwrite,0,0,0,0,0,0
(F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0)

```

```

*endif                                !end of depth scheck
*enddo                                  !end of repetitive implication
*do,i,e1num1+1,e1num2,1                !writing res stress for upper cyl (=0)
*vwrite,eis,i
(A8,',',F8.0)
*vwrite,0,0,0,0,0,0
(F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0,',',F8.0)
*enddo

*cfclos                                !closing istress file

*end                                    !ending macro

*use,istress_macro                      !using macro

asel,s,,1
asel,a,,2
esla,r
isfile,read,istress1,ist,
allsel

*endif                                  !end of res. stress routine

solve
finish

```


3 Κώδικας εφαρμογής μοντέλου ΙΗ

3.1 Για 3D προσομοίωση

```

!VOLUME INTEGRAL!

/post1

sigmau=606                                !model constants
tauu=350
c=31/3
e=10/9

allsel                                      !counting volume elements
vsel,s,,1,3,2
eslv,r
*get,elnum2,elem,,num,max
allsel
vsel,s,,2,4,2
eslv,r
*get,elnum1,elem,,num,max
elnum=elnum1-elnum2

!/out,asdf                                 !retrieving simulation results
etable,x,cent,x
etable,y,cent,y
etable,z,cent,z
etable,vol,volu
etable,sint,s,int
etable,seqv,s,eqv
etable,s1,s,1
etable,s2,s,2
etable,s3,s,3
etable,sxy,s,xy
!/out

!/out,asdf                                 !creating arrays
*dim,s,array,elnum,16,1,,,
*dim,depth,array,elnum,1,1
!/out

!/out,asdf                                 !moving simulation results in arrays
*vget,s(1,1),elem,elnum2+1,etab,x,,2
*vget,s(1,2),elem,elnum2+1,etab,y,,2
*vget,s(1,3),elem,elnum2+1,etab,z,,2
*vget,s(1,4),elem,elnum2+1,etab,vol,,2
*vget,s(1,8),elem,elnum2+1,etab,sxy,,2
*vget,s(1,11),elem,elnum2+1,etab,s1,,2
*vget,s(1,12),elem,elnum2+1,etab,s2,,2
*vget,s(1,13),elem,elnum2+1,etab,s3,,2
*vget,s(1,14),elem,elnum2+1,etab,sint,,2
*vget,s(1,15),elem,elnum2+1,etab,seqv,,2
!/out

!calculation of volume integrals
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Volume integral Max Shear stress Amplitude
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*dim,int2,array,elnum,1,,,
v=0
*do,i,1,elnum,1
intv=s(i,14)/2-tauu                        ! intv=sigma-sigmau
*if,intv,gt,0,then                          ! fatigue limit
v=v+1
int2(v,1)=(intv**c)*s(i,4)                 !s(i,4)=dv
*endif
*enddo

```

```

*vscfun,AV2MAXT,sum,int2(1,1)
AV2MAXT=AV2MAXT**(1/e)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Volume integral Von Mises
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*dim,int3,array,elnum,1,,,
v=0
*do,i,1,elnum,1
intv=s(i,15)-sigmau          ! intv=sigma-sigmau
*if,intv,gt,0,then          !fatigue limit
v=v+1
int3(v,1)=(intv**c)*s(i,4)   !s(i,4)=dv
*endif
*enddo
*vscfun,AV3VMIS,sum,int3(1,1)
AV3VMIS=AV3VMIS**(1/e)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Volume integral with Dang Van
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

*dim,int4,array,elnum,1,,,
v=0
*do,i,1,elnum,1
intv=s(i,14)/2-tauu-0.3*(s(i,11)+s(i,12)+s(i,13))/3   ! intv=sigma-sigmau
*if,intv,gt,0,then          !fatigue limit
v=v+1
int4(v,1)=(intv**c)*s(i,4)   !s(i,4)=dv
*endif
*enddo
*vscfun,AV4DV,sum,int4(1,1)
AV4DV=AV4DV**(1/e)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! retrieving Von Mises maximum value and location
allsel
vsel,s,,2,4,2
eslv,r
nsort,s,eqv,

*get,A_num_sqvmtx,sort,0,imax,
*get,A_val_sqvmtx,sort,0,max,

*get,A_seqvmx_x,node,A_num_seqvmx,loc,x
*get,A_seqvmx_y,node,A_num_seqvmx,loc,y
*get,A_seqvmx_z,node,A_num_seqvmx,loc,z
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Dang Van stresses                                     !Dang Van stresses implication / present element results
etable,svd,s,eqv
*do,i,1,elnum,1
s(i,16)=s(i,14)/2-0.3*(s(i,11)+s(i,12)+s(i,13))/3
*enddo
*vput,s(1,16),elem,1+elnum2,etab,svd,,
pletab,svd,avg

*vscfun,A_MAXDV,max,s(1,16)                             !max Dang Van value
*vscfun,A_MAXDVL,lmax,s(1,16)                          !max Dang Van location in array
A_MAXDVX=s(A_MAXDVL,1)                                 !x location of Dang Van value
A_MAXDXY=s(A_MAXDVL,2)                                 !y location of Dang Van value

```

3.2 Για 2D προσομοίωση

```

|*****
IPOSTPROCESSING
|*****

/post1

sigmau=606                                !model constants
tauu=350
c=31/3
e=10/9

asel,s,,1                                  !element selection
esla,r
*get,elnum1,elem,,num,max

!tables                                    !retrieving element results
etable,s1,s,1
etable,s2,s,2
etable,s3,s,3
etable,sxy,s,xy
etable,x1,cent,x
etable,y1,cent,y
etable,vol1,volu
etable,sint,s,int
etable,seqv,s,eqv

!arrays                                    !array creation
*dim,ssxy,array,elnum1,1,1,,
*dim,ss,array,elnum1,1,1,,
*dim,ss1,array,elnum1,1,1,,
*dim,ss2,array,elnum1,1,1,,
*dim,ss3,array,elnum1,1,1,,
*dim,ssint,array,elnum1,1,1,,
*dim,sseqv,array,elnum1,1,1,,
*dim,vvol1,array,elnum1,1,1,,
*dim,int1,array,elnum1,1,1,,
*dim,int2,array,elnum1,1,1,,
*dim,int3,array,elnum1,1,1,,
*dim,int4,array,elnum1,1,1,,
*dim,xx1,array,elnum1,1,1,,
*dim,yy1,array,elnum1,1,1,,

!Getting data                              !retrieving data to arrays
*vget,ss1,elem,1,etab,s1,,2
*vget,ss2,elem,1,etab,s2,,2
*vget,ss3,elem,1,etab,s3,,2
*vget,ssxy,elem,1,etab,sxy,,2
*vget,sseqv,elem,1,etab,seqv,,2
*vget,vvol1,elem,1,etab,vol1,,2
*vget,xx1,elem,1,etab,x1,,2
*vget,yy1,elem,1,etab,y1,,2
*vget,ssint,elem,1,etab,sint,,2

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!INTEGRAL WITH MAX SHEAR STRESS AMPLITUDE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

v=0
*do,i,1,elnum1,1
*if,ssint(i,1)/2,lt,1414,then
intv=ssint(i,1)/2-tauu                                !intv=sigma-sigmau
*elseif,ssint(i,1)/2,ge,1414,and,ssint(i,1)/2,lt,1824,then
intv=ssint(i,1)/2-(-(ssint(i,1)/2)*tauu/410+1824*tauu/410)
!linear reduce due to plasticity
!Elastic limit 1414 MPa, fract. limit :1824 MPa
*else
intv=0
*endif

*if,intv,gt,0,then

```

```

v=v+1
int1(v,1)=(intv**c)*vvol1(i,1)
*endif
*enddo
*vscfun,AS1MAXT,sum,int1(1,1)
AS1MAXT=AS1MAXT**(1/e)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!INTEGRAL WITH VON MISES
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

v=0
*do,i,1,elnum1,1
*if,sseqv(i,1),lt,2459,then
intv=sseqv(i,1)-sigmau
*elseif,sseqv(i,1),ge,2459,and,sseqv(i,1),lt,3128,then
intv=sseqv(i,1)-(-sseqv(i,1)*sigmau/669+3128*sigmau/669)
*else
intv=0
*endif

*if,intv,gt,0,then
v=v+1
int2(v,1)=(intv**c)*vvol1(i,1)
*endif
*enddo
*vscfun,AS2VMIS,sum,int2(1,1)
AS2VMIS=AS2VMIS**(1/e)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!INTEGRAL WITH DANG VAN
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

v=0
*do,i,1,elnum1,1
*if,ssint(i,1)/2,lt,1414,then
intv=ssint(i,1)/2-tauu-0.3*(ss1(i,1)+ss2(i,1)+ss3(i,1))/3
*elseif,ssint(i,1)/2,ge,1414,and,ssint(i,1)/2,lt,1824,then
intv=ssint(i,1)/2-(-(ssint(i,1)/2)*tauu/410+1824*tauu/410)-0.3*(ss1(i,1)+ss2(i,1)+ss3(i,1))/3
*else
intv=0
*endif

*if,intv,gt,0,then
v=v+1
int3(v,1)=(intv**c)*vvol1(i,1)
*endif
*enddo
*vscfun,AS3DV,sum,int3(1,1)
AS3DV=AS3DV**(1/e)

!dang van stresses
*do,i,1,elnum1,1
ss(i,1)=ssint(i,1)/2-0.3*(ss1(i,1)+ss2(i,1)+ss3(i,1))/3
*enddo
etable,sdv,s,eqv
*vput,ss(1,1),elem,1,etab,sdv,,
pletab,sdv,avg
*vscfun,A_MAXDV,max,ss(1,1)
*vscfun,A_MAXDVL,lmax,ss(1,1)
A_MAXDVX=xx1(A_MAXDVL,1)
A_MAXDYY=yy1(A_MAXDVL,1)

```

!vvol=dv

!integral

! intv=sigma-sigmau
!linear reduce due to plasticity,
!elastic limit:2459 MPa, fract. limit :3128

!vvol=dv

!integral

! intv=sigma-sigmau
!linear reduce due to plasticity
!elastic,plastic limit same as Max Sh. Stress

!vvol=dv

!Dang Van stresses calculation

4 Κώδικας ανάγνωσης επιφανειακής πίεσης

!Reads pressure distribution from the model and exports the data (pressure, x, z) to a text file

```

!contact width and length
allsel
esel,s,type,,3
etable,nstat,cont,stat
esel,r,etab,nstat,2,3
nsle,r
nsort,loc,x,1
*get,l,sort,,max           !contact length
nsort,loc,z,1
*get,b,sort,,max          !contact width

!pressure distribution (width)
allsel
esel,s,type,,3
etable,nstat,cont,stat
nsle,r,
nsel,r,loc,x,0
esln,r
etable,press,cont,press
etable,centx,cent,x
etable,centz,cent,z
*get,number,elem,,count
*get,minel,elem,,num,min
*get,maxel,elem,,num,max
*dim,conprb,array,number,3,1,,,
o=minel
*do,i,1,number
*get,conprb(i,1),elem,o,etab,press   !contact element pressure
*get,conprb(i,2),elem,o,etab,centx   !x coordinate
*get,conprb(i,3),elem,o,etab,centz   !z coordinate
o=elnext(o)
*enddo
*create,ansuitmp
*cfopen,pressb.txt
*vwrite,conprb(1,1),conprb(1,2),conprb(1,3) !write results to file pressb.txt
(ES17.8,' ',ES17.8,' ',ES17.8)
*cfclose
*end
/input,ansuitmp

!pressure distribution (length)
allsel
esel,s,type,,3
etable,nstat,cont,stat
nsle,r,
nsel,r,loc,z,0
esln,r
etable,press,cont,press
etable,centx,cent,x
etable,centz,cent,z
*get,number,elem,,count
*get,minel,elem,,num,min
*get,maxel,elem,,num,max
*dim,conprl,array,number,3,1,,,
o=minel
*do,i,1,number
*get,conprl(i,1),elem,o,etab,press   !contact element pressure
*get,conprl(i,2),elem,o,etab,centx   !x dimension
*get,conprl(i,3),elem,o,etab,centz   !z dimension
o=elnext(o)
*enddo
*create,ansuitmp
*cfopen,pressl.txt
*vwrite,conprl(1,1),conprl(1,2),conprl(1,3) !write results to file pressl.txt
(ES17.8,' ',ES17.8,' ',ES17.8)

```

```
*fclose  
*end  
/input,ansuitmp
```

Βιβλιογραφία

- [1]. Ioannides E, Rolling Bearings: Achievements & Future Challenges, VDI-Berichte Nr. 1942 p.3-28,2006
- [2]. Ioannides E, Jacobson B, Dirty lubricants - Reduced bearing life, Ball Bearing J., 1989, p. 22-27
- [3]. Epstein D, Keer L M, Wang Jane Q, Cheng S H, Effect of Surface Topography on Contact Fatigue in Mixed Lubrication, Tribology Transactions V 43, 2003, p.506-513
- [4]. Harris T A, Lubricant Films in Rolling Elements - Raceway Contacts, Rolling Bearing Analysis, 2001, p.446-451
- [5]. Ioannides E, Kuijpers J. C., Elastic Stresses below asperities in lubricated contacts, Journal of Tribology, Trans ASME, 1986
- [6]. Harris T A, Fatigue Life - Lundberg Palmgren Fatigue Standards, Rolling Bearing Analysis p. 686, 2001
- [7]. Haenel B, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, FKM-Richtlinie, 2003
- [8]. Ioannides E; Bergling G; Gabelli A, An analytical formulation for the life of rolling bearings, Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Serie No. 137, 1999
- [9]. Zhou R S, Cheng H S, Mura T, Micropitting in Rolling and Sliding Contact under mixed Lubrication, ASME J. Trib., 111, p.605-613, 1989
- [10]. Weibull W, A Statistical Theory of the Strength of Materials, Proceedings of the Royal Swedish Institute for Engineering Research, No. 151, Stockholm, 1939
- [11]. Lundberg G, Palmgren A, Dynamic Capacity of Roller Bearing, Acta Polytech., Mechanical Engineering Series 2, No. 3, 1947
- [12]. Lundberg G, Palmgren A, Dynamic Capacity of Roller Bearing, Acta Polytech., Mechanical Engineering Series 2, No. 4, 1952
- [13]. Tallian T E, A Unified Model for Rolling Contact Life Prediction, Journal of Lubrication Technology, 1982
- [14]. Ioannides E, Harris T A, A new Fatigue Life Model for Rolling Bearings, Trans. of ASME, Journal of Tribology, 107, 1985, p.367-378

- [15]. Ioannides E, Kuijpers J C, Elastic Stresses below asperities in lubricated contacts, Journal of Tribology, Trans ASME,1986
- [16]. Ioannides E, Bergling G , Gabelli A, An analytical formulation for the life of rolling bearings, Acta PolytechnicaMechanical Engineering Serie No. 137,1999
- [17]. DIN ISO 281,Wälzlager –Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer,2007,
- [18]. Zaretsky E V, Poplawski J V, Miller C R, Rolling Bearing Life prediction - Past present and Future, NASA TM 210529,2000
- [19]. Dang Van K, Macro–micro approach in high cycle multi-axial fatigue, A.S.T.M. S.T.P. 1191,1993,p.120–130
- [20]. Cantley E R, Predicting the effects of Lubricant Chemistry on Bearing Fatigue Life,ASLE Transactions Volume 21,I,1981,p.80-86,
- [21]. Tasan Y C, de Roij M B, Schipper D J, Changes in the micro geometry of a rolling contact, Tribology Int, 40,2007
- [22]. Melander A, A finite element study of short cracks with different inclusion types under rolling contact fatigue load, International Journal of Fatigue V 19,I,1997,p.13-24
- [23]. Kasarekar A T, Sadeghi F, Tseregounis S ,Fretting Fatigue of rough surfaces, Wear 264,2008,p.719-730
- [24]. Lehtovaara H, Rabb R, A numerical model for the evaluation of fretting fatigue crack initiation in rough point contact,Wear 264, 2008,p.750-756,
- [25]. Μάμαλης Α Γ, Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών, Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Αθήνα 1996
- [26]. Χρυσουλάκης Γ Δ, Παντελής Ι Δ, Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Εκδ Παπασωτηρίου,ISBN 960-7510-39-9
- [27]. Harris T A, Ragen M A, Spitzer F R, The effect of hoop and material residual stresses on the fatigue life of High speed rolling bearings, Tribology Transactions V 35, I,1992, p.194-198
- [28]. Williams J A, The influence of repeated loading, residual stresses and shakedown on the behaviour of tribological contacts, tribology International V 38,2005,p786-797
- [29]. Broszeit E, Zwirlein O, Adelman J, Werkstoffanstrengung im Hertschen Kontakt - Einfluss von Reibung und Eigenspannungen,Z.werkstofftech.13,1982,p.423-429

- [30]. Scholtes B, Zum Einfluss von Last und Eigenspannungen auf die Ergebnisse instrumentierten Eindringhaerteproofungen, Forschungsberichte aus dem Insitut fuer Metallische Werkstoffe der Universitaet Kassel, Band 6,2003
- [31]. Cadario A, Alfredsson B, Influence of residual stresses from shot peening on fretting fatigue crack growth, Fatigue fract Engng Mater Struct 30,2007,p.947-963
- [32]. Lillamand I, Barrallier L, Lalanne B, Castex L, Cyclic modelling of the mechanical state produced by shot-peening, Fatigue Fract Engng Mater Struct 24,2001,p.93-104
- [33]. Bunk W, Hansen J, Geyer M, Tribologie: Reibung - Verschleiß - Schmierung, Springer Verlag Berlin,1981
- [34]. Hertz H,Über die Berührung fester elastischer Körper, Journal für die reine und angewandte Mathematik 92,1881,p156-171
- [35]. Johnson K L, Contact Mechanics, Cambridge University Press,1987
- [36]. Harris T A, Yu K W, Lundberg - Palmgren Fatigue Theory: Considerations of Failure Stress and Stressed Volume, Trans ASME, J. Tribology V121,p.85-89,1999
- [37]. Hamilton G M, Goodman L E, The stress field created by a sliding circular contact,J. Appl. Mech, 16,1966,p.371-376
- [38]. Hamilton M G, Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact, IMechE, V197C,1983,p.55-60
- [39]. Santos F de C, Bruni F, Santos L T, Evaluation of Subsurface Contact Stresses in Railroad Wheels Using an Elastic Half-Space Model, J. Braz. Soc. of Mech. Sci. Eng. V 115,2004,p 420-429
- [40]. Harris T A, Contact Stress and Deformation, Rolling Bearing Analysis,2001,p.204-219
- [41]. Hamrock B J , Dowson D, Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts, part III fully flooded results, Trans. ASME J. Lubr. Eng 99 serF,1977
- [42]. Petersen H, Waelyfestigkeitsuntersuchungen von Sintenstraehlen und neuentwicklung eines waelyfestigkeitspruefstandes, Diss RWTH Aachen,2004
- [43]. Castro J, Seabra J, Global and Local analysis of gear scuffing tests using a mixed film lubrication model, Tribology International 41,2008,p.244-255

-
- [44]. Paulin C, Ville F, Sainsot P, Coulon S, Lubrecht A A, Effect of rough surfaces on rolling contact fatigue. Theoretical and experimental analysis, Proceedings of the 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology,2004
- [45]. Deters L, Fleischer G, Fritsch B, Bartel D, Meyer K, Beschreibung von Mischreibung zustaenden in Waelykontakten,1997
- [46]. Scholz U, Bartel B, Deters L, Berechnung elastischer Spannungen unterhalb der Oberfläche kontraformer Reibkontakte,GfT, Tribologische Fachtagung,2006
- [47]. Voskamp A P, Chapter 6; Introduction, the three stages in material responce, Microstructural changes during rolling contact fatigue, Diss, TU Delft,1997
- [48]. Johnson K L, The application of shakedown principles in rolling and sliding contact,Eur. J. Mech, A/Solids, 11, Special Issue,1992,p 155-172
- [49]. Harris T A, Investigtion and Analysis of Bearing Failures, Rolling Bearing Analysis,2001,p. 1043-1069
- [50]. Ville F, Coulon S, Lubrecht A A, Influence of solid contaminants on the fatigue life of lubricated machine elements, Special Issue paper, J. Mech. E.V 220, Engineering Tribology,2005,p. 441-445
- [51]. Nelias B D V, Rolling Bearing Modelling/Surface damage in EHL contacts for real or dented surfaces, Diss, INSA France,1999
- [52]. Lamagnere P, Fougères R, Lormand G, Girodin D, Dudragne G, Vergne F, Vincent A, A physically based model for endurance limit of bearing steels,Trans. of ASME Journal of Tribology, Vol. 120,1998
- [53]. Walther F, Eifler D, Lebensdauerberechnung metallischer Werkstoffe auf der Basis physikalischer Messgroessen, Tagung Gefüge und Bruch, Bochum,2007
- [54]. Bader M, Beitrag zur Charakterisierung der Wälzbeanspruchung von Gradientenschichten -Am Beispiel von Nitrierschichten, Dissertation TU Freiberg,2002
- [55]. Ren Z, Fajdiga G, Glodež S, Application of the short crack growth model to surface pitting simulations, Proceedings of the sixth conference on Computational structures technology,2002
- [56]. Ringsberg J W, Shear mode growth of short surface-breaking RCF cracks,Wear,2005

-
- [57]. Kabo E, Ekberg A, Material defects in rolling contact fatigue of railway wheels—the influence of defect size, *Wear* 258,2005
- [58]. Dang Van K, Maitournam M H, Rolling contact in railways: modelling, simulation and damage prediction, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* Vol. 26, Nr. 10,2003
- [59]. Bomas H, Linkewitz T, Mayr P, Application of a weakest-link concept to the fatigue limit of the bearing steel SAE 52100 in a bainitic condition, *Blackwell Science Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct* 22,1999,p.733–741
- [60]. Boehm J, Heckel K, Die Vorhersage der Dauerschwingfestigkeit unter Berücksichtigung des statistischen Größeneinflusses, *Zeitschrift für Werkstofftechnik* 13,1982
- [61]. Brecher C, Zuber D, Optimierung der Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder unter Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen, *RWTH Aachen*,2006
- [62]. Dang Van K, Griveau B, Message O, Biaxial and Multiaxial Fatigue, *Proc. 2nd Int. Conf.on Multiaxial Fatigue*, Dec 1985,Sheffield, Mech. Eng. Publ.,1988
- [63]. Harris T A, McCool J I, On the Accuracy of Rolling Bearing Fatigue Prediction,*Trans. ASME, J. of Tribology*, V 118,1996,p.297-310
- [64]. Tripp J H, Ioannides E, Effects of Surface Roughness on Bearing Life,*Proc. Japan Int. Tribology Conf.,Nagoya*,1990,p. 797-802
- [65]. Yu W K, Harris T A New Stress-Based Fatigue Life Model for Ball Bearings, *ASME Tribology Transactions*, Vol. 44,2001,pp. 11-18
- [66]. Greenwood J, Williamson J, Contact of Nominally Flat Surfaces, *Proc. Royal Soc. London A295*,1966,p.300-319