

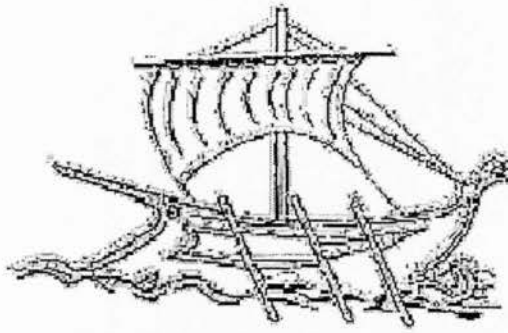
# ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧ  
695

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ



## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΖΩΡΤΖΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

Αρ. Μητρ. : 32070

Τμήμα Μηχανολογίας

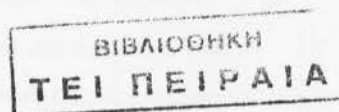
ΣΤΕΦ / ΤΕΙ Πειραιά

**Τριβολογική συμπεριφορά κεραμομεταλλικών επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού σε όλκιμα μεταλλικά υποστρώματα**

Πτυχιακή Εργασία

Χαράλαμπος Στεργ. Τζώρτζης Α. Μ. : 32070

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Πανδώρα Ψυλλάκη



Αιγάλεω , Νοέμβριος 2012

---

## Πίνακας Περιεχομένων

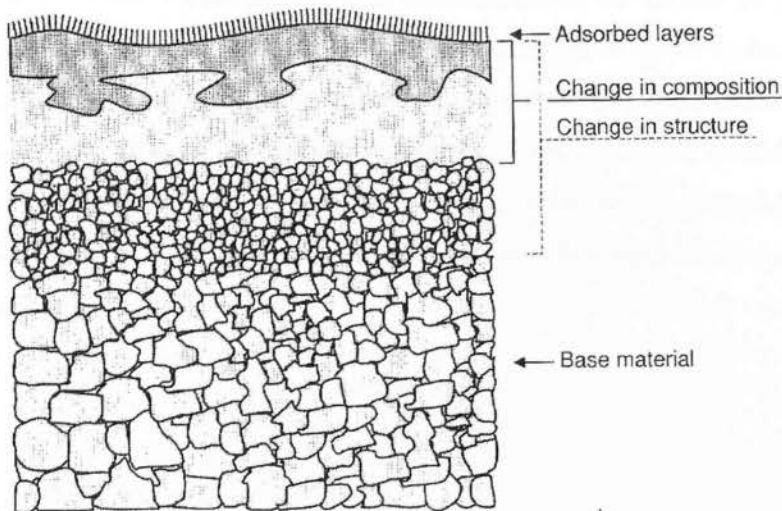
---

<i>Κεφ.</i>	<i>Τίτλος</i>	<i>Αρ. Σελίδας</i>
	Πίνακας Περιεχομένων	2
	Περίληψη	4
	Abstract	5
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b>	
1.	Εισαγωγή	7
1.1	Επιφανειακές κατεργασίες και επικαλύψεις, πρόοδος και καινοτομίες	7
1.2	Τεχνικά και οικονομικά θέματα που αφορούν την τριβή και φθορά στην χρήση αντιτριβικών επικαλύψεων	8
1.3	Εφαρμογές επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού	9
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο</b>	
2.1	Κεραμομεταλλικά Υλικά (Cermets) και «Σκληρομέταλλα» (Hard-Metals)	12
2.1.1	Σκληρομέταλλα	12
2.1.2	Κεραμομεταλλικά	16
2.2	Κεραμικές Επικαλύψεις	18
2.3	Επικαλύψεις Κεραμικών Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	18
2.4	Επιστρώσεις Θερμικού Ψεκασμού	19
2.5	Τεχνικές Θερμικού Ψεκασμού	19
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο</b>	
3.1	Αντιτριβικές Εφαρμογές	21
3.2	Υπόστρωμα μικρό-δομής	21
3.3	Τραχύτητα Σύνθετων Αποθεμάτων	22
3.4	Σκληρότητα Σύνθετων Αποθεμάτων Ni/SiC	25
3.5	Μορφολογία Επιφάνειας Σύνθετων Αποθεμάτων Ni/SiC	27
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο</b>	
4.1	Θερμική Επίστρωση (Thermal Barriers)	36

4.2	Θερμικό Φράγμα Επιχρίσματος (TBC)	38
4.3	Φθορά από Επιφανειακή κόπωση (αποκόλληση υποστρώματος, διάβρωση, κλπ.)	41
4.4	Φθορά λόγω Λείανσης ή Διάβρωσης (Στιλβωτικά ή Διάβρωση Φθοράς)	42
4.5	Σπηλαιώση Θερμικού κρούση και Θερμικής Κόπωσης	44
4.6	Φθορά από Διάβρωση λόγω Τριβής (Επαφή με οξείδωση, φθορά που προκαλείται από μικρά διάκενα, κ.λπ.)	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο</b>		
5.1	Αξιολόγηση των Χαρακτηριστικών Θραύσης των Κεραμικών Επιστρωμάτων σε Υπόστρωμα Ανοξειδωτου Χάλυβα	48
5.2	Αποτελέσματα Αξιολόγησης των Χαρακτηριστικών Θραύσης των Κεραμικών Επιστρωμάτων	55
5.3	Μηχανικές Ιδιότητες (Σκληρότητα $\approx$ Κάμψη/Εφελκυσμός)	59
<b>Τριβολογική Συμπεριφορά, Μαθηματική Ανάλυση</b>		
5.4	Συμπεριφορά σε Τριβή, Επίδραση Διαβρωτικού	64
5.5	Πρότυπο Λειτουργίας, Μαθηματική Ανάλυση	86
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο</b>		
	<b>Συμπεράσματα</b>	106
	<b>Βιβλιογραφία</b>	107

## Περίληψη

Στην τριβή, η επιφάνεια δεν είναι μόνο η ζώνη του διαχωρισμού των δύο σωμάτων αλλά περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά της επαφής που παίζουν ρόλο στη τριβή, π.χ. οι μηχανικές καταπονήσεις, οι θερμοκρασίες, και η συμπεριφορά του τρίτου σώματος (λιπαντικό, φθορά, υπολείμματα) σύμφωνα με τον Michel Cartier [1]. Θα υποθέσουμε, ως εκ τούτου, ότι οι μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών που έρχονται σε επαφή, καθώς επίσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επαφής, συμπεριλαμβανομένων, κατ' επέκταση, το σχήμα των εξαρτημάτων, είναι όλες οι παράμετροι που καθορίζουν την επιφάνεια (Σχήμα Ι). Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της τριβολογικής συμπεριφοράς κεραμομεταλλικών επικαλύψεων σε όλκωμα μεταλλικά υποστρώματα. Οι κύριες εφαρμογές των κεραμικών επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού μπορούν να βρεθούν σε συστήματα  $Al_2O_3$  / χάλυβα, σε προστασία από διάβρωση και από οξείδωση υψηλής θερμοκρασίας, σε κοπτικά εργαλεία νιτρίδιο του τιτανίου  $TiN$ / νιτρίδιο αλουμινίου τιτανίου  $TiAlN$ , σε προστασία από τριβή και φθορά, σε τεχνολογίες θερμικού ψεκασμού για επιδιόρθωση ανταλλακτικών, σε θερμική μόνωση και τέλος σε πολλές άλλες εφαρμογές. Γενικώς τα επιστρώματα χρησιμοποιούνται εκτενώς ως αναπόσπαστα τμήματα σαν υλικά εφαρμοσμένης μηχανικής για να καταπολεμήσουν τις θερμικές λειαντικές και περιβαλλοντικές επιθέσεις όπως η φθορά, η διάβρωση  $\approx$  (απομάκρυνση μετάλλου από συστατικά που υπόκεινται σε ροή υγρού, ειδικά όταν το νερό περιέχει στερεά σωματίδια) και η αλλοίωση  $\approx$  (καλείται κάθε αυθόρμητη, ηλεκτροχημικής κατ' επέκταση μηχανικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και κραμάτων που οδηγεί σε απώλεια υλικού). Τέτοια συστήματα μας ενδιαφέρουν διότι υπάρχει υψηλή αντίσταση των κεραμικών σε φθορά λόγω τριβής. Η κατανομή σκληρότητας σε κεραμικές επικαλύψεις που εναποτίθενται με θερμικό ψεκασμό είναι συνήθως οξειδία, καρβίδια και νιτρίδια. Η συγκεκριμένη πτυχιακή αποτελεί βιβλιογραφική έρευνα στο θέμα κεραμομεταλλικών επικαλύψεων με θερμικό ψεκασμό σε όλκωμα μεταλλικά υποστρώματα και κυρίως δίνεται έμφαση στις μηχανικές ιδιότητες.



Σχήμα Ι. Σχηματισμός επιφάνειας κεραμικής επικάλυψης.

## Abstract

In tribology, the surface is not just the zone of the separation of the bodies but includes all the characteristics of the contact that play a part in friction, i.e. the mechanical stresses, the temperature, and the behavior of the third body (lubricant, wear, debris, etc.). We will assume, therefore that the mechanical, physical, and chemical properties of the materials in contact, and also the geometric characteristics of the contact, including, by extension, the shape of the components, are all parameters that define the surface (Fig I). The purpose of this paper is to investigate the tribologic behavior ceramic coating on ductile metallic substrate. The main applications of ceramic thermal spray coatings can be found in systems  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / steel, under protection against corrosion and high temperature oxidation, in cutting tools  $\text{TiN}$  /  $\text{TiAlN}$ , for protection from abrasion and wear, in thermal spray technologies for reconditioning department, in thermal insulation and finally in many other applications. In general the coatings

are used extensively as an integral part as a materials engineering research to combat the heat abrasive and environmental attacks such as the wear, erosion (removing metal from ingredients that are subject to water flow, especially when the water contains solid particles) and the alteration (hereinafter referred to as any spontaneous electrochemical hence engineering nature, deformation of the surface of metals and alloys which leads to loss of material). Such systems are important to us because there is high resistance of the ceramics to wear due to friction. The allocation hardness in ceramic coatings deposited by thermal spraying is usually oxides, carbides and nitrides. This paper constitute bibliographical research at the theme of ceramic coatings with thermal spray in ductile metallic substrate and mainly emphasis is being given to the mechanical properties.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Επιφανειακές κατεργασίες και επικαλύψεις, πρόοδος και καινοτομία

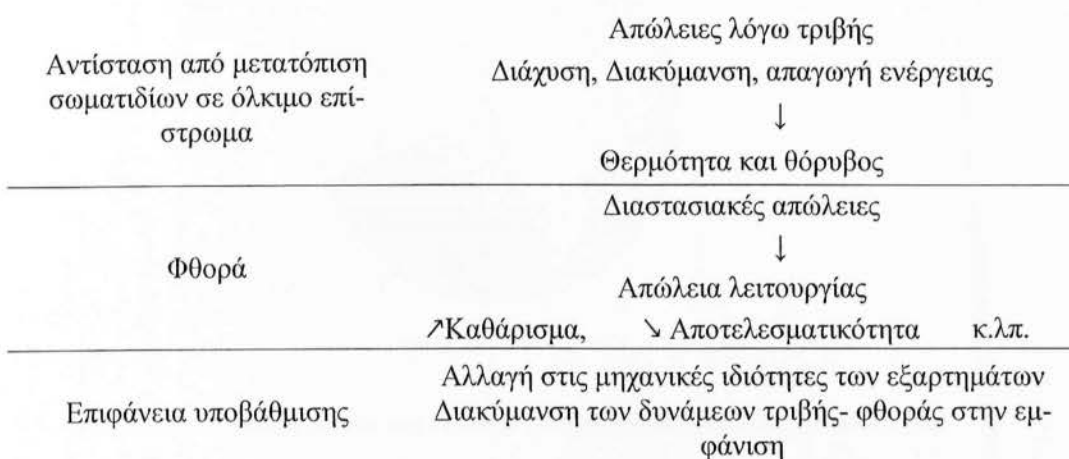
Η αναγκαιότητα χρήσης επικαλύψεων έγινε προκειμένου να παραχθούν βελτιωμένα προϊόντα και να είναι ανταγωνιστικά στην αγορά των εξαγωγών, είναι σημαντικό να είναι σε θέση να παράγουν επιφάνειες που δεν φθείρονται, είναι πιο ανθεκτικές στην αμαύρωση και διάβρωση, και διατηρούν τις ηλεκτρικές οπτικές ή θερμικές ιδιότητες τους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης, είναι πολύ μεγάλου ενδιαφέροντος, χρήσιμο να έχουμε την τεχνογνωσία και τεχνολογία να απλοποιούμε σειρές προϊόντων ή απαιτήσεις συντήρησης, ή να δημιουργούμε μηχανισμούς ελαφρύτερους, μείωση θορύβου, βελτίωση της αξίας στρατηγικά ή οικονομικά συμφέρουσα προσφορά υλικών κ.τ.λ. .

Είναι τώρα ευρέως γνωστό ότι η STAC έχει ένα προεξέχον, επιφανή ρόλο να παίζει σε αυτό το σημείο. STAC εδώ και καιρό έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις απλώς να αποζημιώσει για τυχόν λάθη στο σχεδιασμό (στην επιλογή υλικών, διαστάσεις, κ.λπ.); ωστόσο, αποκτούν πλέον μεγαλύτερη αναγνώριση, και σταδιακά θεωρούνται στο σχεδιασμό ή στα ερευνητικά στάδια του έργου, ανεξάρτητα από το αν πρόκειται για την σχεδίαση νέων προϊόντων ή για την βελτίωση τα ήδη υπάρχοντα (για παράδειγμα, στον τομέα της ανάλυσης της αξίας μιας κεραμομεταλλικής επικάλυψης σε όλκιμο υπόστρωμα). Ως αποτέλεσμα της ολοένα και πιο συγκεκριμένης λύσης που προσφέρουν για όλο και πιο ποικίλη και απαιτητικές βιομηχανικές καταστάσεις, η STAC έχει γίνει η αληθινή πηγή της προόδου, ακόμα επιτρέπει την κατανόηση του σχεδιασμού των νέων προϊόντων που παλαιότερα δεν υπήρχαν καθόλου χωρίς αυτό.



## 1.2 Τεχνικά και οικονομικά θέματα που αφορούν την τριβή και φθορά στην χρήση αντιτριβικών επικαλύψεων

Η τριβή και η φθορά οδηγούν σε μια σειρά από διακηρύξεις που μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς τη λειτουργία των μηχανικών υποσυστημάτων και γενικά τις μηχανές, ή το περιβάλλον τους, με πολλούς τρόπους. Παραδείγματα της επίδρασης, επιρροής τους που έχουν εύρος στα πλέον αναπόφευκτα, όπως απώλειες μέσω τριβής, στην πιο καταστροφική, όπως κατάσχεση, εμπλοκή απεικονίζονται στο Διάγραμμα 1.

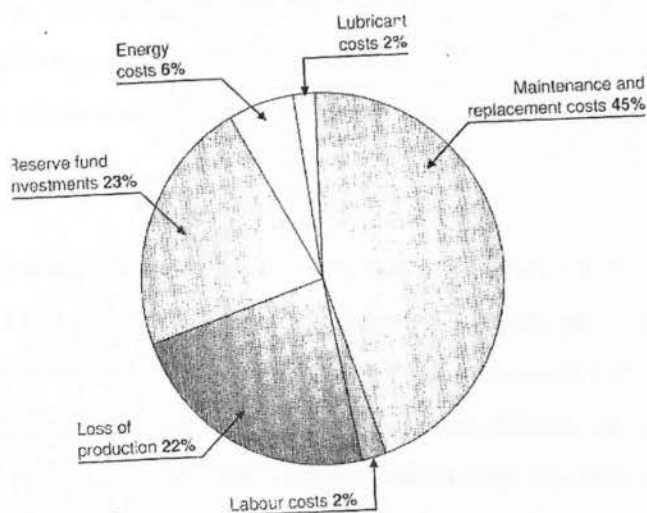


Διάγραμμα 1. Τριβή και Φθορά στην χρήση επικαλύψεων

Αφού η τριβή και η φθορά είναι δαπανηρή από την άποψη της ενέργειας, των πρώτων υλών (εξαρτήματα υλικών και λιπαντικών), και το εργατικό δυναμικό (συντήρηση, κ.λπ. ), η εξοικονόμηση πόρων μέσω καλύτερου ελέγχου των τριβολογικών προβλημάτων είναι σημαντική, για παράδειγμα :

- Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε πρόσφατα από την CETIM, [Centre Techniques des Industries Mécaniques (Engineering Industries Technical Research Centre)] η φθορά κόστισε στη Γαλλία περίπου 164 δισεκατομμύρια φράγκα ετησίως, δηλαδή σχεδόν 3 τοις εκατό του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος (ΑΕΠ), όπως το διάγραμμα κατανομής στο Διάγραμμα 2 δείχνει, αυτά τα έξοδα από μέρους των δαπανών σε πολλούς τομείς, όπως οι πρώτες ύλες, συντήρηση, απώλεια της παραγωγής, κλπ.

- Μια αμερικανική μελέτη υπολόγισε ότι οι απώλειες λόγω τριβής στο έμβολο-δαχτυλίδι-επένδυση του συστήματος των κινητήρων εσωτερικής καύσης ανέρχονται σε 0,7 τοις εκατό των Ηνωμένων Πολιτειών και η συνολική κατανάλωση ενέργειας (υπολογίζεται ότι 3 τοις εκατό της ενέργειας από το καύσιμο απάγεται από τριβή).



Διάγραμμα 2. Κατανομή του κόστους της φθοράς των ενδεικτικών στοιχείων (μετά CETIM).

### 1.3 Εφαρμογές επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού

Η υψηλή αντίσταση των κεραμικών στη φθορά και στη διάβρωση και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητά τους, συντελούν ώστε οι εφαρμογές των κεραμικών επικαλύψεων με θερμικό ψεκασμό να συγκεντρώνονται γύρω από τρεις (3) βασικούς άξονες: Προστασία από φθορά, Προστασία από διάβρωση και από οξείδωση υψηλής θερμοκρασίας.

Και οι τρεις αυτοί άξονες οδηγούν προς την κατεύθυνση εξοικονόμησης ενέργειας και υλικών, συχνά σπάνιων και ακριβών, με αποτέλεσμα να καθιστούν τις κεραμικές επικαλύψεις ικανές να παίξουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε κάθε βιομηχανικό-βιοτεχνικό τομέα που έχει σχέση με παραγωγή, συντήρηση και επισκευή. Πέρα από τους τρεις κύριους άξονες εφαρμογών των κεραμικών επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού, υπάρχουν και εφαρμογές με ειδικό χαρακτήρα που σχετίζονται με :

Βιοσυμβατότητα, Ηλεκτρική μόνωση, Διαχυσιακή μόνωση, Υπεραγωγιμότητα

Η τεχνολογία θερμικών κεραμικών επικαλύψεων, αρχικά χρησιμοποιήθηκε στην αεροναυπηγική βιομηχανία σε εφαρμογές κατά της φθοράς και σε εφαρμογές θερμικών φραγμάτων. Στη συνέχεια η χρήση της επεκτάθηκε ταχύτατα στους περισσότερους τομείς της βιομηχανίας. Τα τμήματα συντήρησης των βιομηχανιών σε όλο το κόσμο εξοικονομούν ετησίως εκατομμύρια δολάρια εφαρμόζοντας επικαλύψεις κατά της φθοράς και της διάβρωσης και επιτυγχάνοντας ανάλογα με την περίπτωση χαμηλούς ή υψηλούς συντελεστές τριβής. Επίσης κάνουν εκτεταμένη χρήση τεχνολογιών θερμικού ψεκασμού για την επιδιόρθωση και την αναγόμωση φθαρμένων ανταλλακτικών.

Εκτός από τις εφαρμογές αυτές, μείζονος μηχανολογικού ενδιαφέροντος, ειδικές ποιότητες κεραμικών επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται Βιοσυμβατότητα, ηλεκτρική μόνωση κλπ. .

Οι συνήθεις κεραμικές επικαλύψεις που εναποτίθενται με θερμικό ψεκασμό είναι συνήθως οξειδία, καρβίδια και νιτρίδια. Ειδικά στην περίπτωση των καρβιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της υψηλής τους σκληρότητας και της εξαιρετικής αντιτριβικής προστασίας που προσφέρουν, προκειμένου να εξασφαλισθεί η συνεκτικότητα της επικάλυψης, τα καρβίδια συν-ψεκάζονται με μεταλλικές κόνεις που έχουν το ρόλο της συνδετικού υλικού και οι υλοποιούμενες επικαλύψεις καλούνται κεραμομεταλλικές .

Οι βιομηχανικοί τομείς στους οποίους βρίσκουν και μπορούν να βρουν ακόμη περισσότερες εφαρμογές οι θερμικές επικαλύψεις είναι :

Αεροναυπηγική, Αυτοκινητοβιομηχανία, Στροβιλομηχανές , Ντηζελομηχανές, Ναυπηγεία, Χημική , πετροχημική βιομηχανία, Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, Αντλίες-υδραυλικά συστήματα, Γεωργικά μηχανήματα-εργαλεία, Εργαλεία μεταλλείων, ορυχείων, Μεταφορά και επεξεργασία βιομηχανικών ορυκτών και μεταλλευμάτων (σωλήνες, χοάνες, μύλοι λειοτριβήσης, κυκλώνες, μεταφορικές ταινίες), Εξοπλισμός αμμοβολής, Κλωστοϋφαντουργία (οδηγοί νημάτων, καρούλια, βελόνες), Χαρτοβιομηχανία (φερωτές, χιτώνια αναλυτή), Μηχανές τυπογραφείων, Τσιμεντοβιομηχανία (αλεστικά συστήματα, φερωτές αερισμού, συστήματα μεταφοράς υλικού), Πλακίδια,

είδη υγιεινής, είδη εστίασεως, Τούβλα, κεραμίδια (ανάμιξη, εξώθηση, κοπή πηλού),  
Ιατρικά εμφυτεύματα, Ηλεκτρονική

Τα σημαντικότερα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή κεραμικών επικαλύψεων είναι:

Αύξηση χρόνου ζωής των μηχανικών εξαρτημάτων, Μείωση εξόδων για ανταλλακτικά, Μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών συντηρήσεων, Καλύτερη χρήση των μηχανών και υψηλότερη παραγωγικότητα, Υψηλότερη ποιότητα των παραγομένων προϊόντων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Κεραμομεταλλικά Υλικά (Cermets) και «Σκληρομέταλλα» (Hard-Metals)

Η επιλογή και χρήση κοπτικών εργαλείων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ερωτήματα, τα οποία καλείται να απαντήσει ένας μηχανολόγος μηχανικός στην καθημερινή του πρακτική.

Την τελευταία εικοσαετία, οι αυξημένες απαιτήσεις για κοπτικά υψηλών μηχανικών αντοχών και χαμηλής φθοράς οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων και τη βελτίωση γνωστών από παλαιότερα οικογενειών υλικών. Σήμερα, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι οι ταχυχάλυβες (high-speedtoolsteels), τα καρβίδια, τα κεραμομεταλλικά, το κυβικό νιτρίδιο του βορίου (c-BN) και τεχνητά πολυκρυσταλλικά διαμάντια (PCD) ή άνθρακας με ιδιότητες διαμαντιού (diamond-likecarbon, DLC).

Καθεμία από τις κατηγορίες αυτές παρουσιάζει χαρακτηριστικά που την καθιστούν κατάλληλη για συγκεκριμένα πεδία εφαρμογών, με κύρια κριτήρια την ταχύτητα πρόωσης του κοπτικού εργαλείου και την ταχύτητα κοπής (Σχήμα 2.8). Υψηλότερες ταχύτητες κοπής απαιτούν υλικά εργαλείων με μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, ενώ μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης κατά την κοπή επιβάλλει κοπτικό υψηλότερης δυσκαμψίας. Για παράδειγμα, οι ταχυχάλυβες εμφανίζουν υψηλή δυσκαμψία, η χαμηλή τους όμως μηχανική αντοχή περιορίζει τη χρήση τους μόνο για χαμηλό-στροφική κοπή. Αντίθετα, υπέρ-σκληρά υλικά, όπως το c-BN και το PCD, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε φθορά και γι' αυτό χρησιμοποιούνται για κοπές υψηλών ταχυτήτων. Για ενδιάμεσες συνθήκες κατεργασίας, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα κεραμικά και τα κεραμομεταλλικά. [www.Google.com](http://www.Google.com) [2].

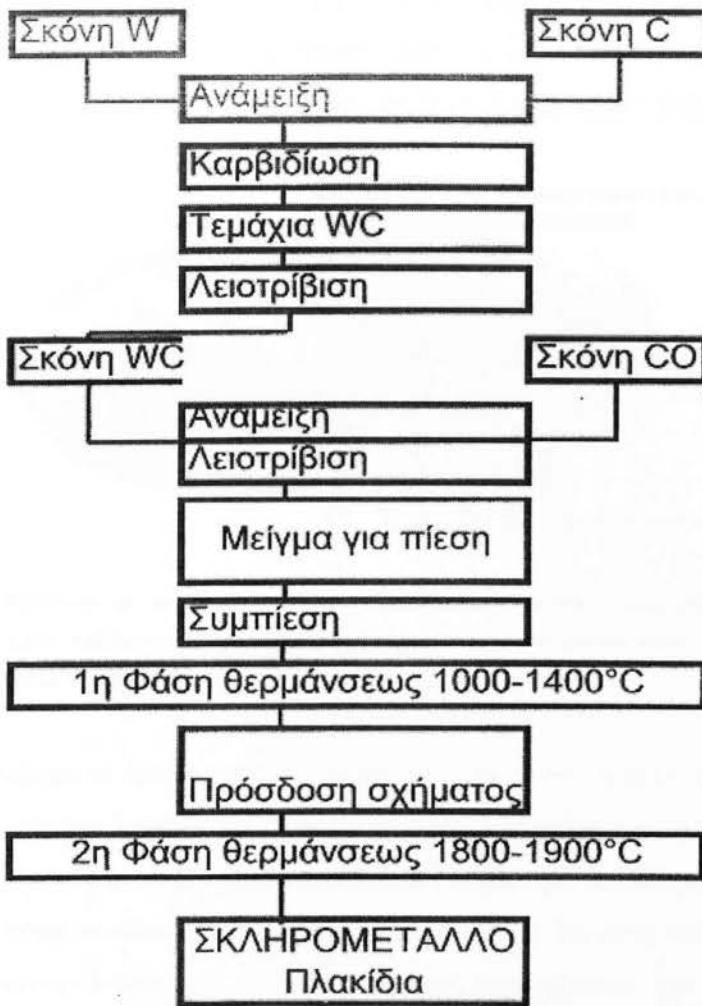
#### 2.1.1 Σκληρομέταλλα

Τα σκληρομέταλλα είναι τα ευρύτερα διαδεδομένα κοπτικά εργαλεία σήμερα. Το κύριο πλεονέκτημά τους έναντι των ταχυχάλυβων είναι η ικανότητά τους να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής, περίπου 3-5 φορές ταχύτερα. Τα σκληρομέταλλα έχουν αντικαταστήσει τους ταχυχάλυβες σε μεγάλο βαθμό σε πολλές κατεργασίες

και κατέχουν ποσοστό πάνω από το 50% της παγκόσμιας παρασκευής κοπτικών εργαλείων. Το ποσοστό των ταχυγάλυβων ανέρχεται στο 40%, ενώ το υπόλοιπο 10% μοιράζονται όλα τα υπόλοιπα υλικά. Κατασκευάζονται με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και αποτελούνται από διάφορα καρβίδια σε εξαιρετικά λεπτόκοικη μορφή, τα οποία αναμιγνύονται και συντηκούνται σε μια βάση κοβαλτίου που αποτελεί και το συνδετικό τους μέσο [3]. Το καρβίδιο του βολφραμίου (WC) είναι το κυριότερο καρβίδιο που χρησιμοποιείται. Άλλα καρβίδια που χρησιμοποιούνται αλλά με αρκετά μικρότερη συχνότητα, είναι τα καρβίδια των τιτανίου, τανταλίου, χρωμίου και νιοβίου. Το ποσοστό καρβιδίου σε ένα σκληρομέταλλο κυμαίνεται μεταξύ 60 και 95%. Ρυθμίζοντας το ποσοστό αυτό, καθώς και τον τύπο και το μέγεθος, δύναται να κατασκευαστούν κοπτικά εργαλεία που να ταιριάζουν σε μια πολύ μεγάλη γκάμα μηχανουργικών κατεργασιών. Στην εικόνα 1. βλέπουμε σχηματικά τα στάδια παραγωγής των σύγχρονων σκληρομετάλλων. Ανάλογα την κατεργασία για την οποία προορίζονται τα υλικά αυτά έχουν διάφορους συνδυασμούς ιδιοτήτων που τους επιτρέπουν να υπερέχουν ως κοπτικά εργαλεία. Οι κύριες ιδιότητές τους είναι :

Εξαιρετική αντιτριβική ικανότητα, μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, χημική αδράνεια, αντοχή σε κάμψη διπλάσια αυτής των HSS, αντοχή σε πίεση επιφανείας, σκληρότητα και αντοχή σε κρουστικά φορτία, αντοχή σε φθορά.



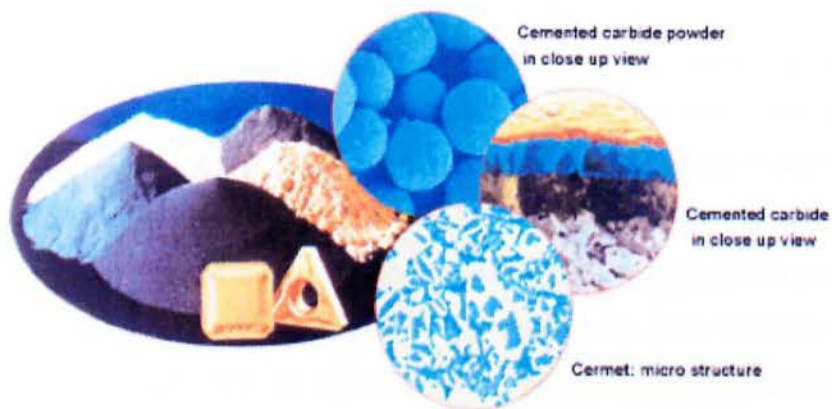


Εικόνα 1. Σχηματικό διάγραμμα των σταδίων παρασκευής των σκληρομετάλλων.

Η τεχνολογική πρόοδος ωθεί τον τομέα ανάπτυξης των κοπτικών εργαλείων προς τη δημιουργία εργαλείων ολοένα και μικρότερων διαστάσεων και πολυπλοκότερων-συνδέσεων ώστε η χρήση του βολφραμίου να υποχωρεί δίνοντας τη θέση της σε άλλα καρβίδια όπως αυτά που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Η κοκκομετρία των κόκκων καρβιδίων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή των υλικών αυτών έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια από τα 10μm στο 1μm. Αυτό έχει επιφέρει υλικά με μεγαλύτερη συνοχή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στο τελικό προϊόν, όπως μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχή σε φθορά.

Σε μηχανικές δοκιμές που έγιναν σε συνήθη υλικά κόκκωσης 2-3μm και ποσοστόσε καρβιδίου του κοβαλτίου 8% έναντι υλικών αισθητά μικρότερης δομής, κόκκωσης 0.3-1μm και 11%Co, η αντοχή σε εφελκυσμό αυξήθηκε από τα 2000 στα 3000 N/mm<sup>2</sup> ενώ η αντοχή σε θλίψη παρουσίασε αύξηση γύρω στο 11% περνών-

ντας από τα 5400 στα 6000 N/mm<sup>2</sup>. Πρακτικά, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής στα υλικά αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμο καθότι με αυτόν τον τρόπο προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή στην κοπτική αιχμή του εργαλείου, όπως συμβαίνει με τα υπέρ-κράματα.



Σκληρομέταλλα και cermet, παράγονται με τη μέθοδο της κοινιομεταλλουργίας. Η αρχική κόνη αρχικά συμπιέζεται μαζί με το συνθετικό μέσο και έπειτα το μείγμα συντήκεται, παράγοντας την αρχική γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων.

Σήμερα οι έρευνες επεκτείνονται προς την επίτευξη κατασκευής υλικών με ακόμα μικρότερη διάμετρο των κόκκων σύντηξης της τάξης των 0.1 με 0.2 μm. Τα υλικά αυτά θα προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη σκληρότητα με δεδομένο ποσοστό κοβαλτίου. Ακόμα, οι ενδοαποστάσεις μεταξύ των τεμαχίων θα είναι τόσο μικρή ώστε οι θερμοκρασίες σύντηξης να μειωθούν αισθητά, περιορίζοντας την ανάπτυξη των κόκκων, φαινόμενο που παρουσιάζεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες σύντηξης.

Η χρήση διαφορετικών καρβιδίων σε μια ποικιλία ιδιοτήτων, επιτρέπει επίσης τους κατασκευαστές να παράγουν κοπτικά εργαλεία πιο κοντά στις απαιτήσεις τους. Προσμίξεις καρβιδίων τιτανίου, τανταλίου και νιοβίου είναι πλέον συνηθισμένες και τείνουν να βελτιώσουν την αντοχή έναντι σε παραμορφώσεις υψηλών θερμοκρασιών και να αυξήσουν την αντοχή σε χημική φθορά. Άλλες προσμίξεις όπως τα καρβίδια βαναδίου και χρωμίου, τείνουν να εμποδίσουν την ανάπτυξη των απειροστών κόκκων κατά τη διάρκεια της πίεσης και πυροσυσσωμάτωσης της κόνης.

Μια άλλη καινοτομία στις παρασκευαστικές διαδικασίες αυτών των υλικών είναι ο εμπλουτισμός της επιφάνειας των κοπτικών με κοβάλτιο. Η αύξηση της περιεκτικότητας του κοβαλτίου στην επιφάνεια του κοπτικού, έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τη σκληρότητα διατηρώντας την αντοχή σε κόπωση και φθορά σε άλλες περιοχές.

Το πάχος του στρώματος αυτού κυμαίνεται μεταξύ 0.013 και 0.025 mm και η περιεκτικότητά του φτάνει δύο με τρεις φορές ή και περισσότερες αυτή του υπόλοι-



πουλικού. Κατά την συνηθέστερη διαδικασία που ακολουθείτε, η εμπλουτισμένη ζώνη παράγεται μέσω διάχυσης αζώτου, τιτανίου και κοβαλτίου κατά τη διάρκεια της σύντηξης. Η επένδυση κοβαλτίου αποτελεί πλέον μια συνηθισμένη διεργασία που χρησιμοποιείται ακόμα και σε κοπτικά για φινίρισμα υψηλών ταχυτήτων. Η ιδέα έγκειται στην ανάγκη παροχής ενός επιπλέον επιπέδου ασφαλείας όσον αφορά την αξιοπιστία των κοπτικών εργαλείων. Μελέτες γίνονται ακόμα και ως προς την διαφοροποίηση της συγκέντρωσης κοβαλτίου στις γωνίες των κοπτικών όπου η καταπόνηση είναι σαφώς μεγαλύτερη, για ακόμα καλύτερη αποτελεσματικότητα.

Η επιλογή συγκεκριμένου σκληρομετάλλου για μια κατεργασία, μπορεί να κρύβει πιθανά ρίσκα και παγίδες δεδομένου της γκάμας που είναι διαθέσιμη. Μια πρώτη εκτίμηση της κατάστασης και επιλογής του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου, αποτελούν τα χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου υλικού, όπως η σύνθεση και η σκληρότητά του [4].

Σημαντική βοήθεια στην καλύτερη και πιο αξιόπιστη σύγκλιση προς το κατάλληλο κοπτικό, αποτελούν οι κατά ISO προδιαγραφές προσθηκών.

Η προτυποποίηση αυτή, εμπεριέχει τρεις κύριες κατηγορίες σκληρομετάλλων: Την κατηγορία P που εμπίπτει στην κατεργασία υλικών με συνεχή απόβλητα όπως οπτερισσότεροι χάλυβες, η κατηγορία M για υλικά υψηλότερων απαιτήσεων όπως ο ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα υψηλής θερμικής αντοχής και τέλος η κατηγορία K για υλικά με ασυνεχή απόβλητα όπως οι χυτοσίδηροι, κραματομένοι χάλυβες και άλλα μη σιδηρούχα υλικά. Οι κατηγορίες αυτές συνδυάζονται και με μια σειρά ποιοτήτων οι οποίες δείχνουν την συμβατότητα του συγκεκριμένου κοπτικού για κατεργασίες που διαβαθμίζονται από το απλό φινίρισμα (01) μέχρι την εκχόνδριση (50). Η βελτιστοποίηση της επιλογής των κατάλληλων κοπτικών εργαλείων, απαιτούν πέρα από τις βασικές τυποποιήσεις και ακριβείς μελέτες κόστους, χρόνου κατεργασίας, διάρκειας ζωής κοπτικού και άλλες παραμέτρους.

## **2.1.2 Κεραμομεταλλικά**

Τα επονομαζόμενα cermet (ceramics + metals) αποτελούν στην πραγματικότητα μια ιδιαίτερη κατηγορία σκληρομετάλλων τα οποία εκτός από το καρβίδιο του βορφοφραμίου, χρησιμοποιούν και άλλα σκληρά υλικά. Τέτοια είναι το καρβίδιο του τιτανίου και το νιτρίδιο του τιτανίου. Η σκληρή φάση αποτελείται σε μερικά υλικά και

από το καρβίδιο του μολυβδαίνιου, ενώ ο μεταλλικός δεσμός των υλικών αυτών είναι συνήθως ένα κράμα κοβαλτίου-νικελίου σε περιεκτικότητες 3-20%.

Τα cermets και τα σκληρομέταλλα έχουν παρόμοιες διαδικασίες παραγωγής. Μάλιστα, όσο η σύνθεση ενός σκληρομέταλλου γίνεται πιο περίπλοκη, τόσο η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δύο υλικών γίνεται περισσότερο ασαφής. Αν και η ανάπτυξη που εμφανίζεται τα τελευταία χρόνια στον τομέα των cermets βαίνει αυξανόμενη, παρόλα αυτά επισκιάζεται από εκείνη που εμφανίζεται στο χώρο των σκληρομετάλλων.

Τα cermet εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε φθορά σε σχέση με τα υλικά που έχουν βάση το καρβίδιο του βολφραμίου. Η δυσθραυστότητα είναι συγκρίσιμη με αυτών των σκληρομετάλλων όπως και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ ο μεταλλικός δεσμός αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα. Τα σκληρομέταλλα εμφανίζουν μεγαλύτερη σκληρότητα, αντοχή σε κόπωση και σε θερμικά σοκ έναντι των cermet.

Σε μικρά συνεχή φορτία τα cermets υπερτερούν των σκληρομετάλλων σε αντοχή ακμής και μπορούν να φινιριστούν εύκολα προσφέροντας τελικές επιφάνειες υψηλής ποιότητας. Το μεγαλύτερο τους όμως πλεονέκτημα έναντι των σκληρομετάλλων είναι ότι μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες κοπής και ελαχιστοποιούν την τάση εμφάνισης ψευδοακμής.

Τα σύνθετα υλικά cermets παρουσιάζουν αυξημένη ζήτηση καθώς μέσω της τεχνολογικής πρόοδου καθίστανται ολοένα και πιο ικανά να αντιμετωπίσουν τις σύγχρονες βιομηχανικές απαιτήσεις και να προσφέρουν κατεργασίες με υψηλή ακρίβεια και πολύ μικρά βάθη κοπής. Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν τα cermet ιδανικά υλικά για διακοπτόμενες κατεργασίες κοπής όπως είναι οι κατεργασίες ημίφινιρίσματος, προσφέροντας μια μεγάλη ποικιλία υλικών. Κοπτικά τα οποία παρασκευάζονται από cermets και σχεδιάζονται για κατεργασίες τόννευσης, μπορούν να κατεργαστούν ανοξειδωτους χάλυβες και άλλα μεταλλικά υλικά υψηλής σκληρότητας.

Μια ουσιαστική διαφορά των υλικών cermets έναντι των σκληρομετάλλων, είναι το μέγεθος των ινών που χρησιμοποιούνται στη σκληρή φάση. Εδώ τα cermets υπερτερούν εμφανίζοντας μια μεγάλη διαστασιολογική γκάμα έναντι των σκληρομετάλλων που παρασκευάζονται με τη χρήση πολύ λεπτών ινών στο πλέγμα τους. Η ποικιλία στο μέγεθος των ινών που χρησιμοποιούνται στα cermet περιορίζουν την εμφάνιση ρωγμών και ελαχιστοποιούν την πιθανότητα αστοχίας του υλικού. Σε ορισμένα από τα υλικά αυτά, η αύξηση της περιεκτικότητας σε υδρογόνο προσφέρει αυξημένη

χημική σταθερότητα και δυνατότητα χρήσης συνδετικού μετάλλου σε μεγαλύτερο ποσοστό, αυξάνοντας τη σκληρότητα.

## 2.2 Κεραμικές Επικαλύψεις

Μία από τις σημαντικότερες κατεργασίες της επιφάνειας των υλικών είναι η επίστρωσή τους με κεραμικές επικαλύψεις. Η υψηλή σκληρότητα, η χημική αδράνεια και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των κεραμικών υλικών, καθιστούν τις κεραμικές επικαλύψεις ικανές να προστατεύσουν άλλα υλικά που αποτελούν το υπόστρωμα, από οξείδωση, διάβρωση και φθορά ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως θερμικά φράγματα. Πέραν αυτού, οι ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητες των κεραμικών καθιστούν τα λεπτά κεραμικά επιστρώματα σημαντικά για πολλές ηλεκτρονικές και οπτικές συσκευές. Επικαλύψεις όπως, TiC, TiN, TiAlN, WC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> και άνθρακας τύπου διαμαντιού (DLC), επιδεικνύουν κατά περίπτωση εξαιρετική σταθερότητα απέναντι σε μηχανική καταπόνηση και χημική ή θερμική προσβολή. Ως εκ τούτου, εξαρτήματα επικαλυμμένα με τα ως άνω υλικά παρουσιάζουν αυξημένο «χρόνο ζωής» και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες δύσκολες συνθήκες εργασίας.

## 2.3 Επικαλύψεις Κεραμικών Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Οι επικαλύψεις στα κεραμικά και το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> χρησιμοποιούνται κυρίως για την αύξηση της αντοχής σε φθορά των κοπτικών. Τα κλασσικά υλικά επίστρωσης περιέχουν αλουμίνα, καρβίδιο τιτανίου, νιτρίδιο τιτανίου, ακολουθούν διαφορετικές μεθόδους επικάλυψης και με διαφορετικά πάχη (π.χ. cvd για Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> :χημική εναπόθεση με ατμό). Στα σύνθετα κεραμικά και τα κεραμικά οξειδία, το υπόστρωμα αποτελείται κυρίως από αλούμινα με υψηλή αντιτριβική συμπεριφορά. Ως εκ τούτου, η επικάλυψη λογικά δεν θα επέφερε σημαντική βελτίωση στην αντοχή σε φθορά του κοπτικού. Στην πραγματικότητα οι επικαλύψεις αυτές έχουν αρχικά οπτικό σκοπό. Με τη βοήθειά τους γίνεται ευκολότερα αισθητή η φθορά των αρχικά σκούρων κοπτικών εργαλείων. Η επικάλυψη των νιτρίδιων πυριτίου έχει αρκετά πλεονεκτήματα, ειδικά στην περίπτωση όπου έχουμε ένα στρώμα από αλουμίνα σε ένα πολλαπλό στρώμα από διδοχικές επικαλύψεις αλουμίνας και νιτρίδιο του τιτανίου. Η δομή αυτών των επικαλύψεων προσφέρουν παρόμοια διαστολή με αυτή του υποστρώματος. Βελτιώνουν

την αντοχή του κοπτικού και διευρύνουν την ακτίνα χρήσης του Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> καθιστώντας το κατάλληλο στην τόννευση χυτοσιδήρου.

## **2.4 Επιστρώσεις θερμικού ψεκασμού**

Οι επιστρώσεις θερμικού ψεκασμού είναι υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη επιφανειών, έτσι ώστε οι επιφάνειες αυτές να αποκτήσουν πιο βελτιωμένες ιδιότητες. Τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση των τεχνικών θερμικού ψεκασμού είναι τα εξής:

Βελτίωση των επιφανειακών μηχανικών ιδιοτήτων των διαφόρων εξαρτημάτων, Μεγαλύτερη απόδοση, Εξοικονόμηση υλικού, Μείωση του κόστους συντήρησης, Μεγαλύτερο διάστημα μεταξύ των συντηρήσεων.

## **2.5 Τεχνικές θερμικού ψεκασμού**

Οι τεχνικές θερμικού ψεκασμού εφαρμόζονται σε εξαρτήματα τα οποία έχουν διαβρωθεί από απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας, από όξινο, βασικό ή φυσικό περιβάλλον ή έχουν υποστεί φθορές από διάφορες τριβές. Ο θερμικός ψεκασμός ενός υλικού γίνεται με τη χρήση πίδακα θερμότητας (φλόγα ή πλάσμα) υψηλής κινητικής και θερμικής ενέργειας. Κατά τον θερμικό ψεκασμό χρησιμοποιείται πούδρα με το υλικό της πούδρας να τήκεται πλήρως ή μόνο στο εξωτερικό του στρώμα. Το φαινόμενο αυτό, η τήξη δηλαδή του υλικού της πούδρας εξαρτάται από τη δομή του υλικού, από την ταχύτητα με την οποία διοχετεύεται η πούδρα ή το σύρμα και από την θερμοκρασία της φλόγας ή του πλάσματος. Έτσι κατά την ψυχρή προσκόλληση των τηγμένων σωματιδίων της πούδρας πάνω στην ψυχρότερη επιφάνεια επικάλυψης, το υλικό επικάλυψης στερεοποιείται ακαριαία και δημιουργεί μια παρόμοια δομή με το υλικό που επικαλύπτεται.

Κατά τον ψεκασμό η επιφάνεια του υλικού που επικαλύπτεται θερμαίνεται. Έτσι κατά την διάρκεια του θερμικού ψεκασμού και κατά την ψύξη του υλικού επικάλυψης παρατηρείται μια θερμοδυναμικά μετά-ασταθής κατάσταση η οποία επηρεάζει την νανοκρυσταλλική δομή του υλικού προς μια σταθερότερη θερμοδυναμικά κατάσταση. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εμφάνιση νανοκρυστάλλων μεγαλύτερης κοκκομετρίας. Η μμεγέθυνση της νανοκρυσταλλικής δομής του υλικού μπορεί να συνοδεύεται και

από μετασχηματισμό των αρχικών φάσεων, δηλαδή αν πχ το υλικό που επικαλύπτεται είναι χάλυβας θα μετασχηματίζεται ξανά σε φερρίτη, ωστενίτη, μαρτενσίτη κτλ, αλλάζοντας κυριολεκτικά έτσι και την κρυσταλλική δομή του επικαλυπτόμενου υλικού. Οι τεχνικές του θερμικού ψεκασμού που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι συνήθως φυσικές ή χημικές τεχνικές εναπόθεσης ατμών, ηλεκτρο-αποθέσεις ή τεχνικές sol-gel.

#### **Κύριες τεχνικές θερμικού ψεκασμού**

<b>Πηγή θερμότητας</b>	<b>Πηγή θερμότητας</b>
<b>Καύση</b>	<b>Ηλεκτρική Ενέργεια</b>
Ψεκασμός Φλόγας	Ατμοσφαιρικός ψεκασμός πλάσματος (APS)
Ψεκασμός υψηλής ταχύτητας με καύση οξυγόνου (HVOF)	Ψεκασμός σύρματος με ηλεκτρικό τόξο (WAS)
Ψεκασμός σύρματος με φλόγα (FS)	Ψεκασμός πλάσματος σε κενό (VPS)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Αντιτριβικές εφαρμογές

Οι σημαντικότερες ιδιότητες των προηγμένων δομικών κεραμικών που τα καθιστούν κατάλληλα για αντιτριβικές εφαρμογές είναι η αντοχή τους στη φθορά και τη διάβρωση και η σκληρότητά τους. Οι εφαρμογές αυτές υπήρξαν μεταξύ των πρώτων και ήδη τα κεραμικά αντιτριβικά εξαρτήματα (στόμια αμμοβολών, στεγανωτικά αντλιών, οδηγοί νημάτων) είναι καλά καθιερωμένα στην αγορά. Κεραμικά από αλουμίνα έχουν αντικαταστήσει τα πολυμερή και τα μέταλλα σε μηχανές κοπής χαρτιού υψηλής ταχύτητας εδώ και 15 χρόνια. Τα τελευταία χρόνια η ζιρκόνια κερδίζει έδαφος έναντι της αλουμίνας λόγω της υψηλότερης δυσθραυστότητας και της μεγαλύτερης αντοχής σε θερμικούς αιφνιδιασμούς. Κεραμικά από αλουμίνα χρησιμοποιούνται επίσης εδώ και πολύ καιρό σαν εξαρτήματα αντλιών (στεγανωτικές έδρες, χιτώνια, έμβολα κ.λπ), ενώ μόλις πρόσφατα έχει αρχίσει η εφαρμογή του καρβιδίου του πυριτίου.

Τα κεραμικά υλικά βρίσκουν επίσης εφαρμογές λόγω των αντιτριβικών τους ιδιοτήτων στις μεταλλευτικές βιομηχανίες. Οι περισσότερες απ' αυτές τις εφαρμογές (π.χ. χιτώνια σωλήνων, κυκλώνες, αντλίες και βαλβίδες) έχουν να κάνουν με τη λειοτρίβηση και μεταφορά πολύ διαβρωτικών ρευστών. Το κύριο πλεονέκτημά τους έναντι των αντίστοιχων μεταλλικών εξαρτημάτων είναι ο πολύ μεγαλύτερος χρόνος ζωής με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης.

Πέραν όμως αυτών υπάρχουν πάρα πολλές δυνατότητες εισαγωγής των κεραμικών υλικών σε αντιτριβικές εφαρμογές και αναμένεται σημαντική ανάπτυξη σ' αυτόν τον τομέα τα επόμενα χρόνια.

### 3.2 Υπόστρωμα

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την δομή του αποθέματος είναι η επιταξιακή δράση του υποστρώματος. Έχει αποδειχθεί ότι στα πρώτα στάδια της ηλεκτροαπόθεσης ο κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός είναι πλήρως ελεγχό-

μενος από την επιταξιακή δράση του υποστρώματος και, όταν αυτό είναι μονοκρυσταλλικό ή προσανατολισμένο, μπορεί να επιβάλει στο απόθεμα τη δομή του υποστρώματος, ακόμα και σε πάχος μερικών δεκάδων μm. Πέραν ενός κρίσιμου πάχους, το απόθεμα αποκτά δομή η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τις επιβαλλόμενες ηλεκτρολυτικές συνθήκες. Το κρίσιμο πάχος αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η φύση του υποστρώματος και η πυκνότητα του ρεύματος απόθεσης.

Προκειμένου να περιοριστεί όσο το δυνατόν η επιταξιακή δράση κατά τα πρώτα στάδια της ηλεκτρολυτικής απόθεσης των μετάλλων, αλλά και να αποφευχθεί η παρασκευή αποθεμάτων αυξημένου πορώδους, οι περισσότεροι επιστήμονες χρησιμοποιούν μη μεταλλικά ή μηχανικά λειασμένα μεταλλικά υποστρώματα.

Στην περίπτωση που το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα είναι μεταλλικό, η πυρηνόγνεση πραγματοποιείται ομοιόμορφα. Οι πυρήνες κρυστάλλωσης που δημιουργούνται στα πρώτα στάδια της ηλεκτροαπόθεσης είναι περισσότεροι, εντοπισμένοι κυρίως σε κρυσταλλικές ατέλειες του υποστρώματος ή του σχηματιζόμενου αποθέματος, έχουν πολυεδρικό σχήμα (δεκαεδρικό ή εικοσαεδρικό), ενώ το απόθεμα είναι πολυκρυσταλλικό [5].

### 3.3 Τραχύτητα σύνθετων αποθεμάτων

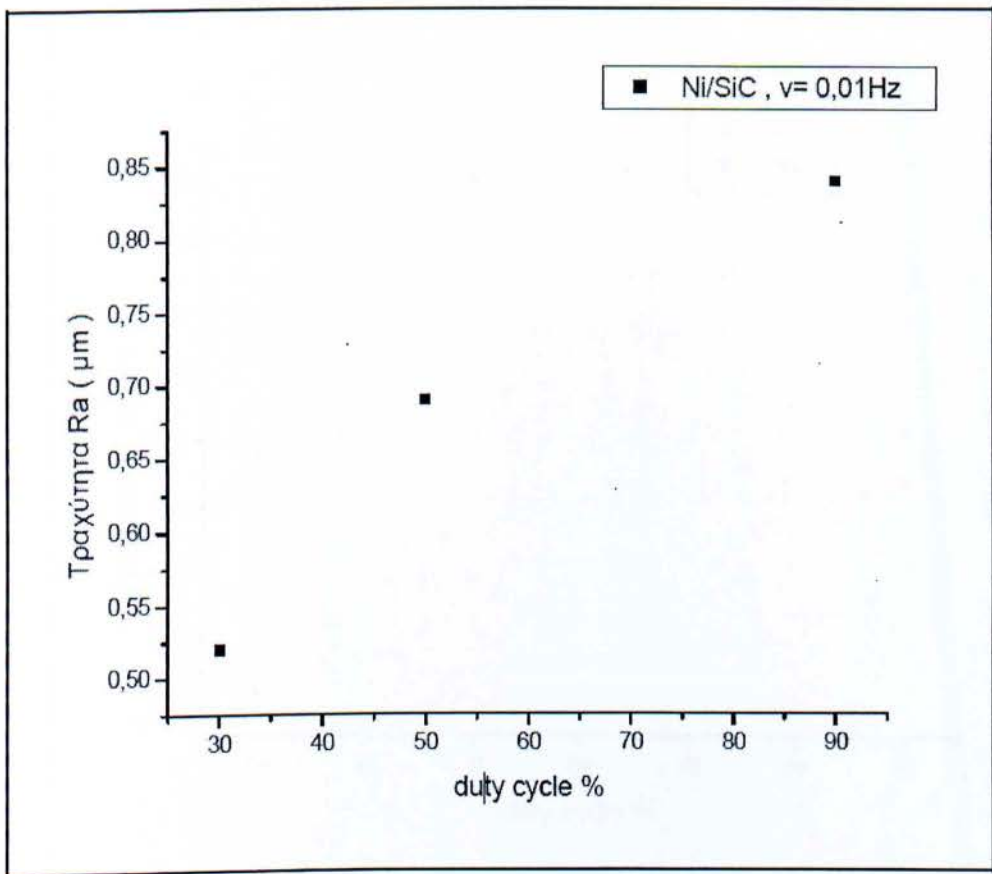
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της τραχύτητας για τα σύνθετα αποθέματα Ni/SiC. Στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις της τραχύτητας (Ra σε μm) ενώστη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μεταβολής των τιμών τραχύτητας συναρτήσει των τιμών του duty cycle καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα όπου γίνεται η σύγκριση των σύνθετων αποθεμάτων με τα απλά αποθέματα για τις ίδιες συνθήκες.

**Πίνακας 3:** Η τραχύτητα για κάθε σύνθετο απόθεμα νικελίου ανάλογα με τις επιβαλλόμενες συνθήκες.

duty cycle	συχνότητα ν σε Hz	Ra (σε μm) για Ni/SiC
συνεχής		<b>0,47</b>
90	0,01	<b>0,84</b>
50	0,01	<b>0,69</b>
30	0,01	<b>0,52</b>

Παρατηρώντας τον Πίνακα 5.10 βλέπουμε ότι η τιμή της τραχύτητας για το σύνθετο απόθεμα σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με το αντίστοιχο απλό απόθεμα Ni σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος στο οποίο η τραχύτητα έχει τιμή 3,6  $\mu\text{m}$  (Πίνακας 5.5) ενώ του σύνθετου είναι 0,47  $\mu\text{m}$ . Πρέπει να τονιστεί όμως ότι η επιφάνεια του σύνθετου δοκιμίου ήταν πιο ομοιόμορφη δηλαδή δεν υπήρχαν οπές και κρατήρες όπως στα αντίστοιχα απλά αποθέματα Ni [6].

Στο Σχήμα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών τραχύτητας Ra (σε  $\mu\text{m}$ ) συναρτήσει του επιβαλλομένου παλμού για τα σύνθετα αποθέματα, ενώ το Σχήμα 5.11 είναι ένα συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των απλών και των σύνθετων αποθεμάτων, σχετικά με τη μεταβολή των τιμών της τραχύτητας συναρτήσει του επιβαλλόμενου παλμού.

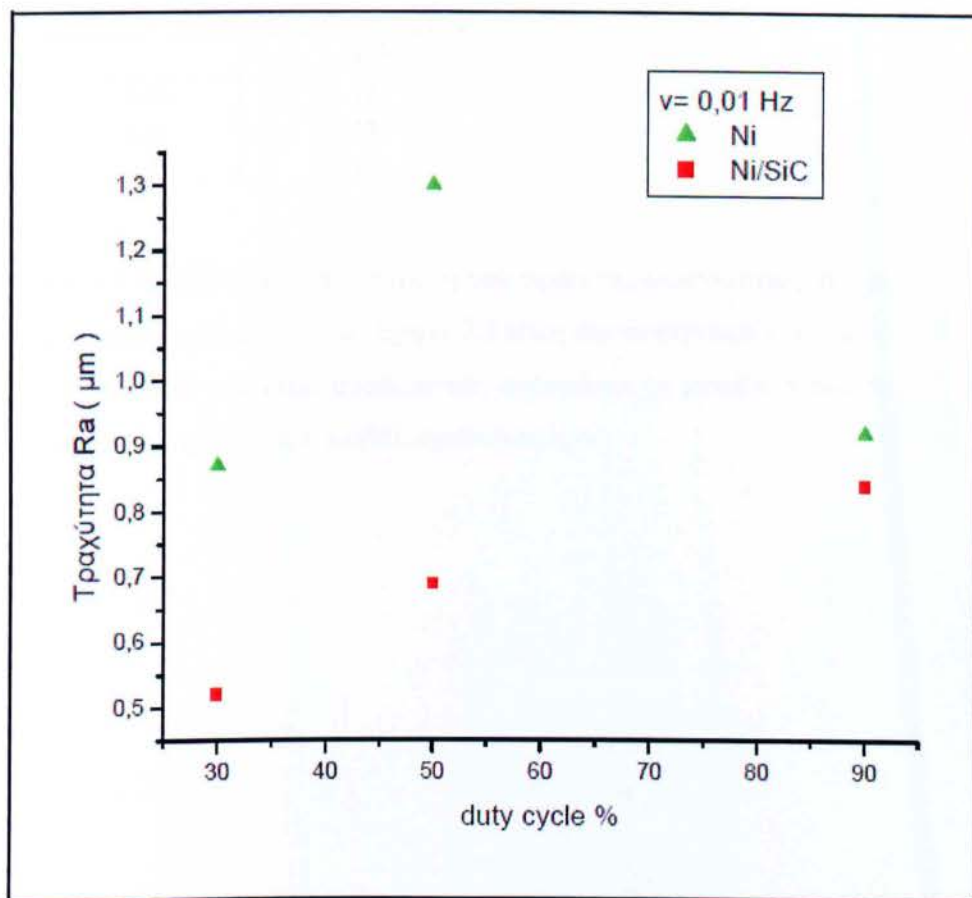


Σχήμα 3. Μεταβολή των τιμών τραχύτητας Ra (σε  $\mu\text{m}$ ) για τα σύνθετα αποθέματα συναρτήσει του duty cycle.



Από το Σχήμα 3 προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνει η τιμή του επιβαλλομένου παλμού τόσο αυξάνει και η τιμή της τραχύτητας. Η χαμηλότερη τιμή τραχύτητας προκύπτει για d.c = 30%.

Από το Σχήμα 3.1, που παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των απλών και των σύνθετων αποθεμάτων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τραχύτητα των συνθέτων αποθεμάτων είναι πολύ πιο μικρή σε σχέση με τα αντίστοιχα απλά. Συγκεκριμένα για d.c = 50 % για το απλό απόθεμα η τραχύτητα έχει τιμή 1,3  $\mu\text{m}$  ενώ για το σύνθετο η τιμή είναι σχεδόν μειωμένη στο μισό δηλαδή 0,7  $\mu\text{m}$ . Η διαφορά είναι εξίσου σημαντική και στην περίπτωση του d.c = 30% όπου το απλό απόθεμα Ni έχει τιμή 0,87  $\mu\text{m}$  ενώ το σύνθετο έχει τιμή 0,52  $\mu\text{m}$ . Τελικά προκύπτει το συμπέρασμα ότι, στην περίπτωση του υποστρώματος από χάλυβα, η προσθήκη του μέσου ενίσχυσης οδήγησε σε μείωση της τραχύτητας των σύνθετων αποθεμάτων.



Σχήμα 3.1. Μεταβολή των τιμών τραχύτητας Ra (σε  $\mu\text{m}$ ) για τα απλά και σύνθετα αποθέματα συναρτήσει του duty cycle.

### 3.4 Σκληρότητα σύνθετων αποθεμάτων Ni/SiC

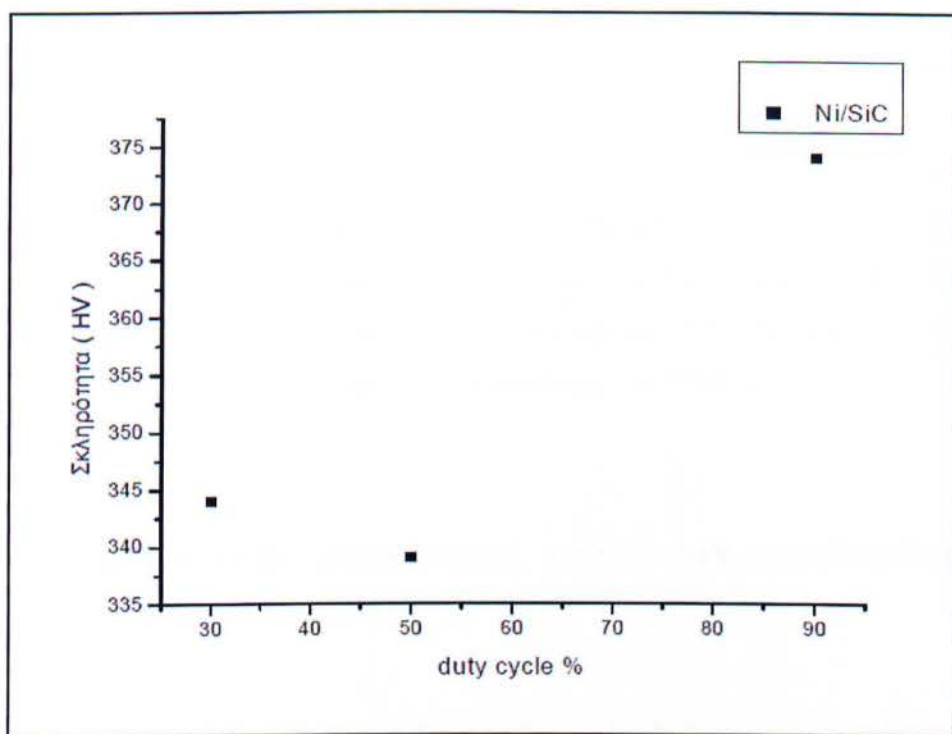
Στα σύνθετα αποθέματα Ni/SiC που παρασκευάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν πέντε μετρήσεις μικροσκληρότητας σε κάθε δείγμα για να προκύψουν όσο το δυνατόν περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών για κάθε απόθεμα ξεχωριστά. Συγκρίνοντας την τιμή για το σύνθετο απόθεμα σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος με την τιμή του αντίστοιχου απλού αποθέματος για τις ίδιες συνθήκες (όπως στην προηγούμενη παράγραφο) προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προσθήκη του ανθρακοπυριτίου προκάλεσε μικρή αύξηση στην τιμή της σκληρότητας των επικαλύψεων.

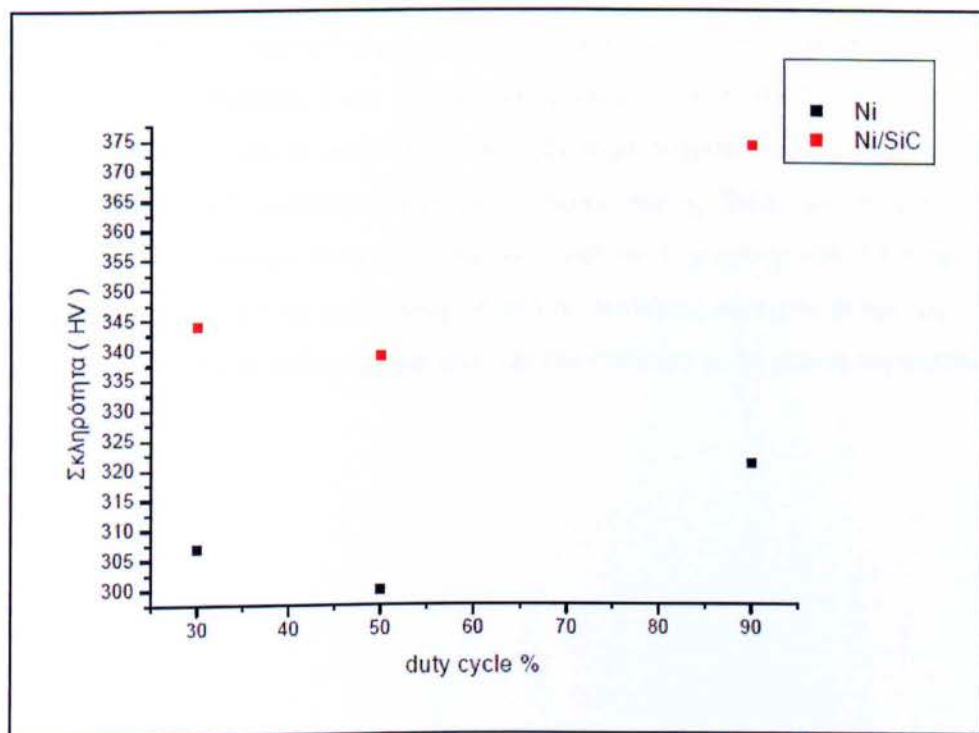
**Πίνακας 3.1.** Τιμές σκληρότητας για τα σύνθετα αποθέματα Ni/SiC.

duty cycle	συχνότητα ν σε Hz	HV σε υπόστρωμα
συνεχές		<b>353</b>
90	0,01	<b>374</b>
50	0,01	<b>339</b>
30	0,01	<b>344</b>

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών της σκληρότητας συναρτήσει του επιβαλλομένου παλμού, ενώ το Σχήμα 3.3 είναι ένα συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των απλών και των συνθέτων αποθεμάτων, σχετικά με τη μεταβολή των τιμών της σκληρότητας συναρτήσει του επιβαλλόμενου παλμού.



Σχήμα 3.2. Η σκληρότητα των σύνθετων αποθεμάτων σε συνάρτηση με το duty cycle.



Σχήμα 3.3. Σύγκριση της σκληρότητας των σύνθετων με τα αντίστοιχα απλά αποθέματα.

Όπως φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 5.13 τη μεγαλύτερη τιμή σκληρότητας την παίρνουμε για τιμή επιβαλλόμενου παλμού d.c = 90%. Η χαμηλότερη τιμή προκύπτει για d.c = 50% [7].

Από τη σύγκριση των τιμών σκληρότητας για τα απλά και σύνθετα αποθέματα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προσθήκη του ανθρακοπυριτίου προκάλεσε αύξηση. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρήθηκε στην περίπτωση της εφαρμογής d.c = 90%. Στην περίπτωση αυτή το απλό απόθεμα νικελίου είχε τιμή 321 HV ενώ με την προσθήκη του ανθρακοπυριτίου η σκληρότητα μετρήθηκε στα 375 HV.

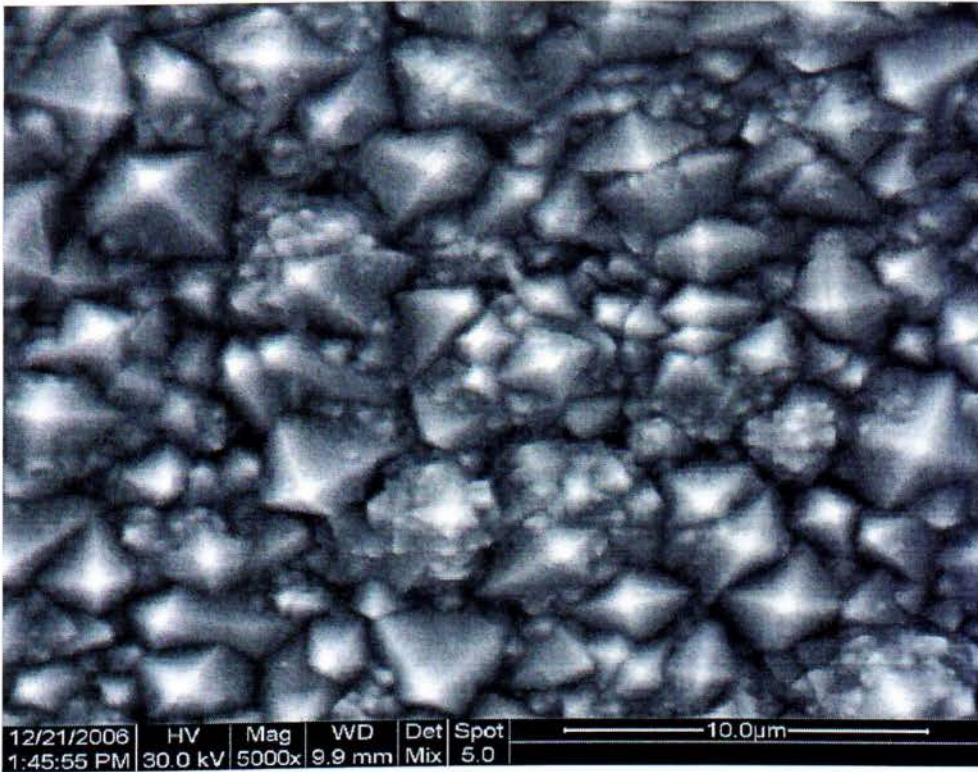
### **3.5 Μορφολογία επιφάνειας σύνθετων αποθεμάτων Ni/SiC**

Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας των σύνθετων αποθεμάτων Ni/SiC χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης SEM και γίνεται η σύγκριση με τα αποτελέσματα της μελέτης της μορφολογίας των αντίστοιχων απλών.

Στις Μικρογραφίες 3 και 3.1 παρουσιάζεται το σύνθετο απόθεμα σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος και το αντίστοιχο απλό. Στην μικρογραφία 3 βλέπουμε καθαρά την ύπαρξη του ανθρακοπυριτίου (λευκό χρώμα), επίσης βλέπουμε ότι δεν έχουν σχηματιστεί τόσο καθαρά οι κρύσταλλοι του νικελίου. Η μικρογραφία 3.1 δείχνει το απλό απόθεμα νικελίου σε μεγέθυνση (5000.) σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος. Στην εικόνα αυτή φαίνονται καθαρά οι κρύσταλλοι του νικελίου με τη μορφή πυραμίδας.

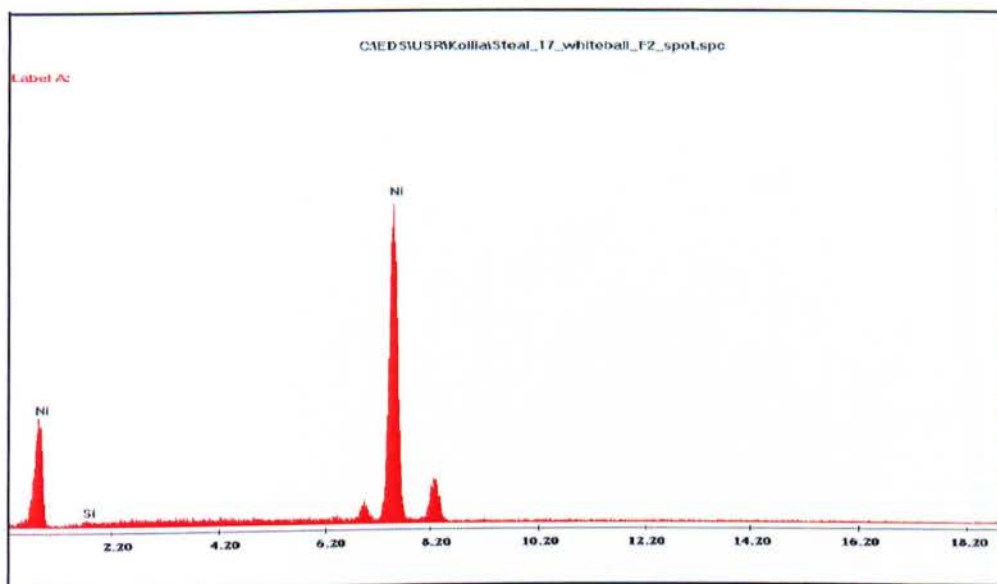


Μικρογραφία 3. Μορφολογία επιφάνειας συνθέτου αποθέματος Ni/SiC σε υπόστρωμα χάλυβα σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος (8000.).



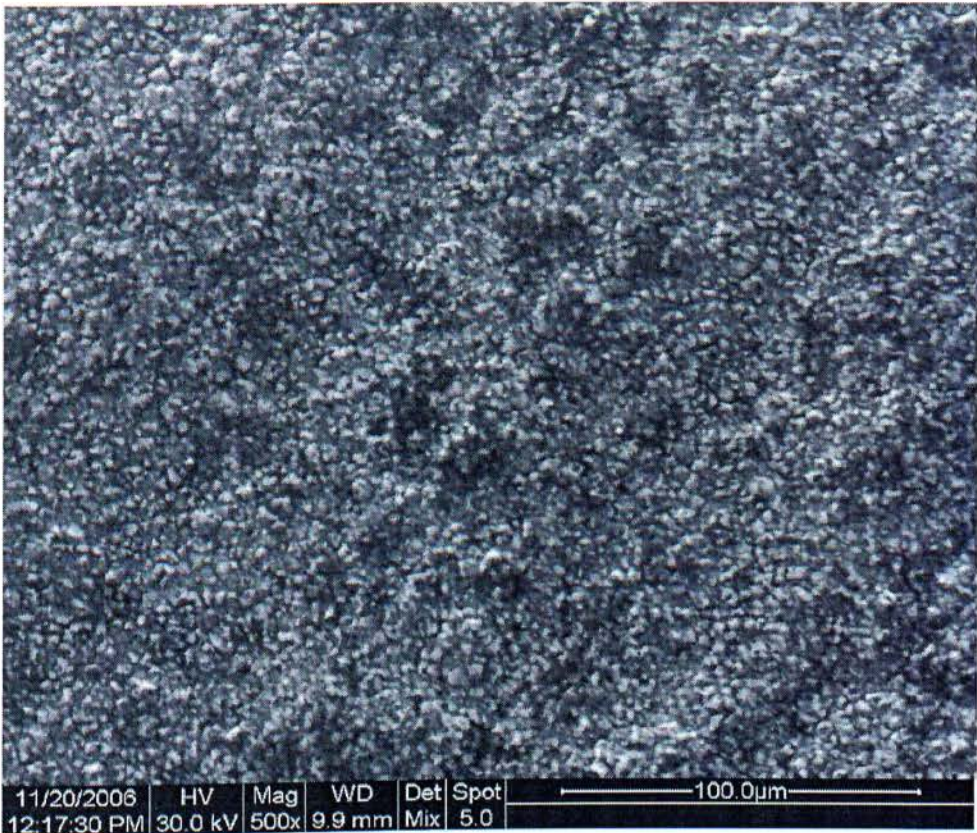
Μικρογραφία 3.1. Μορφολογία επιφάνειας απλού αποθέματος Ni σε υπόστρωμα χάλυβα σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος (5000.).

Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται το διάγραμμα στοιχειακής ανάλυσης EDS του σύνθετου αποθέματος σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος, από το οποίο πιστοποιείται η ύπαρξη του ανθρακοπυριτίου. Η μέτρηση που έγινε στον κόκκο που φαίνεται στη μικρογραφία 3 έδειξε ότι η περιεκτικότητά του σε πυρίτιο ήταν 1,3 % κ.β.

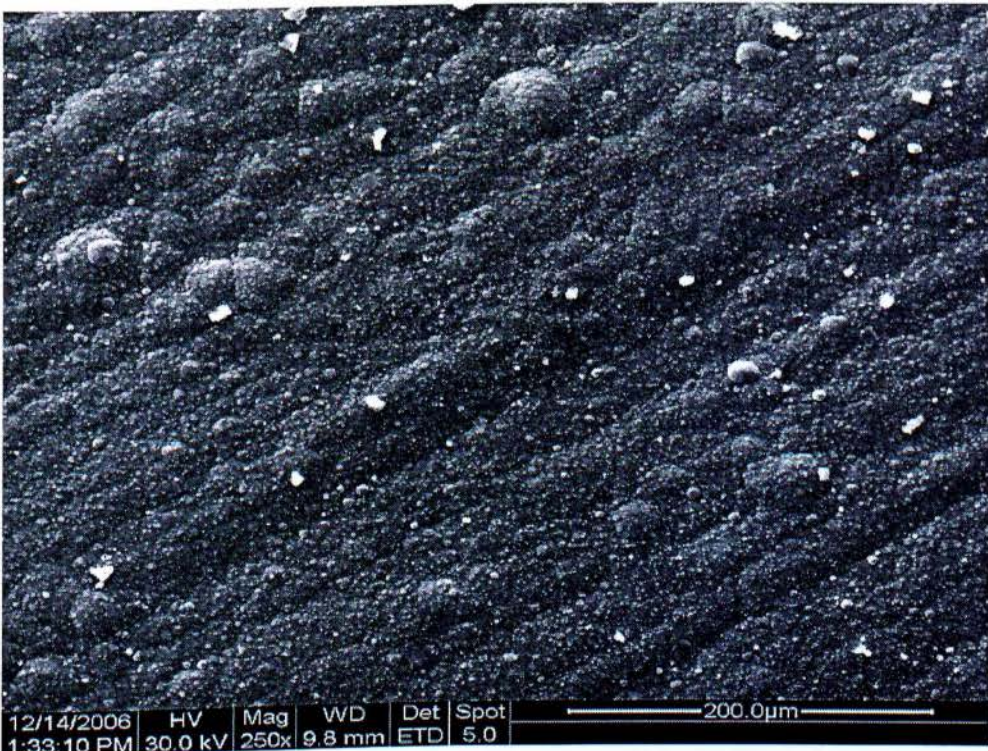


Σχήμα 3.4. Διάγραμμα στοιχειακής ανάλυσης EDS του σύνθετου αποθέματος σε υπόστρωμα χάλυβα σε συνθήκες συνεχούς ρεύματος.

Στις μικρογραφίες 3.2 , 3.3 και 3.4 παρουσιάζεται το απλό απόθεμα νικελίου και το αντίστοιχο σύνθετο Ni/SiC που παρασκευάστηκαν σε συνθήκες  $d.c=90\%$   $v=0,01\text{Hz}$ . Η μικρογραφία 3.2 είναι σε μεγέθυνση 500. Και αντιστοιχεί στο απλό απόθεμα, ενώ η 3.3 είναι σε μεγέθυνση 250. Και αντιστοιχεί στο σύνθετο απόθεμα. Τα άσπρα σημεία στην μικρογραφία 3.3 αντιστοιχούν στο ανθρακοπυρίτιο που έχει ενσωματωθεί στη μήτρα του νικελίου. Η μικρογραφία 3.4 είναι σε μεγέθυνση 8000. και δείχνει σε μεγέθυνση έναν από τους κόκκους του ανθρακοπυριτίου.



Μικρογραφία 3.2. Μορφολογία επιφάνειας απλού αποθέματος Ni σε υπόστρωμα χάλυβα (d.c = 90%, ν = 0,01 Hz) (500.).



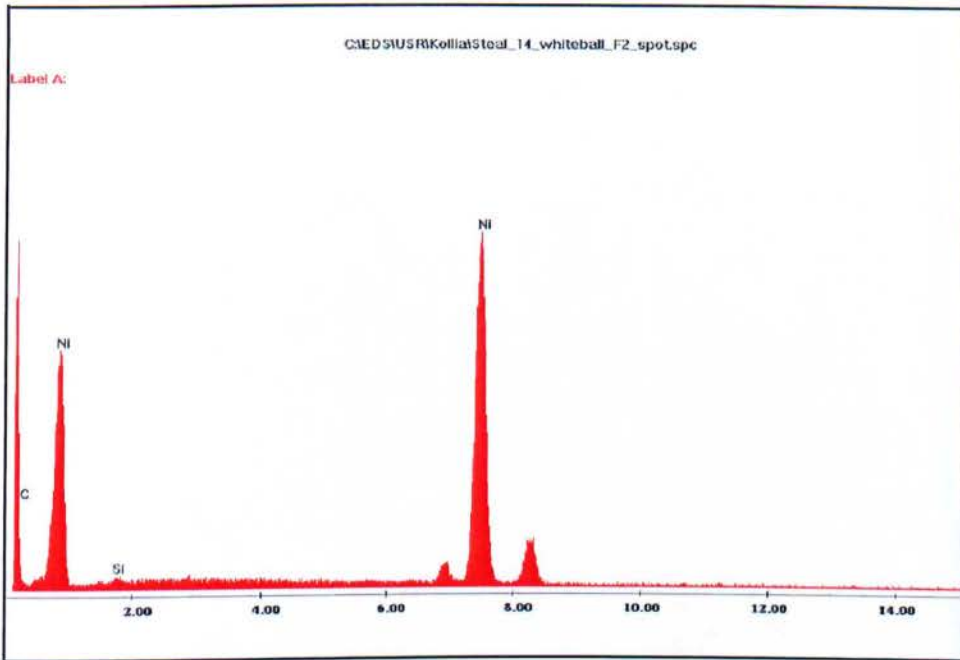


Μικρογραφία 3.3. . Μορφολογία επιφάνειας συνθέτου αποθέματος Ni/SiC σε υπόστρωμα χάλυβα (d.c = 90%, $\nu$ = 0,01 Hz) (250.).



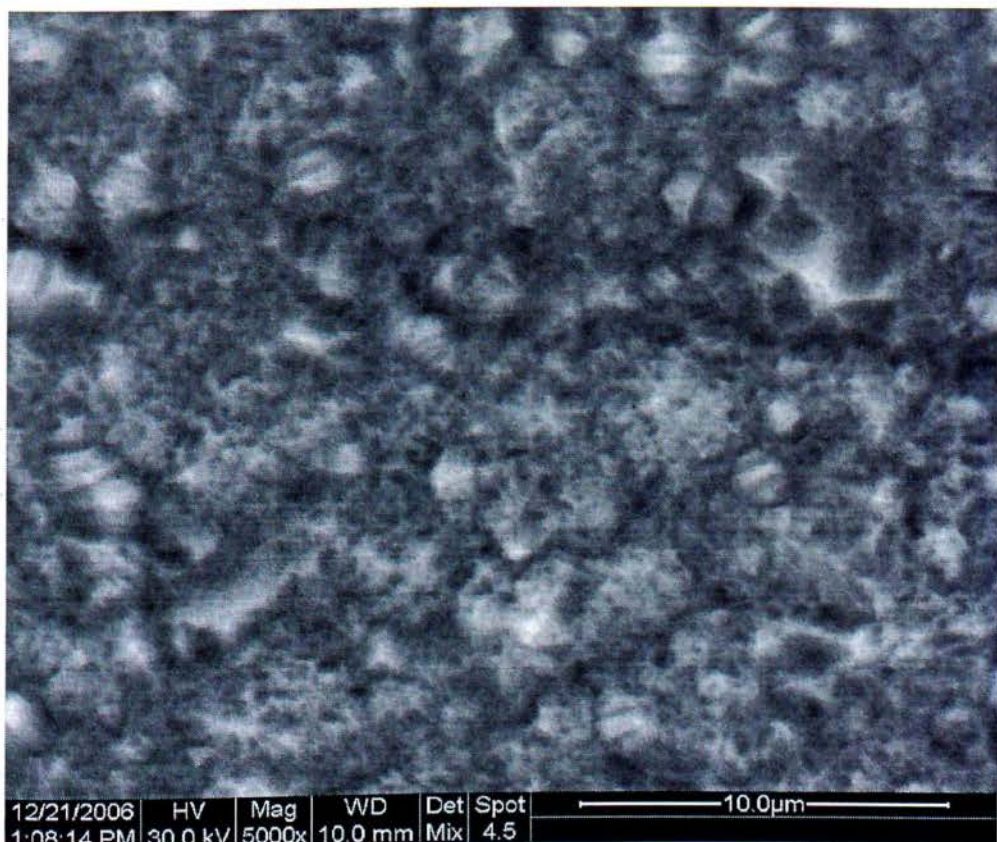
Μικρογραφία 3.4. Μορφολογία επιφάνειας σύνθετου αποθέματος Ni/SiC σε υπόστρωμα χάλυβα (d.c = 90%, $\nu$ = 0,01 Hz) (8000.).

Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται το διάγραμμα στοιχειακής ανάλυσης EDS του σύνθετου αποθέματος σε συνθήκες d.c = 90%,  $\nu$ =0,01Hz από το οποίο πιστοποιείται η ύπαρξη του ανθρακοπυριτίου. Η μέτρηση που έγινε στον κόκκο που φαίνεται στην εικόνα 5.15 με τη μέθοδο spot analysis (σημειακή ανάλυση) έδειξε ότι η περιεκτικότητά του σε πυρίτιο ήταν 1,07 % κ.β και σε άνθρακα 26,23 % κ.β [8].

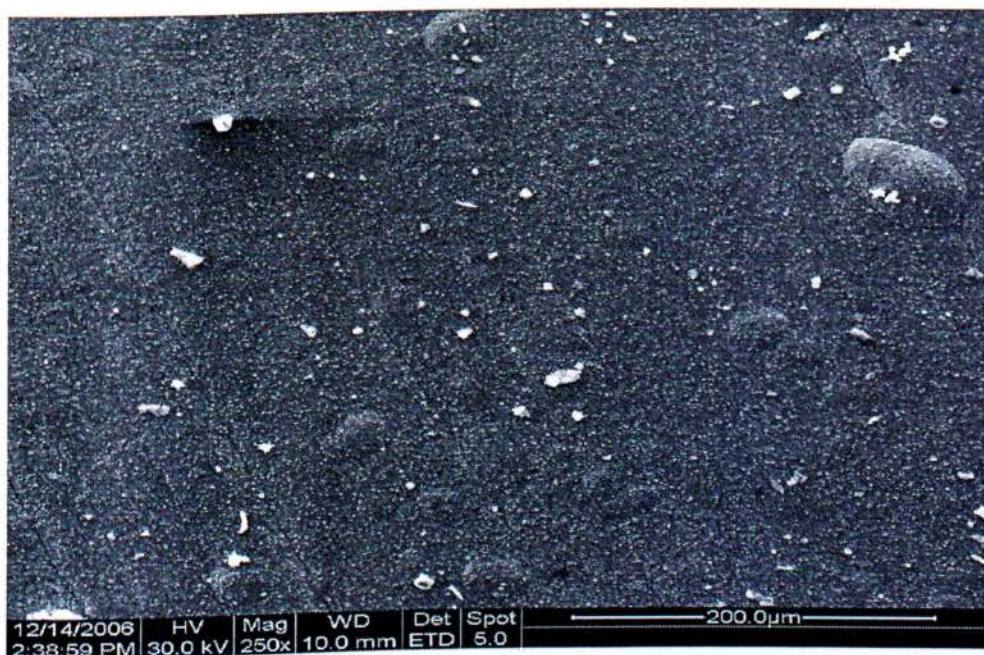


Σχήμα 3.5. Διάγραμμα στοιχειακής ανάλυσης EDS του σύνθετου αποθέματος σε υπόστρωμα χάλυβα (d.c = 90%, ν = 0,01Hz).

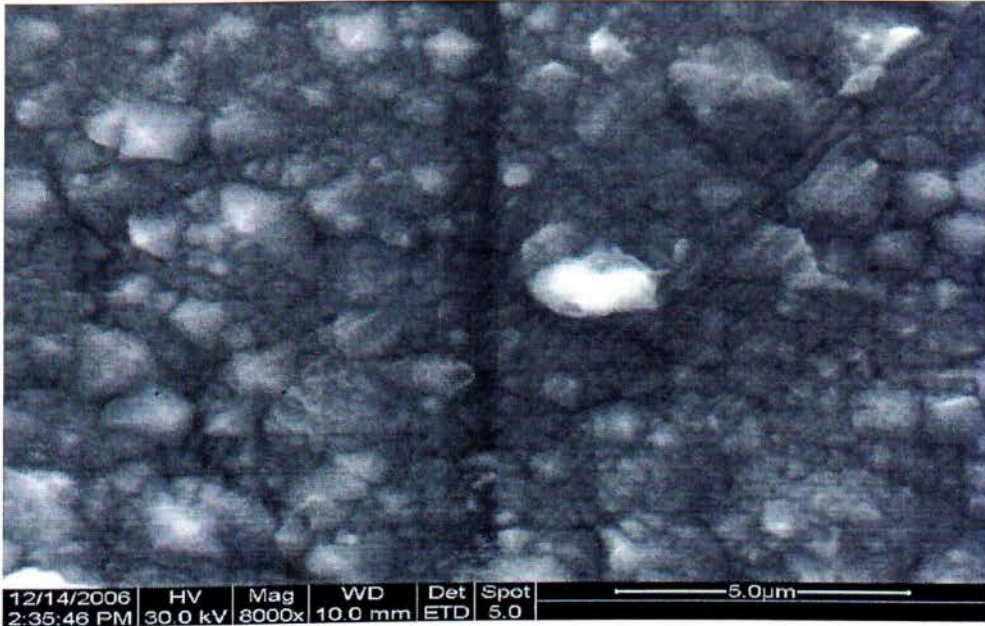
Στις Μικρογραφίες 3.5, 3.6 και 3.7 που ακολουθούν φαίνεται ημεγέθυνση της μορφολογίας της επιφάνειας του απλού αποθέματος νικελίουκαι του σύνθετου αποθέματος Ni/SiC που έχουν παρασκευαστεί σε συνθήκεςd.c =50%, ν = 0,01Hz.



Μικρογραφία 3.5. Μορφολογία επιφάνειας αποθέματος Νί σε υπόστρωμα χάλυβα (d.c = 50%, $\nu$ = 0,01 Hz) (5000.).



Μικρογραφία 3.6. Μορφολογία επιφάνειας συνθέτου αποθέματος Ni/SiC σε υπόστρωμα χάλυβα (d.c = 50%, $\nu$ = 0,01 Hz) (25.).



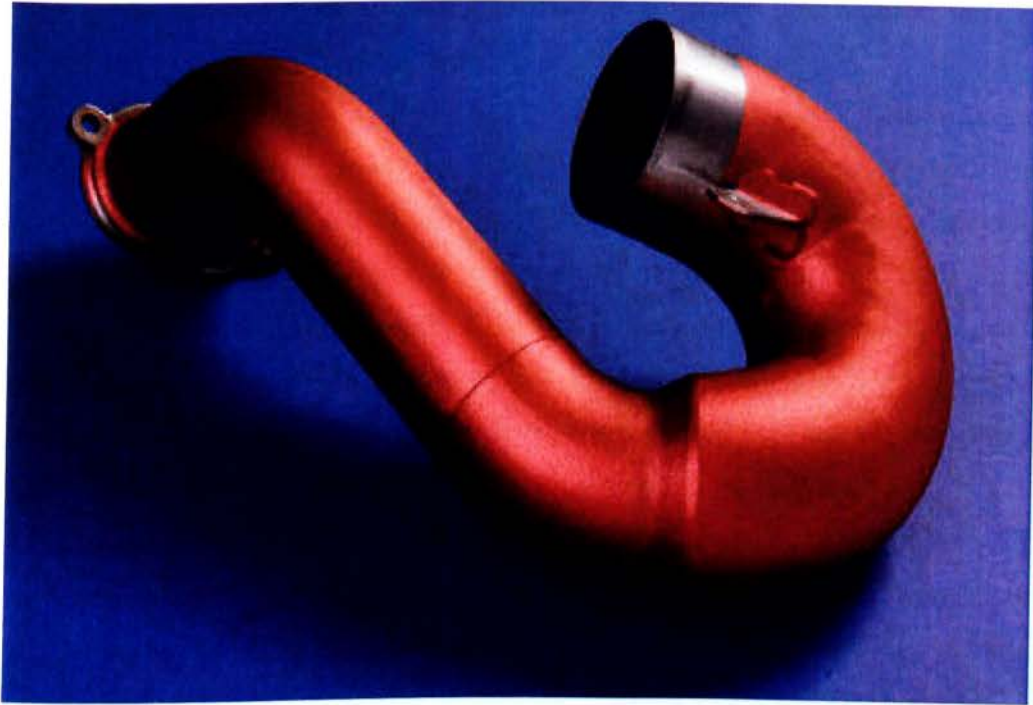
Μικρογραφία 3.7. Μορφολογία επιφάνειας σύνθετου αποθέματος Ni/SiCσε υπόστρωμα χάλυβα (d.c = 50%, $\nu$ = 0,01 Hz) (8000.).

Στη Μικρογραφία 3.5 παρουσιάζεται το απλό απόθεμα νικελίου σε μεγέθυνση 5000.. Σε αυτήν φαίνονται οι κρύσταλλοι του νικελίου αμυδρά, οι οποίοι δeneίνai ομοιόμορφα σχηματισμένοι. Στις Μικρογραφίες 3.6 και 3.7 παρουσιάζεται το σύνθετο απόθεμα Ni/SiC σε μεγέθυνση 250. και 8000., αντίστοιχα. Σε αυτές φαίνεται καθαρά το ανθρακοπυρίτιο (άσπρα σημεία) που έχει ενσωματωθεί στη μήτρα του νικελίου. Το διάγραμμα στοιχειακής ανάλυσης EDS του συνθέτου αποθέματος (για d.c =50%  $\nu$  = 0,01Hz, Σχήμα 5.15) πιστοποιεί την ύπαρξη του ανθρακοπυριτίου. Η μέτρηση που έγινε στον κόκκο που φαίνεται στη μικρογραφία 3.5 με τη μέθοδο spot analysis έδειξε ότι η περιεκτικότητά του σε πυρίτιο ήταν 1,49 % κ.β. και σε άνθρακα 34,4 % κ.β.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4.1 Θερμική επίστρωση (Thermalbarriers)

Τα **επιχρίσματα θερμικού φράγματος** είναι ιδιαίτερα προηγμένα συστήματα υλικών, συνήθως εφαρμόζεται σε μεταλλικές επιφάνειες, όπως αεριοστροβίλων ή αεροκινητήρων τμημάτων, που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, ως μια μορφή της *εξαέρωσης της θερμότητας*. Αυτές οι επικαλύψεις χρησιμεύουν για τη θερμομόνωση σε μεγάλα φορτία και η συνεχόμενη χρήση θερμότητας από θερμικά μονωτικά υλικά που μπορούν να διατηρήσουν μια αισθητή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των φερόντων κραμάτων και του επιχρίσματος. Για τον σκοπό αυτό, αυτές οι επιστρώσεις μπορούν να επιτρέπουν υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας περιορίζοντας ταυτόχρονα την θερμική έκθεση των δομικών στοιχείων, την παράταση του χρόνου μειώνοντας την οξείδωση και θερμική καταπόνηση. Σε συνδυασμό με την ενεργή ταινία ψύξης, τα TBCs επιτρέπουν στο ρευστό για θερμοκρασίες υψηλότερες από το σημείο τήξης του μετάλλου αεροτομής σε ορισμένες εφαρμογές τουρμπίνας.



Θερμικό φράγμα επίστρωσης στο σύστημα εξαέρωσης αυτοκινήτων

Τα Κεραμικά θερμικά φράγματα επιχρισμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροστροβίλων βιομηχανία. Η πιο κοινή χρήση είναι στην καύση του κινητήρα, και η οποία εφαρμόζεται στη στατική των μεταλλικών στοιχείων κράματος που καθορίζουν το θάλαμο καύσης. Τα κράματα που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν οι θαλάμη καύσης περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τις αποκαλούμενες HASTELLOY κράμα X και HAYNES κράμα 188. Η κεραμική επίστρωση παρέχει απομόνωση/θωράκιση προς την αίθουσα καύσης, επιτρέποντας έτσι την καύση του καυσίμου για να διεξαχθεί σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες χωρίς να προκαλείται υποβάθμιση του μεταλλικού υποστρώματος.

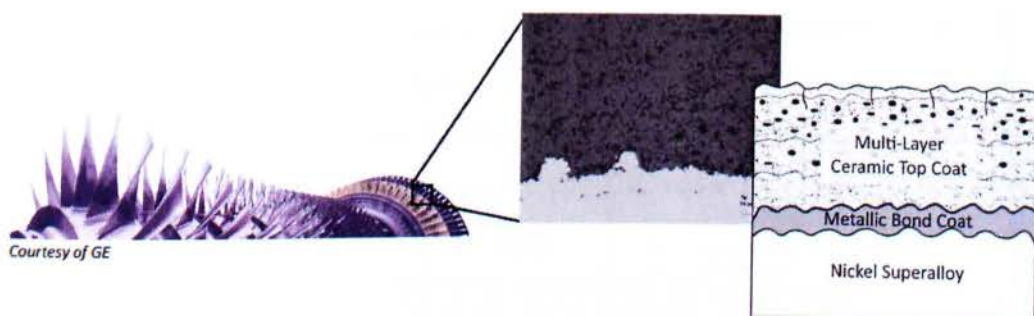
Το Θερμικό φράγμα είναι ένα υλικό που εφαρμόζεται σε ένα μεταλλικό ή αφρώδες υλικό ώστε να επιβραδυνθεί ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας. Το υλικό αυτό δημιουργήθηκε για την πρόληψη πυρκαγιών, και καθίσταται ένα κύριο συστατικό σε κτίρια, μηχανήματα και κινητήρες. Το Θερμικό φράγμα μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε επιφάνεια που λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία ή έχει τη δυνατότητα να αναφλέγεται. Η επίστρωση ενός θερμικού φράγματος τοποθετείται σε μία επιφάνεια σε τέσσερα επίπεδα. Κάθε στρώμα αποτελείται από ένα διαφορετικό υλικό που δημιουργεί μείωση θερμοκρασίας με διαφορετικό τρόπο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα στρώματα έχουν εφαρμοστεί με τάση ατμών ή σπρέι.

Τα εξαρτήματα του κινητήρα είναι το πιο κοινό μέταλλο σε χρησιμότητα των θερμικών φραγμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα θερμικό φράγμα διατηρεί έναν κινητήρα που παρουσιάζει διάβρωση ή οξειδωση λόγω της θερμότητας. Ορισμένοι κινητήρες τείνουν να σβήσουν καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτό εμφανίζεται στο κινητήρα λόγω θερμικών τριβή, αλλά ένα θερμικό φράγμα μειώνει τις θερμικές τριβής ή την κόπωση που μπορεί να παρουσιαστεί. Δυστυχώς, τα θερμικά φράγματα δεν διαρκούν για πάντα, και θα πρέπει να επανατοποθετηθεί μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Επίσης τα Θερμικά φράγματα συνήθως χρησιμοποιούνται σε οχήματα που έχουν εξάτμιση ή turbo συστήματα διότι οι μηχανές φθάνουν σε ακραίες θερμοκρασίες. Το αυτοκίνητο είναι ασφαλέστερα έχοντας ένα φράγμα που ρυθμίζει καλύτερα την θερμοκρασία του. Εκτός από τα οχήματα, θερμικά φράγματα χρησιμοποιούνται επίσης στην αεροστροβιλοκινητήρων. Τα Θερμικά φράγματα εξετάζονται από ευρωπαϊκές επιστημονικές ομάδες και από της ΗΠΑ, ώστε να μπορούν να κερδίσουν μια

καλύτερη κατανόηση του πώς να δημιουργηθεί η προστασία μιαςπολύ-λειτουργικής επιφάνειας.

Τα Θερμικά φράγματα θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται, γιατί επεκτείνουν τη ζωή σε κτίρια, ηλεκτρικά εξαρτήματα, και κινητήρες. Στα κτίρια, επιβραδύνουν τις πυρκαγιές, στους κινητήρες που εφαρμόζεται θερμικό φράγμα υπάρχει λιγότερη διάβρωση και περισσότερο αντίσταση. Η Θερμότητα και οι πυρκαγιές προκαλούσαν καταστροφή από την αρχή του χρόνου, αλλά η εξέλιξη της τεχνολογίας και την εισαγωγή των θερμικών φραγμάτων παρέσχε μία λύση για να επιβραδυνθεί η θερμική καταστροφή.



Ένα φράγμα μετάλλου είναι ένα λεπτό στρώμα από μέταλλο, είτε σαν μορφή ελάσματος ή φιλμ, και βρίσκεται ανάμεσα σε δύο αντικείμενα ούτως ώστε τα μαλακά μέταλλα να μολύνουν άλλα αντικείμενα. Για παράδειγμα, τα χάλκινα και μπρούτζινα εξαρτήματα σε σύγχρονα κυκλώματα περιλαμβάνουν πάντα ένα λεπτό στρώμα από μεταλλικά ελάσματα γύρω τους για την αποφυγή καταστροφής των κρυσταλλικών ημιαγωγών τους.

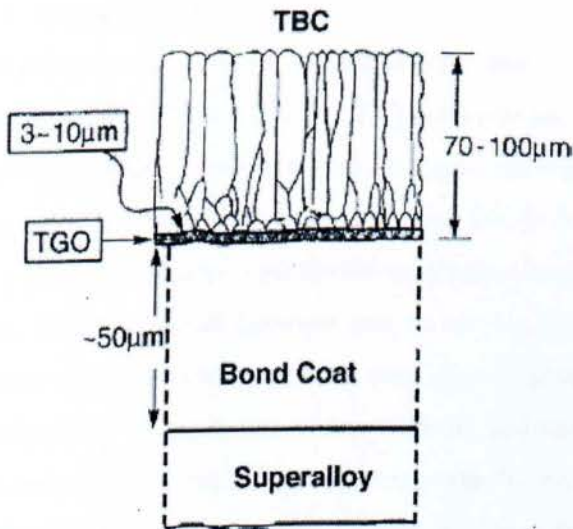
## 4.2 Θερμικό φράγμα επιχρίσματος (TBC)

Θερμικό φράγμα επιχρίσματος (TBC) χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόληψη υψηλής θερμοκρασίας και επιτρέπει στα εξαρτήματα να έχουν υψηλή αντοχή. Λόγω της ισχυρής ανομοιογενές στο υλικό οι ιδιότητες σε TBC αποτυχία συχνά ξεκινάει κοντά στην διασύνδεση μεταξύ της εύθραυστης στρώσης οξειδίου και τα ελατά

υπόστρωμα. Μια αξιόπιστη πρόβλεψη της TBC αποτυχία απαιτεί λεπτομερή στοιχεία σχετικά με τη ρωγμή τομέα και την επακόλουθη θραύση.

Πρώωση και αεριοστρόβιλων λεπίδες που υποβάλλονται σε εξαιρετικά υψηλή θερμική φόρτωση. Θερμικό φράγμα επιχρίσματος (TBC) χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόληψη της υψηλής θερμοκρασίας και επιτρέπουν στα εξαρτήματα να έχουν υψηλή αντοχή. Τα οφέλη της TBC έχουν ως αποτέλεσμα να διατηρούν την ικανότητά τους σε υψηλές θερμικές διαβαθμίσεις στην παρουσία της κατάλληλης ψύξης. Η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων ενός μηχανήματος ουσιαστικά σχετίζεται με την εφαρμογή και ανθεκτικότητα της TBC.

Ένα τυπικό TBC σύστημα θεωρείται ότι στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται στο Σχ. 1. Το σύστημα αποτελείται από τέσσερα βασικά συστατικά. Είναι (1) το TBC, (2) το υπέρ-κράμα υπόστρωμα, (3) αλουμινίου που περιέχουν δεσμό επιστρώματος (BC), και (4) ένα θερμικά καλλιεργούμενο οξείδιο του αργιλίου (TGO), κατά κύριο λόγο το  $YS_2$  που σχηματίζεται μεταξύ των TBC και το BC.



Σχήμα 4. Ένα χαρακτηριστικό σύστημα θερμικού φράγματος σε επικάλυψη με τη δέσμη ηλεκτρονίων με φυσική τεχνική εναπόθεσης ατμών (EB-PVD).

Το TBC στρώμα σε μια διάσταση των 70-200  $\mu\text{m}$  είναι ένα θερμομονωτικά ψαθυρό οξειδίου του αργιλίου και αποτρέπει/εμποδίζει από την μεταφορά θερμότητας. Η ζιρκόνια  $ZrSiO_4$  έχει αναδειχθεί ως το προτιμώμενο υλικό, σταθεροποιημένο στην κυβικό τετραγωνική μορφή από την προσθήκη ύτριο σε στερεό διάλυμα. Αυτό το υλικό έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα με ελάχιστη θερμοκρασιακή ευαισθησία.



Το TBC αποτίθενται στο υπόστρωμα είτε από δέσμη ηλεκτρονίων φυσική εναπόθεση ατμών (EB-PVD) ή από αέρα ψεκασμού πλάσματος εναπόθεση (APS).

Η TGO είναι ένα λεπτό στρώμα με μικρό πάχος και έχει μια σημαντική επιρροή στο TBC σύστημα στην ανθεκτικότητα του [9,10,11]. Το BC κράμα είναι σχεδιασμένο ως ένα τοπικό Al δοχείο, ώστε να καταστεί δυνατή η καθιέρωση-αλουμινίου κατά προτίμηση σε άλλα οξειδία, ως οξυγόνο περνά μέσα από την TBC. Η αλουμίνα είναι το προτιμώμενο οξείδιο λόγω της χαμηλής διάχυσης/εξάπλωσης του οξυγόνου και της κορυφαία πρόσφυση. Το TGO στρώμα αναπτύσσει εξαιρετικά μεγάλη συμπίεση υπολειμμάτων λόγω της θερμικά απροσάρμοστης διαστολής με το υπόστρωμα, καθώς ψύχεται το σύστημα ψύχει [9].

Το BC με πάχος περίπου 50 μm είναι σχεδιασμένο για να αυξάνει την πρόσφυση του TBC και να γεφυρώσει μηχανικά τις διαφορές μεταξύ της TBC και το υπέρ-κράμα του υποστρώματος. Το BC έχει συντελεστή Young κοντά στα 200 GPa, τάση διαρροής 300-900MPa και θερμικό συντελεστή διαστολής  $13 \cdot 10^6 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ , η οποία ταιριάζει στο κράμα Ni καλά.

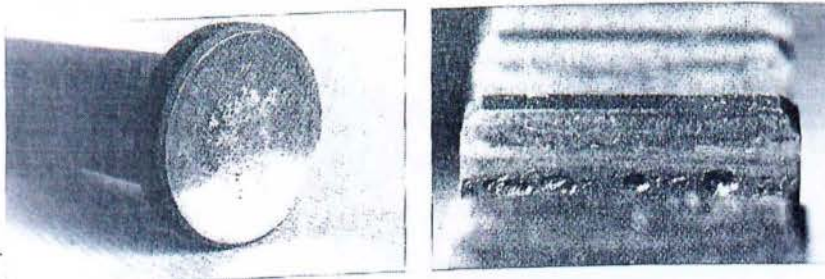
Για την ετερογένεια του σύνθετου υλικού, το TBC σύστημα παρουσιάζει πολλαπλές μη μηχανισμών ρωγμές. Evans et al. [12,13] ανέφεραν μια λεπτομερή επισκόπηση των TBC αποτυχία μηχανισμών. Μια από τις κύριες αποτυχίες συστήματος είναι τεκμηριωμένες και εξηγείται από Wright και Evans [14]. Η διασύνδεση διαχωρισμού λόγω μικρής κλίμακας κάμψεις έχει βρεθεί ως η κύρια πηγή για την εκκίνηση των μικρό-ρωγμών. Η μικρό-ρωγμή ξεκίνησε από το οξείδιο του αργιλίου από την ετερογένεια και ομοιογένεια του και διευρύνεται κατά μήκος της διασύνδεσης.

Για να υπολογιστεί το περίπλοκο υλικό κατά τη διαδικασία αποτυχίας, το TBC σύστημα απλοποιήθηκε σε μια 2-δυσδιάστατη πολύ-επίπεδη σύνθετη πλάκα. Λόγω των μικρών διαστάσεων των TGO που είναι ιδανικές ως διασύνδεση, όπου το TBC, BC υπέρ-κράμα υπόστρωμα αντιμετωπίζονται ως συνεχιζόμενο. Η ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΟΥ συγκεντρώνεται γύρω από τους TGO κοντά στο TBC και οι επιπτώσεις του υπέρ-κράματος υποστρώματος είναι πλέον δευτερεύουσες. Με αυτόν τον τρόπο μοντελοποιήθηκε με βιοϋλικά συστήματος. Ένα συνεκτικό μοντέλο [15,16] η κλίση της πλαστικότητας [17,18] εισάγονται για να περιγράψουν την αποτυχία των TGO και TBC στρωμάτων, αντίστοιχα. Τα φαινομενολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των σύνθετων υλικών με μια μη διαδικασία ανάλυσης τους. Το συνεκτικό μοντέλο και η κλίση της πλαστικότητας παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες.

Το TBC χαρακτηρίζεται από ένα εύθραυστο υλικό και η συμπεριφορά η οποία περιγράφεται από το μοντέλο Rankine με στέλεχος χαλάρωσης στο πλαίσιο του βαθμιδωτού πεδίου της πλαστικότητας [18]. Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την ανάλυση συγκεκριμένων δομών [19,20]. Βαθμιδωτού πεδίου Κατά την πλαστικότητα η θεωρία χαλάρωσης δεν προκαλεί εξάρτηση των μοντέλων αυτών. Η υπολογιστική πρόβλεψη συσχετίζεται μοναδικά με τις παραμέτρους του υλικού με το τροποποιημένο Rankineμοντέλο.

### 4.3 Φθορά από επιφανειακή κόπωση (αποκόλληση υποστρώματος, διάβρωση, κλπ.)

Υποδείγματα (Σχήμα 4.1) : Ρήγματα και πόροι που μπορεί να επεκταθούν σε βάθος αρκετών δεκάτων του χιλιοστού TruscottGF [21].



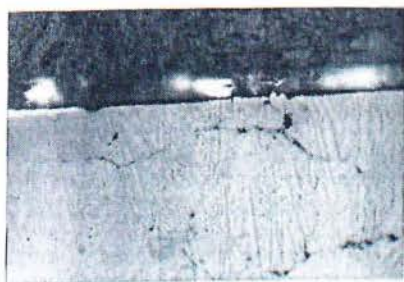
Σχήμα 4.1 {α} Έκκεντρο ωστηρίου κινητήρα IC; τηχθέντος κοινού χάλυβα  
{β} Γρανάζι- τηχθέντος κοινού χάλυβα

Λόγοι : Κυκλική φόρτωση επαφών υπό πίεση που κινούνται από κύλιση, κρούση, ή από ολίσθηση σε μια περιοχή υπό λίπανση.

Άλλα χαρακτηριστικά.

- Η φθορά συσσωρεύεται
- Παροτρύνεται από την παρουσία υφιστάμενων ελλείψεων ή αδυναμίες σημείων: δομική ετερογένεια, εναπομένουσα αντοχή σε καταπονήσεις.
- Η τοποθεσία από όπου αρχίζει η ζημιά καθορίζεται από το περιβάλλον (για παράδειγμα, διάβρωση), η δομή των υλικών, και η κατανομή της πίεσης: η κόπωση ξεκινά στην επιφάνεια, εάν η επιρροή των εφαιπτό-

μενων επιφανειακών πιέσεων δείχνουν να κυριαρχούν (Σχήμα 4.1e) ή στο υπόστρωμα εάν η επιρροή της επακόλουθης δυνάμεις διάτμησης είναι μεγαλύτερη (Σχήμα 4.1c).



Σχήμα 4.1. {c} Τμήμα μικρογραφίας του ωστηρίου ενός εκκέντρου του λευκού χυτοσιδήρου (χυτό-μέταλλο); Φαινόμενο φθοράς που ξεκινά στο υπόστρωμα (x450)

«Υλικά» Παράμετροι : δομή και συνοχή, όριο ελαστικότητας, παραμένουσες (εσωτερικές) τάσεις, αντοχή WoodRJK, WheelerDW [22] .

Πιθανές συνέπειες

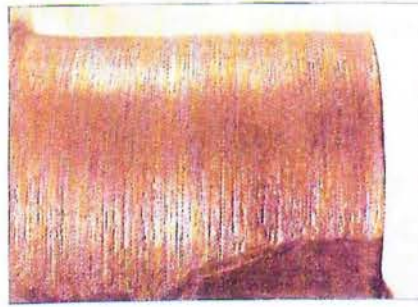
- Επιφανειακά γδαρσίματα
- Επιδείνωση στην κατάσταση των επιφανειών  $\square \rightarrow$  με μείωση της σταθερότητας του λιπαντικού φιλμ και στα μηχανικά χαρακτηριστικά.

## 4.4 Φθορά λόγω Λείανσης ή διάβρωσης (Στιλβωτικά ή Διάβρωση Φθοράς)

(Σχήμα 4.2).



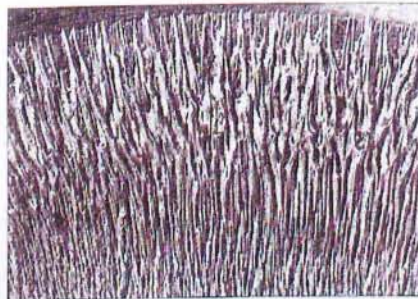
(a) Shaft of nitrided steel; bearing of steel 100 Cr6. Environment: water filled with sand.  $V = 20 \text{ mm s}^{-1}$ ,  $P = 20 \text{ MPa}$



(b) Shaft of nitrided steel; counterface: the same. Environment: air + iron oxides. Temperature =  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; very low  $P \times V$



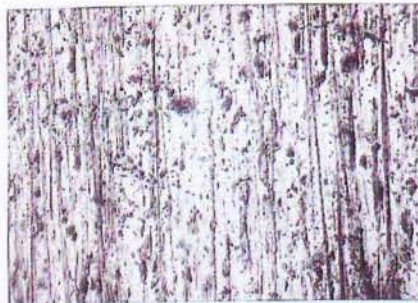
(c) 'Sloodge' pump piston; erosion by the fluid filled with alumina



(d) Hot-forging die; abrasion by the carbon deposit



(e) Axle of a hot water circulator (rubbing on a graphite bearing); abrasion by oxide particles embedded in the bearing



(f) Cutting tool blade of surface-hardened steel ( $\times 60$ )

**Σχήμα 4.2. Έλεγχος φθοράς τριβής και διάβρωσης – παραδείγματα.**

- ❖ Διαστάσεις και/ή απώλεια βάρους
- ❖ Βαθμολογίες, αυλακώσεις, φρεάτια κ.λπ. , που προκλήθηκαν από κοπή ή παραμόρφωση (Σχήμα 4.3).

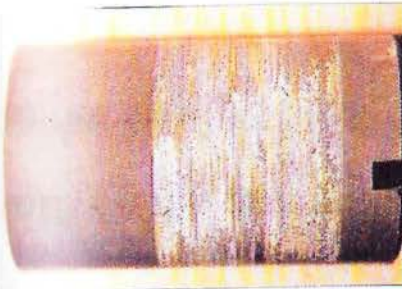
## 4.5 Σπηλαιώση θερμικής Κρούσης και θερμικής κόπωσης

Ρωγμή ή ελαφρό ράγισμα.

Αιτίες  $\approx$

Υλικά που υπόκεινται σε κλίση θερμότητας που προκλήθηκαν από :

- Τριβή (Σχήμα 4.4α και δ)
- Ένα λειτουργικό περιβάλλον ή την κόντρα ύλη που θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία, π. χ. είναι εξαρτήματα σε επαφή με καυτά αέρια (Σχήμα 4.4 β) και η διαμόρφωση εργαλείων (Σχήμα 4.4 γ).



(α) Shaft and bearing of steel coated with aluminium (by thermal spraying). Environment: water.  
 $V = 0.2 \text{ m s}^{-1}$ ,  $P = 4 \text{ MPa}$



(β) Sintered aluminium bearing. Counterface: Co based superalloy. Environment: water.  
 $V = 0.5 \text{ m s}^{-1}$ ,  $P = 0.5 \text{ MPa}$

(γ) Bearing track of chromium-plated steel.  
Crazing and flaking of the coating



Σχήμα 4.4 {a-d}. Θερμική κόπωση και κρούση/τράνταγμα – παραδείγματα εικόνων.

Πιθανές αιτίες.

- Αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες  $\square \rightarrow$  Φθορά με υψηλή πίεση, με επιφανειακή κόπωση, κ.λπ. .
- Επιδείνωση στην κατάσταση της επιφάνειας  $\square \rightarrow$  μηχανική μεταφορά, κ.λπ..

Ρήγματα, πόροι. (Σχήμα 4.5)

Αιτίες  $\approx$

- ❖ Λιπαινόμενες επιφάνειες.
- ❖ Ξαφνικές μεταβολές/αποκλίσεις στην πίεση του υγρού  $\rightarrow$  δημιουργία κυμάτων κρούση λόγω θραύσης/ρήξης.

## **4.6 Φθορά από διάβρωση λόγω τριβής (επαφή με οξειδωση, φθορά που προκαλείται από μικρά διάκενα, κ.λπ.)**

Σχήμα 4.6.1.

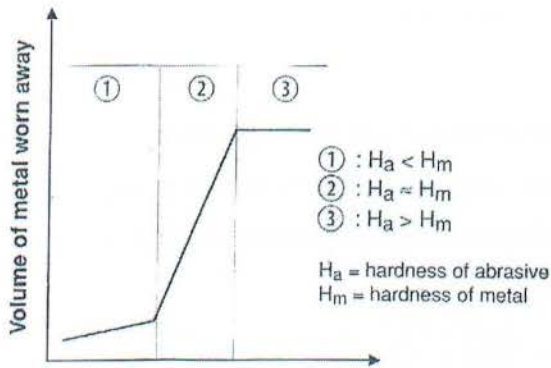
- ❖ Χρωματισμοί των επιφανειών (σχηματισμός του  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  και/ή  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  στην περίπτωση των κραμάτων σιδήρου).
- ❖ Φθορά από τριβή με απώλεια διαστάσεων.

Αιτίες  $\approx$

- Μηχάνημα συναρμολόγησης που υπόκειται σε κραδασμούς.
- Στοιχεία που υποβάλλονται σε εναλλακτική σχετική κίνηση χαμηλό πλάτος κύματος (που μπορεί να προκαλούνται μόνο από ελαστική παραμόρφωση των εξαρτημάτων).

Άλλα χαρακτηριστικά

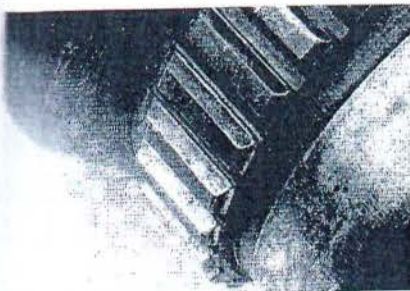
Τα θραύσματα που παράγονται από μηχανικά αποτελέσματα ή/και με πρόσφυση (ανάλογα με την αιτία και τη φύση των υλικών): λόγω τριβής.



**Σκληρότητα λειαντικού μέσου.**

Η δοκιμή αντοχής κατά την τριβή αυξάνεται όταν η σκληρότητα των λειαντικών  $H_a$  φτάνει αυτή του μετάλλου  $H_m$ .

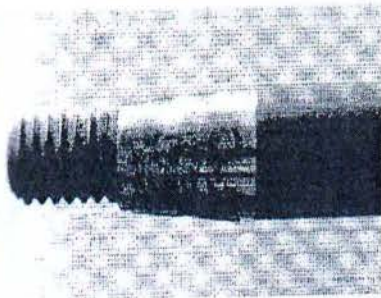
**Σχέση μεταξύ φθοράς και σκληρότητας (Τριβή κοπής).**



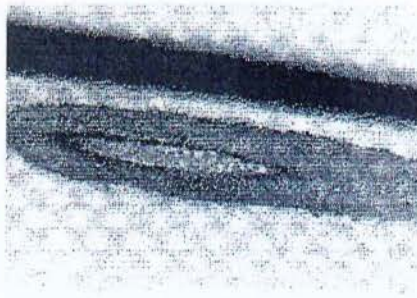
(a) Fretting corrosion on a coupling hub. Wear by dimensional loss on the teeth (with effect of misalignment)



(b) Wear by fretting corrosion on a coupling



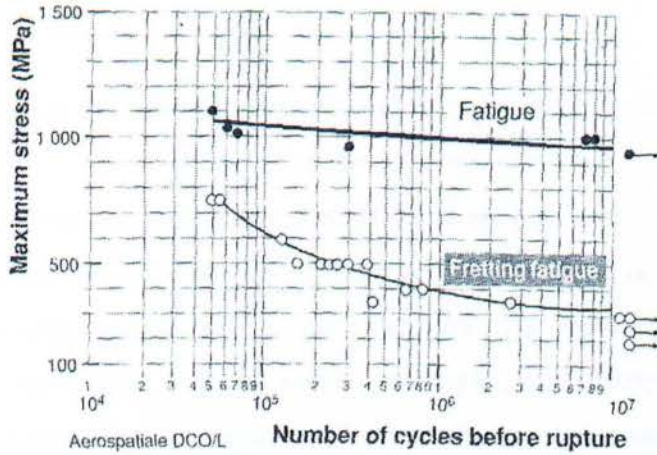
(c) Fretting corrosion on a conical joint



(d) Consequences of friction on a suspension leaf spring. Different degrees of oxidation: black ( $Fe_3O_4$ ) and red ( $Fe_2O_3$ )

**Σχήμα 4.6.1. Φθορά από διάβρωση λόγω τριβής – παραδείγματα (βλέπε εικόνα).**

- Εάν το παραπάνω φαινόμενο συνοδεύεται από οξείδωση των υπολειμμάτων → Διάβρωση λόγω τριβής.
- Η ανάπτυξη των φαινομένων φθοράς εξαρτάται από την ικανότητα για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων φθοράς : ανοικτών ή κλειστών επαφών, το πλάτος των μικρό-μετατοπίσεων του άξονα κίνησης, κ.λπ..



Επίδραση της διάβρωσης λόγω τριβής στο όριο κόπωσης. J. Gurland [23], B. Zhang, L. Zhou [24].

- Εξάλειψη των μικρό-μετατοπίσεων (μηχανικός σχεδιασμός)
- Εξάλειψη της ολίσθησης (αυξημένη δύναμη σύσφιξης).
- Παγίδευση ή απομάκρυνση των υπολειμμάτων (τοπογραφία, κ.λπ.).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### 5.1 Αξιολόγηση των χαρακτηριστικών θραύσης των κεραμικών επιστρωμάτων σε υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα

Η αντοχή του εξοπλισμού του επιστρωμένου κεραμικού κυρίως εξαρτάται από τη δυνατότητα των επιστρωμάτων να στηρίζουν διαφορετικές εν χρήση συνθήκες φόρτωσης. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών σπασίματος των επιστρωμάτων δραματίζει έναν κρίσιμο ρόλο για την αξιολόγηση της απόδοσης των πολλών συστατικών, τα οποία είναι στην επιφάνεια ή/και κάτω από την επιφάνεια και αλληλεπιδρούν. Σε αυτή την μελέτη η συμπεριφορά σπασίματος των επιστρωμάτων TiN και TiAlN μελετήθηκαν κάτω από εφελκυστική φόρτωση. Τα επιστρώματα κατατέθηκαν επάνω από τα υποστρώματα ανοξειδωτου χάλυβα από μια καθοδική τεχνική απόθεσης τόξων. Η μηχανική ακεραιότητα αυτών των επιστρωμάτων μελετήθηκε χρησιμοποιώντας ένα νέο δείγμα δοκιμής, γνωστό ως περιέλιξη χαραγμένη σε εφελκυστικό δείγμα (CNT). Ένας από τους βασικούς στόχους ήταν να μελετηθεί η επίδραση της μορφής υποστρωμάτων στη ρωγμή, τα χαρακτηριστικά αρχής και διάδοσης, λήφθηκαν υπόψη οι ρεαλιστικές μορφές των μηχανικών συστατικών. Οι εφελκυστικές δοκιμές διεξήχθησαν σε Tin και TiAlN επιστρωμένα με ανοξειδωτο χάλυβα τα κυλινδρικά υποστρώματα. Τα επιστρωμένα δείγματα μετά από την εφελκυστική φόρτωση εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ανίχνευσης για να μελετηθεί η αντίδραση των επιστρωμάτων στα εφαρμοσμένα φορτία. Οι διανομές πίεσης στο κρίσιμο φορτίο των επιστρωμάτων ερευνήθηκαν αριθμητικά. Η ενδιάμεση μέγιστη πίεση και ο ρυθμός της ενέργειας που απελευθερώθηκε καθορίστηκαν χρησιμοποιώντας πειραματικές και αριθμητικές προσομοιώσεις. Διαπιστώθηκε ότι η μορφή του υποστρώματος έχει μια ισχυρή επιρροή στην έναρξη και διάδοση των ρωγμών στα εύθραυστα επιστρώματα. Συγκεντρωμένες πιέσεις προκαλούμενες από τη μορφή του υποστρώματος μπορεί να οδηγήσουν σε μια πρόωρη αποτυχία των επιστρωμένων συστατικών. Η προτεινόμενη νέα μέθοδος βρίσκεται στο να είναι αποτελεσματική για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των επιστρωμάτων υπό

συνθήκες πίεσης που αντιμετωπίζονται κατά τη διάρκεια των πραγματικών εφαρμογών.

Τα κεραμικά επιστρώματα παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση των ιδιοτήτων σε μια επιφάνεια ενός υποστρώματος. Τα επιστρωμένα συστατικά υποβάλλονται σε εξωτερικά φορτία, ρωγμές εμφανίζονται συνήθως στα επιστρώματα πριν από την αποτυχία(χάραγμα) του υποστρώματος. Αυτό καταδεικνύει ότι η αξιολόγηση της φορτισμένης μεταφέρουσας ικανότητας του επιστρώματος είναι σημαντική να αναπτυχθεί σε ένα ανθεκτικά επιστρωμένο συστατικό. Στα κεραμικά επιστρώματα, οι ρωγμές χαρακτηριστικά ξεκινούν και διαδίδονται σε όλο το πάχος του επιστρώματος έως ότου φθάνει στη διεπαφή του επιστρωμένου υποστρώματος. Συνεπώς, η ρωγμή μπορεί είτε να διαδοθεί στο υπόστρωμα προκαλώντας αύξηση του υποστρώματος, και διαδίδεται κατά μήκος της διεπαφής προκαλώντας αποκόλληση η να σταματήσει στην διεπαφή. Η διακοπή της ρωγμής στη διεπαφή θα οδηγήσει σε ένα νέο σχηματισμό ρωγμών αλλού στο επίστρωμα κατά τη διάρκεια περαιτέρω φόρτωσης, γνωστή σαν το πολλαπλό ράγισμα. Αυτή η πτυχιακή ερευνά το πολλαπλό ράγισμα των επιστρωμάτων TiN και TiAlN στα υποστρώματα ανοξείδωτου χάλυβα για τις περιπτώσεις όπου οι ρωγμές παύουν στη διεπαφή του επιστρώματος και του υποστρώματος.

Το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) είναι πολύ σκληρό, αδρανές κεραμικό υλικό, συνήθως χρησιμοποιείται σαν επίστρωμα στο χάλυβα, τα συστατικά του κράματος τιτανίου και του αλουμινίου χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν τις ιδιότητες της επιφάνειας του υποστρώματος. Όταν εφαρμόζονται ως λεπτό ή παχύ επίστρωμα, ανάλογα με την εφαρμογή, το νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) παρέχει την σκληρότητα και προστατεύει κατά την κοπή και την ολίσθηση της επιφάνειας. Αυτά τα επιστρώματα είναι ελκυστικά για διακοσμητική χρήση λόγω της χρυσής εμφάνισης του χρώματος τους και για την μη-τοξική εξωτερική όψη στα ιατρικά μοσχεύματα. Επίσης, την μη-τοξικότητα τους την συναντάμε στα τρόφιμα και στις οδηγίες διοίκησης φαρμάκων επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτές τις εφαρμογές. Αυτό το κεραμικό επίστρωμα έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την χρήση στα εμφυτεύματα μοσχευμάτων ειδικά στα ισχίων μοσχεύματα αντικατάστασης λόγω των υψηλών επιπέδων βίο-συμβατότητας.

Το νιτρίδιο αλουμινίου τιτανίου (TiAlN) είναι επίσης μια δυνατή κεραμική επίστρωση που χρησιμοποιείται σε μια σειρά από εφαρμογές κατεργασίας και επεξεργασίας μετάλλων. Η προσθήκη του αλουμινίου στο νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) προσφέρει την ανώτερη απόδοση σε πολλές εφαρμογές λόγω της υψηλής αντίστασης

σε διάβρωση και σκληρότητα. Επίσης παρέχει μια σειρά από χρώματα επιστρώματος που ποικίλλουν από το μαύρο σε χάλκινο εξαρτώμενο από την αναλογία του νιτρίδιου του τιτανίου (TiAlN). Ο σχηματισμός ενός προστατευτικού στρώματος οξειδίου του αλουμινίου στην επιφάνεια του επιστρώματος νιτρίδιου του τιτανίου (TiAlN) βοηθάει στην αντίσταση σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας (μέχρι και 800°C) σε σύγκριση/έναντι με αυτής (μέχρι 500°C) των επιστρωμάτων νιτρίδιου του τιτανίου (TiN).

Ο MengHC, Ludema[25] πρότειναν μια εφελκυστική δοκιμή ή μια τεχνική επιμήκυνσης του υποστρώματος για να αξιολογηθεί η τελική μέγιστη πίεση της διεπαφής επιστρώματος-υποστρώματος εναποθέτοντας ένα κεραμικό επίστρωμα πάχους 60 nm σε ένα όλκιμο υπόστρωμα από καθαρό χαλκό. Το δείγμα υποβλήθηκε σε εφελκυστική φόρτωση έως ότου ρωγμές παρατηρήθηκαν στην επιφάνεια της επίστρωσης. Η πίεση στο σημείο της έναρξης της ρωγμής χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η δύναμη του εφελκυστικού σπασίματος, και η περιοδικότητα της σταθερής κατάστασης μεταξύ των ρωγμών χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσει την τελική μέγιστη πίεση της διεπαφής. Αυτή η μέθοδος τροποποιήθηκε περαιτέρω θεωρητικά και πειραματικά όπως περιγράφεται κατά Kim και λοιποί μελετήθηκε η συμπεριφορά σπασίματος συνεκτικού ραγίσματος και επόμενη κάμψη απ-ελασματοποίησης στη διεπαφή μεταξύ μιας αδαμαντοειδούς ταινίας άνθρακα (DLC) σε ανοξειδωτο χάλυβα (160lm πάχους) συγκράτηση υποστρώματος χρησιμοποιώντας micro-εφελκυστική φόρτωση. Η ενδιάμεση ενέργεια προσκόλλησης υπολογίστηκε με τον καθορισμό του μεγέθους της διαχωρισμένης περιοχής και παρατηρήθηκε χρησιμοποιώντας μια ιονική ακτίνα και ανίχνευση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Ο TurchaninovSP, καιHutchings[26],[27] αναλύοντας τις ενδιάμεσες μηχανικές ιδιότητες ενός SiOx/Au και SiOx/Cu διασύνδεουν με την τροποποίηση της γεωμετρίας που προτείνεται από τον MengHC, Ludema[25] στην κυλινδρική γεωμετρία. Η ανάλυση τους χρησιμοποιώντας ένα κλασικό μοντέλο/πρότυπο της συνεχόμενης ελαστικότητας ήταν αποτελεσματική στον καθορισμό όχι μόνο της ενδιάμεσης μέγιστης πίεσης, αλλά και την δύναμη δεσμών. Ο TurchaninovSP, καιHutchings [26],[27] θεωρητικά ανέλυσαν τις ενδιάμεσες μηχανικές ιδιότητες ενός νιτρίδιου του τιτανίου TiN επιστρωμένο ανοξειδωτο χαλύβδινο σύρμα που χρησιμοποιεί την εφελκυστική φόρτωση. Τα πειραματικά αποτελέσματα καθόρισαν ότι ο μηχανισμός αποτυχίας ενός επιστρώματος νιτρίδιου του τιτανίου TiN υπό εφελκυστική φόρτωση έντονα εξαρτώνται από το πάχος του επιστρώματος.

Σε πρακτικές εφαρμογές, τα επιστρώματα εφαρμόζονται σχετικά σε τραχύς επιφάνειες σε άκρες και γωνίες. Όταν το υπόστρωμα δεν είναι τέλεια ομαλό και επίπεδο, μεγάλες συγκεντρώσεις πίεσης παράγονται στη διεπαφή του επιστρωμένου συστήματος. Στις εφαρμογές των κεραμικών επιστρωμάτων, ένα σύστημα επιστρώματος-υποστρώματος υποβάλλεται σε διάφορες εξωτερικές φορτώσεις που αυξάνουν την πιθανότητα της αποτυχίας και τις κατασμίλευσης του επιστρώματος. Μια κρίσιμη πτυχή ενός οποιουδήποτε συστήματος επιστρώματος είναι η μορφή του υποστρώματος. Η συνήθης χρησιμοποιούμενη δοκιμή ανάλυσης υποθέτει τα επιστρώματα να είναι σε επίπεδα υποστρώματα. Εντούτοις, οι πιο ρεαλιστικές εφαρμογές των επιστρωμάτων είναι στα συστατικά με κυρτές επιφάνειες. Οι πρόσθετες συγκεντρώσεις πίεσης λόγω της μορφής του υποστρώματος συμβάλλουν στην αποτυχία του επιστρωμένου συστήματος αυξάνοντας την πιθανότητα της έναρξης και διάδοσης των ρωγμών. Επομένως, ένας από τους στόχους αυτού του άρθρου είναι να εξετάσει την κυρτότητα του υποστρώματος και να μελετήσει την επίδραση της μορφής του υποστρώματος στην αποτυχία της συμπεριφοράς των επιστρωμάτων.

Διάφορες μηχανικές δοκιμές όπως η εγκοπή, δοκός που κάμπτεται, εφελκυσμός και δοκιμές γδαρσίματος χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν την ενδιάμεση δύναμη μεταξύ του επιστρώματος και του υποστρώματος. Μια περιεκτική αναθεώρηση από διαφορετικές τεχνικές για τη μέτρηση της ανθεκτικότητας μιας λεπτής ταινίας δίνεται από τον TurchaninovSP. [26] και λοιποί. Μεταξύ αυτών των δοκιμών, η εφελκυστική δοκιμή είναι μια κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για να καθορίσει την προσκόλληση του επιστρώματος εξ' αιτίας της απλότητας και της αξιοπιστίας του στον υπολογισμό της προσκόλλησης της διεπαφής επιστρώματος-υποστρώματος. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τα σκληρά επιστρώματα σε μαλακά υποστρώματα όπου το γδάρισμα ή η μέθοδος εγκοπής μπορεί να προκαλέσει σοβαρές/δριμύς παραμορφώσεις του υποστρώματος. Οι δοκιμές της δοκού που κάμπτεται μελετώνται εκτενώς και μια μεγάλη ποικιλία από γεωμετρικές δοκιμές από λύσεις πιέσεων καταπόνησης είναι διαθέσιμες σε αυτή τη μελέτη. Οι δοκιμές της δοκού που κάμπτεται δεν μπορούν αποτελεσματικά να μιμηθούν την φόρτωση πίεσης καταπόνησης που πραγματικά κατασκευάζουν τα μέρη με εμπειρία, ειδικά όταν αποτυγχάνει το επίστρωμα ως αποτέλεσμα εσωτερικών πιέσεων.

Τα περιφερειακά χαραγμένα εφελκυστικά (CNT) δείγματα δοκιμής έχουν επικυρωθεί και εκτενώς χρησιμοποιηθεί ως μια ελπιδοφόρα τεχνική για τον υπολογισμό της "τυποποιημένης" ανθεκτικότητας σπασίματος των υλικών. Η CNT τεχνική έχει

καθιερωθεί επίσης ως μια αποτελεσματική τεχνική για την ενδιάμεση ανθεκτικότητα σπασίματος όλκιμου επιστρώματος. Σε αυτό το έγγραφο, η μηχανική ακεραιότητα ενός κεραμικού ευθραύστου επιστρώματος μελετάται χρησιμοποιώντας τα δείγματα CNT, τα οποία είναι ικανά να αντιγράψουν πραγματικές εφαρμογές. Η CNT τεχνική εξέτασης χρησιμοποιήθηκε για να συσχετίσει το ραγισμένο επίστρωμα σαν μια λειτουργία του εφαρμοσμένου φορτίου και της μορφής του υποστρώματος.

#### Γεωμετρία δειγμάτων και πειραματική οργάνωση

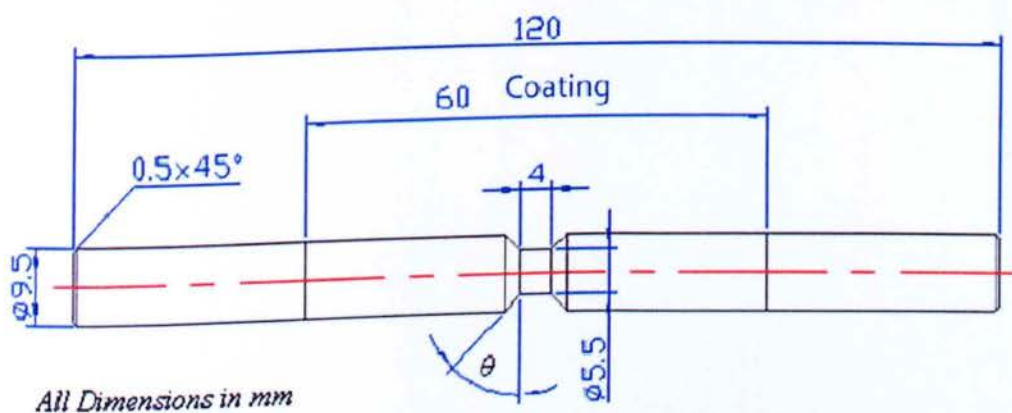
Σχήμα 5.1. Παρουσιάζει τη διαμόρφωση των δειγμάτων CNT που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση σπασίματος επιστρώματος. Τα υποστρώματα προετοιμάστηκαν από κρύα ανοπτημένα, τύπου 321, ράβδους ανοξείδωτου χάλυβα διαμέτρου 9.52 mm. Οι ράβδοι κόπηκαν σε μήκος 120 mm και μια εγκοπή διαμορφώθηκε στο μέσο της κυλινδρικής ράβδου. Η εγκοπή κόπηκε διαγωνίως σε γωνία  $0^\circ$  ( $\theta$ ) όπως φαίνεται στο Σχ.5 και γυαλίστηκε με γυαλόχαρτο 1200 grit για να λάβει μια ομαλή επιφάνεια.

Το υπόστρωμα, ανοξείδωτου χάλυβα-21 βαθμών είναι βασικού ωστενιτικού 18/8 χάλυβα (βασικού βαθμού 304) και σταθεροποιημένος από τις προσθήκες τιτανίου (321). Έχει υψηλή στερεότητα, σταθερότητα φάσης και αντίσταση σε απολέπιση [Η απομάκρυνση αλάτων ή σκουριάς από μια μεταλλική επιφάνεια] και σε διάβρωση, η οποία το καθιστά κατάλληλο για τις εφαρμογές όπου οι θερμοκρασίες λειτουργίας μπορούν να φθάσουν μέχρι σε  $900^\circ\text{C}$ . Η σύνθεση του είναι 0.05% C, 17.36% Cr, 9.32% Ni, 0.30% Mo, 0.47% Cu, 1.72% Mn, 0.02% N, 0.27% Si, 0.52% Ti, 0.022% P, 0.024% S, και το υπόλοιπο είναι Fe. Το νιτρίδιο του τιτανίου TiN και νιτρίδιο αλουμινίου τιτανίου TiAlN επίστρωμα κατατέθηκαν στην εγκοπή σε ένα πάχος περίπου 4  $\mu\text{m}$  πέρα από το μήκος των 60 mm όπως φαίνεται στο {Σχ. 5.2}. Οι δύο άκρες των υποστρωμάτων αφέθηκαν χωρίς επίστρωση για να αποφευχθεί η ζημιά της επίστρωσης κατά την διάρκεια της σύσφιξης της εφελκυστικής δοκιμής. Πριν από το επίστρωμα, τα δείγματα πρώτα καθαρίστηκαν με υπερήχους στην αιθανόλη και έπειτα ξανά καθαρίστηκαν χρησιμοποιώντας με βομβαρδισμό πλάσματος αργού. Και τα δύο επιστρώματα νιτρίδιο του τιτανίου TiN και νιτρίδιο αλουμινίου τιτανίου TiAlN κατατέθηκαν χρησιμοποιώντας την καθοδική διαδικασία απόθεσης τόξων. Η καθοδική απόθεση τόξων είναι μια φυσική τεχνική απόθεσης ατμού (PVD), στην οποία ένα ηλεκτρικό τόξο χρησιμοποιείται για να ατμοποιήσει τα υλικά από έναν καθοδικό στό-

χο. Τα ατμοποιημένα υλικά αντιδρούν έπειτα με το άζωτο για να σχηματίσουν επιστρώματα νιτρίδιων στα υποστρώματα. Τα επιστρώματα διαμορφώθηκαν χρησιμοποιώντας μιας μεγάλης-περιοχής καθοδική απόθεση τόξων που χρησιμοποιεί υψηλής-καθαρότητας στόχους του τιτανίου και αλουμινίου του τιτανίου

Το {Σχ. 5.3} παρουσιάζει τα σχέδια των ακτίνων διάθλασης X (XRD) των επιστρωμάτων νιτρίδιο του τιτανίου TiN και νιτρίδιο αλουμινίου τιτανίου TiAlN που κατατίθενται στο υπόστρωμα ανοξειδωτού χάλυβα που χρησιμοποιεί CuK $\alpha$  ραδιενέργεια. Οι μετρήσεις XRD πραγματοποιήθηκαν με βαθμό ανίχνευσης 1° ανά λεπτό σε βήμα 0.02° και σε περιοχή γωνίας 2 $\theta$  που καθορίστηκε μεταξύ 30° και 90°. Επιπλέον στις XRD ακμές του υποστρώματος ανοξειδωτού χάλυβα {Σχ. 3a}, τέσσερις αιχμές διάθλασης [(1.11), (2.00), (3.11) και (2.22)] μπορούν σαφώς να αναγνωριστούν από τα σχέδια XRD των επιστρωμάτων TiN όπως φαίνεται στο Σχ. 3b. Οι αιχμές διάθλασης δεν εμφανίζονται από τα επιστρώματα Ti<sub>33</sub>Al<sub>67</sub>N στο σχέδιο XRD όπως φαίνεται στο σχέδιο 3c. Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη συγκέντρωση Al, η οποία κατέληξε σε λεπτότερους κρυσταλλίτες ή άμορφες φάσεις στα επίστρωμα TiAlN.

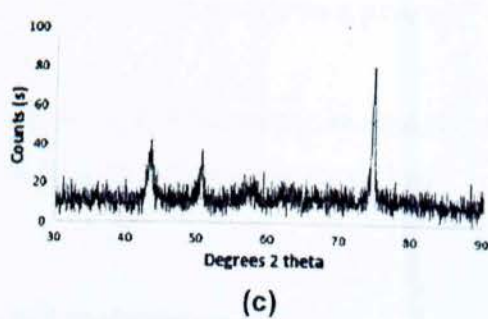
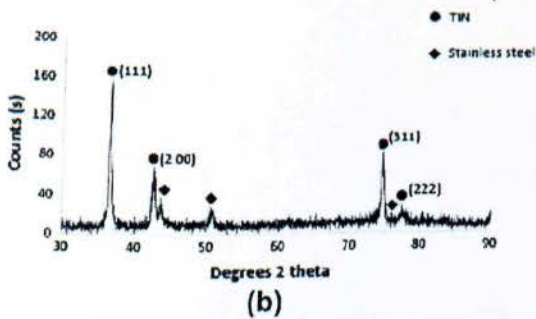
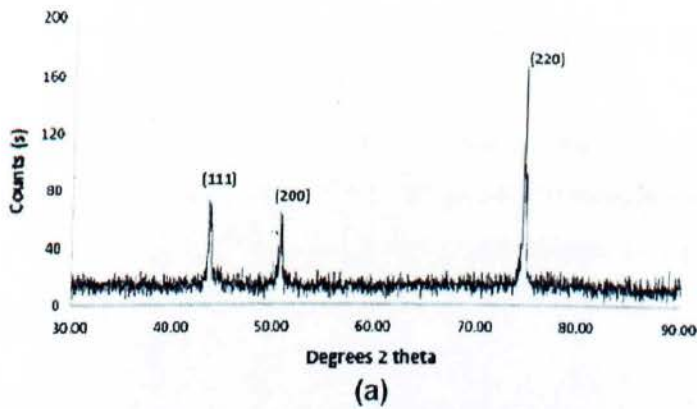
Οι επιστρωμένα δείγματα CNT φορτώθηκαν χρησιμοποιώντας έναν Instron 5500R παγκόσμια μηχανή δοκιμών για uni-αξονική δοκιμών εφελκυσμού. Το εφελκυστικό φορτίο εφαρμόστηκε σε ποσοστό/βαθμό 0.1 mm/min χρησιμοποιώντας μετατοπισμένο τρόπο λειτουργίας με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα αποκτήσεων στοιχείων. Τα CNT δείγματα υποβλήθηκαν σε διαφορετική καταπόνηση για την ανάλυση του βαθμιαίου σχεδίου σπασίματος.



{Σχήμα 5.1}. Ένα χαρακτηριστικό δείγμα CNT με εγκοπή (U-notch) γωνίας  $\theta$ , όπου το  $\theta$  μπορεί να ποικίλει για να αξιολογήσει την επίδραση της συγκεντρωμένης πίεσης στην ενδιάμεση μέγιστη πίεση και το ποσοστό της ενέργειας που απελευθερώθηκε



{Σχήμα 5.2}. Κεραμικά επιστρώματα σε χαραγμένα κυλινδρικά ανοξείδωτου χάλυβα υποστρώματα (a) TiN επιστρώσεις σε ένα CNT δείγμα και (b) TiAlN επιστρώσεις σε ένα CNT δείγμα.



{Σχήμα 5.3}. (a) XRDυπόδειγμα(σχέδιο) του υποστρώματος ανοξειδωτου χάλυβα μόνο, (b) XRDυπόδειγμα(σχέδιο) του υποστρώματος TiN που εναποθέεται σε ένα υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα και (c) XRDυπόδειγμα(σχέδιο) ενός TiAlN επιστρώματος που εναποθέεται σε ένα υπόστρωμα ανοξειδωτου χάλυβα. Την υψηλότερη συγκέντρωση σε Αλουμίνιο (Al) κάνει το επίστρωμα άμορφο ή λεπτότερους κρυσταλλίτες.

## 5.2 Αποτελέσματα αξιολόγησης των χαρακτηριστικών θραύσης των κεραμικών επιστρωμάτων

Οι πολλαπλές ρωγμές των κεραμικών επιστρωμάτων στα δείγματα CNT υποβλήθηκαν σε διαφορετικές εφελκυστικές δοκιμές διασταυρώθηκαν τμηματικά και αναλύθηκαν κάτω από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Τα SEM μικρογραφήματα των μη δοκιμασμένων δειγμάτων παρουσίασαν ομοιόμορφο πάχος επιστρώματος κατά μήκος της περιφέρειας των υποστρωμάτων σε διαφορετικές θέσεις της εγκοπής. Το πάχος υπολογίστηκε να είναι 4 μm από τα διαγώνια τεμαχισμένα δείγματα όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1. Τα δείγματα αναλύθηκαν για να καθορίσουν



την κρίσιμη πίεση στη οποία άρχισαν οι ρωγμές και η κλιμάκωση μεταξύ των ρωγμών στα επιστρώματα.

Σε αυτήν την μελέτη, ο (AR) πρότυπο Agrawal και Raj [28] χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της ενδιάμεσης μέγιστης πίεσης των επιστρωμάτων. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, η ενδιάμεση μέγιστη πίεση ( $\hat{t}$ ) συσχετίζεται με την εφελκυστική πίεση του επιστρώματος ( $\sigma_c$ ) από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\hat{t} = \frac{\pi \delta \sigma_c}{\lambda} \quad (1)$$

όπου  $\delta$  είναι το πάχος(πυκνότητα) του επιστρώματος, και  $\lambda$  είναι η μέγιστη ρωγμή κλιμάκωσης Alfano G, Crisfield Ma [30].

Επομένως, για την αξιολόγηση την ενδιάμεσης μέγιστης πίεσης, οι παράμετροι είναι η εφελκυστική δύναμη επιστρώματος ( $\sigma_c$ ) και η κλιμάκωση μεταξύ των ρωγμών  $\hat{\lambda}$  στο



{Σχήμα 5.2.1}. SEM μικρό-γράφημα του διαγώνια τεμαχισμένου επιστρώματος του νιτρίδιου του τιτανίου TiN σε υπόστρωμα ανοξείδωτου χάλυβα πριν από την φόρτωση.

επίστρωμα {Σχ.5.2.2}. Αρχικά, η κρίσιμη φόρτωση (φόρτωση στην οποία το επίστρωμα ράγισε αρχικά) καθορίζεται από τα πειράματα. Το πειραματικά αποκτηθέν κρίσιμο φορτίο εφαρμόστηκε στο πρότυπο πεπερασμένου στοιχείου. Η πίεση του άξονα που παράγεται στη χαμηλότερη γωνία εγκοπών υποτίθεται ότι είναι η πίεση σπασίματος του συστήματος επιστρώματος-υποστρώματος.

Το κρίσιμο ποσοστό απελευθέρωσης ενέργειας ( $G_{\text{critical}}$ ) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$G_{\text{critical}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c^2 \delta}{E_c} \pi g(\alpha, \beta) \quad (2)$$

Όπου  $g(\alpha, \beta)$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις παραμέτρους Dundurs ( $\alpha$  και  $\beta$ ).

Για προβλήματα πίεσης στα αεροπλάνα, όπου  $G_c$ ,  $V_c$  και  $E_c$  είναι ο συντελεστής

$$\alpha = \frac{\bar{E}_c - \bar{E}_s}{\bar{E}_c + \bar{E}_s}$$

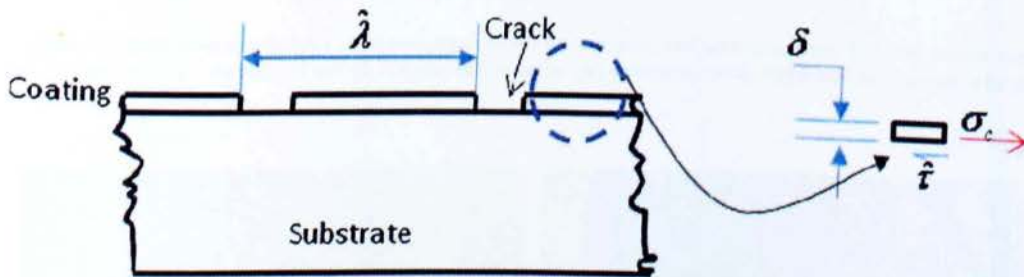
και

$$\beta = \frac{G_c(1-2\nu_s) - G_s(1-2\nu_c)}{2G_c(1-\nu_s) + 2G_s(1-2\nu_c)}$$

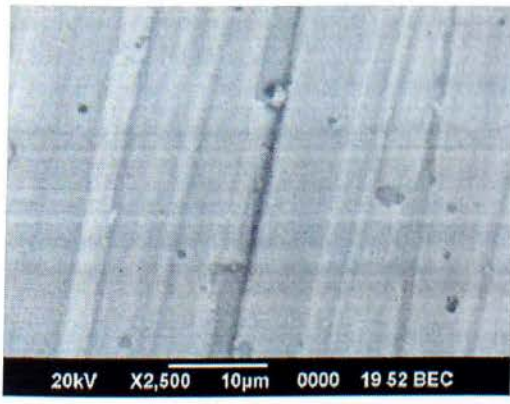
όπου

$$\bar{E} = \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \quad \text{και} \quad \bar{E}_s = \frac{E_s}{1-\nu_s^2}$$

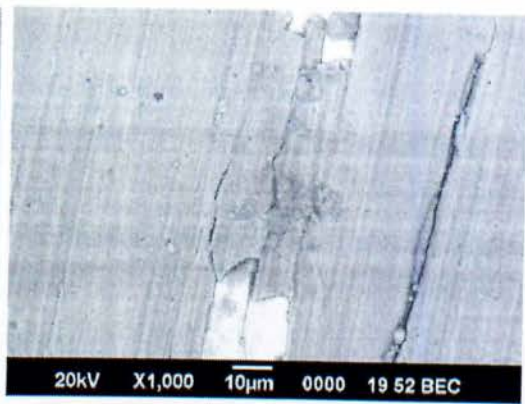
διάτμησης, η αναλογία Poisson και Young's modulus του επιστρώματος, αντίστοιχα,  $G_s$ ,  $\nu_s$  και  $E_s$  είναι ο συντελεστής διάτμησης, η αναλογία Poisson και Young's modulus του υποστρώματος, αντίστοιχα. Σε αυτήν την μελέτη, η παραμόρφωση υποτίθεται ότι είναι ελαστική



{Σχήμα 5.2.2}. Σχηματική αναπαράσταση του περιοδικού ραγίσματος σε όγκιμο υπόστρωμα κάτω από εφελκυστική φόρτωση.

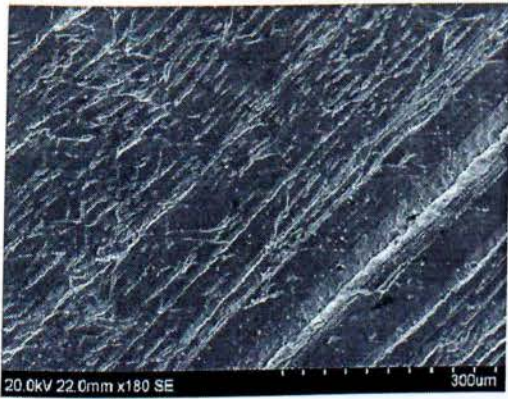


(a)

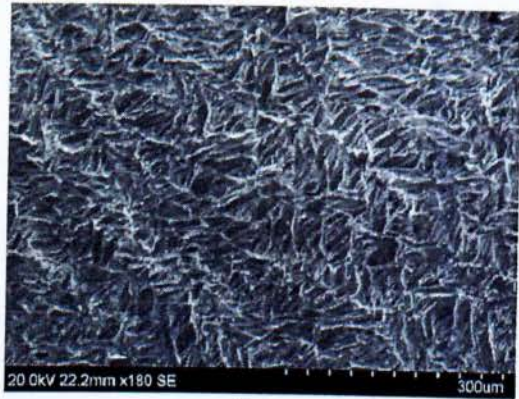


(b)

{Σχήμα 6}. SEM μικρο-γράφημα στη γωνία εγκοπών που παρουσιάζει (a) τον αρχικό σχηματισμό ρωγμών στο κρίσιμο φορτίο, και (b) την κατασμίλευση του επιστρώματος στην υψηλότερη φόρτωση.

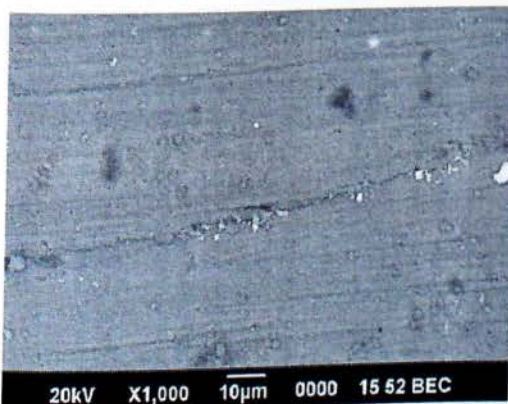


(a)

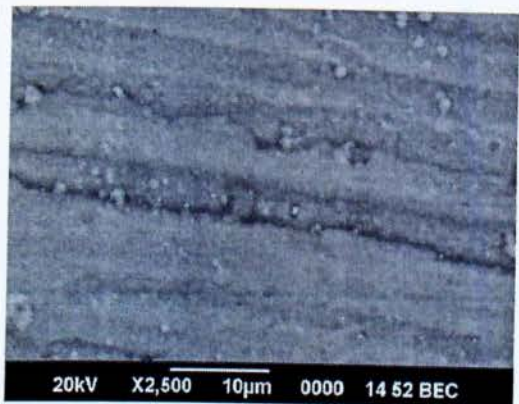


(b)

{Σχήμα 7}. SEM εικόνες που παρουσιάζουν μορφολογία σπασίματος του επιστρώματος TiN στο τελικό φορτίο της εσωτερικής ακτίνας (a) κοντά στη γωνία εγκοπών, (b) συνυφαίνουν/συμπλέκουν τις ρωγμές στο μέσο της γωνίας εγκοπών.

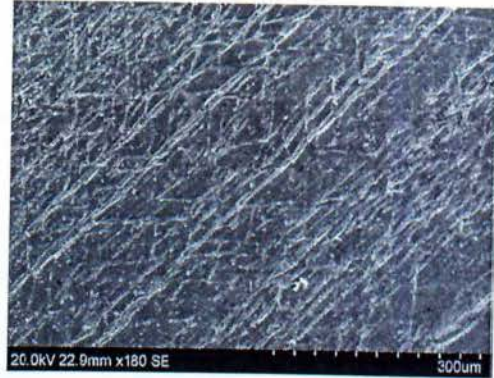
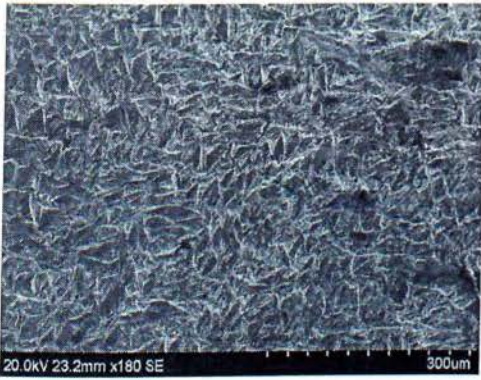


(a)



(b)

{Σχήμα 8}. Μικρο-γράφημα SEM των επιστρώματων TiAlN στη γωνία εγκοπής (a) στο κρίσιμο φορτίο, (b) σε αυξανόμενο φορτίο.



{Σχήμα 9}. Μικρο-γράφημα SEM που παρουσιάζει μορφολογία σπασίματος του επιστρώματος TiAlN στο τελικό φορτίο (a) μέσω τμήμα της εσωτερικής ακτίνας, (b) εσωτερική ακτίνα κοντά στην εγκοπή, (c) κατασμίλευση του επιστρώματος στη γωνία εγκοπών.

για τις εύθραυστες επιστρώσεις και την ελαστικό-πλαστικότητα των όλκιμων υποστρωμάτων Banks-SillsL [33].

### 5.3 Μηχανικές ιδιότητες (Σκληρότητα $\approx$ Κάμψη/Εφελκυσμός)

Το κρίσιμο φορτίο στο οποίο η ρωγμή άρχισε στο επίστρωμα καθορίστηκε πειραματικά. Το υπόστρωμα και το επίστρωμα έχουν περίπου την ίδια πίεση μέχρι το κρίσιμο φορτίο. Το υπόστρωμα παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι το κρίσιμο φορτίο.

Από τις πειραματικές μετρήσεις το κρίσιμο φορτίο καθορίστηκε ως 4500 N για το TiN σύστημα χάλυβα και 1800 N για το TiAlN σύστημα χάλυβα AlfanoG, CrisfieldMa [29]. Η πίεση σπασίματος καθορίστηκε χρησιμοποιώντας πεπερασμένη ανάλυση στοιχείων εφαρμόζοντας το κρίσιμο φορτίο που αποκτήθηκε πειραματικά στο πεπερασμένο πρότυπο στοιχείων. Η πίεση σπασίματος για TiN ήταν 2,4 GPa και για TiAlN ήταν 600 MPa XieD, SalviAG [32]. Η εσωτερική ακτίνα, εξωτερική ακτίνα και κάθετη πλευρά της εγκοπής είναι σημειωμένες στο Σχ. 2. Οι εγκάρσιες ρωγμές αρχικά παρατηρήθηκαν στη γωνία της εγκοπής στο κρίσιμο φορτίο (όπως φαίνεται στο Σχ. 6a για το επίστρωμα TiN και Σχ. 8a για το επίστρωμα TiAlN). Δεδομένου ότι το φορτίο αυξήθηκε, το επίστρωμα διαχωρίστηκε από την γωνία της εγκοπής όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 6b. Κάθετες ρωγμές στον άξονα του εφελκυσμού των δειγμάτων αναπτύχθηκαν στο επίστρωμα στην εσωτερική ακτίνα της εγκοπής.

#### Πίνακας 1

1. Μηχανικές Ιδιότητες ενός επιστρώματος και υποστρώματος που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση του τελικού στοιχείου. Τα οποία μετρήθηκαν με σύστημα ABAQUS [31].

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (Mpa)	Yield offset (%)	Hardening index n
Coating (TiN)	640	0.25	-	-	-
Coating (TiAlN)	310	0.2	-	-	-
Substrate (stainless steel)	210	0.28	300	0.2	5

Τα δείγματα φορτώθηκαν με το ύψιστο φορτίο και εξετάστηκαν για ρωγμές. Καμία ρωγμή δεν παρήχθη στην κάθετη πλευρά της εγκοπής. Το σχέδιο ρωγμών στο ύψιστο φορτίο στη θέση της εσωτερικής ακτίνας φαίνεται στα Σχ. 7 και 9.

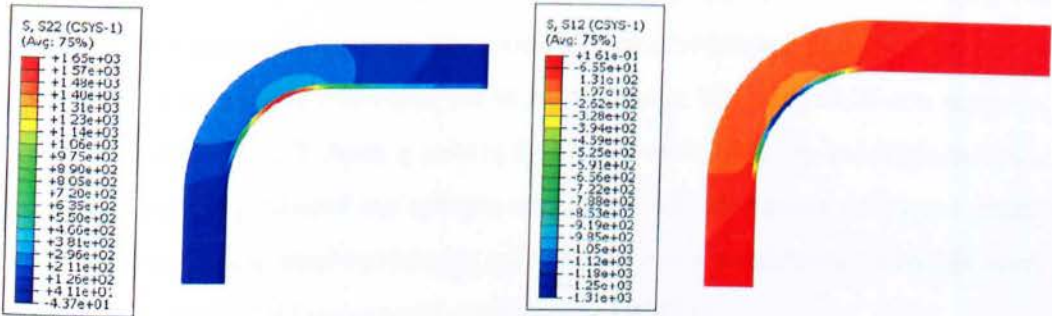
Η πεπερασμένη διαμόρφωση στοιχείων της διεπαφής του επιστρώματος-υποστρώματος διεξήχθη σε ένα αξιο-συμμετρικό δείγμα CNT χρησιμοποιώντας τον FE διαλυτή ABAQUS [43]. Το CNT δείγμα διαμορφώθηκε με μια "U" εγκοπή 2 mm σε πλάτος 4 mm στο μέσο του δείγματος. Οι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για την FE διαμόρφωση δίνονται στον Πίνακα 1. Οτομέας πίεσης γύρω από τη διεπαφή επίστρωμα-υποστρωμάτων βρέθηκε να είναι κρίσιμος για την έναρξη και τη διάδοση

των ρωγμών. Για να ληφθούν ακριβείς διανομές πίεσης στο επίστρωμα-υπόστρωμα διεπαφής, διγραμμικά (4-κόμβων) τετράπλευρα, μειωμένα στοιχεία ολοκλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν με τον έλεγχο κλεψυδρών. Τα επιστρώματα TiN και TiAlN και το υπόστρωμα χάλυβα υποτέθηκαν ότι ήταν ομοιογενή και ιστροπικά. Για να αξιολογηθεί η ενδιάμεση διανομή πίεσης της διεπαφής επιστρώματος-υποστρωμάτων χρησιμοποιείται η FE ανάλυση, ένα πολύ λεπτό πλέγμα στην διεπαφή χρησιμοποιήθηκε. Αυτό θα είχε οδηγήσει σε υψηλό υπολογιστικό χρόνο λόγω των μεγάλων διαφορών στις διαστάσεις επιστρώματος και υποστρωμάτων. Για να παρακαμφθεί αυτό, μια υπό-προτύπου προσέγγιση υιοθετήθηκε. Αυτό περιλαμβάνει ένα σφαιρικό πρότυπο του πιο χονδροειδών πλέγματος και του υπό-προτύπου του σχετικά λεπτότερου πλέγματος.

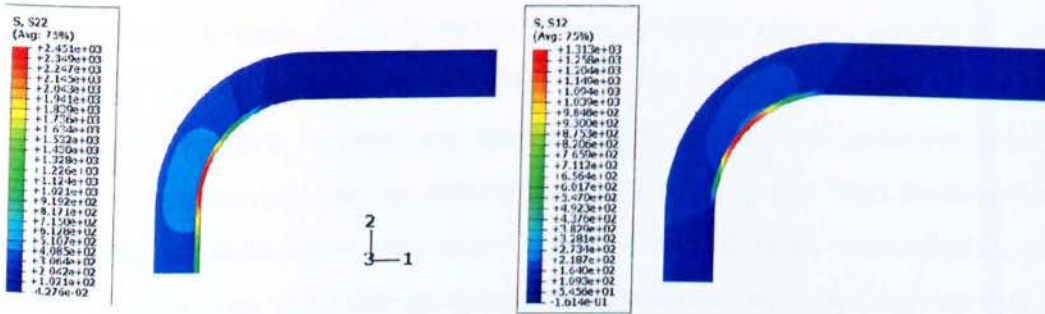
Η υπό-πρότυπο τεχνική χρησιμοποιήθηκε για την τοπική περιοχή με το καθορισμένο πλέγμα, βασισμένο στην παρεμβολή της λύσης από ένα αρχικό σφαιρικό πρότυπο επάνω στους κόμβους της κατάλληλης περιοχής στο όριο του υπό-προτύπου. Τα FE πρότυπα αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το μέγιστο από έξι υπό-πρότυπα. Εντούτοις, διαπιστώθηκε ότι η χρήση από τέσσερα υπό-πρότυπα ήταν επαρκής για να παρέχει τις συγκεντρωμένες λύσεις πίεσης. Έτσι ο βέλτιστος αριθμός χρησιμοποιούμενων υπό-προτύπων ήταν τέσσερα. Ο τομέας πίεσης μέσα στο τέταρτο υπό-πρότυπο του CNT δείγματος στο κρίσιμο φορτίο παρουσιάζεται στο Σχ. 10 και 11. Κάθε υπό-πρότυπο ήταν έναντι του προηγούμενου υπό-προτύπου ή της σφαιρικής πρότυπης χρησιμοποιώντας την μέθοδο επικάλυψων για να εξασφαλίσει την απουσία αποκλίσεων στα αποτελέσματα.

Όταν το δείγμα υποβλήθηκε σε εφελκυστική φόρτωση, μέγιστες πιέσεις αναπτύχθηκαν στην διεπαφή ως αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της ακαμψίας του επιστρώματος και του υποστρώματος. Όταν η αναπτυγμένη πίεση στη διεπαφή φθάνει τη δύναμη σπασίματος υοθ επιστρώματος, εύθραυστες ρωγμές αρχίζουν στο επίστρωμα, ιδιαίτερα στη διεπαφή του όλκιμου υποστρώματος. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις τιμές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενδιάμεσης μέγιστης πίεσης, ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης και αδιάστατη παράμετρος  $g(\alpha, \beta)$ . Εδώ το μοντέλο A-R χρησιμοποιήθηκε όπως δίνεται από Eq. (1) για να αξιολογήσει την ενδιάμεση μέγιστη πίεση που υπολογίστηκε να είναι  $s=354.6$  MPa για το σύστημα επίστρωμα-υποστρωμάτων TiN και  $83.7$  MPa για το σύστημα επίστρωμα-υποστρωμάτων TiAlN.

Η ανθεκτικότητα σπασίματος από την άποψη του ποσοστού της κρίσιμης ενεργειακής απελευθέρωσης του επιστρώματος υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2). Η αδιάστατη



{Σχήμα 10}. Υπό-πρότυπο που παρουσιάζει διανομή πίεσης κανονική και κατά μήκος στις επιφάνειες επιστρώματος ενός TiN επιστρώματος-χάλυβα του συστήματος υποστρωμάτων που χρησιμοποιεί 0° γωνία εγκοπής σε CNT δείγμα.



{Σχήμα 11}. Υπό-πρότυπο που παρουσιάζει (α) διαμήκη κανονική διανομή πίεσης, (β) διανομή μέγιστης πίεσης ενός TiN επιστρώματος-χάλυβα του συστήματος υποστρωμάτων χρησιμοποιώντας 0° γωνία εγκοπής σε δείγμα CNT.

### Πίνακας 2

Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενδιάμεσης μέγιστης πίεσης και του κρίσιμου ποσοστού ενεργειακής απελευθέρωσης.

	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_c$ (MPa)	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	E (Gpa)	G (Gpa)	$\nu$	$g$ ( $\alpha, \beta$ )
TiN επίστρωμα	4	2400	85	640	256	0.25	1.8
TiAlN επίστρωμα	4	600	90	310	129	0.2	1.2
Χάλυβα ανοξείδωτου υποστρώματος				210	82	0.28	

σταθερά  $g(\alpha,\beta)$  λήφθηκε από την γραφική παράσταση  $g(\alpha,\beta)$  εναντίον μιας παρεχόμενης BeuthJr. [17]. Το κρίσιμο ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης έχει υπολογιστεί όπως  $G_{critical} = 101.74 \text{ J/m}^2$  για το σύστημα επίστρωμα-υποστρώματων TiN και  $8.75 \text{ J/m}^2$  για το σύστημα επίστρωμα-υποστρώματων TiAlN. Οι τιμές για την ενδιάμεση μέγιστη πίεση και του ποσοστού απελευθέρωσης βρέθηκαν σε αυτήν την μελέτη να είναι μέσα στο εύρος για τα επιστρώματα TiN και TiAlN που περιγράφονται αλλού [7, 11, 27]. Αυτή η μελέτη έχει δείξει ότι η ανάμιξη από TiN επιστρώματα με αλουμίνιο μειώνουν την κρίσιμη ενεργειακή απελευθέρωση ποσοστού σημαντικά. Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη σκληρότητα των επιστρώματων TiAlN έναντι των επιστρώματων TiN TvergaardV, HutchinsonJW [34].

### *Παρατηρήσεις*

Σε αυτό το έγγραφο, τα χαρακτηριστικά σπασίματος των επιστρώματων TiN και TiAlN σε υποστρώματα ανοξείδωτου χάλυβα εξετάστηκαν χρησιμοποιώντας περιφερειακά χαραγμένα εφελκυστικά (CNT) δείγματα. Η διανομή πίεσης των επιστρώματων στη γωνία εγχοπών στο κρίσιμο φορτίο μελετήθηκε χρησιμοποιώντας υπό-πρότυπο προσεγγίζοντας την πεπερασμένη μέθοδο στοιχείων. Έχει διαπιστωθεί ότι η φύση των πολλαπλών ραγισμάτων σε εύθραυστα κεραμικά υποστρώματα σε όλκιμα υποστρώματα κάτω από την ένταση εξαρτώνται από τη μορφή του υποστρώματος.

Η CNT μέθοδος βρέθηκε να είναι η κατάλληλη για την ανάλυση της μορφολογίας της δύναμης και θραύσης των λεπτών κεραμικών επιστρώματων υπό διαφορετικούς όρους φόρτωσης. Προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα και για την αριθμητική διαμόρφωση και για τις πειραματικές μελέτες για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών σπασίματος των επιστρώματων. Η αξο-συμμετρική γεωμετρία του δείγματος μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο της αριθμητικής ανάλυσης. Το δείγμα CNT καθιστά ικανή την αξιολόγηση της επίδρασης της κυρτότητας της επιφάνειας υποστρώματων στο αχνάρι σπασίματος λόγω της κυλινδρικής γεωμετρίας του. Επί-προσθέτως ένα πρακτικό πλεονέκτημα της CNT τεχνικής είναι η απλότητα της προετοιμασίας των δειγμάτων και της εξεταστικής διαδικασίας. Η τεχνική CNT βρέθηκε να είναι μια αξιόπιστη μέθοδος στην αξιολόγηση της απόδοσης των εύθραυστων επιστρώματων



## Τριβολογική Συμπεριφορά, Μαθηματική Ανάλυση.

### 5.4 Συμπεριφορά Σε Τριβή, Επίδραση Διαβρωτικών

Οι υλικές παραμορφώσεις και η επιρροή του πάχους επιστρώματος και του ελαστικού συντελεστή αναλύθηκαν στο τρισδιάστατο πεπερασμένο στοιχείο με μέθοδο (FEM) που διαμορφώνεται σύμφωνα με τη μικρή κλίμακα, από την πίεση, την καταπόνηση, και τις μετατοπίσεις των υπολογιστών προσομοιώσεων και από τις πειραματικές μελέτες από έναν ελεγκτή. Η μελετημένη τριβολογική επαφή ήταν μια σφαίρα διαμαντιών που γλιστρά καθώς του επιβάλλεται ομαλά αυξανόμενο φορτίο σε ένα λεπτό επίστρωμα νιτριδίων τιτανίου (TiN) και σε ένα επίπεδο υπόστρωμα χάλυβα. Η σφαίρα διαμορφώθηκε να είναι άκαμπτη, το επίστρωμα ήταν γραμμικά ελαστικό, και το υπόστρωμα χάλυβα ήταν ελαστικό-πλαστικό, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα σκλήρυνσης της πίεσης. Αποδείχθηκε ότι ένα λεπτό κεραμικό επίστρωμα TiN σε ένα υπόστρωμα χάλυβα έχει μόνο μια πολύ μικρή επίδραση στην τριβή και στις πλαστικές παραμορφώσεις (δηλ., ο σχηματισμός αυλακιού) στην επιφάνεια, αλλά αρκετές αλλαγές στην πίεση που δέχεται η επιφάνεια. Η πίεση παραμορφώσεις έδειξε πως ένα παχύτερο σκληρό επίστρωμα σε ένα μαλακό υπόστρωμα έχει καλύτερη μεταφερόμενο φορτίο ικανότητα από μια λεπτότερη. Υψηλότερες πιέσεις εφελκυσμού στο επίστρωμα/υπόστρωμα αύξηση διεπαφών ο κίνδυνος για τις ρωγμές διεπαφών και την (απελασματοποίηση)των παχύτερων επιστρωμάτων. Ένα πιο δύσκαμπτο σκληρό επίστρωμα σε ένα μαλακό υπόστρωμα έχει μια καλύτερη μεταφερόμενο φορτίοικανότητα από μια ελαστικότερη. Το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα θα προσαρμόσει τις υψηλότερες πιέσεις εφελκυσμού με το ίδιο βάθος εγχοπών έναντι του ελαστικότερου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι πολύ περισσότερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη βελτιστοποίηση των ελαστικών ιδιοτήτων του επιστρώματος από ότι προηγουμένως έχει γίνει. Σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί να είναι αποτελεσματικότερο να βελτιωθεί η αντοχή στην επιστρωμένη επιφάνεια με την εστίαση στον ελαστικό συντελεστή του επιστρώματος από ότι να μεταβάλλεται το πάχος του επιστρώματος.

## Περιγραφή και Τριβολογική Ανάλυση Επαφών

Αυτή η πτυχιακή περιγράφει την τριβολογική ανάλυση επαφών μιας άκαμπτης σφαίρας που γλιστρά σε μια σκληρή επιφάνεια από τη FEM διαμόρφωση μικρής κλίμακας, προσομοίωση πιέσεων και καταπονήσεων, και δοκιμές γρατσουνιών/ γδαρσίματος.

Τα επιστρώματα σήμερα όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τριβολογική απόδοση των προηγούμενων προϊόντων. Μια τριβολογική επαφή με δυο φορτωμένες επιφάνειες με σχετική κίνηση είναι ένα σχετικό σύστημα που δεν είναι εύκολο να κατανοηθεί ή να προβλεφθεί. Το σύστημα γίνεται ακόμα πιο σύνθετο όταν τα επιστρώματα κατατίθενται στις επιφάνειες. Σε αυτή την πτυχιακή θα εστιάσουμε στις μηχανικές υλικές παραμέτρους που είναι κρίσιμη για την τριβολογική απόδοση, και εδώ υπάρχει μια ιδιαίτερη ποικιλομορφία. Η σημασία να εκφραστεί η υλική απάντηση μιας επιστρωμένης επιφάνειας στις βασικές υλικές παραμέτρους-ελαστικότητα ως ελαστικός συντελεστής, πλαστικότητα ως σκληρότητα ή μέγιστη πίεση, και ολκιμότητα ως ανθεκτικότητα σπασίματος έχει υπογραμμιστεί. Έχει παρατηρηθεί ότι σκληρά επιστρωμένες επιφάνειες πολύ συχνά αποτυγχάνουν λόγω του σπασίματος.

Αριθμητική ανάλυση FEM της σκληρότητας και των ελαστικών ιδιοτήτων μιας σκληρής επιφάνειας στρώματος σε ένα ελαστικό-πλαστικό υπόστρωμα που αναφέρθηκε από τον ValorosoN, Champaney [35] και διάφορους συντάκτες έχουν υπογραμμίσει τη χρησιμότητα μιας H/E σχέσης στην αξιολόγηση των ιδιοτήτων επένδυσης των επιστρωμένων επιφανειών. Οι ελαστικές και πλαστικές συμπεριφορές σε ένα ελεγκτή γρατσουνιών/ γδαρσιμάτων επαφής έχει συζητηθεί. WilliamsML καιDengX[36], [37]και Hainsworth και λοιποί έδειξαν/ παρουσίασαν ότι η σημασία της σκληρότητας υποστρωμάτων και ελαστικότητας στην τριβή και την επιφάνεια παραμόρφωσης.

Το πρώτο περιληπτικό τρισδιάστατο ελαστικό-πλαστικό πρότυπο για την παρουσίαση των όρων πίεσης και καταπόνησης σε μια τυπική επαφή ολίσθησης με ένα λεπτό επίστρωμα παρουσιάστηκε από τον NeedlemanA[38] και άλλοι. Επεξηγήσαμε πως οι μέγιστες πρώτες αρχές πιέσεις παράγονται στο τελικό τμήμα (μέρος της ουράς) της ολισθαίνουσας σφαίρας διαμαντιών ενάντια στην TiN-επιστρωμένη χαλύδιδνη επιφάνεια και πως μια tetra- οπλισμένη αστεροειδής πίεση τομέα παράγεται ύψω από την επαφή. Οι συγκεντρώσεις πίεσης ήταν σε συμφωνία με την εμφάνιση

της πρώτης γωνιακής ρωγμής στο επίστρωμα που παρατηρήθηκε στην εμπειρική δοκιμή γρατσουνιών (γδαρσίματος). Μια μέθοδος για τον υπολογισμό της ανθεκτικότητας σπασίματος για το επίστρωμα είναι βασισμένη στις μετρήσεις δοκιμής γρατσουνιών και παρουσιάζεται παρακάτω.

Ο στόχος αυτού του άρθρου είναι να παρουσιάσει τη διανομή πίεσης και τις μετατοπίσεις των παραμορφώσεων σε μια σφαίρα σε μια επίπεδη-επιστρωμένη επαφή και να δείξει την επιρροή Emodulus: [Μέτρο του Young, γνωστό ως μέτρο ελαστικότητας, είναι ένα μέτρο ακαμψίας από ελαστικό υλικό και είναι μια ποσότητα που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό υλικών.] και το πάχος επιστρώματος στη διανομή πίεσης και κατά συνέπεια της δύναμης στην επιστρωμένη επιφάνεια. Στο έγγραφο, αναλύσαμε τους τριβολογικούς μηχανισμούς των επαφών απαριθμήσαμε λεπτομερώς και παρουσιάσαμε την ανάπτυξη του τρισδιάστατου ελαστικό-πλαστικού πεπερασμένου προτύπου στοιχείων για τον υπολογιστή προσομοίωσης της διανομής πίεσης.

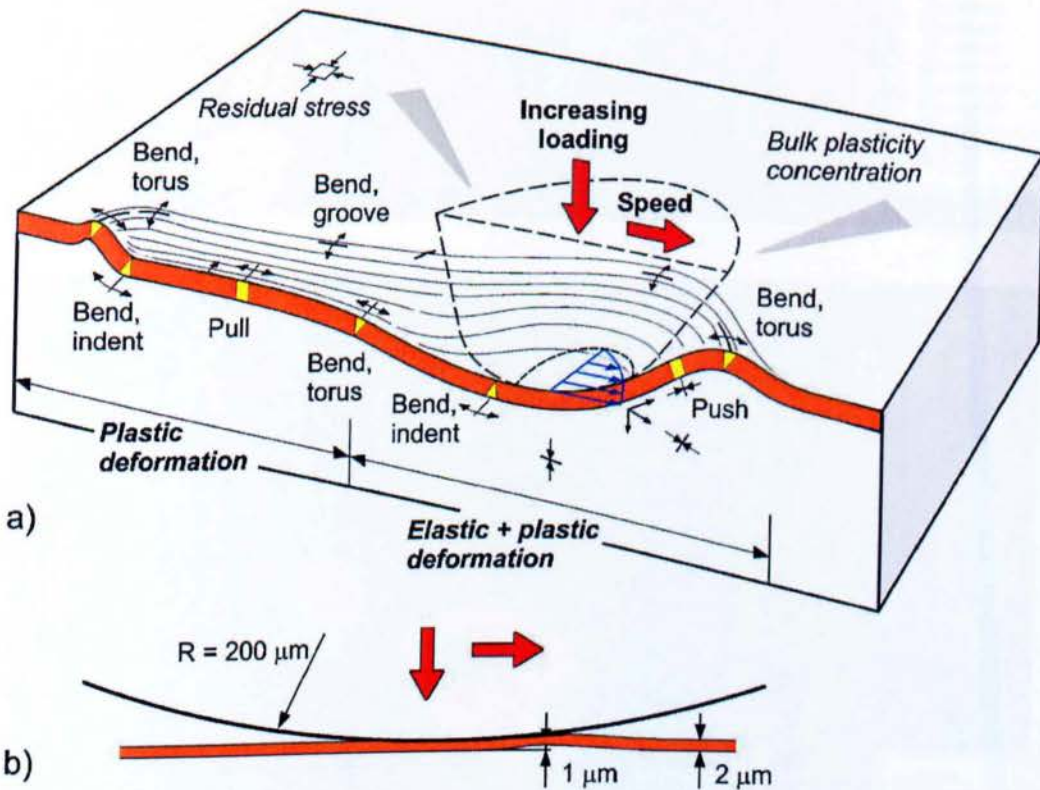
Παρουσιάσαμε επίσης τα αποτελέσματα προσομοίωσης πίεσης και για το TiN-επιστρωμένο υψηλής-ταχύτητας υπόστρωμα και για ένα χωρίς επίστρωση υπόστρωμα, και συζητήσαμε τις πτυχές της δύναμης και του ελέγχου μετατοπίσεων στη διαμόρφωση και προσομοίωση άσκησης. Παρουσιάζουμε μια μέθοδο για τον υπολογισμό των πραγματικών συστατικών πίεσης και ανθεκτικότητας σπασίματος της επιστρωμένης επιφάνειας και ερευνήσαμε τα αποτελέσματα (επιδράσεις) της υπολειμματικής πίεσης στο επίστρωμα.

## **Το Τριβασύστημα**

Σε αυτήν την πτυχιακή, μελετήσαμε το τριβασύστημα μιας ολίσθησης σφαιρών σε μια επιστρωμένη επιφάνεια με αυξανόμενο ομαλά φορτίο. Αυτό αντιστοιχεί στην επαφή της κλίσης διαμαντιών ενάντια στο επίστρωμα σε ένα ελεγκτή γρατσουνιών (γδαρσίματος), και έτσι εκεί υπάρχουν πολύ μεγάλος όγκος εμπειρικών πληροφοριών που είναι διαθέσιμες προς σύγκριση. Η δοκιμή γρατσουνιών (γδαρσίματος) αποτελείται από ένα τράβηγμα [επιμήκυνση] διαμαντιών stylus: [μικρό εργαλείο, για κάποια μορφή διαμόρφωσης] πέρα από την επιφάνεια ενός δείγματος κάτω από μια κανονική [ομαλά αυξανόμενη] δύναμη, η οποία αυξάνεται είτε σταδιακά ή συνεχώς μέχρι να παρατηρηθεί αποτυχία. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η δοκιμή είναι κατάλληλη

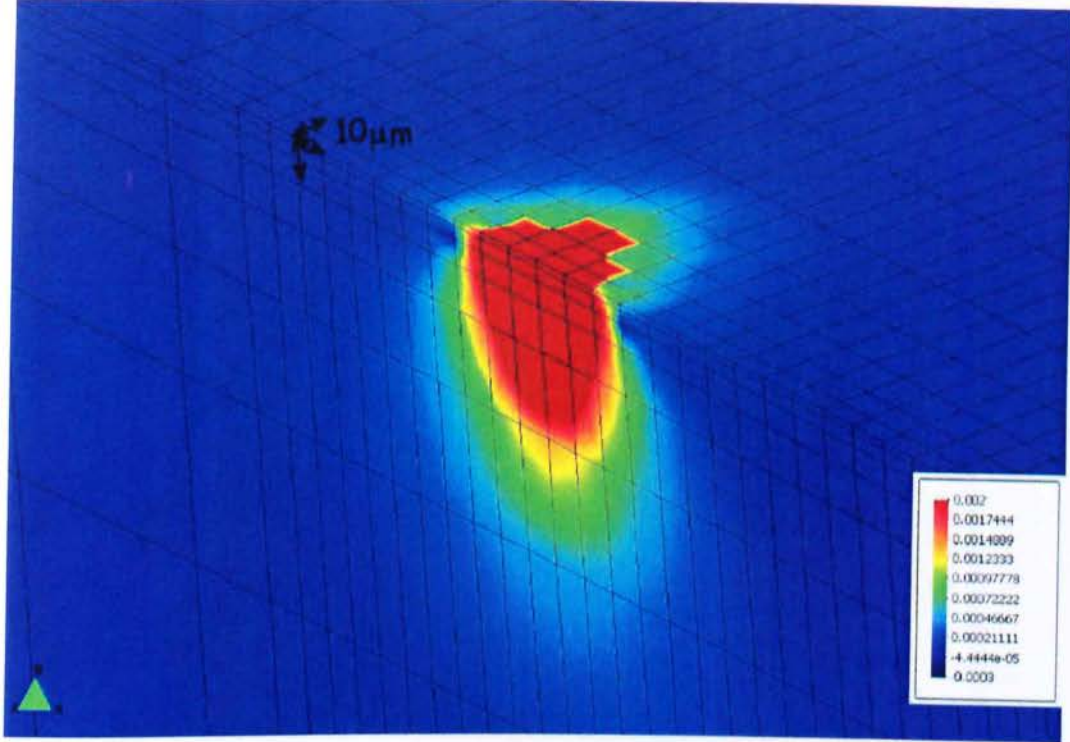
για τα επιστρώματα με πάχη που κυμαίνονται από 0.1 έως 20  $\mu\text{m}$ , και αυτό καλύπτει ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών.

Μια σχηματική παρουσίαση stylus που ολισθαίνει σε ένα επιστρωμένο δείγμα παρουσιάζεται στο Σχ. 5.4.1. Η ολισθαίνουσα διαμαντένια άκρη της σφαίρας παραμορφώνει την επιφάνεια και πλαστικά και ελαστικά. Στο αρχικό στάδιο, με 5 N φόρτωση εκ των προτέρων και 0.5  $\mu\text{m}$  βάθος εγκοπών, μια μικρή σφαιρική εσοχή διαμορφώνεται και το πλαστικό υλικό ρέει ωθώντας προς τα πάνω το υλικό γύρω από την εσοχή σε μια δακτύλιο-διαμορφωμένη μορφή. Καθώς η άκρη προωθείται εμπρός, ένα αυλάκι με αυξανόμενο βάθος διαμορφώνεται.

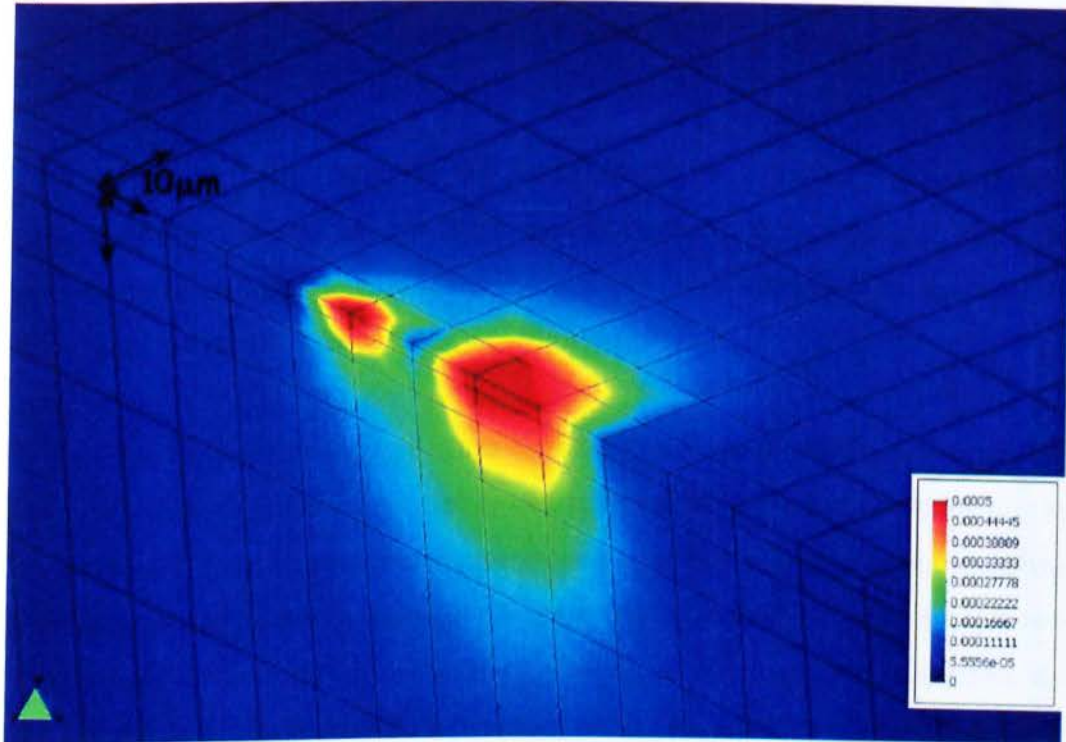


{Σχήμα 5.4.1}. Ο τομέας πίεσης στην επιστρωμένη επιφάνεια ως αποτέλεσμα μιας σφαίρας που ολισθαίνει είναι αποτέλεσμα τεσσάρων δράσεων, πράξεων, ενεργειών, αποτελεσμάτων φόρτωσης: δύναμη τριβής, γεωμετρικές παραμορφώσεις, όγκου συγκέντρωσης πλαστικότητας και υπολειμματικών πιέσεων. Η απεικόνιση (a) παρουσιάζει αποτελέσματα φόρτωσης με τις υπερβάλλουσες διαστάσεις και της παραμορφώσεις και (b) με σωστές διαστασιακές αλληλεξαρτήσεις.

a)

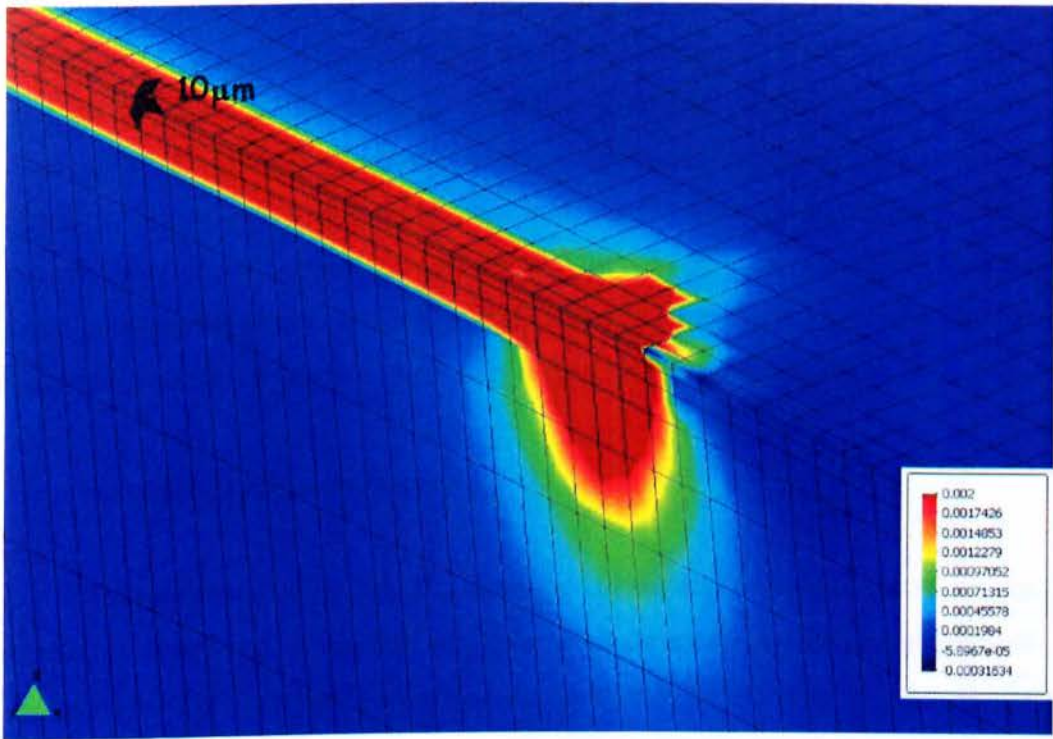


b)



{Σχήμα 5.4.2}. Τοπογραφικοί χάρτες των παραμορφώσεων και των πιέσεων στο επίστρωμα και στη συμμετρική επίπεδη διατομή του επιστρωμένου δείγματος γάλυβα με πάχος 2  $\mu\text{m}$  της TiN επίστρωσης και φορτωμένο από μια ολισθαίνουσα διαμαντένια άκρη της σφαίρας. Η κατεύθυνση ολίσθησης είναι από αριστερά προς τα δεξιά, και η ολισθαίνουσα κλίση είναι αόρατη στην εικόνα. Η χρωματισμένη κλίμακα παρουσιάζει (a και c) τιμές πίεσης και (b) υλικές μετατοπίσεις σε χιλιοστόμετρα. (a) Πιέσεις εκ των προτέρων στα 5 N προ ολίσθησης. (b) Μετατοπίσεις στο φορτίο 5.3 N κατόπιν της ολίσθησης 0.06 mm. (c) Πιέσεις στο φορτίο 10 N μετά από 1.2 mm της ολίσθησης.

c)



{Σχήμα 5.4.2}. Συνεχιζόμενο

Κάτω από την άκρη, υπάρχουν και πλαστικές και ελαστικές παραμορφώσεις, ενώ στην επιφάνεια πίσω από την άκρη, επικρατεί μόνο το πλαστικό μέρος. Μια άλλη μορφή δακτυλίων διαμορφώνεται μπροστά από την άκρη. Το τριβόσυστημα περιγράφεται με περισσότερες λεπτομέρειες παρακάτω.

Ένα τρισδιάστατο πεπερασμένο πρότυπο στοιχείων αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των πιέσεων και τον καταπονήσεων στην επιστρωμένη επιφάνεια και για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων πίεσης όπου οι πρώτες ρωγμές της επιστρωμένης επιφάνειας αναμένονται να εμφανιστούν. Το πείραμα δοκιμής γρατσουνιών (γδαρσίματος) αναλύθηκε χρησιμοποιώντας την ενυπάρχουσα συμμετρία της γεωμετρίας και της εισαγωγής ενός πεπερασμένου στοιχείου πλέγματος όπου η ταξινόμηση πλέγματος είναι το πάχος επιστρώματος. Διαγραμματικά υβριδικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε Abaqus: [είναι μια εφαρμογή λογισμικού για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και με τη βοήθεια υπολογιστικής μηχανικής] 5.8-14, 6.2-1 και σε Warp3D 14.2 πεπερασμένου στοιχείων λογισμικού. Ο όγκος της πεπερασμένης σχισμής στοιχείων λήφθηκε για να περιγράψει τη δοκιμή της διαμόρφωσης (σχηματισμού) της γρατσου-

νιάς που ήταν  $2 \times 4 \times 12 \text{ mm}^3$  (πλάτος, πάχος και μήκος). Η συμπεριφορά διαμόρφωσης του υποστρώματος χαρακτηρίστηκε σαν ελαστικό-πλαστικό με ιστροπική σκλήρυνση, ενώ το επίστρωμα διαμορφώθηκε ώστε να συμπεριφέρεται κατά τρόπο γραμμικό-ελαστικό. Η ολισθαίνουσα διαμαντένια άκρη της σφαίρα διαμορφώθηκε απολύτως άκαμπτη. Το πρότυπο FEM: [μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (πρακτική εφαρμογή της, συχνά είναι γνωστή ως ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων FEM) είναι μια αριθμητική τεχνική για την εύρεση των λύσεων κατά προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων καθώς και εξισώσεις] περιγράφεται λεπτομερώς.

### **Συνθήκες Διαβρωτικών μέσων.**

Τα παραπάνω περιγράφουν τους όρους και την ολίσθηση των επαφών η διαδικασία μιμήθηκε από το πρότυπο υπολογιστών. Οι παρακάτω παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των διανομών πίεσης και καταπόνησης.

Παράμετροι δοκιμής γρατσουνιών: η απόσταση ολίσθησης είναι 10 mm, το φορτίο αυξάνεται γραμμικά από 5 N εκ των προτέρων φόρτωση 0.5  $\mu\text{m}$ , βάθος εγχοπών προ ολίσθησης ξεκινά σε 50 N και 3  $\mu\text{m}$  βάθος εγχοπών στα 10 mm απόσταση ολίσθησης, και η ταχύτητα ολίσθησης δεν συμπεριλαμβάνεται στο πρότυπο (δηλ., το πρότυπο είναι ανεξάρτητο του χρόνου). Το ολισθαίνον stylus (RockwellC): η ακτίνα της σφαιρικής άκρης είναι 200  $\mu\text{m}$ , το υλικό είναι διαμάντι, συντελεστής Young είναι 1140 GPa, η σκληρότητα είναι 80 GPa, η αναλογία Poisson είναι 0.07, και η τραχύτητα είναι ιδανικά ομαλή.

Επίστρωση: το πάχος 2  $\mu\text{m}$ , το υλικό είναι νιτρίδιο του τιτανίου (TiN) που κατατίθεται από PVD, ο συντελεστής του Young είναι 300 GPa, σκληρότητα 25 GPa, η αναλογία Poisson 0.22, και η τραχύτητα είναι ιδανικά ομαλή.

Υπόστρωμα: η γεωμετρία είναι ιδανικά ομαλά επενδυμένη, το υλικό είναι υψηλής ταχύτητας χάλυβα, ο συντελεστής Young είναι 200 GPa, η σκληρότητα είναι 7.5 GPa, η αναλογία Poisson είναι 0.29, το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας υπολογίζεται από την τελευταία δύναμη κάμψης σε 4100 MPa, και ο συντελεστής σκλήρυνσης πίεσης είναι 20.

Τριβή: Οι τιμές για το συντελεστή της τριβής μετρήθηκαν από τα δείγματα που αντιστοιχούν στους ανωτέρω συνδυασμούς υλικών. Η αξία ήταν 0.06 μετά από 0.1 mm ολίσθησης και αυξήθηκε γραμμικά σε 0.13 στα 10 mm της ολίσθησης. Στις προσομοιώσεις, μια σταθερή αξία 0.08 χρησιμοποιήθηκε για το συντελεστή τριβής

λόγω της τριβής από την ενδιάμεση διάτμηση, η οποία αποκλείει το στρωμένο συστατικό της τριβής.

Οι όροι φόρτωσης στην επιφάνεια, που προκαλείται από την ολίσθηση της άκρης της σφαίρας, αποτελέσματα και στις πλαστικές και στις ελαστικές παραμορφώσεις, όπως φαίνεται από το σχέδιο 5.4.1. Οι παραμορφώσεις επιφανείας έχουν τις μορφές σφαιρικών εγκοπών, του δακτυλίου, και του αυλακιού. Οι μετατοπίσεις και οι πιέσεις στην επιφάνεια μπορούν να υπολογιστούν από το υπόδειγμα και τέτοια αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα/Σχέδιο 2a-c.

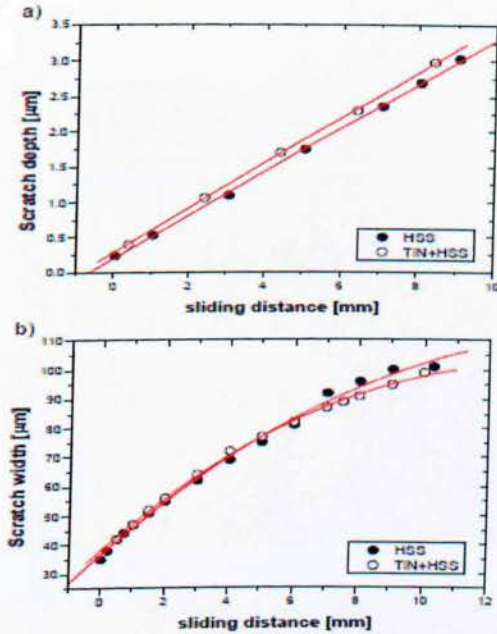
Σχέδιο 2a παρουσιάζει στον τομέα πίεσης κάτω από την εκ των προτέρων φόρτωση 5 N πριν η ολίσθηση έχει αρχίσει. Εδώ παρουσιάζονται και οι ελαστικές και οι πλαστικές παραμορφώσεις. Το βάθος εγκοπών είναι 0.5  $\mu\text{m}$  στο κέντρο της κορφής (άκρης). Η επέκταση της περιοχής αυξάνεται σε 0.2% της πίεσης και έχει διάμετρο περίπου 50  $\mu\text{m}$  και επεκτείνεται σε 50  $\mu\text{m}$  κάτω από το επίπεδο της επιφανείας. Είναι αξιοσημείωτο ότι η πλαστικότητα επεκτείνεται πολύ βαθύτερα στο υπόστρωμα καθώς κάποιος μπορεί να περιμένει απλά βάσει του βάθους εγκοπής. Η κλίση πλαστικότητας είναι φυσικά σπουδαιότερη/μεγαλύτερη κοντά στη διεπαφή επιστρώματος υποστρωμάτων, αλλά ο υλικός όγκος που βιώνει την πλαστικότητα είναι περίπου ένα μέγεθος μεγαλύτερο από το πάχος του επιστρώματος.

Οι μετατοπίσεις και στην επιφάνεια αλλά και κάτω από την επιφάνεια παρουσιάζονται στο Σχέδιο 2b. Η κόκκινη περιοχή στην αριστερή πλευρά παρουσιάζει υπολειπόμενες πλαστικές παραμορφώσεις στη θέση της πρώτης περίπτωσης. Η υπόλοιπη μετατόπιση της επιφανείας στο κέντρο της άκρης είναι 0.5  $\mu\text{m}$ . Η μετατόπιση της επιφανείας κάτω από την κινούμενη άκρη κατόπιν του 0.06 mm της ολίσθησης είναι περίπου 1  $\mu\text{m}$  και μια μετατόπιση από 0.1  $\mu\text{m}$  επεκτείνεται κάτω και μέσα στην επιφάνεια τόσο βαθιά ως 40  $\mu\text{m}$ .

Μετά από 1,2 mm ολίσθησης, οι ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις που υπερβαίνουν το 0.2% της πίεσης εκτείνονται κάτω από 70  $\mu\text{m}$  κάτω από την επιφάνεια (Σχέδιο 2c). Η υπολειπόμενη πλαστική παραμόρφωση στο αυλάκι παραμένει στην άκρη ολίσθησης κάτω από 25  $\mu\text{m}$  κάτω από την επιφάνεια του επιπέδου που ροκανίζεται και έχει πλάτος 40  $\mu\text{m}$ . Το προσομοιωμένο πλάτος αυλακιού και οι τιμές βάθους είναι τις ίδιας τάξης αλλά ελαφρώς υψηλότερα από τα μετρημένα πλάτη και βάθη όπως παρουσιάζονται στο Σχ. 5.4.3.



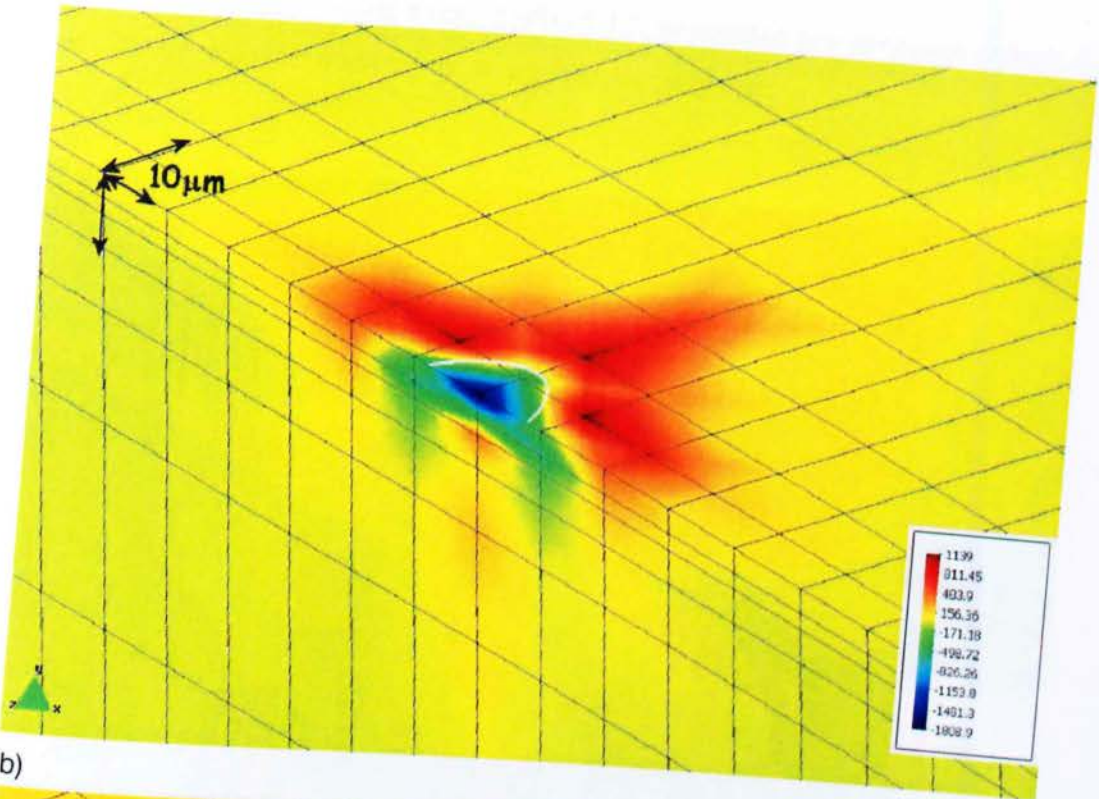
Οι πρώτοι κύριοι τομείς πίεσης που προσομοιώθηκαν από το ελεγχόμενο μοντέλο μετατόπισης αναφέρονται στο Σχέδιο 6a-d στο μέρος 4.3. Σε αυτό το τμήμα, συγκρίνουμε εκείνα τα αποτελέσματα με τις προσομοιώσεις όπου κάποιες από αυτές τις παραμέτρους άλλαξαν.



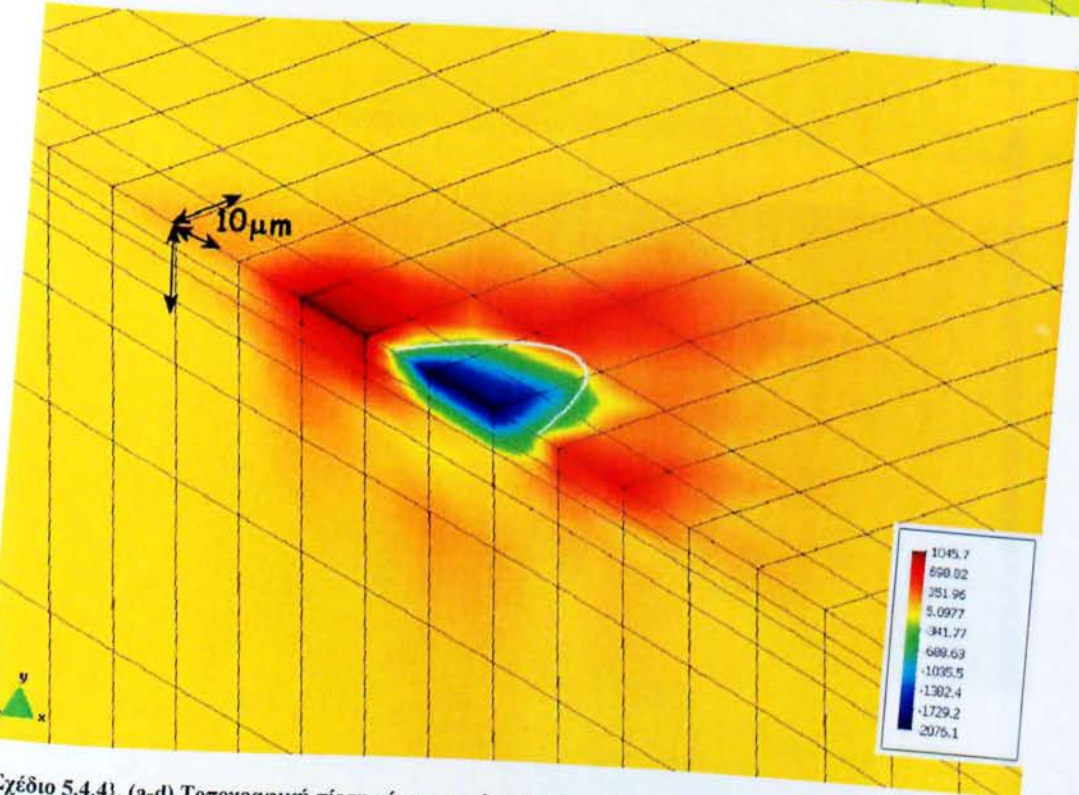
{Σχέδιο 5.4.3}. Μετρημένο (a) βάθος αυλακιού και (b) πλάτος αυλακιού από τη δοκιμή γρατσουνιών/γδαρσίματος με μια 0.2 mm ακτίνα στην άκρη της σφαίρας με αυξανόμενο φορτίο από 5 N σε 50 N πέρα από έναν λεπτό, 2 μm πάχους TiN-επίστρωση και μη επιστρωμένο υψηλής ταχύτητας χάλυβα επίπεδου δείγματος.

Στις προσομοιώσεις πίεσης στο Σχέδιο 6, το χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι το ίδιο όπως στο Σχέδιο 5.4.4 και επίσης όλες οι παράμετροι εισαγωγής είναι οι ίδιες, με τη μόνη εξαίρεση αυτή του πάχους του νιτρίδιο του τιτανίου TiN επιστρώματος στην επιφάνεια του χάλυβα είναι 5 μm αντί 2 μm. Αυτό δίνει την δυνατότητα να συγκριθούν τα αποτελέσματα της αύξησης του πάχους στρώσης ("ταινιάς"). Οι παραλλαγές στον τομέα πίεσης στην επιφάνεια και στο επίπεδο συμμετρίας από μια εκ των προτέρων φόρτωση 5 N και της καθαρής εγκοπής 0.5 μm παρουσιάζονται/φαίνονται στο Σχέδιο 4a. Το πλέγμα (ή βρόγχος, ή δίκτυο) δείχνει τις διαστάσεις στο Σχέδιο και είναι ίδιες όπως στο Σχέδιο 6, με την εξαίρεση ότι τώρα υπάρχει άλλο ένα στρώμα νιτρίδιο του τιτανίου TiN, 3 μm πάνω από την επιφάνεια αυτή ήδη υπάρχει μια στρώση νιτρίδιο του τιτανίου TiN, 2 μm. Από αυτό, το αποτέλεσμα είναι μια στρώση νιτρίδιο του τιτανίου TiN, 5 μm πάνω από την επιφάνεια χάλυβα. Σχέδιο 4b παρουσιάζει συγκεντρώσεις πίεσης μετά από 0.06 mm ολίσθηση, Σχέδιο 4c μετά από 1,2 mm ολίσθηση, και Σχέδιο 4d μετά από 3,3 mm ολίσθηση.

a)



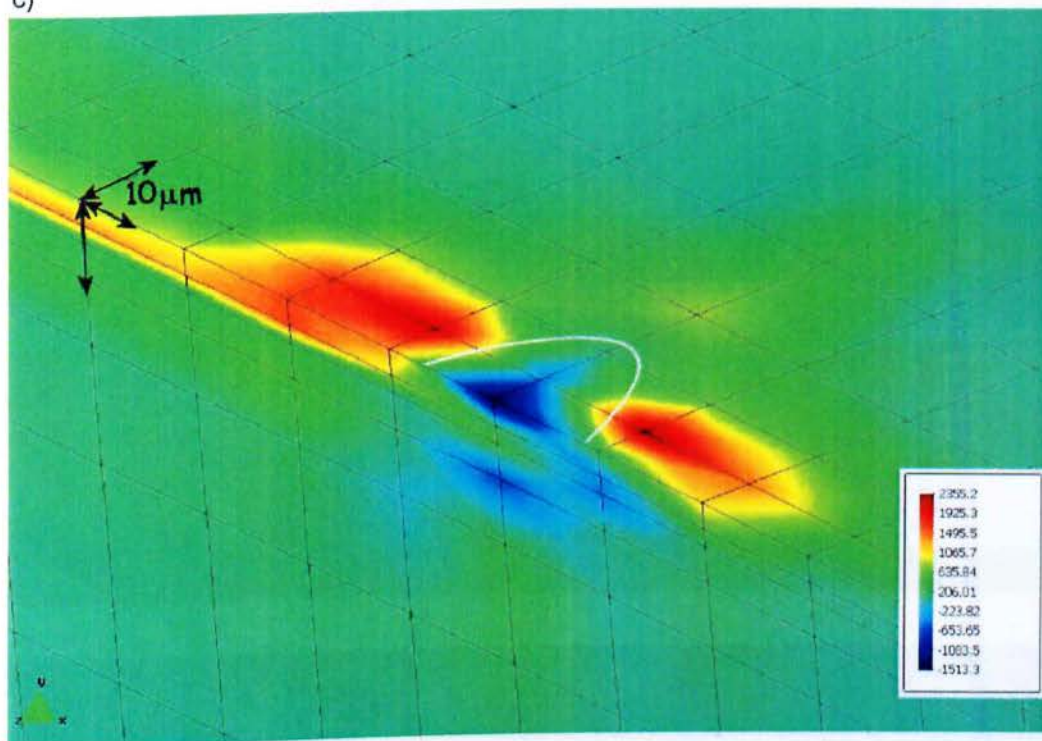
b)



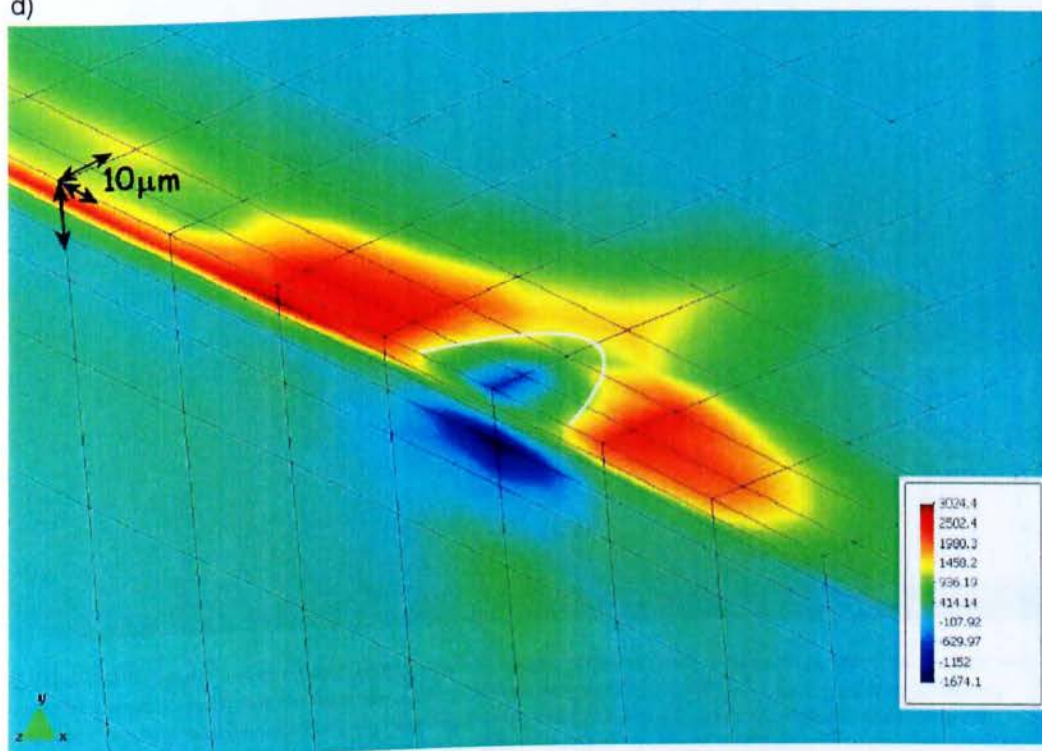
Σχέδιο 5.4.4). (a-d) Τοπογραφική πίεση χάρτες τομέων παρουσιάζουν πρώτες κύριες πιέσεις στο επίστρομο-  
 στη συμμετρική διατομή επιπέδου του επιστρωμένου δείγματος χάλυβα με ένα 5 mm TiN επίστρομο που  
 φέρνεται από μια ολισθαίνουσα σφαίρα διαμαντιών. Η κατεύθυνση ολίσθησης είναι από αριστερά στα  
 δεξιά; Η άκρη ολίσθησης είναι αόρατη στο Σχέδιο και η ζώνη επαφής υποδεικνύεται από την άσπρη καμπύ-  
 λη. Οι τιμές στην κλίμακα με χρώμα δίνονται σε MPa. Ο τομέας πίεσης στο (a) 5 N εκ των προτέρων φόρ-  
 τωση χωρίς ολίσθηση, (b) 5.3 N φόρτωση 0.06 mm ολίσθηση, (c) 10 N φόρτωση και 1.2 mm ολίσθηση, και  
 (d) 20 N φόρτωση και 3.3 mm ολίσθηση.

Στις προσομοιώσεις πίεσης Σχέδιο 5.4.5, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδιο με το Σχέδιο 6 και επίσης οι παράμετροι εισαγωγής.

c)

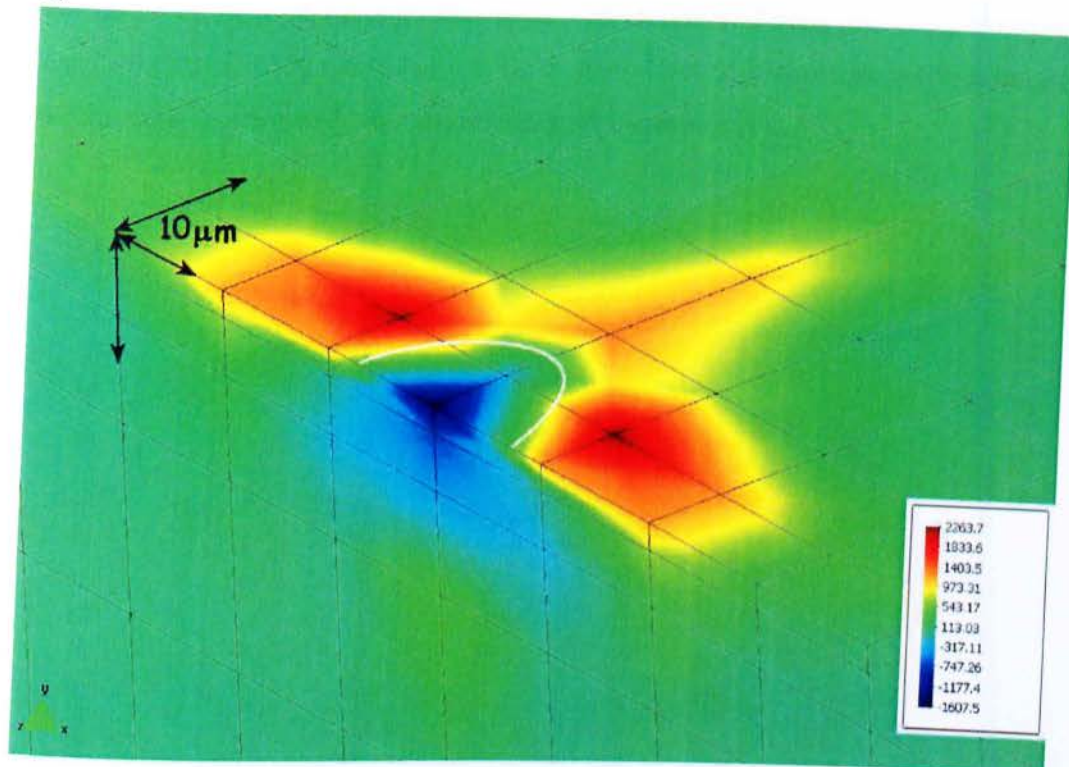


d)

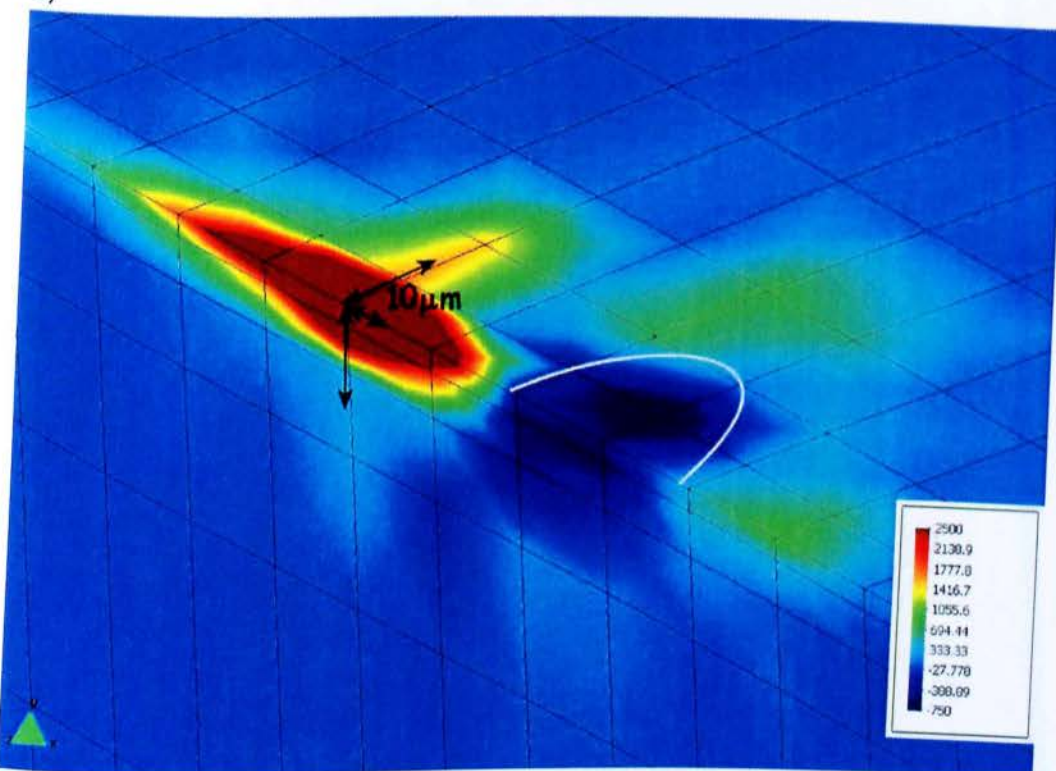


{Σχήμα 5.4.4}. Συνεχιζόμενο

a)



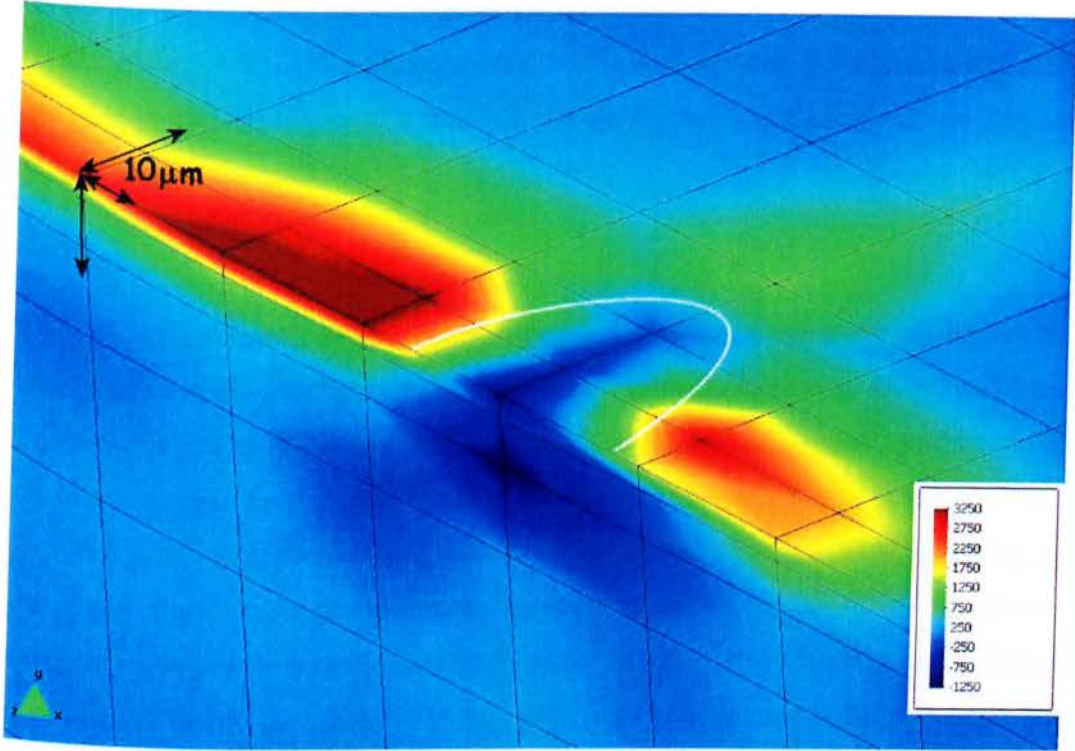
b)



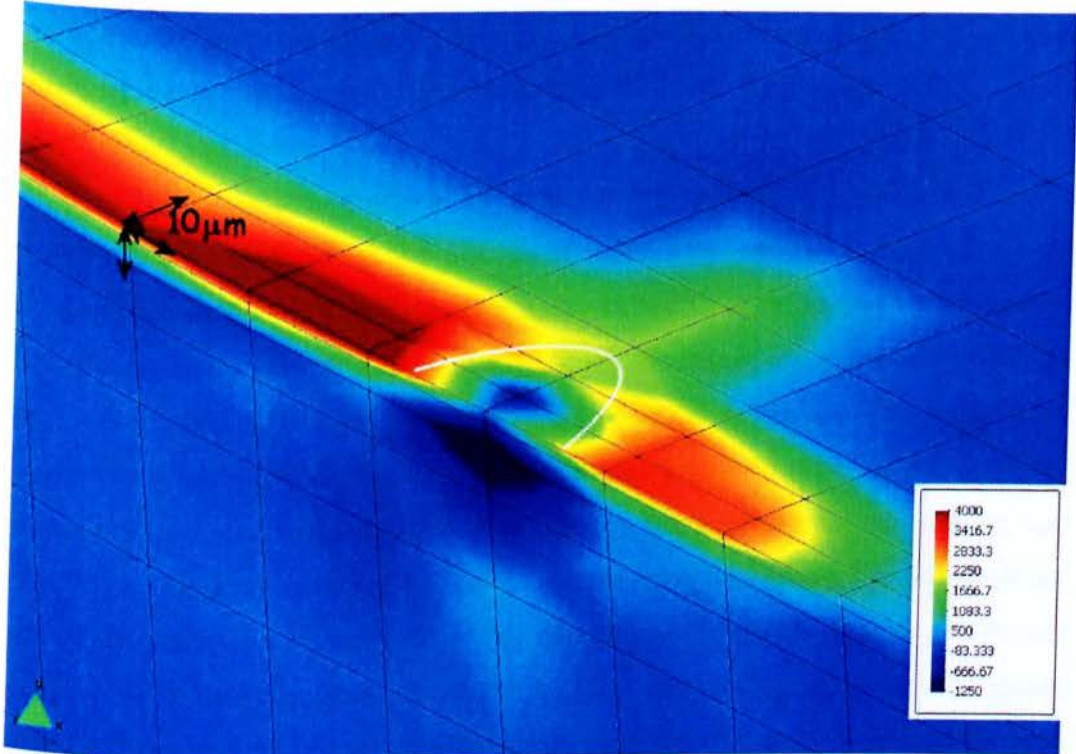
(Σχέδιο 5.4. 5). (a-d) Τοπογραφικοί χάρτες τομέων πίεσης παρουσιάζουν τις πρώτες κύριες πιέσεις στο επί-  
 στρωμα και τη συμμετρική διατομή του επιστρωμένου δείγματος χάλυβα με 2 mm πάχος επιστρώματος  
 επιμεταλλωμένου του τιτανίου TiN έχοντας συντελεστή Young 540 GPa και φορτωμένοι από μια ολισθαίνουσα  
 επαφαιρική άκρη διαμαντιών. Η κατεύθυνση ολίσθησης είναι από αριστερά στα δεξιά; Η ολισθαίνουσα άκρη  
 είναι αόρατη και η ζώνη επαφής υποδεικνύεται από την άσπρη καμπύλη. Οι τιμές στην κλίμακα με χρώμα  
 δίνονται σε MPa. (a) 5 N εκ των προτέρων φόρτωση χωρίς ολίσθηση, (b) 5.3 N φόρτωση και 0.66 mm ολί-  
 σθηση (c) 10 N φόρτωση και 1.2 mm ολίσθηση, και (d) 20 N φόρτωση και 3.3 mm ολίσθηση.

είναι ίδιοι, με τη μόνη διαφορά που τώρα ο συντελεστής Young της ελαστικότητας είναι 540 GPa αντί 300 GPa όπως στο Σχ. 6. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να συγκριθούν τα αποτελέσματα του αυξανόμενου συντελεστή ελαστικότητας.

c)



d)



{Σχήμα 5.4.5}. Συνεχιζόμενο

Οι παραλλαγές στον τομέα πίεσης στην επιφάνεια και στο συμμετρικό επίπεδο από μια εκ των προτέρων φόρτωση 5 N και της καθαρής εγκοπής από 0.5 μm φαί-

νονται στο Σχέδιο 5a. Η ένδειξη εμπλοκής των διαστάσεων στο Σχέδιο είναι οι ίδιες με το Σχέδιο 5.4.6. Σχέδιο 5b παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις πίεσης μετά από 0.06 mm ολίσθησης, Σχέδιο 5c μετά από 1.2 mm ολίσθησης, και Σχέδιο 5d μετά από 3.3 mm ολίσθησης.

Ο σχηματισμός φύτρων μιας ρωγμής και η αύξηση του συσχετίζονται με το επίπεδο πίεσης αλλά επίσης και με το στάδιο της παραμόρφωσης. Οι μετατοπίσεις έχουν και οι δύο προσομοιωθεί και μετρηθεί από τις πειραματικές δοκιμές λείανσης και οι αντιστοιχία πιέσεων έχει υπολογιστεί. Παρουσιάσαμε σε ένα προηγούμενο άρθρο ότι ο καλύτερος συσχετισμός για την πίεση και για τις προσομοιώσεις πίεσης με την πραγματική πειραματική δοκιμή λείανσης ήταν όταν ένα αντικαταστημένο-ελεγχόμενο πρότυπο χρησιμοποιήθηκε. Αυτό σημαίνει ότι στις παρούσες προσομοιώσεις, τα βάθη εγχοπών από 0.5  $\mu\text{m}$  σε 5 N εκ των προτέρων φόρτωση προ ολίσθησης και 3  $\mu\text{m}$  βάθος εγχοπών μετά από τα 10 mm της ολίσθησης στα 50 N κανονικού φορτίου χρησιμοποιούνται σαν τιμές εισαγωγής για το πρότυπο. Αυτό είναι σε συνάρτηση με τις μετρημένες τιμές όπως παρουσιάζονται στο Σχέδιο 5.4.3.

Στην προ-φόρτωση με 5 N και στην εγκοπή με 0.5  $\mu\text{m}$ , το εύρος των υλικών μετατοπίσεων υπερβαίνει το 0.1  $\mu\text{m}$ , επεκτείνεται στην επιφάνεια διαμορφώνοντας μισή σφαίρα με βάθος 30  $\mu\text{m}$  και ακτίνα στο επίπεδο της επιφάνειας από 20  $\mu\text{m}$ . Ο αντίστοιχος τομέας πίεσης και για ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις στο Σχέδιο 2a δείχνει ότι η ζώνη πίεσης υπερβαίνει το 0.2% είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερο σε διάμετρο. Επεκτείνεται σε βάθος 50  $\mu\text{m}$  και με ακτίνα στην επιφάνεια στο περίπου 50  $\mu\text{m}$ , και έτσι είναι το διπλάσιο της διαμέτρου επαφής. Η διάδοση της πλαστικότητας κατά την διάρκεια της δοκιμής λείανσης (γδαρσίματος) είναι προοδευτική, αλλά υπό όρους σταθερή, λόγω της εφαρμοσμένης μετατόπισης της φόρτωσης ελέγχου. Η έκταση της υλικής έκθεσης του όγκου τάσης πλαστικότητας είναι αρκετά μεγάλη έναντι του πάχους του επιστρώματος λόγω της αύξησης της πίεσης που προκύπτει από τον λάθος υπολογισμό (κακό συνδυασμό) του ελαστικού επιστρώματος και του ελαστικό-πλαστικού υποστρώματος. Οι τοπικές πιέσεις του πεδίου κάτω από την επαφή είναι σε θέση να προκαλέσουν (επηρεάσει) τις πλαστικές πιέσεις μέσα σε ένα υλικό όγκο αρκετά μεγαλύτερο από την υψηλότερη πίεση στην περιοχή υλικού. Η συμπεριφορά προάγεται από την απόδοση του υποστρώματος, λόγω χάριν., λόγω

της ακραίας δύναμης-του χάλυβα, αυτό έχει μια απόδοση (παραγωγή) στην αναλογία της δύναμης εφελκυσμού κοντά στην ένωση, η οποία στην πράξη σημαίνει ότι η συμπεριφορά του είναι κοντά στην ακαμψία του πλαστικούPandyakC, Williams [42]. Σε αυτό το στοιχείο αυτής της περίπτωσης, η πλαστική ζώνη μπορεί να επεκταθεί χωρίς αξιοσημείωτη αύξηση στην εφαρμοσμένη εξωτερική φόρτωση-μιας φανεράς επεξεργασίας στο Σχέδιο 5.4.2.

Μια παραμορφωμένη πλαστικά εσοχή αφήνεται πίσω καθώς μετακινείται η άκρη όπως φαίνεται στο Σχέδιο 2b. Η κόκκινη περιοχή στην δεξιά πλευρά στο Σχέδιο παρουσιάζει μετατοπίσεις δεξιά κάτω από την κινούμενη άκρη, τα οποία είναι και τα δυο ελαστικά και πλαστικά και αυξανόμενα στον όγκο λόγω του αυξανόμενου φορτίου. Οι μετατοπίσεις είναι συμμετρικές στη μορφή όπως αναμένεται.

Η κινούμενη άκρη αφήνει πίσω στο αυλάκι μια υψηλή στρώση στο επίστρωμα με υψηλές υπολειπόμενες πιέσεις που φαίνονται μετά από 1.2 mm ολίσθησης στο Σχέδιο 6c. Η αντιστοιχία του όγκου πίεσης παρουσιάζεται στο Σχέδιο 2c και η περιοχή ξεπερνά το 0.2% εκτείνεται 25  $\mu\text{m}$  σε βάθος και 50  $\mu\text{m}$  στο πλάτος. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι ο τομέας πίεσης δεν είναι μεγαλύτερος στην επιφάνεια στα δεξιά μπροστά στην κινούμενη άκρη αλλά ελαφρώς 20-30° και στις δυο πλευρές της άκρης.

Οι υλικές παραμορφώσεις που πραγματοποιούνται κυρίως σχετίζονται με την συμπεριφορά του υποστρώματος. Από το Σχέδιο 5.4.3, μπορεί να φανεί ότι δεν υπάρχει σχεδόν καμία διαφορά στο βάθος του αυλακιού και το πλάτος του αυλακιού από την λείανση (γδάρισμα) εκτελείται με τις ίδιες πειραματικές παραμέτρους, αλλά η μόνη διαφορά ήταν ότι ένα χαλύβδινο δείγμα είχε ένα 2  $\mu\text{m}$  νιτρίδιο του τιτανίου TiN επίστρωμα και το άλλο ήταν χωρίς επίστρωση. Προηγουμένως αναφέραμε ότι, σε αυτές τις περιπτώσεις, οι συντελεστές τριβής είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλον και επίσης είναι μετρημένη, αλλά λόγω της δομής της επιφάνειας με τη σκληρή στρώση, οι τομείς πίεσης είναι σημαντικά διαφορετικοί.

Το πάχος του επιστρώματος είναι μια σημαντική παράμετρος όταν καταθέτονται εργαλεία η συστατικά με την προστασία της επίστρωσης της επιφάνειας. Εάν υπάρχει συνεχής φθορά της επιστρωμένης επιφάνειας, θα φαινόταν φυσικό να υπάρ-



χει επίστρωμα που να είναι πυκνό όσο γίνεται και να επιτρέπει την φθορά χωρίς να διαπερνάτε και έτσι να εκτίθεται η μάζα του υλικού. Εντούτοις, από καιρό είναι γνωστό πως ένα σκληρό επίστρωμα που κατατίθεται σε ένα μαλακότερο υπόστρωμα μπορεί να προκαλέσει άλλα προβλήματα εάν είναι πολύ παχύ. Το παχύτερο επίστρωμα δεν έχει την ίδια ευκαμψία να ακολουθήσει τις επιφανειακές παραμορφώσεις και όταν αυτές επιβάλλονται πάνω της, υψηλή πίεση παραμόρφωσης μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε ρωγμές, ελασματοποίηση :[ο διαχωρισμός των στρωμάτων σε φύλλα (ελάσματα) εξαιτίας αστοχίας συνεκτικότητας της μήτρας ή αστοχίας διασύνδεσης], και αποτυχίας της επιφάνειας. Αυξανόμενο φθορά μορίου παραγωγής για τη αύξηση του πάχους επιστρώματος έχει προσφάτως αναφερθεί από τον CornecA, ScheiderκαιVankovicΑκαιAshkenaziD[39], [40], [41] και λοιποί. Κατά συνέπεια, η επιλογή του σωστού πάχους του επιστρώματος είναι πάντα μια ανταλλαγή μεταξύ του περιθωρίου της φθοράς και της αντίστασης στο σπάσιμο.

Υψηλές συγκεντρώσεις πίεσης και παραμορφώσεις στην επιφάνεια είναι η προέλευση των ρωγμών και της θραύσης. Είναι πολύ ενδιαφέρον να συγκρίνουμε πως αυτά διαμορφώνονται και αναπτύσσονται σε ένα παχύτερο 5 μμνιτριδίου του τιτανίου TiN επίστρωμα σε μια επιφάνεια χάλυβα (Σχήμα 5.4.4), και να συγκριθεί αυτό με τα αποτελέσματα από ένα 2 μμνιτριδίου του τιτανίου TiN επίστρωμα στην ίδια επιφάνεια χάλυβα (Σχήμα 5.4.6). Όταν ένα φορτίο από 5 N πιέζεται ενάντια στις δυο επιφάνειες από μια σφαιρική άκρη, το αποτέλεσμα είναι πολύ παρόμοιος τομέας πίεσης πάνω από το επίστρωμα με μέγιστη τάση συγκέντρωσης πίεσης περίπου 1130 MPa, όπως φαίνεται στο Σχέδιο 6a και Σχέδιο 4a αυτής της έκθεσης. Αλλά μια σαφής διαφορά μπορεί να φανεί όταν κάποιος εξετάσει προσεκτικά τον τομέα πίεσης δεξιά κάτω από τη φορτωμένη άκρη. Για το 2 μμ επίστρωμα, η συμπίεση της πίεσης συγκέντρωσης είναι περίπου 15% υψηλότερη, 2080 MPa έναντι 1810 MPa για το επίστρωμα 5 μμ. Η υψηλή συγκέντρωση της πίεσης τομέα πηγαίνει δεξιά μέσω του επιστρώματος και συνεχίζεται στο υψηλότερο μέρος του υποστρώματος. Το παχύτερο 5 μμ επίστρωμα έχει υψηλότερη ικανότητα να μεταφέρει μέρος του φορτίου και αυτό μπορεί να θεωρηθεί αρκετά χαμηλότερο στις πιέσεις συμπίεσης στο κάτω μέρος του επιστρώματος κάτω από την άκρη (500 MPa έναντι 1100 MPa για το 2 μμ επίστρωμα και επίσης τάση πίεσης από 250 MPa δεξιά στο πάνω μέρος του υποστρώματος).

Πρέπει να αναφερθεί ότι το πρότυπο είναι μετατοπισμένο ελεγχόμενα, το οποίο σημαίνει ότι και τα παχύτερα και τα λεπτότερα επιστρώματα έχουν τα ίδια βάθη εγχοπών. Με την ίδια εγχοπή, θα υπάρχει περισσότερη τάση επιμήκυνσης του υλικού

επιστρώματος κοντά στο επίστρωμα/υποστρώματων στο παχύτερο επίστρωμα, και αυτό αντισταθμίζει τη συμπίεση που προέρχεται από το κανονικό φορτίο. Μπορεί επίσης να φανεί από το Σχέδιο 4b-d ότι μέγιστες τάσεις πιέσεων στο χαμηλότερο μέρος 5  $\mu\text{m}$  επιστρώματος είναι περίπου 0 MPa σε 5.3 N και 0.06 mm ολίσθησης, και περίπου 500 MPa και σε 10 N και 1.2 mm και 20 N και 3.3 mm ολίσθησης. Η αλλαγή της θέσης των μέγιστων πιέσεων συμπίεσης από την κορυφή την επιστρώματος σε 0 mm και 0.06 mm ολίσθησης σε 9  $\mu\text{m}$  κάτω της επιφάνειας μπορεί να φανεί από το Σχέδιο 4a-d. Αυτή η αλλαγή συμβαίνει μόνο μετά από υψηλά φορτία για 2  $\mu\text{m}$  επίστρωμα.

Ο τομέας πίεσης και των παχύτερων και λεπτότερων επιστρώματων είναι σχεδόν ίδιος μετά από 0.06 mm ολίσθησης με μέγιστες τάσεις πίεσης 600 MPa μπροστά και στις δυο πλευρές της άκρης ολίσθησης και για τα δυο επιστρώματα. Εντούτοις, υπάρχει ένα αρκετά υψηλότερο έντασηςυπολειπόμενου τομέα πίεσης που αφήνεται πίσω από την κινούμενη άκρη στα 2  $\mu\text{m}$  επιστρώματος με πιέσεις πάνω από 1800 MPa, ενώ είναι μόνο 1000 MPa για το 5  $\mu\text{m}$  επίστρωμα. Οι αλλαγές κατάστασης με την περαιτέρω ολίσθηση μετά, από 1.2 mm ολίσθησης, οι μέγιστες πιέσεις έντασης και μπροστά στην άκρη και πίσω από αυτήν είναι περίπου 10% υψηλότερες (2350 MPa εν συγκρίσει/έναντι 2100 MPa) για το παχύτερο επίστρωμα έναντι του λεπτότερου. Μετά από 3.3 mm της ολίσθησης, αυτές οι πιέσεις είναι περίπου του ίδιου επιπέδου, ενώ μπορεί να φανεί ότι ο όγκος των υψηλότερων πιέσεων στα 5  $\mu\text{m}$  επιστρώματος σαφώς υπερβαίνει τον όγκο του 2  $\mu\text{m}$  επιστρώματος. Σοφά ερμηνεύεται από τις μηχανικές δοκιμές θραύσης, ότι αυτό υπονοεί μια υψηλότερη ροπή για την αποτυχία σε υψηλότερο φορτίο για 5  $\mu\text{m}$  επίστρωμα.

Ένας μηχανισμός που μπορεί να εξηγήσει αυτές τις παρατηρήσεις των υψηλότερων εφελκυστικών πιέσεων στο λεπτότερο επίστρωμα σε χαμηλότερο φορτίο μετά από 0.06 mm της ολίσθησης ενώ και τα δύο επιστρώματα είχαν πιέσεις σχεδόν ίδιου επιπέδου σε υψηλότερα φορτία μετά από 1.2 mm και 3.3 mm της ολίσθησης μπορεί να είναι το ακόλουθο. Ένας πολύ μικρότερος όγκος εκτίθεται στην ένταση από την παραμόρφωση εσοχών σε χαμηλό φορτίο σε λεπτότερο επίστρωμα και έτσι αυτό αποκρίνεται σε υψηλότερες πιέσεις. Υπό αυτήν την μορφή, το παχύτερο επίστρωμα είναι ικανό να μεταφέρει τα φορτία εγχοπών καλύτερα σε χαμηλά εφαρμόσιμα φορτία, καταλήγοντας σε χαμηλότερες πιέσεις. Αυτή η επίδραση, πράξη, αποτέλεσμα δεν επικρατεί, κυριαρχεί στα υψηλότερα φορτία από τότε που ο όγκος των υλικών εκθέτει, επιδεικνύει την πλαστική παραμόρφωση κάτω από την άκρη και είναι

πολύ μεγαλύτερη και επεκτείνεται πολύ μέσα στο υπόστρωμα. Κατά συνέπεια, η επιρροή του επιστρώματος δεν κυριαρχεί πλέον στην ισχύουσα φόρτωση επιφάνειας. Η κατάσταση στα υψηλότερα φορτία είναι, εντούτοις, διαφορετική για το παχύτερο επίστρωμα. Η μεγαλύτερη ακαμψία του παχύτερου επιστρώματος αναγκάζει τις πιέσεις να υπερβούν εκείνων των λεπτότερων επιφανειών υπό τους μονότονους όρους φόρτωσης, παράγοντας μια κατάσταση που ευνοεί το λεπτότερο επίστρωμα με μεγαλύτερη υποχωρητικότητα, ενδοτικότητα, συμμόρφωση και, υπό αυτή την μορφή, η παραγωγή χαμηλότερου ολική κατάσταση πίεσης.

Ο μηχανισμός της ολισθαίνουσας άκρης ωθεί το υλικό μέσα σε αυτό υπό τη δράση οργώματος εμφανίζεται ωραία στην μπλε περιοχή των συμπιεστικών πιέσεων στο χαμηλότερο μέρος επίστρωμα στο Σχέδιο 4c. Αυτό εξηγεί το λόγο για τα μέγιστα από τους έντασης τομείς πίεσης μπροστά από την άκρη για να είναι και στις δύο πλευρές του επιπέδου συμμετρίας. Πάλι ένα άλλο μέγιστο της έντασηςτομέα πίεσης διαμορφώνεται κοντά στην άκρη αυλακιού πίσω από την άκρη μετά από 1,2 mm της ολίσθησης με τον ίδιο τρόπο για το επίστρωμα 2 μm. Οι πρώτες ρωγμές μπορούν να αναμένονται για να εμφανιστούν κοντά σε αυτήν την θέση αλλά κανένα πείραμα δεν έχει διεξαχθεί για να επιβεβαιώσει αυτό.

Στην ανάπτυξη των επιφανειών φθοράς αντίστασης και τα επιστρώματα, η κύρια εστίαση ήταν στη σκληρότητα της επιφάνειας. Αυτό είναι φυσικό, δεδομένου ότι για τα υλικά μάζας, εδώ και καιρό έχει παρατηρηθεί, στις περισσότερες περιπτώσεις, μια υψηλότερη σκληρότητα σαν αποτελέσματα μια καλύτερη αντοχή. Αυτή η σχέση είναι συμπεριλαμβάνεται στο νόμο επίστρωσης του D. Sinclair[43], ο οποίος δίνει μια γραμμικά αντίστροφη σχέση μεταξύ του όγκου επίστρωσης και της σκληρότητας. Αυτό είναι ακόμα ένας από τους πιο νόμους φθοράς της επίστρωσης που χρησιμοποιείται σε επαφές ολίσθησης. Ισχύει αρκετά καλά σε πολλές περιπτώσεις, αλλά την ίδια στιγμή, πρέπει να δηλωθεί ότι υπάρχουν επίσης πολλές περιπτώσεις όπου δεν ισχύει καθόλου.

Η σκληρότητα ενός επιστρώματος είναι σημαντική καθώς ένα σκληρότερο επίστρωμα μπορεί να προστατεύσει την επιφάνεια από τις πλαστικές παραμορφώσεις με συνέπεια τις γρατσουνιές και μπορεί να μειώσει το συστατικό εμβύθισης της τριβής. Εντούτοις, για ένα σύστημα ενός σκληρού επιστρώματος σε ένα μαλακότερο υπόστρωμα, επίσης οι ελαστικές ιδιότητες είναι κύριας σπουδαιότητας για την τριβολογική συμπεριφορά του. Αυτή η πτυχή δεν έχει παρατηρηθεί καθόλου στον ίδιο

βαθμό με τη σκληρότητα, και έχει παραμεληθεί ακόμη και σε πολλές μελέτες στις ιδιότητες του επιστρώματος.

Σε αυτήν την πτυχιακή, η επιρροή των ελαστικών ιδιοτήτων του επιστρώματος μελετήθηκε από τις προσομοιώσεις πίεσης σε μια 2 μm παχιά TiN-επιστρωμένη επιφάνεια χάλυβα με δύο διαφορετικές τιμές για το συντελεστή της ελαστικότητας του Young. Παρουσιάζονται οι διανομές πίεσης για ένα σχετικά ελαστικότερο επιστρώματα με  $E = 300$  GPa, και το Σχέδιο 5σε αυτό το έγγραφο παρουσιάζει εκείνα για ένα πιο δύσκαμπτο επίστρωμα με  $E = 540$  GPa. Ο λόγος για τα δύο επιστρώματα με τέτοια μεγάλη διαφορά στις ελαστικές ιδιότητες είναι ότι επίσης στη λογοτεχνία, υπάρχει μια πραγματικά τεράστια παραλλαγή στους αναφερόμενους συντελεστές του Young για τα επιστρώματα TiN, στο εύρος του  $E = 160$  GPa μέχρι το  $E = 600$  GPa. Είναι, επιπλέον, ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η επιλεγμένη υψηλότερη αξία  $E$  είναι στο χαρακτηριστικό εύρος για άμορφα αδαμαντοειδή επιστρώματα άνθρακα (ta-C DLC).

Κατά τη σύγκριση των εφελκυστικών συγκεντρώσεων πίεσης στο σχέδιο 6 και του σχέδιο 5αυτού του εγγράφου, αυτά που μπορούν να παρατηρηθούν από τα γενικά σχέδια πίεσης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης από 0 έως 3,3 mm είναι πολύ παρόμοια. Εντούτοις, υπάρχει μια τεράστια διαφορά στα εφελκυστικά επίπεδα πίεσης. Στη μελετημένη του εύρους ολίσθησης, οι μέγιστες εφελκυστικές συγκεντρώσεις πίεσης ήταν 30-100% υψηλότερες για τα πιο δύσκαμπτα επιστρώματα ( $E = 540$  GPa) έναντι των ελαστικότερων ( $E = 300$  GPa). Αφ' ετέρου, οι μέγιστες συμπιεστικές συγκεντρώσεις πίεσης ήταν 5-60% χαμηλότερες για τα πιο δύσκαμπτα επιστρώματα έναντι των πιο ελαστικών. F.A. McClintock, A.S. Argon [44].

Η κύρια διαφορά στους τομείς πίεσης στην εγκοπή με 5 N εκ των προτέρων φόρτωση είναι η τεράστια διαφορά στα μέγιστα επίπεδα πίεσης. Οι υψηλότερες εφελκυστικές πιέσεις είναι περίπου 2250 MPa για το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα, ενώ είναι μόνο 1120 MPa για ελαστικό. Επίσης η διαφορά σε μέγιστες συμπιεσμένες πιέσεις είναι ιδιαίτερες: 1600 MPa για δύσκαμπτα και 2100 MPa για το ελαστικό. Με το ίδιο ποσό εγκοπής, το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα θα προσαρμόσει σε πολύ πιο υψηλά επίπεδα πίεσης από το ελαστικότερο. Συγχρόνως, επίσης το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα θα μεταφέρει ένα μεγαλύτερο μέρος του φορτίου και έτσι αυτό θα αποτελέσει στις χαμηλότερες συγκεντρώσεις πίεσης κάτω από την ολισθαίνουσα άκρη όπως παρουσιάζεται από τις προσομοιώσεις. Το φινίρισμα των εφελκυστικών μέγιστων πιέσεων με τις υλικές ελαστικές ιδιότητες είναι εμφανή.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η συμπιεστική πίεση ακριβώς κάτω από την άκρη στο επίστρωμα/υποστρωμάτων της διεπαφής είναι σταθερή σε ολόκληρη το εύρος ολίσθησης και για τα δύο επιστρώματα. Για περισσότερο ελαστικό επίστρωμα, το επίπεδο συμπίεσης είναι περίπου 1100 MPa, και για το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα, είναι περίπου 600 MPa. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα από την κατάσταση του υλικού υποστρωμάτων αμέσως να προσαρμοστεί στο επίστρωμα, δηλ., δοκιμάζει μεγαλύτερες πλαστικές πιέσεις, που είναι υπό αυτήν τη μορφή πέρα από το όριο φορτίου. Αυτό προκύπτει σε μια σχεδόν ανεξάρτητη κατάσταση πίεσης παραμόρφωσης της κατάστασης, όπου ακόμη και όταν οι παραμορφώσεις αυξάνονται η ικανότητα του φορτίου που μεταφέρεται, οι πιέσεις του υλικού δεν αυξάνεται. Αυτό οδηγεί σε μια κατάσταση όπου η κατάσταση της πίεσης εξουσιάζει το όριο των ιδιοτήτων του φορτίου και το διαποτίζει, και αυτή η κατάσταση πίεσης μπορεί να προσεγγίζεται όσον αφορά την αναλογία των εφελκυστικών μονάδων μέτρησης.

Ο συμπιεστικός τομέας πίεσης αυξάνει βαθύτερο κάτω από τη διεπαφή με το αυξανόμενο φορτίο. Για το περισσότερο ελαστικό επίστρωμα, αυτό έχει ένα μέγιστο 1750 MPa, 6 μm υπό την επιφάνεια μετά από 3,3 mm της ολίσθησης, ενώ είναι 1250 MPa το ίδιο βάθος για το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα. Εδώ πάλι, το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα φέρνει ένα μεγαλύτερο μέρος του φορτίου και οδηγεί σε χαμηλότερα συμπιεστικά επίπεδα πίεσης στο υπόστρωμα. Η μετακίνηση από τη μέγιστη συμπιεστική αιχμή πίεσης κάτω από την επίστρωση/ενάρξεις διεπαφών υποστρωμάτων νωρίτερα με το πιο δύσκαμπτο επίστρωμα έναντι του ελαστικότερου. Ο λόγος είναι ότι οι μεγαλύτερες εφελκυστικές πιέσεις στο πιο δύσκαμπτο επίστρωμα, σε μεγαλύτερο βαθμό, αντισταθμίζουν τη συμπιεστική πίεση τομέας κάτω από τη συνολική επαφή.

Στην αρχική θέση προ ολίσθησης, η μέγιστη συμπιεστική συγκέντρωση πίεσης είναι πάντα στο επίπεδο συμμετρίας, αλλά μετά από κάποια ολίσθηση, αυτό μπορεί να παρατηρηθεί ότι μπορεί επίσης να απομακρυνθεί ελαφρώς από το επίπεδο συμμετρίας όπως στο Σχέδιο 5b και d. Οι ερευνητές θεωρούν ότι αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο χωριστά αποτελέσματα. Από την μια, διακριτοποίηση στο πρότυπο μπορεί να οδηγήσει σε ένα σχέδιο όπου η τιμή της κορυφής εμφανίζεται και στις δύο πλευρές του επιπέδου συμμετρίας, αφού ο βαθμός της πολυωνυμικής παρεμβολής μέσα στο στοιχείο είναι αυστηρά γραμμικός. Αφ' ετέρου, μπορεί επίσης να υπάρχει μια φυσική επίδραση. Η πλαστική παραμόρφωση θα πραγματοποιηθεί αρχικά σε, και αρχίζει από, το επίπεδο συμμετρίας κάτω από την επαφή. Μετά από αυτό, οι περιοχές και στις δύο πλευρές της επαφής όπου το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας είναι περί-

που έτοιμο να το υπερβούν και θα είναι το σημείο όπου έχει την υψηλότερη ικανότητα μεταφερόμενου φορτίου και εδώ επίσης εμφανίζονται οι υψηλότερες συμπιεστικές πιέσεις. Αυτό μπορεί να συνδεθεί με τους δύο ευδιάκριτους άξονες κυρτότητας στην παραμορφωμένη γεωμετρία και την πεπερασμένη πίεση αποτελέσματος.

Γενικά, ολόκληρο το σχέδιο τομέων πίεσης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης στο σχέδιο 6 περισσότερο εξουσιάζεται από την ελαστική συμπεριφορά έναντι των σχεδίων τομέων πίεσης στο Σχέδιο 5. Αυτό ο συλλογισμός είναι μια πιθανή εξήγηση σε μερικές ασυμμετρίες στις ιστορίες των σχεδίων πίεσης.

Το ελαστικό πάχος συντελεστών και επιστρώματος είναι οι κύριο παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στο μέγεθος των πιέσεων επίστρωσης/συστήματος υποστρωμάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση του ελαστικού συντελεστή υπερβαίνει αυτής του πάχους επιστρώματος εφ' όσον αποστάσεις ολίσθησης χαμηλότερες από περίπου 3-5 mm εξετάζονται. Ο ελαστικός συντελεστής είναι μια παράμετρος του υλικού που αυξάνει το γενικό τομέα πίεσης κάτω από σταθερούς όροι παραμόρφωσης, δηλ., η E-αναλογία του επιστρώματος και του υποστρώματος. Το πάχος επιστρώματος έχει επιπτώσεις μέσω της ακαμψίας συστήματος, δηλ., η ακαμψία του επιστρώματος και του υποστρώματος και η συμπυκνωμένη ακαμψία συστημάτων. Ελαστικά αποτελέσματα συντελεστών δεν συνδέεται άμεσα με την πλαστικότητα του υποστρώματος, αλλά η αυξανόμενη πλαστικότητα υποστρωμάτων προάγει υψηλότερο το τέντωμα στο επίστρωμα και, υπό αυτήν τη μορφή, υψηλότερος τονίζει μέσω ελαστικός συντελεστής. Το πάχος έχει επιπτώσεις στην ακαμψία συστημάτων. Ενώ οι ακαμψίες των διαφορετικών στρωμάτων επιστρώματος είναι συγκρίσιμα επίπεδα, χωρίς την ιδιαίτερη πλαστικότητα υποστρωμάτων, το επίστρωμα μπορεί να φέρει τα υψηλότερα φορτία με παχύτερο τα επιστρώματα και διανέμουν τις πιέσεις πιο ομοιόμορφα, με συνέπεια χαμηλότερες γενικές πιέσεις. Στα υψηλότερα φορτία, εντούτοις, το παχύτερο επίστρωμα αναγκάζεται να συμμορφωθεί με την παραμόρφωση από το υπόστρωμα, το οποίο έχει τη μεγαλύτερη ροπή για την πλαστικότητα. Αυτό οδηγεί σε μια αύξηση της πίεσης μέσα σύγκριση στα λεπτότερα επιστρώματα και τα αποτελέσματα σε φτωχότερο μηχανική απόδοση. Υπό αυτήν τη μορφή, κάποιος μπορεί σε γενικές γραμμές καθορίστε τις περιοχές φορτίων επαφών, όπου τροποποίηση στο επίστρωμα το πάχος μπορεί να παραγάγει την ευνοϊκή τριβολογική απάντηση. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν επίσης να γίνουν κατανοητοί από το συντελεστή ελαστικότητας στην αναλογία σκληρότητας, αλλά αυτό πρόκειται να σημειωθεί ότι οι όροι πλαστικότητας πρέπει να ληφθούν υπόψη σε τέτοιες παρατηρήσεις.

Μια σημαντική παρατήρηση που σημειώνεται είναι αυτή με την αλλαγή πάχους των 2  $\mu\text{m}$  παχύ και ελαστικό ( $E = 300 \text{ GPa}$ ) TiN επίστρωμα 5  $\mu\text{m}$  παχύ επίστρωμα, οι μέγιστες εφελκυστικές πιέσεις αυξήθηκαν με λιγότερο από 15%. Αλλά κρατώντας σταθερό το πάχος και αυξάνοντας τον συντελεστή ελαστικότητας σε 540 GPa, οι μέγιστες εφελκυστικές πιέσεις αυξήθηκαν με 30-100% στη μελέτη του εύρους ολίσθησης. Αυτό δείχνει ότι πολύ περισσότερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη βελτιστοποίηση των ελαστικών ιδιοτήτων του επιστρώματος από ότι προηγουμένως γινόταν. Σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί να είναι αποτελεσματικότερο να βελτιωθεί η αντοχή σπασίματος της επιστρωμένης επιφάνειας με την αλλαγή του συντελεστή ελαστικότητας του επιστρώματος παρά να γίνει αλλαγή στο πάχος επιστρώματος.

## 5.5 Πρότυπο Λειτουργίας Μαθηματικής Ανάλυσης

Οι διεπαφές έχουν ερευνηθεί με διάφορους τρόπους στο παρελθόν. Μια δυνατότητα είναι να υποθεθεί ότι τα δύο υλικά συνδέονται τέλεια. Με αυτήν την προσέγγιση, ένα συντηρητικό ολοκλήρωμα μπορεί να υιοθετηθεί για να λάβει τους παράγοντες έντασης πίεσης και αντίστοιχο ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης. Εντούτοις, εάν η ρωγμή προωθεί οιονεί-στατικά, η διεπαφή μπορεί να προσομοιωθεί ως πολύ λεπτή περιοχή συνέχειας με τις βαθμολογημένες ιδιότητες, ως στενή λουρίδα των ελατηρίωνή την χρησιμοποίηση ενός συνεκτικού προτύπου ζώνης. Η τελευταία προσέγγιση προτάθηκε αρχικά από YeT, SuoZ, EvansAGκαιShieuFS, Shiao[44], [45]ως εναλλακτική προσέγγιση μοναδικής συμπεριφοράς ακρών ρωγμών. Με αυτήν την έννοια, οι πιέσεις μπροστά από την άκρη ρωγμών είναι οριακές, και ένας νόμος έλξης-χωρισμού χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία σπασίματος.

Λόγω της μεταβλητότητάς του, τα συνεκτικά πρότυπα ζώνης εφαρμόζονται όλο και περισσότερο σε πολλούς τομείς εφαρμοσμένης μηχανικής. Παραδείγματος χάριν, συνεκτικός τα πρότυπα λειτουργίας έχουν χρησιμοποιηθεί στην πλαστικότητα ακρών ρωγμών μελέτης, τον ερπυσμό κάτω από τη στατική φόρτωση κόπωσης, συγκολλητικές ενώσεις που συνδέεται, η ρωγμή γεφύρωσης, και η διεπαφή ραγίζουν στα βιοϋλικά. Όπως συζητείται από το Wiklund U.[46], ένα μεγάλο πλεονέκτημα από τη συνεκτική λειτουργία προτύπων είναι ότι είναι σε θέση να αντιπροσωπεύσουν διάφορους Μίκρο-μηχανικούς μηχανισμούς στην εγγύτητα της άκρης ρωγμών. Επιπλέον, μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα σε ένα αριθμητικό πλαίσιο. Για μια λεπτο-

μερή αναθεώρηση στις εφαρμογές τα συνεκτικά πρότυπα λειτουργίας, ο αναγνώστης κατευθύνεται στον Wiklund U και λοιποί.

Υπάρχουν διάφορα συνεκτικά πρότυπα ζώνης που εξετάζουν τις μικτές παραμορφώσεις τρόπου και τις ρωγμές διεπαφών. Γενικά, αυτοί οι νόμοι γράφονται χωριστά για κάθε τρόπο και συνδέονται έπειτα μαζί, είτε με τον καθορισμό των παραμέτρων συζεύξεων είτε με τη χρησιμοποίηση μιας αποτελεσματικής μετατόπιση. Καθώς ένα παράδειγμα των πρώτων πλησιάζει, ο συνεκτικός νόμος που παρουσιάζεται από Xu και Needleman [47], [48], [49], ο οποίος εφαρμόστηκε για να ερευνηθεί τη συνοχή μόριο-μητρών, κυβερνάται από δύο παραμέτρους ένωσης, οι οποίες αφορούν την αναλογία μεταξύ των ποσοστών ενεργειακής απελευθέρωσης καθαρών τρόπων I και II και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις. Εντούτοις, ήταν παρουσιασμένο από τον vandeBosch και λοιποί.ότι αυτό το πρότυπο δεν περιγράφει τη ρεαλιστική μικτή συμπεριφορά τρόπου εκτός αν τα ποσοστά ενεργειακής απελευθέρωσης και των δύο τρόπων είναι ίσα.

Δυστυχώς, αυτή η υπόθεση δεν είναι γενικά σωστή. Για να υπερνικήσει αυτό το πρόβλημα, μια μη διαστασιακή αποτελεσματική σχετική μετατόπιση ρωγμών υποτίθεται ότι από πολλούς ανακριτές έλαβε τη μικτή διεπαφή τρόπου συμπεριφοράς. Όπως συζητείται με Zhang και Paulino [50] και vandeBosch και λοιποί, μια σημαντική δυσκολία προκύπτει κατά τον εξέταση μιας αποτελεσματικής σχετικής μετατόπισης ρωγμών οδηγεί σε μια σταθερή ενέργεια του χωρισμού, η οποία δεν είναι ρεαλιστική στην περίπτωση των ρωγμών διεπαφών. Είναι ευρέως γνωστό ότι η ενδιάμεση ανθεκτικότητα σπασίματος δεν είναι μια σταθερά, αλλά μια λειτουργία από το μικτό τρόπο. Για αυτόν τον λόγο, σε διάφορες έρευνες μια μεταβλητή ενδιάμεση ανθεκτικότητα σπασίματος έχει ενσωματωθεί στα συνεκτικά πρότυπα ζώνης. Ένα κριτήριο έλλειψης-μορφής υποτίθεται ότι αποτέλεσε την επίδραση από τον μικτό τρόπο. Αν και αυτό το κριτήριο αποτυχίας χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς ερευνητές για τις διαφορετικές εφαρμογές τα όμοιο κατευθυνόμενα σύνθετα, αυτό το κριτήριο να μην είναι αρκετά ακριβές για ορισμένες περιπτώσεις των μικτών ρωγμών διεπαφών λειτουργίας, ειδικά μεταξύ των ανόμοιων ιστροπικών υλικών. Για να υπερνικήσουν αυτό το πρόβλημα, Hutchinson και Suo [51], [52], εισήγαγαν το εντελώς διαφορετικό μικτό κριτήριο αποτυχίας τρόπου που βρέθηκε να είναι κατάλληλο για τις ρωγμές διεπαφών μεταξύ ανόμοιων ιστροπικών υλικών, καθώς επίσης και για τα τοποθετημένα σε σύνθετα στρώματα.



Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι να εισαχθεί ένα νέο συνεκτικό πρότυπο λειτουργίας που να είναι σε θέση να περιγράψει την εξάρτηση από τις πρότυπες παραμέτρους επάνω στο μικτό τρόπο. Μέσα στο σχέδιο αυτού του προτύπου, η συνεκτική ενέργεια δεν είναι σταθερή, αλλά η λειτουργία του μικτού τρόπου. Ένα πολυωνυμικό συνεκτικό πρότυπο λειτουργίας παράγεται λαμβάνοντας υπόψη τις αναλυτικές και πειραματικές παρατηρήσεις από τις ρωγμές διεπαφών. Ο δεύτερος στόχος αυτής της μελέτης είναι να προταθεί μια μεθοδολογία για τον καθορισμό πρότυπων παραμέτρων από τα πειραματικά στοιχεία. Για αυτόν τον λόγο, ένα κριτήριο αποτυχίας λαμβάνεται σύμφωνα με το νέο συνεκτικό νόμο.

Το παρόν έγγραφο οργανώνεται ως εξής. Κατ' αρχάς, διάφορες σημαντικές έννοιες σχετικά με τους μηχανικούς σπασίματος της διεπαφής οι ρωγμές συζητούνται εν συντομία στην παράγραφο 2. Οι συστατικές εξισώσεις του προτεινόμενου συνεκτικού προτύπου λειτουργίας περιγράφονται στην Παράγραφο 3. Η αντίστοιχη μήτρα συντελεστών εφαπτομένης εξάγεται, καθώς επίσης και ένα αριθμητικό σχέδιο ενός στοιχείου διεπαφών. Στην παράγραφο 4, η ισχύς του νέου συνεκτικού νόμου εξετάζεται. Για αυτόν τον λόγο, η διπλή πρόβολος ακτίνας και τα βραζιλιάνα δείγματα δίσκων αναλύονται. Τέλος, μια μεθοδολογία για να καθορίσει τις παραμέτρους του προτύπου περιγράφεται.

Σε αυτό το τμήμα, διάφορες σημαντικές έννοιες των μηχανισμών σπασίματος των ρωγμών διεπαφών περιγράφονται εν συντομία. Μια υπόθεση τις μικρής κλίμακας πλαστικού και ζώνης επαφών επικαλούνται. Συνεπώς, η θεωρία των γραμμικών ελαστικών μηχανισμών σπασίματος μπορεί να υιοθετηθεί έτσι ώστε ο τομέας μετατοπίσεων κοντά στην άκρη ρωγμών κυβερνάται από έναν σύνθετο παράγοντα έντασης πίεσης  $K = K_1 + iK_2$

$$\mathbf{u}_\alpha(r, \theta) = \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ \Re(Kr^{i\epsilon}) \mathbf{u}_\alpha^{(1)}(\theta, \epsilon) + \Im(Kr^{i\epsilon}) \mathbf{u}_\alpha^{(2)}(\theta, \epsilon) \right\} \quad (1)$$

όπου  $\alpha = 1, 2$  δείχνει τα ανώτερα και χαμηλότερα υλικά,  $r$  και  $\theta$  είναι πολικές συντεταγμένες άκρων ρωγμών,  $R$  και  $I$  είναι τα πραγματικά και φανταστικά μέρη της πο-

σότητας στην παρένθεση,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\epsilon$  είναι η παράμετρος ταλάντωσης, η οποία δίνεται από :

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{1-\beta}{1+\beta} \right) \quad (2)$$

και  $\beta$  είναι μια από τις παραμέτρους Dundurs. Για την διεπαφή μεταξύ δύο γραμμικά ελαστικών ισοτροπικών υλικών,

$$\beta = \frac{\mu_1 (\kappa_2 - 1) - \mu_2 (\kappa_1 - 1)}{\mu_1 (\kappa_2 + 1) + \mu_2 (\kappa_1 + 1)} \quad (3)$$

όπου  $\mu_j$  και  $\nu_j$ ,  $j = 1, 2$  είναι συντελεστές διάτμησης και αναλογία Poisson από τα ανώτερα και χαμηλότερα υλικά αντίστοιχα. Στην εξίσωση (3)  $\kappa_j = 3 - 4 \nu_j$  για τους όρους επίπεδων τάσεων και  $(3 - \nu_j) / (1 + \nu_j)$  για τους γενικευμένους όρους πίεσης επιπέδων. Οι εκφράσεις  $u_\alpha^{(1)}(\theta, \epsilon)$  και  $u_\alpha^{(2)}(\theta, \epsilon)$  είναι ομαλοποιημένα διανύσματα μετατοπίσεων λειτουργίας 1 και 2 οι οποίες εξαρτώνται από το  $\theta$  και  $\epsilon$ .

Μπορεί να αποδειχθεί ότι οι ανοιχτές ρωγμές και η μετατοπισμένη ολίσθηση,  $\delta_n$  και  $\delta_s$ , αντίστοιχα, δίνονται από

$$\delta_n + i\delta_s = \sqrt{\frac{r}{2\pi}} C^* [\Re(Kr^{i\epsilon}) + i\Im(Kr^{i\epsilon})] \quad (4)$$

όπου  $C^*$  εξαρτάται από τις υλικές ιδιότητες των ανώτερων και χαμηλότερων υλικών. Επιπλέον, με τη βοήθεια του  $j$ -ολοκληρώματος, αυτό μπορεί να παρουσιαστεί ότι το ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης μιας ρωγμής διεπαφών δίνεται από τη μορφή

$$\mathcal{G}_i = \frac{1}{H} (K_1^2 + K_2^2), \quad (5)$$

όπου το  $H$  εξαρτάται από τις υλικές ιδιότητες και ο υπογεγραμμένος  $i$  αντιπροσωπεύει τη διεπαφή. Άραξ το ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης Γίδιεπαφών φθάνει στην κρίσιμη αξία του  $G_{ic}$ , η ρωγή διαδίδει μια αύξηση. Εντούτοις, η ανθεκτικότητα διεπαφών δεν είναι μια ενιαία παράμετρος υλικού αλλά μια λειτουργία του μικτού τρόπου στη διεπαφή. Συνεπώς, το κρίσιμο Griffith ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης μπορεί γράφεται όπως

$$\mathcal{G}_{ic} = \mathcal{G}_{ic}(\psi), \quad (6)$$

όπου το  $w$  είναι μια παράμετρος του μικτού τρόπου ή γωνία φάσης, η οποία ορίζεται ως

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{\delta_s}{\delta_n} \right) \Big|_{r=\hat{L}} = \tan^{-1} \left[ \frac{\Im(K\hat{L}^{ic})}{\Re(K\hat{L}^{ic})} \right] = \tan^{-1} \left( \frac{K_2}{K_1} \right) + \epsilon \ln \hat{L} \quad (7)$$

και  $\sqrt{L}$  είναι ένα αυθαίρετο μήκος αναφοράς. Στην εξίσωση (7) οι μονάδες του όρου  $K\sqrt{L}^{ic}$  είναι  $MPa\sqrt{m}$ , οι ‘συνηθισμένες’ μονάδες των παραγόντων έντασης πίεσης. Επιπλέον, στη διεπαφή ( $\theta = 0$ ), κάποιος μπορεί να δείξει ότι η εξίσωση (7) μειώνει το

$$\tan \psi = \frac{\sigma_{r\theta}}{\sigma_{\theta\theta}} \Big|_{r=\hat{L}} = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{22}} \Big|_{r=\hat{L}} \quad (8)$$

Επομένως, το  $W$  είναι το μέτρο της σχέσης μεταξύ της μέγιστης και της κανονικής τμημάτων (συστατικών) πίεσης κατά μήκος της διεπαφής σε μια απόσταση  $\sqrt{L}$  από την άκρη ρωγμών.

Μια ρητή έκφραση  $\mathcal{G}_{ic}(\psi)$  μπορεί να καθοριστεί από μια φαινομενολογική προσέγγιση. Για παράδειγμα, Hutchinson και Suo [51], [52] υπέδειξαν δύο λειτουργίες που περιγράφουν το κρίσιμο ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης της διεπαφής ως

$$\mathcal{G}_{ic}(\psi) = \mathcal{G}_{ic} \{1 + \tan^2[(1 - \lambda)\psi]\} \quad (9)$$

και

$$\mathcal{G}_{ic}(\psi) = \mathcal{G}_{ic} \{1 + (1 - \lambda) \tan^2 \psi\}. \quad (10)$$

Και στις δύο περιπτώσεις, στο όριο  $\lambda = 0$ ,  $\mathcal{G}_{ic}$  δείχνει το κρίσιμο ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης που συνδέεται με  $K_1$  και ανεξάρτητο το  $K_2$ . Από την εξίσωση (10), για  $\lambda < 1$ , η ανθεκτικότητα διεπαφών είναι απεριόριστη (δεν συνδέεται) για την υπόθεση  $\psi \rightarrow \pm\pi/2$ . Όπως ερμηνεύθηκε από Hutchinson και Suo [51], [52] αυτό το χαρακτηριστικό δεν πρέπει να ληφθεί κυριολεκτικά, αλλά απεικονίζει την τάση του φαινομενολογικού πρότυπου. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε για πολλές/διάφορες διεπαφές, όπως το γυαλί/εποξειδικά, κεραμικοί βιοϋλικοί άργιλοι και ενισχυμένοι ίνα από γραφίτη/εποξικός διαγώνιος πτυχές. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα φαινομενολογικά κριτήρια ανθεκτικότητας βρέθηκαν να είναι της μορφής

$$\mathcal{G}_{ic}(\psi) = \mathcal{G}_{ic}(1 + \tan^2 \psi), \quad (11)$$

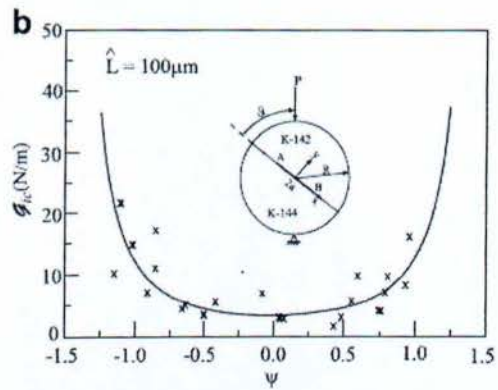
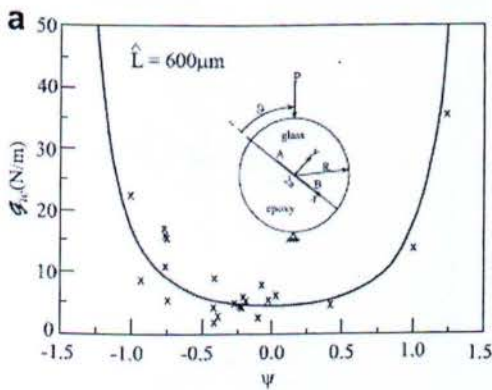
Η οποία συμπίπτει με τις εξισώσεις (9) και (10) για  $\lambda = 0$ .

Μια απεικόνιση των κριτηρίων ανθεκτικότητας διεπαφών του γυαλιού/εποξικές και κεραμικές διεπαφές αργίλου παρουσιάζονται στο Σχέδιο 1. Αυτή η αποτυχία για τα κριτήρια λαμβάνονται από Banks-Sills [53], [54], [55], [56], και λοιποί. για το γυαλί/την εποξική διεπαφή και από Banks-Sills και λοιποί. για τα K-142/K-144 κεραμική διεπαφή αργίλου. Τα λεπτομερή πειραματικά στοιχεία των δειγμάτων φόρτωσαν στις διαφορετικές γωνίες  $\theta$  και θεραπεύοντας τη θερμοκρασία  $\Delta T$  αλλαγής μπορεί να βρεθεί στον Ashkenazi. Για αυτόν τον λόγο, οι μηχανικοί παράγοντες έντασης πίεσης (που αντιστοιχούσαν το εφαρμοσμένο φορτίο  $\pi$  για το σπάσιμο) καθορίστηκαν με τη βοήθεια της πεπερασμένης μεθόδου στοιχείων και ενός συντηρητικού ολοκληρώματος. Η συμβολή της υπόλοιπης θεραπείας τονίζει στους παράγοντες έντασης πίεσης αξιολογήθηκε με την υιοθέτηση της τεχνικής λειτουργίας βάρους. Μετά από την απόκτηση των μηχανικών και θερμικών παραγόντων έντασης πίεσης, οι συνολικοί παράγοντες έντασης πίεσης λήφθηκαν από την υπέρθεση. Αυτοί υιοθετή-

θηκαν για να καθορίσουν το κρίσιμο ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης διεπαφών στην εξίσωση (5) ως λειτουργία του τρόπου μεικτής γωνίας ή φάσης στην εξίσωση (7) για κάθε μεμονωμένο δείγμα. Αυτά τα αποτελέσματα σχεδιάστηκαν για κάθε υλικό ζευγάρι στο Σχέδιο 1.

Σε αυτό το τμήμα, ένα νέο δισδιάστατο συνεκτικό πρότυπο ζώνης που είναι κατάλληλο για τη μικτή παραμόρφωση τρόπου παράγεται. Η μηχανική απάντηση της διεπαφής περιγράφεται από τη σχέση μεταξύ των μεταφορών/έλξης/τράβηγμα και των σχετικών μετατοπίσεων εμπρός η διεπαφή. Σε ένα δεδομένο σημείο της διεπαφής, η σχετική μετατόπιση και η αντίστοιχη έλξη δείχνονται κοντά  $\delta = [\delta_n, \delta_s]^T$  και  $t = [t_n, t_s]^T$ , αντίστοιχα. Ακολούθως ο Needleman, τίθεται μια πιθανή λειτουργία ως αίτημα όπως αυτή

$$\Phi = \Phi[\delta(\delta_n, \delta_t), \psi(\delta_n, \delta_t)] \quad (12)$$



Κριτήρια σπασίματος (α) του γυαλιού/της εποξικής διεπαφής και (β) του βιοϊλικού κεραμικού σύνθετου αργίλου.

με έναν αντίστοιχο συνεκτικό νόμο

$$t = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \quad (13)$$

Επιπλέον, μια κλιμακωτή αποτελεσματική μετατόπιση ανοίγματος και μια γωνία φάσης μικτού τρόπου ορίζονται ως

$$\delta = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_s^2}, \quad \psi = \tan^{-1} \frac{\delta_s}{\delta_n} \quad (14)$$

Ξαναγράφοντας την εξίσωση (13), η συνεκτική έλξη δίνεται από

$$\mathbf{t} = t_n \mathbf{n} + t_s \mathbf{s} = \frac{\partial \phi}{\partial \delta_n} \mathbf{n} + \frac{\partial \phi}{\partial \delta_s} \mathbf{s}, \quad (15)$$

όπου

$$\begin{aligned} t_n &= \frac{\partial \phi}{\partial \delta_n} = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \delta_n} + \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \delta_n} = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\delta_n}{\delta} + \frac{1}{\delta} \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \frac{\delta_s}{\delta}, \\ t_s &= \frac{\partial \phi}{\partial \delta_s} = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \delta_s} + \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \delta_s} = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\delta_s}{\delta} + \frac{1}{\delta} \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \frac{\delta_n}{\delta}. \end{aligned} \quad (16)$$

Αλλιώς

$$t_n = t_n^\delta + \frac{1}{\delta} t_n^\psi, \quad t_s = t_s^\delta + \frac{1}{\delta} t_s^\psi \quad (17)$$

με

$$t_n^\delta = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\delta_n}{\delta}, \quad t_n^\psi = -\frac{\partial \phi}{\partial \psi} \frac{\delta_s}{\delta}, \quad t_s^\delta = \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\delta_s}{\delta}, \quad t_s^\psi = \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \frac{\delta_n}{\delta}. \quad (18)$$

Οι επόμενες, δυο αποτελεσματικές παράμετροι καθορίζονται από

$$\begin{aligned} t^\delta &= \sqrt{(t_n^\delta)^2 + (t_s^\delta)^2} = \frac{\partial \phi}{\partial \delta}, \\ t^\psi &= \sqrt{(t_n^\psi)^2 + (t_s^\psi)^2} = \frac{\partial \phi}{\partial \psi}, \end{aligned} \quad (19)$$

έτσι ώστε η αποτελεσματική έλξη εισάγεται ως

$$t = t^{\delta} + \frac{1}{\delta} t^{\psi} \quad (20)$$

Από την εξίσωση (19), δύο συστατικοί νόμοι καθιερώνονται. Ο πρώτος αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της αποτελεσματικής έλξης  $t^{\delta}$  και η αποτελεσματική σχετική μετατόπιση  $\delta$ . Ο δεύτερος αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του  $t^{\psi}$  και της γωνίας φάσης  $\psi$ . Μπορεί να σημειωθεί ότι το  $t^{\psi}$  δεν έχει τις μονάδες της πίεσης. Εντούτοις, ο όρος  $t^{\psi}/\delta$  συμβάλλει στη γενική αποτελεσματική έλξη σύμφωνα με την εξίσωση (20).

Έπειτα, καθιερώνεται μια κατάλληλη πιθανή λειτουργία. Μια απλή και κατάλληλη λειτουργία είναι μια πολυωνυμική πιθανή λειτουργία η οποία έχει επεκταθεί εδώ για τους μικτούς τρόπους, δηλαδή

$$\phi = \phi(\delta, \psi) = \frac{27}{4} t_0^*(\psi) \delta \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{\delta}{\delta_c^*(\psi)} \right)^3 - \frac{2}{3} \left( \frac{\delta}{\delta_c^*(\psi)} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta}{\delta_c^*(\psi)} \right) \right] \quad (21)$$

για  $\delta \leq \delta_c^*(\psi)$ , όπου

$$\delta_c^*(\psi) = \delta_c^1 \sqrt{1 + \tan^2 \psi}, \quad t_0^*(\psi) = t_0^1 \sqrt{1 + \tan^2 \psi} \quad (22)$$

Στην εξίσωση (22),  $\delta_c^1$  και  $t_0^1$  είναι υλικές παράμετροι οι οποίες δείχνουν αποτελεσματικά την αποκόλληση και μετατόπιση και η μέγιστο αποτελεσματική έλξη για τον τρόπο 1 χωριστά, αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, το κεφάλαιό 1 δείχνει μια περίπτωση παραμόρφωσης που συνδέεται με  $K_1$  και τον ανεξάρτητο  $K_2$ . Σημειώστε ότι το ενδεχόμενο  $\phi$  είναι μια λειτουργία της γωνίας φάσης μικτού τρόπου  $\psi$ . Για  $\delta \geq \delta_c^*(\psi)$ ,

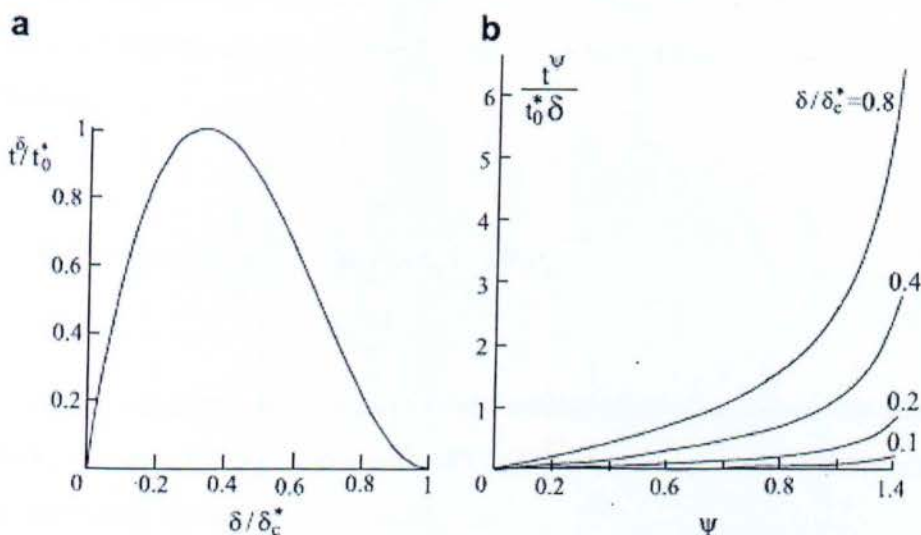
η ενδεχόμενη λειτουργία  $\phi(\delta, \psi)$  που φθάνει την κρίσιμη αξία  $\mathcal{G}_{ic}(\psi)$ . Αλλάζοντας την εξίσωση (21) μέσα στην εξίσωση (19) η οποία γίνεται

$$t^\delta(\delta, \psi) = \frac{\partial \phi(\delta, \psi)}{\partial \delta} = \frac{27}{4} t_0^* \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right) \left[ 1 - 2 \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right) + \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right)^2 \right] \quad (23)$$

και

$$t^\psi(\delta, \psi) = \frac{\partial \phi(\delta, \psi)}{\partial \psi} = \frac{9}{8} t_0^* \delta \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right)^2 \left[ 4 - 3 \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right) \right] \tan \psi \quad (24)$$

για  $\delta \leq \delta_c^*$  και  $t^\delta = t^\psi = 0$  για  $\delta > \delta_c^*$ . Μόλις καθοριστούν οι αποτελεσματικές έλξεις  $t^\delta$  και  $t^\psi$ , οι έλξεις  $t_n$  και  $t_s$  μπορούν να καθοριστούν από την εξίσωση (17).



(a) Συστατικός νόμος χωρισμού έλξης. (b) Η επίδραση του μικτού τρόπου στην παραγμένη έλξη.

Μια γραφική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της συνεκτικής έλξης  $t^\delta$  και της αποτελεσματικής σχετικής μετατόπισης  $\delta$  παρουσιάζεται στο σχέδιο 2a. Σημειώστε ότι η συνεκτική έλξη και η αποτελεσματική σχετική μετατόπιση είναι ομαλοποιημένες όσον αφορά το  $t_0^*$  και  $\delta_c^*$  στην εξίσωση (22). Γίνεται κατανοητό ότι και οι δύο εξαρτώνται από τη γωνία  $\psi$  φάσης μικτού τρόπου. Κάποιος μπορεί να φανταστεί ένα άπειρο σύνολο συνεκτικής ζώνης που διαμορφώνεται με την ίδια πολυωνυμική μορφή αλλά με διαφορετικές τιμές  $t_0^*$  και  $\delta_c^*$ . Για μια συγκεκριμένη αξία του  $\psi$ , οι παράμετροι του συνεκτικού πρότυπου ζώνης ρυθμίζεται για να μιμηθεί την επίδραση του μικτού τρόπου. Στην περίπτωση ορίου  $\psi = \pi/2$ , η σχετική μετατόπιση για το χωρισμό  $\delta_c^*$  φθάνει στο άπειρο, το οποίο υπονοεί ότι κανένας χωρισμός δεν αναμένεται. Αυτό μοιάζει με τα κριτήρια σπασίματος τα οποία συζητήθηκαν στην παράγραφο 2. Αφ'



ετέρου, για το  $\psi = 0$ , το πρότυπο μειώνεται στην καλά γνωστή πολυωνυμική συνεκτική ζώνη πρότυπου Needleman. Στο σχέδιο 2b, η σχέση μεταξύ της έλξης  $t^{\psi}/\delta$  και η γωνία φάσης μικτού τρόπου είναι διευκρινισμένες. Όπως αναμένεται, στο όριο  $\psi \rightarrow \pi/2$ , η έλξη είναι άπειρη; αυτό υπονοεί ότι η διάδοση ρωγμών δεν είναι δυνατή.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η επιλογή μιας πολυωνυμικής πιθανής λειτουργίας είναι κυρίως για την απλότητα. Μια παρόμοια παραγωγή μπορεί να πραγματοποιηθεί για άλλες ομαλές πιθανές λειτουργίες, όπως ο εκθέτης (όπως σε Ortiz και Pandolfi) [40] ή γραμμικός. Ένα δη-γραμμικό συνεκτικό πρότυπο δεν είναι κατάλληλο, δεδομένου ότι για αυτήν την περίπτωση μια συνεχής πιθανή λειτουργία δεν μπορεί να καθιερωθεί.

Το κρίσιμο ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης ορίζεται ως η ενέργεια για το χωρισμό. Συνεπώς, μπορεί να ληφθεί από τη δυνατότητα λειτουργίας στην εξίσωση (21) όπως

$$\mathcal{G}_K(\psi) = \phi(\delta = \delta_c^*) = \frac{9}{16} \delta_c^1 \zeta_0^1 (1 + \tan^2 \psi) = \mathcal{G}_{1c} (1 + \tan^2 \psi), \tag{25}$$

η οποία συμπίπτει με το καλά γνωστό κριτήριο ανθεκτικότητας των ρωγμών διεπαφών, το οποίο δόθηκε στην εξίσωση (11). Μπορεί να σημειωθεί εκείνη η χρήση ότι έχει γίνει στην εξίσωση (22).

Το προτεινόμενο συνεκτικό πρότυπο ζώνης εξαρτάται από δύο παραμέτρους, δηλαδή, ο τρόπος 1 συνεκτικής ενέργειας,  $\mathcal{G}_{1c}$ , και τρόπος 1 συνεκτικής δύναμης  $t_0^1$ . Η αποτελεσματική σχετική μετατόπιση για το χωρισμό  $\delta_c^1$  μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση (25) με την αντικατάσταση  $\psi = 0$ .

Μπορεί να διαπιστωθεί ότι η αναστρεψιμότητα του προτύπου δεν εξετάζεται στην τρέχουσα μελέτη. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλο για τα προβλήματα μέσα από μια εκφόρτωση δεν εμφανίζεται μέσα στη συνεκτική περιοχή ζώνης.

Τα τμήματα  $t_n$  και  $t_s$  έλξης μπορούν να καθοριστούν από τις σχέσεις στις εξισώσεις (16). Τα συστατικά της ακαμψίας εφαπτομένης μήτρας ορίζεται ως

$$D_{nn} = \frac{\partial t_n}{\partial \delta_n}, \quad D_{ns} = \frac{\partial t_n}{\partial \delta_s}, \quad D_{sn} = \frac{\partial t_s}{\partial \delta_n}, \quad D_{ss} = \frac{\partial t_s}{\partial \delta_s}. \quad (26)$$

αντικαθιστώντας την εξίσωση (16) στην εξίσωση (26) προκύπτει ότι

$$D_{nn} = \frac{\partial}{\partial \delta_n} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \delta_n} + \frac{\partial \psi}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \delta_n} \right] = \phi_{,\delta\delta} \left( \frac{\delta_n}{\delta} \right)^2 + \phi_{,\psi\psi} \left( \frac{\delta_s}{\delta^2} \right)^2 - 2\phi_{,\delta\psi} \left( \frac{\delta_n \delta_s}{\delta^3} \right) + \phi_{,\delta} \left( \frac{1}{\delta} - \frac{\delta_n^2}{\delta^3} \right) + \phi_{,\psi} \left( \frac{2\delta_n \delta_s}{\delta^4} \right), \quad (27)$$

$$D_{ss} = \frac{\partial}{\partial \delta_s} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \delta_s} + \frac{\partial \psi}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \delta_s} \right] = \phi_{,\delta\delta} \left( \frac{\delta_s}{\delta} \right)^2 + \phi_{,\psi\psi} \left( \frac{\delta_n}{\delta^2} \right)^2 + 2\phi_{,\delta\psi} \left( \frac{\delta_n \delta_s}{\delta^3} \right) + \phi_{,\delta} \left( \frac{1}{\delta} - \frac{\delta_s^2}{\delta^3} \right) - \phi_{,\psi} \left( \frac{2\delta_n \delta_s}{\delta^4} \right), \quad (28)$$

$$D_{sn} = D_{ns} = \frac{\partial}{\partial \delta_n} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \delta_s} + \frac{\partial \psi}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \delta_s} \right] = \phi_{,\delta\delta} \left( \frac{\delta_n \delta_s}{\delta^2} \right) - \phi_{,\psi\psi} \left( \frac{\delta_n \delta_s}{\delta^4} \right) + \phi_{,\delta\psi} \left( \frac{\delta_n^2}{\delta^3} - \frac{\delta_s^2}{\delta^3} \right) - \phi_{,\delta} \left( \frac{\delta_n \delta_s}{\delta^3} \right) - \phi_{,\psi} \left( \frac{\delta_n^2 - \delta_s^2}{\delta^4} \right). \quad (29)$$

όπου

$$\phi_{,\delta} = t^{\delta} = \frac{27}{4} t_0^{\delta} \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right) \left[ 1 - 2 \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right) + \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right)^2 \right], \quad (30)$$

$$\phi_{,\delta\delta} = \frac{27}{4} t_0^{\delta} \left[ 1 - 4 \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right) + 3 \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right)^2 \right], \quad (31)$$

$$\phi_{,\delta\psi} = \frac{27}{2} t_0^{\delta} \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right)^3 \frac{\delta_c^* - \delta}{\delta} \tan \psi, \quad (32)$$

$$\phi_{,\psi} = t^{\psi} = \frac{9}{8} t_0^{\psi} \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right)^2 \left[ 4 - 3 \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right) \right] \delta \tan \psi, \quad (33)$$

$$\phi_{,\psi\psi} = \frac{9}{8} t_0^{\psi} \left( \frac{\delta}{\delta_c^*} \right)^3 [4\delta_c^* - 3\delta(1 - \tan^2 \psi)]. \quad (34)$$

If  $\delta > \delta_c^*$ , then  $D_{nn} = D_{ss} = D_{ns} = D_{sn} = 0$ .

Το δισδιάστατο συνεκτικό πρότυπο ζώνης που παρουσιάζεται εδώ μπορεί να εφαρμοστεί αριθμητικά με τη βοήθεια μονοδιάστατου στοιχείου διεπαφών. Το στοιχείο διεπαφών θεωρείται με μηδενικό πάχος ( $h = 0$ ) στην μη-παραμορφωμένη κατάσταση και διαμορφώνεται σαν ένα 4-κόμβων γραμμικό στοιχείο, όπως φαίνεται στο Σχέδιο 3. Σε ένα δεδομένο σημείο της διεπαφής, η σχετική μετατόπιση και η αντίστοιχη έλξη δείχνεται από  $\delta = [\delta_n, \delta_s]^T$  και  $t = [t_n, t_s]^T$ , αντίστοιχα. Η σχετική μετατόπιση διανύσματος βρίσκεται από

$$\Delta(\eta) = B(\eta),$$

όπου  $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_1^T, \mathbf{P}_2^T, \mathbf{P}_3^T, \mathbf{P}_4^T]^T$ ,  $\mathbf{P}_j = [u_j, v_j]^T \cdot \mathbf{J}$  αναφέρεται στο σφαιρικό σύστημα αναφοράς και  $u_j$  και  $v_j$  είναι οι μετατοπίσεις στο  $x$  και  $y$ -συντεταγμένες, αντίστοιχα.

Η μήτρα  $\mathbf{B}$  δίνεται από

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -N_1 & 0 & -N_2 & 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & -N_1 & 0 & -N_2 & 0 & N_1 & 0 & N_2 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

όπου  $N_1 = (1-\eta)/2$  και  $N_2 = (1+\eta)/2$  είναι γραμμική, μορφή μονοδιάστατης λειτουργίας.

Για να εφαρμόσει το στοιχείο διεπαφών, το εσωτερικό διάνυσμα δύναμης  $\mathbf{q}$  δίνεται από

$$\mathbf{q} = \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{t} dA = \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{t} / d\eta, \quad (37)$$

όπου  $l$  είναι το μήκος του στοιχείου διεπαφής στο σφαιρικό σύστημα αναφοράς. Η πεπερασμένη εξίσωση στοιχείων δίνεται σε επ-αυξητική μορφή από

$$\mathbf{D}_i \Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{q}, \quad (38)$$

$$\mathbf{D}_i = \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dA = \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} / d\eta, \quad (39)$$

και τα συστατικά του  $\mathbf{D}$  δίνονται από τις εξισώσεις (27)-(29).

Μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι εκτός-της διαγωνίου όροι μπορούν να εμφανιστούν στη  $\mathbf{D}\mathbf{T}$  μήτρα ακαμψίας στοιχείων. Αυτοί οι όροι αντιπροσωπεύουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών βαθμών ελευθερίας της διεπαφής του στοιχείου και είναι η έκβαση της φύσης συνέχειάς του. Εντούτοις, οι όροι εκτός-της διαγωνίου οδηγούν μερικές φορές στις αριθμητικές δυσκολίες. Για να υπερνικήσουν αυτό το πρόβλημα,  $\chi_{ie}$  και λοιποί και  $\chi_{ie}$  και ο Waas [57], [58] εισήγαγαν ένα ιδιαίτερο συ-

νεκτικό πρότυπο ζώνης (DCZM) και ένα κατάλληλο στοιχείο στα οποία η μήτρα α-καμψίας είναι αραιή. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στα στοιχεία DCZM, οι άμεσες κομβικές τιμές μετατοπίσεων χρησιμοποιούνται στο νόμο χωρισμού έλξης,



παρά τις τιμές παρεμβολής όπως στο πλαίσιο συνέχειας που χρησιμοποιείτε εδώ. Η απόδοση του DCZM πλαισίου στην σύζευξη με τη νέα συνεκτική ζώνη του προτύπου πρέπει να ερευνηθεί.

### Εφαρμογή και προσομοίωση

Σε αυτό το τμήμα, η ισχύς του συνεκτικού προτύπου ζώνης εξετάζεται και μια μεθοδολογία για τη λήψη των παραμέτρων του πρότυπου συζητείται. Για αυτόν τον λόγο, το προτεινόμενο πρότυπο εφαρμόστηκε δεδομένου ότι ένας χρήστης παρείχε την υλική υπό-ρουτίνα στον αντιπρόσωπο πεπερασμένης συσκευασίας στοιχείων ABAQUS [30]. Κατ' αρχάς, μια διπλή πρόβλος αναλύθηκε σε ένα δείγμα ακτινών (DCB). Η επίδραση της συνεκτικής δύναμης στη συμπεριφορά αυτού του δείγματος εξετάστηκε. Έπειτα, η μικτή παραμόρφωση τρόπου προσομοιώθηκε με μέσα από ένα βραζιλιάνο δείγμα δίσκων και μια νέα αποτυχία κριτηρίου συζητείτε.

### Αριθμητική προσομοίωση

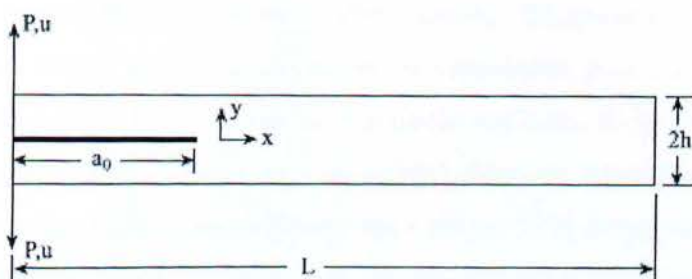
Η διπλή πρόβλος του δείγματος ακτινών, που απεικονίζεται στο Σχέδιο 4, είναι κατάλληλη για την πρόβλεψη της διάδοσης ρωγμών τοποθετημένη σε στρώματα σύνθετα κάτω από τον καθαρή λειτουργία I όρου. Από την καθαρή λειτουργία I του όρου που εξετάζονται σε αυτό το τμήμα, σε όλες τις εξισώσεις, ο δείκτης 1 έχει αντικατασταθεί από το I. Για αυτόν τον λόγο, ένα συνολικό μήκος του  $L = 100 \text{ mm}$ , πά-

χος  $B = 20$  mm, ύψος  $2h = 3$  mm και το αρχικό μήκος ρωγμών  $a_0 = 30$  mm εξετάζονται. Το φορτίο εφαρμόστηκε στις αριστερές άκρες του δείγματος. Μια ομοιοκατευθυνόμενη ίνα ενίσχυσε το φύλλο πλαστικού που αποτελείτε από  $0^\circ$  ίνα άνθρακα/ τις εποξικές πτυχές μητρών (XAS-913C) με τον προσανατολισμό τους, που ευθυγραμμίστηκαν με τη σφαιρική X-κατεύθυνση που επιλέχτηκε για τη μελέτη. Οι ιδιότητες της παρουσιάζονται στον πίνακα 1, όπου  $E_A$ ,  $E_{TV_A}$  και  $\nu_T$  είναι οι αξονικοί και εγκάρσιοι συντελεστές Young και οι αναλογίες Poisson, αντίστοιχα, και το  $G_A$  είναι ο αξονικός συντελεστής διάτμησης. Η παράμετρος  $\mathcal{G}_{1c}$  αντιπροσωπεύει τη συνεκτική ενέργεια για την καθαρή λειτουργία I παραμόρφωσης.

Το πεπερασμένο πλέγμα στοιχείων αποτελέστηκε από 1440 4-κόμβος isoparametric στοιχεία με 2100 κομβικά σημεία, καθώς επίσης και 99 γραμμικά 4-κόμβους στοιχεία διεπαφών με 200 κομβικά σημεία. Οι όροι επιπέδου πίεσης υποτέθηκαν. Η συμπεριφορά μαλακώματος που συνδέεται με τα συνεκτικά πρότυπα αποτελέσματα ζώνης σε μια αιφνιδιαστική διαμέσου και αιφνιδιαστική-προς τα πίσω συμπεριφορά της καμπύλης φορτίου-μετατοπίσεων. Όπως συζητείται από Alfano και Crisfield, [59] αυτά συχνά συσχετίζονται με μια ιδιομορφία στη μήτρα ακαμψίας εφαρμοσμένης του πεπερασμένου προτύπου στοιχείων. Συνεπώς, η μέθοδος τόξου-μήκους (Riks)εφαρμόστηκε για να αποφύγει αυτά τα προβλήματα σύγκλισης.

Στο Σχέδιο 5, η αντίδραση του φορτίου-μετατοπίσεων του δείγματος DCB σχεδιάστηκε. Η έντονη(με χρώμα) γραμμή λήφθηκε από Xie και Waas όπου αποκτήθηκε με τη βοήθεια της εικονικής τεχνικής περάτωσης ρωγμών (VCCT) που αντιπροσωπεύει τη γραμμική ελαστική λύση που θεωρείται εδώ ως αναφορά. Η καμπύλη του φορτίου μετατοπίσεων VCCT στο Σχέδιο 5είναι αρχικά γραμμική ακολουθούμενη από τη συμπεριφορά μαλακώματος. Αφότου έχει διαδοθεί η ρωγμή σε κάποια απόσταση, παρατηρούνται αποτελέσματα σκλήρυνσης. Στις αναλύσεις του συνεκτικού πρότυπου ζώνης, η συνεκτική ενέργεια ήταν κρατημένο σταθερό ( $\mathcal{G}_{1c} = 0.28$  N/mm), και οι συνεκτικές δυνάμεις λήφθηκαν ως  $t_0^I = 0.15, 0.3, 0.75$  και  $1.5$  MPa. Οι δυσκολίες σύγκλισης συναντήθηκαν με τις υψηλότερες τιμές  $t_0^I$ . Για όλες τις περιπτώσεις, η μορφή από τις καμπύλες είναι αρκετά παρόμοια. Η συμπεριφορά κάθε καμπύλης είναι αρχικά γραμμική, και μετά από μια τιμή κορυφής του εφαρμοσμένου φορτίου, η χαλάρωση εμφανίζεται. Αυτό ακολουθείται με μια ελαφρά σκλήρυνση κοντά στο τέλος της διαδικασίας. Επιπλέον, φαίνεται ότι η ζώνη πρότυπου υπερεκτιμά τη λύση VCCT στην περιοχή όπου το υλικό είναι πιο μαλακό. Γενικά, η καμπύλη φορτίου-

μετατοπίσεων ταυτίζεται με την καμπύλη VCCT καθώς η ρωγμή έχει διαδοθεί σε κάποια απόσταση (όταν  $a > 58$  mm και  $u > 4$  mm). Εντούτοις, η ταύτιση με την ελαστική λύση σε ένα αρχικό στάδιο της διάδοσης της ρωγμής (για  $a < 58$  mm και  $u < 4$  mm) επιτυγχάνεται για  $t_0^I = 1.5$  MPa. Σε αυτήν την περιοχή, καθώς οι συνεκτικές δυνάμεις αυξάνονται, και τα μέγιστα φορτία αυξάνονται. Συνεπώς, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η μέγιστη δύναμη συνεκτικότητας είναι η σημαντικότερη παράμετρος να βαθμονομηθεί/μετρηθεί δεδομένου ότι φαίνεται ότι η απόδοση από το πρότυπο εξαρτάται ιδιαίτερα από το.

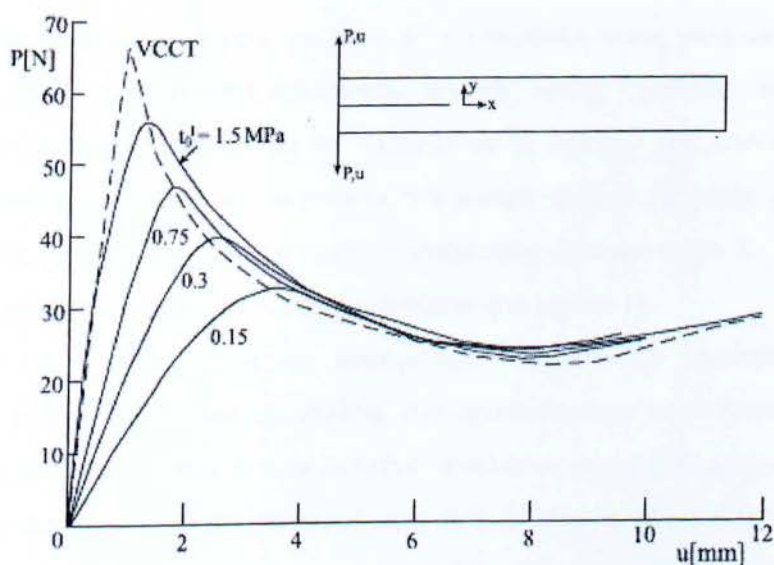


{Σχήμα 4}. Η γεωμετρία ενός DCB δείγματος.

### Πίνακας 1

#### Υλικές ιδιότητες της ίνας άνθρακα/των εποξικών πτυχών μήτρας (XAS-913C)

Ιδιότητα	$E_A$ (Gpa)	$E_T$ (Gpa)	$V_A$	$V_T$	$G_A$ (Gpa)	$\mathcal{G}_{1c}$ (N/mm)
Αξία	135.3	9.0	0.24	0.46	5.2	0.28



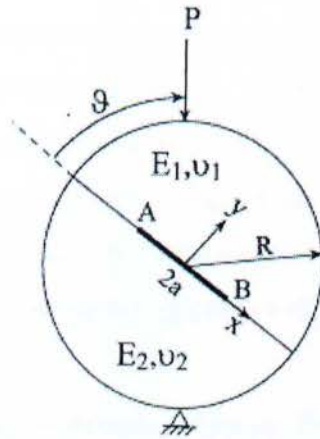
{Σχήμα 5}. Συμπεριφορά του φορτίου μετατόπισης και το αποτέλεσμα από τη συνεκτική έλξη

Σε αυτήν την υποενότητα, η συμπεριφορά μιας ρωγμής μελετάται με τη βοήθεια του προτεινόμενου συνεκτικού προτύπου ζώνης. Επιπλέον, ο στόχος αυτής της ανάλυσης είναι να καθιερωθεί μια απλή μεθοδολογία για τη λήψη του τρόπου 1 συνεκτική δύναμη  $t_0^I$ . Μπορεί να διαπιστωθεί ότι υπάρχουν διάφορες μελέτες σχετικά με τον προσδιορισμό των συνεκτικών παραμέτρων νόμου.

Το βραζιλιάνο δείγμα δίσκων (βλ. το σχέδιο 6) χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση της ανθεκτικότητας σπασίματος διεπαφών από ένα ευρύ φάσμα από το μικτό τρόπο, οι τιμές μπορούν να επιτευχθούν εύκολα. Σύμφωνα με Banks-Sills και λοιποί, αυτό το δείγμα χρησιμοποιήθηκε για να κατανοηθεί πόσο αντοχή μπορεί να υπάρξει μεταξύ δύο κεραμικών αργίλων. Για αυτόν τον λόγο, K- 142 και K- 144 κεραμικά υλικά αργίλου επιλέχθηκαν για τη μελέτη. Μερικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες αυτών των υλικών παρατίθενται στον πίνακα 2. Η ονομαστική ακτίνα των δειγμάτων ήταν  $R = 20 \text{ mm}$ , το μήκος των ρωγμών κυμάνθηκε από  $5,4 \text{ mm} \leq a \leq 6,4 \text{ mm}$ , και το πάχος  $9,1 \text{ mm} \leq b \leq 10,7 \text{ mm}$ . Η θερμοκρασία σκλήρυνσης ήταν  $1040^\circ\text{C}$ . Το λεπτομερώς πειραματικό στοιχείο των 31 δειγμάτων που φορτώθηκαν στις διαφορετικές γωνίες  $\theta$  και θερμοκρασία  $\Delta T$  αλλαγής μπορεί να βρεθεί στον Ashkenazi [40]. Σύμφωνα με Banks-Sills [53], [54], [55], [56] και λοιποί, οι μηχανικοί "παράγοντες έντασης πίεσης" (που αντιστοιχούν στο εφαρμοσμένο φορτίο του σπασίματος) καθορίστηκαν με τη βοήθεια της πεπερασμένης μεθόδου στοιχείων και ενός συντηρητικού ολοκληρώματος. Η επίδραση των υπόλοιπων πιέσεων ανατέθηκε με την υιοθέτηση της τεχνικής λειτουργίας βάρους για να ληφθεί η συμβολή στους παράγοντες έντασης πίεσης. Κατόπιν, οι συνολικοί παράγοντες έντασης πίεσης λήφθηκαν με υπέρθεση. Αυτοί ήταν κατασκευασμένοι για να καθορίσουν το κρίσιμο ποσοστό ενεργειακής απελευθέρωσης διεπαφών ως λειτουργία του μικτού τρόπου για κάθε μεμονωμένο δείγμα. Μια γραφική απεικόνιση της ανθεκτικότητας διεπαφών του K- 142 και K- 144 κεραμικού ζευγαριού αργίλου παρουσιάζεται στο σχέδιο 1b.

Σε αυτήν την μελέτη, το πειραματικό στοιχείο που λήφθηκε από τον ashkenazi [40] αναλύθηκε με τη βοήθεια του προτεινόμενου συνεκτικού προτύπου ζώνης. Για αυτόν τον λόγο, οι πεπερασμένες αναλύσεις στοιχείων πραγματοποιήθηκαν για να καθορίσουν τη συνεκτική δύναμη κάθε δείγματος. Μετά από τη πειραματική διαδικασία, η ρωγμή αναμενόταν να αρχίσει από την αριστερή άκρη ρωγμών (σημείο A στο σχέδιο 6). Η διεπαφή μεταξύ της άκρης ρωγμών B και το τέλος του

δείγματος αντιμετωπίστηκαν ειδικά για να το καταστήσουν ισχυρό/δυνατό. Ως εκ τούτου, η διεπαφή μεταξύ των δύο κεραμικών αργίλων κοντά στην αριστερή άκρη ρωγμών παγιδευτήκαν με 140-144 στοιχεία διεπαφών με 282-290 κομβικά



{Σχήμα 6}. Το βραζιλιάνικο δείγμα δίσκων

## Πίνακας 2

### Ιδιότητες των υλικών των δύο κεραμικών αργίλων

Υλικό	E (GPa)	$\nu$	$\alpha$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
K-142	19.5	0.29	6.01
κ-144	23.3	0.20	5.38

σημεία (όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.2). Πρόσθετα 6181 δη-γραμμικά στοιχεία και 6450 κομβικά σημεία χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις. Οι όροι επιπέδων πίεσης υποτέθηκαν. Κάθε πλέγμα κατασκευάστηκε όσον αφορά τη μεμονωμένη γεωμετρία κάθε δείγματος, όπως δίνεται από τον Ashkenazi [40]. Σημειώστε ότι το αρχικό μήκος ρωγμών, πάχος δειγμάτων, γωνία φόρτωσης, κρίσιμη εφαρμοσμένη δύναμη και αλλαγή θερμοκρασίας ποικίλλεται για κάθε δείγμα. Για κάθε δείγμα, ο κρίσιμος τρόπος 1 ποσοστού ενεργειακής απελευθέρωσης  $\mathcal{G}_{1c}$  που καθορίζεται από τον Ashkenazi [40] υιοθετήθηκε εδώ. Κατόπιν, οι πεπερασμένες αναλύσεις στοιχείων πραγματοποιήθηκαν για να λάβουν τη συνεκτική δύναμη  $t_0^1$ , αυτών των αποτελεσμάτων στη διάδοση ρωγμών όσον αφορά τις μεμονωμένες γεωμετρικές ιδιότητες, σχέδιο φόρτωσης και την εφαρμοσμένη θερμοκρασία αλλαγή του κάθε δείγματος.



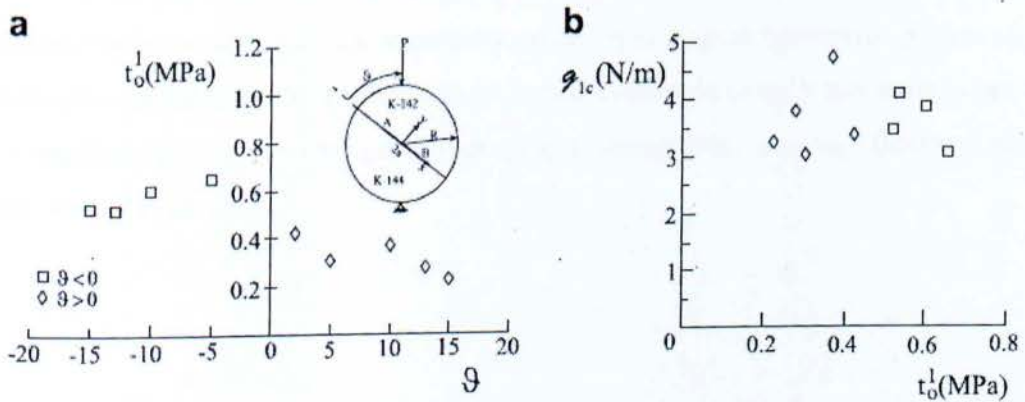
Για κάθε ένα από τα 31 πειράματα, οι πεπερασμένες αναλύσεις στοιχείων πραγματοποιήθηκαν εδώ. Η αλλαγή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορά της σκλήρυνσης και της θερμοκρασίας δωματίου που εφαρμόστηκε σε κάθε δείγμα, ενώ το φορτίο αυξήθηκε μονοτονικά. Η αξία υποψηφίων  $t_0^1$  επιλέχτηκε ως τρόπος I τη συνεκτική δύναμη ζώνης, μαζί με  $\mathcal{S}_{1c}$  που λήφθηκε από τον Ashkenazi [40]. Εάν η ρωγμή δεν άρχισε να διαδίδεται στο κρίσιμο φορτίο από το πείραμα, ένας υψηλότερος υποψήφιος για  $t_0^1$  επιλέχτηκε μέχρι που η σύγκλιση επιτεύχθηκε. Φυσικά, εάν μια χαμηλότερη συνεκτική δύναμη απαιτήθηκε, υιοθετήθηκε. Ως εκ τούτου, για κάθε δείγμα, βρέθηκε ένας τρόπος I συνεκτικής αξίας δύναμης. Δεδομένου ότι υπάρχουν διάφορα δείγματα για κάθε γωνία φόρτωσης, υπολογίστηκε μια μέση αξία. Αυτά σχεδιάζονται στο σχέδιο 7a. Μπορεί να διαπιστωθεί ότι αφού οι κεραμική άργιλοι είναι εύθραυστα υλικά, η ρωγμή διαδίδεται γρήγορα καθώς μια κατάλληλη συνεκτική δύναμη  $t_0^1$  εμφανίστηκε.

Η σχέση μεταξύ της συνεκτικής ενέργειας  $\mathcal{S}_{1c}$  και της συνεκτικής δύναμης  $t_0^1$  παρουσιάζεται στο σχέδιο 7b. Σε αυτό το αριθμό, υπολογίστε κατά μέσο όρο οι τιμές για κάθε γωνία φόρτωσης  $\theta$  του τρόπου I της συνεκτική ενέργειας  $\mathcal{S}_{1c}$  και της συνεκτικής δύναμης  $t_0^1$  και παρουσιάζεται. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η συνεκτική ενέργεια ποικίλλει μεταξύ 3 και 5 N/m, ενώ δύο τάσεις μπορούν να προσδιοριστούν για τη συνεκτική δύναμη: για θετικές τιμές της γωνίας φόρτωσης  $\theta$ , η συνεκτική δύναμη ποικίλλει μεταξύ 0,2 και 0,4 MPa, ενώ για τις αρνητικές τιμές  $\theta$ , ποικίλλει μεταξύ 0,5 και 0,6 MPa. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται επίσης στο σχέδιο 7a. Μια αρνητική γωνία φόρτωσης υπονοεί ότι το δείγμα είναι στο ίδιο επίπεδο για τον κάθετο άξονα. Σε γενικές γραμμές, αυτό είναι ισοδύναμο με τη διάδοση ρωγμών που εμφανίζεται από τη σωστή ρωγμή άκρης (σημείο β στο σχέδιο 6). Φυσικά, αυτό δεν μπορεί να εμφανιστεί στα πειράματα, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η διεπαφή σε αυτήν την περιοχή έχει τραχυνθεί. Στα πειράματα, τα δείγματα περιστράφηκαν για να λάβουν τις αρνητικές τιμές  $\theta$ . Καθώς τα υλικά συγγενεύουν με τη διεπαφή κ διαφέρουν τα υλικά όταν αντιστρέφονται στο δείγμα, είναι λογικό να αναμένεται συμπεριφορά τέτοιου σπασίματος για  $\theta > 0$  και  $\theta < 0$  και αυτό μπορεί να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι δύο ευδιάκριτες τιμές της συνεκτικής δύναμης υπονοούν τους διαφορετικούς μηχανισμούς σπασίματος για τις θετικές και αρνητικές τιμές.

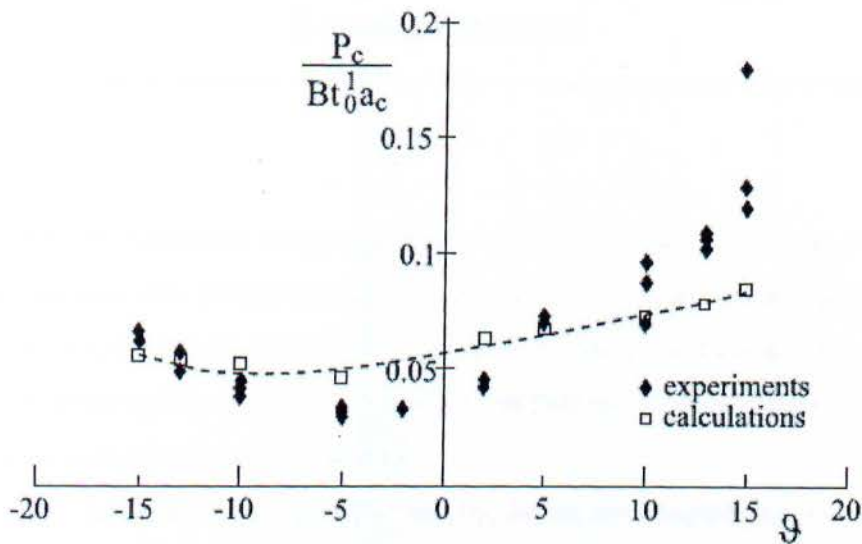
Έπειτα, ένα κατάλληλο κριτήριο για να περιγράψει το κρίσιμο φορτίο στο σπάσιμο ως λειτουργία της γωνίας φόρτωσης καθιερώνεται. Κατ' αρχάς, η βαθμολό-

γηση των συνεκτικών παραμέτρων ζώνης απαιτείται. Όπως αναφέρεται ανωτέρω, οι τιμές της συνεκτικής ενέργειας  $\mathcal{G}_{1c}$  ποικίλλουν μεταξύ 3 και 5 N/m με μια μέση αξία  $\mathcal{G}_{1c} = 3.7$  N/m. Από τη διασπορά στη συνεκτική ενέργεια οι τιμές είναι μάλλον μικρές (βλ. το σχέδιο 7b), η μέση αξία  $\mathcal{G}_{1c} = 3.7$  N/m λαμβάνεται ως συνεκτική ενεργειακή παράμετρος. Εντούτοις, δεδομένου ότι δύο τάσεις παρατηρούνται για τη συνεκτική δύναμη  $t_0^1$ , η συνεκτική δύναμη λήφθηκε ως 0,58 MPa για  $\theta < 0$  και 0,32 MPa για  $\theta > 0$ . Αυτοί είναι οι μέσες τιμές της συνεκτικής δύναμης για τις αρνητικές και θετικές τιμές της γωνίας φόρτωσης  $\theta$ .

Με την αντικατάσταση των βαθμολογημένων τιμών της συνεκτικής δύναμης  $t_0^1 = 0.58$  MPa για  $\theta < 0$ , 0.32 MPa για  $\theta > 0$  και η συνεκτική ενέργεια  $\mathcal{G}_{1c} = 3.7$  N/m στις συστατικές εξισώσεις του συνεκτικού προτύπου ζώνης στις εξισώσεις (22) και (25), προβλέφθηκε η ρωγμή  $\kappa$  η διάδοση για την κεραμική διεπαφή αργίλου οπότε μπορεί να αξιολογηθεί. Για αυτόν τον λόγο, ένα βραζιλιάνο δείγμα δίσκων με τις διαστάσεις ακτίνα  $R = 20$  mm, αρχικό μήκος ρωγμής  $a_0 = 6$  mm, πάχος  $B = 10$  mm και αλλαγή θερμοκρασίας  $\Delta T = -1010$  °C αναλύθηκαν. Για αυτήν την επιλογή των συνεκτικών παραμέτρων, για τις γωνίες φόρτωσης  $-15 \leq \theta \leq 15$  °C, το εφαρμοσμένο φορτίο αυξήθηκε



{Σχέδιο 7}. Η σχέση μεταξύ των (a) συνεκτικής δύναμης και γωνίας φόρτωσης και (b) συνεκτικής δύναμης και της συνεκτικής ενέργειας.



{Σχήμα 8}. Κριτήριο σπασίματος των Βιοϋλικών κεραμικών σύνθετης διεπαφής.

μονοτονικά μέχρι την επίτευξη της διάδοσης των ρωγμών. Αυτές οι τιμές παρουσιάζονται ως ανοικτά σημεία στο σχέδιο 8. Το φορτίο στο  $P_c$  σπάσιμο ομαλοποιήθηκε όσον αφορά τη συνεκτική δύναμη  $t_0^1$ , το κρίσιμο εναλλασσόμενο ρεύμα μήκους ρωγμών για αυτά τα δείγματα ήταν το ίδιο όπως το  $a_0$ , και πάχος  $B$ . Τα αποτελέσματα της δοκιμής από τον Ashkenazi [40] είναι διευκρινισμένα ως στερεά διαμάντια. Μια τακτοποίηση μέσω των ανοικτών σημείων μας οδηγεί σε ένα νέο κριτήριο αποτυχίας για αυτό το δείγμα αυτό είναι διευκρινισμένο ως ορμώμενη καμπύλη στο σχέδιο 8. Συνεπώς, για τη γωνία φόρτωσης  $\theta$ , η ρωγή αναμένεται να διαδοθεί μόλις φθάσει το ομαλοποιημένο εφαρμοσμένο φορτίο στην καμπύλη κριτηρίου (έντονη/με χρώμα καμπύλη στο σχέδιο 8) ή από επάνω του. Η λογική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής και του κριτηρίου αποτυχίας παρατηρήθηκε από τις εξισώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω.

---

## Συμπεράσματα

---

Κατά τη διαδικασία συγγραφής της παρούσας πτυχιακής και της συλλογής των πληροφοριών που υπάρχουν πάνω στο θέμα «Τριβολογική συμπεριφορά κεραμομεταλλικών επικαλύψεων θερμικού ψεκασμού σε όλκιμα μεταλλικά υποστρώματα» το οποίο αναπτύχθηκε σε αυτό το έγγραφο, υπεβλήθησαν τα ακόλουθα στάδια και διεξήχθησαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

1. Μελέτη της μορφολογίας και της δομής των επιφανειών οι οποίες υπεβλήθησαν σε θερμικό ψεκασμό.
2. Μελέτη της δυσθραυστότητας, καθώς και της αντοχής στην τριβή και κόπωση των επιφανειών. Μελέτη της αντοχής στη διάβρωση και στη θερμική οξείδωση των επιφανειών.
3. Εκτίμηση των αποτελεσμάτων και αριστοποίηση των παραμέτρων καθώς και εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των κεραμομεταλλικών επικαλύψεων.

Μελετήθηκε η επιστρωμένη επιφάνεια και ερευνήθηκαν οι επιδράσεις στο υπόστρωμα, επίσης μελετήθηκε και το τρίβω-σύστημα ολίσθησης δύο επιφανειών με επιστρωμένη επιφάνεια και με αυξανόμενα ομαλό φορτίο. Περαιτέρω παρατηρήθηκαν οι επιφάνειες πως αλληλεπιδρούν μεταξύ τους είτε πλαστικά είτε ελαστικά. Ένα γενικό συμπέρασμα ήταν ότι ένα λεπτό κεραμικό επίστρωμα έναντι ενός υποστρώματος χάλυβα έχει μόνο μια πολύ μικρή επίδραση στην τριβή και στις πλαστικές παραμορφώσεις του.

---

## Βιβλιογραφία

---

1. Tvergaard Michel Cartier (*Surface Treatments and Coatings*) **6 – 8** 2003.
2. Μηχανές αναζήτησης στο Internet, [www.google.com](http://www.google.com), [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), [www.springerlink.com](http://www.springerlink.com).
3. Konovalov N. *Examination of out-of-plane deformation in 3-D crack problems*. M.Sc. Thesis. Tel Aviv University; 2008 [in Hebrew].
4. Dundurs J. *Some properties of elastic stresses in a composite*. In: Eringen AC, editor. *Recent advances in engineering science*, vol. 5. New York: Gordon and Breach Science Publishers; 1970. p. **203–16**.
5. E. Raub, K. Muller, *Fundamentals of Metal Deposition*, Elsevier, 1967
6. J.F. Shackelford, *Introduction to Materials Science for Engineers*, 4th ed., Prentice Hall, 1996, p.152-158, **555-557**
7. R. Wiart, These d' Etat, Paris (1968), *Oberflache Surface* 9 (1968) p.218, **241, 275**.
8. J.P. Celis, J.R. Roos, *Surface Engineering-Surface Modification of Materials*, (1984), p.**614-627**.
9. Evans AG, Hutchinson JW, He MY. *Micromechanics model for the detachment of residually compressed brittle films and coatings*. *Acta Mater* 1999;47:**1513–22**.
10. Evans AG, Hutchinson JW, Wei Y. *Interface adhesion: effects of plasticity and segregation*. *Acta Mater* 1999;47:**1513–22**.
11. Hutchinson JW, Evans AG. *Mechanics of materials: top-down approaches to fracture*. *Acta Mater* 2000;48:**125–35**.
12. Evans AG, Mumm DR, Hutchinson JW, Meier GH, Pettitt FS. *Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings*. *Res Mater Sci* 2001;46:**505–53**.
13. He MY, Evans AG, Hutchinson JW. *Effects of morphology on the decohesion of compressed thin film*. *Phys Status Solidi (a)* 1998;166:**19–35**.

14. Wright PK, Evans AG. *Mechanisms governing the performance of thermal barrier coatings*. *CurrOptionSolidStateMaterSci* 1999;4:255–65.
15. Hillerborg A, Modeer M, Peterson PE. *CemConcrRes* 1976;6:773–82.
16. Hordijk DA. Local approach to fatigue of concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, 1991.
17. Aifantis EC. *The physics of plastic deformation*. *Int J Plast* 1987;3:211–47.
18. deBorst R, M€uhlhaus H. *Gradient-dependent plasticity: formulation and algorithmic aspects*. *Int J Numer Meth Engng* 1992;35:521–39.
19. deBorst R, M€uhlhaus H, Pamin J, Sluy LJ. *A continuum mechanics approach to concrete fracture*. In: Wittmann FH, editor. *Numerical Models in Fracture Mechanics of Concrete*, 1993.
20. Chen J, Yuan H, Wittmann FH. *Computational analysis of size effects in concrete materials, submitted for publication*.
21. Truscott GF. *Literature survey on wear in pipelines wear in slurry pipelines*. In: Gittins L, editor. *BHRA InformationSeries Number 1*, 1980:23-49.
22. Wood RJK, Wheeler DW. *Erosion of candidate hard surface coatings for valve applications*, Proc. Of the International Conference on Valves, Actuators and Systems, 14-15<sup>th</sup> April 1997, Cambridge UK, 217-224.
23. H.C. Lee, J. Gurland, *Mater. Sci. Eng.* 33 (1978) 125.
24. B. Zhang, L. Zhou, *Thin Solid Films* 307 (1997) 21.
25. Meng HC, Ludema KC. *Wear models and predictive equations: their form and content*. *Wear* 1995;181/183:443-457.
26. Turchaninov SP. *The Life of Hydrotransport Pipelines*. Moscow:Nedra Press, 1973.
27. Hutchings IM. *Tribology }Friction and Wear of Engineering Materials*, Arnold, 1992, Chapter 6.
28. Agrawal DC, Raj R. *Measurement of the ultimate shear strength of a metal-ceramic interface*. *ActaMetall* (1989);37(4):1265-70
29. Alfano G, Crisfield Ma. *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. *Int J Numer Meth Engng* (2001);50(7):1701-36.
30. ABAQUS Standard Version 6.7-1, HibbitKarlsson& Sorensen Inc.:(2007)

31. Xie D, Salvi AG, Sun C, Waas Am, Caliskan A. *Discrete cohesive zone model to simulate static fracture in 2D triaxially braided carbon fiber composites*. J Compos Mater (2006);40(22):**2025-46**.
32. Banks-Sills L, Freed Y, Eliasi R, Fourman V. *Fracture toughness of the +45°/-45° interface of a laminate composite*. Int J Fract. 2006;141(1-2):**195-210**.
33. V, Hutchinson JW. *The influence of plasticity on mixed mode interface toughness*. J MechPhys Solids (1993);41(6):**1119-35**.
34. Valoroso N, Champany L. *A damage-mechanics-based approach for modeling decohesion in adhesively bonded assemblies*. EngngFractMech2006;73(18):**2774-801**.
35. Williams ML. *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. BullSeismSocAm 1959;49(2):**199-204**.
36. Deng X. *General crack-tip fields for stationary and steadily growing interface cracks in anisotropic bimetals*. J ApplMech 1993;60(1):**183-96**.
37. Needleman A. *A continuum model for void nucleation by inclusion debonding*. J ApplMech 1987;54(3):**525-31**.
38. Cornec A, Scheider I, Schwalbe KH. *On the practical application of the cohesive model*. EngngFractMech 2003;70(14):**1963-87**.
39. Ivankovic A, Pandya KC, Williams JG. *Crack growth predictions in polyethylene using measured traction-separation curves*. EngngFractureMech. 2004;71(4-6):**657-68**.
40. Ashkenazi D. *Determination of critical interface energy release rates for bonded elastic materials*. Ph.D. Thesis. TelAvivUniversity; 1999 [inHebrew].
41. Pandya KC, Williams JG. *Cohesive zone modelling of crack growth in polymers – part I. Experimental measurement of cohesive law*. PlastRubber. Compos 2000;29(9):**439-46**.
42. D. Sinclair, *A bending method for measurement of the tensile strength and Young's modulus of glass fibers*, J. Appl. Phys. 21 (1950) **380-386**.
43. F.A. McClintock, A.S. Argon, in: M. Cohen (Ed.), *Mechanical Behavior of Materials, Addison-Wesley Series in Metallurgy and Materials*, AddisonWesley Publishing Company, Reading, MA, 1966.

44. Ye T, Suo Z, Evans AG. *Thin film cracking and the roles of substrate and interface*. Int J Solids Struct 1992;29(21):**2639–48**.
45. Shieu FS, Shiao MH. *Measurement of the interfacial mechanical properties of a thin ceramic coating on ductile substrates*. Thin Solid Films 1997;306(1):**124–9**.
46. Wiklund U, Gunnars J, Hogmark S. *Influence of residual stresses on fracture and delamination of thin hard coatings*. Wear 1999;232(2):**262–9**.
47. Xu XP, Needleman A. *Void nucleation by inclusion debonding in a crystal matrix*. Model Simul Mater Sci Engng. (1993);1(2):**111–32**.
48. Van den Bosch Mj, Schreurs PJG, Geers MGD. *An improved description of the exponential Xu and Needleman cohesive zone law for mixed-mode decohesion*. Engng. Fract Mech (2006);73(9):**1220–34**.
49. Needleman A. *A continuum model for void nucleation by inclusion debonding*. J. Appl Mech (1987);54(3):**525–31**.
50. Zhang ZY, Paulino GH. *Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogenous and functionally graded materials*. Int J Plast (2005);21(6):**1195–254**.
51. Tvergaard V, Hutchinson JW. *The influence of plasticity on mixed mode interface toughness*. J Mech Phys Solids (1993);41(6):**1119–35**.
52. Hutchinson JW, Suo Z. *Mixed mode cracking in layered materials*. Adv Appl Mech (1992);29:**63–191**.
53. Banks-Sills L, Boniface V, Eliasi R. *Development of a methodology for determination of interface fracture toughness of laminate composites—the 0°/90° pair*. Int J Solids Struct (2005);42(2):**663–83**
54. Banks-Sills L, Travitzky N, Ashkenazi D. *Interface fracture properties of a biomaterial ceramic composite*. Mech Mater (2000);32(12):**711–22**.
55. Banks-Sills L, Ashkenazi D. *A note on fracture criteria for interface fracture*. Int J Fract. (2000);103(2):**177–88**.
56. Banks-Sills L, Freed Y, Eliasi R, Fourman V. *Fracture toughness of the +45°/-45° interface of a laminate composite*. Int J Fract. 2006;141(1-2):**195–210**.



57. Xie D, Salvi AG, Sun C, Waas Am, Caliskan A. *Discrete cohesive zone model to simulate static fracture in 2D triaxially braided carbon fiber composites*. J Compos Mater (2006);40(22):**2025-46**.
58. Xie D, WaasAM. *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis*. EngngFractMech (2006);73(13):**1783-96**.
59. Alfano G, Crisfield Ma. *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. Int J Numer Meth Engng (2001);50(7):**1701-36**.

