



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ  
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΛΗΞΗΣ (burr)  
ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ENAW 2007**



**ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΑΡΑΚΑΚΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Στους γονείς μου  
Γιώργο και Αργυρώ



Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω, για τη βοήθεια και καθοδήγηση του, τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την Χαρίκλεια Ευσταθίου, τον Δημήτριο Βακόνδιο και τον Αντώνιο Λυρώνη, μέλη της ομάδας του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης για τη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια την οποία εργάστηκα, για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας μέσα στο εργαστήριο.

Το ζεστό κλίμα και η ομαδικότητα που υπήρχε στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, καθώς και οι στιγμές διασκέδασης οι οποίες μας ξεκούρασαν από την δουρεία, δημιούργησαν μια ωραία ανάμνηση.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους και στην βοήθειά τους για την επίτευξη του στόχου μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ .....	5
2.1 Η κατεργασία της διάτρησης .....	5
2.2 Τι είναι απόληξη διάτρησης, λόγοι και αρνητικές συνέπειες της εμφάνισης της .....	6
2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μορφολογία της απόληξης διάτρησης .....	7
2.4 Τύποι απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής και μεταβλητές παράμετροι της κατεργασίας διάτρησης που επιδρούν στην εμφάνιση και μορφολογία της .....	8
2.5 Στάδια ανάπτυξης της απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής .....	9
2.6 Μέθοδοι μέτρησης της απόληξης διάτρησης .....	11
2.7 Μελέτες του σχηματισμού της απόληξης εξόδου στη διάτρηση που προέκυψαν από πειραματικές διαδικασίες .....	12
2.8 Διάγραμμα ελέγχου της απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής .....	15
2.9 Μελέτες του σχηματισμού της απόληξης εξόδου στη διάτρηση σε μικροκλίμακα που προέκυψαν από πειραματικές διαδικασίες .....	16
3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	19
3.1 Εξοπλισμός πειραμάτων .....	19
3.1.1 Κέντρο κατεργασίας (3+2 αξόνων) DMG DMU 50 ecoline .....	19
3.1.2 Κέντρο τόννευσης (2 αξόνων) DMG CTX 310 ecoline .....	20
3.1.3 Laser χάραξης DMG LASERTEC 40 .....	20
3.1.4 Συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG MICROSET Uno 115 eco .....	20
3.1.5 Στερεοσκόπιο Leica M125 .....	21
3.1.6 Προφιλόμετρο BRUKER Contour GT-K 3D .....	21
3.1.7 Εργαλείο διάτρησης BOSCH .....	22
3.1.8 Υλικό κατεργασίας EN AW 2007 .....	22
3.1.9 Ανιχνευτής ακμών Heidenhain TS 642 (Infrared machine tool 3D touch probe) .....	23
3.1.10 Κάμερα υψηλής ταχύτητας (MotionBLITZ EoSens mini2 Highspeed Recording Camera) .....	23
3.2 Προετοιμασία πειραμάτων .....	24
3.3 Διαδικασία μέτρησης του πλάτους και ύψους της απόληξης διάτρησης και αρχικά αποτελέσματα των πειραμάτων .....	30
4. ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	38
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....	47
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	49
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	50

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους πυρήνες του κατασκευαστικού τομέα είναι οι εργαλειομηχανές και οι μηχανουργικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ποικίλων μηχανολογικών εξαρτημάτων. Χαρακτηριστικοί τύποι εργαλειομηχανών είναι τα κέντρα κατεργασίας ή τórνευσης ή συνδυασμός και των δύο, τα δράπανα κ.α..

Από τις πιο σημαντικές μηχανουργικές διεργασίες στην κατασκευή μηχανολογικών εξαρτημάτων είναι η διάτρηση. Ως διάτρηση νοείται η μηχανουργική κατεργασία διάνοιξης οπών συνήθως από 0,1mm έως 60mm. Η σπουδαιότητά της οφείλεται κυρίως στην ανάγκη διάνοιξης οπών για να εξυπηρετηθούν σκοποί όπως η συναρμολόγηση ή μείωση του βάρους του εξαρτήματος κ.λπ.. Η διάτρηση ως τμήμα της παραγωγικής διαδικασίας συναντάται κυρίως στα τελικά στάδια για αυτό και η εμφάνιση αστοχιών ανεβάζει το κόστος παραγωγής αρκετά. Για το λόγο αυτό η κατεργασία της διάτρησης έχει βρεθεί πολλές φορές στο επίκεντρο επιστημονικών ερευνών, το οποίο συμβαίνει μέχρι και σήμερα. Μια από τις πιο συνηθισμένες αστοχίες που έχει παρατηρηθεί από τον επιστημονικό κόσμο (κατά τη διεργασία της διάτρησης) είναι ο σχηματισμός της χαρακτηριστικής απόληξης διάτρησης (drilling burr) στην είσοδο και την έξοδο της οπής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η εμφάνιση αυτής της αστοχίας, δηλαδή της απόληξης διάτρησης (drilling burr) στην έξοδο της οπής, πραγματοποιώντας μια σειρά πειραμάτων. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το ελικοειδές τρυπάνι τύπου HSS-R κατά DIN 338 για τη διάνοιξη οπών διαμέτρου 6mm στα δοκίμια. Το κύριο μέρος των πειραμάτων, δηλαδή η διάνοιξη των οπών, έλαβε χώρα στο κέντρο κατεργασίας DMG DMU 50 ecoline τροποποιώντας σε κάθε εκτέλεση του πειράματος τις συνθήκες κατεργασίας. Άλλα κέντρα κατεργασίας όπως το DMG CTX 30 ecoline, το DMG LASERTEC 40 καθώς και το DMG DMU 50 ecoline χρησιμοποιήθηκαν για την απαιτούμενη προετοιμασία των δοκιμίων πριν την έναρξη των πειραμάτων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών των απολήξεων διάτρησης στην έξοδο των οπών. Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών της απόληξης έγιναν με τη χρήση προφیلόμετρου (οπτικού μικροσκοπίου) BRUKER Contour GT-K 3D και του στερεοσκοπίου Leica M125, ενώ οι τρόποι εμφάνισης διαφορετικών χαρακτηριστικών των απολήξεων διάτρησης διερευνήθηκαν κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων εφαρμόζοντας διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας κάθε φορά.

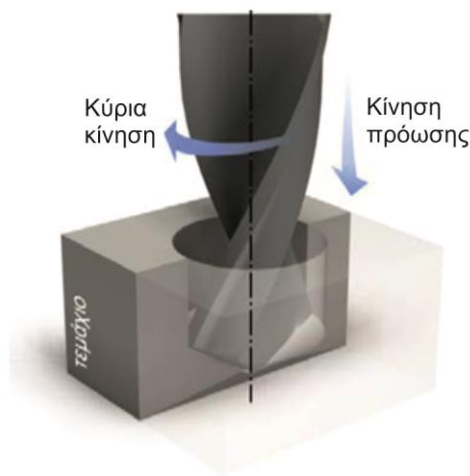
## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 2.1 Η κατεργασία της διάτρησης

Η διάτρηση είναι αποτέλεσμα δύο επιμέρους κινήσεων, την κύρια κίνηση κοπής και τη δευτερεύουσα κίνηση πρόωσης, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1.

Η κύρια κίνηση κοπής είναι περιστροφική και αντιστοιχεί στην περιστροφή του εργαλείου γύρω από τον άξονα του. Το μέγεθος το οποίο συνδέεται άμεσα με την κίνηση αυτή είναι η ταχύτητα κοπής  $v_c$  που εκφράζεται σε [m/min] και μεταφράζεται στις εργαλειομηχανές σε ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου σε [rpm].

Η δευτερεύουσα κίνηση είναι μεταφορική και αντιστοιχεί στην πρόωση του εργαλείου με φόρα προς το κατεργασμένο τεμάχιο. Το μέγεθος το οποίο συνδέεται με την κίνηση αυτή είναι η ταχύτητα πρόωσης  $v_f$  που μετρείται σε [mm/min] ή σε [mm/rev] για ταχύτητα πρόωσης ανά κοπτική ακμή και ανά περιστροφή του εργαλείου.



Σχήμα 2.1 : Κινηματική της διάτρησης

Η ταχύτητα κοπής  $v_c$  δίνεται από τον τύπο  $v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$

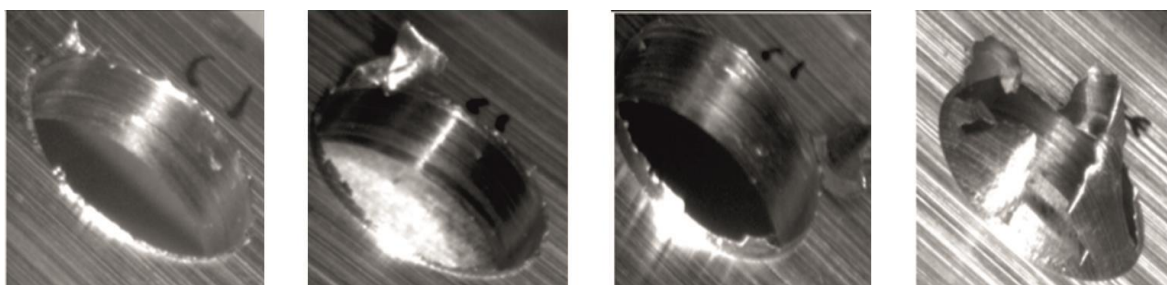
Η ταχύτητα πρόωσης  $v_f$  ισούται με  $v_f = f_z \cdot z \cdot n$

Όπου  $v_f$  : η ταχύτητα πρόωσης ανά λεπτό [mm/min]  
 $f_z$  : η πρόωση ανά περιστροφή [mm/rev]  
 $z$  : ο αριθμός των κόψεων  
 $n$  : οι στροφές της ατράκτου σε [rpm]  
 $v_c$  : η ταχύτητα κοπής [m/min]  
 $D$  : η διάμετρος του εργαλείου [mm]

## 2.2 Τι είναι απόληξη διάτρησης, λόγοι και αρνητικές συνέπειες της εμφάνισης της

Στη σύγχρονη εποχή η εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάπτυξη της με ταχείς ρυθμούς, έχει φθάσει σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο την ποιότητα των προϊόντων τα οποία παράγονται στο δευτερογενή οικονομικό τομέα της βιομηχανίας. Σε αυτόν το τομέα της βιομηχανίας ανήκουν και οι μηχανουργικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Τέτοιες κατεργασίες (φραιζάρισμα, τórνευση και άλλες) όπως και η διάτρηση, στοχεύουν στην κατασκευή μηχανολογικών εξαρτημάτων στις ακριβείς διαστάσεις των μηχανολογικών τους σχεδίων. Η τήρηση των μηχανολογικών διαστάσεων του σχεδίου ενός εξαρτήματος είναι αναγκαία τόσο για τη λειτουργικότητά του όσο και για την αποτελεσματική συναρμογή του με άλλα εξαρτήματα (ή αντικείμενα) τα οποία αποτελούν μέρη ενός τελικού προϊόντος (ή κατασκευής). Η αναγκαιότητα της τήρησης των μηχανολογικών διαστάσεων του σχεδίου ενός τεμαχίου οφείλεται στις υψηλές απαιτήσεις των βιομηχανιών, που ο βαθμός πολυπλοκότητας του μεγαλύτερου ποσοστού των τελικών προϊόντων τα οποία παράγουν είναι πολύ μεγάλος. Τέτοιες υψηλές απαιτήσεις για παράδειγμα υπάρχουν στους τομείς της ρομποτικής, της μηχανοκίνητης και της αεροπορικής βιομηχανίας που παράγουν ρομποτικούς βραχίονες, κινητήρες αυτοκινήτων και μηχανών και κινητήρες αεροσκαφών αντίστοιχα.

Πέραν όμως αυτής της εξέλιξης της τεχνολογίας παρουσιάζονται ακόμα στα κατεργασμένα με διάτρηση τεμάχια σημαντικές αστοχίες/σφάλματα που αποτελούν τροχοπέδη στη διαδικασία παραγωγής των τελικών προϊόντων των βιομηχανιών. Ο λόγος εμφάνισης των αστοχιών κατά τις κατεργασίες διάτρησης είναι η θερμο-ελαστο-πλαστική συμπεριφορά των υλικών η οποία οδηγεί σε μεγάλες παραμορφώσεις με πολύ υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Η απόληξη διάτρησης (drilling burr) είναι μια αστοχία η οποία εμφανίζεται στην είσοδο και στην έξοδο της οπής. Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της απόληξης διάτρησης παρακάτω στο σχήμα 2.2 φαίνονται κάποιοι χαρακτηριστικοί της τύποι.



Σχήμα 2.2 : Χαρακτηριστικοί τύποι απόληξης διάτρησης

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της απόληξης διάτρησης μόνο στην έξοδο της οπής λόγω του πολύ μεγαλύτερου μεγέθους της από την απόληξη στην είσοδο της οπής. Το μεγάλο μέγεθος της απόληξης στην έξοδο της οπής σε σχέση με την απόληξη στην είσοδο έχει ως επακόλουθο να είναι και η κύρια αιτία της μη τήρησης των μηχανολογικών διαστάσεων του τεμαχίου το οποίο έχει υποστεί διάτρηση, με άμεση αρνητική συνέπεια τη μείωση της ποιότητας του. Άλλες αρνητικές συνέπειες της εμφάνισης της απόληξης διάτρησης, μερικές εκ των οποίων έχουν αναφερθεί στο παραπάνω κείμενο και περιγράφονται πιο συνοπτικά είναι οι εξής:

- Μείωση της ποιότητας του τεμαχίου εξαιτίας της απόκλισης του από τα επιθυμητά γεωμετρικά χαρακτηριστικά
- Αύξηση του χρόνου παραγωγής άρα και του κόστους παραγωγής του τεμαχίου εξαιτίας της μετά-κατεργασίας που θα πρέπει να υποστεί για την εξάλειψη της απόληξης διάτρησης
- Υπάρχει κίνδυνος για την ασφάλεια των εργαζομένων λόγω της αιχμηρότητας της απόληξης

- Εμφάνιση προβλημάτων στη συναρμολόγηση όπως τυχόν μπλοκαρίσματα και αστοχίες
- Μείωση της αντοχής του κομματιού σε κόπωση λόγω της σκλήρυνσης παραμόρφωσης και της πιο ψαθυρής συμπεριφοράς της. Η απόληξη πολλές φορές μπορεί να λειτουργήσει σαν σημείο δημιουργίας ρωγμών οι οποίες κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος και τη συνεχή καταπόνησή του, διαδίδονται και μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία
- Η απόληξη στερείται επαρκούς συνδετικής ζώνης με το υπόλοιπο κομμάτι, με αποτέλεσμα ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του να αποχωρίζεται κατά τη λειτουργία και να δημιουργεί από μικρές έως ανεπανόρθωτες βλάβες

### 2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μορφολογία της απόληξης διάτρησης

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει και μελετούν ακόμα και σήμερα τη διαδικασία και τους τρόπους εμφάνισης της απόληξης διάτρησης καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι επειδή οι αρνητικές συνέπειες όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο είναι αρκετές και σημαντικές ώστε να επηρεάζουν σοβαρά τη διαδικασία παραγωγής της βιομηχανίας.

Τον πρώτο γενικό ορισμό της απόληξης διάτρησης έδωσε ο Gillespie [1] το 1976 ο οποίος διατύπωσε ότι η απόληξη που δημιουργείται σε κατεργασίες κοπής περιλαμβάνει όλο το υλικό το οποίο προεξέχει πέραν της θεωρητικής τομής των δύο εφαπτόμενων επιφανειών (του τεμαχίου) που την περικλείουν.



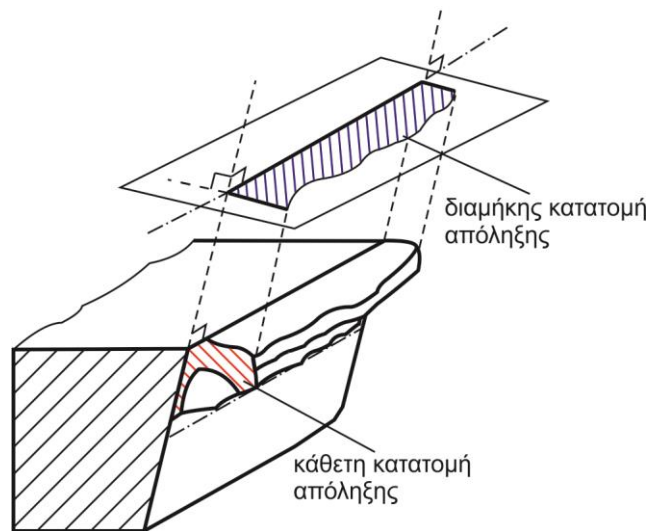
Σχήμα 2.3 : Παραδείγματα χαρακτηριστικών απολήξεων σύμφωνα με τον Gillespie

Δύο χρόνια αργότερα, το 1978, ακολουθεί ο Schäfer [2] ο οποίος περιγράφει την απόληξη ως μέρος ενός κατεργαζόμενου κομματιού το οποίο παράγεται μέσω μηχανουργικών διεργασιών σε μία ακμή ή επιφάνεια του κομματιού και προεξέχει της επιθυμητής ή προβλεπόμενης γεωμετρίας. Επίσης ο Schäfer χρησιμοποιώντας μια τομή στο σημείο κατεργασίας του κομματιού, σχήμα 2.4, θα περιγράψει για πρώτη φορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης διάτρησης τα οποία χρησιμοποιούνται έως και σήμερα. Έτσι τα χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία ορίζονται σύμφωνα με τη μελέτη του Schäfer είναι τα ακόλουθα και περιγράφονται στο σχήμα 2.5:

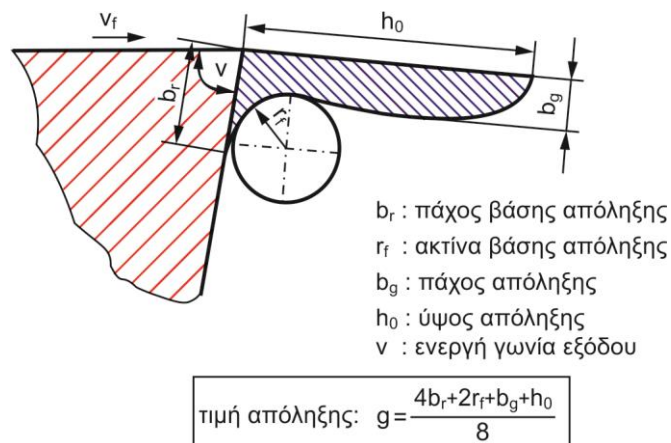
- Το πάχος της βάσης  $b_r$
- Το ύψος της απόληξης  $h_o$ , το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της ιδανικής επιφάνειας του κομματιού και του υψηλότερου σημείου προεξοχής της απόληξης
- Την ακτίνα της βάσης  $r_f$  (προσδιορίζεται από ένα κύκλο ακτίνας  $r_f$ )
- Το πάχος της απόληξης  $b_g$ , το οποίο είναι το πάχος παράλληλα στη βάση και σε απόσταση  $r_f$

Τέλος το μέγεθος  $g$  όπου ισούται με: 
$$g = \frac{4b_r + 2r_f + b_g + h_o}{8}$$

ορίζει σύμφωνα με τον Schäfer την τιμή της απόληξης.



Σχήμα 2.4 : Τομή απόληξης στο σημείο κατεργασίας του κομματιού



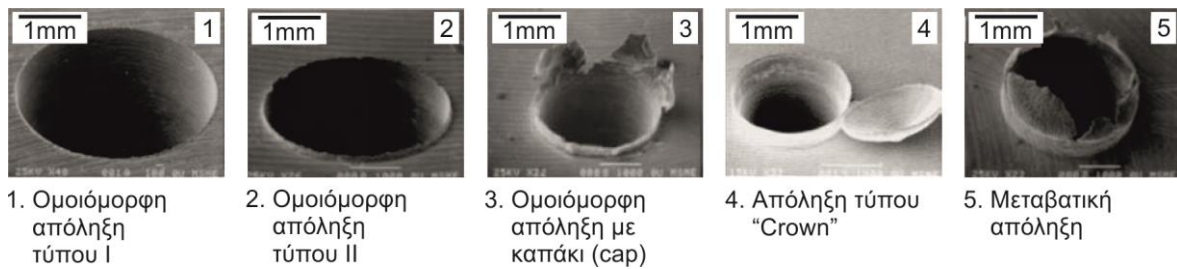
Σχήμα 2.5 : Προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών σύμφωνα με τον Schäfer

## 2.4 Τύποι απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής και μεταβλητές παράμετροι της κατεργασίας διάτρησης που επιδρούν στην εμφάνιση και μορφολογία της

Μετά από μία σειρά πειραμάτων σε χάλυβα AISI 304L και AISI 4118 ο Kim [3] και άλλοι επιστήμονες παρατήρησαν τη δημιουργία τεσσάρων διαφορετικών τύπων απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής. Οι διαφορετικοί τύποι απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής κατά τον Kim είναι οι εξής:

- Η ομοιόμορφη απόληξη και η ομοιόμορφη απόληξη μεγαλύτερου μεγέθους
- Η ομοιόμορφη απόληξη με το χαρακτηριστικό καπάκι (cap)
- Η απόληξη τύπου "Crown" (ανομοιόμορφη)
- Μεταβατική απόληξη (ενδιάμεσο στάδιο ομοιόμορφης και "Crown")

Οι παραπάνω τύποι απεικονίζονται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστικοί τύποι απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής κατά τον Kim

Ωστόσο, σημαντικό ρόλο στη μορφή της απόληξης διάτρησης έχουν οι μεταβλητές παράμετροι οι οποίοι επιδρούν στη δημιουργία της. Οι βασικότεροι παράμετροι που επιδρούν στο σχηματισμό της απόληξης διάτρησης είναι:

- Οι συνθήκες κοπής: πρόωση, ταχύτητα κοπής, χρήση ή μη ψυκτικού υγρού
- Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου: θερμοεξαρτώμενες μηχανικές ιδιότητες, όπως η ολκιμότητα και το όριο πλαστικής διαρροής
- Η γεωμετρία του εργαλείου διάτρησης (τρυπανιού): ο τύπος του τρυπανιού (ελικοειδές, διπλής ή τριπλής ελίκωσης κ.λπ.), η διάμετρος του τρυπανιού, οι χαρακτηριστικές γωνίες του τρυπανιού (γωνία ελίκωσης, γωνία κορυφής, γωνία ανακούφισης, γωνία κλιμάκωσης)
- Το βασικό υλικό ή/και η επικάλυψη του εργαλείου διάτρησης: HSS, καρβιδίου, επικάλυψη TiN, κ.λπ.
- Και η κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή της κοπής

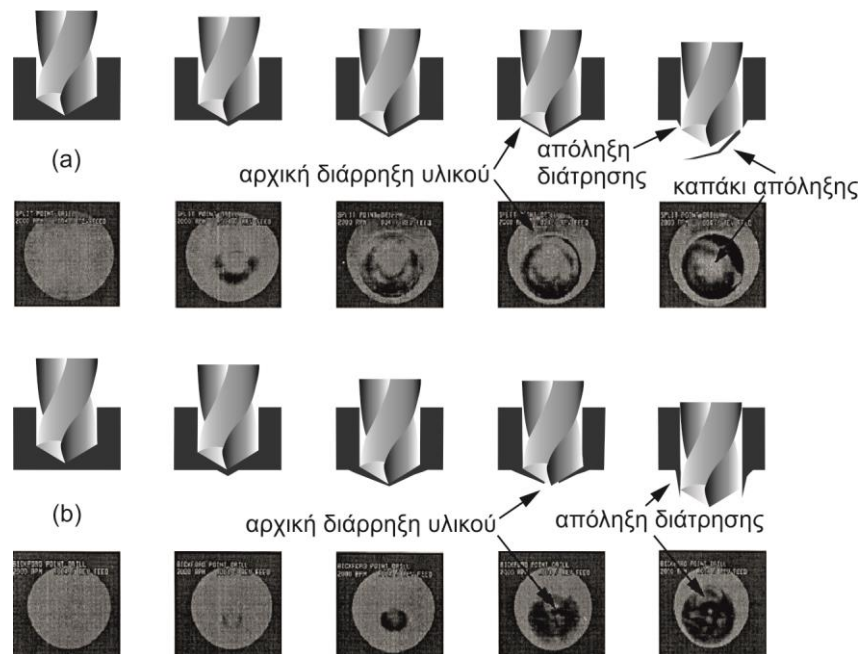
## 2.5 Στάδια ανάπτυξης της απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής

Τα στάδια ανάπτυξης της απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής είναι γενικά τα παρακάτω:

- Συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady-state drilling)
- Εκκίνηση προεξοχής της απόληξης από την επιφάνεια εξόδου (εκκίνηση δημιουργίας "cap")
- Ανάπτυξη "cap"
- Αρχική διάρρηξη του υλικού
- Και τελευταίο στάδιο ο σχηματισμός τελικής απόληξης με ή χωρίς "cap"

Τα παραπάνω στάδια της απόληξης διάτρησης εμφανίζονται στο σχήμα 2.7 με τις αντίστοιχες εικόνες από κάμερα υψηλής ταχύτητας. Στο σχήμα αναπαριστώνται τα στάδια σχηματισμού ομοιόμορφης απόληξης με ή χωρίς καπάκι (cap) (πάνω) και τα αντίστοιχα για το σχηματισμό απόληξης τύπου "Crown" (κάτω).




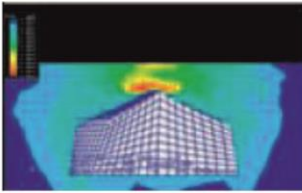





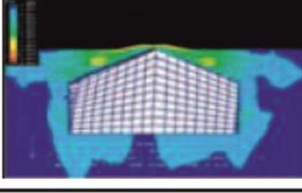

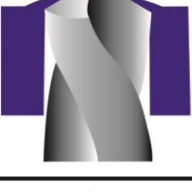
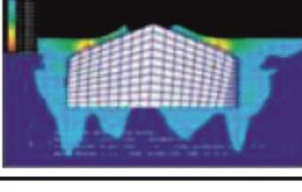


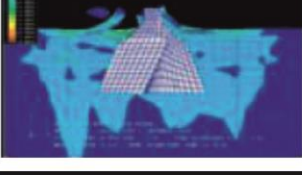



Σχήμα 2.7 : Στάδια δημιουργίας απόληξης διάτρησης

Πιο αναλυτικά, στο στάδιο των σταθερών συνθηκών κατάστασης γίνεται η αρχική διάτρηση στο κατεργαζόμενο κομμάτι με συνεχόμενη κοπή και εμφάνιση του απόβλιττου της κατεργασίας. Αυτό συμβαίνει μέχρι το στάδιο όπου θα αρχίσει να δημιουργείται η προεξοχή της απόληξης από την επιφάνεια εξόδου λόγω του ότι το ακατέργαστο υλικό του τεμαχίου το οποίο έχει απομείνει δεν μπορεί να δεχτεί άλλη δύναμη ώθησης από το τρυπάνι και έτσι αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά προς την έξοδο της οπής. Έπειτα ακολουθεί το στάδιο ανάπτυξης του καπακιού ώσπου κάποια στιγμή δημιουργείται μια ρωγμή (στάδιο αρχικής διάρρησης του υλικού) η οποία με τη διεύθυνση του τρυπανιού διαδίδεται. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το υλικό να αποχωριστεί από την περιοχή της κατεργασίας δημιουργώντας την απόληξη διάτρησης. Στο τελευταίο στάδιο του τελικού σχηματισμού της απόληξης σημαντικό ρόλο παίζει το σημείο δημιουργίας της ρωγμής και ο τρόπος διάδοσης της, που αυτοί οι δύο παράγοντες θα καθορίσουν κυρίως τη μορφολογία και το μέγεθος της απόληξης διάτρησης καθώς και αν θα δημιουργηθεί ομοιόμορφη απόληξη με ή χωρίς καπάκι (cap) ή απόληξη τύπου "Crown".

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.7, εάν η ρωγμή δημιουργηθεί κοντά στην περιφέρεια της οπής, τότε θα διαδοθεί περιφερειακά του "cap" και η τελική απόληξη θα είναι ομοιόμορφη με ή χωρίς καπάκι. Ενώ εάν η ρωγμή δημιουργηθεί στο σημείο του υλικού το οποίο βρίσκεται μπροστά από τη μύτη του τρυπανιού τότε το υλικό χωρίζεται στην κορυφή του "cap" και έτσι θα δημιουργηθεί ένα κενό από το οποίο περνάει το τρυπάνι με αποτέλεσμα να εμφανιστεί η απόληξη τύπου "Crown".

Στο παρακάτω σχήμα 2.8 αναπαριστάται ο μηχανισμός δημιουργίας απόληξης στην έξοδο της οπής κατά τη διεργασία της διάτρησης, όπως αυτή προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία και αποτυπώθηκε με κάμερα υψηλής ταχύτητας από τον Guo κ.ά. [4].

Μηχανισμός σχηματισμού απόληξης	Μηχανισμός σχηματισμού απόληξης	Προσομοίωση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	Εικόνα απο κάμερα υψηλής ταχύτητας
(α) Συνθήκες σταθερής κατάστασης			
(β) Εκκίνηση πλαστικής παραμόρφωσης			
(γ) Ανάπτυξη "cap"			
(δ) Αρχική διάρρηξη υλικού			
(ε) Τελικός σχηματισμός απόληξης			

Σχήμα 2.8 : Προσομοίωση διάτρησης και δημιουργίας απόληξης εξόδου από τον Guo κ.ά.

## 2.6 Μέθοδοι μέτρησης της απόληξης διάτρησης

Η μέτρηση της απόληξης διάτρησης είναι απαραίτητη μετά το τέλος της κατεργασίας. Πιο συγκεκριμένα ως μέτρηση της απόληξης διάτρησης νοείται η μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τα οποία αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.3. Οι λόγοι για τους οποίους είναι απαραίτητη αυτή η μέτρηση είναι όπως αναφέρθηκε και στο παραπάνω κείμενο η τήρηση των μηχανολογικών διαστάσεων των εξαρτημάτων που παράγονται, καθώς και για το σκοπό αυτής της διπλωματικής εργασίας ο οποίος είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών των απολήξεων διάτρησης στην έξοδο των σπών στην επίδραση διαφορετικών συνθηκών και παραμέτρων διάτρησης. Ωστόσο για την τήρηση των μηχανολογικών διαστάσεων, ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο προορίζεται το εξάρτημα δίνονται από τις βιομηχανίες κάποιες ανοχές στις διαστάσεις της απόληξης που μπορεί η τιμή της απόληξης διάτρησης να θεωρηθεί επιτρεπτή αν δεν τις παραβιάζει.

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μεθόδων μέτρησης της απόληξης διάτρησης. Η κάθε μέθοδος επιλέγεται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια στη μέτρηση, με το ποιο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιθυμούμε να μετρήσουμε και από το ποιες είναι οι συνθήκες μέτρησης. Έτσι οι διάφορες κατηγορίες μεθόδων μέτρησης, είναι:

- Οι μονοδιάστατες, οι διδιάστατες και οι τριδιάστατες
- Οι καταστροφικές ή μη καταστροφικές
- Οι μέθοδοι με επαφή ή χωρίς
- Και οι μέθοδοι μέτρησης κατά τη διαδικασία διάτρησης (παραγωγής) ή εκτός διαδικασίας

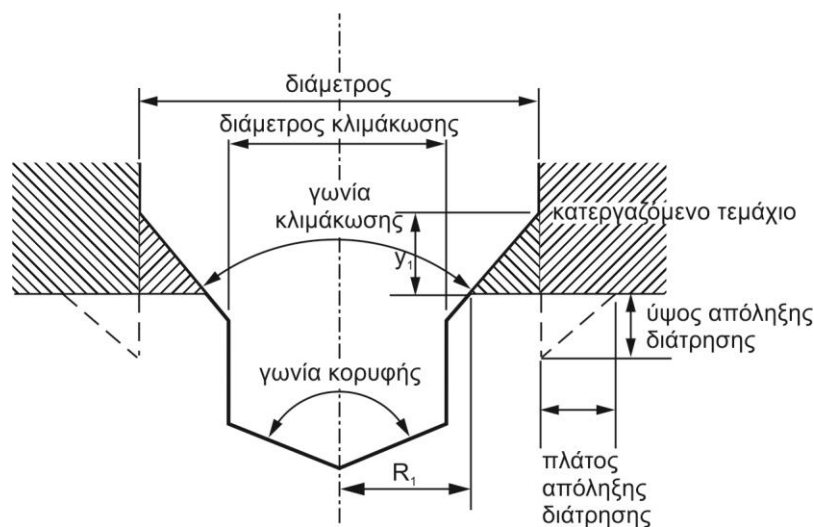
Οι βασικές μέθοδοι μέτρησης του μεγέθους της απόληξης διάτρησης είναι:

- Οι οπτικές μέθοδοι: κάμερες, οπτικά μικροσκόπια, ηλεκτρονικά μικροσκόπια (SEM), laser, ιντερφερόμετρα, επεξεργασία εικόνας (CCDcamera)
- Οι μέθοδοι με επαφή: Η πιο βασική μέθοδος με επαφή είναι ο στυλίσκος. Ο στυλίσκος μπορεί να δώσει πληροφορίες μόνο για το ύψος της απόληξης. Σε μη ομοιόμορφες απολήξεις πρέπει να πραγματοποιηθούν πολλές μετρήσεις ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν γίνεται ακριβές αποτέλεσμα. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου μέτρησης είναι ότι η επαφή μπορεί να καταστρέψει το στυλίσκο ή την απόληξη
- Οι θερμογραφικές μέθοδοι: Θερμικές κάμερες
- Και τέλος οι καταστροφικές μέθοδοι: Μεταλλογραφικές τομές οι οποίες δίνουν πληροφορίες για όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απόληξης και είναι επίσης και αξιόπιστες μέθοδοι. Επειδή η μέτρηση με τη μέθοδο αυτή γίνεται κάθε φορά σε ένα μόνο σημείο έχει ως αρνητικό χαρακτηριστικό ότι είναι χρονοβόρα

## **2.7 Μελέτες του σχηματισμού της απόληξης εξόδου στη διάτρηση που προέκυψαν από πειραματικές διαδικασίες**

Οι περισσότερες μελέτες για το σχηματισμό της απόληξης διάτρησης, λόγω της πολυπλοκότητας της κατεργασίας, έχουν προκύψει από πειραματική διερεύνηση των συνθηκών και παραμέτρων της διεργασίας.

Την επίδραση της γεωμετρίας και του υλικού του εργαλείου διάτρησης στο σχηματισμό της απόληξης εξόδου μελέτησαν με πειράματα ξηρής διάτρησης οι Ko και Chang [5]. Οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν αυτά τα πειράματα ήταν σταθερή ταχύτητα κοπής (κύρια περιστροφική κίνηση εργαλείου) και μεταβαλλόμενη πρόωση (δευτερεύουσα/ μεταφορική κίνηση του εργαλείου), καθώς χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια διαφορετικών γεωμετριών. Στα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν κλιμακωτά τρυπάνια εμφανίστηκαν τα καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή η απόληξη εξόδου που δημιουργήθηκε ήταν πολύ μικρότερη σε σχέση με τις απολήξεις τρυπανιών άλλων γεωμετριών. Για το λόγο αυτό μελετήθηκε και η παράμετρος της γωνίας κλιμάκωσης (step angle) στα κλιμακωτά τρυπάνια με περεταίρω πειράματα. Έτσι παρατηρήθηκε ότι όταν η γωνία κλιμάκωσης κατεβαίνει κάτω από 75° περίπου, η απόληξη ελαχιστοποιείται. Πιο συγκεκριμένα οι Ko κ.ά. [6] διαπίστωσαν ότι όσο μικρότερη ήταν η γωνία κλιμάκωσης, τόσο μικρότερη σε μέγεθος ήταν και η απόληξη διάτρησης. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκαμψία του υπολειπόμενου ακατέργαστου υλικού όταν η διάτρηση γίνεται με μικρή γωνία κλιμάκωσης, με αποτέλεσμα το τεμάχιο να μην παραμορφώνεται πλαστικά στο σημείο της κατεργασίας ως ένα βαθμό μέχρι το τέλος της διάτρησης. Αντίθετα με τη γωνία κλιμάκωσης, το μέγεθος κλιμάκωσης δεν έχει μεγάλη επίδραση στο μέγεθος της απόληξης διάτρησης παρά μόνο σε μεγάλες γωνίες κλιμάκωσης. Επίσης παρατηρήθηκε ότι τα κλιμακωτά τρυπάνια παράγουν μόνο ομοιόμορφη απόληξη χωρίς το χαρακτηριστικό καπάκι (εκτός από τη μέγιστη πρόωση που εφαρμόστηκε). Στο σχήμα 2.9 το οποίο ακολουθεί περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάτρησης με κλιμακωτό τρυπάνι.



Σχήμα 2.9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάτρησης με κλιμακωτό τρυπάνι

Με τα κλιμακωτά τρυπάνια ασχολήθηκαν και οι P. Shanmughasundaram και R. Subramanian [7] που αντικείμενο της έρευνάς τους ήταν η επίδραση της γωνίας και του μεγέθους κλιμάκωσης του κλιμακωτού τρυπανιού καθώς και των παραμέτρων κοπής (ταχύτητα περιστροφής, πρόωση) στη διαμόρφωση της απόληξης στην έξοδο της οπής και πιο συγκεκριμένα στο ύψος της απόληξης. Στα πειράματα διάτρησης τα οποία πραγματοποίησαν, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν συνθετικό κράμα αλουμινίου πυριτίου (Al-Si)-γραφίτη (Gr). Η μέθοδος η οποία χρησιμοποίησαν οι δύο επιστήμονες για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων τους οποίους εξέταζαν, ήταν η μέθοδος Taguchi ενώ πραγματοποίησαν και ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) ώστε να υπολογίσουν την επίδραση και κρισιμότητα της κάθε παραμέτρου αλλά και τη σχέση της με το ύψος της απόληξης. Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν ξεκινώντας από το σημαντικότερο, σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης των δυο ερευνητών, είναι η πρόωση, η γωνία κλιμάκωσης, το μέγεθος κλιμάκωσης και τέλος ο λιγότερο σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα περιστροφής (κοπής).

Τη μέθοδο Taguchi για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων καθώς και την ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) ώστε να υπολογίσει την επίδραση και κρισιμότητα της κάθε παραμέτρου αλλά και τη σχέση της με το ύψος της απόληξης χρησιμοποίησε και ο Kilickar [8], ο οποίος εξέτασε την επίδραση της ταχύτητας κοπής, της πρόωσης και της γωνίας κορυφής του τρυπανιού στο ύψος της απόληξης διάτρησης και την τραχύτητα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου (δοκιμίου) στα πειράματα του ήταν κράμα Al 7075. Ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων που προέκυψε για ελάχιστο ύψος απόληξης διάτρησης ήταν η χαμηλή πρόωση και ταχύτητα κοπής και η μεγάλη γωνία κορυφής. Τέλος από την έρευνα του Kilickar προέκυψε από την ανάλυση διακύμανσης ότι η γωνία κορυφής και η πρόωση επιδρούν στο ύψος της απόληξης κατά 30% ενώ η ταχύτητα κοπής αντίστοιχα κατά 15%.

Τη δημιουργία, στην έξοδο της οπής, της απόληξης διάτρησης φύλλων αλουμινίου Al 99.7Mg0.5Cu-H24 πλάτους και μήκους 50mm και ύψους 2mm, εξέτασαν οι Pilny κ.ά. [9]. Στα πειράματα οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μεταβλητή ταχύτητα κοπής και πρόωσης καθώς και μεταβλητή γεωμετρία του εργαλείου κοπής. Ο παράγοντας ο οποίος εξετάστηκε επίσης ήταν και ο τρόπος συγκράτησής του κομματιού κατά τη διεργασία. Αφού πρώτα μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων κοπής, έπειτα κατασκευάστηκε μηχανισμός συγκράτησής για να διερευνηθεί και η επίδραση αυτού του παράγοντα στη δημιουργία της απόληξης και τέλος εξετάστηκε η επίδραση της γεωμετρίας του τρυπανιού. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι αυξάνοντας την ταχύτητα κοπής μειώνονταν το πάχος και το ύψος της απόληξης, ενώ με αύξηση της πρόωσης σημειώθηκε και αύξηση των παραπάνω γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης. Η χρήση του νέου συστήματος (μηχανισμού)

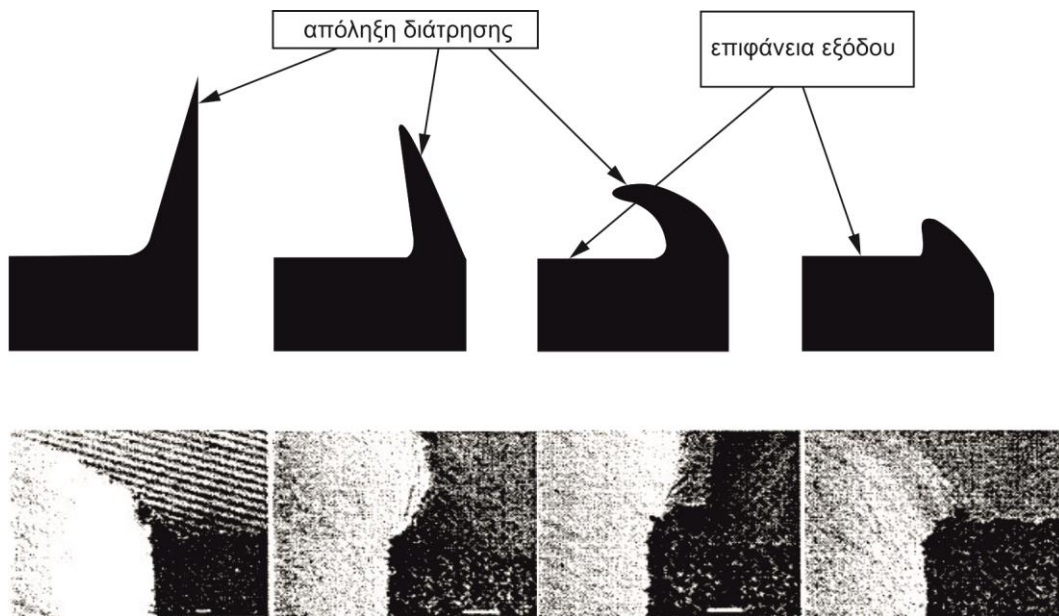
συγκράτησής, ο οποίος ήταν ένα σύστημα αναρρόφησης με στεγανωτικά δαχτυλίδια, μείωσε την απώληξη εξόδου κατά 50% ενώ όσο η πρόωση αυξανόταν η μείωση της απώληξης γινόταν πιο έντονη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο τέλος εξετάστηκε η επίδραση της γεωμετρίας του εργαλείου κοπής όπου για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια διαφορετικών υλικών, γεωμετριών και επικαλύψεων όλα διαμέτρου 2mm. Το μόνο τριπλής ελίκωσης τρυπάνι D το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, άσκησε τις μικρότερες δυνάμεις ώθησης, σε όλες τις προώσεις που εφαρμόστηκαν, με πολύ μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα τρυπάνια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

Ένας παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το σχηματισμό της απώληξης στην έξοδο της οπής, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.4, είναι η κατανομή της θερμότητας η οποία αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας στην περιοχή της κοπής. Ακόμα και αν γίνεται η κατεργασία με τη χρήση ψυκτικού υγρού είναι δύσκολη η απαγωγή επαρκούς θερμότητας επειδή η συνεχής πλήρωση των ελικώσεων με απόβλιπτο εμποδίζει το ψυκτικό υγρό να φτάσει στην περιοχή της διάτρησης. Είτε η κατεργασία της διάτρησης γίνεται με ή χωρίς τη χρήση ψυκτικού υγρού η κατανομή θερμότητας έχει άμεση επίπτωση στο σχηματισμό της απώληξης στην έξοδο της οπής αφού επηρεάζει τις θερμοεξαρτώμενες μηχανικές ιδιότητες του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του εργαλείου κοπής (τρυπανιού). Έτσι μειώνεται το όριο πλαστικής διαρροής του τεμαχίου αλλά και του εργαλείου στην περιοχή της κοπής και κάνει την εμφάνιση της η πλαστική παραμόρφωση που έχει ως συνέπεια την αύξηση των διαστάσεων της απώληξης.

Τον παράγοντα της κατανομής της θερμότητας και την επίδρασή της στο ύψος της απώληξης εξόδου μελέτησαν οι Biermann και Hartmann [10]. Στα πειράματα τους χρησιμοποιήθηκε χάλυβας 34CrNiMo6 και αλουμίνιο AlMgSi1 ενώ η μέθοδος η οποία εφαρμόστηκε ήταν η κρυογενική ψύξη με CO<sub>2</sub> στην περιοχή διαμόρφωσης της απώληξης. Από τα δεδομένα που προέκυψαν και με τη σύγκριση τους με δεδομένα από πειράματα ξηρής και συμβατικής υγρής διάτρησης διαπίστωσαν ότι οι απολήξεις εξόδου ήταν πολύ μεγαλύτερες κατά την ξηρή διάτρηση ενώ κατά τη συμβατική υγρή και με κρυογενική ψύξη διάτρηση ήταν μικρότερες και με μικρές αποκλίσεις μεταξύ των δύο μεθόδων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, διαφορετικής πρόωσης, ελαφρώς μικρότερες απολήξεις από τη συμβατική διάτρηση παρήγαγε η διάτρηση με κρυογενική ψύξη.

Οι Dornfeld κ.ά. [11] χρησιμοποίησαν τρυπάνια καρβιδίου και HSS-Co διπλής και τριπλής ελίκωσης για να κάνουν πειράματα ξηρής διάτρησης και διάτρησης με ψυκτικό υγρό σε πλάκες κράματος Ti-6Al-4V για να διερευνήσουν το σχηματισμό της απώληξης στην έξοδο της οπής υπό την επίδραση διαφορετικών συνθηκών κοπής και γεωμετρίας του τρυπανιού. Οι παρατηρήσεις οι οποίες έγιναν, είναι ότι κατά την ξηρή διάτρηση σχηματίστηκαν τέσσερις τύποι ομοιόμορφης απώληξης, οι τρεις από τους οποίους μετά τη δημιουργία τους είχαν μια επιπλέον πλαστική παραμόρφωση, λόγω των υψηλών προώσεων και ταχυτήτων που εφαρμόστηκαν. Ενώ στα πειράματα διάτρησης με ψυκτικό υγρό παρατηρήθηκαν τρεις τύποι απώληξης οι οποίοι είναι: η απώληξη με δαχτυλίδι, η ομοιόμορφη χωρίς καπάκι και η απώληξη με καπάκι(λόγω χαμηλής πρόωσης). Παρακάτω στο σχήμα 2.10 προβάλλονται οι τέσσερις τύποι απολήξεων στα πειράματα ξηρής διάτρησης και στο σχήμα 2.11 οι τρεις τύποι απολήξεων στα πειράματα διάτρησης με ψυκτικό υγρό.





Σχήμα 2.10: Τέσσερις τύποι απολήξεων στα πειράματα ξηρής διάτρησης

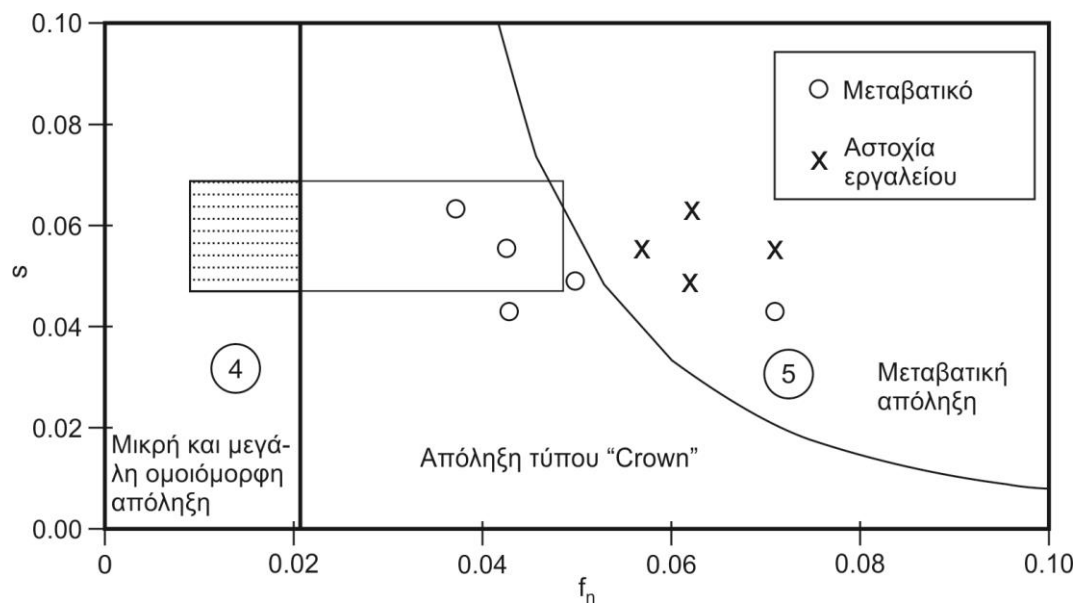


Σχήμα 2.11: Τρεις τύποι απολήξεων στα πειράματα διάτρησης με ψυκτικό υγρό

Έπειτα από μετρήσεις οι οποίες έγιναν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των απολήξεων παρατηρήθηκε ότι στα πειράματα ξηρής διάτρησης το ύψος και το πάχος της βάσης των απολήξεων ήταν μικρότερο όπου χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια τριπλής ελίκωσης. Ενώ στα πειράματα διάτρησης με ψυκτικό υγρό παρατηρήθηκε ότι υπήρξε μείωση του ύψους και του πάχους της απόληξης όπου χρησιμοποιήθηκαν τρυπάνια με μεγάλη γωνία κορυφής και μικρή γωνία ελίκωσης.

## 2.8 Διάγραμμα ελέγχου της απόληξης διάτρησης στην έξοδο της οπής

Το διάγραμμα ελέγχου της απόληξης διάτρησης αναπτύχθηκε από τους Kim κ.ά. [12] έχοντας χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα των πειραμάτων διάτρησης AISI 304L και AISI 4118. Από αυτό το διάγραμμα φαίνεται η σχέση των παραμέτρων κοπής, μίας παραμέτρου  $s$  η οποία σχετίζεται με την ταχύτητα κοπής και μίας παραμέτρου  $f_n$  η οποία σχετίζεται με την πρόωση, με τους διαφορετικούς τύπους απόληξης που παρατηρήθηκαν στα πειράματα. Σύμφωνα με το διάγραμμα ελέγχου της απόληξης διάτρησης μπορεί να υπολογιστεί η επιθυμητή σε μορφή και μέγεθος απόληξη με την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών. Διαπιστώθηκε ότι το ύψος της απόληξης αυξάνεται πολύ με την αύξηση της πρόωσης, ενώ είναι ανεξάρτητο της διαμέτρου του τρυπανιού όπως και το πάχος της. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα κοπής επηρεάζει το σχηματισμό της απόληξης μόνο όταν εφαρμόζεται μεγάλη πρόωση ενώ στις υψηλότερες ταχύτητες κοπής ο βασικότερος παράγοντας είναι η φθορά του εργαλείου και στις χαμηλότερες, η δύναμη ώθησης. Στο σχήμα 2.12 φαίνεται το διάγραμμα.



Σχήμα 2.12 : Διάγραμμα ελέγχου της απόληξης διάτρησης

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές ότι η μετάβαση από την ομοιόμορφη απόληξη στην απόληξη τύπου "Crown" γίνεται σε χαμηλές προώσεις.

## 2.9 Μελέτες του σχηματισμού της απόληξης εξόδου στη διάτρηση σε μικροκλίμακα που προέκυψαν από πειραματικές διαδικασίες

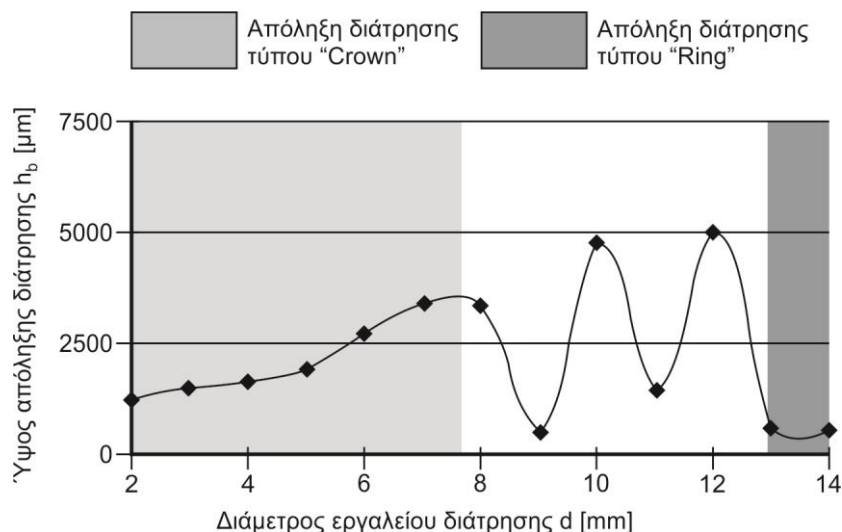
Πολύ σημαντική είναι και η μελέτη των απολήξεων οι οποίες προκύπτουν από κατεργασίες μικροδιάτρησης καθώς η αφαίρεση τους είναι αρκετά δύσκολη έως και αδύνατη όταν γίνεται χειροκίνητα λόγω του περιορισμού της προσβασιμότητας των εργαλείων αφαίρεσης της, εξαιτίας των πολύπλοκων γεωμετριών των εξαρτημάτων που παράγονται.

Τα συμπεράσματα και τα δεδομένα από τις μελέτες του σχηματισμού απόληξης σε συμβατική διάτρηση τα οποία έχουν παρουσιαστεί στο υποκεφάλαιο 2.7 δεν μπορούν να αντιστοιχηθούν στη μικροκλίμακα επειδή οι παράγοντες που επιδρούν στην κατεργασία καθώς και η διαδικασία του σχηματισμού της απόληξης εξόδου, αλλάζουν. Έτσι ο σχηματισμός της απόληξης στη μικροδιάτρηση μελετήθηκε ως ένα ξεχωριστό φαινόμενο.

Την επίδραση της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής και της διαμέτρου του τρυπανιού στο ύψος και το πάχος της απόληξης εξόδου διερεύνησαν οι Lee κ.ά. [13] πραγματοποιώντας πειράματα διάτρησης Al6061-T6 σε μικροκλίμακα με χρήση δύο τρυπανιών διαμέτρου 130μm και 250μm. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων συμπεράναν ότι το ύψος και το πάχος της απόληξης αύξαναν με την πρόωση όπως είχε παρατηρηθεί και στη συμβατική διάτρηση, ενώ η επίδραση της ταχύτητας δεν ήταν σημαντική. Όσον αφορά την επίδραση της διαμέτρου των τρυπανιών στη μορφολογία της απόληξης παρατηρήθηκε ότι το τρυπάνι με διάμετρο 250μm παρήγαγε ομοιόμορφες απολήξεις για χαμηλές προώσεις και απολήξεις τύπου "Crown" για υψηλές προώσεις. Ενώ το τρυπάνι με διάμετρο 130μm παρήγαγε μεταβατικές απολήξεις για χαμηλές προώσεις και απολήξεις τύπου "Crown" για υψηλές προώσεις.

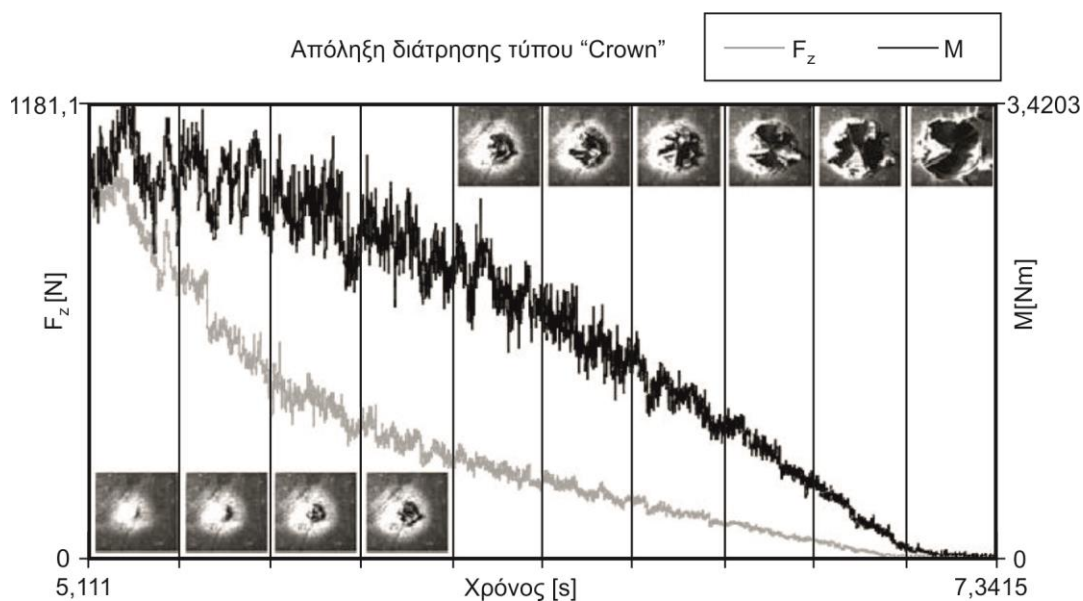
Συνδυασμό πειραμάτων συμβατικής και σε μικροκλίμακα διάτρησης με ένα μεγάλο εύρος διαμέτρου κοπτικών εργαλείων, από 10μm έως 14mm, πραγματοποίησαν οι Neugebauer κ.ά. [14] με σκοπό τη διερεύνηση του σχηματισμού απόληξης σε αυτό το εύρος των τιμών διαμέτρου και της επίδρασης κυρίως της πρόωσης και της ακτίνας κοπτικής ακμής. Έπειτα διερευνήθηκε και η επίδραση της κατανομής της θερμοκρασίας στην περιοχή σχηματισμού της απόληξης και των δυνάμεων κοπής. Από τα πειράματα συμβατικής διάτρησης με προσαρμοζόμενη πρόωση στη διάμετρο του κοπτικού εργαλείου προέκυψε ότι το ύψος της

απόληξης αυξάνεται συνεχώς. Ενώ όταν η πρόωση μεταβάλλεται ανεξάρτητα από τη διάμετρο της οπής, το ύψος της απόληξης παρουσιάζει αυξομειώσεις με την αύξηση της διαμέτρου λόγω αλλαγών από τύπου “Ring” σε τύπου “Crown” και το αντίθετο.



Σχήμα 2.13: Μεταβολή του ύψους της απόληξης με αύξηση της διαμέτρου του εργαλείου διάτρησης

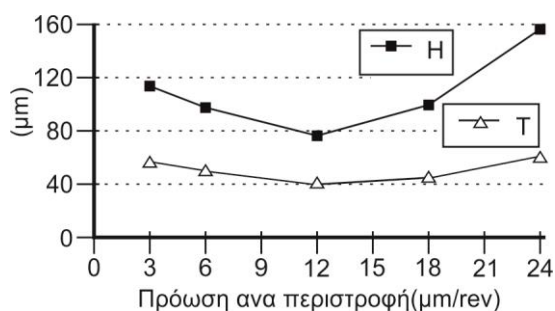
Ο παράγοντας της κατανομής της θερμοκρασίας στην περιοχή της κοπής διαπιστώθηκε ότι επηρέαζε σε μεγάλο βαθμό το σχηματισμό της απόληξης διάτρησης καθώς μειώθηκε τοπικά το όριο αντοχής του υλικού. Σημειώθηκε επίσης αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το κεντρικό σπάσιμο του καπακιού, κατά τη δημιουργία της απόληξης τύπου “Crown”, και στη συνέχεια μείωση της. Τέλος στα πειράματα μικροδιάτρησης, που και εδώ εφαρμόστηκε πρόωση προσαρμοζόμενη στη διάμετρο του εργαλείου, διαπιστώθηκε μείωση του ύψους της απόληξης με μείωση της διαμέτρου του τρυπανιού και μεγαλύτερες ειδικές δυνάμεις κοπής από ότι στη συμβατική διάτρηση επειδή οι ιδιότητες του κατεργαζόμενου κομματιού από ομογενείς και ισοτροπικές άλλαξαν σε ανισοτροπικές. Αυτό συμβαίνει επειδή στη διάτρηση με κοπτικά εργαλεία διαμέτρου κάτω του ενός χιλιοστού (μικροδιάτρηση), αυξάνεται πολύ η επίδραση της δομής του κόκκου.



Σχήμα 2.14: Συσχετισμός μορφολογίας απόληξης με τη δύναμη ώθησης  $F_z$  και τη ροπή  $M$  στην περίπτωση απόληξης τύπου “Crown”



Υγρή μικροδιάτρηση οπών διαμέτρου 0,91mm πραγματοποιήσαν σε δοκίμια ανοξείδωτου χάλυβα SS304L οι Stein και Dornfeld [15] για τη διερεύνηση του σχηματισμού της απόληξης στην έξοδο των οπών. Πιο συγκεκριμένα ο σκοπός τους ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση), της φθοράς του εργαλείου και της γωνίας εξόδου στο μέγεθος της απόληξης εξόδου. Από τα αποτελέσματα συμπεράναν ότι η φθορά του εργαλείου είχε μεγάλη επίδραση στο μέγεθος της απόληξης. Επίσης σε αντίθεση με τη συμβατική διάτρηση παρατηρήθηκε ότι με αύξηση της πρόωσης, μέχρι μία τιμή της, υπήρξε μείωση του ύψους ενώ πάνω από αυτή την τιμή το ύψος αυξήθηκε. Ωστόσο η πρόωση δεν είχε μεγάλη επίδραση στο πάχος της απόληξης. Τέλος παρατηρήθηκε αύξηση του ύψους σχεδόν γραμμικά με την ταχύτητα κοπής και ελαχιστοποίηση του μεγέθους απόληξης σε θετικές γωνίες εξόδου. Στο παρακάτω σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους και πάχους της απόληξης με μεταβολή της πρόωσης.



Σχήμα 2.15: Μεταβολή του ύψους και πάχους απόληξης με μεταβολή της πρόωσης

### 3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Εξοπλισμός πειραμάτων

Για την πραγματοποίηση και την εκτέλεση των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

- Κέντρο κατεργασίας (3+2 αξόνων) DMG DMU 50 ecoline
- Κέντρο τόννευσης (2 αξόνων) DMG CTX 310 ecoline
- Laser χάραξης DMG LASERTEC 40
- Συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG MICROSET Uno 115 eco
- Στερεοσκόπιο Leica M125
- Προφیلόμετρο BRUKER Contour GT-K 3D
- Εργαλείο διάτρησης BOSCH
- Υλικό κατεργασίας EN AW 2007
- Ανιχνευτής ακμών Heidenhain TS 642 (Infrared machine tool 3D touch probe)
- Κάμερα υψηλής ταχύτητας (MotionBLITZ EoSens mini2 Highspeed Recording Camera)

##### **3.1.1 Κέντρο κατεργασίας (3+2 αξόνων) DMG DMU 50 ecoline**

Το κέντρο κατεργασίας (3+2 αξόνων) της DMG, DMU 50 ecoline είναι μια εργαλειομηχανή τύπου CNC. Πιο συγκεκριμένα είναι μια ψηφιακή καθοδηγούμενη φραιζα με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (μονάδα ελέγχου) και δυνατότητα κίνησης σε 5 άξονες. Οι κατεργασίες πραγματοποιούνται σε ένα κλειστό χώρο στον οποίο υπάρχει και αντλία ψυκτικού υγρού (σαπουνέλαιου) με αυτόματη λειτουργία. Η DMU 50 ecoline διαθέτει ισχυρή άτρακτο η οποία φτάνει τις 8.000 περιστροφές το λεπτό (rpm), έχει ροπή 83Nm (40% ED), ισχύς ατράκτου 13kW (40% ED) και 12m/min μέγιστη μετατόπιση. Το περιστρεφόμενο τραπέζι της καθιστά εφικτή την κατασκευή πολύπλοκων τεμαχίων κατεργασίας. Η υδραυλική σύσφιξη η οποία εμπεριέχεται στο περιστρεφόμενο τραπέζι και η περιοχή περιστροφής μέχρι τις 115° (-5° / +110°) καθιστά εφικτές κλίσεις μέχρι 20°. Ο εργαλειοφορέας διαθέτει 16 θέσεις και το αποσπώμενο χειριστήριο καθιστούν εφικτή την απλή και άνετη εκτέλεση των διάφορων εργασιών φραιζαρίσματος. Ο σκελετός της είναι κατασκευασμένος από χυτοσίδηρο με μέγιστη ακρίβεια και ποιότητα επιφανειών. Ο έλεγχος της κατεργασίας γίνεται από το σύστημα ελέγχου SIEMENS 810D POWERLINE με λογισμικό Shopmill ενσωματωμένο στο DMG Slimline Panel με οθόνη TFT 15" και κανονικό πληκτρολόγιο.



Σχήμα 3.1: Κέντρο κατεργασίας DMG DMU 50 ecoline

### **3.1.2 Κέντρο τόννευσης (2 αξόνων) DMG CTX 310 ecoline**

Η CNC εργαλειομηχανή CTX 310 ecoline της DMG έχει δυνατότητα κίνησης σε 2 άξονες. Οι κατεργασίες πραγματοποιούνται σε ένα κλειστό χώρο με τη χρήση γραμμικών οδηγών κύλισης ενώ διαθέτει αυτόματη κεντρική λίπανση και πλήρες σύστημα παροχής ψυκτικού υγρού. Η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να περιστραφεί η κύρια άτρακτος (tsok) φτάνει τις 5000 περιστροφές το λεπτό (rpm) ενώ η δύναμη συγκράτησής του τεμαχίου πάνω στο tsok παρέχεται από πνευματικό σύστημα. Η ισχύς της άτρακτου της CTX 310 ecoline είναι της τάξεως των 16kW και έχει ροπή 166Nm. Το μέγιστο μήκος τεμαχίων το οποίο μπορεί να κατεργαστεί είναι 200mm. Διαθέτει εργαλιοφορέα αυτόματης αλλαγής εργαλείων 12 θέσεων και ακρίβεια στην τοποθέτηση των αξόνων X και Z τουλάχιστον 0.014mm και 0.016mm αντίστοιχα. Ο έλεγχος της κατεργασίας γίνεται από μονάδα ελέγχου ψηφιακής καθοδήγησης της SIEMENS με οθόνη TFT 15" και κανονικό πληκτρολόγιο.



Σχήμα 3.2: Κέντρο τόννευσης DMG CTX 310 ecoline

### **3.1.3 Laser χάραξης DMG LASERTEC 40**

Η CNC εργαλειομηχανή LASERTEC 40 της DMG, είναι ένα κάθετο κέντρο κατεργασίας 3 γραμμικών και 2 οπτικών αξόνων. Διαθέτει παλμικό Ytterbium fibre τύπο laser με ισχύ 20Watt, πλήρη προστασία καμπίνας, παράθυρο ασφαλείας Laser safety glass 1 και σύστημα ελέγχου CNC με λογισμικό προγραμματισμού με δυνατότητα εισαγωγής stl και dxf αρχείων. Η μέγιστη ταχύτητα πρόωσης είναι 12mm/min και η περιοχή κατεργασίας είναι 70mm×70mm, ενώ υπάρχει και τραπέζι εργασίας ενσωματωμένο στη μηχανή, διαστάσεων 400mm με πλάτος 300mm, πλήρως ελεγχόμενο από το control της μηχανής. Ο έλεγχος της κατεργασίας γίνεται από μονάδα ελέγχου ψηφιακής καθοδήγησης της SIEMENS με οθόνη TFT 15" και κανονικό πληκτρολόγιο.



Σχήμα 3.3: Κέντρο κατεργασίας DMG LASERTEC 40

### **3.1.4 Συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG MICROSET Uno 115 eco**

Η συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG MICROSET Uno 115 eco χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μήκους και της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου. Οι δύο αυτές διαστάσεις

εισέρχονται στη μνήμη της μονάδας ελέγχου του κέντρου κατεργασίας και χρησιμοποιούνται για την αντιστάθμιση του εργαλείου σε μήκος και ακτίνα, ώστε κάθε φορά που θα γίνεται αλλαγή εργαλείου να πραγματοποιείται αυτόματα προσαρμογή στις νέες διαστάσεις για την αποφυγή προβλημάτων. Επίσης με τη συσκευή εντοπίζεται οποιαδήποτε φθορά του κοπτικού εργαλείου η οποία θα μπορούσε να δημιουργήσει αρκετές αλλοιώσεις στο τελικό αποτέλεσμα. Η συσκευή εργάζεται με το λογισμικό Microvision II IT και διαθέτει Edge finder για γρήγορο εντοπισμό της κοπτικής ακμής, στιβαρή κατασκευή της βάσης από χυτό, πνευματική σύσφιξη και στους δύο άξονες, ελεύθερα κινούμενους γραμμικούς οδηγούς και CMOS ψηφιακή κάμερα με τηλεσκοπικούς φακούς.



Σχήμα 3.4: Συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG MICROSET Uno 115 eco

### **3.1.5 Στερεοσκόπιο Leica M125**

Το στερεοσκόπιο αποτελεί μια οπτική συσκευή η οποία δημιουργεί στον παρατηρητή την ψευδαίσθηση του βάθους ή του ανάγλυφου σε μια εικόνα ενός δοκιμίου που παρατηρεί. Το Leica M125 είναι ένα στερεοσκόπιο με έγχρωμη ψηφιακή μηχανή, ανάλυσης 2048×1536pixels, για φωτογράφιση σε πραγματικό χρόνο. Η δυνατότητα zoom η οποία έχει είναι 12.5:1 ενώ η ανάλυση των λεπτομερειών του δοκιμίου φτάνει μέχρι και 1.5μm. Για τη λειτουργία του λογισμικού του είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 3.5: Στερεοσκόπιο Leica M125

### **3.1.6 Προφیلόμετρο BRUKER Contour GT-K 3D**

Το προφιλόμετρο BRUKER Contour GT-K 3D είναι ένα οπτικό μικροσκόπιο με δυνατότητες μέτρησης των επιφανειών στις δύο και τις τρεις διαστάσεις (2D/3D). Διαθέτει ένα πολύ εύχρηστο προς το χρήστη, με δυνατότητες έξυπνης ροής, περιβάλλον εργασίας και λογισμικό Vision64 το οποίο είναι εγκατεστημένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με Windows 7 64-bit. Επίσης διαθέτει φωτογραφική μηχανή με επιλογές χρώματος/ανάλυσης (βασική μονόχρωμη 640×480pixels, υψηλής ανάλυσης μονόχρωμη 1280×960pixels, έγχρωμη

640×480pixels) για φωτογράφιση σε πραγματικό χρόνο. Μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Μέγιστη περιοχή σάρωσης έως 10mm
- Κάθετη ανάλυση μικρότερη από 0.01nm
- RMS Επαναληψιμότητα (PSI) 0.01nm
- Μέγιστη σάρωση 47μm/sec (με τη βασική μονόχρωμη φωτογραφική μηχανή)
- Δείγμα ύψους μέχρι 100mm
- Ο Z άξονας εστιάζει έως 100mm με χειροκίνητη ή μηχανοκίνητη επιλογή
- Οι XY άξονες έχουν 150mm επιφάνεια που μπορεί να τοποθετηθεί το δοκίμιο για τη δειγματοληψία και ρυθμίζουν με χειροκίνητη ή μηχανοκίνητη επιλογή



Σχήμα 3.6: Προφιλόμετρο BRUKER Contour GT-K 3D

### **3.1.7 Εργαλείο διάτρησης BOSCH**

Το εργαλείο διάτρησης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν το ελικοειδές τρυπάνι HSS-R για τη διάνοιξη οπών διαμέτρου 6mm στα δοκίμια. Το τρυπάνι είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής ταχύτητας κατά DIN 338. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι ότι κατεργάζεται δεξιόστροφα, είναι τύπου N και η γωνία κορυφής είναι 118°.



Σχήμα 3.7: Εργαλείο διάτρησης BOSCH

### **3.1.8 Υλικό κατεργασίας EN AW 2007**

Η σύνθεση του συγκεκριμένου υλικού το οποίο κατεργάσθηκε είναι Al 4.0Cu 1.2Pb 1.1mg 0.8Mn και ανήκει στην κατηγορία των ημίσκληρων μετάλλων. Χαρακτηριστικές ιδιότητες του EN AW 2007 είναι η υψηλή αντοχή σε κόπωση και θερμότητα ενώ επιτρέπει και υψηλές ταχύτητες κοπής χωρίς να προκαλεί σημαντική φθορά στο κοπτικό εργαλείο. Μερικές μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου κράματος είναι:

- Μέτρο ελαστικότητας 72500MPa
- Μέτρο ακαμψίας 27300MPa
- Θερμοκρασία πήξης 510°C
- Θερμοκρασία τήξης 640°C

- Πυκνότητα 2850kg/m<sup>3</sup>



Σχήμα 3.8: Υλικό κατεργασίας EN AW 2007

### **3.1.9 Ανιχνευτής ακμών Heidenhain TS 642 (Infrared machine tool 3D touch probe)**

Ο τρισδιάστατος ανιχνευτής ακμών είναι ένα ειδικό όργανο το οποίο πραγματοποιεί με χειροκίνητο τρόπο τον καθορισμό των συντεταγμένων του δοκιμίου στο χώρο κατεργασίας της εργαλειομηχανής. Η διαδικασία αυτή λέγεται και μηδενισμός του δοκιμίου και έχει σκοπό την επίτευξη μιας καλής ποιότητας κατεργασίας με σωστά αποτελέσματα. Το εξάρτημα αυτό παίρνει τη θέση του κοπτικού εργαλείου στην DMG DMU 50 ecoline και με την ακίδα που έχει στην άκρη του, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9, ακουμπάει αρκετές φορές (όσες κρίνεται απαραίτητο) πάνω σε διάφορα σημεία του δοκιμίου προς κατεργασία. Με το που ακουμπάει στο δοκίμιο, στέλνει σήμα στη μονάδα ελέγχου για την πραγματική θέση του η οποία και αποθηκεύεται. Έτσι κατά την κατεργασία οι πληροφορίες αυτές είναι αποθηκευμένες στη μνήμη του συστήματος ελέγχου, ώστε να προκύπτουν τα επιθυμητά αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 3.9: Ανιχνευτής ακμών Heidenhain TS 642 (Infrared machine tool 3D touch probe)

### **3.1.10 Κάμερα υψηλής ταχύτητας (MotionBLITZ EoSens mini2 Highspeed Recording Camera)**

Η συγκεκριμένη κάμερα της MIKROTRON πληροί της απαιτήσεις για τις πιο ποικίλες εφαρμογές καθώς η ανάλυση και η ταχύτητα με την οποία καταγράφει την εικόνα μπορούν να ρυθμιστούν από το χρήστη όπως επιθυμεί. Η μέγιστη ανάλυση που διαθέτει είναι των 1696×1710pixels προσφέρει εξαιρετική ποιότητα εικόνας με υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας. Βασισμένη στην τεχνολογία υψηλής ταχύτητας της MIKROTRON η κάμερα μπορεί να συλλαμβάνει πάνω από 200.000 καρέ ανά δευτερόλεπτο σε οποιαδήποτε ενέργεια. Έχει αισθητήρα CMOS και ενεργή περιοχή 19,27mm (διαγώνια). Η ταχύτητα καταγραφής εικόνας είναι από 1fps έως 523fps σε πλήρη ανάλυση ενώ σε μειωμένη πάνω από 200.000fps. Ο χρόνος εγγραφής είναι 3 δευτερόλεπτα σε πλήρη ανάλυση και πλήρη ταχύτητα ενώ η διάρκεια αυξάνεται σε μειωμένη ανάλυση ή/και ρυθμό καρέ. Το λογισμικό του χειριστή είναι το MotionBLITZ Director2 και η διασύνδεση κάμερας με ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται με το Gigabit Ethernet interface.





Σχήμα 3.10: Κάμερα υψηλής ταχύτητας (MotionBLITZ Highspeed Camera)

### 3.2 Προετοιμασία πειραμάτων

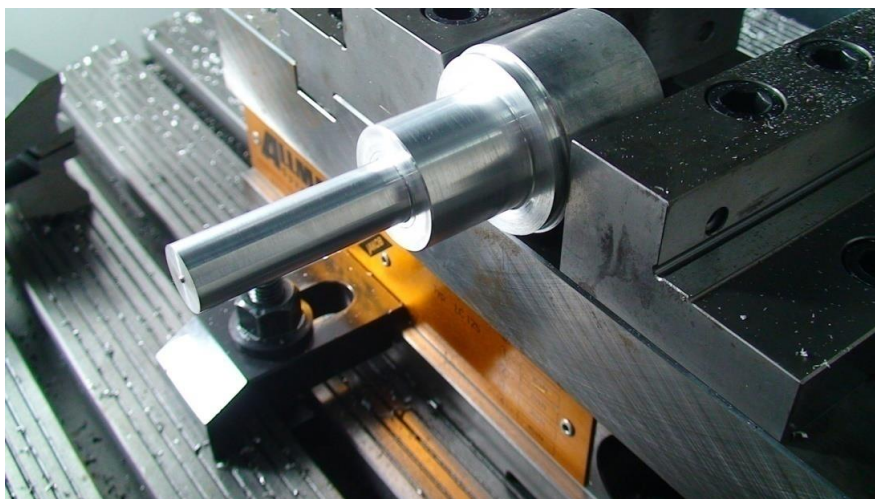
Σκοπός της παρούσας εργασίας, όπως αναφέρθηκε συνοπτικά στην εισαγωγή, είναι η μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των απολήξεων διάτρησης, στην έξοδο των οπών, που δημιουργούνται κατά την κατεργασία φραιζαρίσματος. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκαν το ύψος απόληξης ( $h_o$ ) και το πλάτος των απολήξεων διάτρησης σε εννέα δοκίμια, ίδιων διαστάσεων, σε κάθε ένα από τα οποία είχαν εφαρμοστεί διαφορετικές συνθήκες κοπής κατά τη διεργασία ξηρής διάτρησης στην εργαλειομηχανή DMG DMU 50 ecoline.

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από το υλικό EN AW 2007 το οποίο όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο είναι ημίσκληρο κράμα αλουμινίου. Σε πρώτο στάδιο ο κύλινδρος του συγκεκριμένου υλικού, διαμέτρου 50mm και 100mm μήκους, τοποθετήθηκε στο κέντρο τόννευσης DMG CTX 30 ecoline για να επιτευχθεί η απαιτούμενη διάμετρος των δοκιμίων που ορίστηκε στα 16mm.



Σχήμα 3.11: Τοποθέτηση και αρχική διαμόρφωση του υλικού στο κέντρο τόννευσης DMG CTX 30 ecoline

Στη συνέχεια ο κύλινδρος τοποθετήθηκε στο κέντρο κατεργασίας DMG DMU 50 ecoline για να δημιουργηθεί μία εγκοπή στο κατεργασμένο ήδη μέρος του, δηλαδή στον κύλινδρο των 16mm διαμέτρου. Ο σκοπός δημιουργίας της εγκοπής ήταν για να συγκρατηθεί το δοκίμιο σταθερό και να μην περιστραφεί, με τη διείσδυση του τρυπανιού, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο συνδυασμός της εγκοπής με την κατάλληλα διαμορφωμένη υποδοχή του δοκιμίου σε μία ιδιοκατασκευή, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω, πέτυχε το σκοπό αυτό. Η εγκοπή σχηματίστηκε πάνω από το κέντρο του κατεργασμένου κυλίνδρου στα 6.5mm.



Σχήμα 3.12: Τοποθέτηση κατεργασμένου κυλίνδρου στο κέντρο κατεργασίας DMG DMU 50 ecoline και συγκράτησή του με τη βοήθεια μέγγενης



Σχήμα 3.13: Δημιουργία εγκοπής στα 6.5mm πάνω από το κέντρο του κυλίνδρου διαμέτρου 12mm

Ο επεξεργασμένος κύλινδρος τοποθετήθηκε έπειτα ξανά στο κέντρο τόννευσης για να κοπούν τα εννέα δοκίμια, ίδιων διαστάσεων, διαμέτρου 16mm και πάχους 5mm.



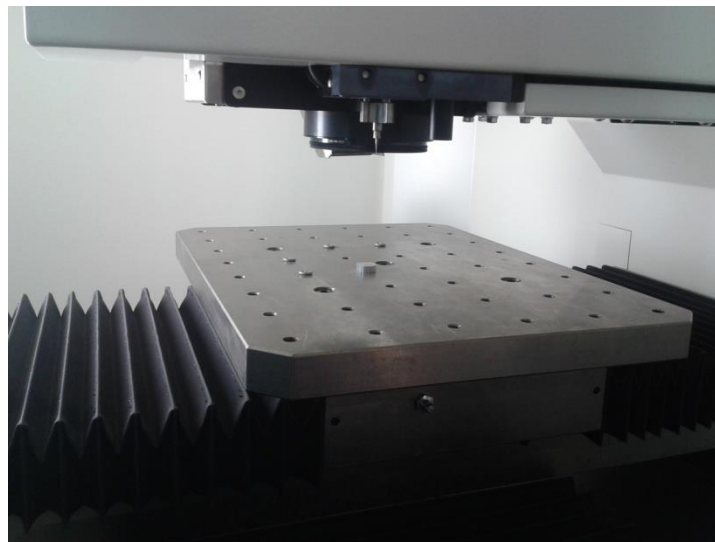
Σχήμα 3.14: Στάδιο κοπής των εννέα, ίδιων διαστάσεων, δοκιμίων



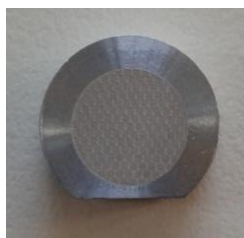


Σχήμα 3.15: Αρχική διαμόρφωση δοκιμίου

Αφού κόπηκαν τα εννέα δοκίμια τοποθετήθηκαν, ξεχωριστά το καθένα, στη CNC εργαλειομηχανή χάραξης DMG LASERTEC 40. Στο στάδιο αυτό της προετοιμασίας των πειραμάτων χαράχθηκε ένας κάνναβος στα δοκίμια, όπως απεικονίζεται στο [σχήμα 3.17](#), με βάθος χάραξης τα 20μm. Ο κάνναβος χαράχθηκε με σκοπό την καλύτερη χαρτογράφηση και μέτρηση της παραμόρφωσης του υλικού στην επιφάνεια εξόδου της οπής σε συνδυασμό με τις εικόνες από την καταγραφή με κάμερα υψηλής ταχύτητας της βασικής διεργασίας των πειραμάτων, την ξηρή διάτρηση με ελικοειδές τρυπάνι HSS-R κατά DIN 338 και διαμέτρου 6mm. Με το τέλος και αυτής της κατεργασίας, τα δοκίμια είχαν πάρει την τελική μορφή τους για την εκτέλεση των πειραμάτων.



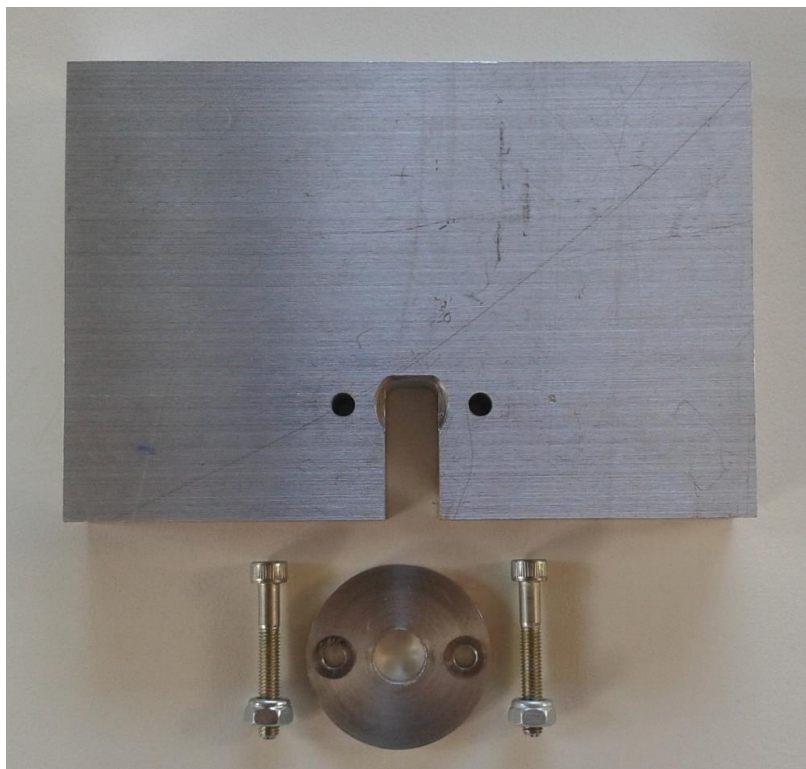
Σχήμα 3.16: Στάδιο χάραξης του καννάβου στη DMG LASERTEC 40



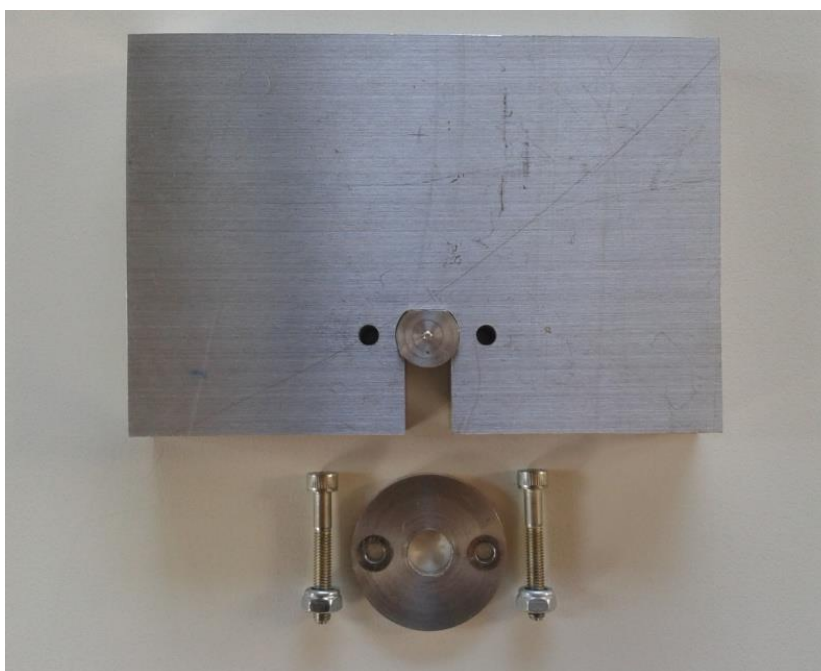
Σχήμα 3.17: Διαμόρφωση δοκιμίου έπειτα από τη χάραξη του καννάβου

Προτού όμως την έναρξη των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από εργασίες οι οποίες ήταν απαραίτητες για την ομαλή και σωστή με μεγάλη ακρίβεια διεξαγωγή τους. Αρχικά κατασκευάστηκε στη CNC φραιζα DMG DMU 50 ecoline μία ιδιοκατασκευή από Al 7075, αποτελούμενη από μία βάση και ένα καπάκι, που λειτούργησε ως μέσο συγκράτησής του δοκιμίου καθώς το δοκίμιο εφάρμοζε μέσα σε αυτήν. Η ιδιοκατασκευή είχε μία ανάλογη εγκοπή στη βάση με αυτή του δοκιμίου για να εφαρμόζουν και μία εγκοπή για να μπορεί να καταγράψει η κάμερα υψηλής ταχύτητας την παραμόρφωση του υλικού στην επιφάνεια από την οποία εξέρχονταν το τρυπάνι. Το καπάκι ήταν μεγαλύτερης διαμέτρου από την υποδοχή

του δοκιμίου το οποίο είχε κατάλληλες και όμοιες οπές με τη βάση ώστε να μπορεί να βιδωθεί σε αυτήν με κοχλίες, καθώς και μία οπή για τη διέλευση του τρυπανιού. Το σχήμα 3.18, σχήμα 3.19 και σχήμα 3.20 θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση της ιδιοκατασκευής και της λειτουργίας της.



Σχήμα 3.18: Ιδιοκατασκευή και μέρη που την αποτελούν

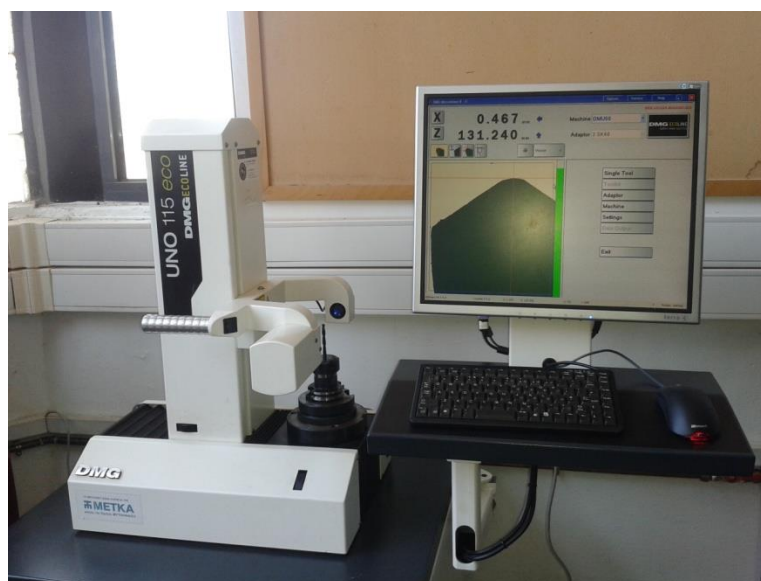


Σχήμα 3.19: Εφαρμογή δοκιμίου στην ιδιοκατασκευή



Σχήμα 3.20: Εφαρμογή δοκιμίου στην ιδιοκατασκευή

Στη συνέχεια, πριν εγκατασταθεί στον εργαλειοφορέα της DMU 50 ecoline, το ελικοειδές τρυπάνι HSS-R κατά DIN 338 διαμέτρου 6mm τοποθετήθηκε στη συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG MICROSET Uno 115 eco για να μετρηθεί το μήκος του. Η διάσταση του μήκους του κοπτικού εργαλείου εισήχθη με χειροκίνητο τρόπο από τη μονάδα ελέγχου (πίνακα χειρισμού) και καταγράφηκε στη μνήμη της εργαλειομηχανής, ώστε να γίνει η αντιστάθμιση μήκους του εργαλείου κοπής από το επίπεδο της ατράκτου στο επίπεδο της κορυφής του τρυπανιού όταν τοποθετηθεί στην άτρακτο της DMU 50 ecoline .



Σχήμα 3.21: Τοποθέτηση κοπτικού εργαλείου στη συσκευή προρύθμισης εργαλείων DMG MICROSET Uno 115 eco

Έπειτα τοποθετήθηκε η ιδιοκατασκευή στην τράπεζα της εργαλειομηχανής DMU 50 ecoline και συγκρατήθηκε, με τη βοήθεια μέγγενης, σε κατάλληλη θέση για την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Η θέση της τράπεζας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρέμεινε κατακόρυφα στις 90° από το οριζόντιο επίπεδο της. Πριν από την εκτέλεση του πρώτου πειράματος, δηλαδή τη διάνοιξη της πρώτης οπής, ο τρισδιάστατος ανιχνευτής ακμών εντόπισε και καθόρισε, με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, τις συντεταγμένες της ιδιοκατασκευής στο χώρο κατεργασίας της εργαλειομηχανής. Με αυτόν τον καθορισμό των συντεταγμένων και εφόσον ήταν γνωστές και οι διαστάσεις όπου έγινε η υποδοχή του δοκιμίου πάνω στην ιδιοκατασκευή και οι διαστάσεις της υποδοχής, μπορούσε να επιτευχθεί με ακρίβεια διάνοιξη των οπών στο κέντρο των δοκιμίων.



Σχήμα 3.22: Εντοπισμός συντεταγμένων ιδιοκατασκευής με χρήση ανιχνευτή ακμών Heidenhain TS 642

Με το πέρας των παραπάνω εργασιών εγκαταστάθηκε ο εξοπλισμός των πειραμάτων στο κέντρο κατεργασίας DMG DMU 50 ecoline. Στο εξοπλισμό αυτόν συγκαταλέγονταν η κάμερα υψηλής ταχύτητας, η μέγγενη που συγκράτησε την ιδιοκατασκευή, η ιδιοκατασκευή, το δοκίμιο και τέλος το τρυπάνι διαμέτρου 6mm. Αφού τοποθετήθηκε το τρυπάνι στην άτρακτο πραγματοποιήθηκαν εννέα ξηρές διατρήσεις, όσες δηλαδή ήταν και τα δοκίμια, με διαφορετικές συνθήκες κοπής σε κάθε διάτρηση. Η εγκατάσταση του εξοπλισμού και η θέση της τράπεζας της εργαλειομηχανής παρουσιάζονται στο σχήμα 3.23.

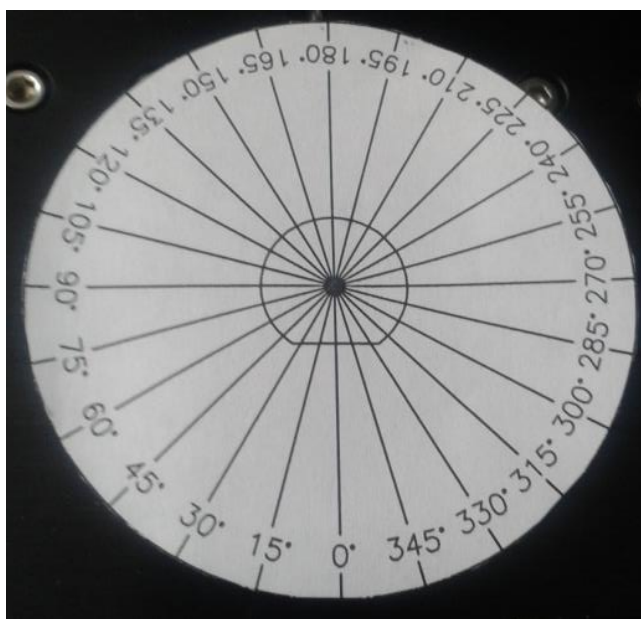


Σχήμα 3.23: Εξοπλισμός των πειραμάτων στο κέντρο κατεργασίας DMG DMU 50 ecoline



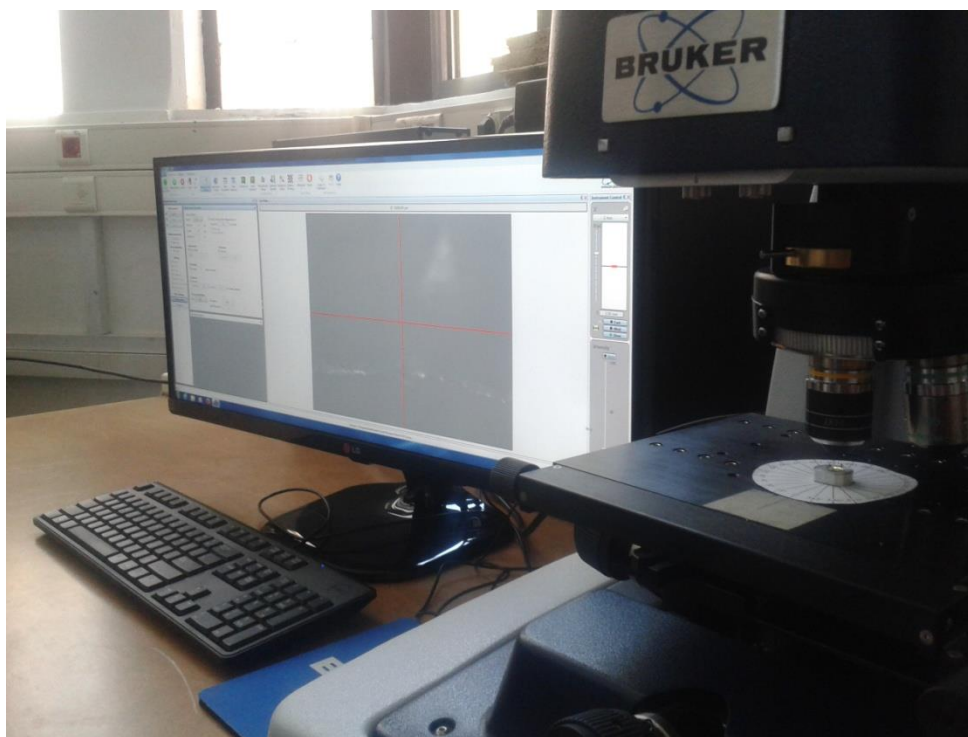
### 3.3 Διαδικασία μέτρησης του πλάτους και ύψους της απόληξης διάτρησης και αρχικά αποτελέσματα των πειραμάτων

Με την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας οι τρόποι οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθεί το ύψος και το πλάτος της απόληξης διάτρησης στα εννέα δοκίμια ήταν δύο. Ο βασικός τρόπος, που χρησιμοποιήθηκε για το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων, ήταν η χρήση του προφιλόμετρου BRUKER Contour GT-K 3D. Ενώ ο δεύτερος τρόπος, ο οποίος θα εξηγηθεί παρακάτω για το πότε χρησιμοποιήθηκε, ήταν η χρήση του στερεοσκοπίου Leica M125. Προτού τοποθετηθεί το πρώτο δοκίμιο στο προφιλόμετρο, δημιουργήθηκε σε λευκό χαρτί ένας οδηγός γωνίας μέτρησης όπου ήταν ένας κύκλος χωρισμένος σε τόξα ανά  $15^\circ$  με το σχήμα της βάσης του δοκιμίου στο κέντρο του. Σκοπός της δημιουργίας του οδηγού γωνίας μέτρησης ήταν η ακρίβεια στη συλλογή των ζητούμενων δεδομένων ανά  $15^\circ$  στην περιφέρεια της οπής καθώς και η γνωστοποίηση της θέσης στην οποία βρισκόταν τα αντίστοιχα δεδομένα.

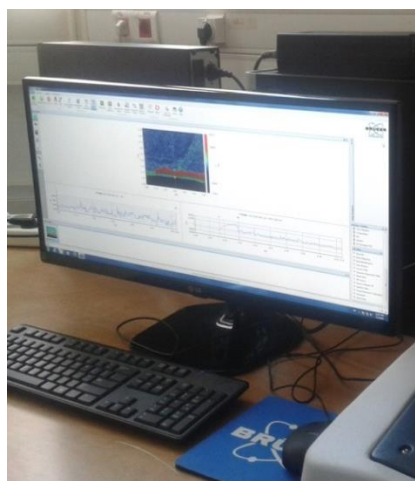


Σχήμα 3.24: Οδηγός γωνίας μέτρησης

Με τη χρήση του προφιλόμετρου BRUKER Contour GT-K 3D και του λογισμικού του, Vision64 το οποίο είναι εγκατεστημένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, έγινε η συλλογή των περισσότερων δεδομένων. Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν εικοσιτέσσερις μετρήσεις ανά  $15^\circ$  με τη βοήθεια του οδηγού γωνίας μέτρησης.

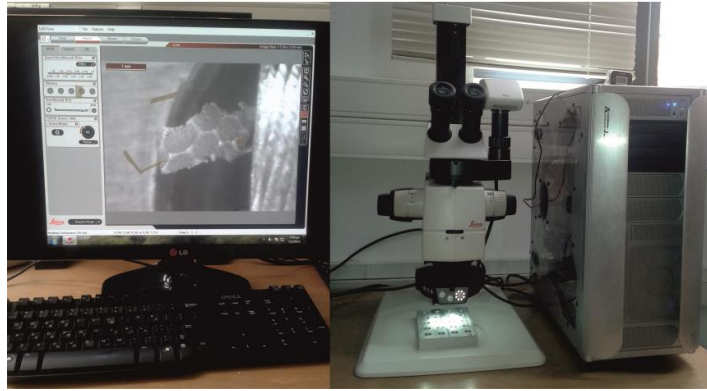


Σχήμα 3.25: Ρύθμιση προφιλόμετρου πριν από κάθε μέτρηση

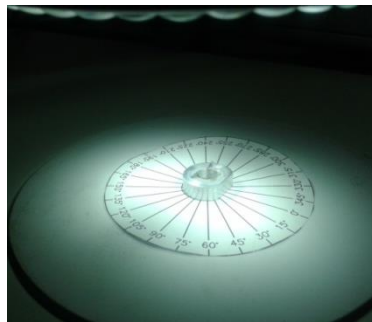


Σχήμα 3.26: Διαγράμματα και εικόνες της απόληξης διάτρησης στο παράθυρο εργασίας του λογισμικού Vision64 μετά από προφίλομέτρηση.

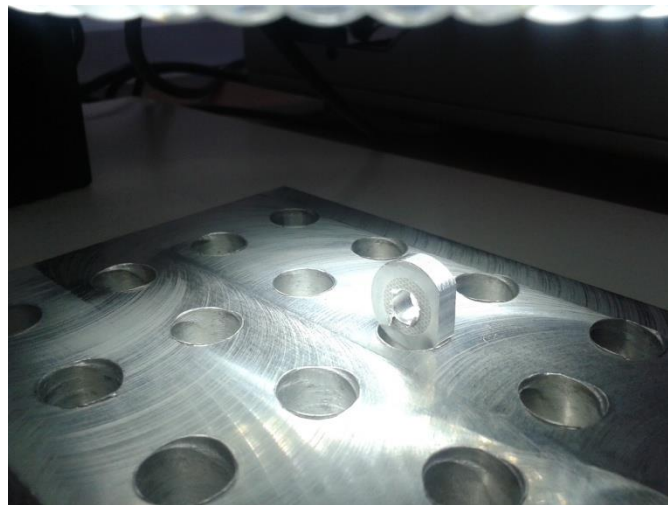
Το στερεοσκόπιο Leica M125 χρησιμοποιήθηκε όταν το πλάτος της απόληξης διάτρησης ξεπερνούσε τα 0.47mm, γιατί τόσο πλάτος μπορούσε ο φακός του προφιλόμετρου να ελέγξει, ή όταν το ύψος της απόληξης ξεπερνούσε το 1mm γιατί οι μετρήσεις και τα διαγράμματα του προφιλόμετρου σε αυτήν την περίπτωση ήταν κακής ποιότητας. Ενώ το προφιλόμετρο έδινε με μία μέτρηση το ύψος και το πλάτος της απόληξης διάτρησης, στο στερεοσκόπιο έπρεπε να γίνουν δύο ξεχωριστές μετρήσεις. Η μέτρηση του πλάτους έγινε έχοντας το δοκίμιο σε οριζόντια θέση κάτω από το φακό του στερεοσκοπίου, ενώ η μέτρηση του ύψους έγινε τοποθετώντας το δοκίμιο σε κατακόρυφη θέση κάτω από το φακό και στη συγκεκριμένη θέση μέτρησης.



Σχήμα 3.27: Στερεοσκόπιο Leica M125 και παράθυρο εργασίας του λογισμικού λειτουργίας



Σχήμα 3.28: Μέτρηση πλάτους της απόληξης διάτρησης



Σχήμα 3.29: Μέτρηση ύψους της απόληξης διάτρησης

Οι συνθήκες κοπής και οι τύποι απόληξης διάτρησης, στην έξοδο της οπής, που προέκυψαν στα εννιά πειράματα αναφέρονται και παρουσιάζονται αντίστοιχα παρακάτω:

Στο πρώτο δοκίμιο (δοκίμιο 1) εφαρμόστηκε πρόωση 0.1mm/rev και 2000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε ομοιόμορφη απόληξη μεγαλύτερου μεγέθους.



Σχήμα 3.30: Δοκίμιο 1,  $f_z=0.1\text{mm/rev}$  και  $n=2000\text{rpm}$

Στο δεύτερο δοκίμιο (δοκίμιο 2) εφαρμόστηκε πρόωση 0.1mm/rev και 3000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε απόληξη τύπου “Crown”.



Σχήμα 3.31: Δοκίμιο 2,  $f_z=0.1\text{mm/rev}$  και  $n=3000\text{rpm}$

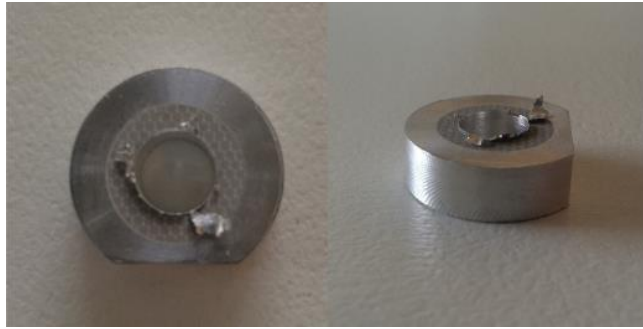
Στο τρίτο δοκίμιο (δοκίμιο 3) εφαρμόστηκε πρόωση 0.1mm/rev και 4000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε απόληξη τύπου “Crown”.



Σχήμα 3.32: Δοκίμιο 3,  $f_z=0.1\text{mm/rev}$  και  $n=4000\text{rpm}$



Στο τέταρτο δοκίμιο (δοκίμιο 4) εφαρμόστηκε πρόωση 0.15mm/rev και 2000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε απόληξη τύπου “Crown”.



Σχήμα 3.33: Δοκίμιο 4,  $f_z=0.15\text{mm/rev}$  και  $n=2000\text{rpm}$

Στο πέμπτο δοκίμιο (δοκίμιο 5) εφαρμόστηκε πρόωση 0.15mm/rev και 3000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε ομοιόμορφη απόληξη μεγαλύτερου μεγέθους.



Σχήμα 3.34: Δοκίμιο 5,  $f_z=0.15\text{mm/rev}$  και  $n=3000\text{rpm}$

Στο έκτο δοκίμιο (δοκίμιο 6) εφαρμόστηκε πρόωση 0.15mm/rev και 4000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε απόληξη τύπου “Crown”.



Σχήμα 3.35: Δοκίμιο 6,  $f_z=0.15\text{mm/rev}$  και  $n=4000\text{rpm}$

Στο έβδομο δοκίμιο (δοκίμιο 7) εφαρμόστηκε πρόωση 0.2mm/rev και 2000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε ομοιόμορφη απόληξη μεγαλύτερου μεγέθους.



Σχήμα 3.36: Δοκίμιο 7,  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  και  $n=2000\text{rpm}$

Στο όγδοο δοκίμιο (δοκίμιο 8) εφαρμόστηκε πρόωση 0.2mm/rev και 3000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε ομοιόμορφη απόληξη μεγαλύτερου μεγέθους.



Σχήμα 3.37: Δοκίμιο 8,  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  και  $n=3000\text{rpm}$

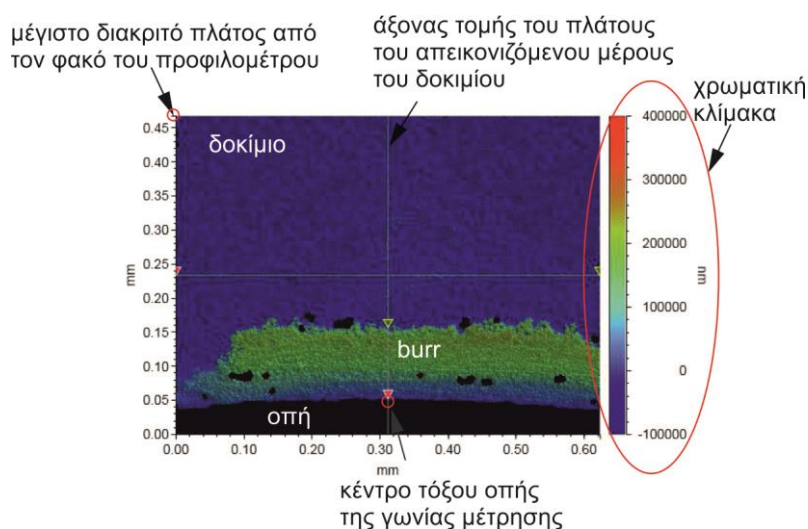
Και τέλος στο ένατο δοκίμιο (δοκίμιο 9) εφαρμόστηκε πρόωση 0.2mm/rev και 4000rpm στροφές της ατράκτου. Με αυτές τις συνθήκες κοπής δημιουργήθηκε ομοιόμορφη απόληξη.



Σχήμα 3.38: Δοκίμιο 9,  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  και  $n=4000\text{rpm}$

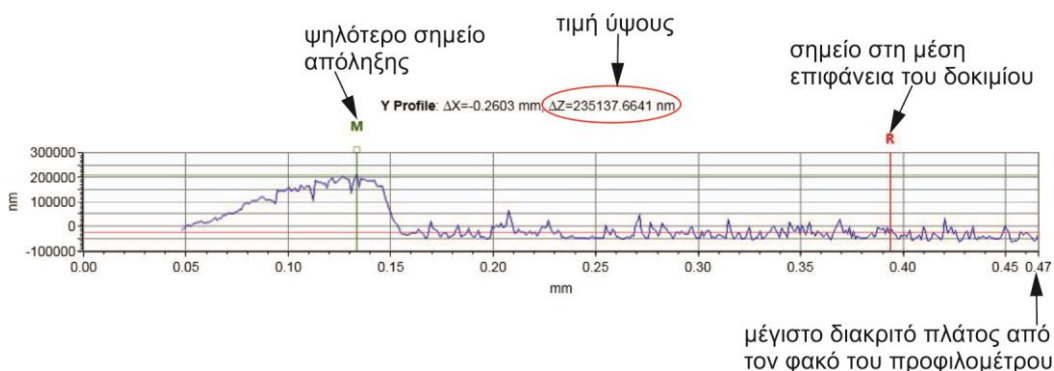
Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες και τα διαγράμματα του λογισμικού του προφιλόμετρου τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του παραρτήματος καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εξήχθησαν οι τιμές των προς μελέτη γεωμετρικών χαρακτηριστικών της απόληξης διάτρησης.

Στο σχήμα 3.39 απεικονίζεται σε διδιάστατη μορφή μία θέση μέτρησης της απόληξης διάτρησης σε ένα δοκίμιο. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως το μέγιστο πλάτος το οποίο μπορεί να διακρίνει ο φακός του προφιλόμετρου είναι 0.47mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο χρωματικές κλίμακες ώστε να μπορούν να συγκριθούν και οπτικά τα εννέα δοκίμια. Η μία χρωματική κλίμακα είναι από -100000nm έως 400000nm στην οποία ανήκουν τα δοκίμια 1,5,7,8 και 9 ενώ η άλλη είναι από -200000nm έως 600000nm στην οποία εντάχθηκαν τα δοκίμια 2,3,4 και 6. Σύμφωνα με τον κατακόρυφο άξονα τομής του πλάτους του δοκιμίου, ο οποίος τοποθετούνταν κυρίως στο κέντρο του τόξου της οπής (στα 0.31mm του οριζόντιου άξονα του παραθύρου) εξήχθησαν οι τιμές του ύψους και πλάτους της απόληξης διάτρησης όπως θα δούμε πιο κάτω. Ο κατακόρυφος άξονας αυτός μεταφέρθηκε σε άλλες θέσεις (δεξιά ή αριστερά από τα 0.31mm ή και στα άκρα του παραθύρου θέασης) μόνο στις περιπτώσεις που δεν υπήρχε απόληξη να τέμνει ή εάν ήταν μεγαλύτερου μεγέθους (ύψους και πλάτους) σε άλλα σημεία η απόληξη.



Σχήμα 3.39: Διδιάστατη απεικόνιση μίας γωνίας μέτρησης

Στο σχήμα 3.40 παρουσιάζεται το διάγραμμα και ο τρόπος από τον οποίο εξήχθηκε η τιμή του ύψους για τα εννέα δοκίμια, για κάθε μια από τις εικοσιτέσσερις γωνίες μέτρησης. Η τιμή ύψους  $\Delta Z$  προκύπτει από την αφαίρεση του σημείου που βρίσκεται στη μέση ακατέργαστη επιφάνεια του δοκιμίου από το ψηλότερο σημείο της απόληξης.



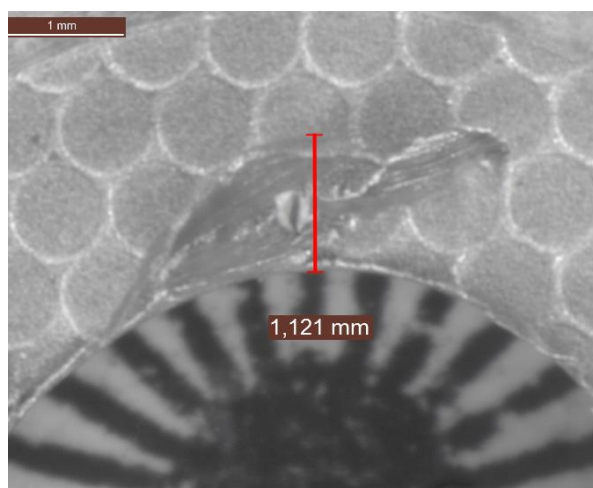
Σχήμα 3.40: Διάγραμμα και τρόπος συλλογής των δεδομένων του ύψους

Στο σχήμα 3.41 παρουσιάζεται το διάγραμμα και ο τρόπος από το οποίο εξήχθηκε η τιμή του πλάτους για τα εννέα δοκίμια, για κάθε μια από τις εικοσιτέσσερις γωνίες μέτρησης. Η τιμή του πλάτους  $\Delta X$  προκύπτει τοποθετώντας τους άξονες M και R του διαγράμματος στην αρχή και το τέλος της απόληξης διάτρησης με τον τρόπο που φαίνεται παρακάτω.

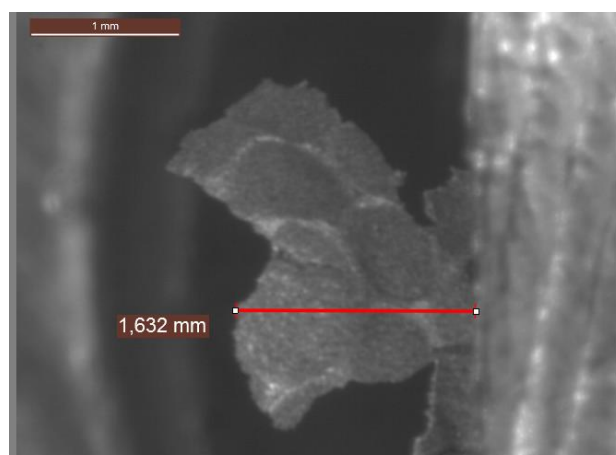


Σχήμα 3.41: Διάγραμμα και τρόπος συλλογής των δεδομένων του πλάτους

Στην περίπτωση την οποία χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο, οι μετρήσεις του ύψους και του πλάτους πραγματοποιήθηκαν όπως αναφέρθηκε παραπάνω και οι τιμές τους βρέθηκαν με την χρήση κλίμακας που παρέχει το λογισμικό.



Σχήμα 3.42 Τιμή του πλάτους της απόληξης με τη χρήση στερεοσκοπίου



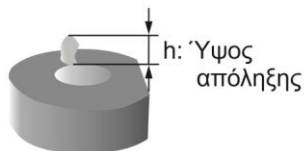
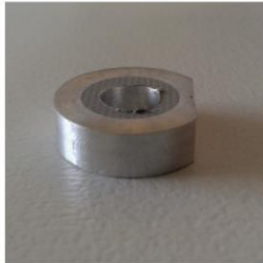
Σχήμα 3.42 Τιμή του ύψους της απόληξης με τη χρήση στερεοσκοπίου

#### 4. ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

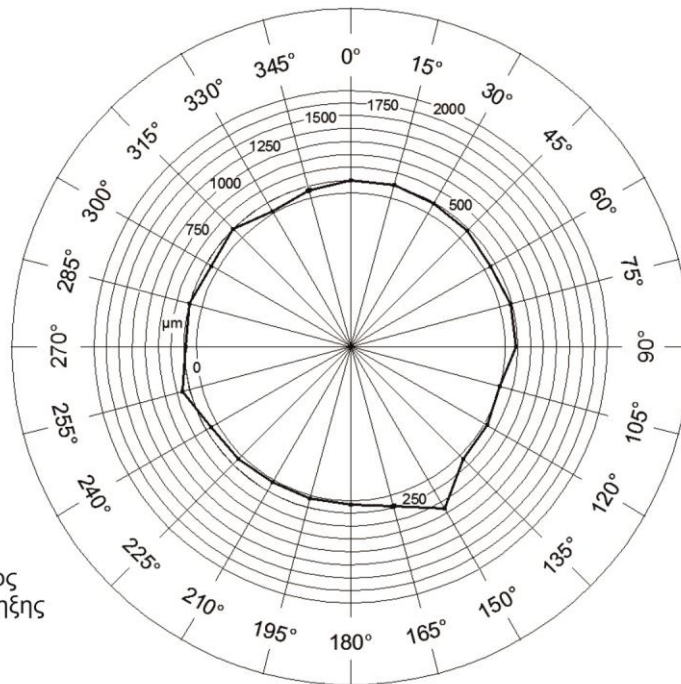


**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE**  
SCHOOL of PRODUCTION ENGINEERING & MANAGEMENT  
MICROMACHINING & MANUFACTURING MODELING LABORATORY

##### Δοκίμιο 1



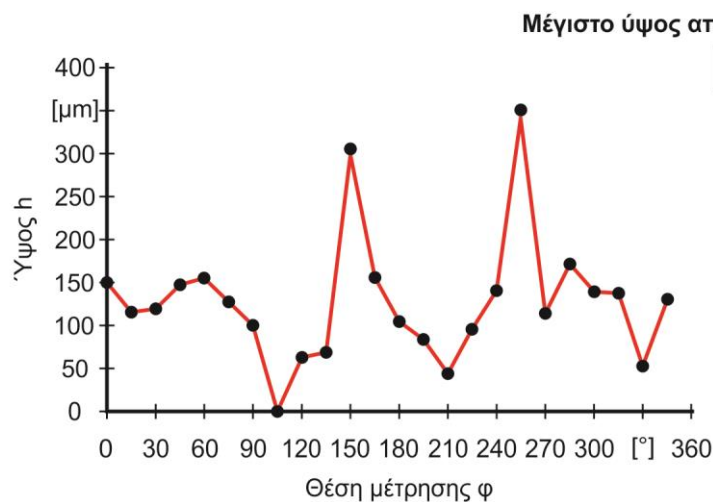
Διάγραμμα πλάτους απόληξης  $d$   
στην έξοδο της οπής



Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**640.0  $\mu\text{m}$**

Διάγραμμα ύψους απόληξης  $h$   
στην έξοδο της οπής



Μέγιστο ύψος απόληξης:

**346.90  $\mu\text{m}$**

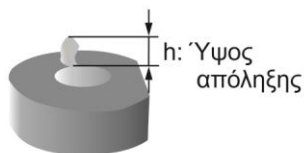
Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R,  $\varnothing 6 \text{ mm}$

Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

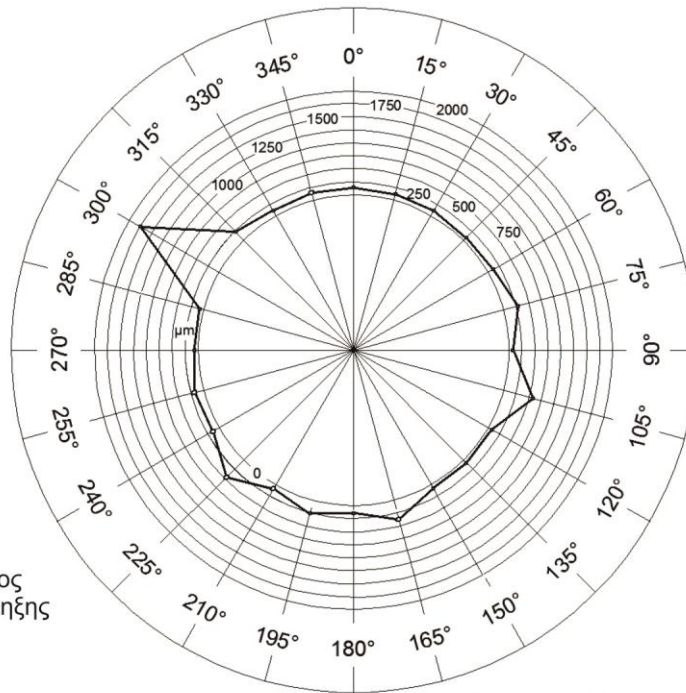
Συνθήκες κοπής:  
 $n = 2000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$



## Δοκίμιο 2



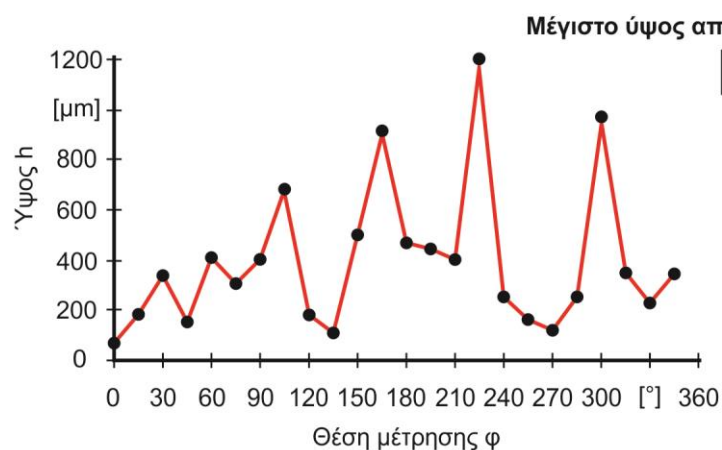
Διάγραμμα πλάτους απόληξης d  
στην έξοδο της οπής



Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**1741.0 μm**

Διάγραμμα ύψους απόληξης h  
στην έξοδο της οπής



Μέγιστο ύψος απόληξης:

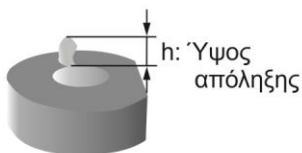
**1200.00 μm**

Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R, Ø6 mm

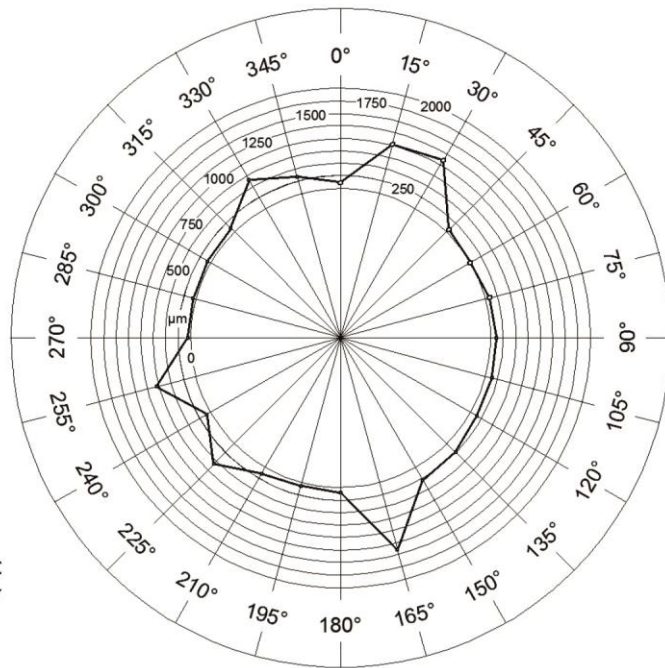
Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες κοπής:  
n = 3000 rpm  
f = 0.1 mm/rev

### Δοκίμιο 3



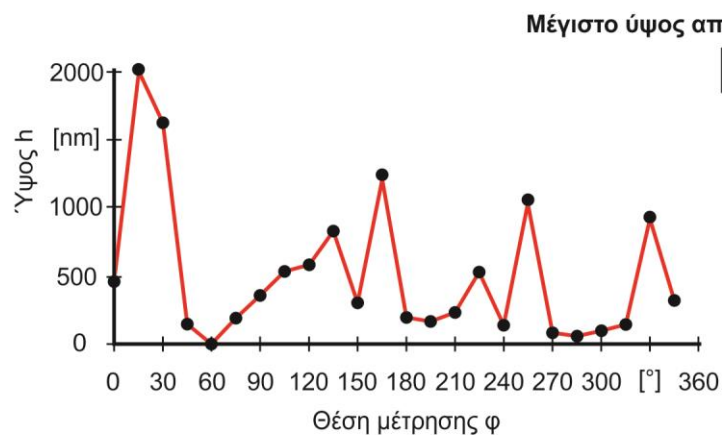
Διάγραμμα πλάτους απόληξης d  
στην έξοδο της οπής



Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**1395.0 μm**

Διάγραμμα ύψους απόληξης h  
στην έξοδο της οπής



Μέγιστο ύψος απόληξης:

**2006.00 μm**

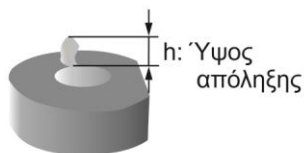
Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R, Ø6 mm

Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

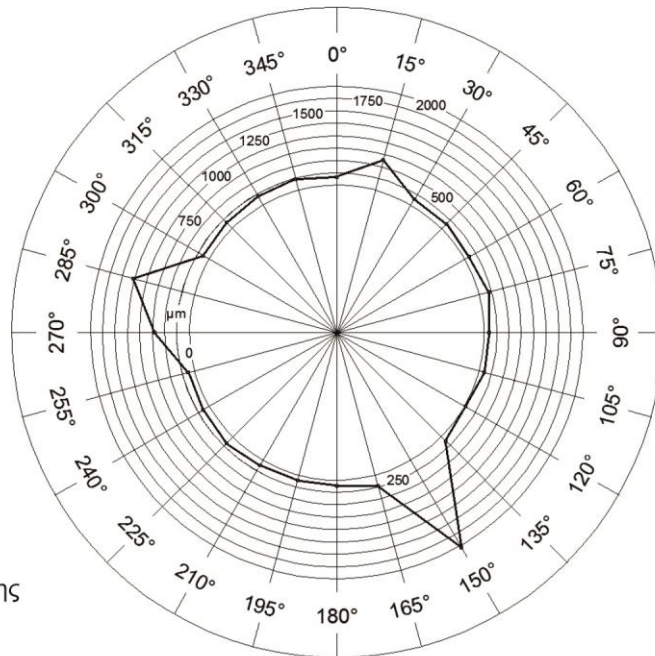
Συνθήκες κοπής:  
n = 4000 rpm  
f = 0.1 mm/rev



#### Δοκίμιο 4



Διάγραμμα πλάτους απόληξης d  
στην έξοδο της οπής



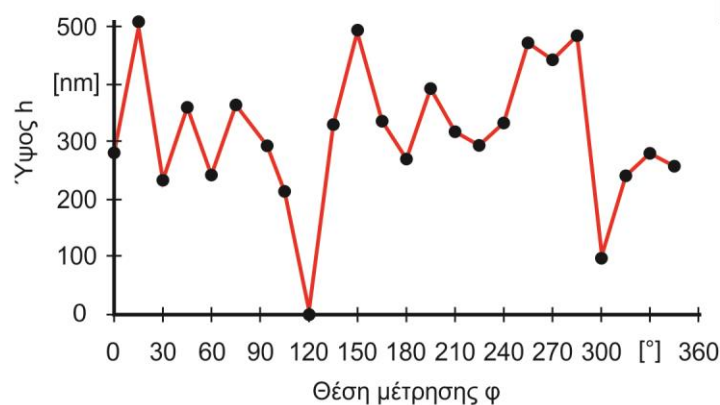
Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**2035.0 μm**

Διάγραμμα ύψους απόληξης h  
στην έξοδο της οπής

Μέγιστο ύψος απόληξης:

**506.00 μm**

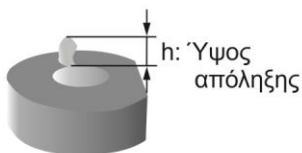


Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R, Ø6 mm

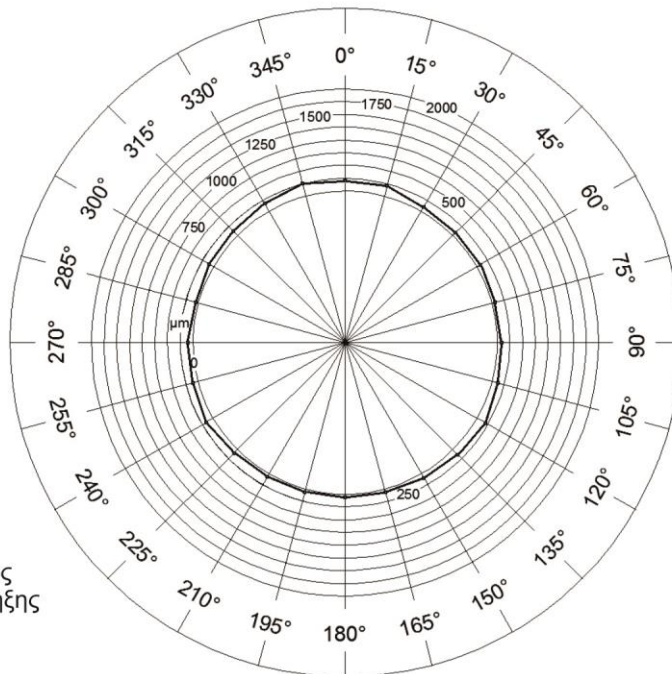
Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες κοπής:  
n = 2000 rpm  
f = 0.15 mm/rev

**Δοκίμιο 5**



Διάγραμμα πλάτους απόληξης d  
στην έξοδο της οπής



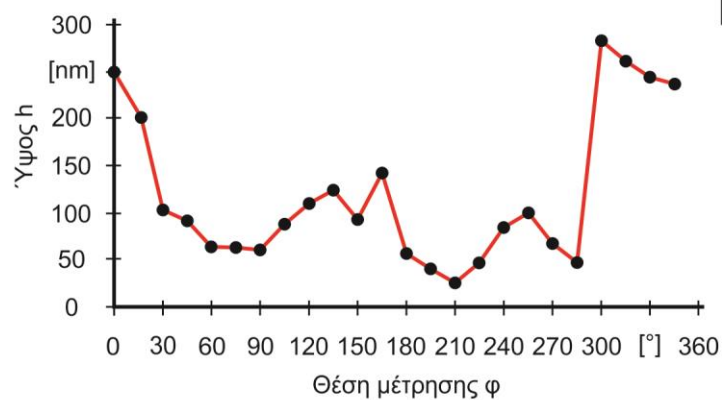
Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**240.0 μm**

Διάγραμμα ύψους απόληξης h  
στην έξοδο της οπής

Μέγιστο ύψος απόληξης:

**284.58 μm**



Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R, Ø6 mm

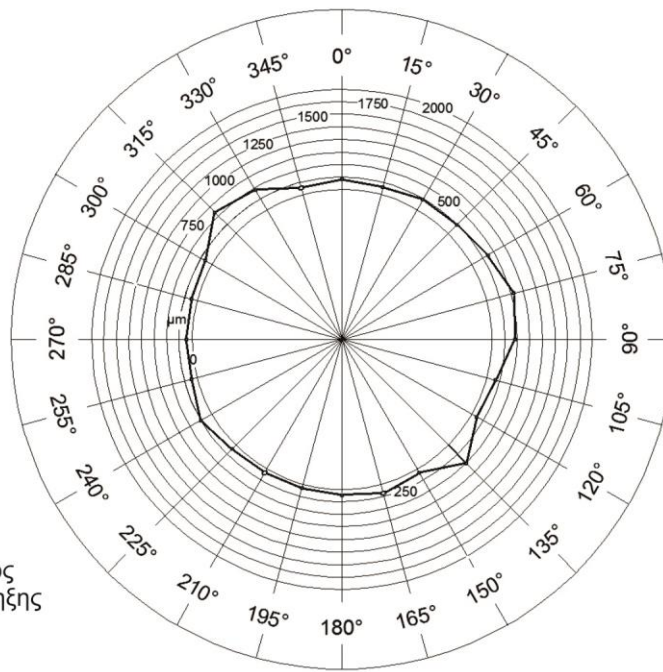
Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες κοπής:  
n = 3000 rpm  
f = 0.15 mm/rev

**Δοκίμιο 6**

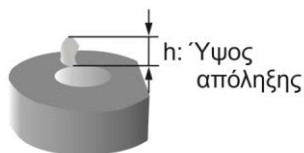


Διάγραμμα πλάτους απόληξης d  
στην έξοδο της οπής



Μέγιστο πλάτος απόληξης:

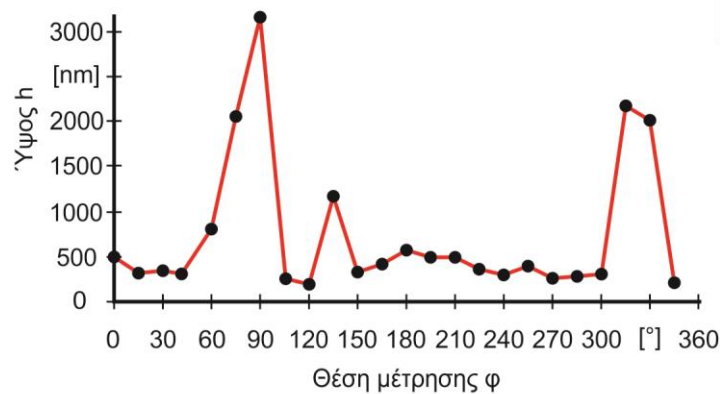
**544.0 μm**



Διάγραμμα ύψους απόληξης h  
στην έξοδο της οπής

Μέγιστο ύψος απόληξης:

**3149.00 μm**



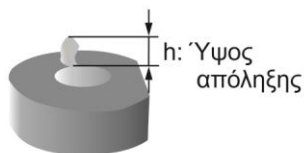
Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R, Ø6 mm

Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

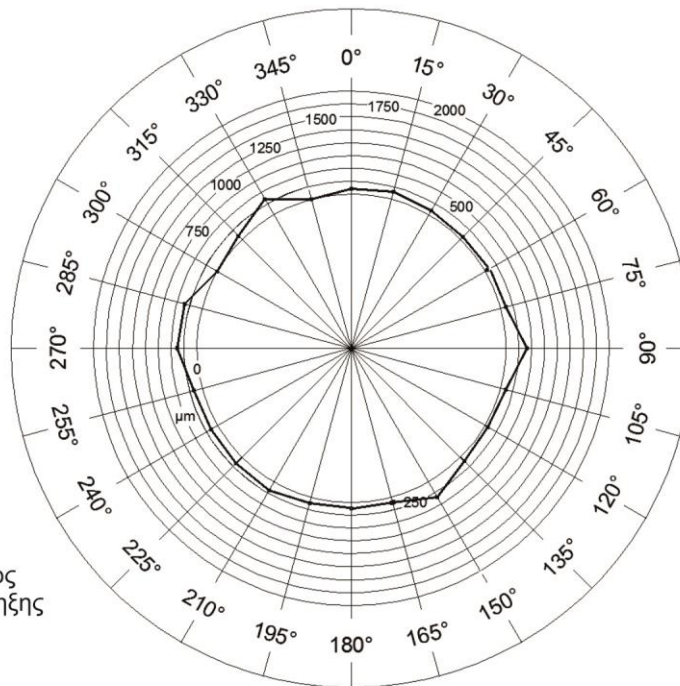
Συνθήκες κοπής:  
n = 4000 rpm  
f = 0.15 mm/rev



### Δοκίμιο 7



Διάγραμμα πλάτους απόληξης d  
στην έξοδο της οπής



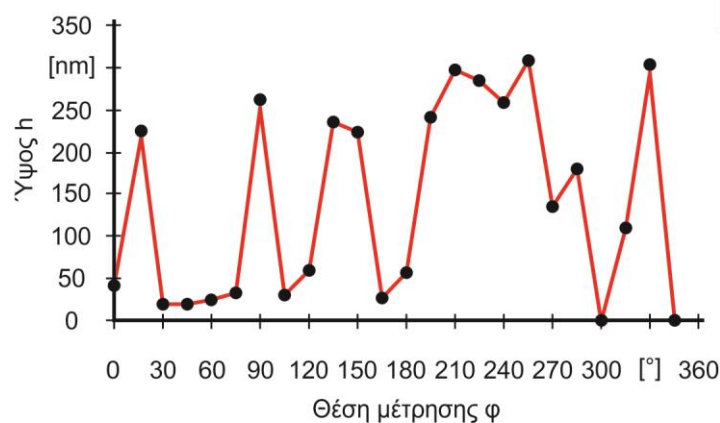
Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**405.8 μm**

Διάγραμμα ύψους απόληξης h  
στην έξοδο της οπής

Μέγιστο ύψος απόληξης:

**307.36 μm**

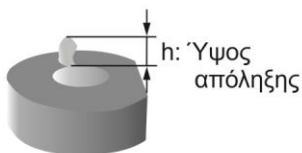


Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R, Ø6 mm

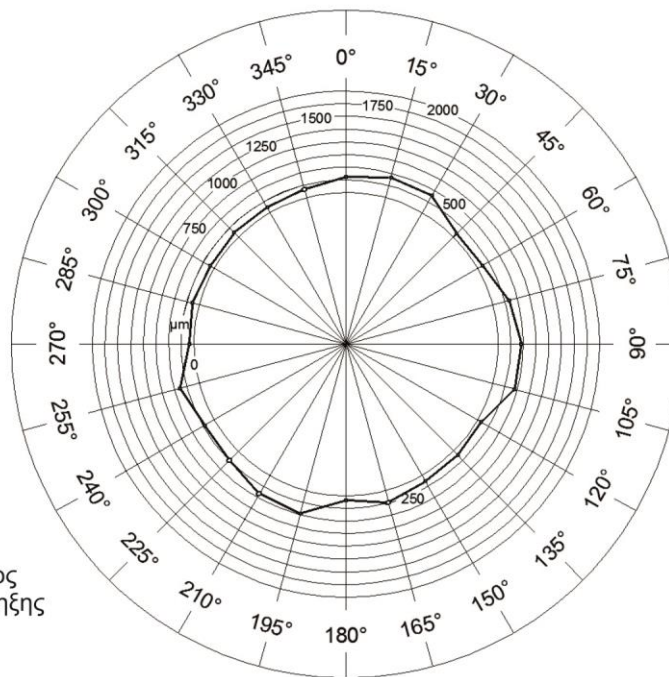
Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες κοπής:  
n = 2000 rpm  
f = 0.2 mm/rev

### Δοκίμιο 8



Διάγραμμα πλάτους απόληξης d  
στην έξοδο της οπής



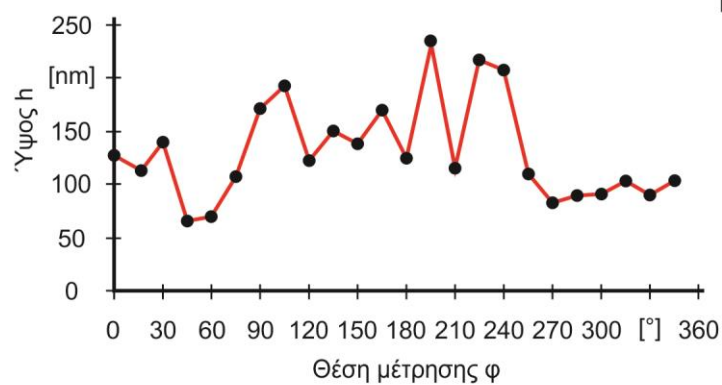
Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**451.4 μm**

Διάγραμμα ύψους απόληξης h  
στην έξοδο της οπής

Μέγιστο ύψος απόληξης:

**231.70 μm**

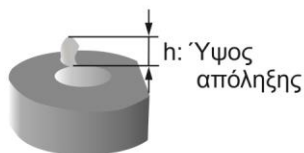


Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R, Ø6 mm

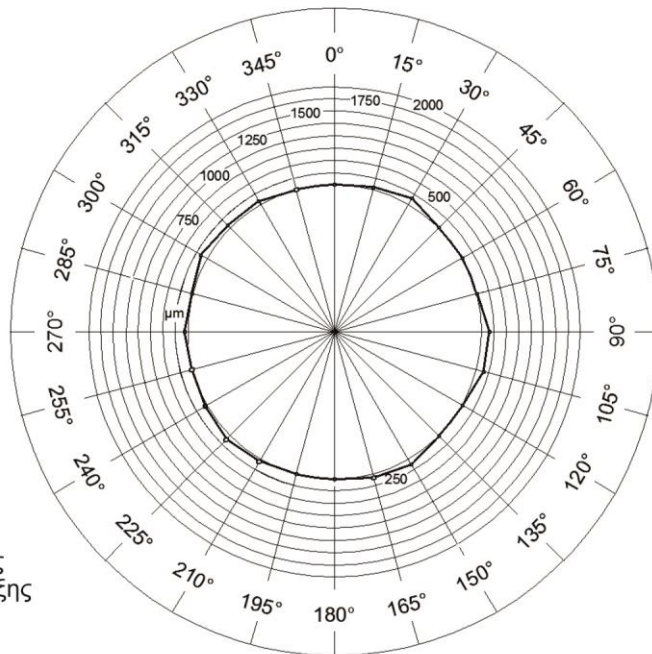
Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες κοπής:  
n = 3000 rpm  
f = 0.2 mm/rev

### Δοκίμιο 9



Διάγραμμα πλάτους απόληξης  $d$   
στην έξοδο της οπής



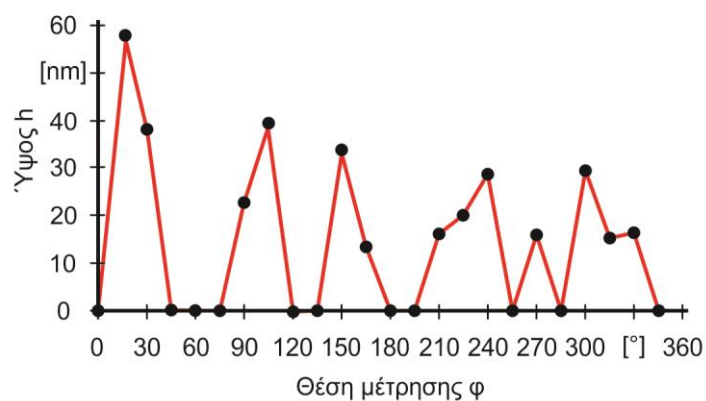
Μέγιστο πλάτος απόληξης:

**144.6  $\mu\text{m}$**

Διάγραμμα ύψους απόληξης  $h$   
στην έξοδο της οπής

Μέγιστο ύψος απόληξης:

**57.85  $\mu\text{m}$**



Κοπτικό εργαλείο:  
HSS-R,  $\varnothing 6$  mm

Κατεργαζόμενο υλικό:  
EN AW 2007

Συνθήκες κοπής:  
 $n = 4000$  rpm  
 $f = 0.2$  mm/rev

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Σύμφωνα με τα συνοπτικά αποτελέσματα και αφού εξετάσθηκαν και οι μέσοι όροι του ύψους και του πλάτους της απόληξης, σε κάθε δοκίμιο, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Με σταθερή την πρόωση της ατράκτου και μεταβαλλόμενη την ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου παρατηρήθηκε ότι:

Για  $f_z=0.1\text{mm/rev}$ :

- Για  $n=2000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $126.88\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $176.7\mu\text{m}$
- Για  $n=3000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $388.34\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $232.1\mu\text{m}$
- Για  $n=4000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $504.08\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $324.0\mu\text{m}$

Οπότε στα τρία πρώτα δοκίμια, με αύξηση των στροφών του κοπτικού εργαλείου, διαπιστώθηκε αύξηση στο ύψος και στο πλάτος της απόληξης διάτρησης.

Για  $f_z=0.15\text{mm/rev}$ :

- Για  $n=2000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $312.58\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $302.6\mu\text{m}$
- Για  $n=3000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $116.4\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $105.7\mu\text{m}$
- Για  $n=4000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $721.06\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $218.02\mu\text{m}$

Οπότε με αύξηση των στροφών του κοπτικού εργαλείου από την κατεργασία του δοκιμίου4 στην κατεργασία του δοκιμίου5 παρατηρήθηκε μείωση στο ύψος και στο πλάτος της απόληξης. Ενώ για  $n=4000\text{rpm}$  διαπιστώθηκε αύξηση του ύψους της απόληξης σε σχέση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων δύο δοκιμίων, μείωση του πλάτους σε σχέση με το δοκίμιο4 και αύξηση σε σχέση με το δοκίμιο5.

Για  $f_z=0.2\text{mm/rev}$ :

- Για  $n=2000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $138.80\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $153.5\mu\text{m}$
- Για  $n=3000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $129.52\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $228.8\mu\text{m}$
- Για  $n=4000\text{rpm}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $14.45\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $48.4\mu\text{m}$

Οπότε στα τρία τελευταία δοκίμια, με αύξηση των στροφών του κοπτικού εργαλείου, διαπιστώθηκε μείωση στο ύψος της απόληξης διάτρησης. Επίσης από την κατεργασία του δοκιμίου7 στην κατεργασία του δοκιμίου8 το πλάτος της απόληξης αυξήθηκε ενώ από την κατεργασία του δοκιμίου8 στην κατεργασία του δοκιμίου9 το πλάτος μειώθηκε σε σχέση και με τα δύο προηγούμενα δοκίμια.



Με σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και μεταβαλλόμενη την πρόωση της ατράκτου παρατηρήθηκε ότι:

Για  $n=2000\text{rpm}$ :

- Για  $f_z=0.1\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $126.88\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $176.7\mu\text{m}$
- Για  $f_z=0.15\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $312.58\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $302.6\mu\text{m}$
- Για  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $138.80\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $153.5\mu\text{m}$

Οπότε με αύξηση της πρόωσης της ατράκτου από την κατεργασία του δοκιμίου<sup>1</sup> στην κατεργασία του δοκιμίου<sup>4</sup> παρατηρήθηκε αύξηση στο ύψος και στο πλάτος της απόληξης. Ενώ για  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  διαπιστώθηκε μείωση του ύψους της απόληξης σε σχέση με τα αποτελέσματα του δοκιμίου<sup>4</sup> και αύξηση σε σχέση με τα αποτελέσματα του δοκιμίου<sup>1</sup> καθώς και για το πλάτος παρατηρήθηκε αρχικά αύξηση από την κατεργασία του δοκιμίου<sup>1</sup> στην κατεργασία του δοκιμίου<sup>4</sup> και έπειτα μείωση στην κατεργασία του δοκιμίου<sup>7</sup>.

Για  $n=3000\text{rpm}$ :

- Για  $f_z=0.1\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $388.34\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $232.1\mu\text{m}$
- Για  $f_z=0.15\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $116.40\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $105.7\mu\text{m}$
- Για  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $129.52\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $228.8\mu\text{m}$

Οπότε με αύξηση της πρόωσης της ατράκτου από την κατεργασία του δοκιμίου<sup>2</sup> στην κατεργασία του δοκιμίου<sup>5</sup> παρατηρήθηκε μείωση στο ύψος και στο πλάτος της απόληξης. Ενώ για  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  διαπιστώθηκε μείωση του ύψους και του πλάτους της απόληξης σε σχέση με τα αποτελέσματα του δοκιμίου<sup>2</sup> και αύξηση σε σχέση με τα αποτελέσματα του δοκιμίου<sup>5</sup>.

Για  $n=4000\text{rpm}$ :

- Για  $f_z=0.1\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $504.08\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $324.0\mu\text{m}$
- Για  $f_z=0.15\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $721.06\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $218.02\mu\text{m}$
- Για  $f_z=0.2\text{mm/rev}$  ο μέσος όρος ύψους είναι  $14.45\mu\text{m}$  και ο μέσος όρος πλάτους είναι  $48.4\mu\text{m}$

Οπότε με αύξηση της πρόωσης της ατράκτου από την κατεργασία του δοκιμίου<sup>3</sup> στην κατεργασία του δοκιμίου<sup>6</sup> παρατηρήθηκε αύξηση του ύψους και μείωση του πλάτους απόληξης. Ενώ με επιπλέον αύξηση της πρόωσης της ατράκτου από την κατεργασία του δοκιμίου<sup>6</sup> στην κατεργασία του δοκιμίου<sup>9</sup> διαπιστώθηκε μείωση του ύψους και του πλάτους της απόληξης διάτρησης.

Πέρα των άνω συμπερασμάτων, η συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας και των επιστημών θα δώσουν στο μέλλον περιθώρια περαιτέρω διερεύνησης των συνθηκών εμφάνισης της απόληξης στην έξοδο της οπής κατά τη διεργασία της διάτρησης. Επίσης ακόμα και τώρα μπορεί να γίνει διερεύνηση με διαφορετικά όργανα μέτρησης και τα αποτελέσματα να εξαρτηθούν από το επίπεδο της έρευνας.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

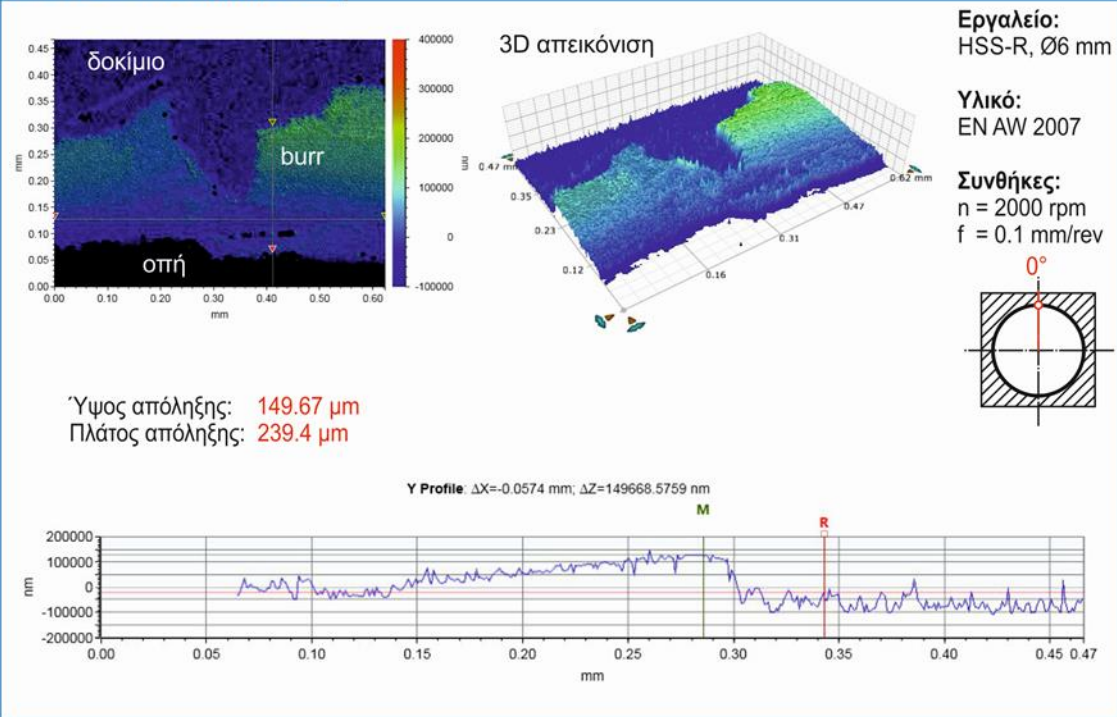
- [1] L.K.Gillespie,P.T. Blotter, 1976, The Formation and Properties of Machining Burrs, Trans. ASME, J. Engineering for Industry, 98/1:66-74
- [2] JF.Schäfer, 1978, Gratbildung und Entgraten beimUmfangsstirnfräsen. VDI-Zeitung 120, 1/2: 47-55
- [3] J.S. Kim, S. Min, D.A. Dornfeld, Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts, International Journal of Machine Tools and ManufactureVolume 41, Issue 7, May 2001, Pages 923–936
- [4] Y.B. Guo, D.A. Dornfeld, Finite Element Modeling of Burr Formation Process in Drilling 304 Stainless Steel, J. Manuf. Sci. Eng.122 (4), 612-619 , 2000
- [5] S.L. Ko, J.E. Chang, Development of Drill Geometry for Burr Minimization in Drilling, 2003, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 52/1: 45-48
- [6] S.L. Ko, J.E. Chang, G.E.Yang, Burr minimizing scheme in drilling, Journal of Materials Processing TechnologyVolume 140, Issues 1–3, 22 September 2003, Pages 237–242
- [7] P. Shanmughasundaram, R. Subramanian, Study of parametric optimization of burr formation in step drilling of eutectic Al–Si alloy–Gr composites, Journal of Materials Research and Technology, Volume 3, Issue 2, 2014, Pages 150–157
- [8] E. Kilickap, Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, Volume 49, Issue 9-12, pp 911-923
- [9] L.Pilný, L.D. Chiffre , M. Píška, M. F. Villumsen, Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets, CIRP Journal of Manufacturing Science and TechnologyVolume 5, Issue 2, 2012, Pages 102–107
- [10] D. Biermann, H. Hartmann, Reduction of Burr Formation in Drilling Using Cryogenic Process Cooling,Procedia CIRP, Volume 3, 2012, Pages 85–90, 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012
- [11] D.A. Dornfeld, J.S. Kim, H. Dechow, J. Hewson, L.J. Chen , Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V,CIRP Annals - Manufacturing Technology,Volume 48, Issue 1, 1999, Pages 73–76
- [12] J.S. Kim, S. Min, D.A. Dornfeld, Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts, International Journal of Machine Tools and ManufactureVolume 41, Issue 7, May 2001, Pages 923–936
- [13] K. Lee, B. Stirn, D.A. Dornfeld, Burr formation in Micro-Machining Aluminum 6061-T6,Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium,2002, pp 47-51
- [14] U. Heisel, M. Schaal, Burr Formation in intersecting Holes,Production Engineering, April 2008, Volume 2, Issue 1, pp 55-62
- [15] J. Stein, D.A. Dornfeld, Burr Formation in Drilling Miniature Holes, (1997) , CIRP Annals 46:63–66

## 7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

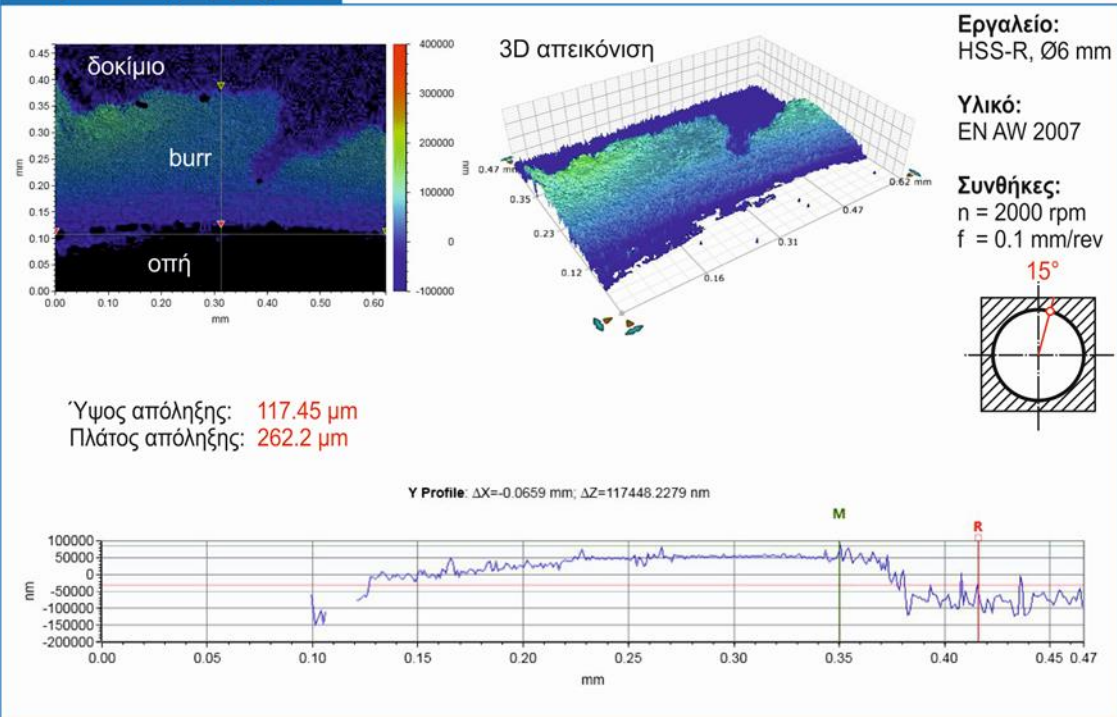


**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE**  
**SCHOOL of PRODUCTION ENGINEERING & MANAGEMENT**  
**MICROMACHINING & MANUFACTURING MODELING LABORATORY**

### Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 0°

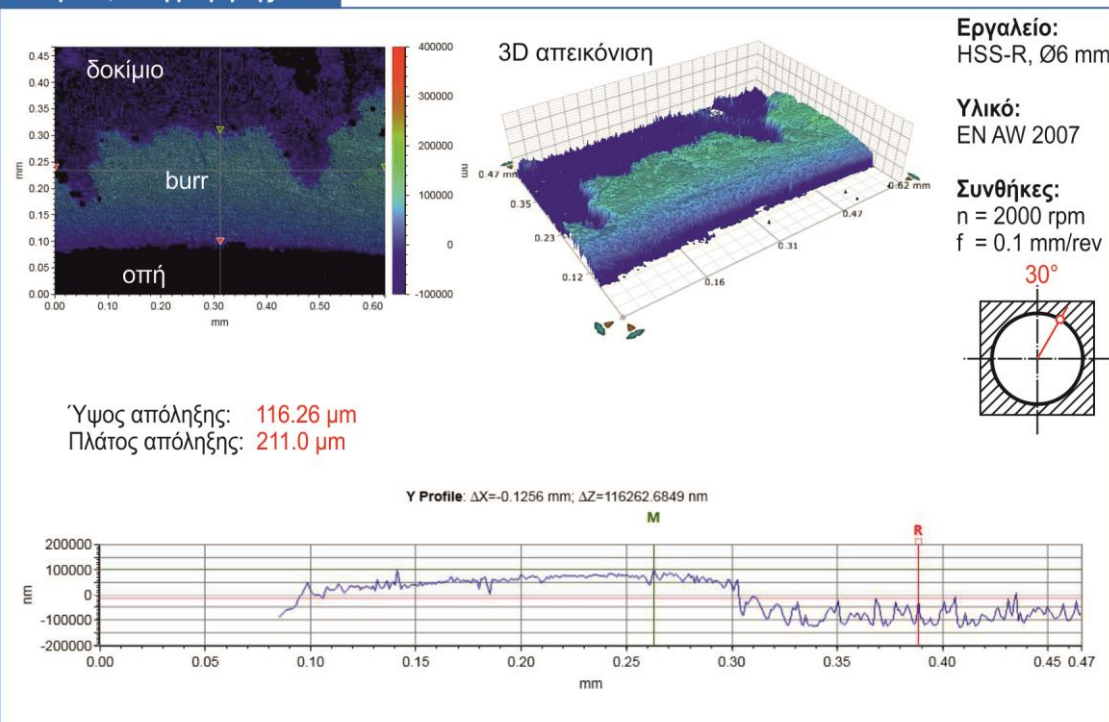


### Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 15°

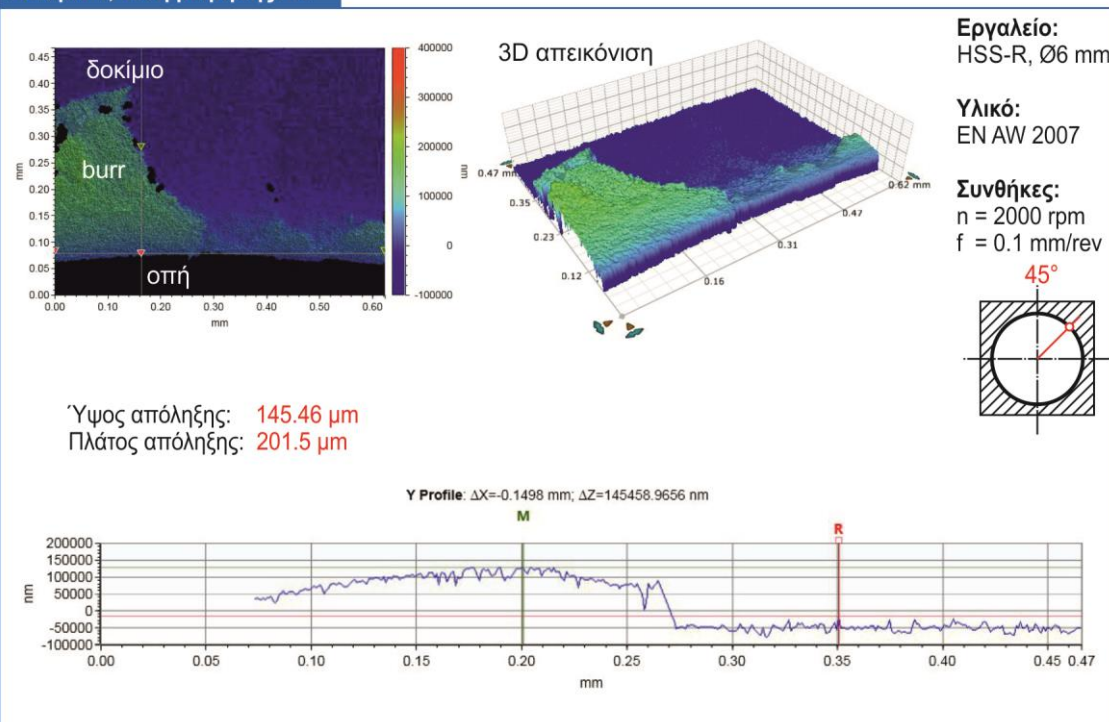




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 30°**



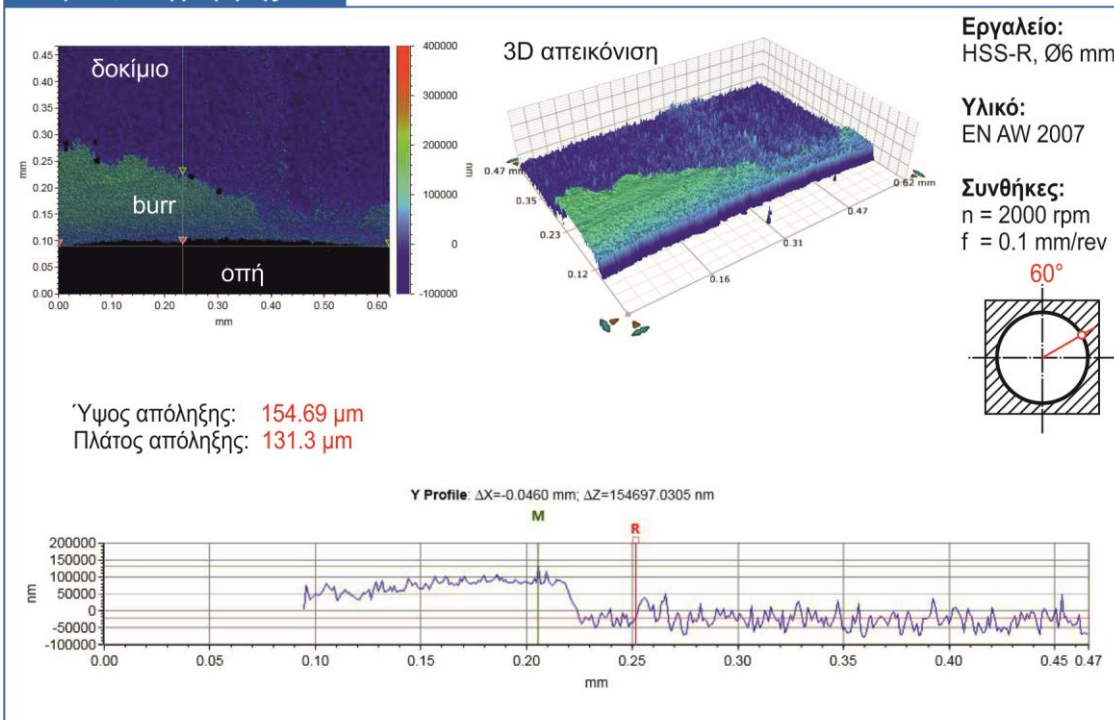
**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 45°**



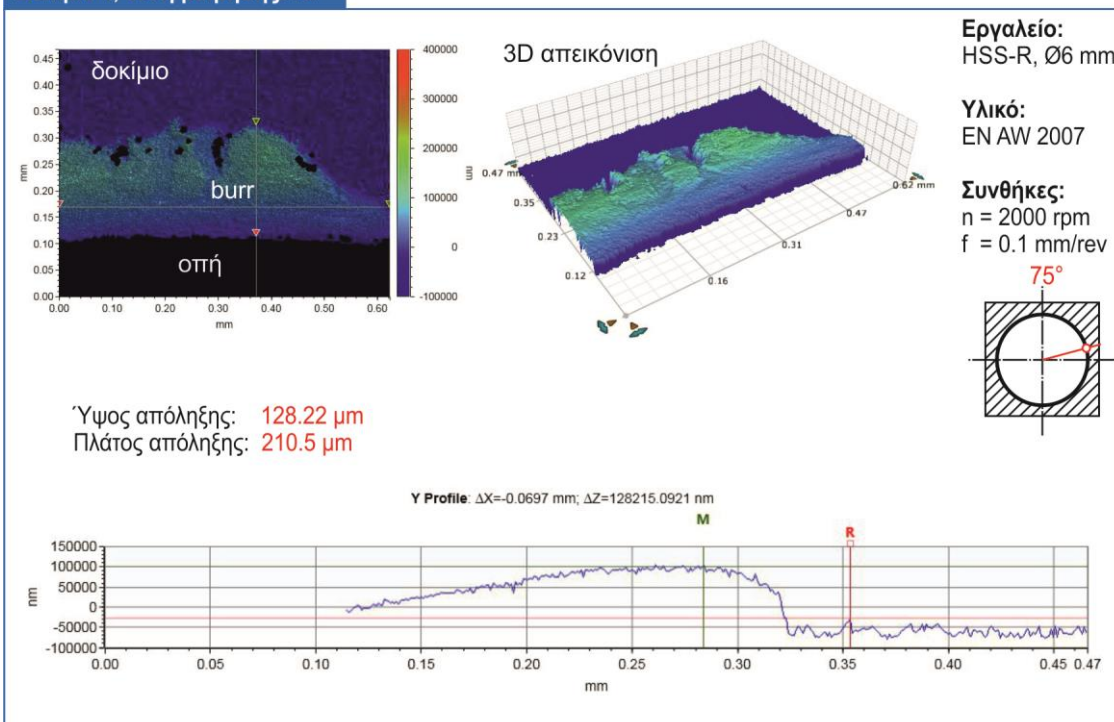




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 60°**

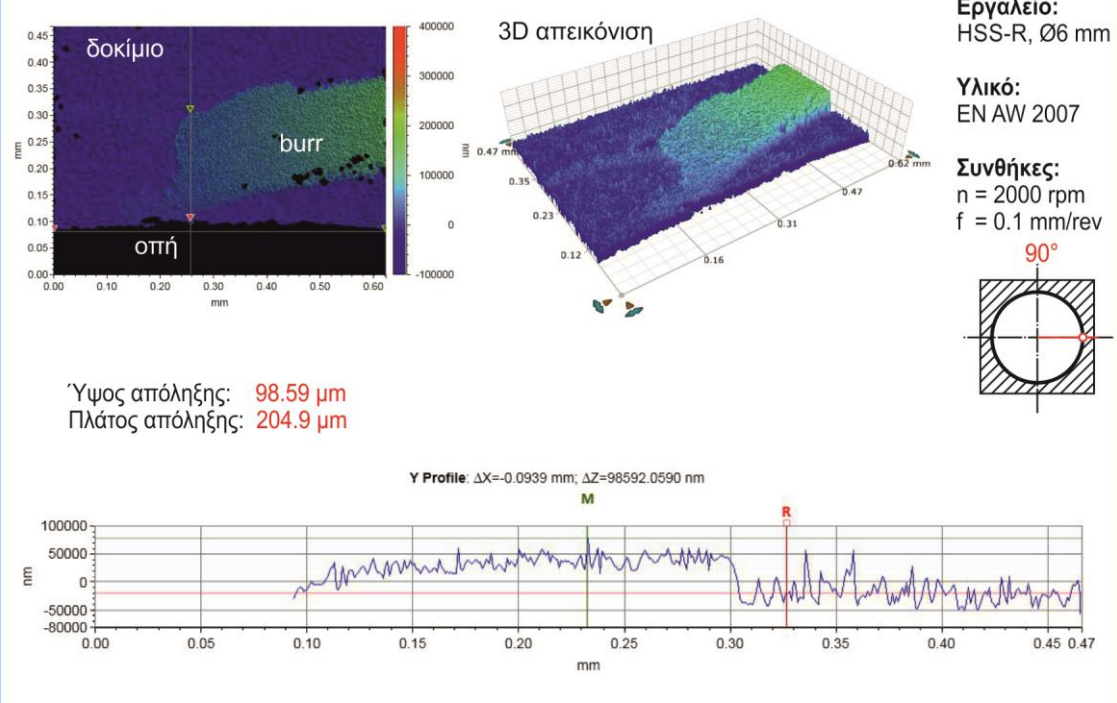


**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 75°**

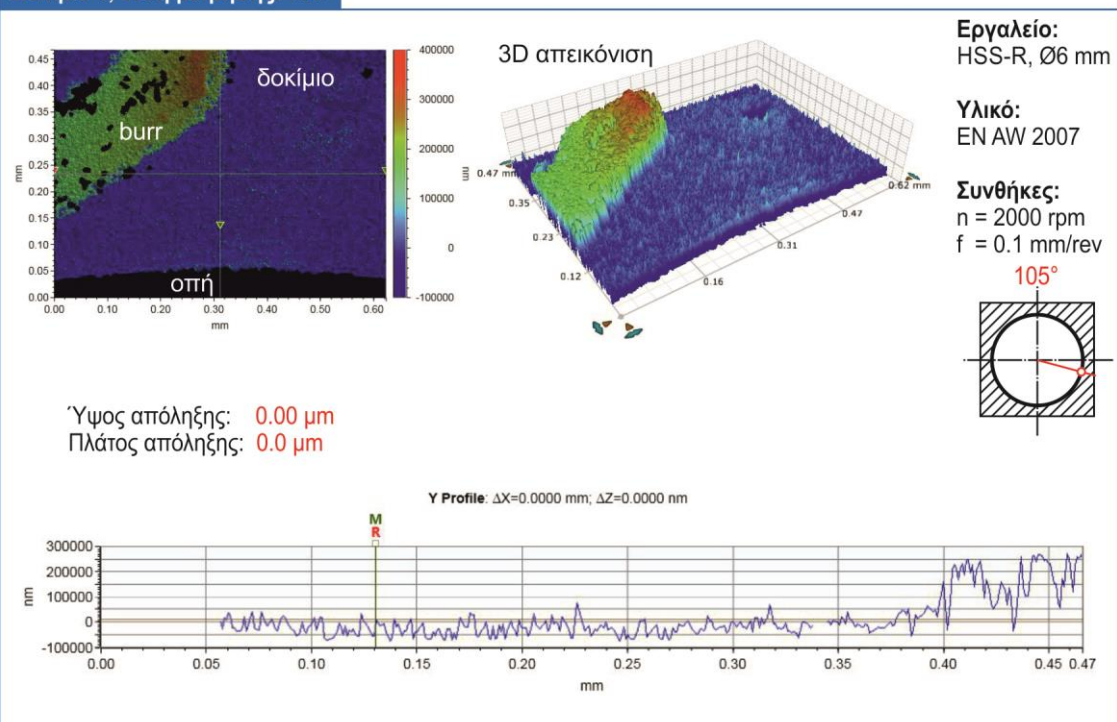




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 90°**



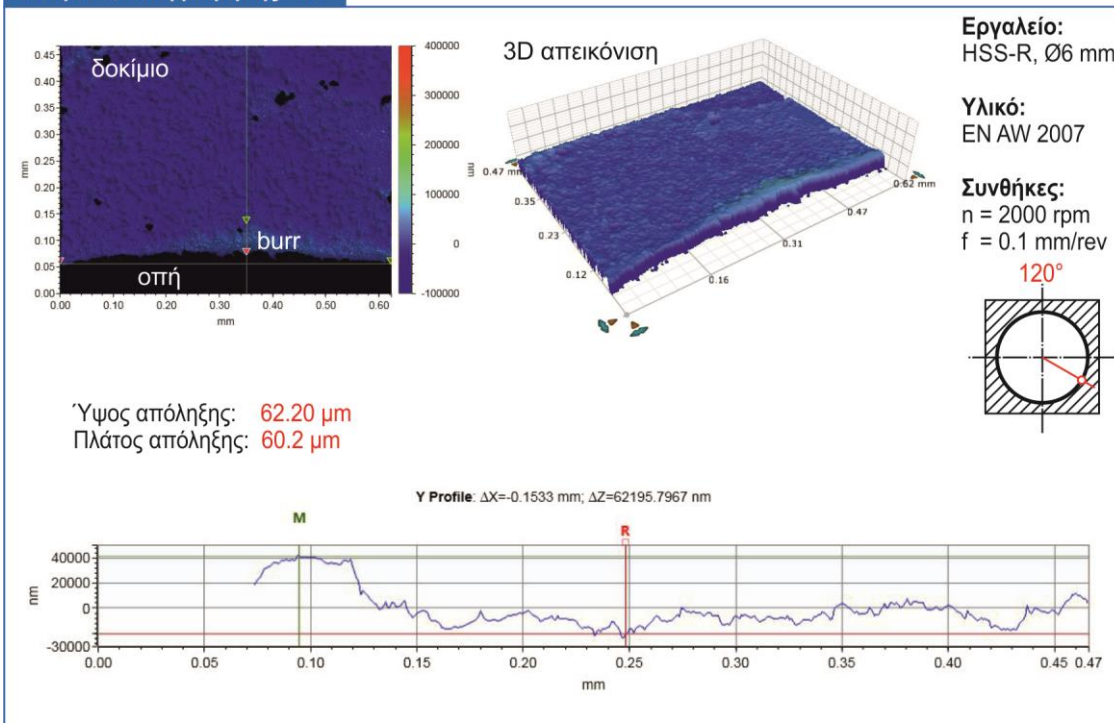
**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 105°**



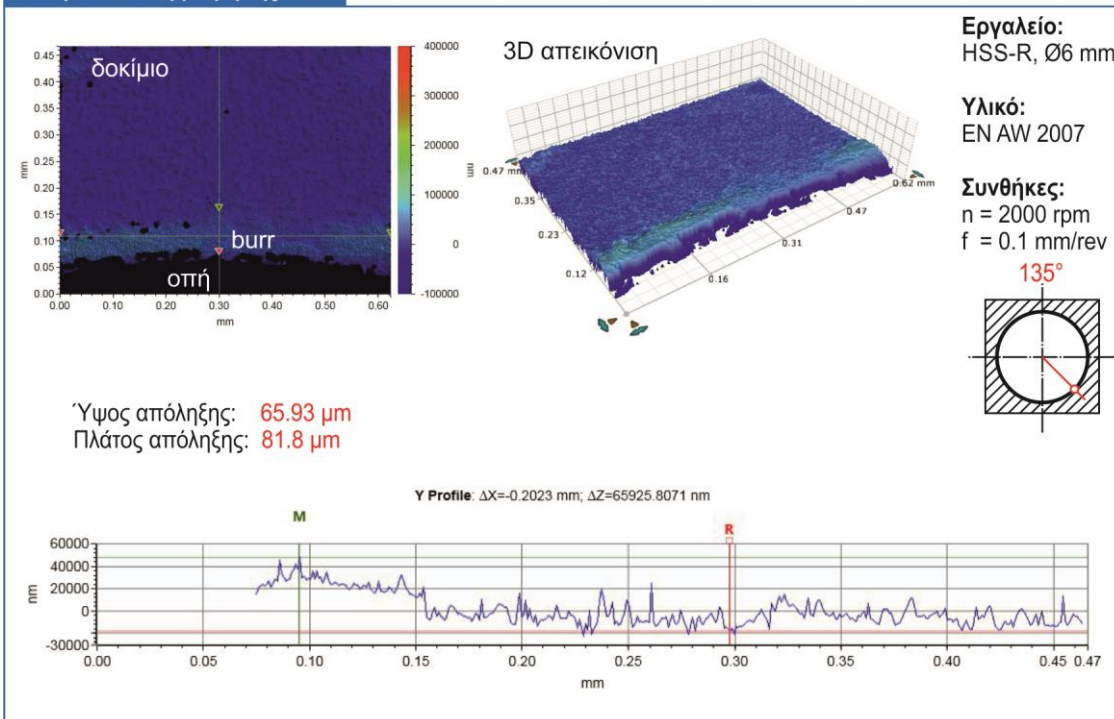




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 120°**

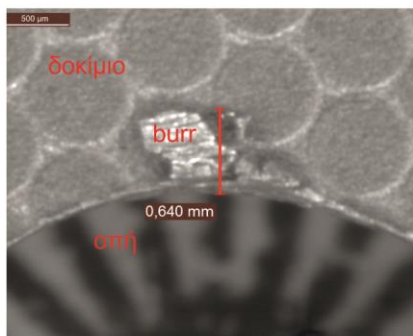


**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 135°**

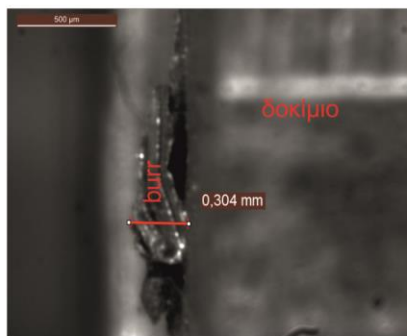




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 150°**



Μέτρηση πλάτους του burr

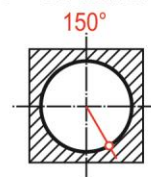


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

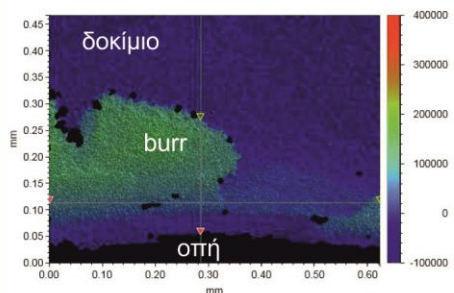
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 2000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$

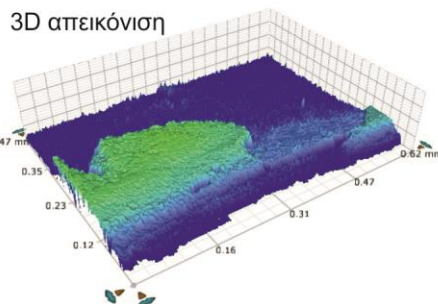


Ύψος απόληξης: 304.00  $\mu\text{m}$   
Πλάτος απόληξης: 640.0  $\mu\text{m}$

**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 165°**



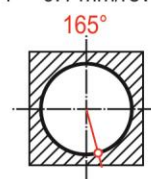
3D απεικόνιση



**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

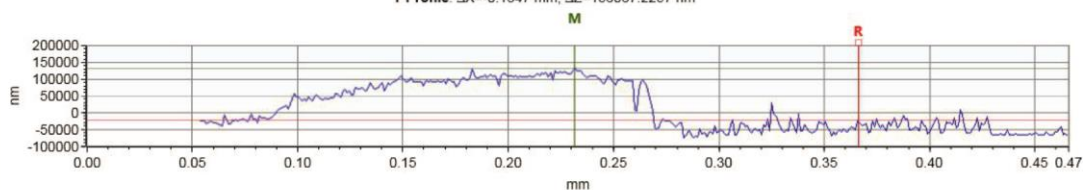
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 2000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$



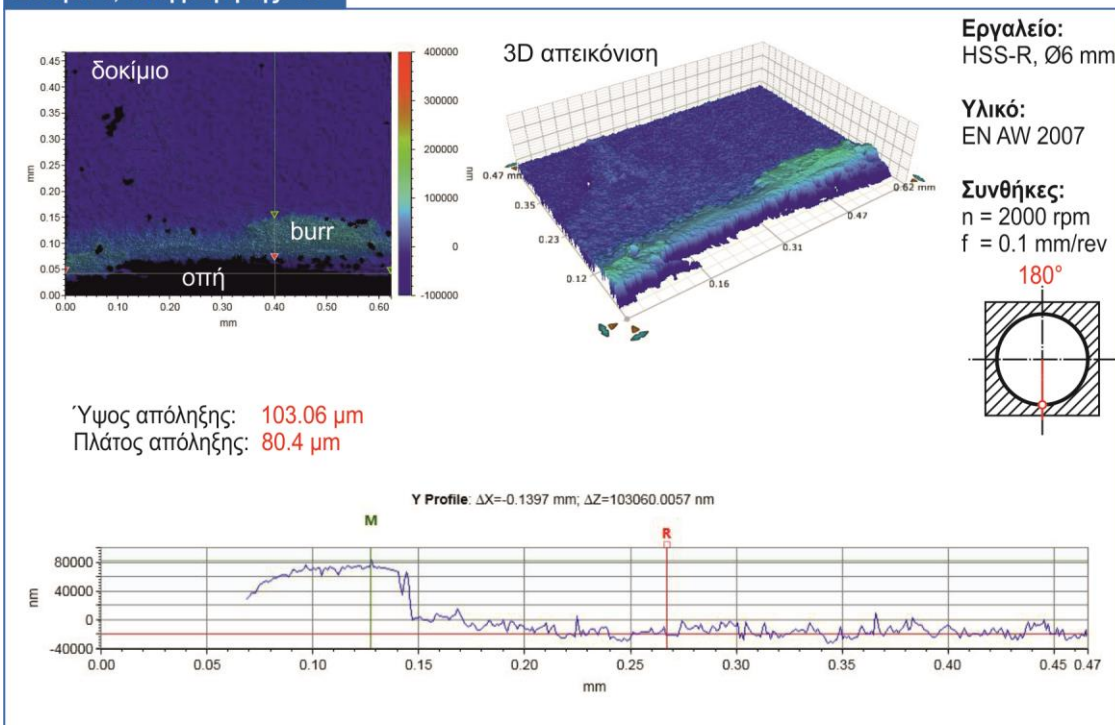
Ύψος απόληξης: 156.07  $\mu\text{m}$   
Πλάτος απόληξης: 216.7  $\mu\text{m}$

Y Profile:  $\Delta X = -0.1347 \text{ mm}$ ;  $\Delta Z = 156067.2257 \text{ nm}$

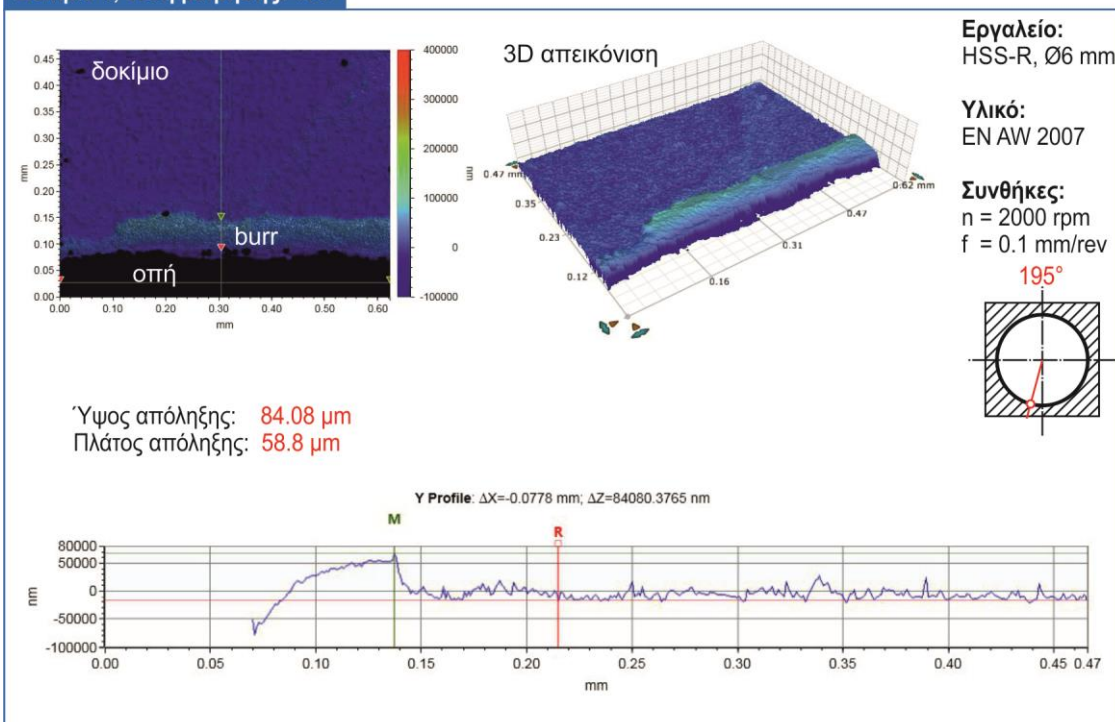




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 180°**



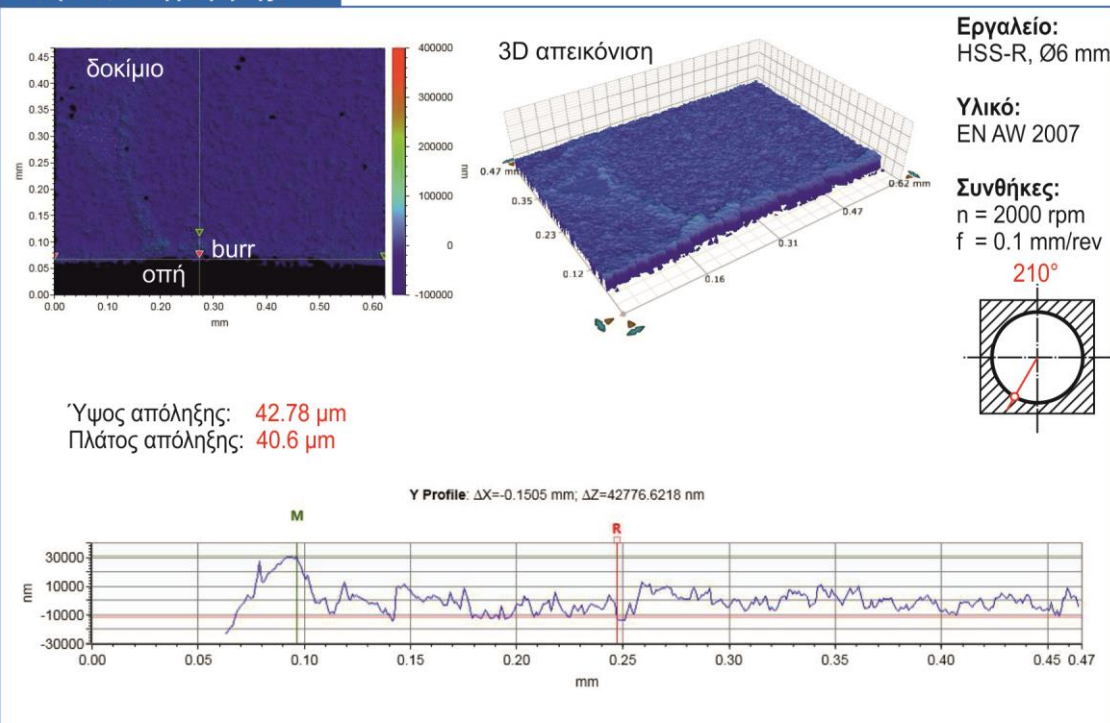
**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 195°**



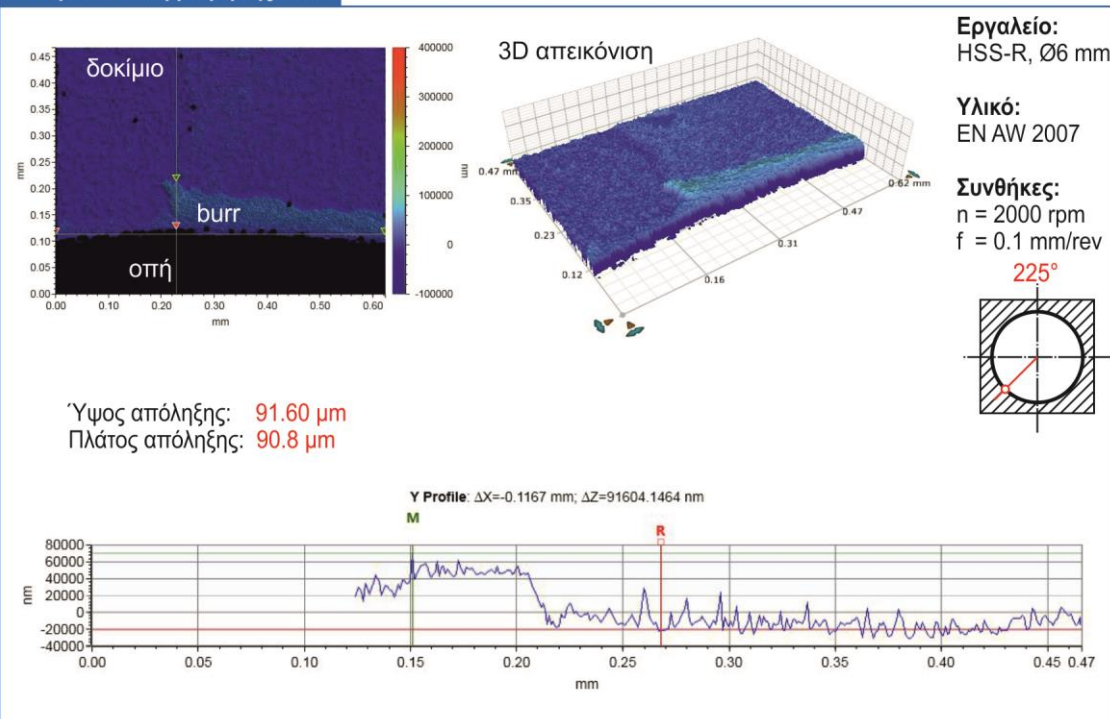




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 210°**

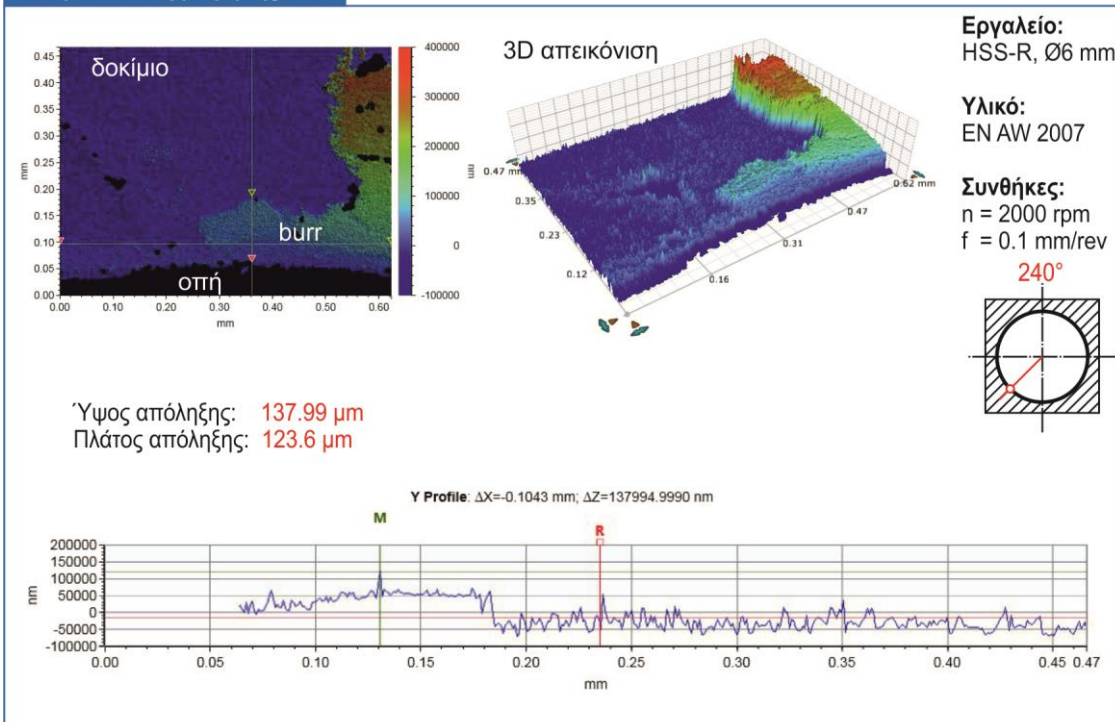


**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 225°**

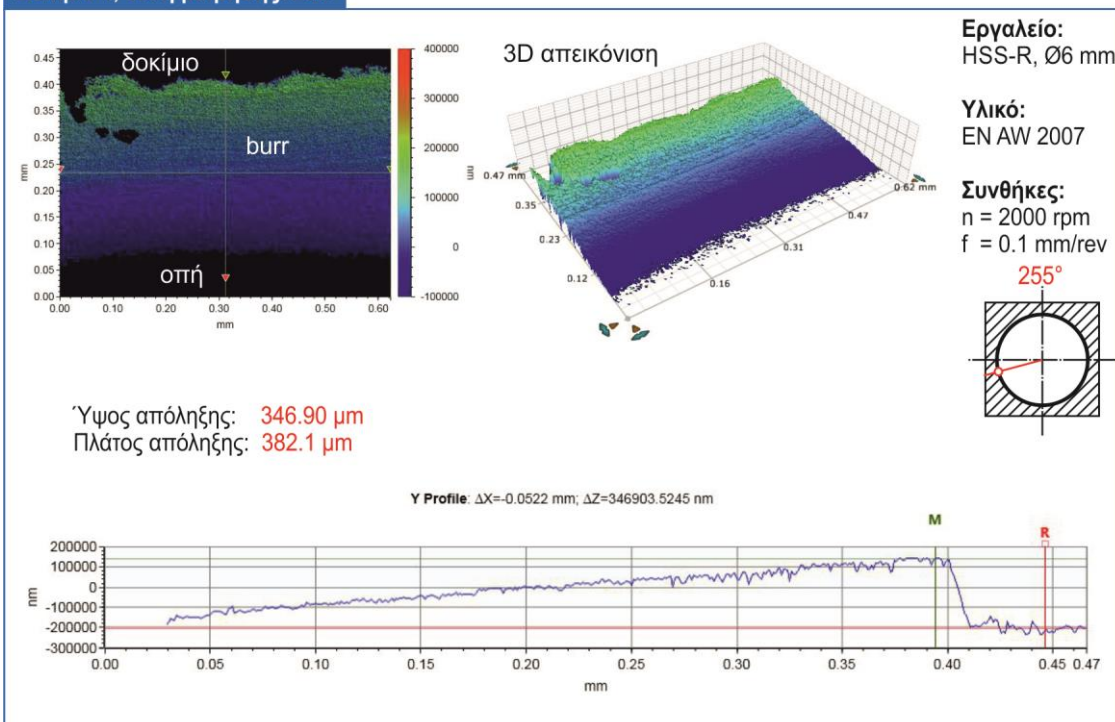




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 240°**

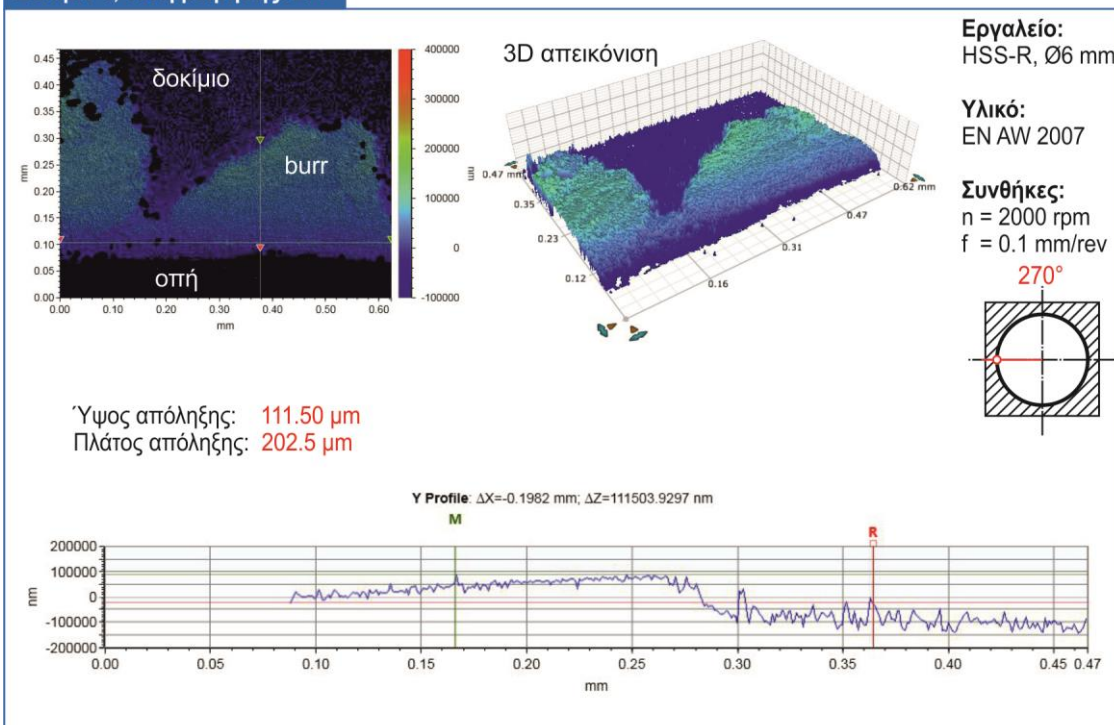


**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 255°**

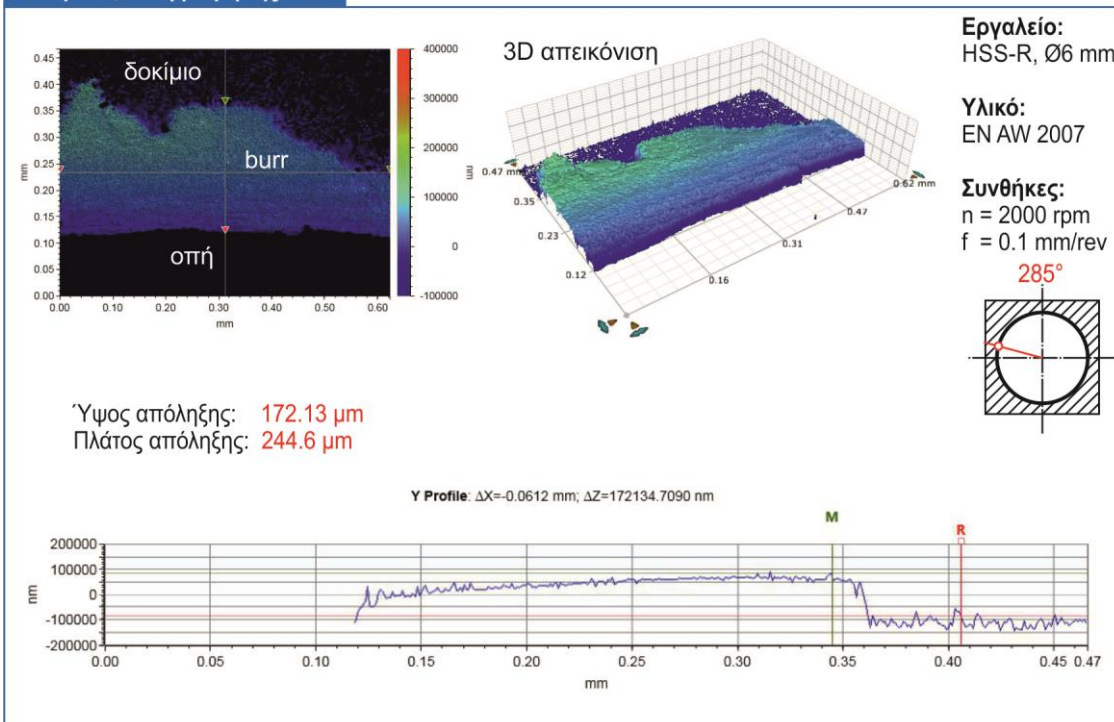




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 270°**



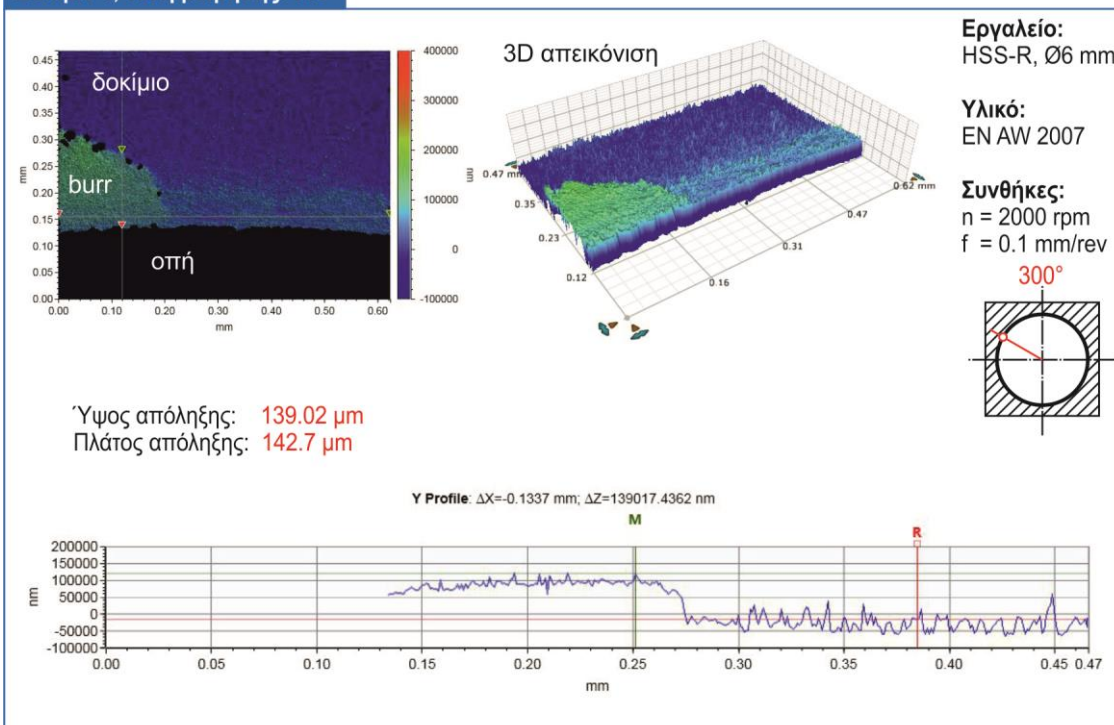
**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 285°**



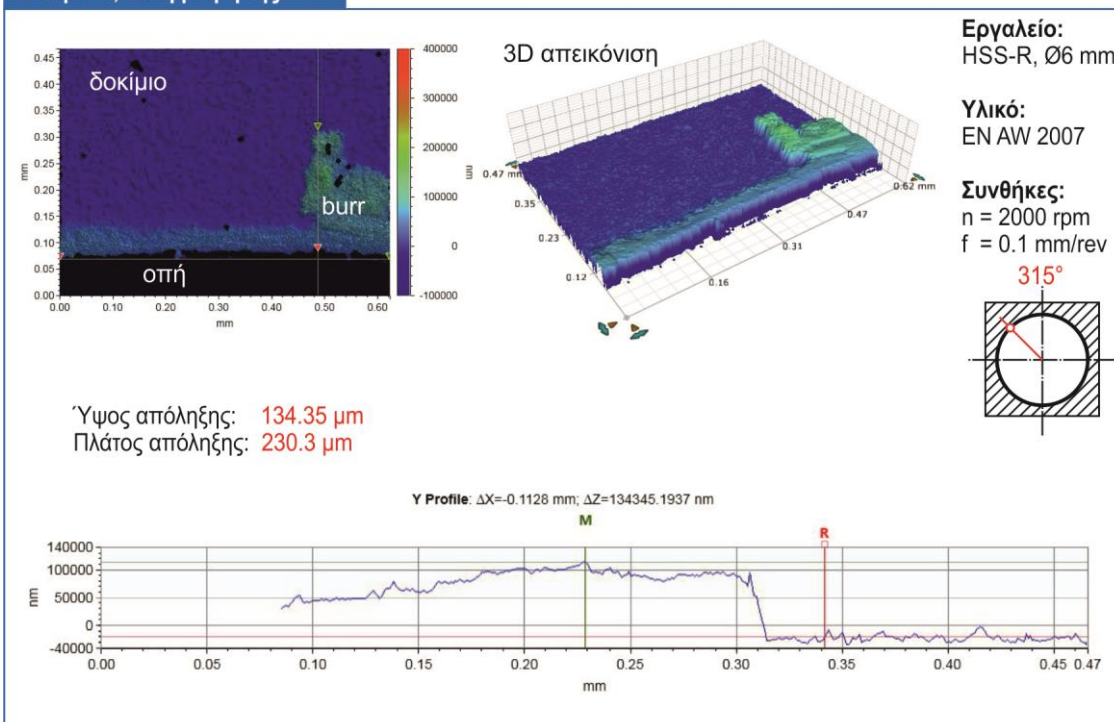




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 300°**

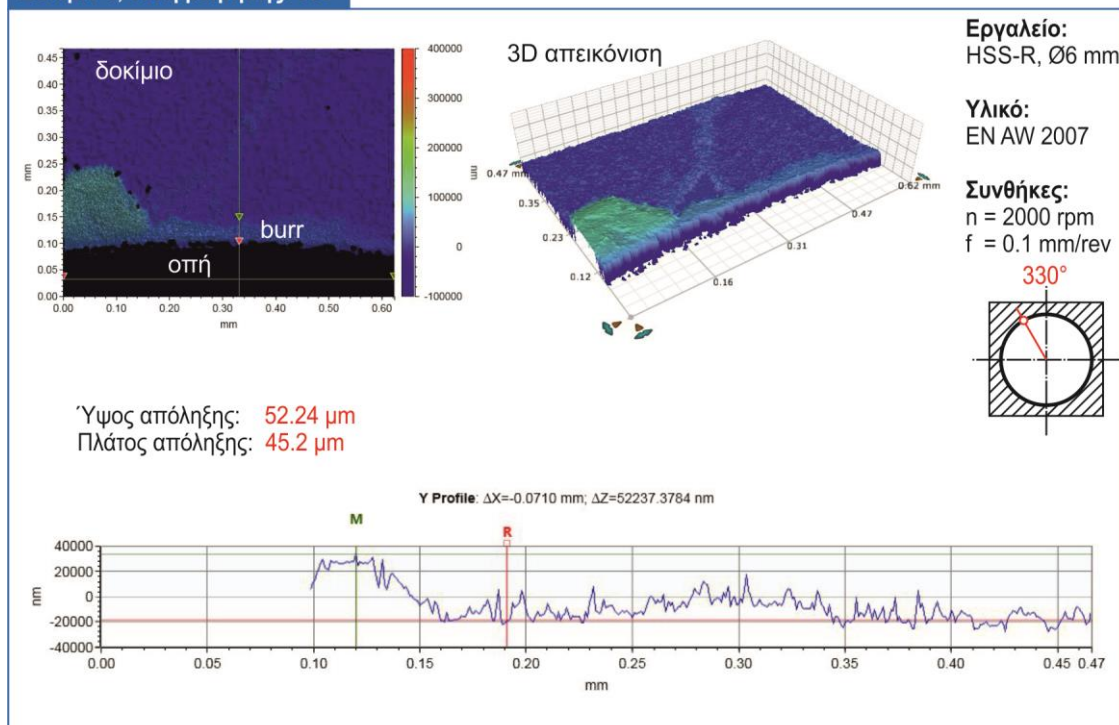


**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 315°**

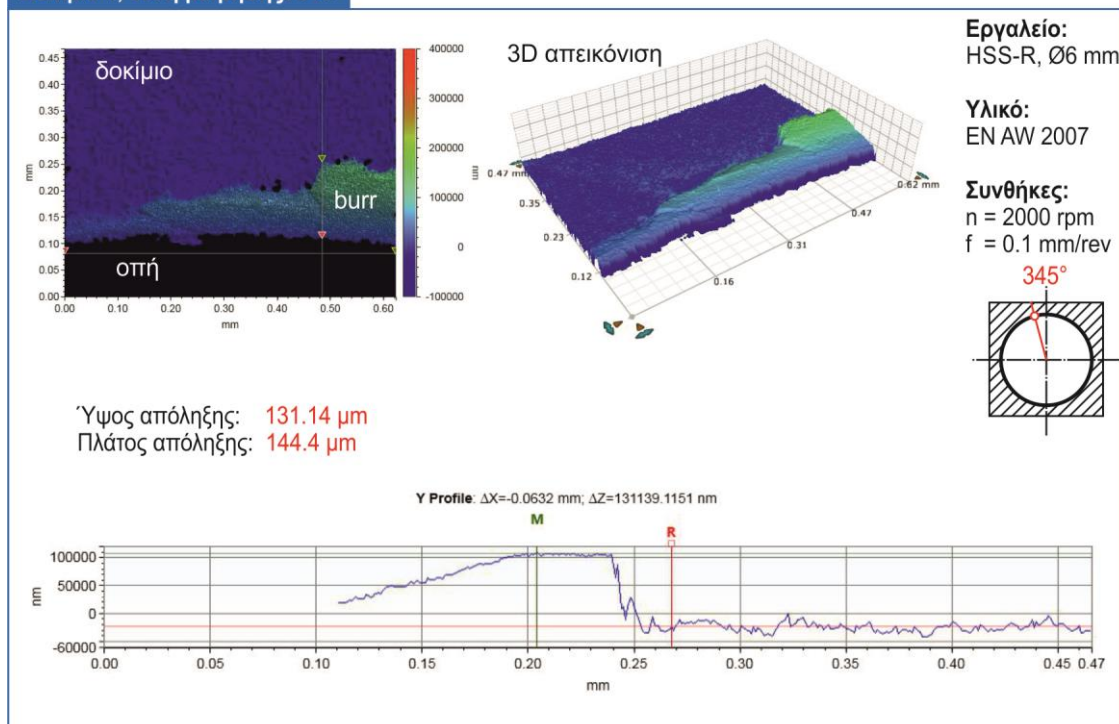




**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 330°**

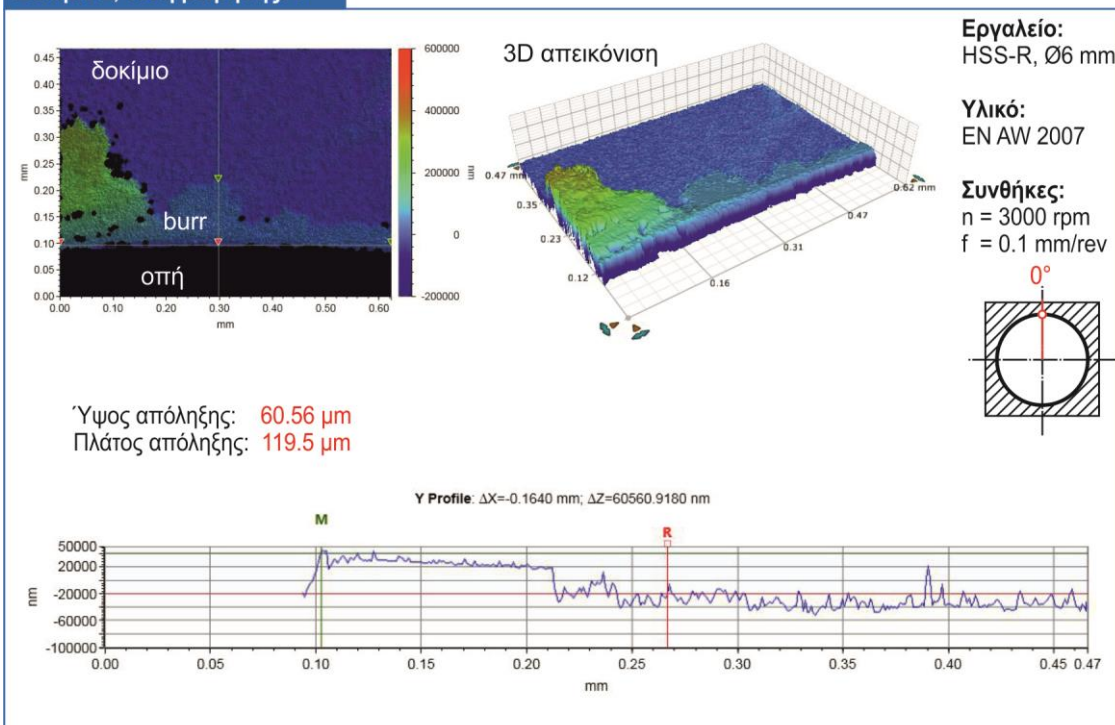


**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 345°**

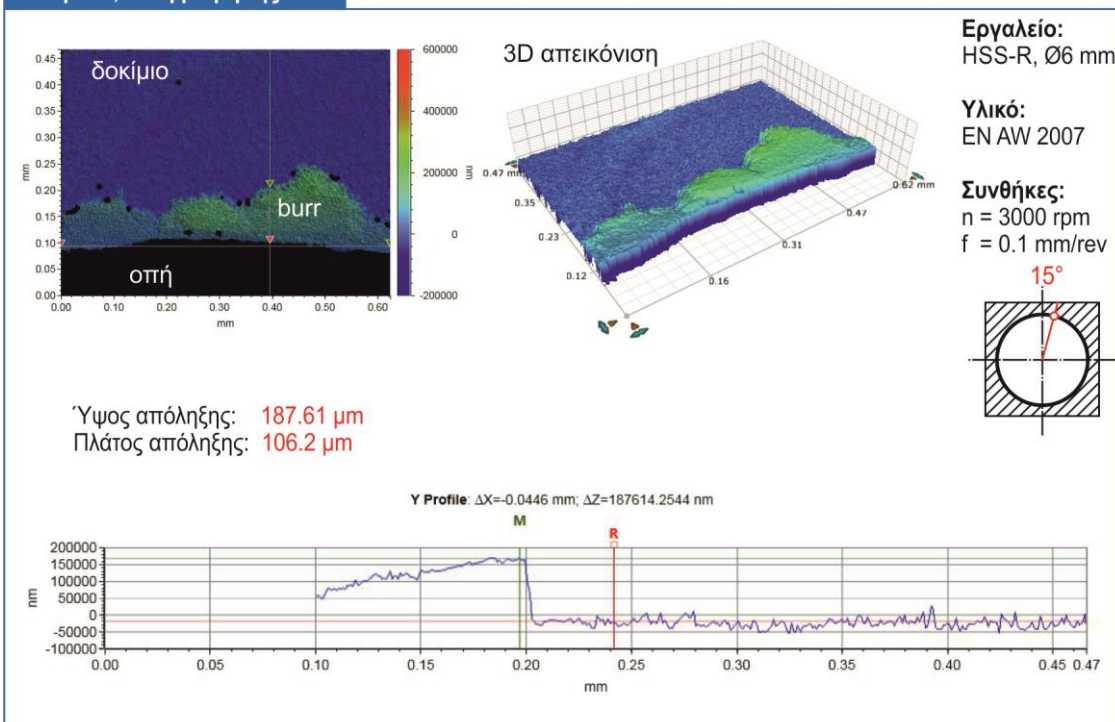




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 0°**



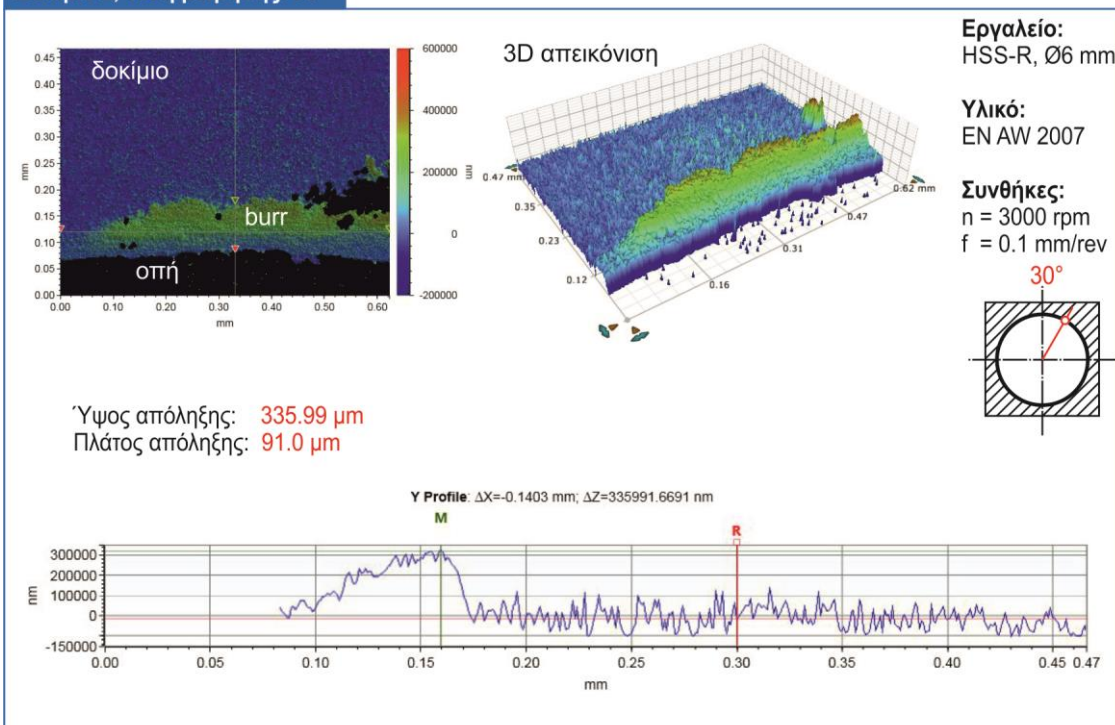
**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 15°**



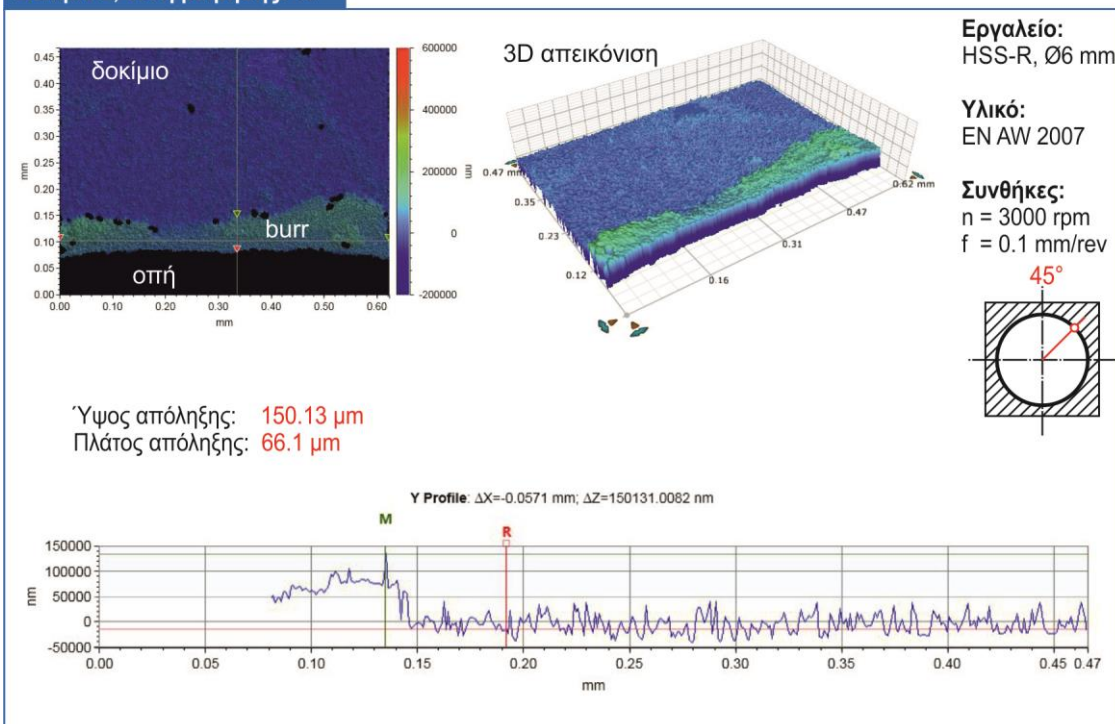




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 30°**

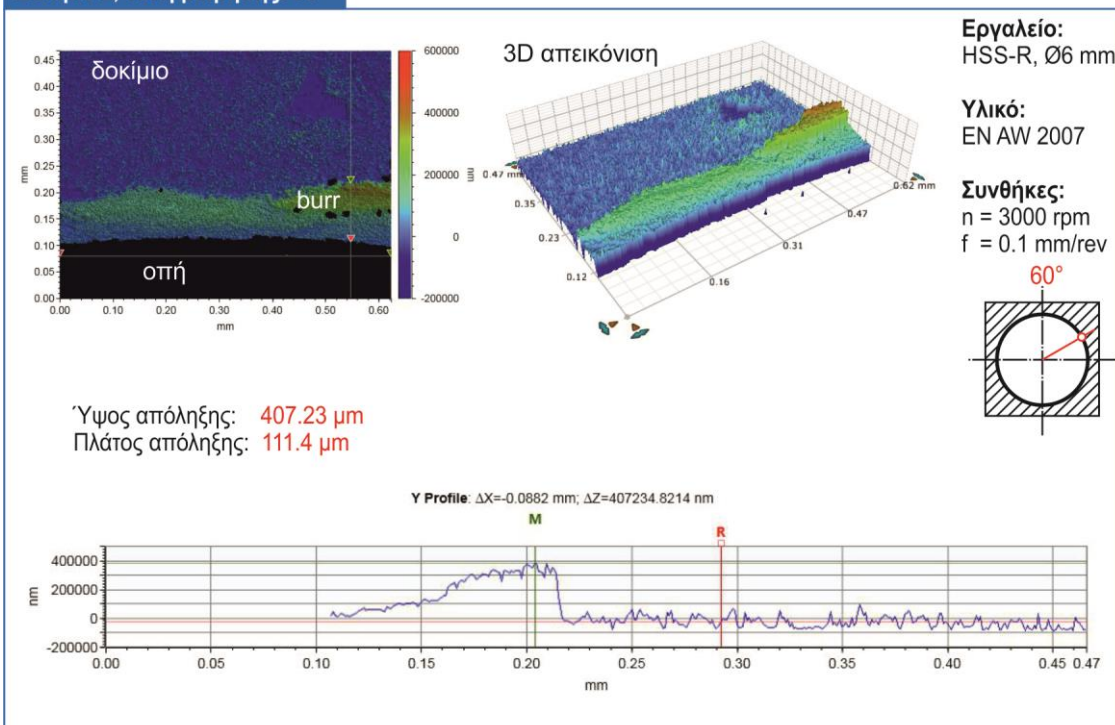


**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 45°**

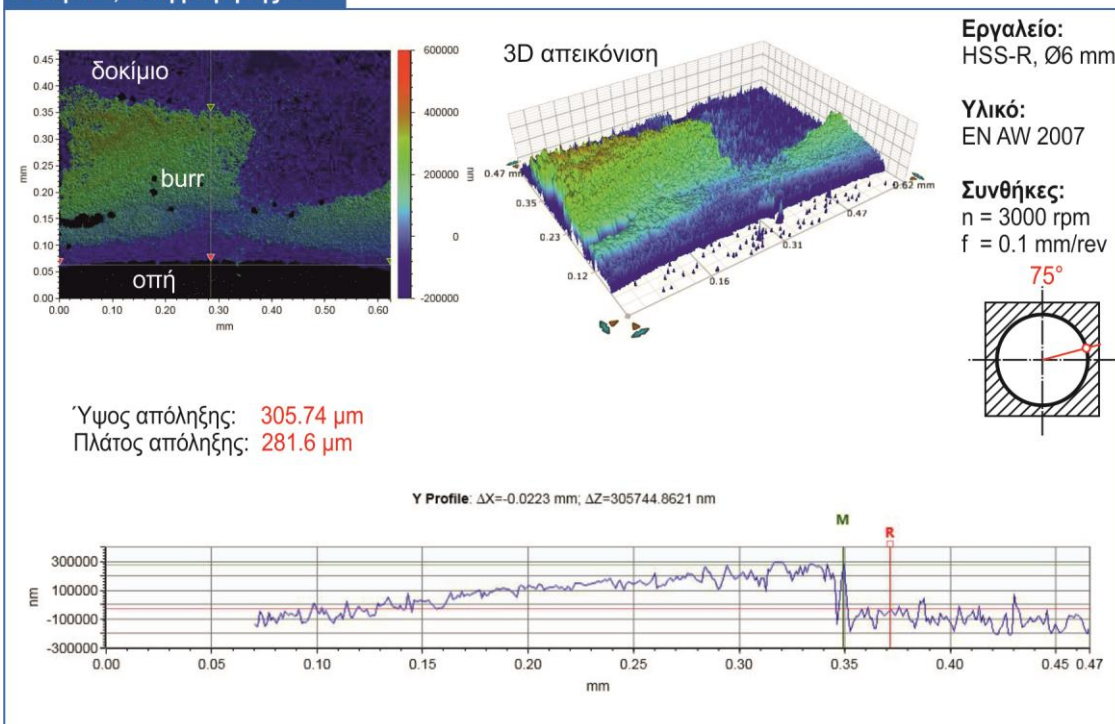




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 60°**



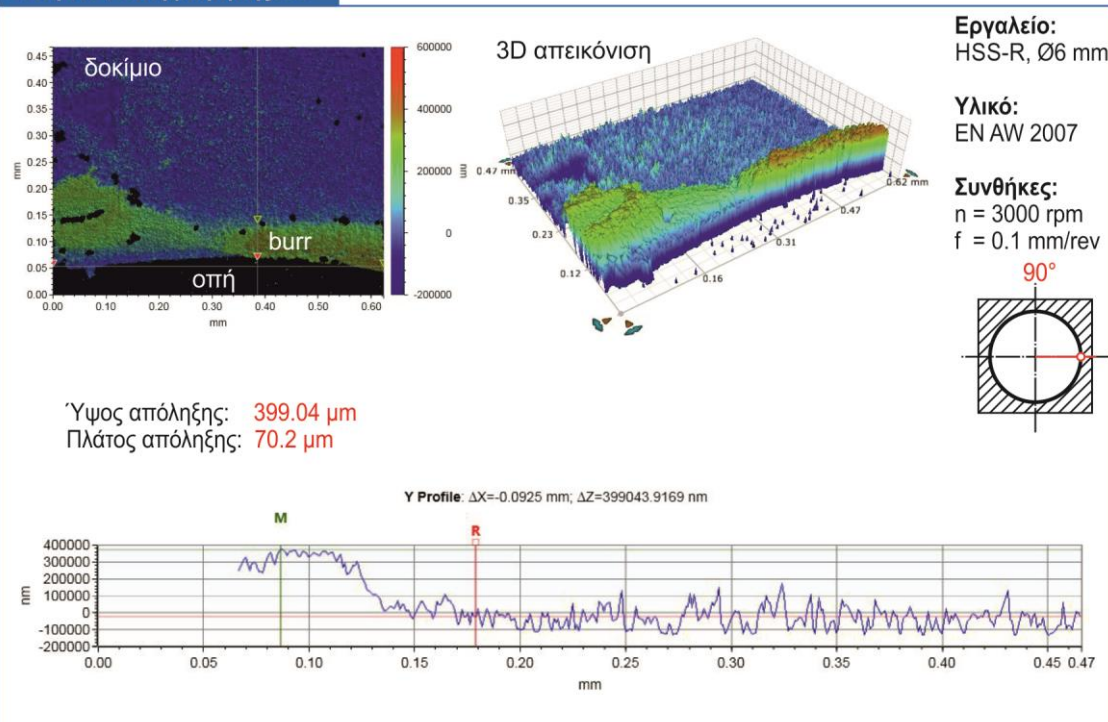
**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 75°**



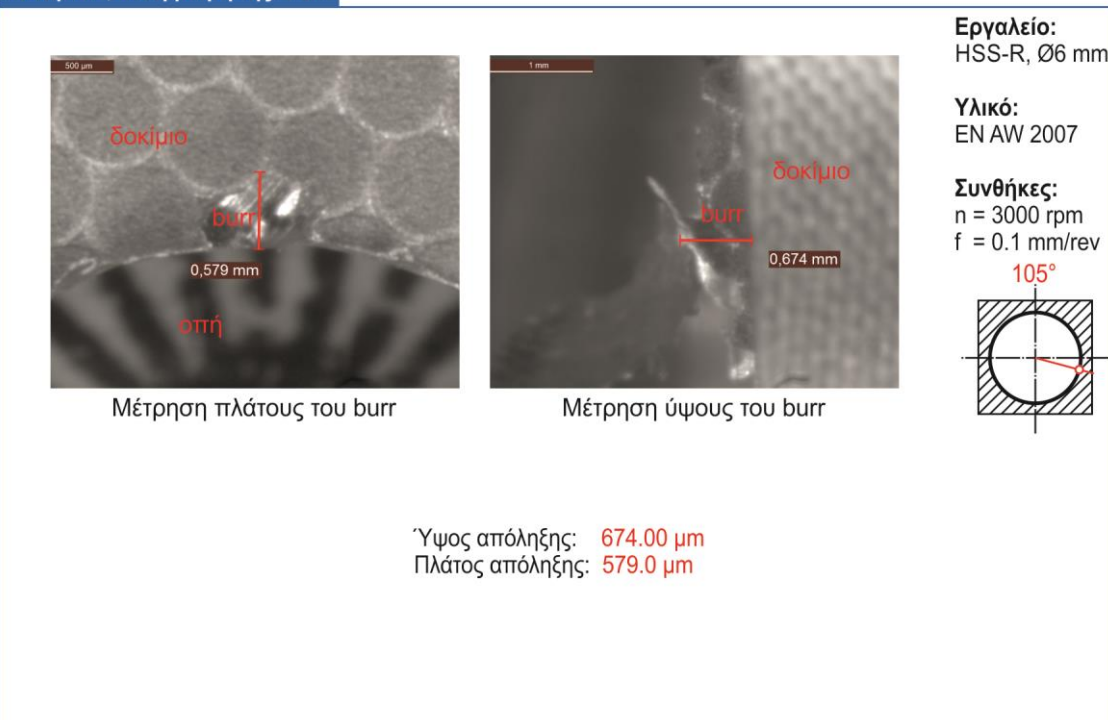




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 90°**

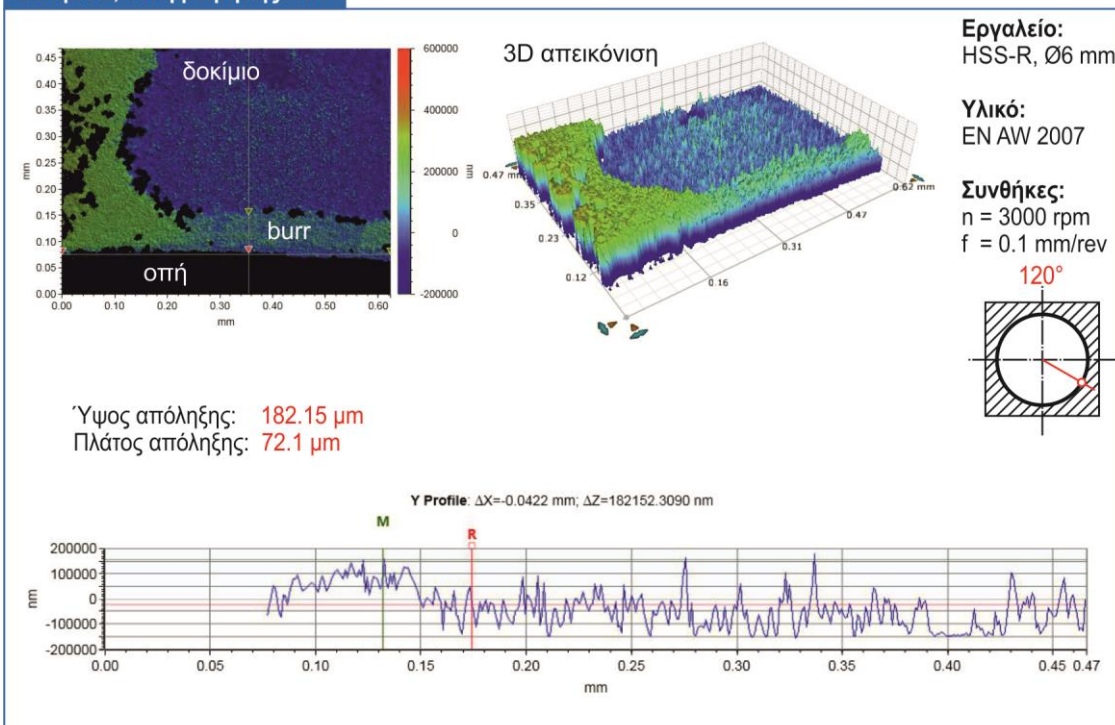


**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 105°**

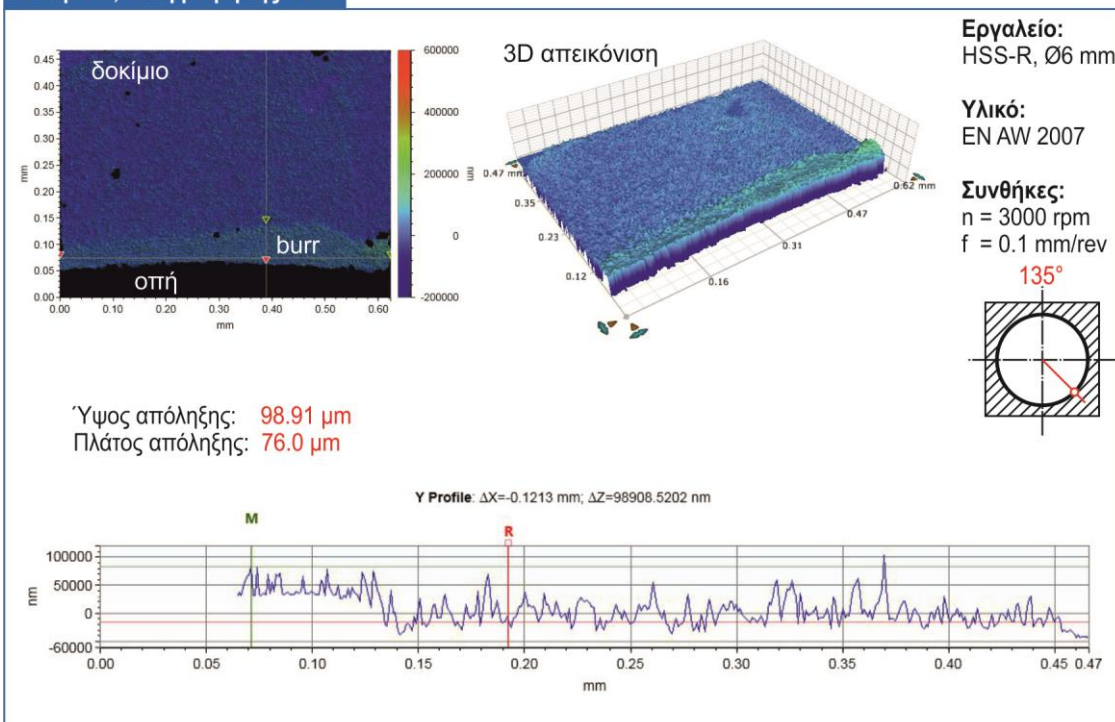




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 120°**

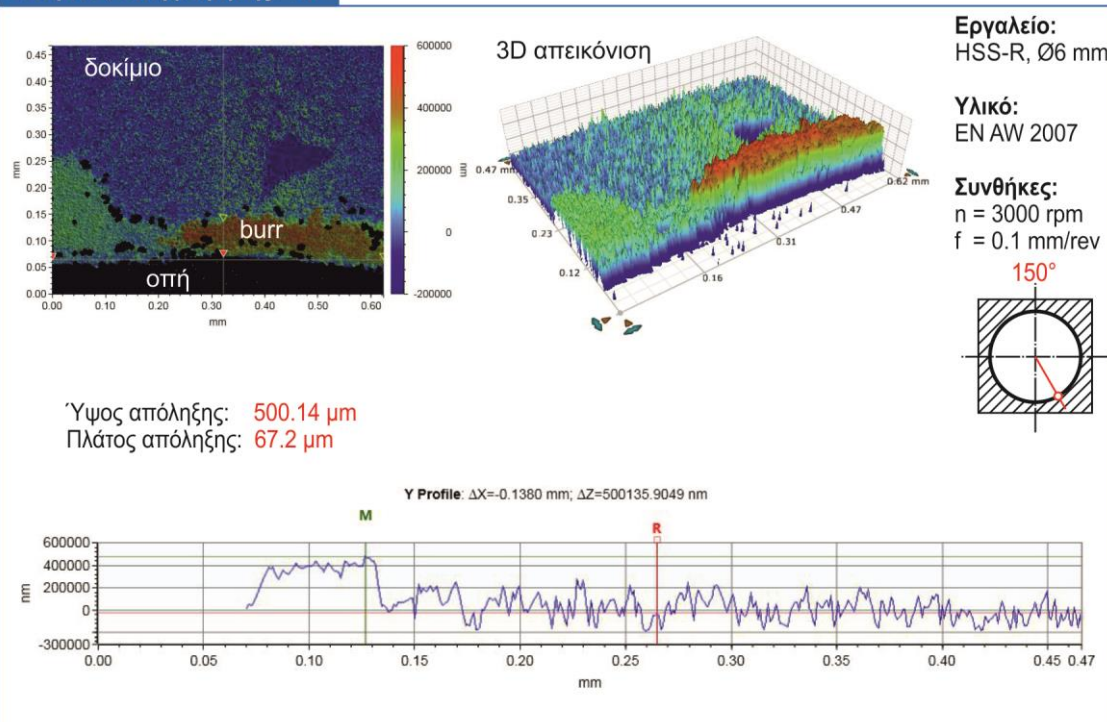


**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 135°**

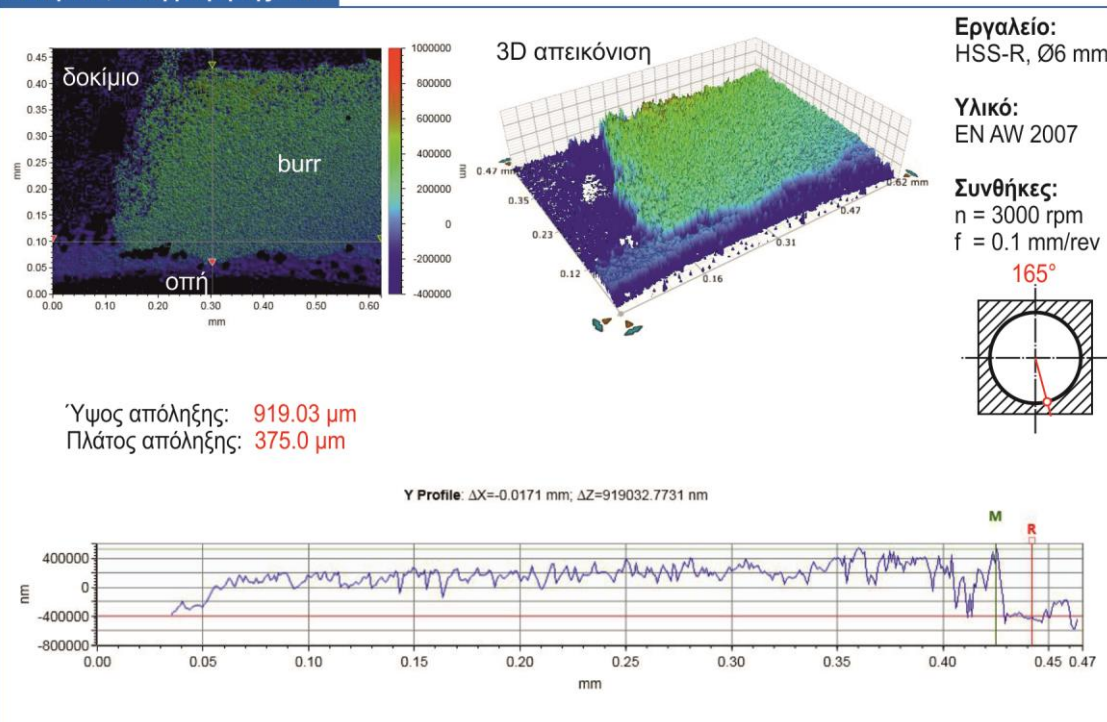




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 150°**



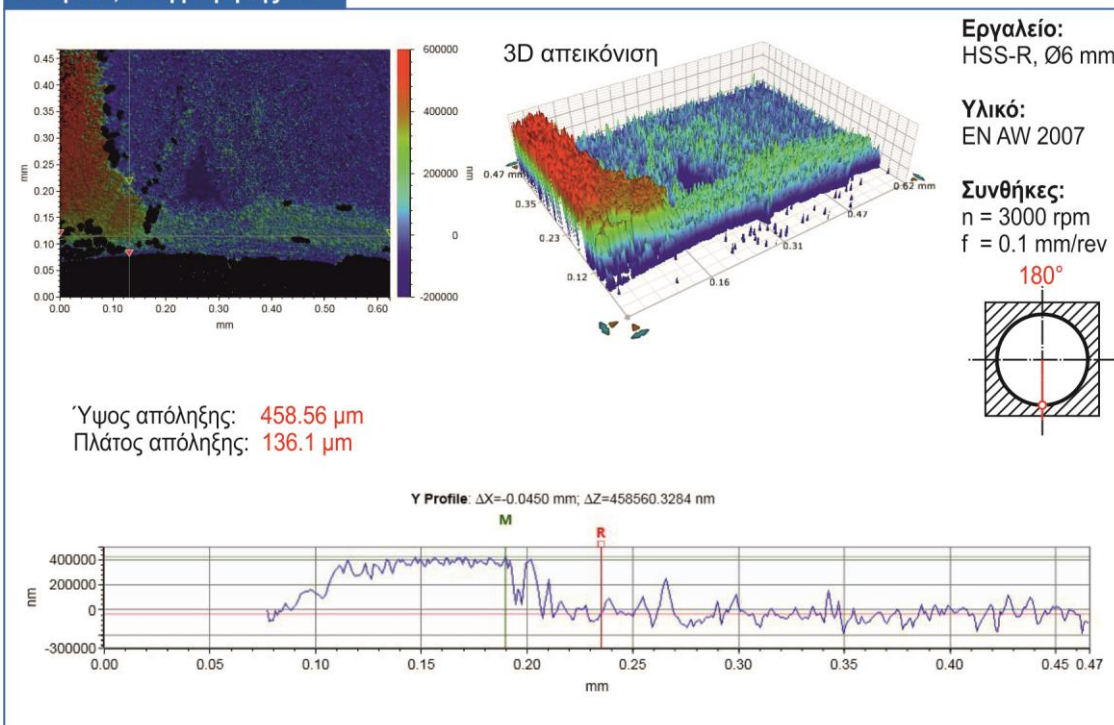
**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 165°**



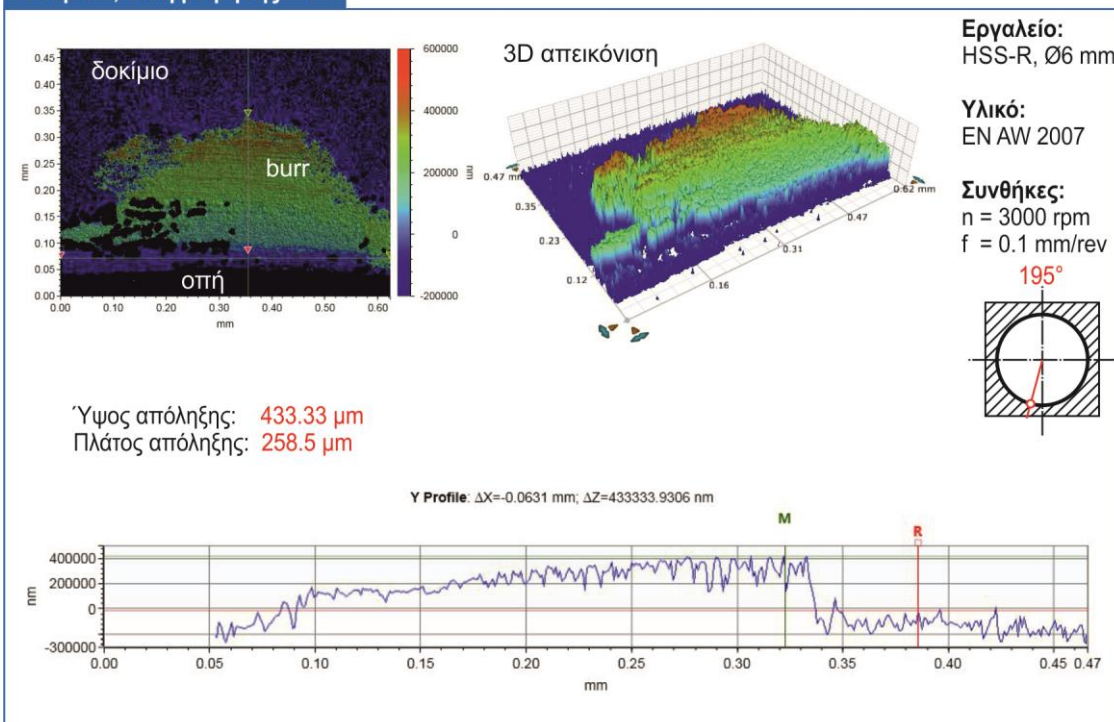




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 180°**

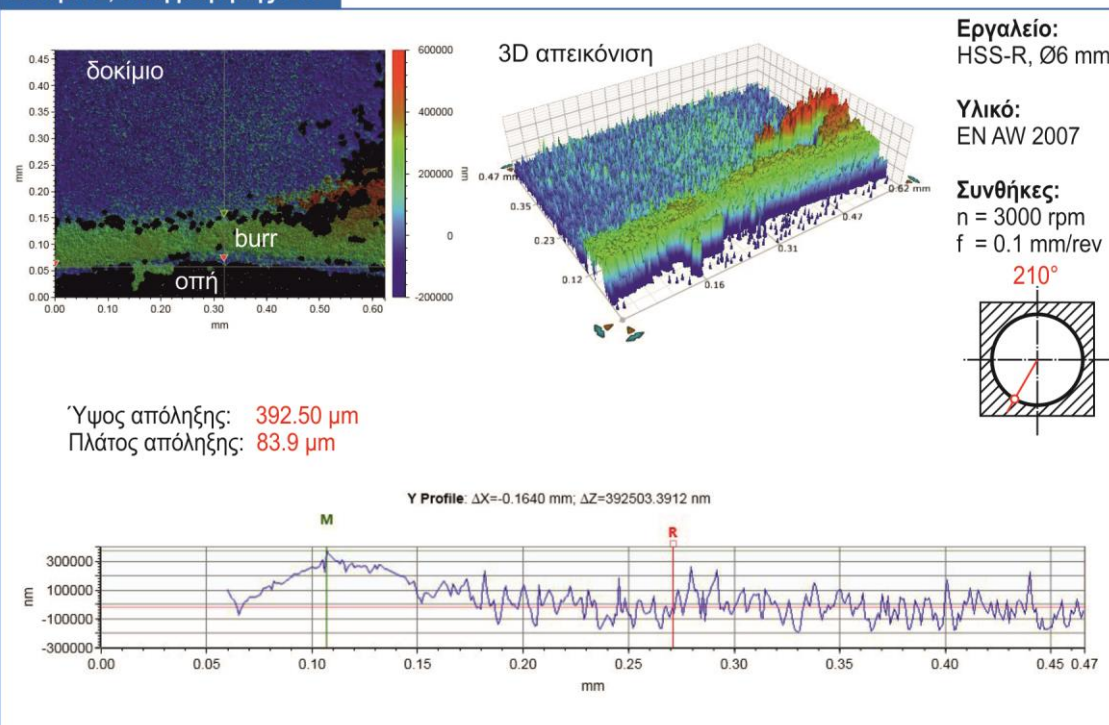


**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 195°**

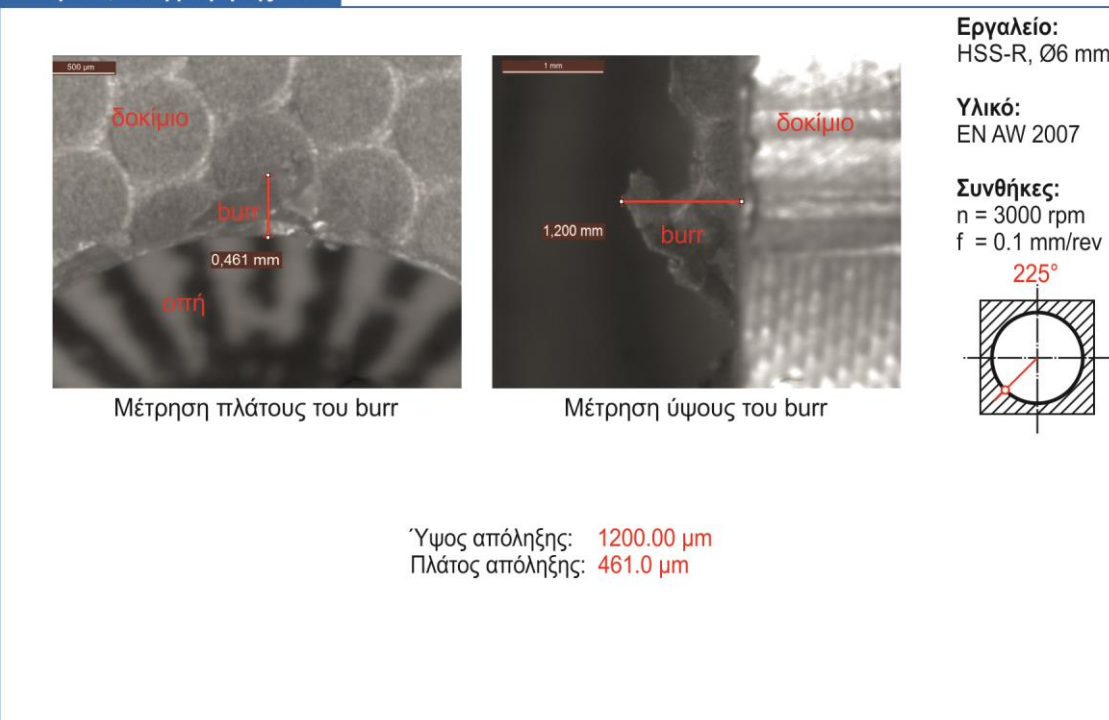




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 210°**



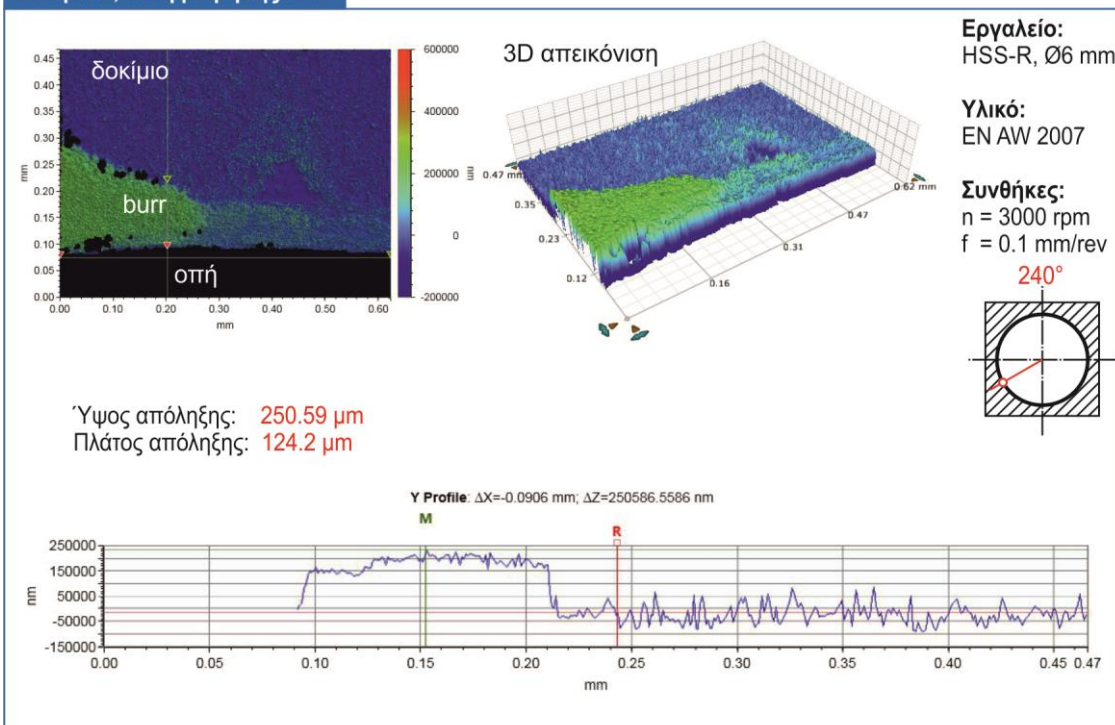
**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 225°**



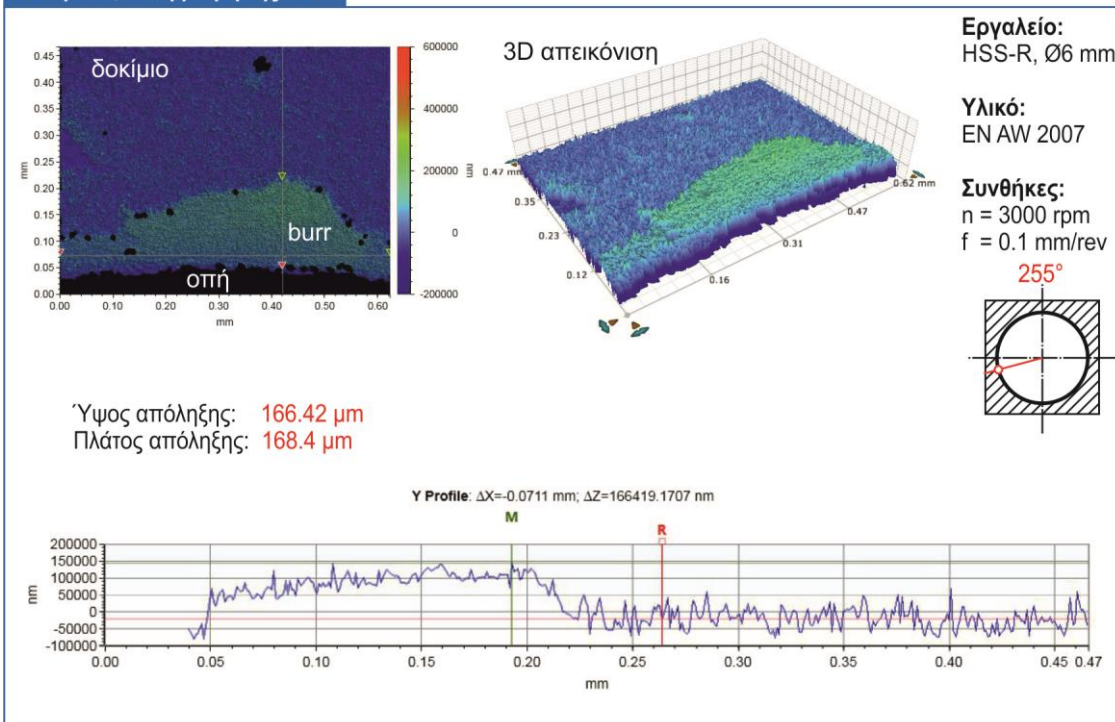




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 240°**

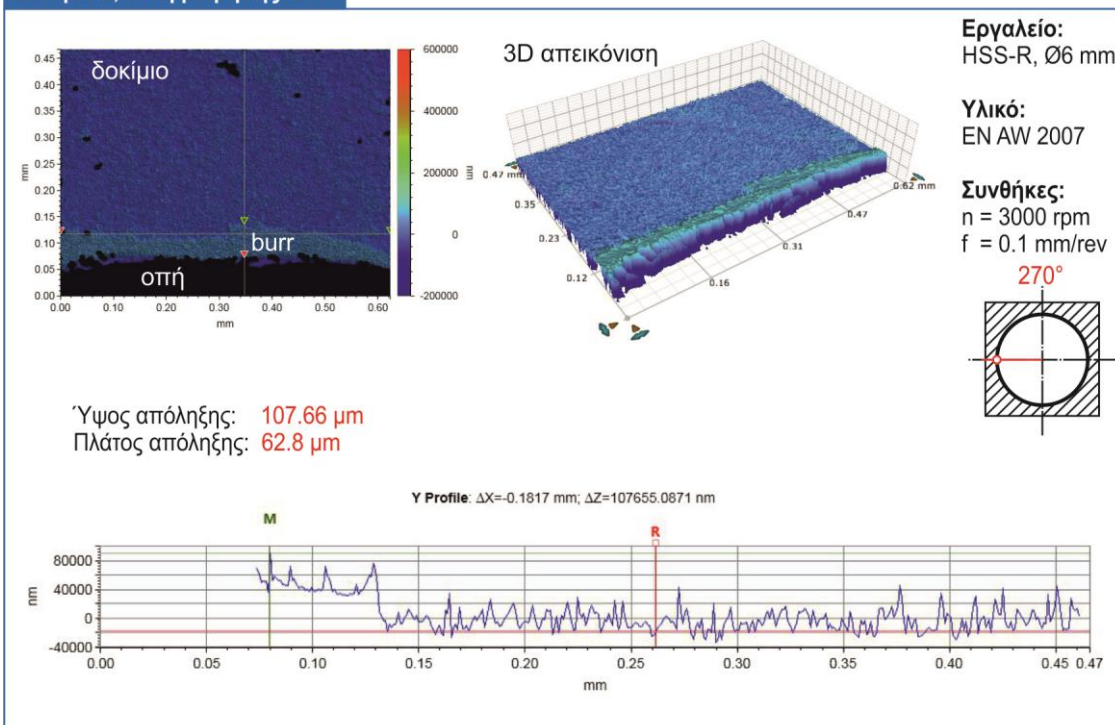


**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 255°**

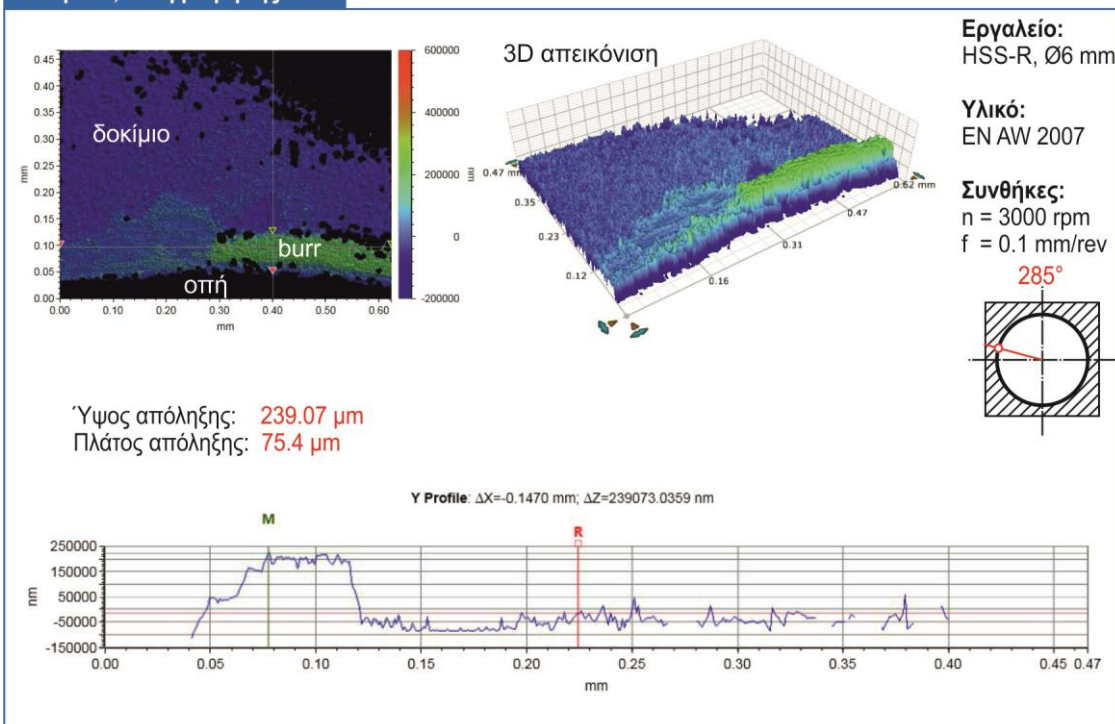




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 270°**

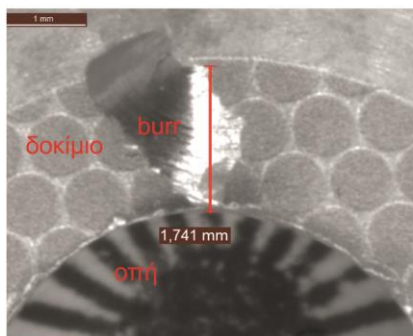


**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 285°**





**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 300°**



Μέτρηση πλάτους του burr

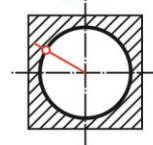


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

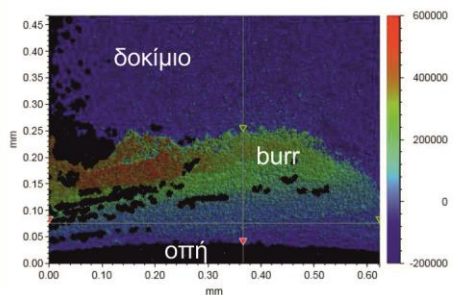
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 3000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$   
**300°**

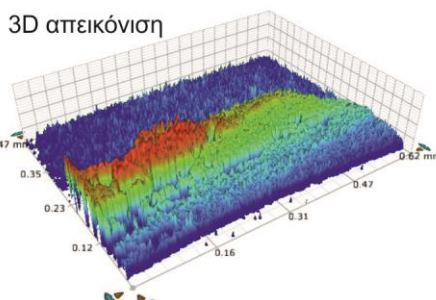


Ύψος απόληξης: **960.00  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **1741.0  $\mu\text{m}$**

**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 315°**



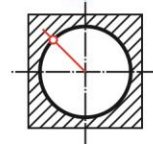
3D απεικόνιση



**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

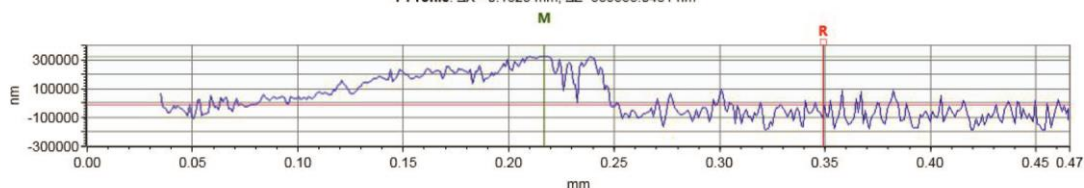
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 3000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$   
**315°**



Ύψος απόληξης: **339.55  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **213.4  $\mu\text{m}$**

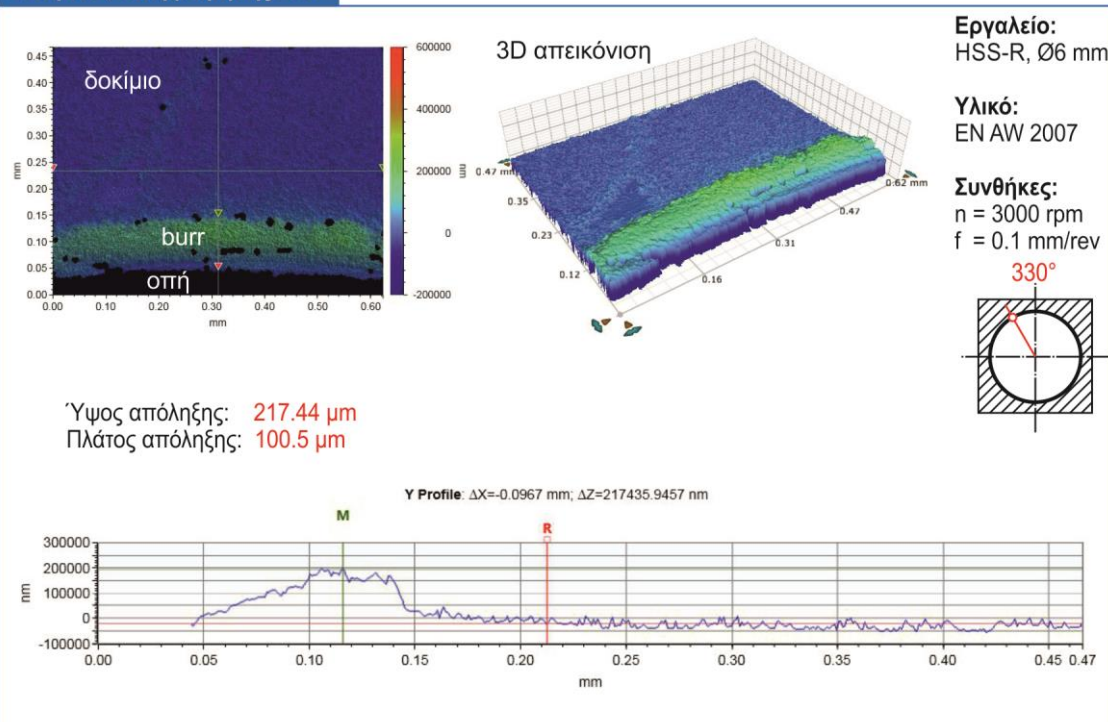
Y Profile:  $\Delta X = -0.1323 \text{ mm}$ ;  $\Delta Z = 339553.0461 \text{ nm}$



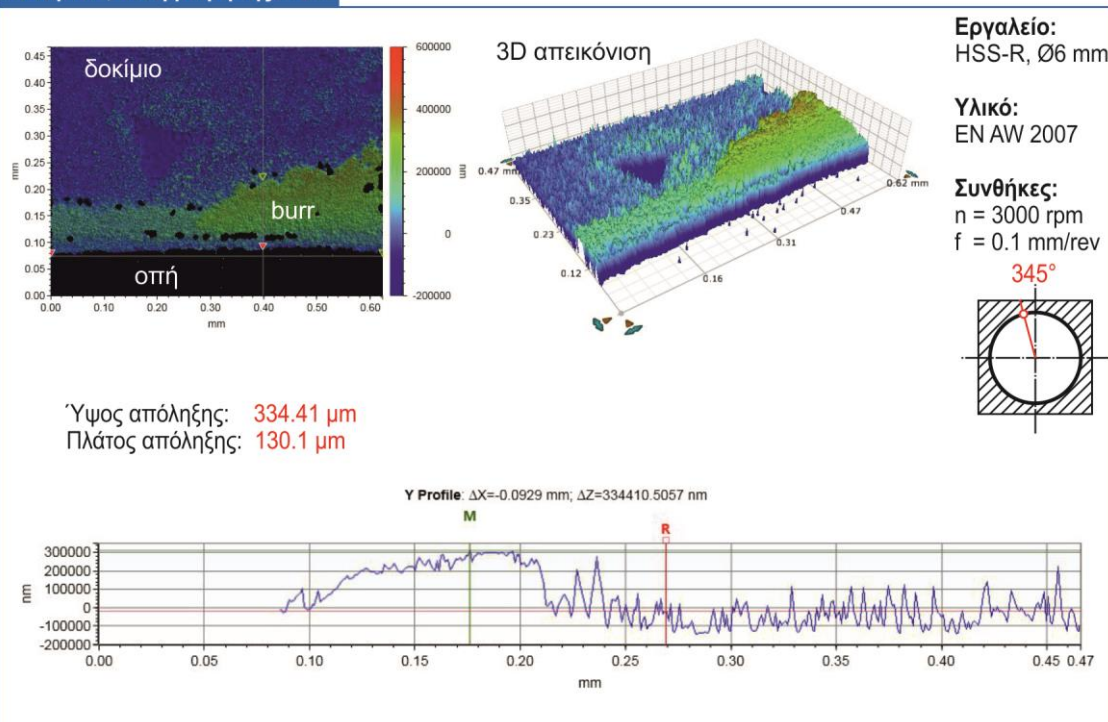




**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 330°**

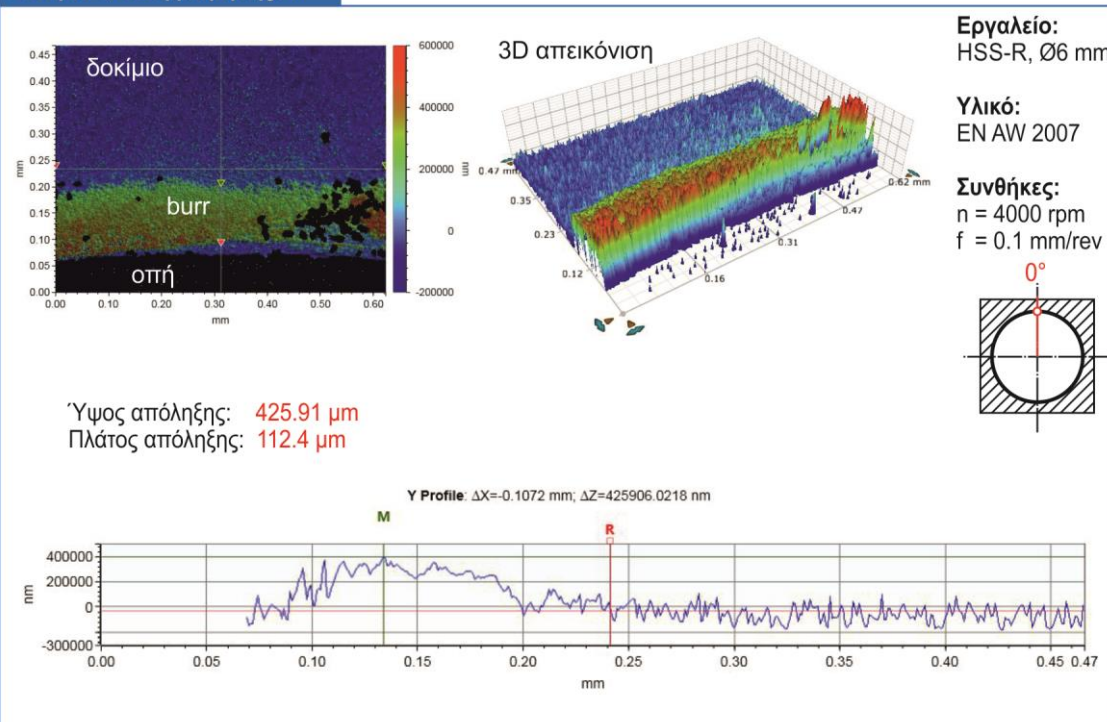


**Δοκίμιο 2, θέση μέτρησης: 345°**

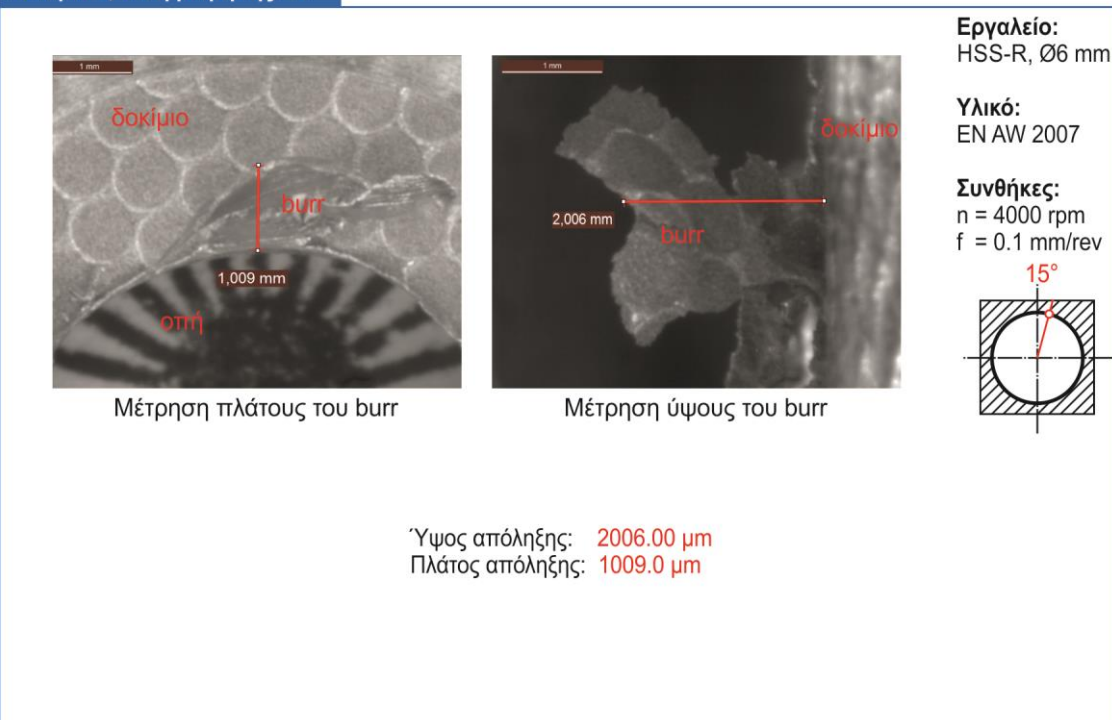




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 0°**



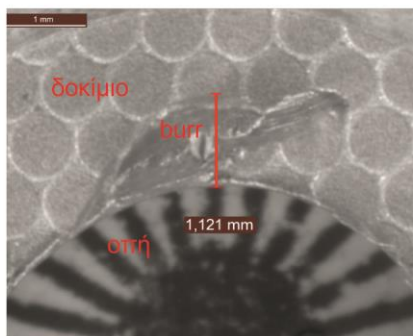
**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 15°**



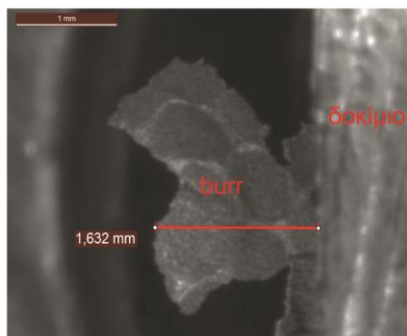




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 30°**



Μέτρηση πλάτους του burr

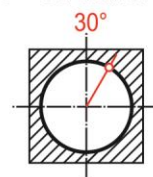


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

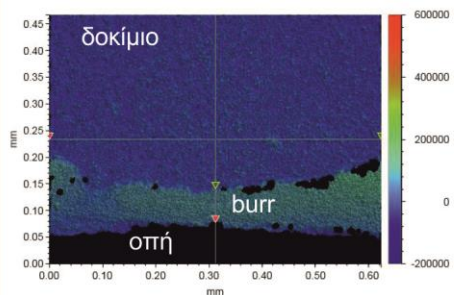
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$

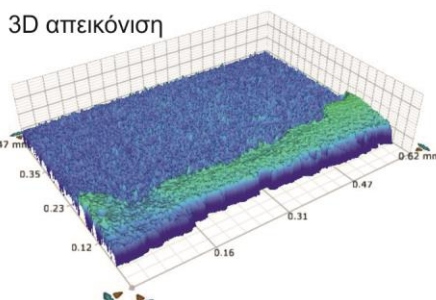


Ύψος απόληξης: 1632.00  $\mu\text{m}$   
Πλάτος απόληξης: 1121.0  $\mu\text{m}$

**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 45°**



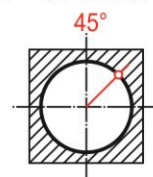
3D απεικόνιση



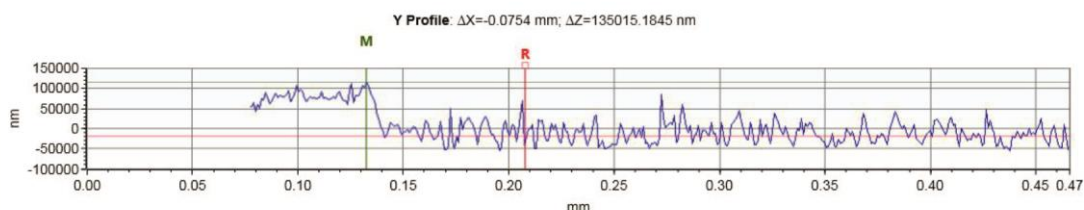
**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$

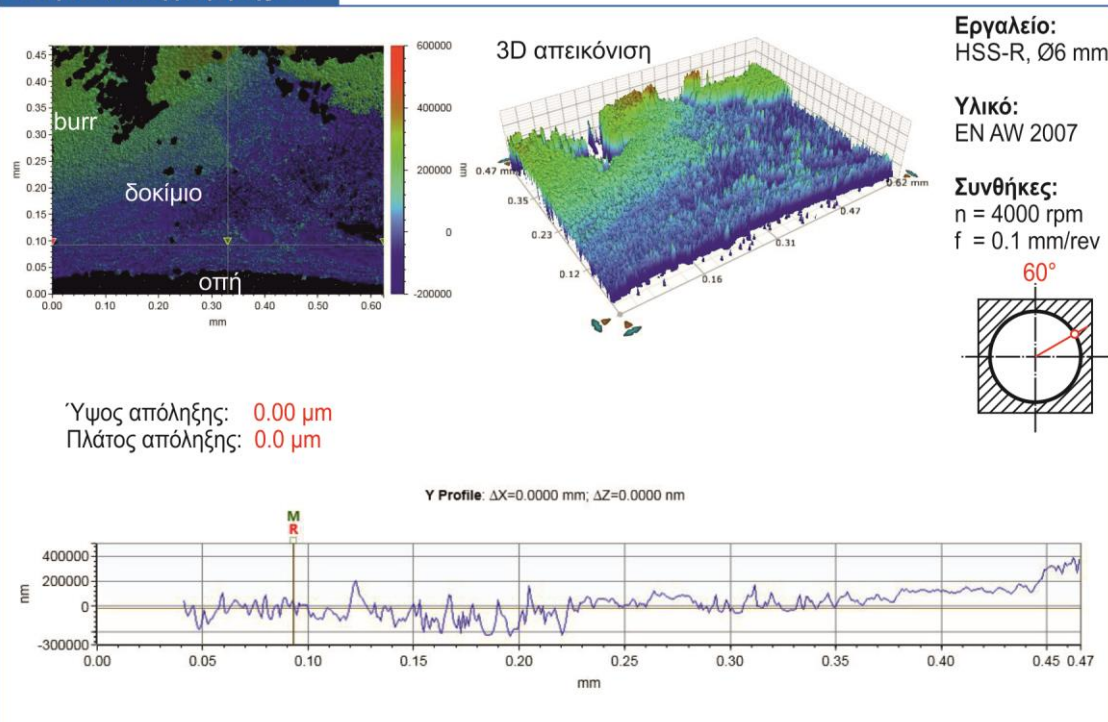


Ύψος απόληξης: 135.02  $\mu\text{m}$   
Πλάτος απόληξης: 64.0  $\mu\text{m}$

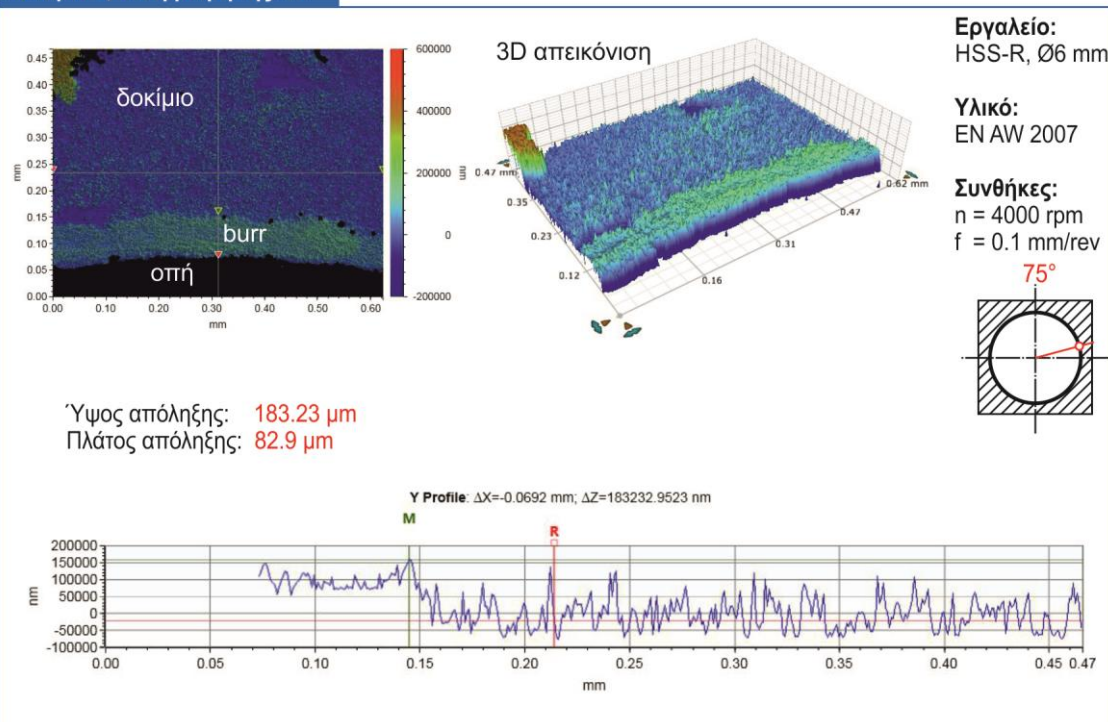




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 60°**

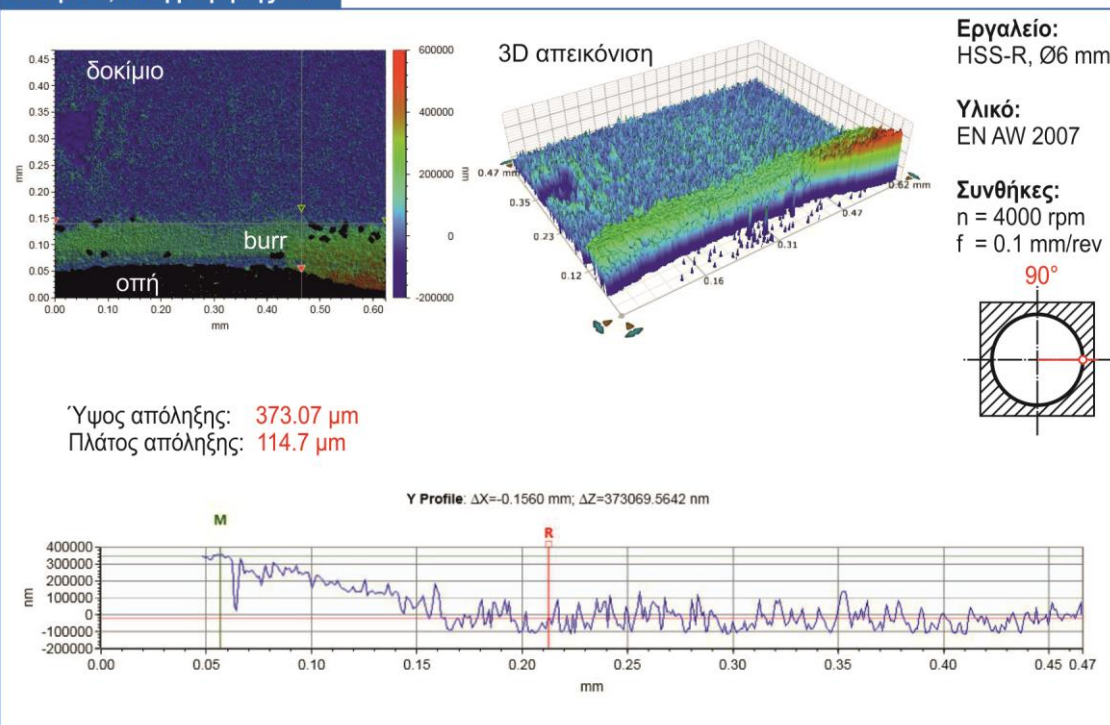


**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 75°**

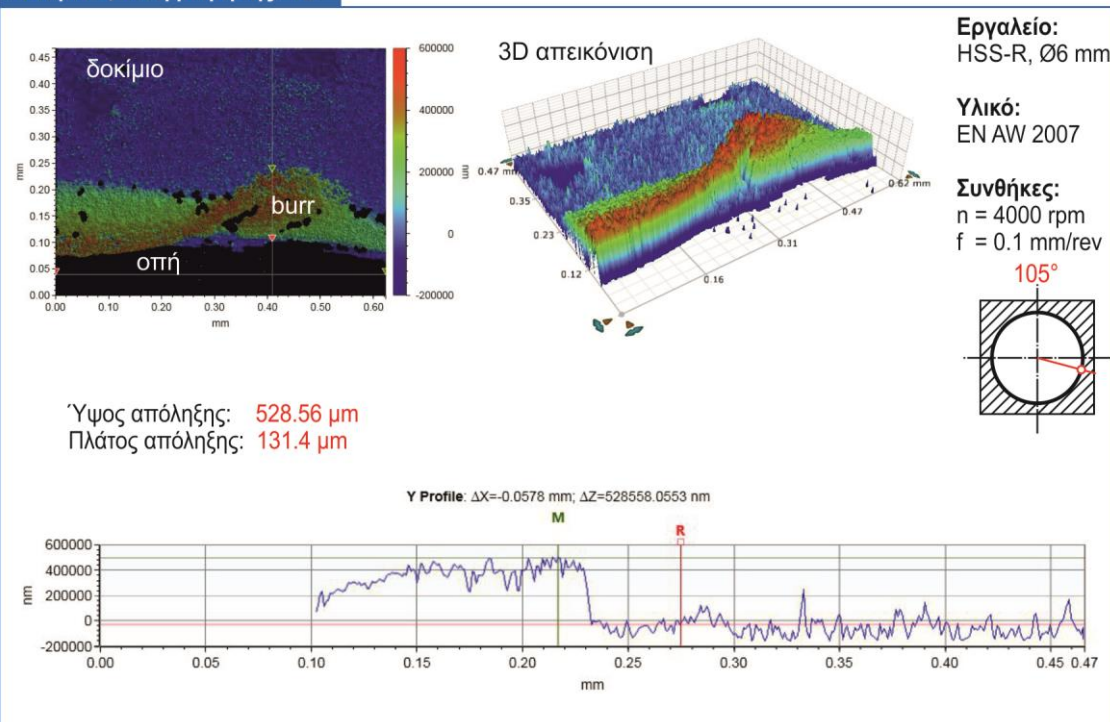




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 90°**



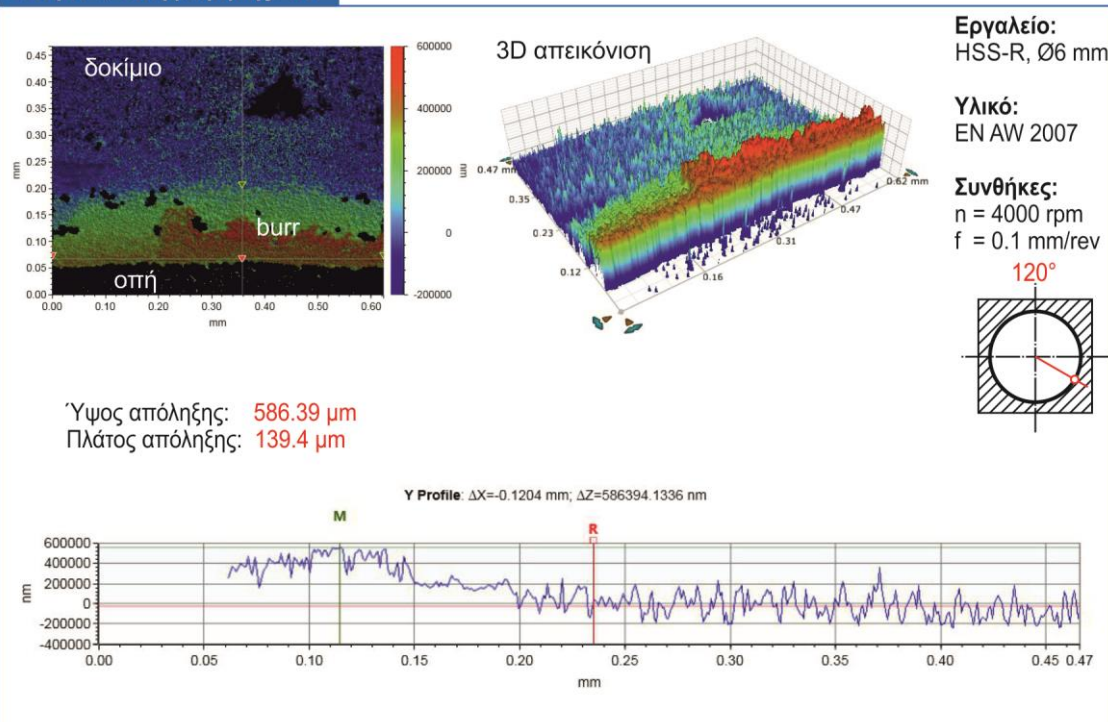
**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 105°**



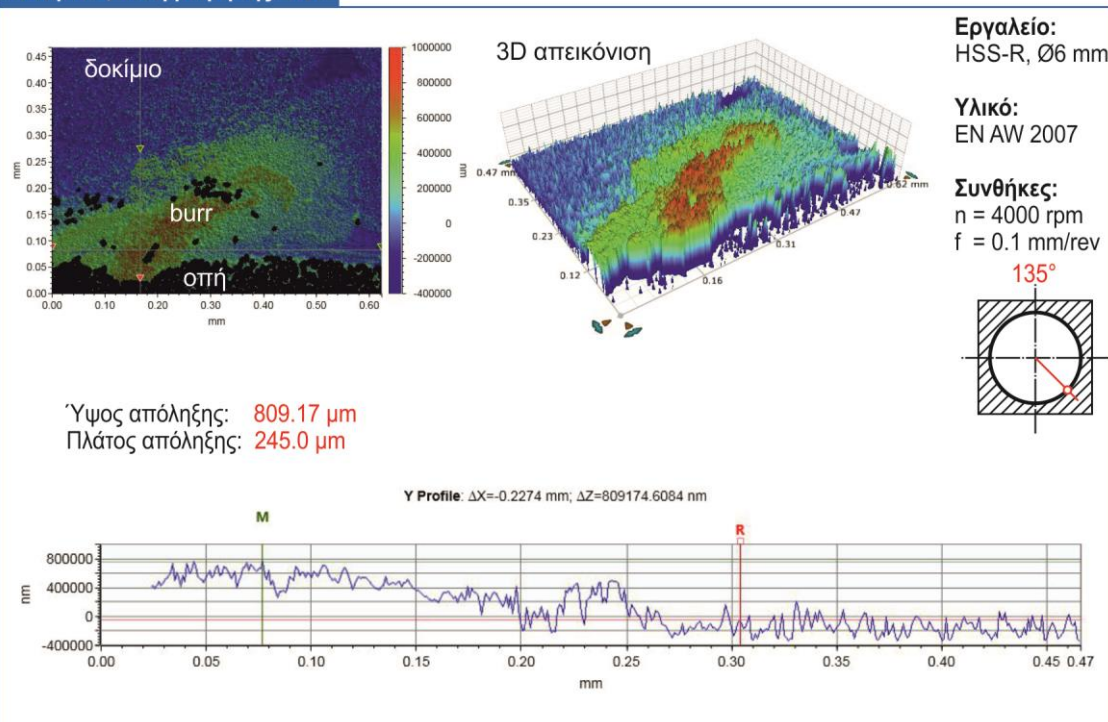




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 120°**

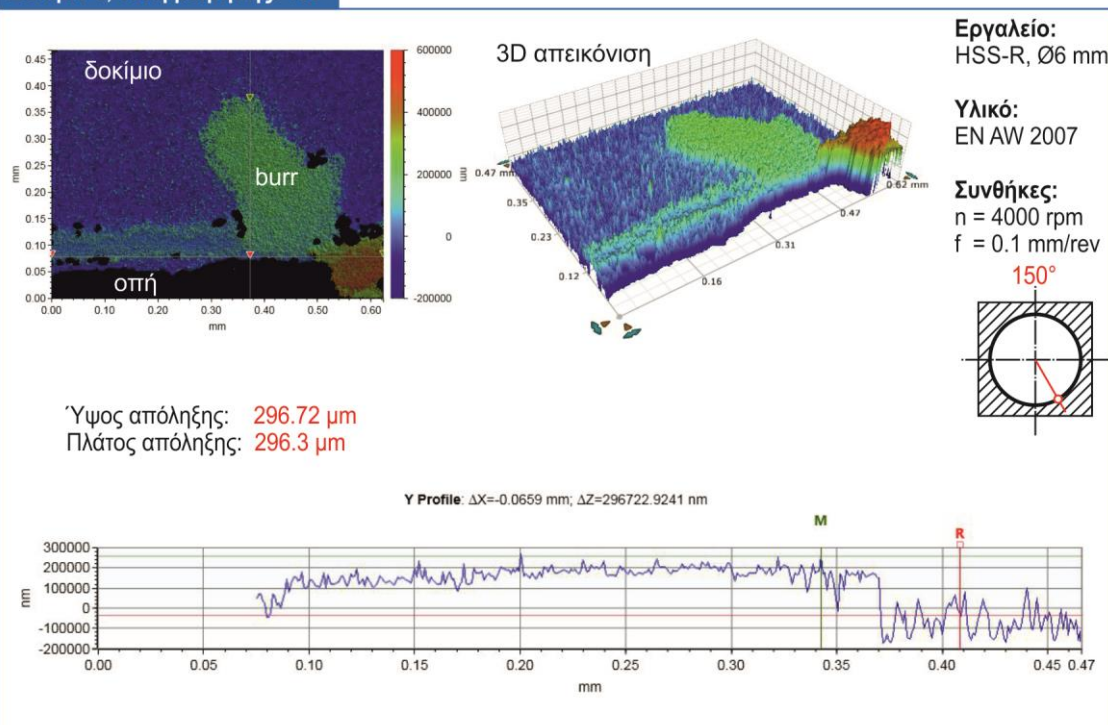


**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 135°**

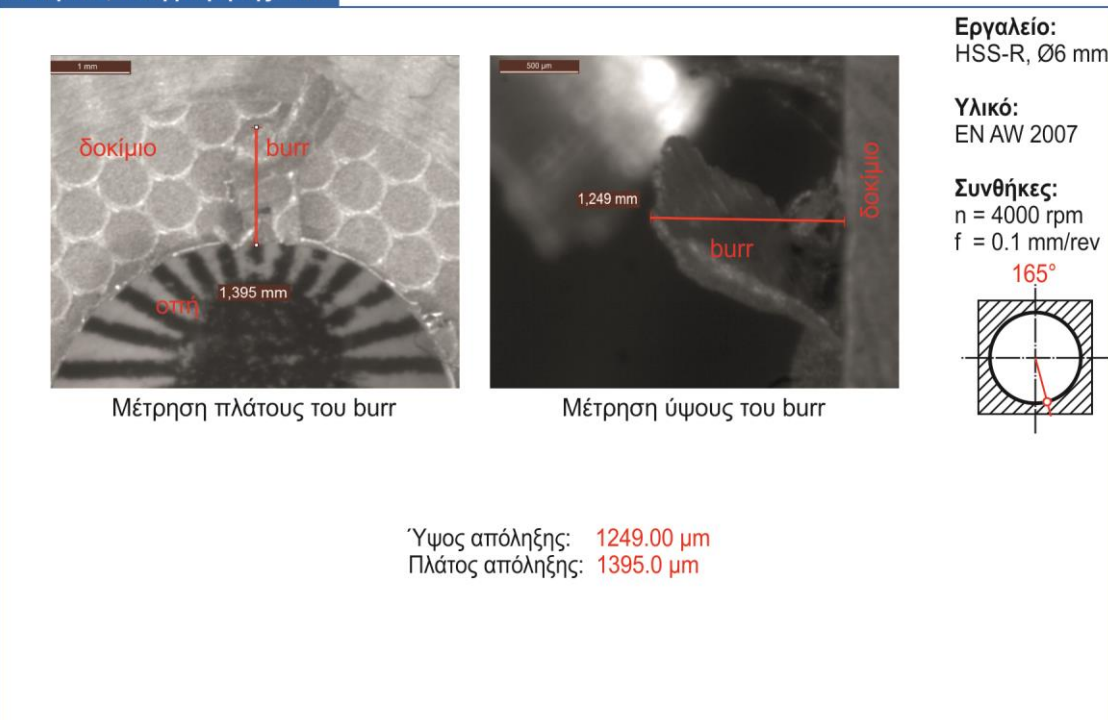




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 150°**



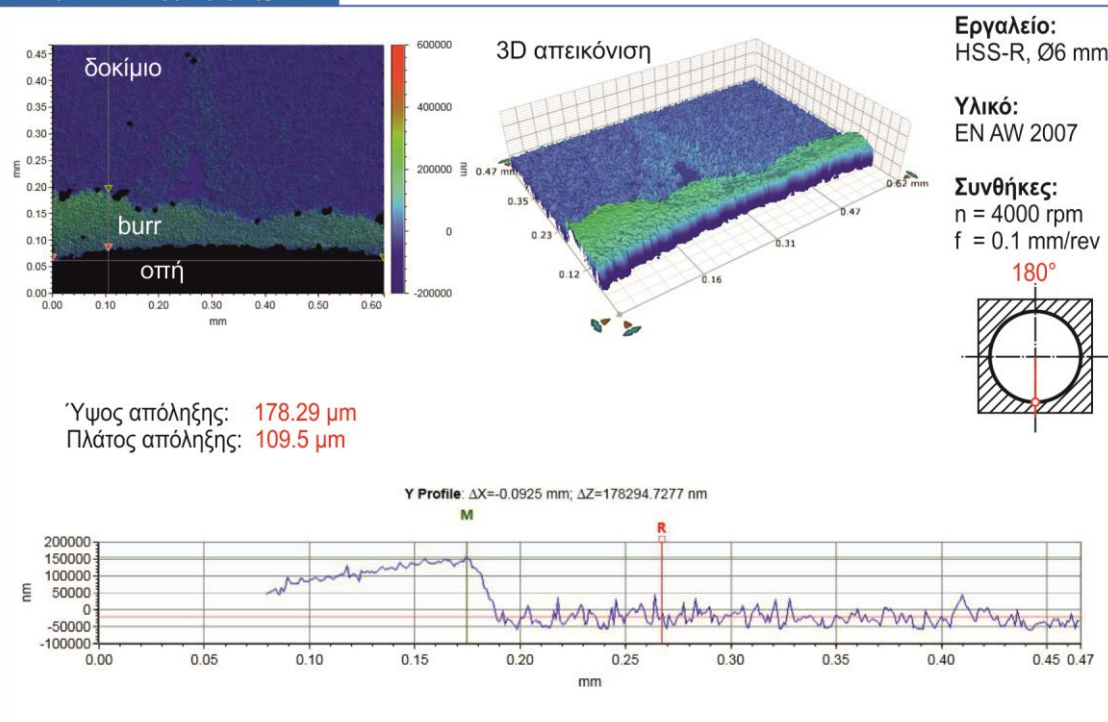
**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 165°**



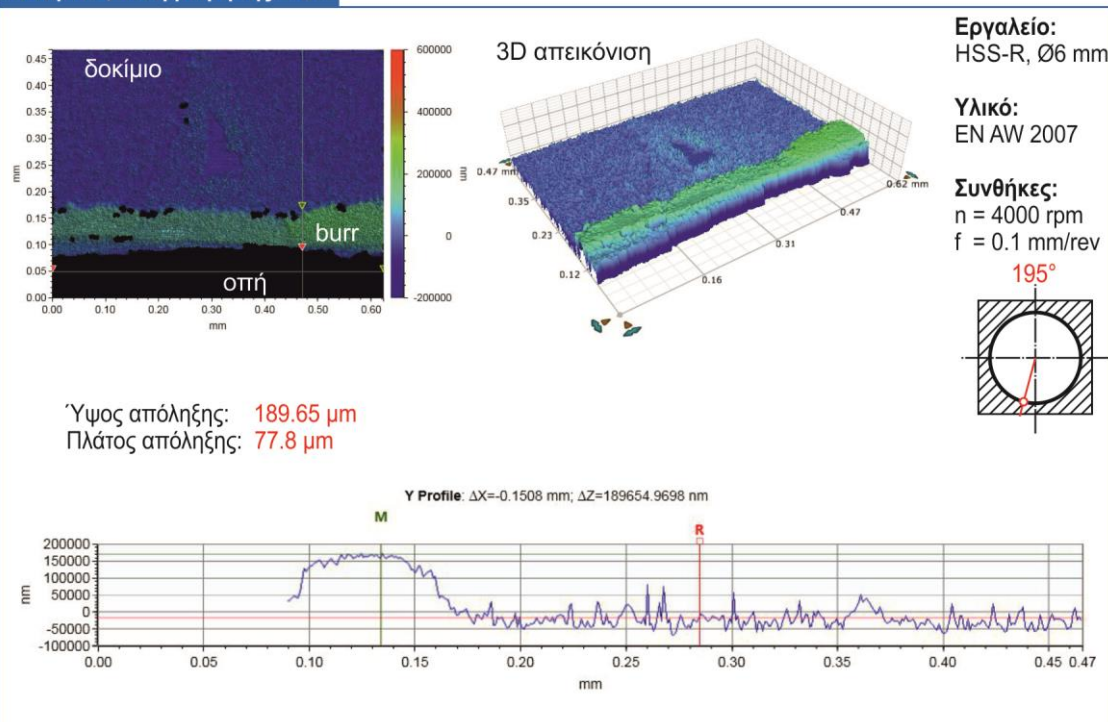




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 180°**

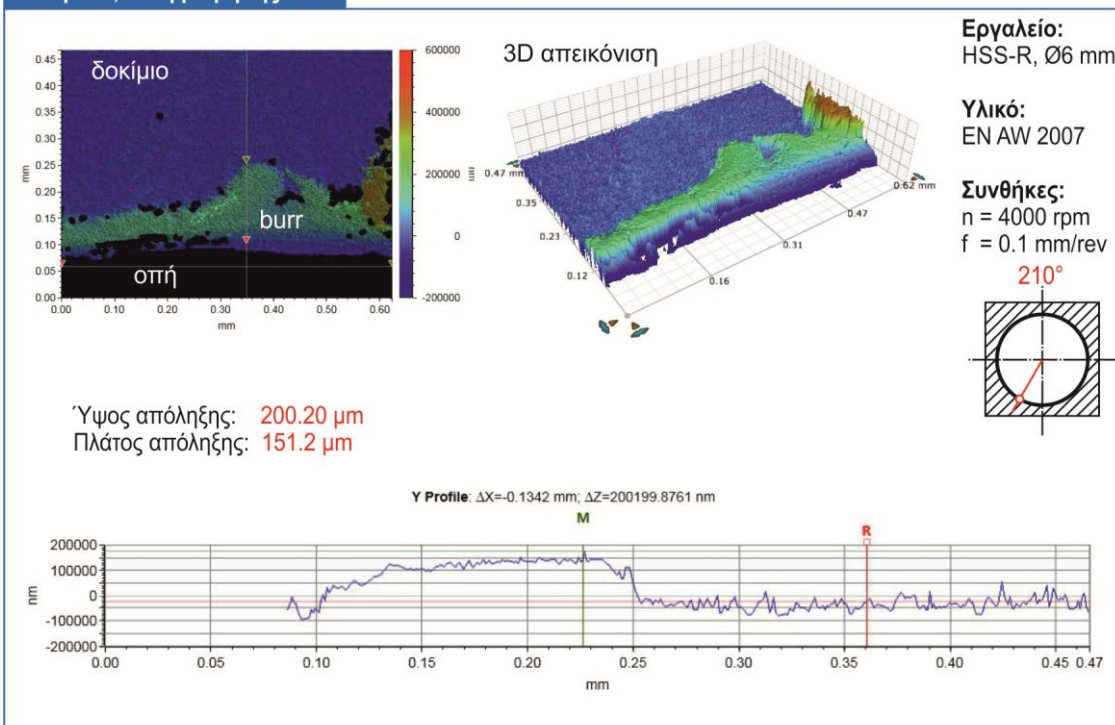


**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 195°**

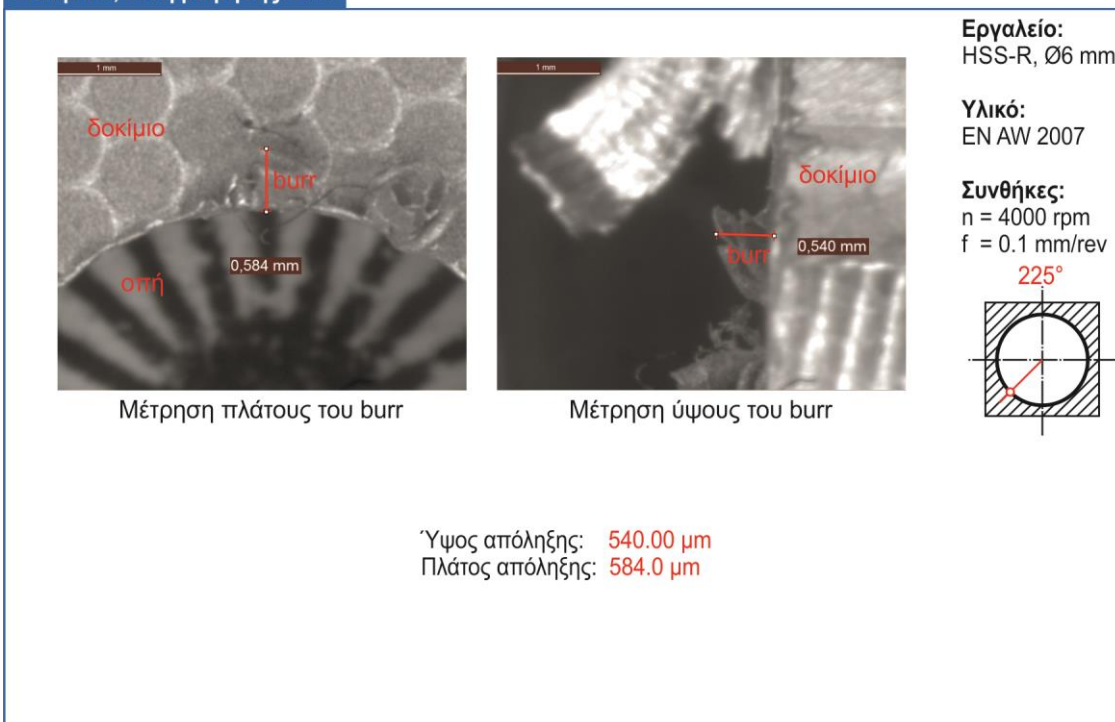




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 210°**

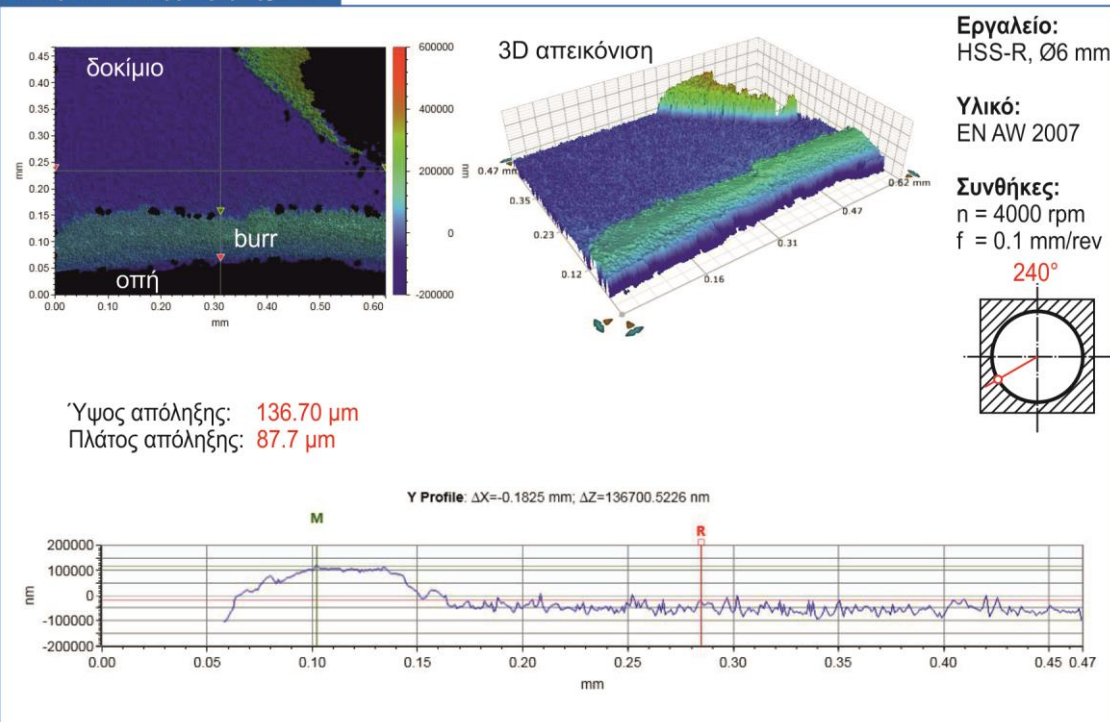


**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 225°**

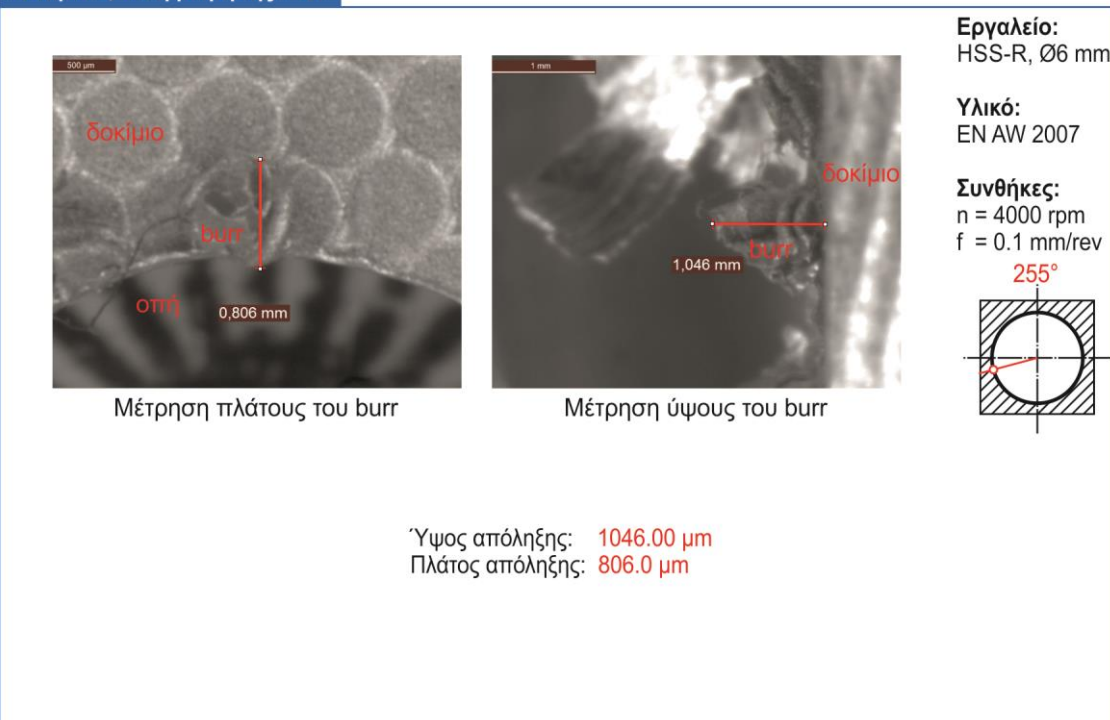




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 240°**



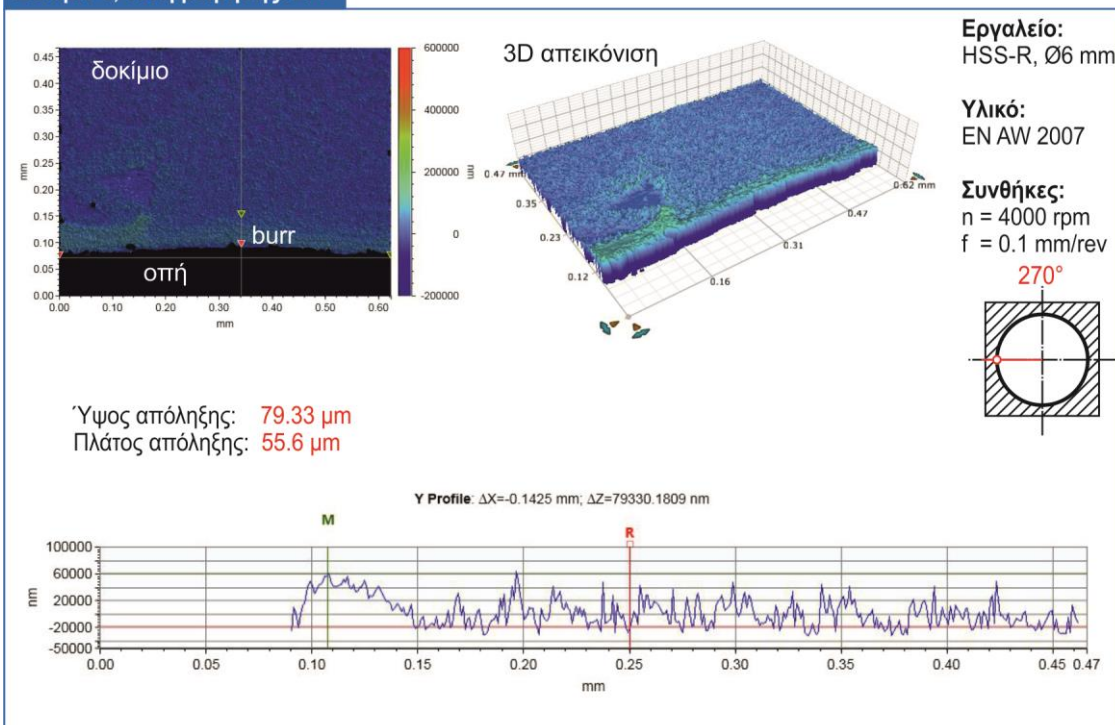
**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 255°**



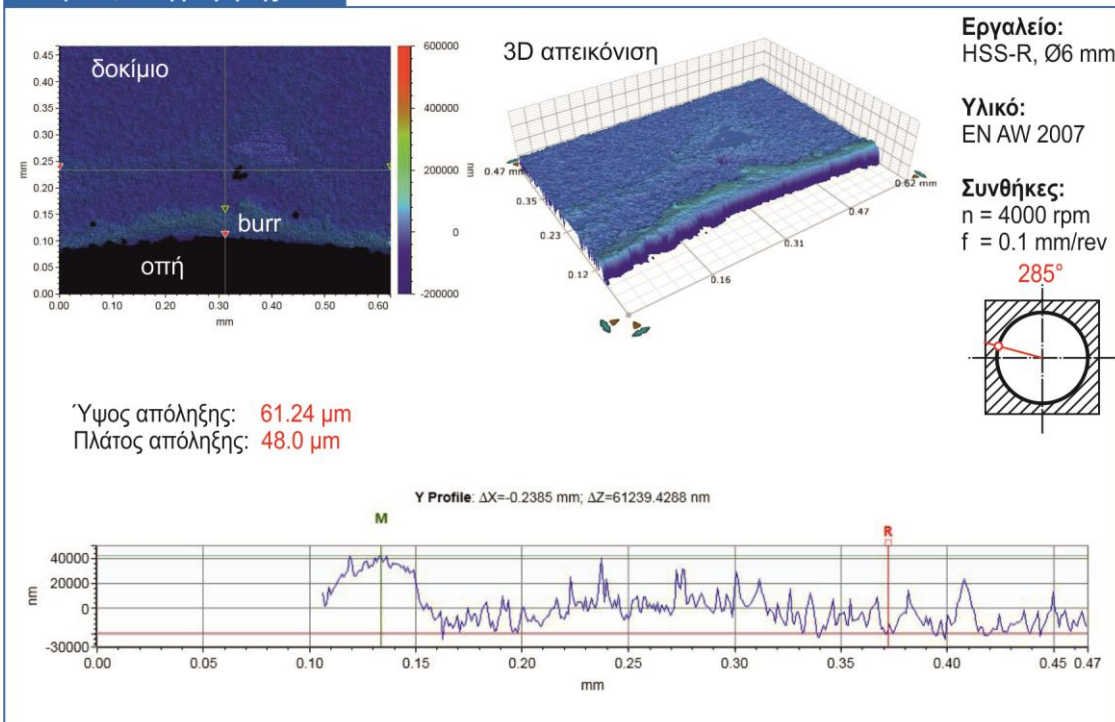




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 270°**



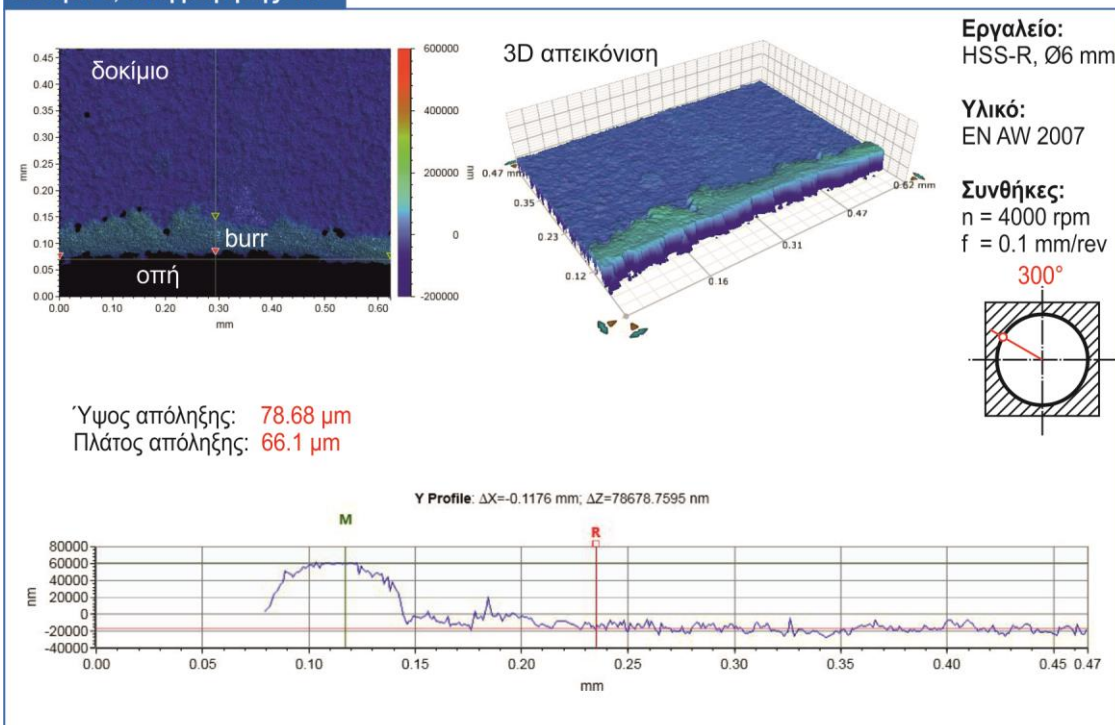
**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 285°**



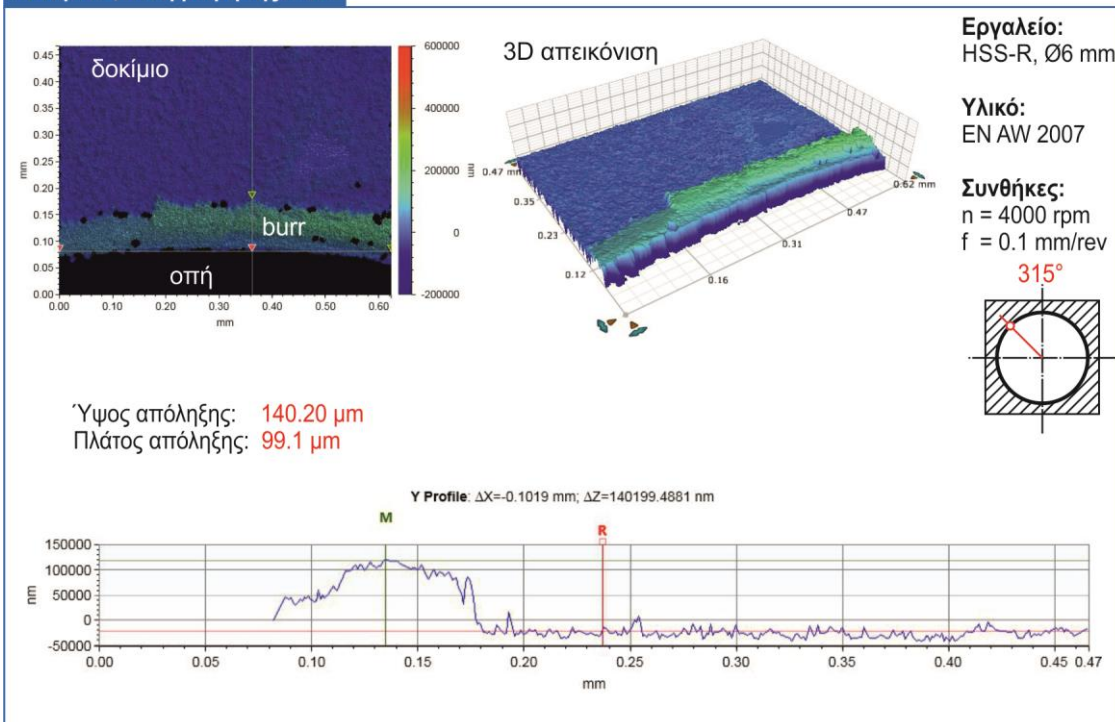




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 300°**

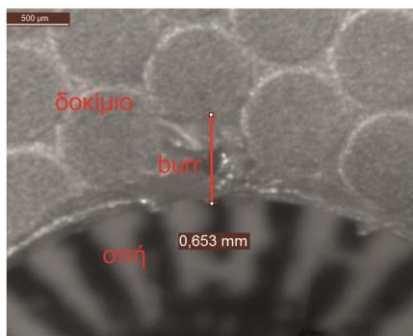


**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 315°**

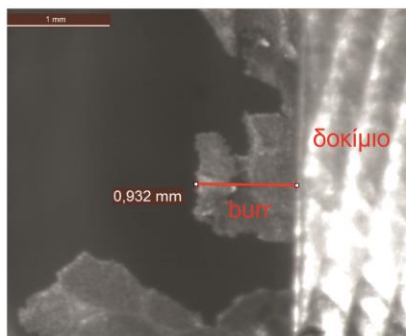




**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 330°**



Μέτρηση πλάτους του burr

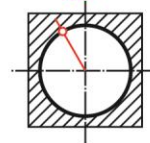


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

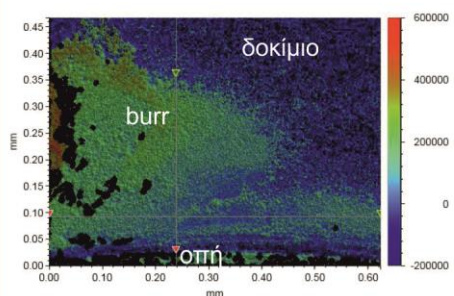
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$   
**330°**

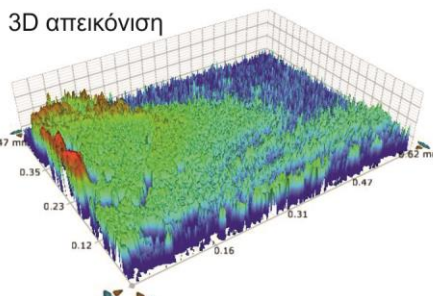


Ύψος απόληξης: **932.00 μm**  
Πλάτος απόληξης: **653.0 μm**

**Δοκίμιο 3, θέση μέτρησης: 345°**



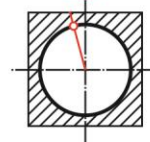
3D απεικόνιση



**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

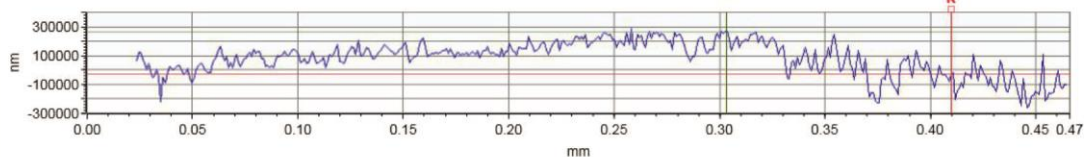
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$   
**345°**



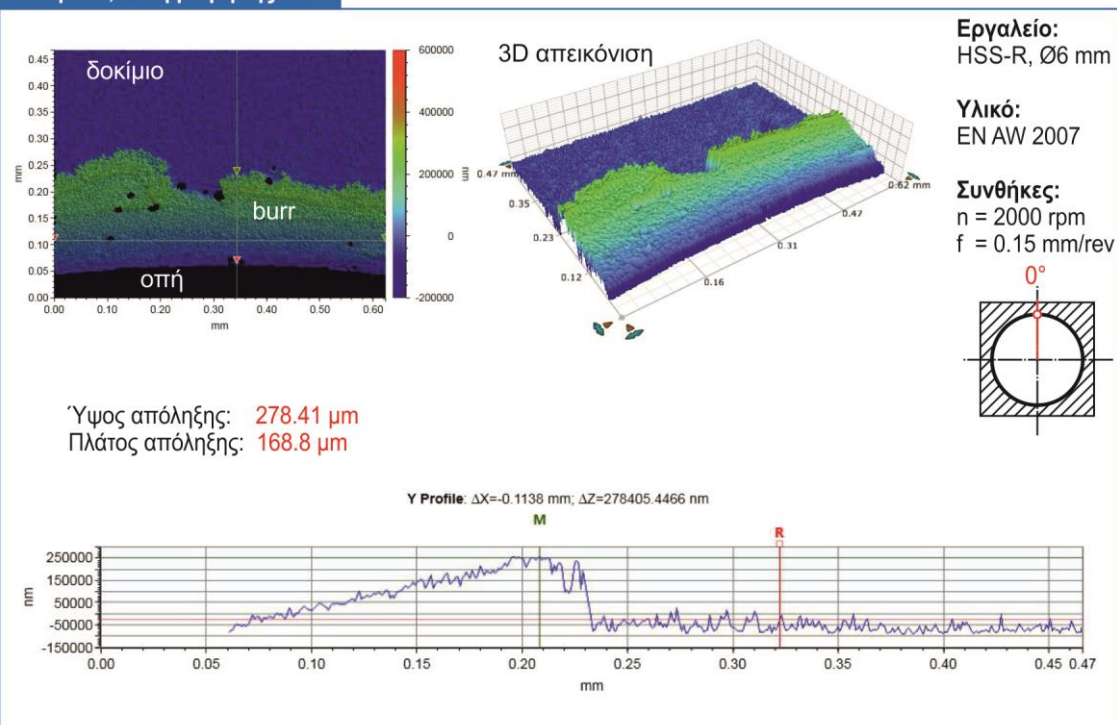
Ύψος απόληξης: **296.74 μm**  
Πλάτος απόληξης: **333.3 μm**

Y Profile:  $\Delta X = -0.1067 \text{ mm}$ ;  $\Delta Z = 296743.1412 \text{ nm}$

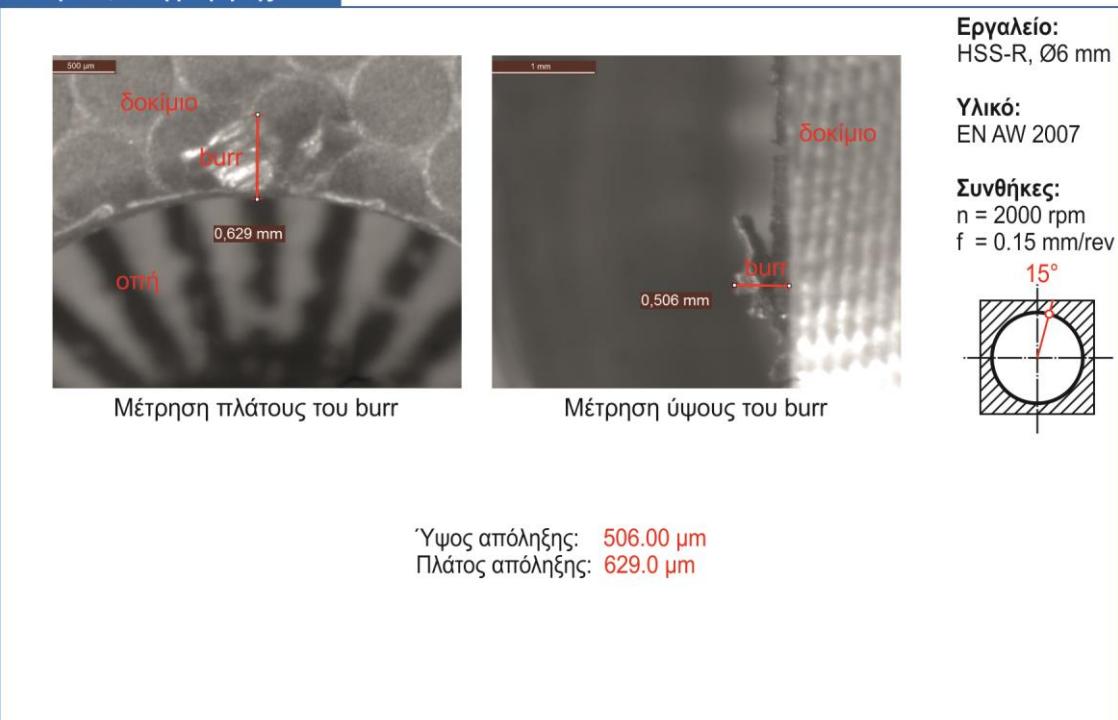




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 0°**



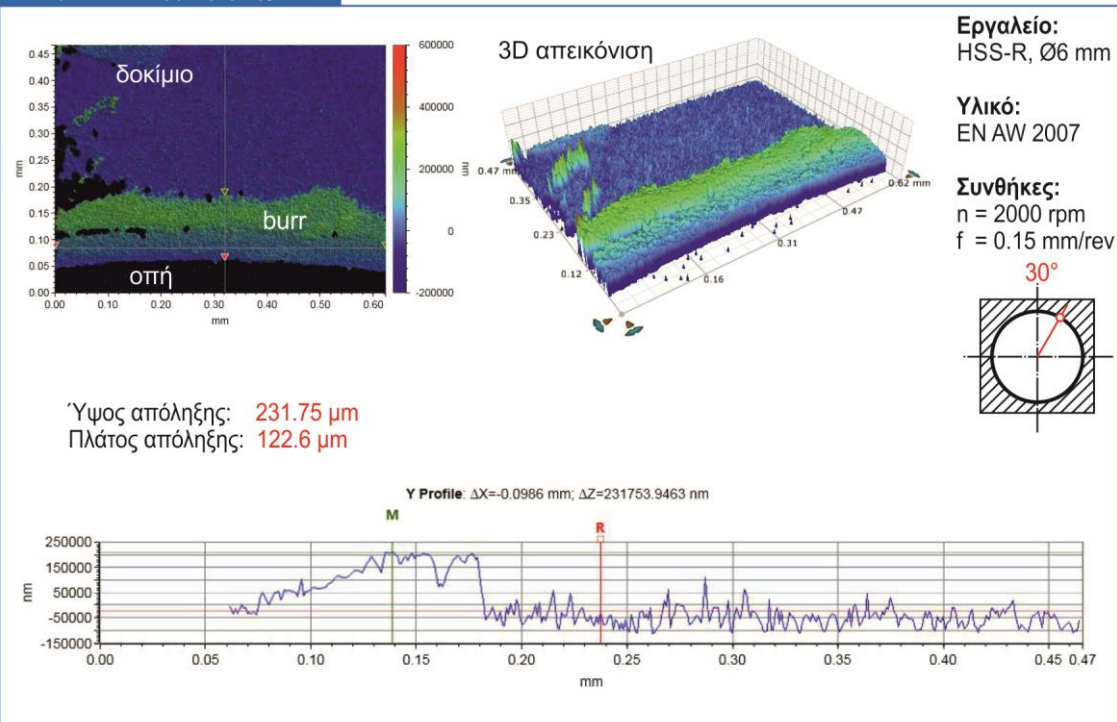
**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 15°**



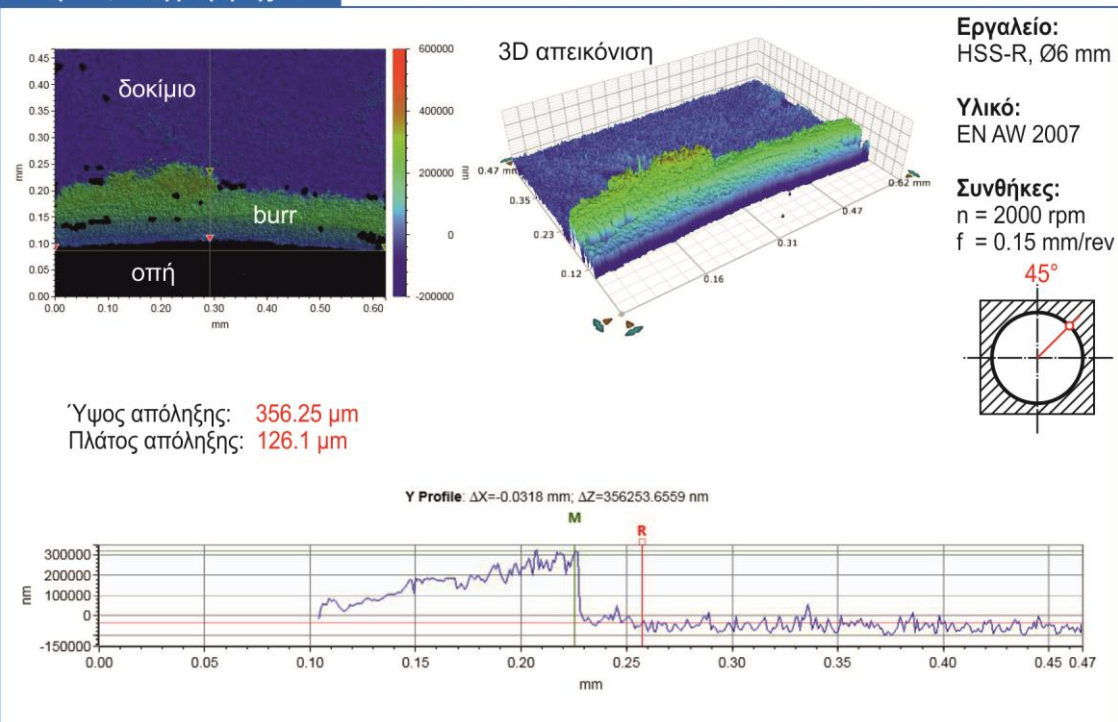




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 30°**



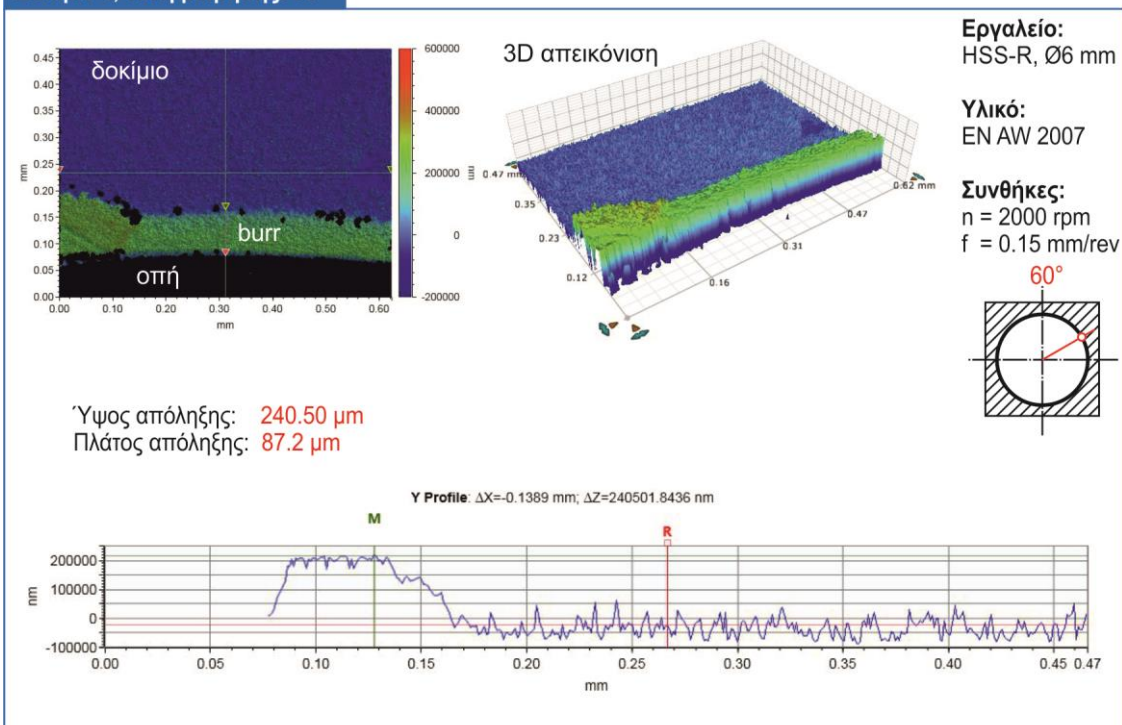
**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 45°**



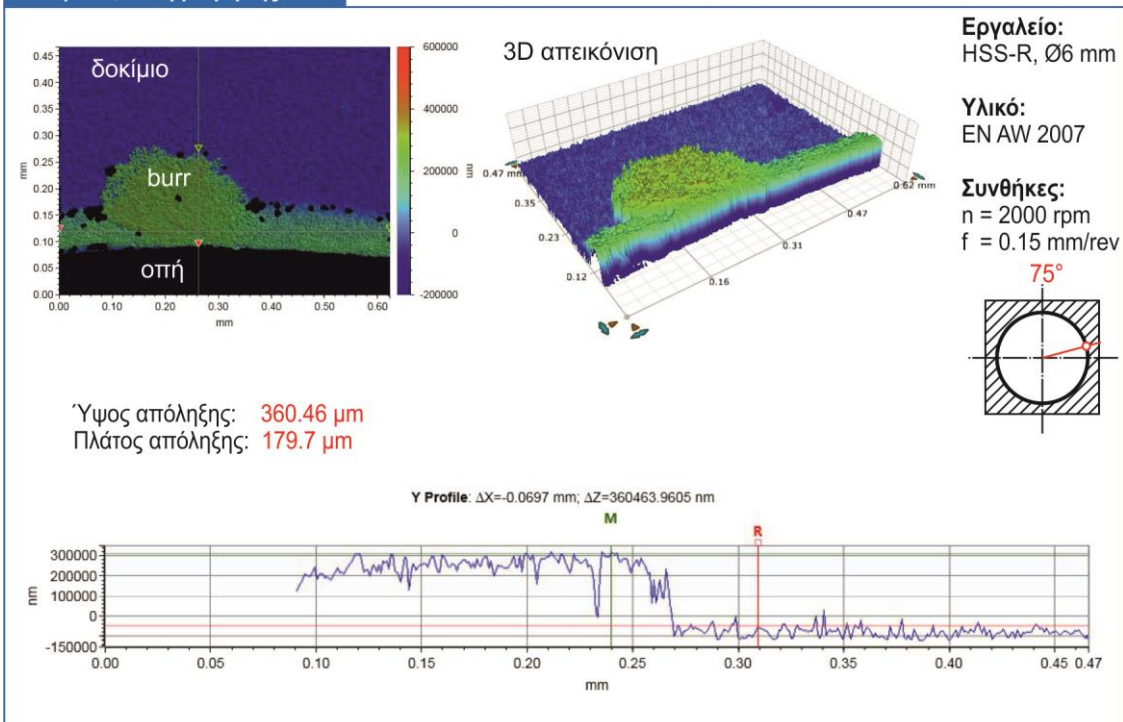




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 60°**

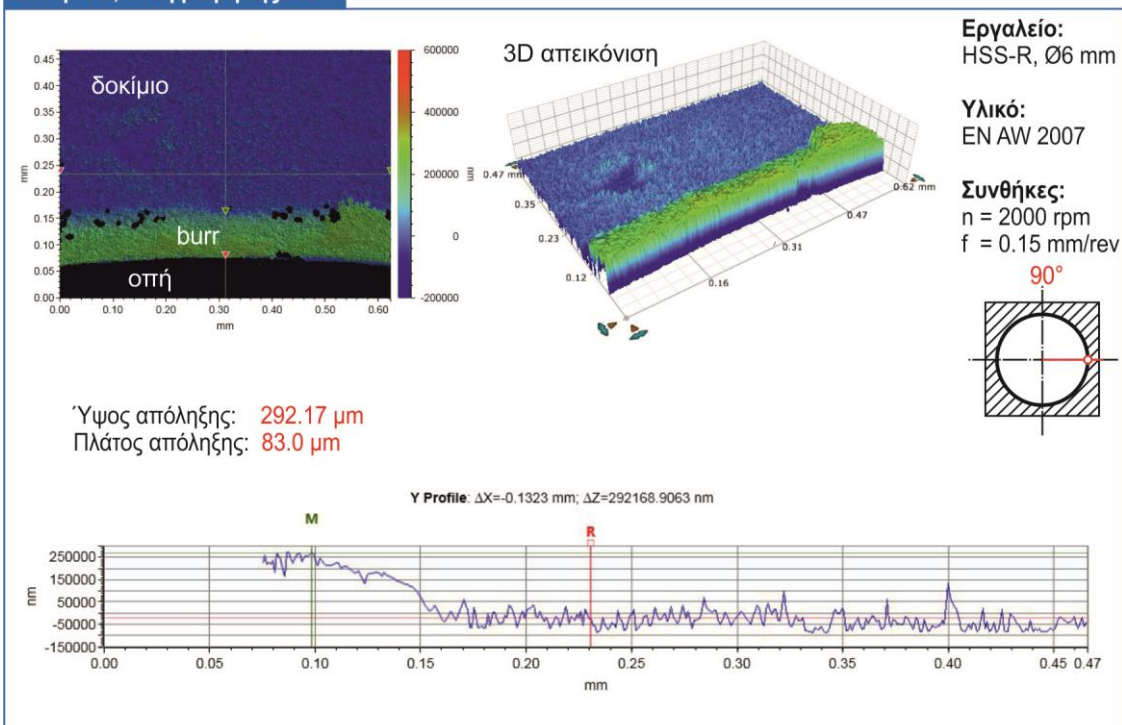


**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 75°**

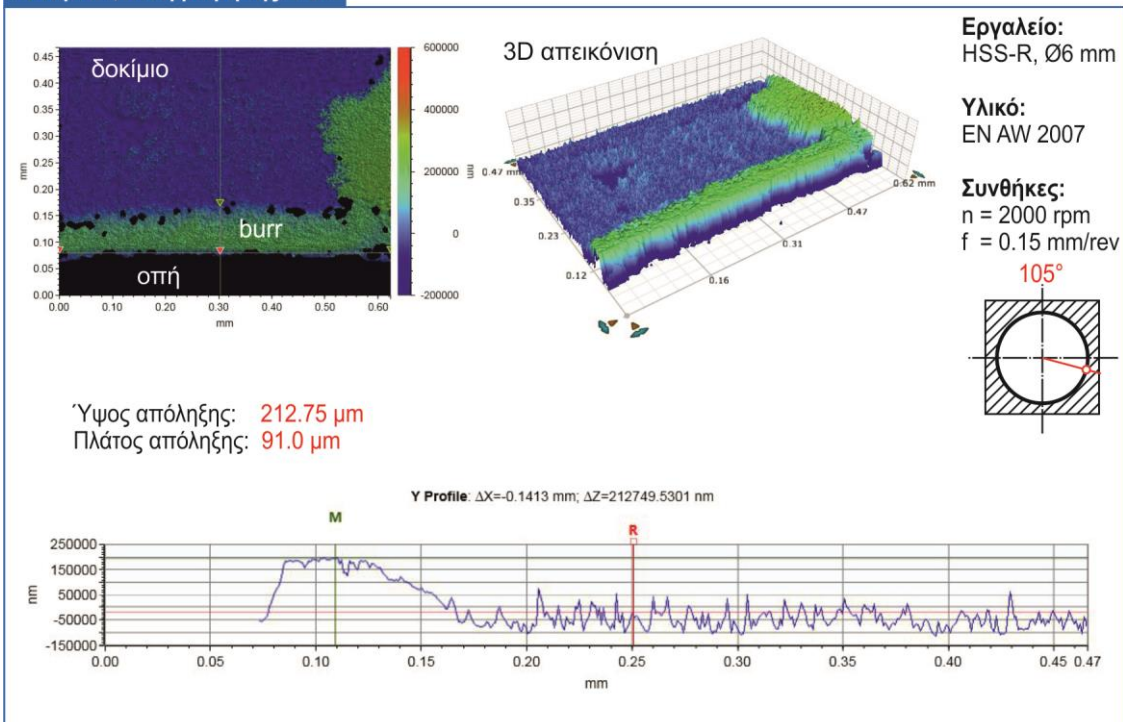




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 90°**

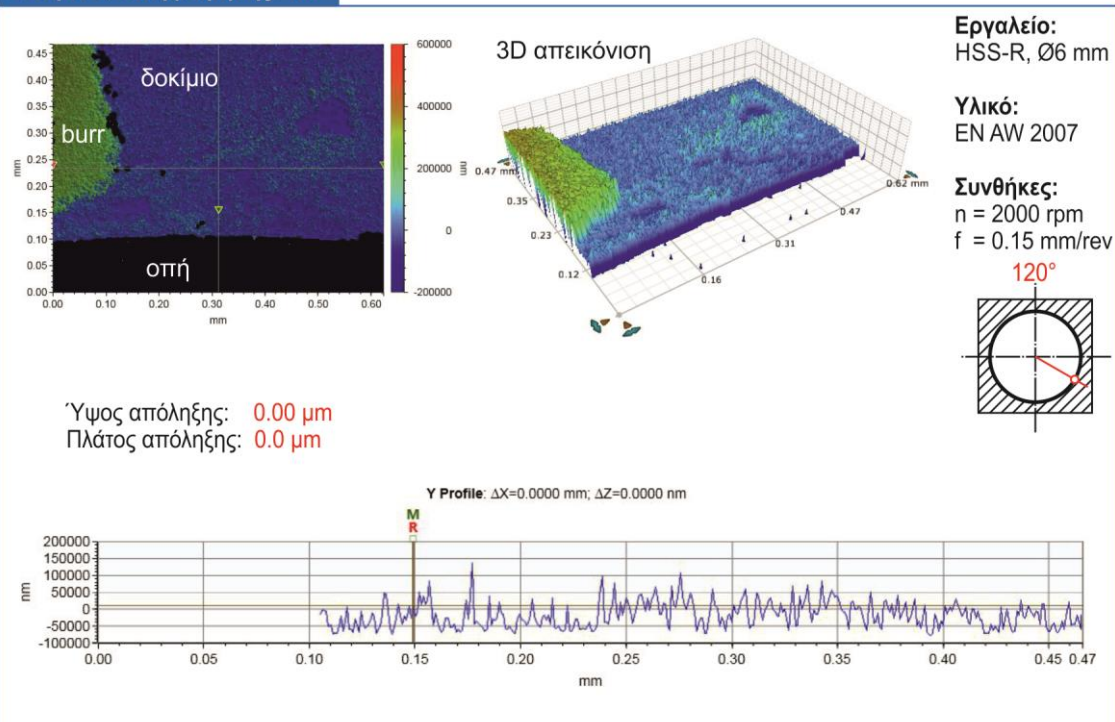


**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 105°**

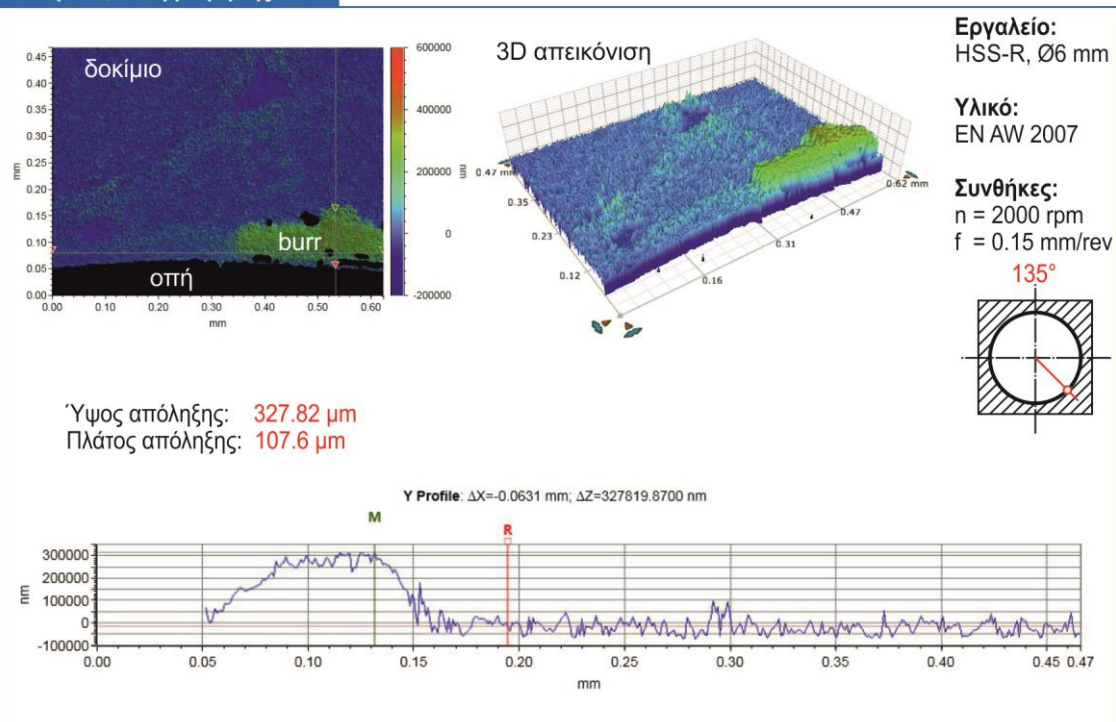




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 120°**



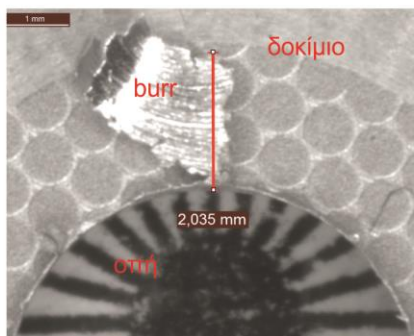
**Δοκίμιο 1, θέση μέτρησης: 135°**



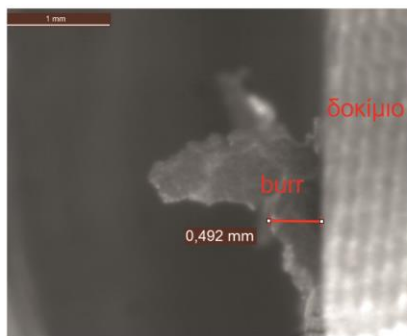




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 150°**



Μέτρηση πλάτους του burr

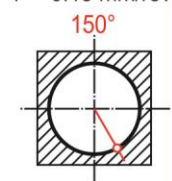


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

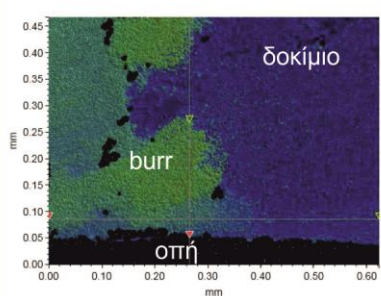
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 2000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$

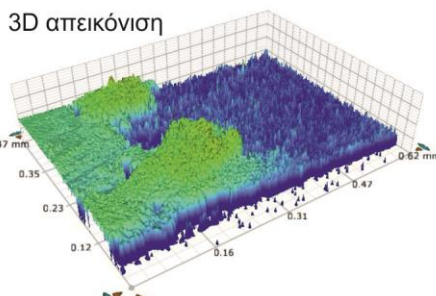


Ύψος απόληξης: **492.00  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **2035.0  $\mu\text{m}$**

**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 165°**



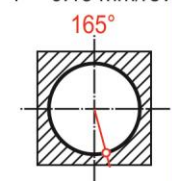
3D απεικόνιση



**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

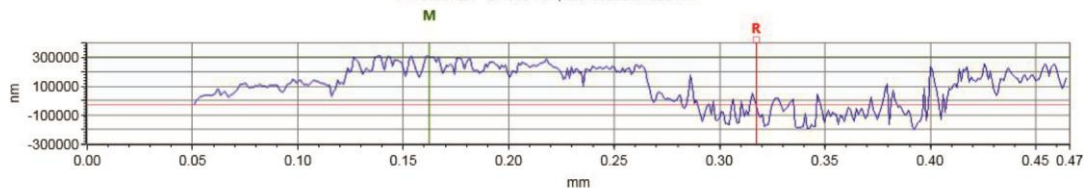
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 2000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$



Ύψος απόληξης: **332.63  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **218.1  $\mu\text{m}$**

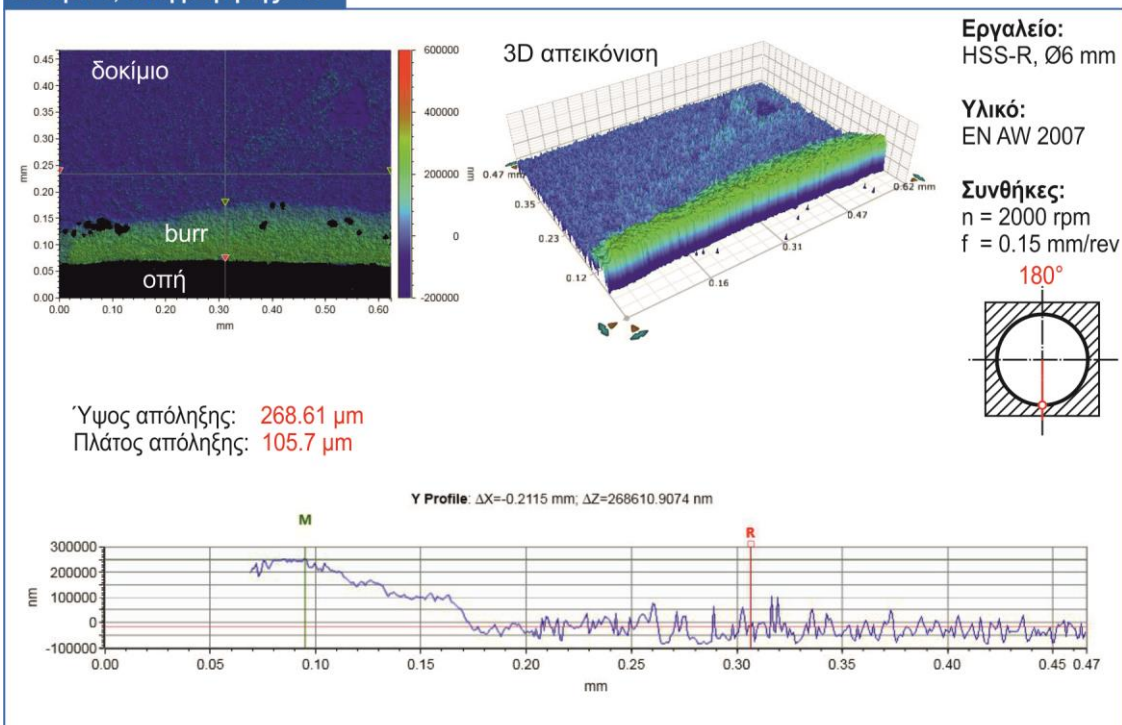
Y Profile:  $\Delta X = -0.1550 \text{ mm}$ ;  $\Delta Z = 332629.4823 \text{ nm}$



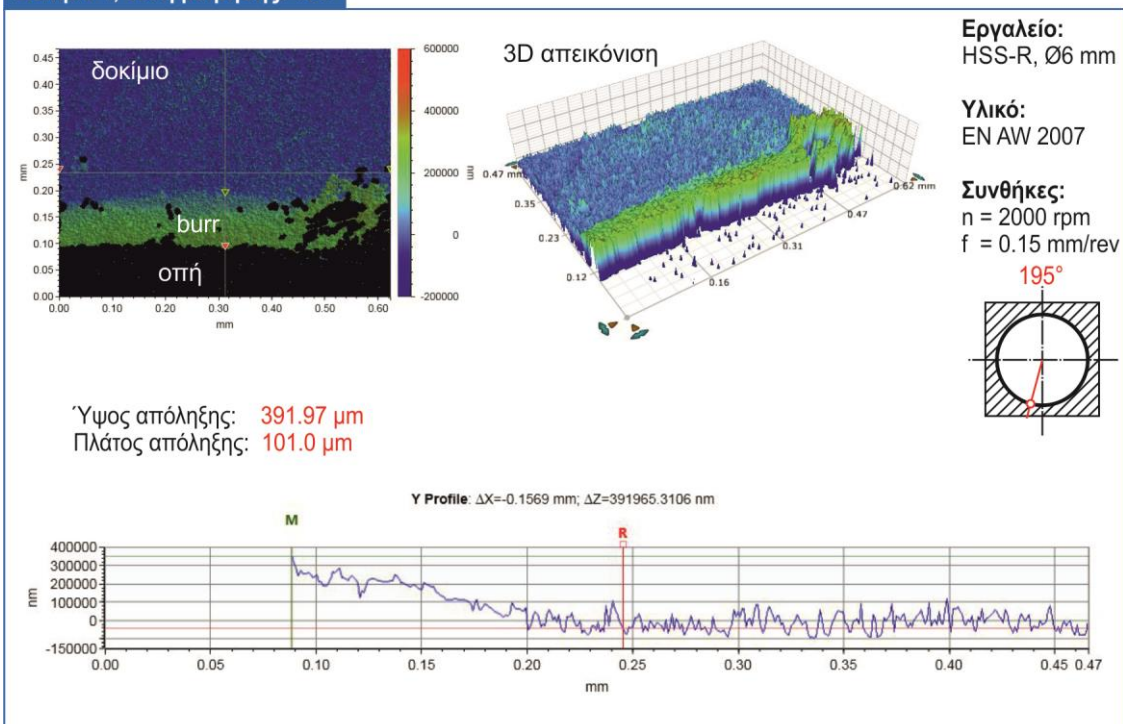




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 180°**

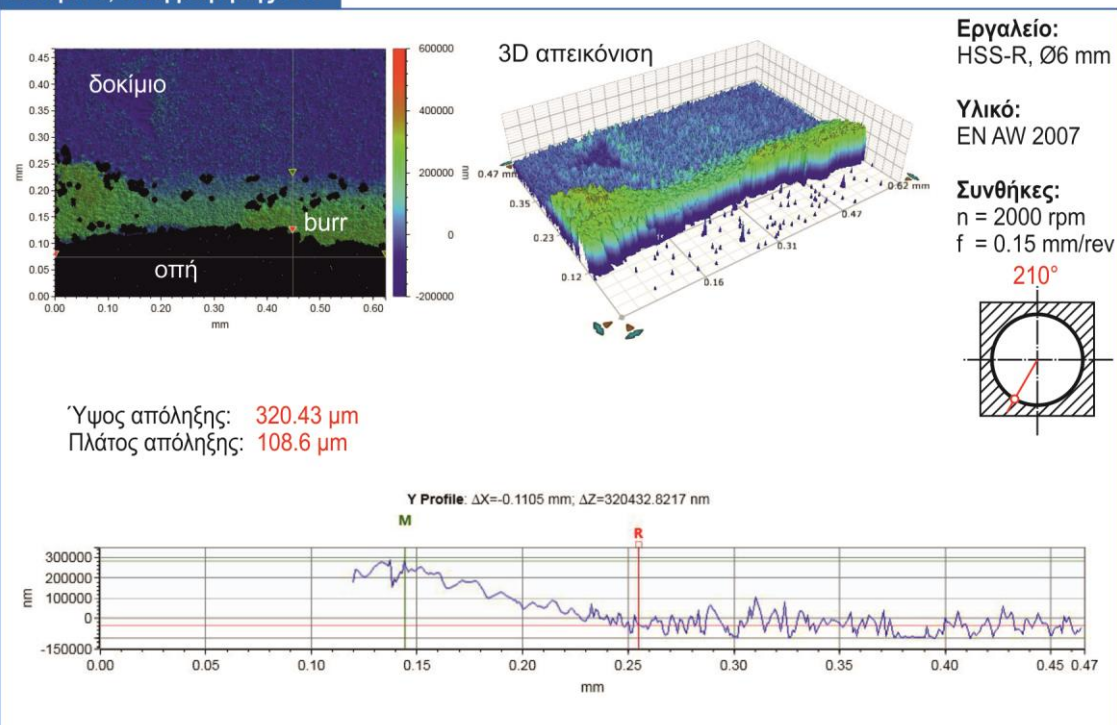


**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 195°**

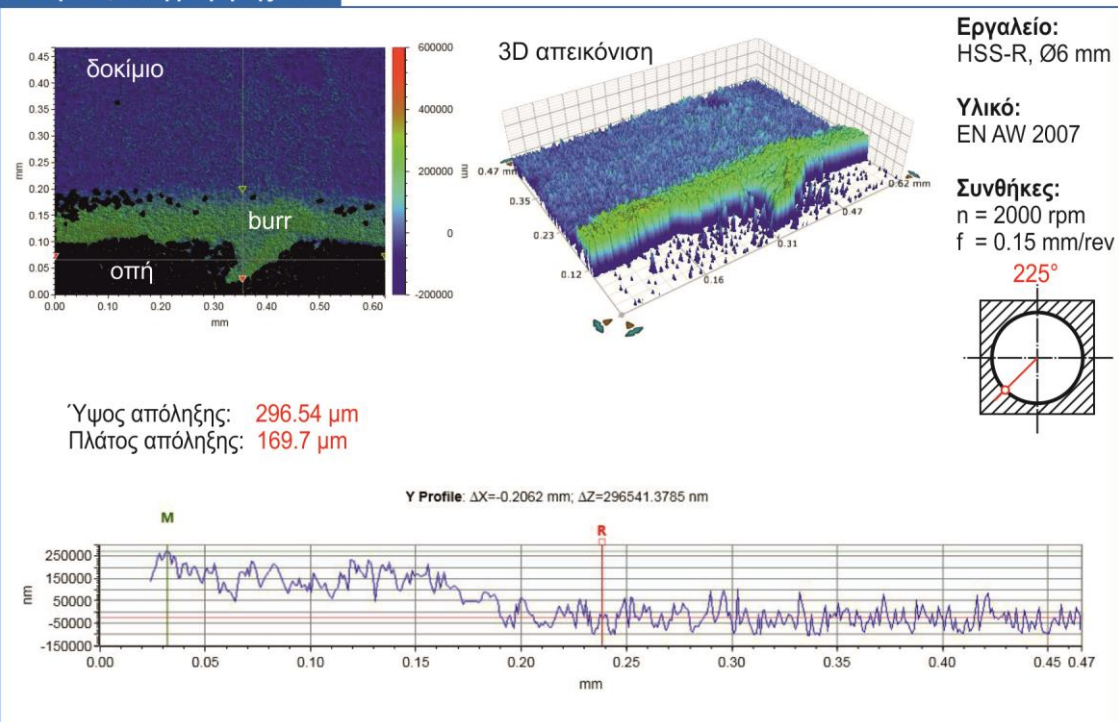




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 210°**

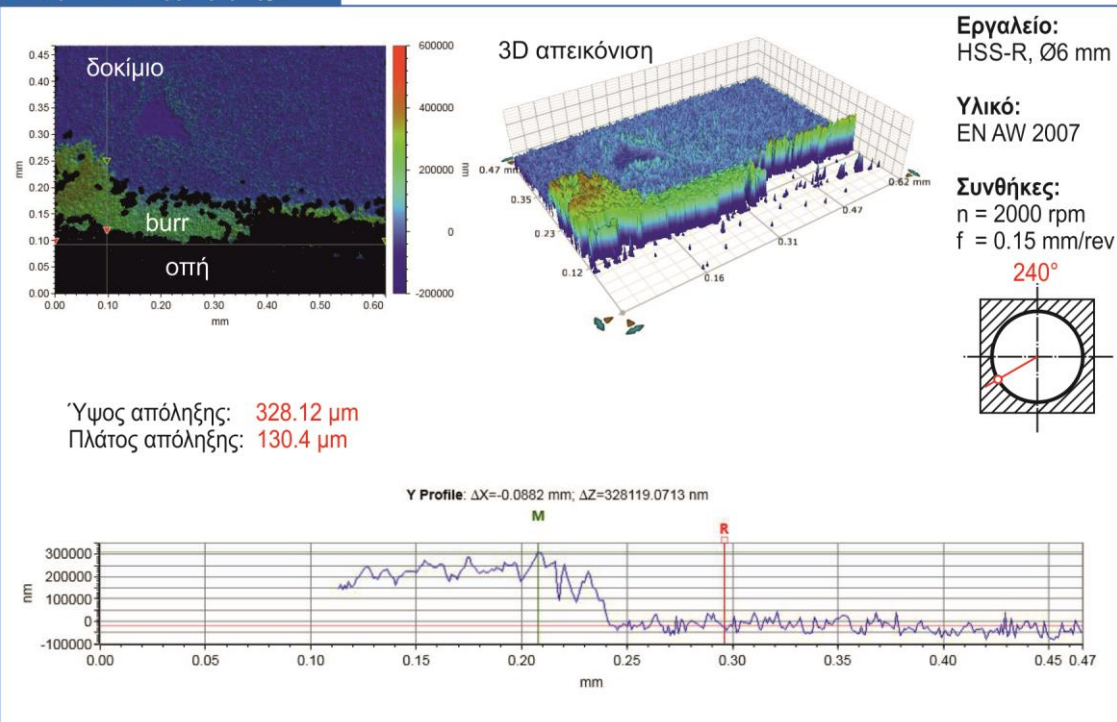


**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 225°**

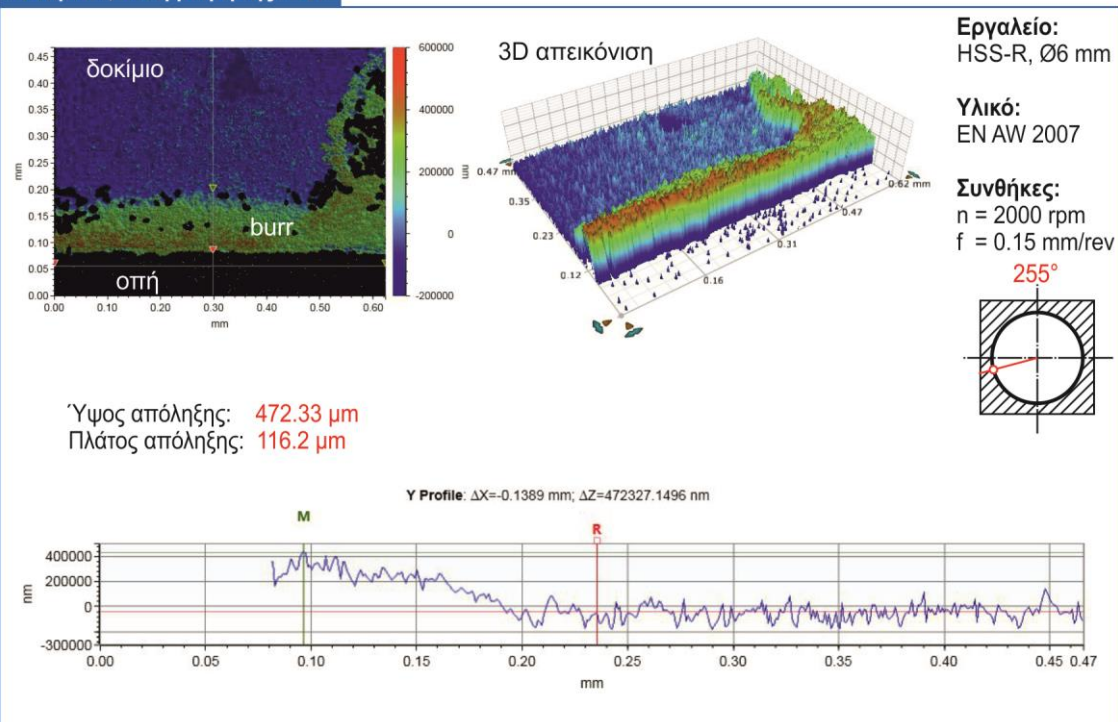




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 240°**



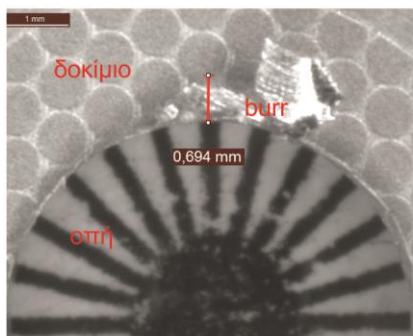
**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 255°**



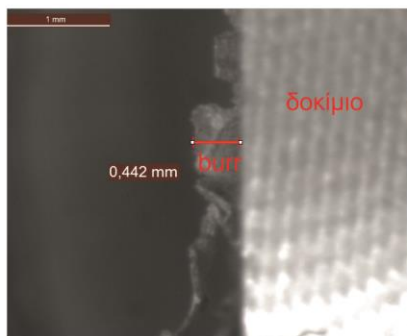




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 270°**



Μέτρηση πλάτους του burr

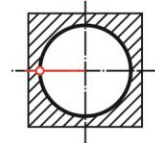


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

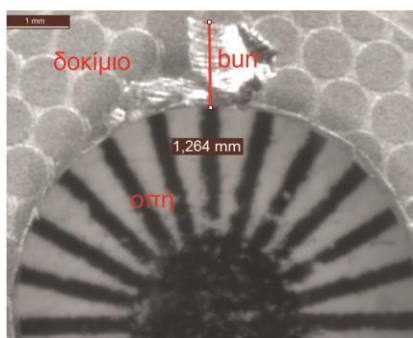
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 2000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$   
**270°**

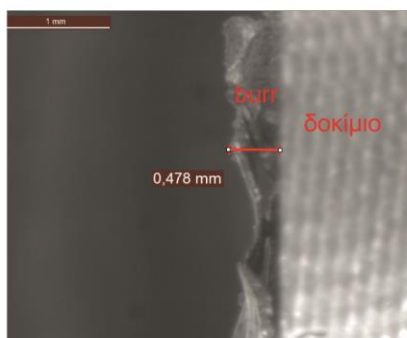


Ύψος απόληξης: **442.00  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **694.0  $\mu\text{m}$**

**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 285°**



Μέτρηση πλάτους του burr

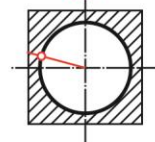


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 2000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$   
**285°**

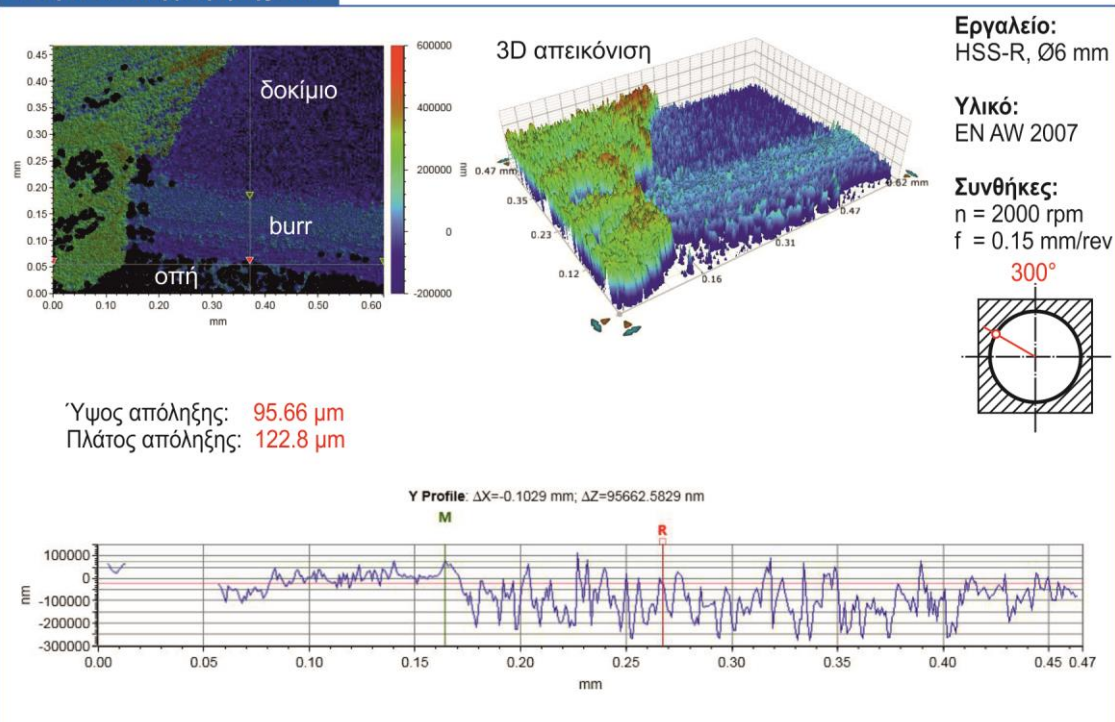


Ύψος απόληξης: **478.00  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **1264.0  $\mu\text{m}$**

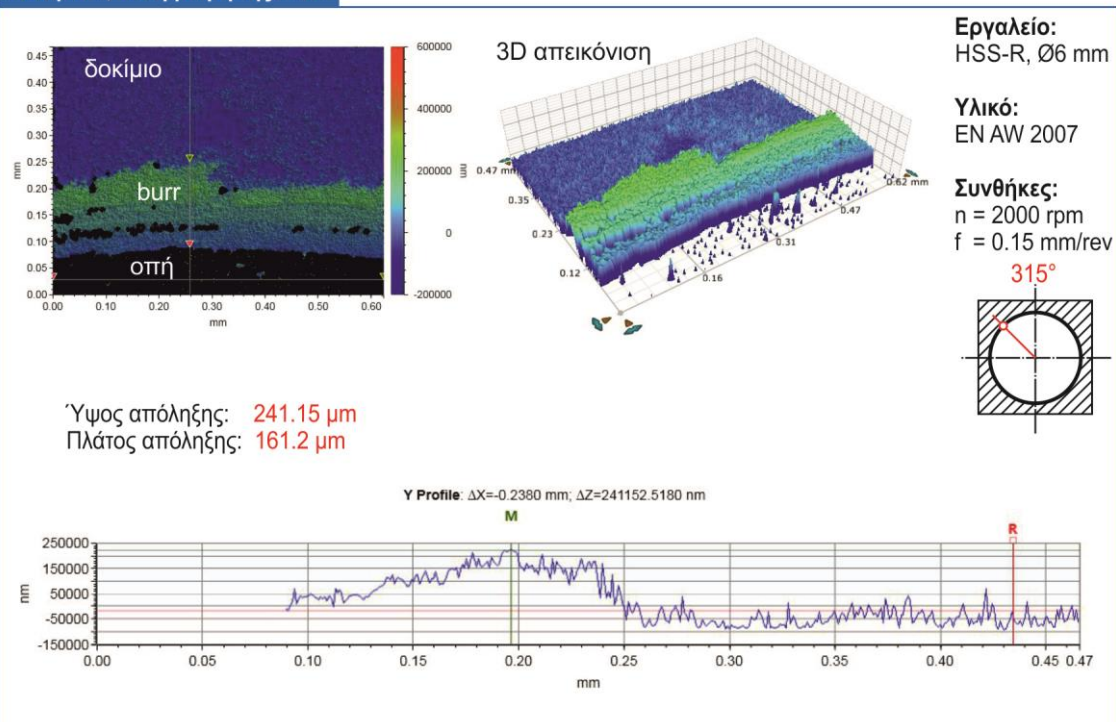




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 300°**

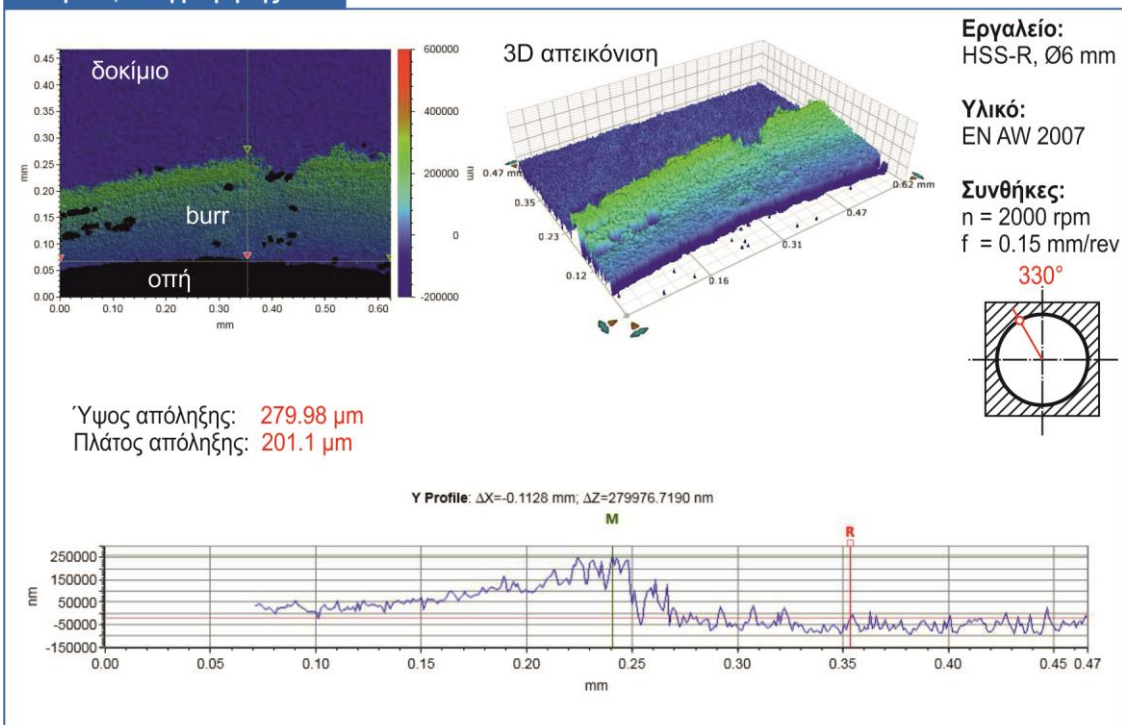


**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 315°**

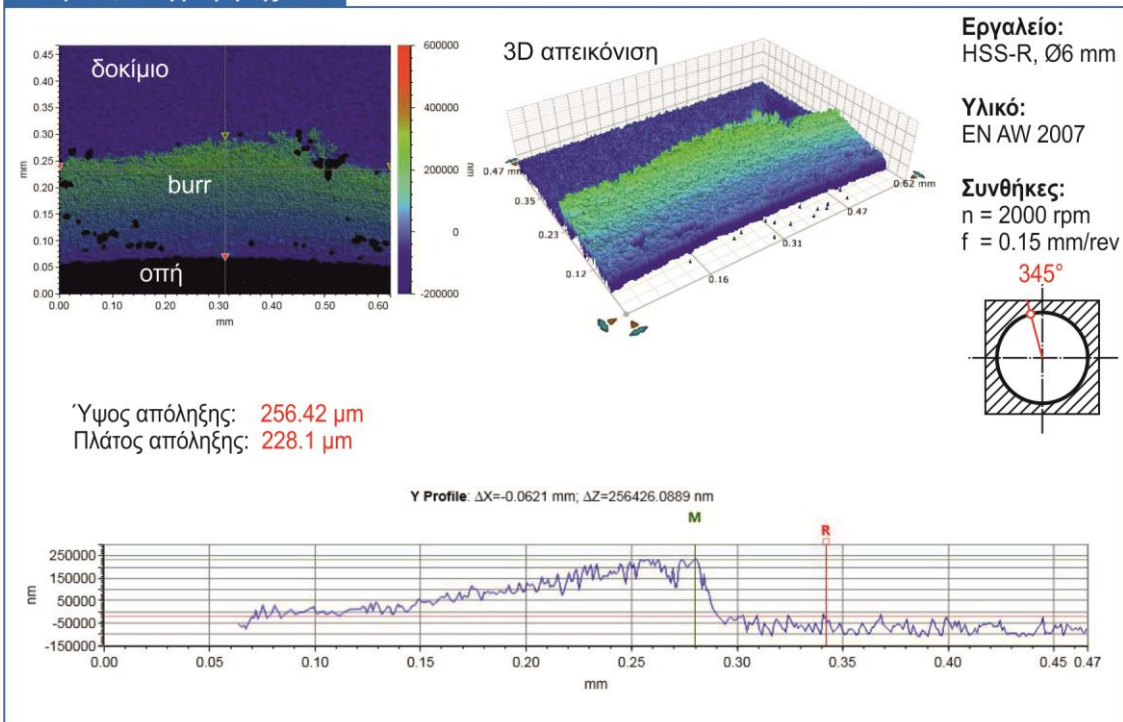




**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 330°**

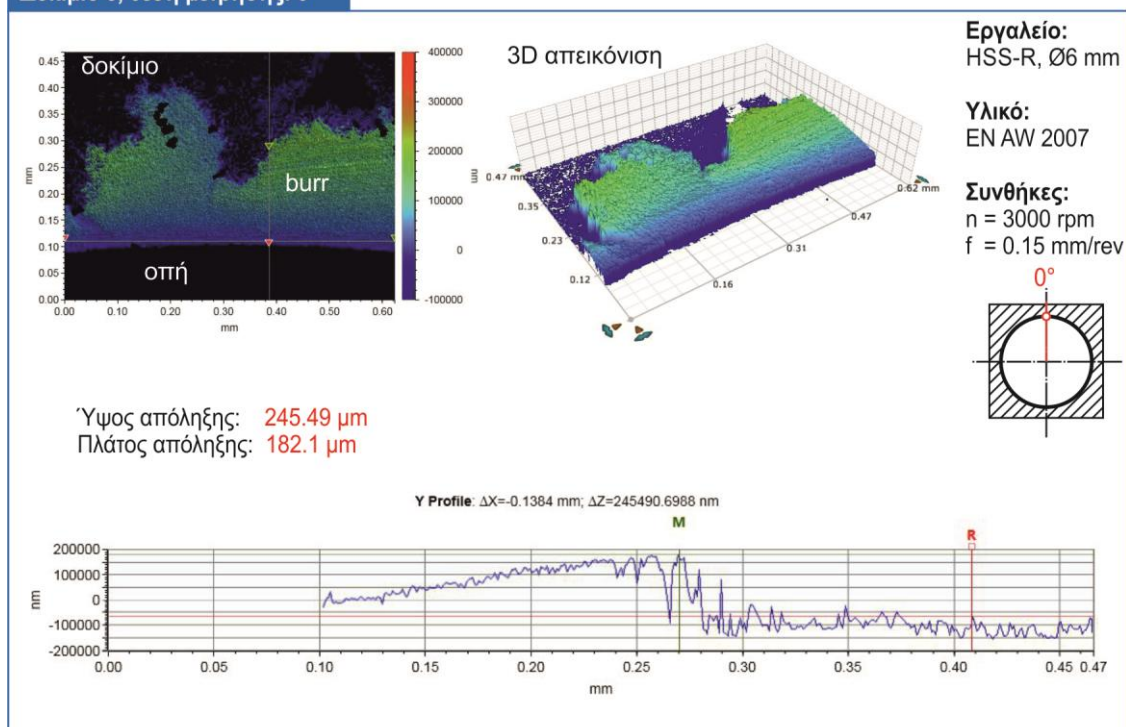


**Δοκίμιο 4, θέση μέτρησης: 345°**

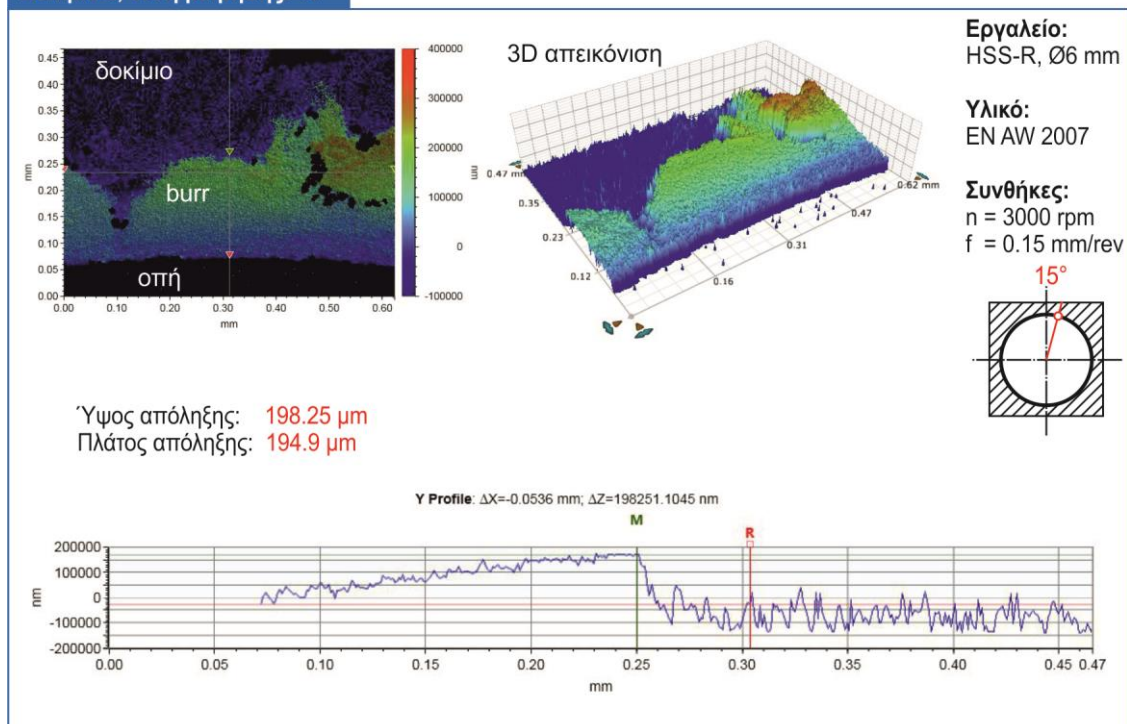




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 0°**



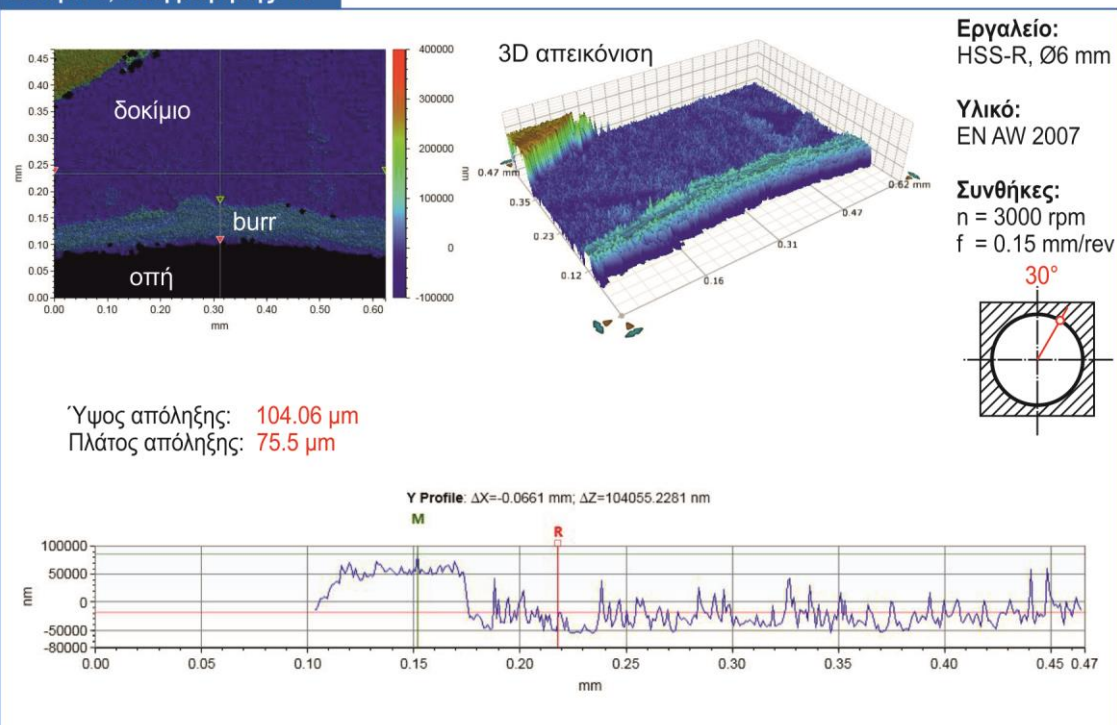
**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 15°**



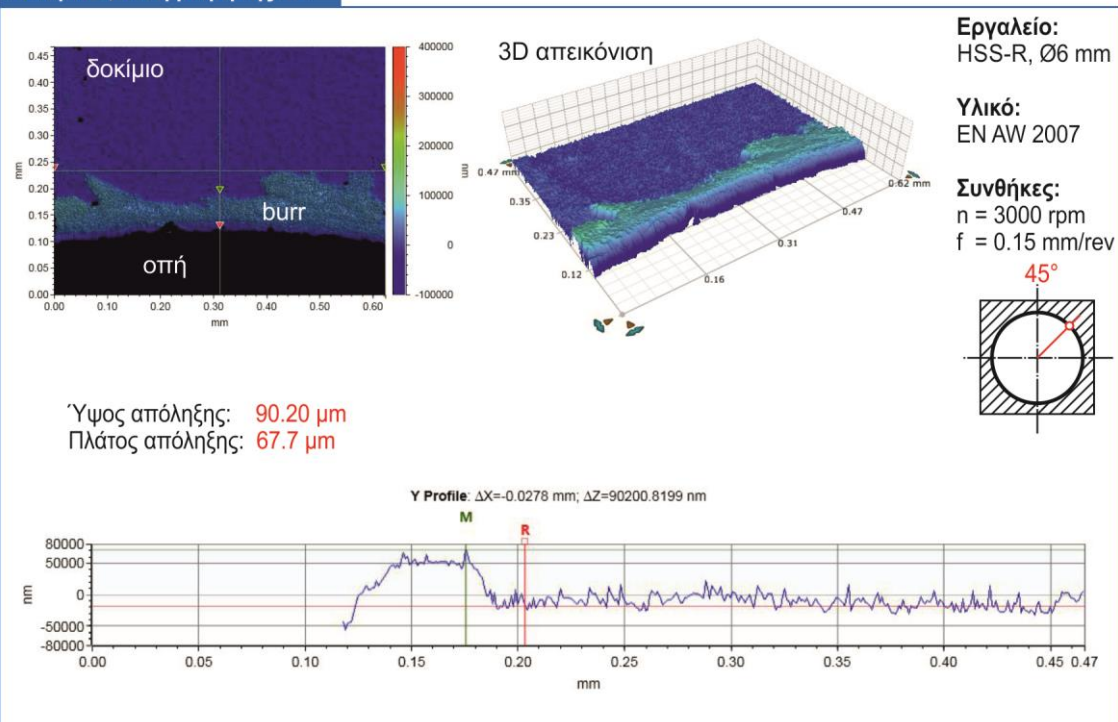




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 30°**



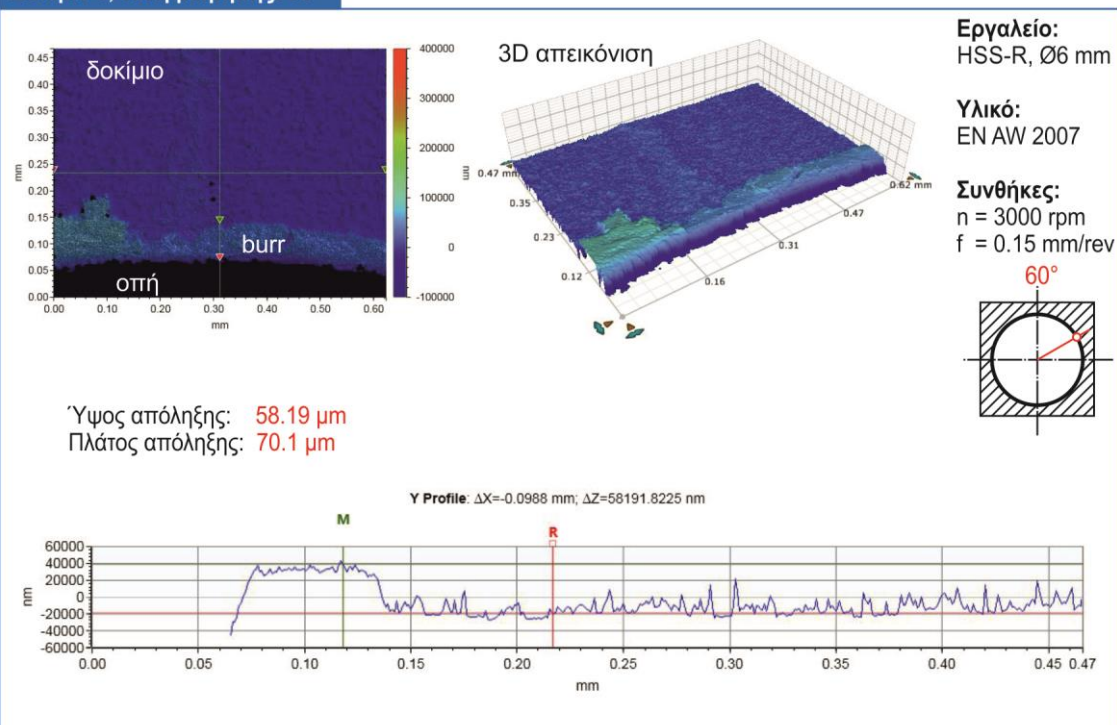
**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 45°**



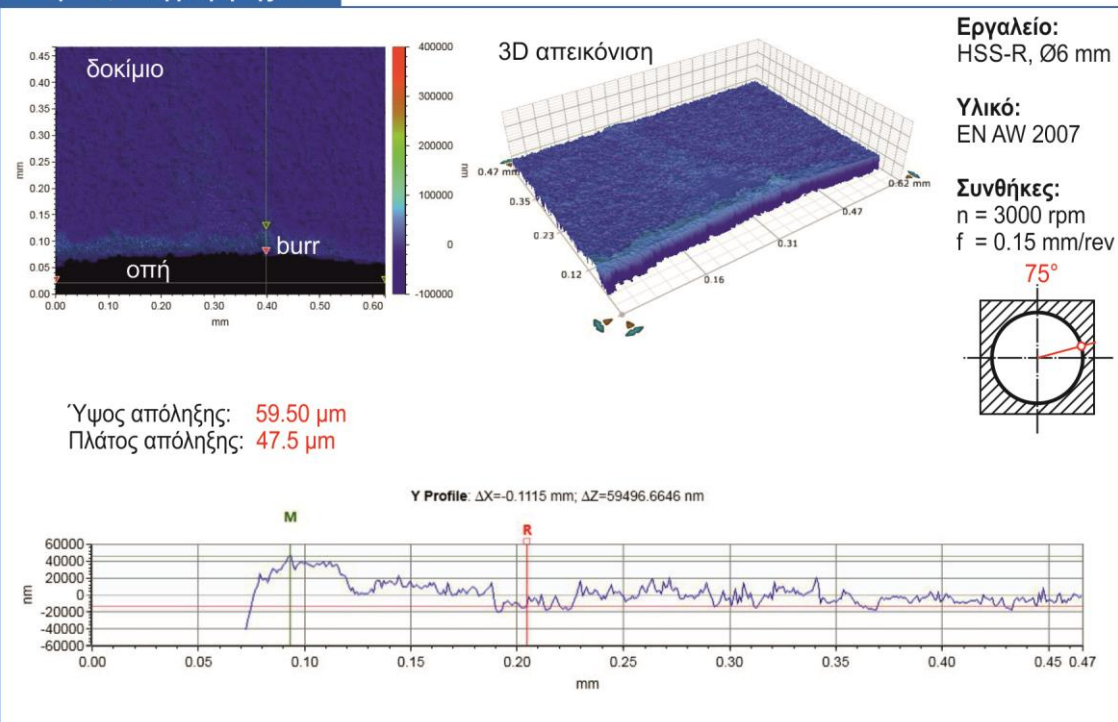




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 60°**

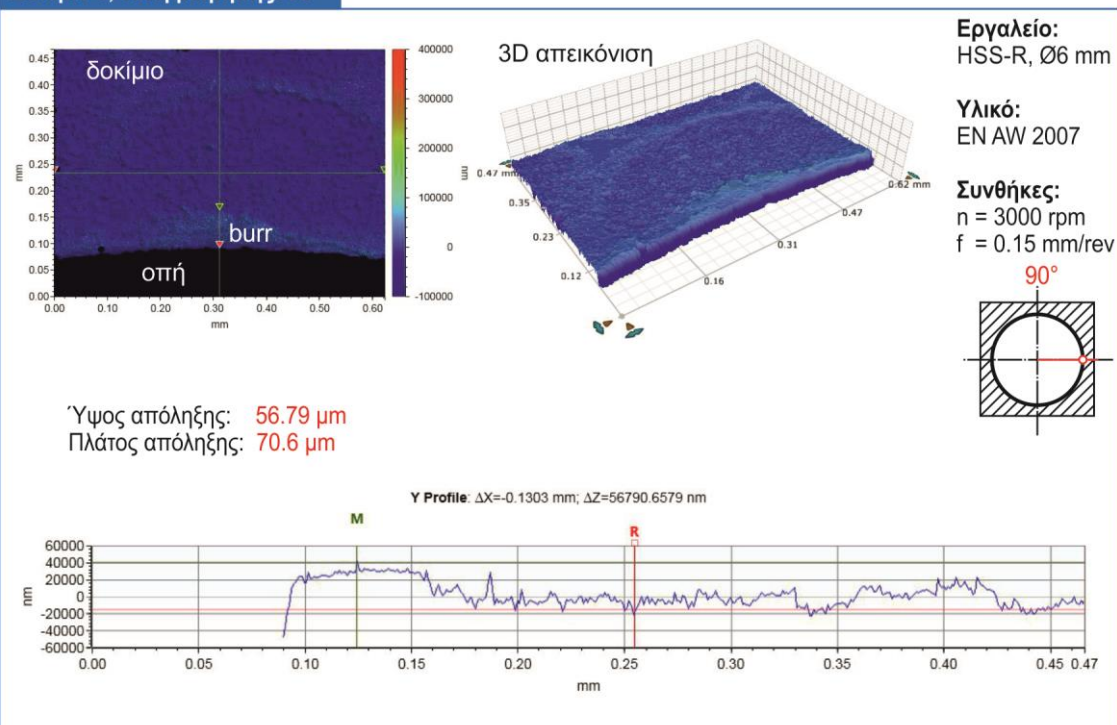


**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 75°**

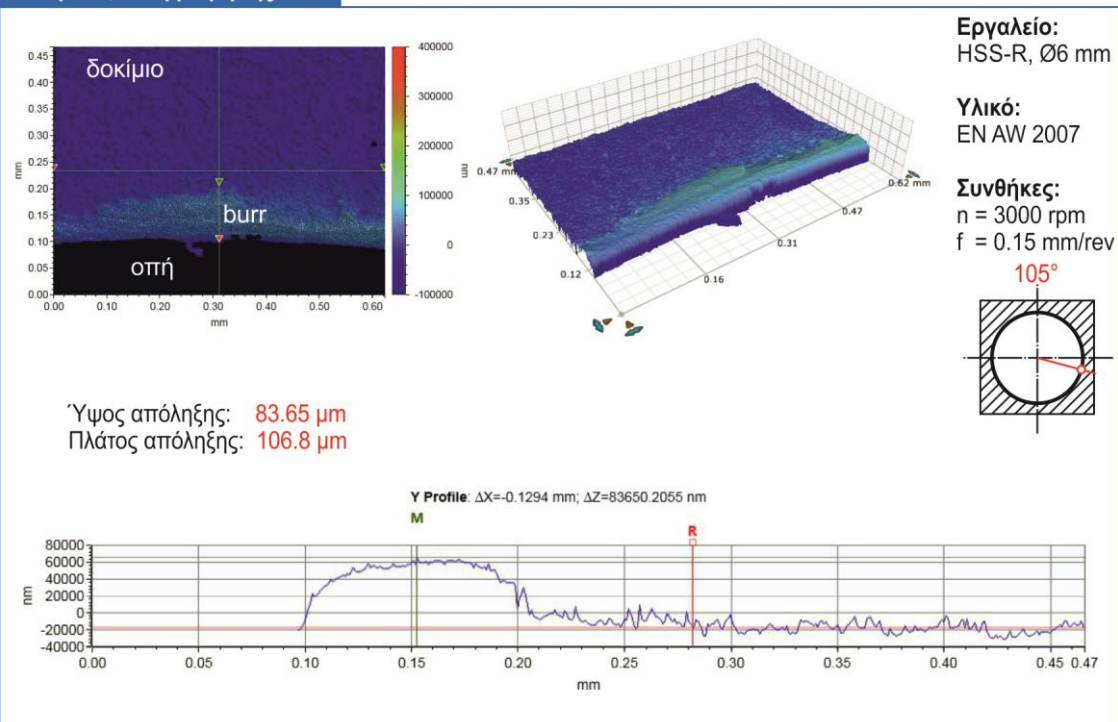




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 90°**

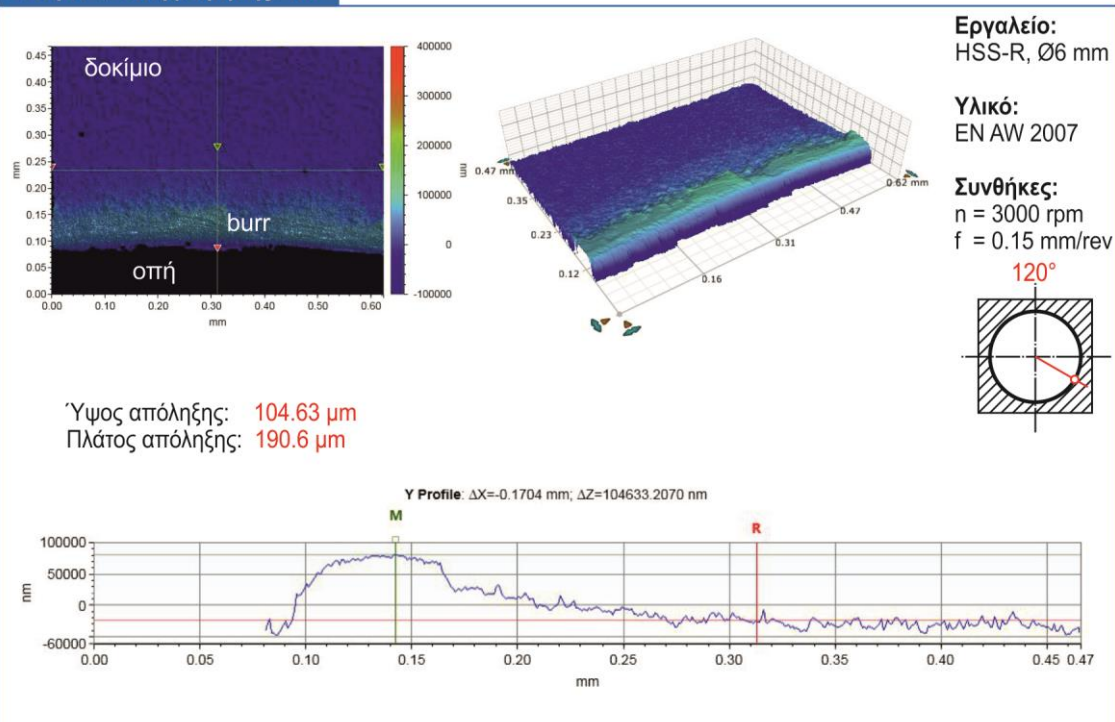


**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 105°**

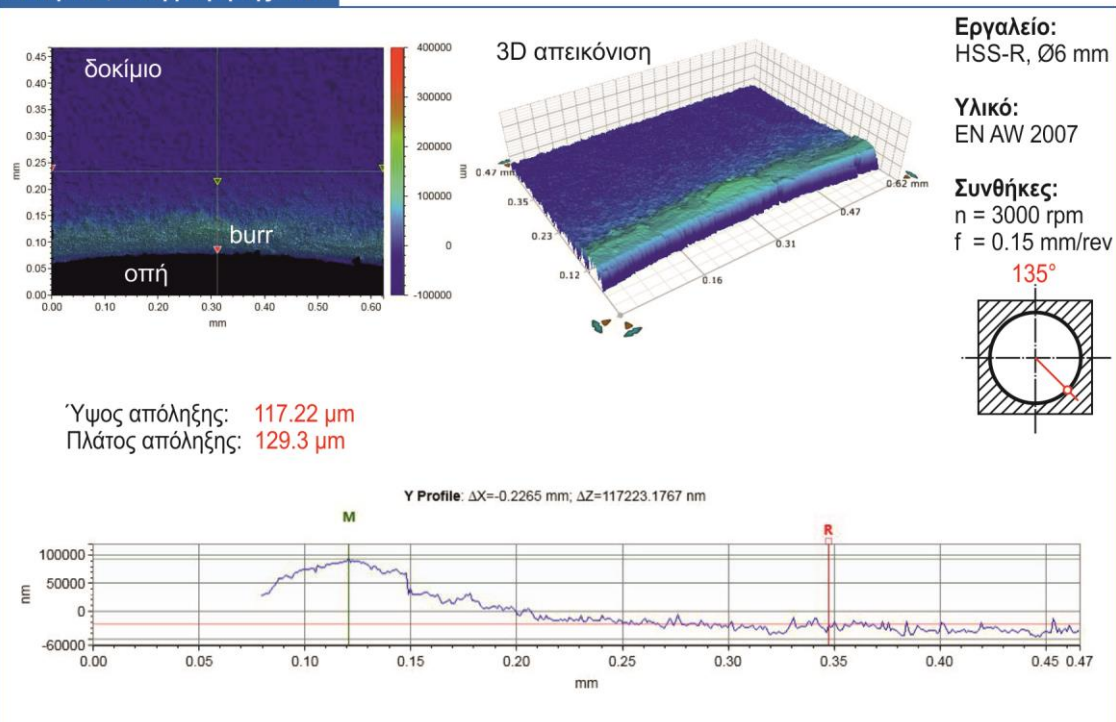




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 120°**



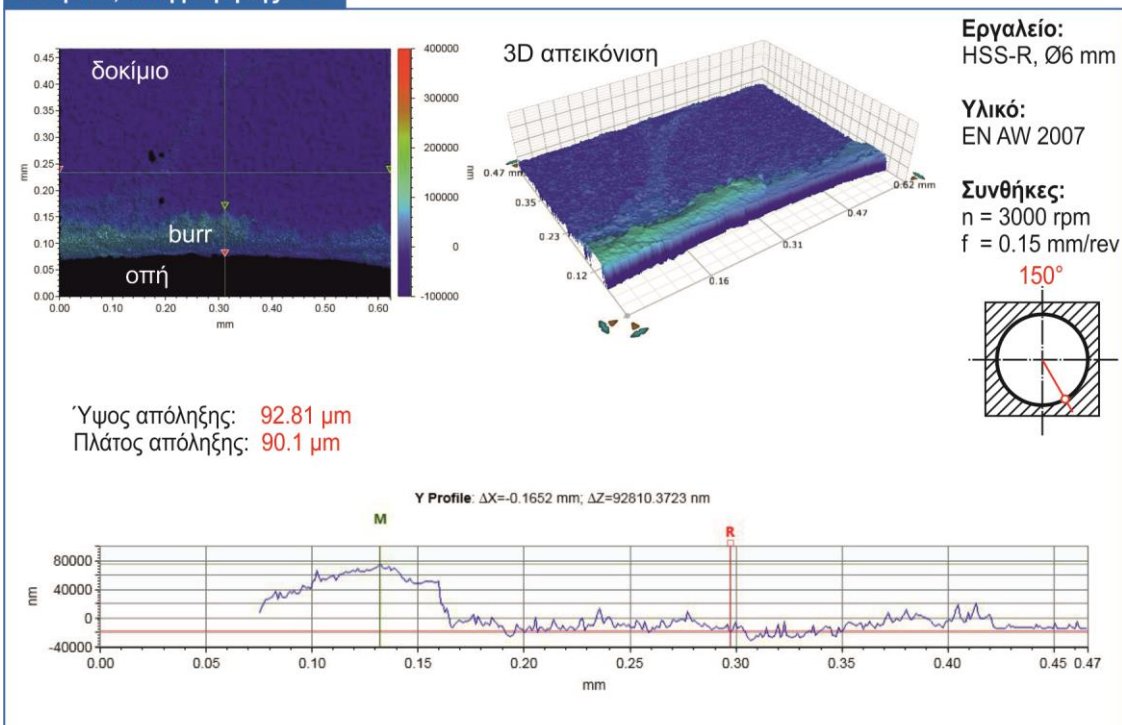
**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 135°**



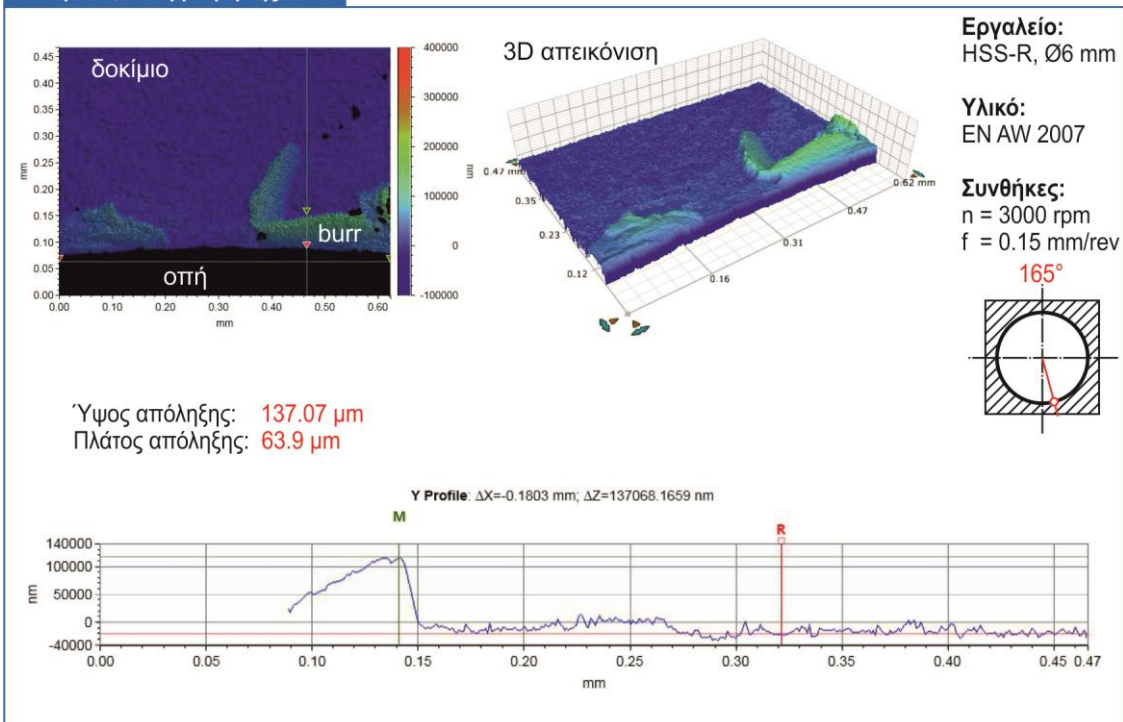




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 150°**



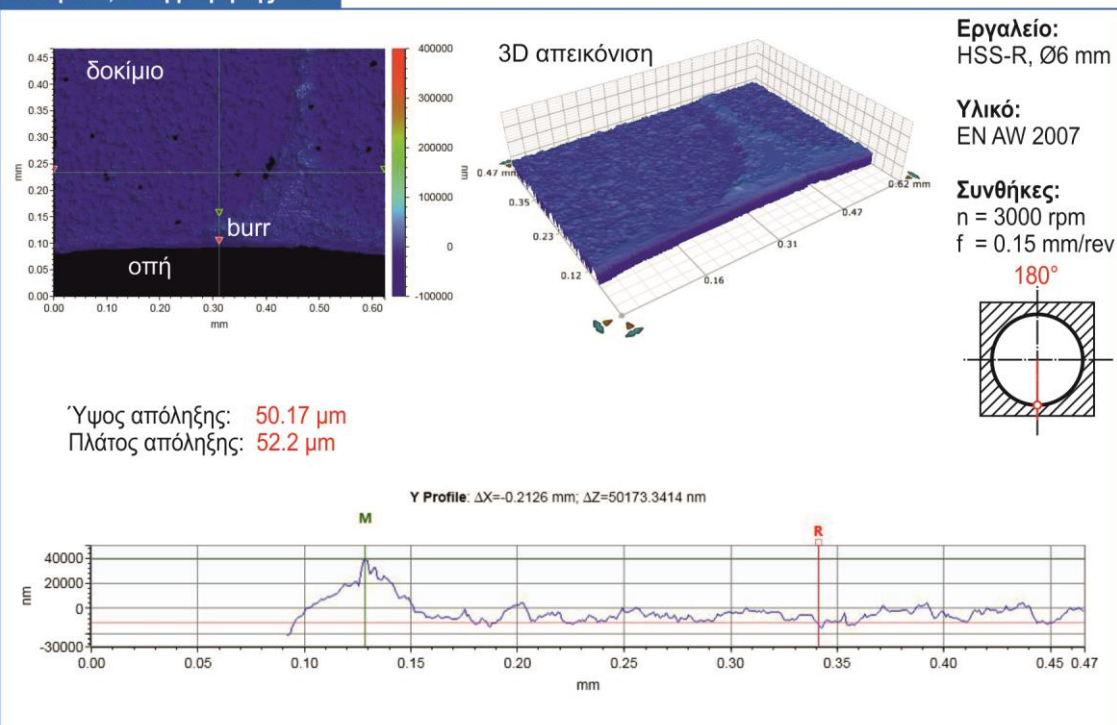
**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 165°**



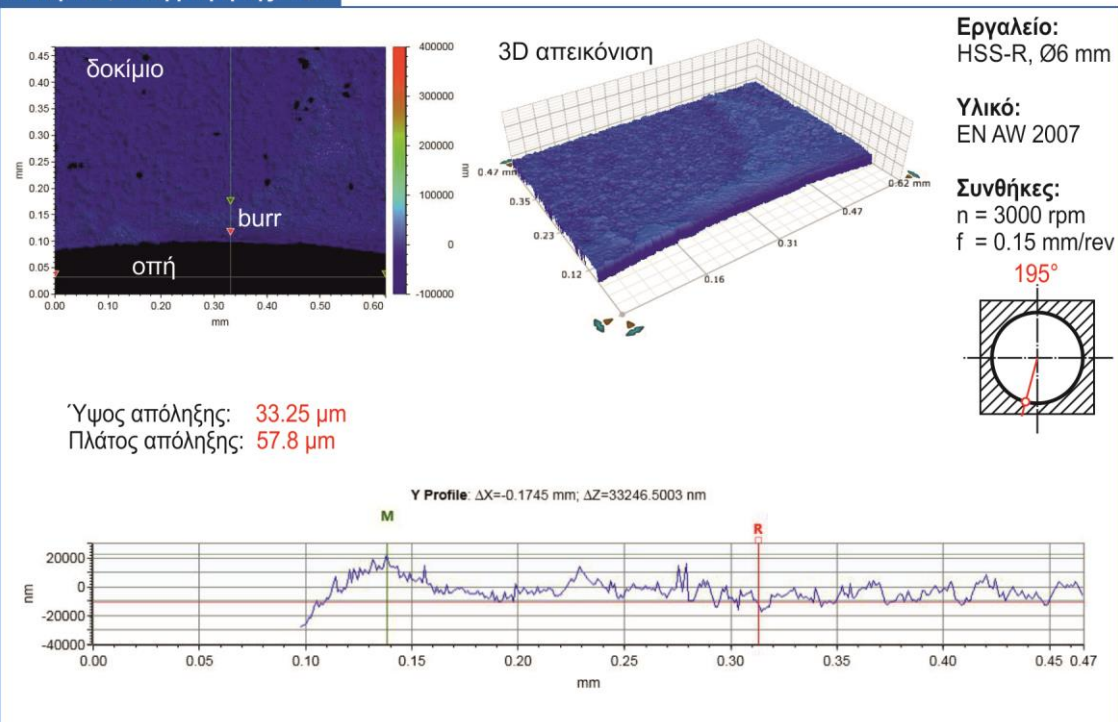




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 180°**

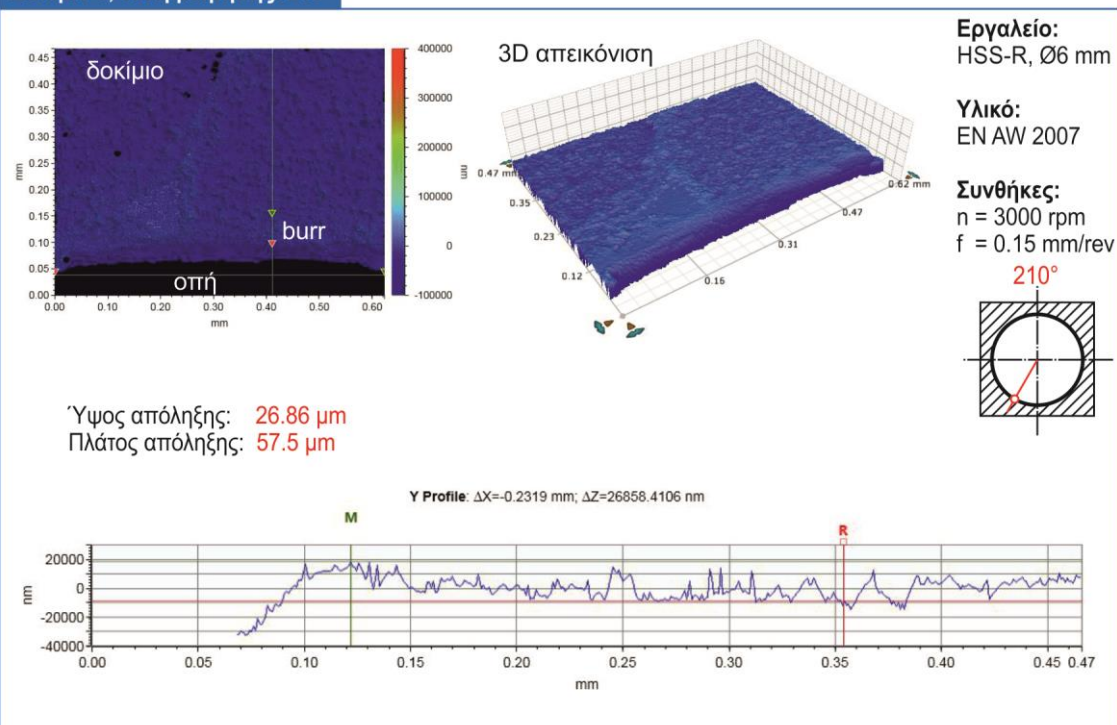


**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 195°**

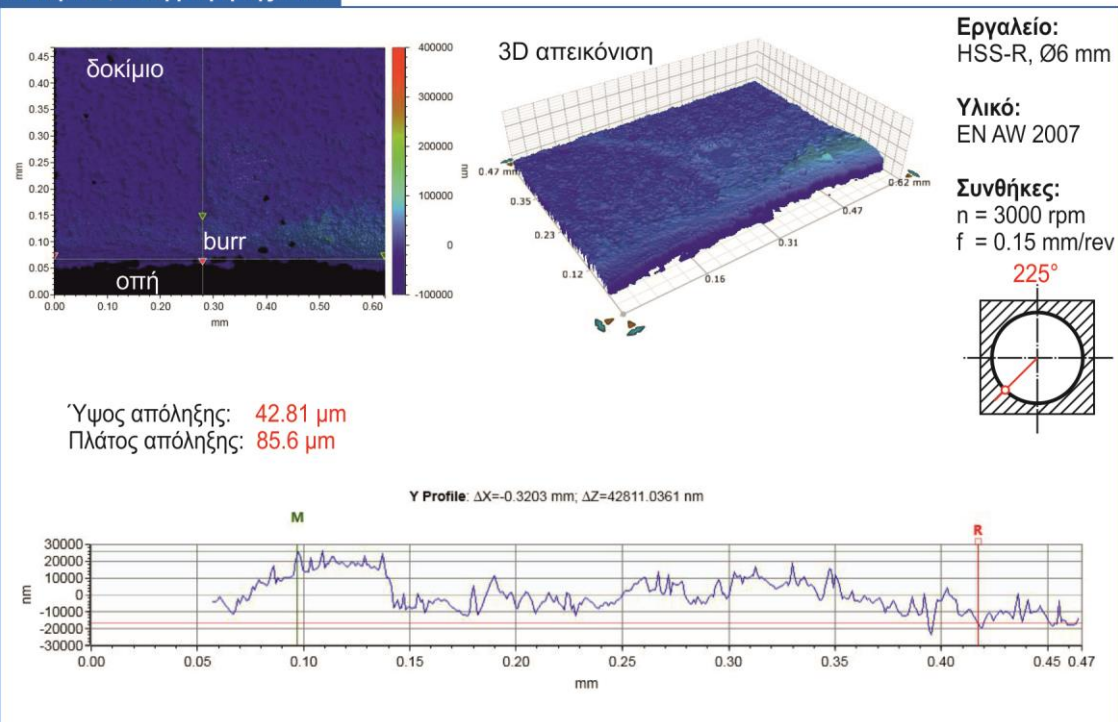




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 210°**

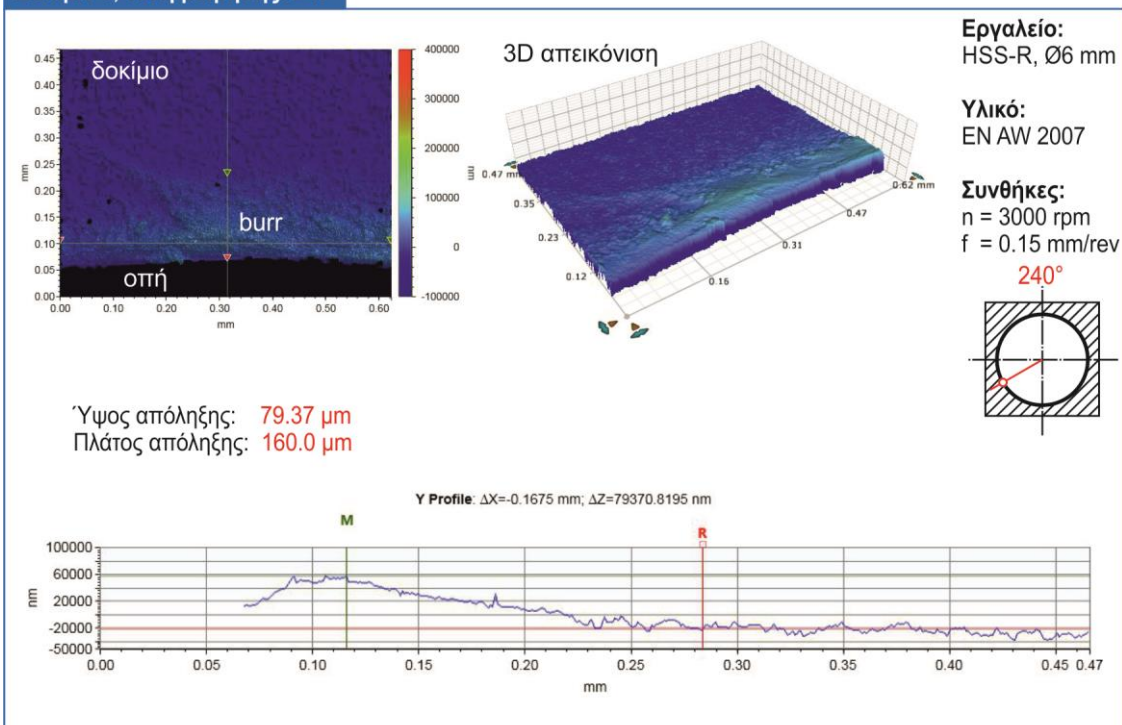


**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 225°**

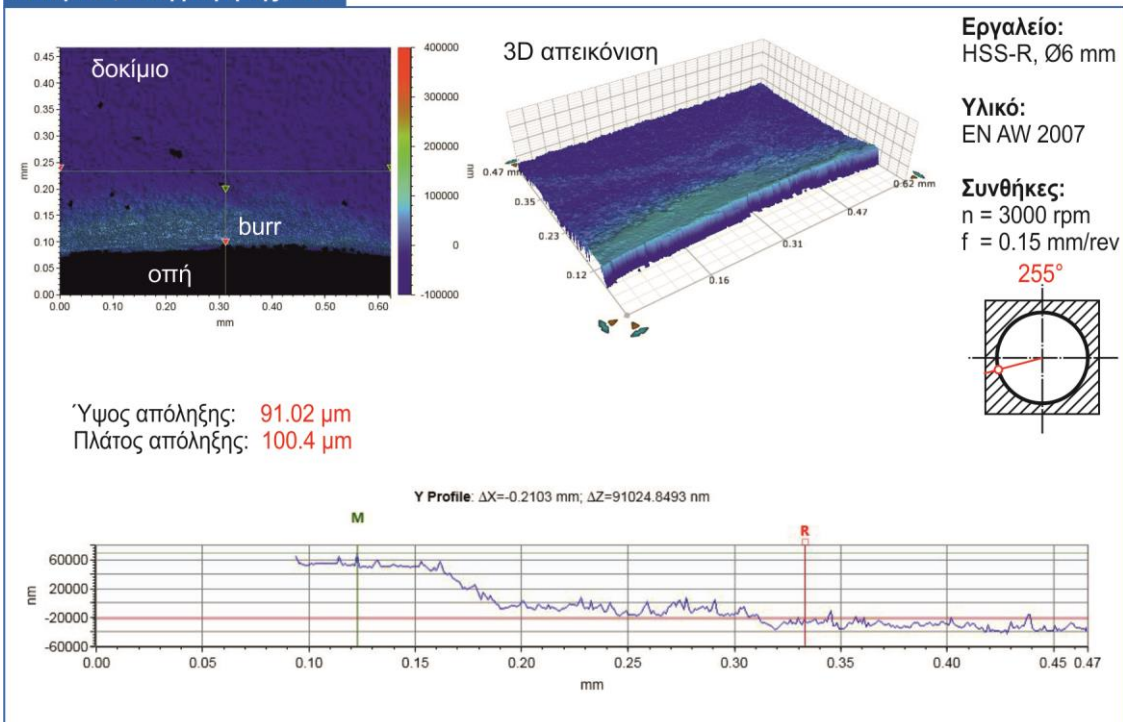




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 240°**



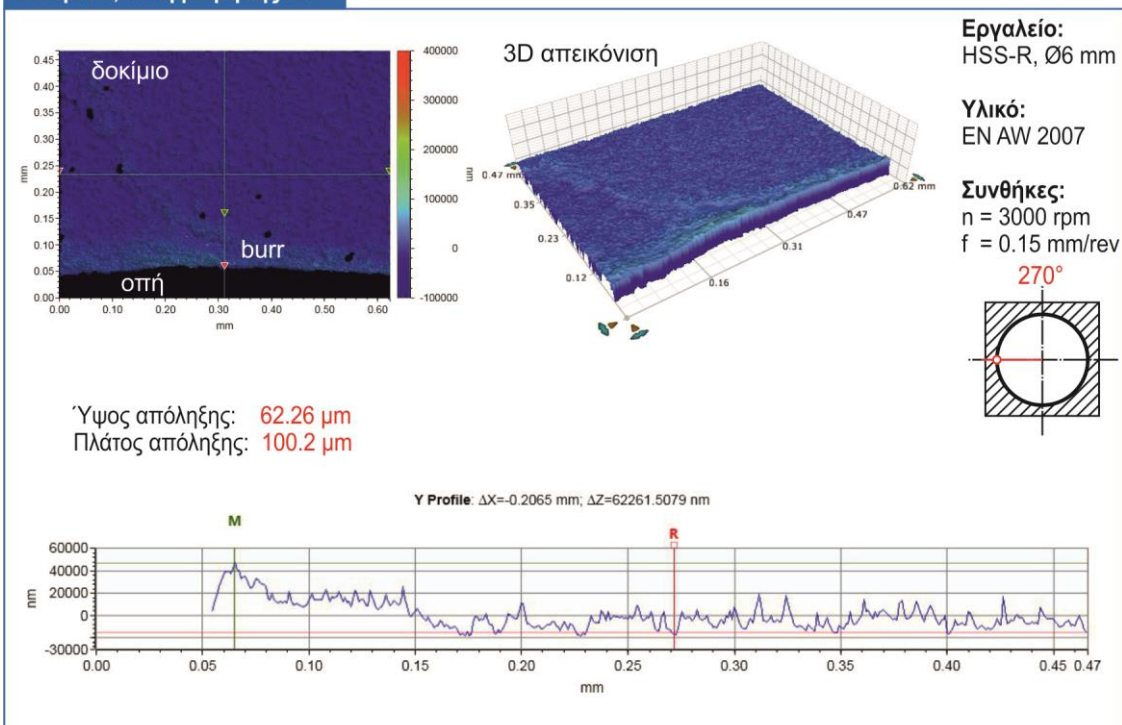
**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 255°**



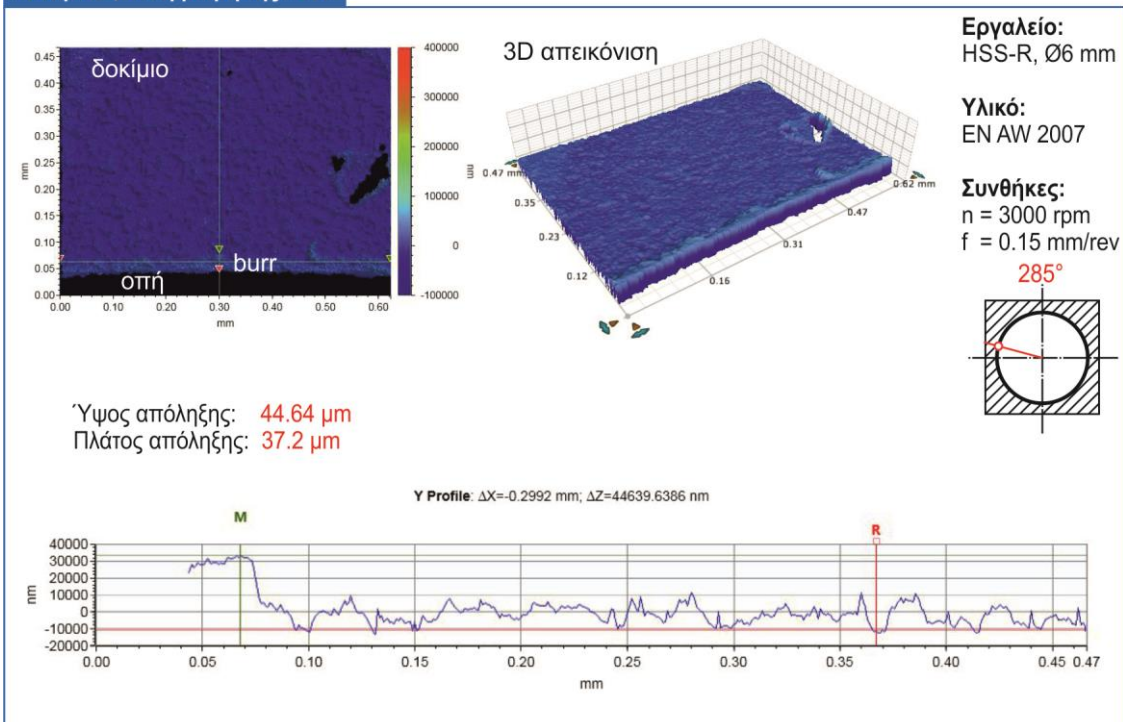




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 270°**



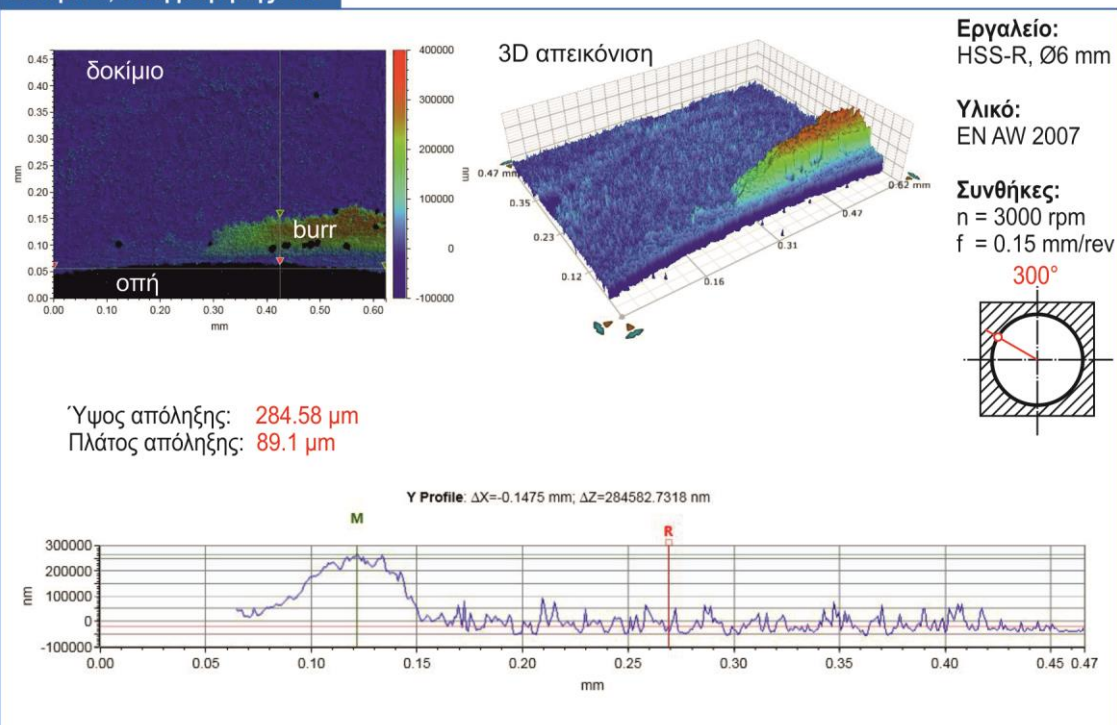
**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 285°**



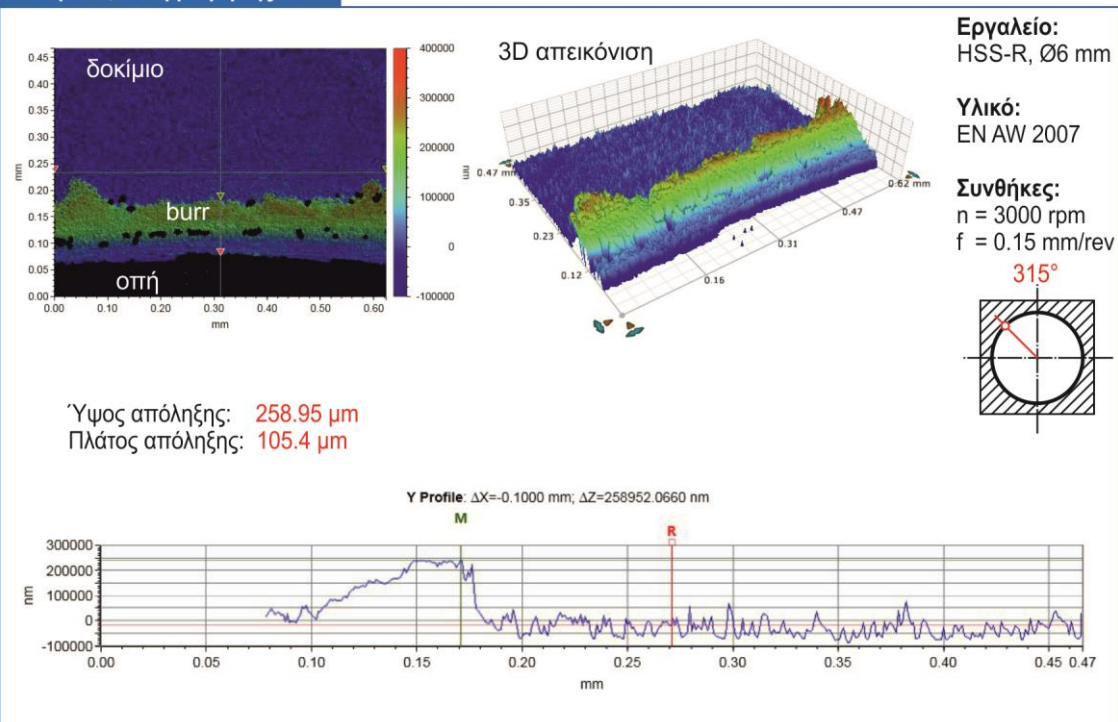




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 300°**

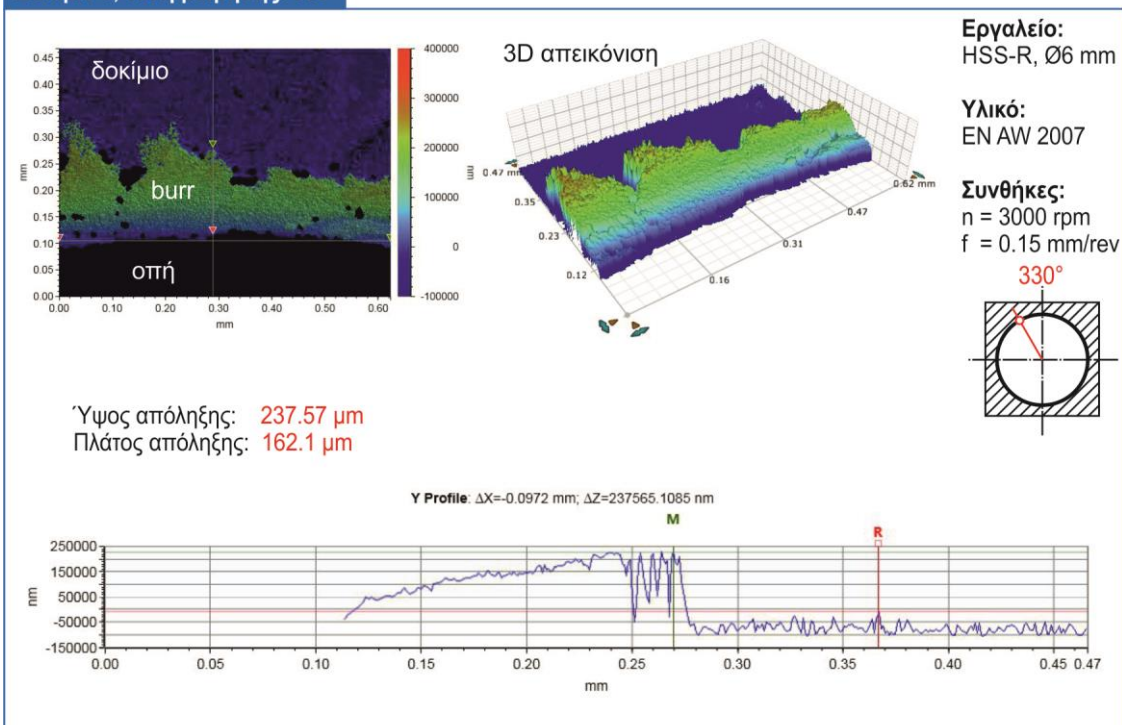


**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 315°**

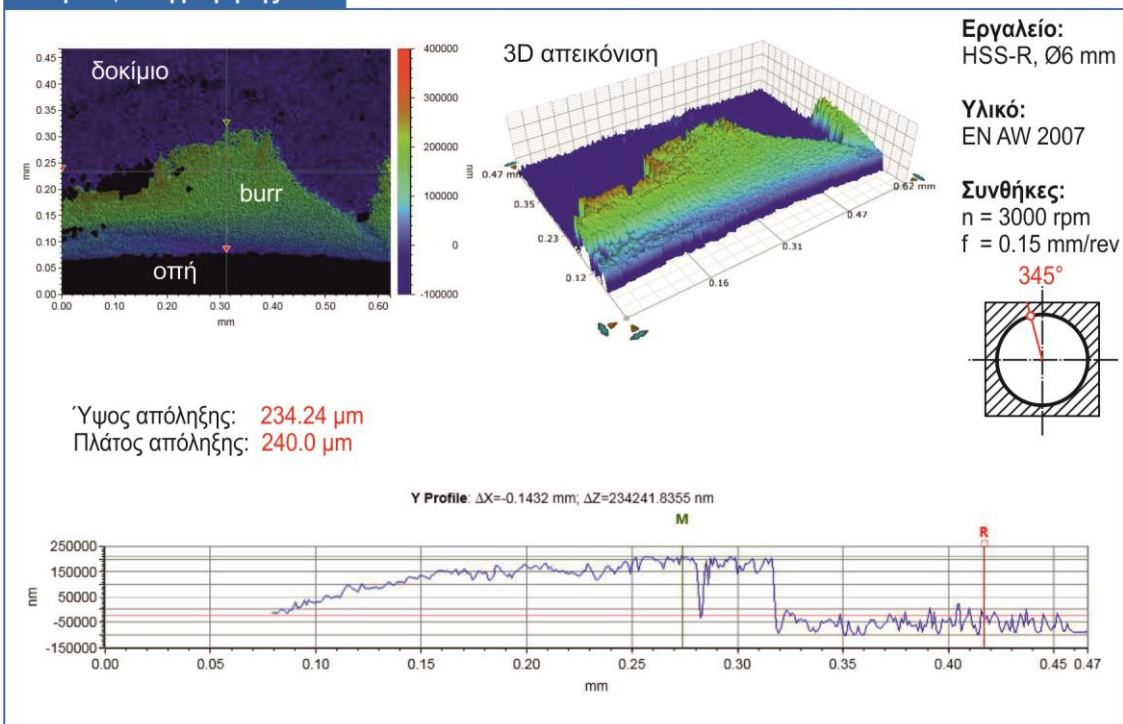




**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 330°**

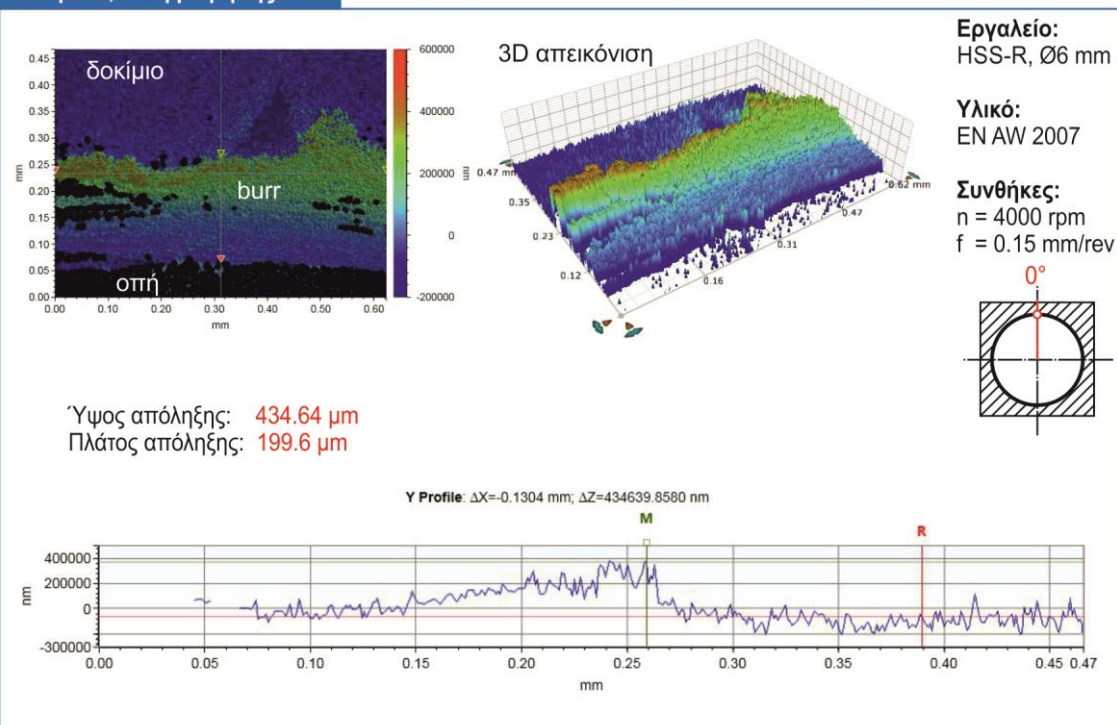


**Δοκίμιο 5, θέση μέτρησης: 345°**

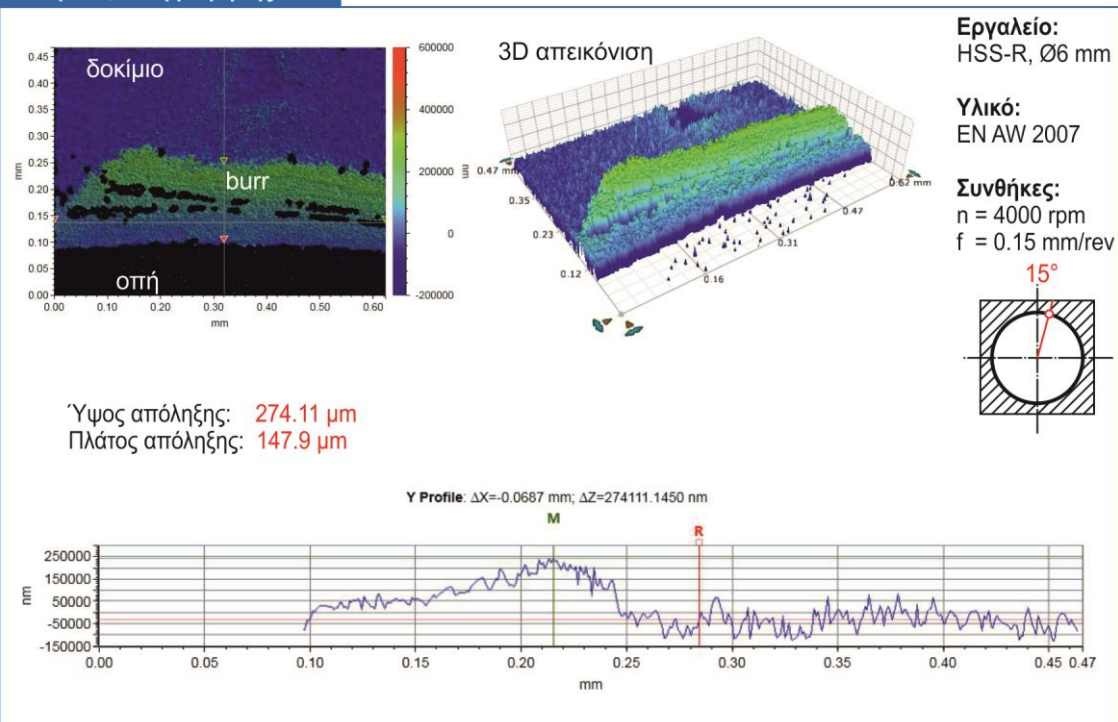




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 0°**



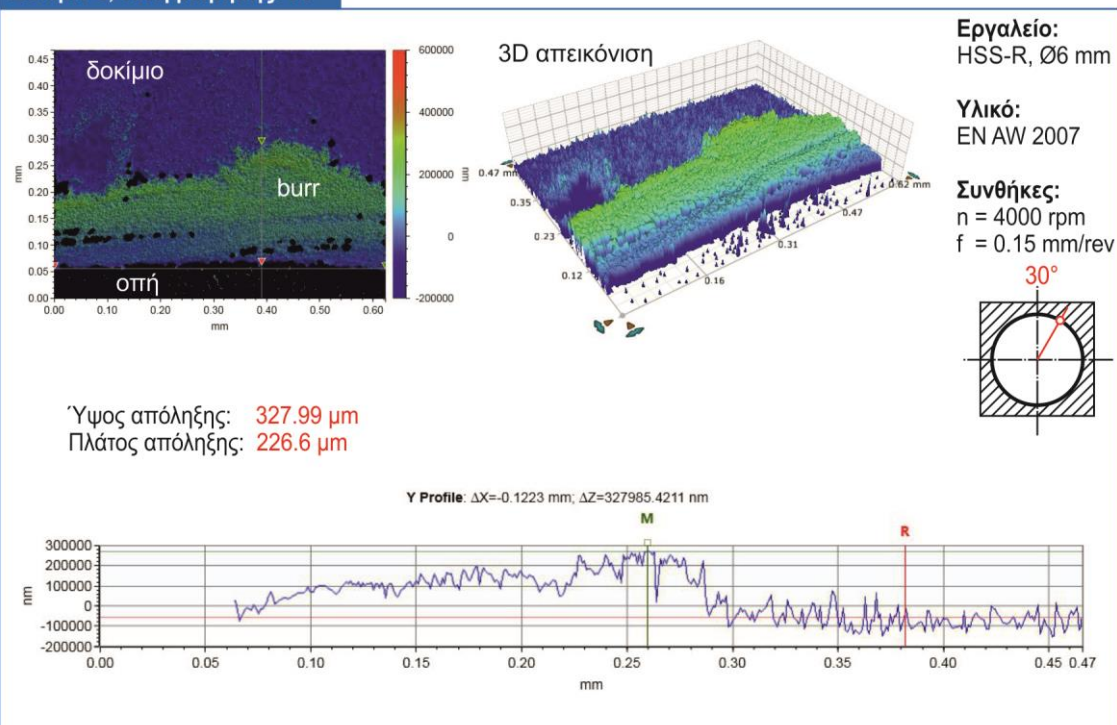
**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 15°**



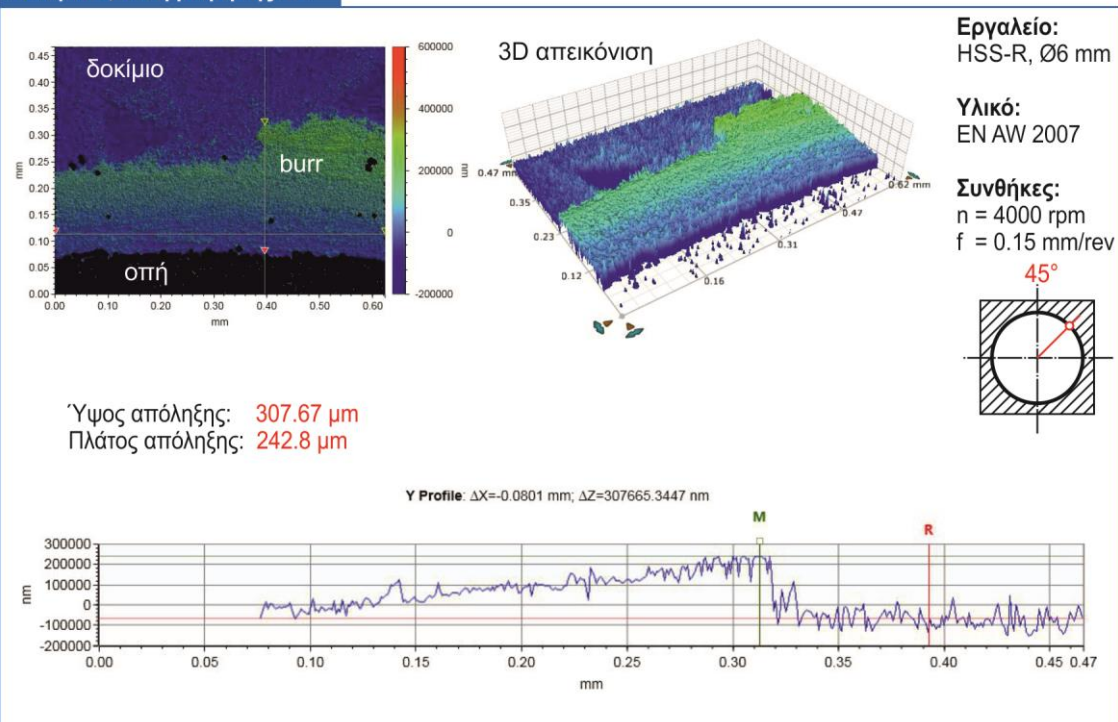




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 30°**



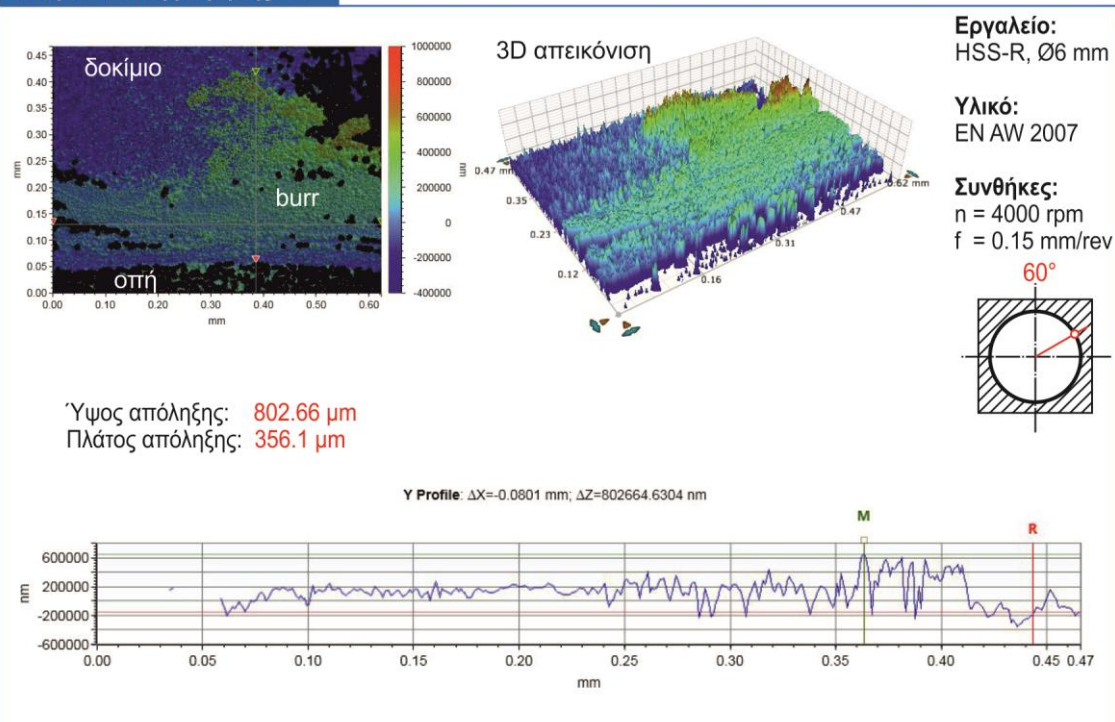
**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 45°**



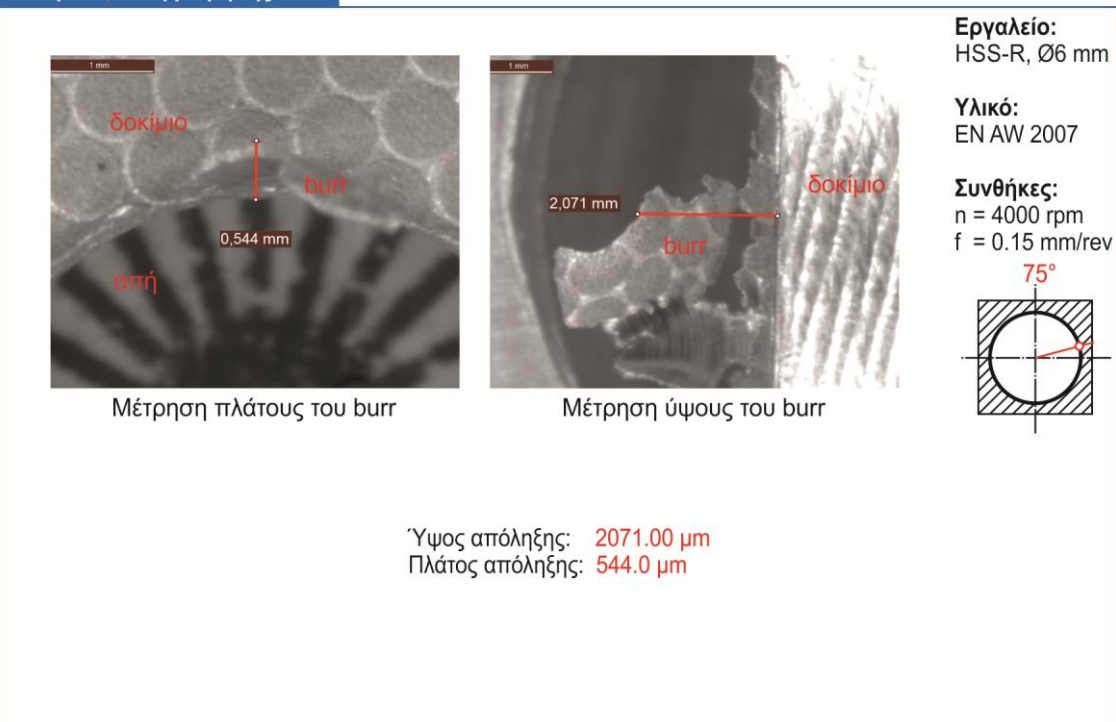




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 60°**

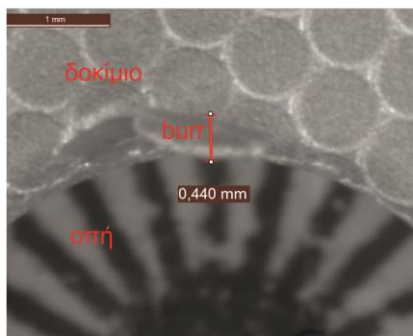


**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 75°**

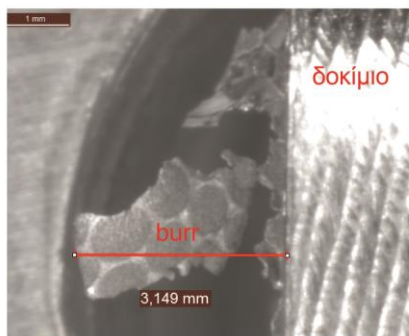




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 90°**



Μέτρηση πλάτους του burr

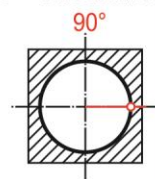


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

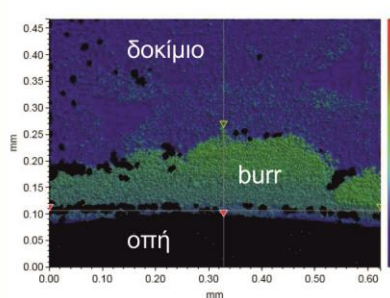
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$

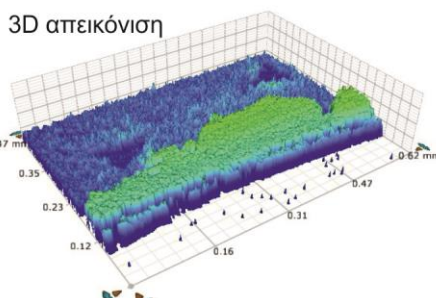


Ύψος απόληξης: 3149.00  $\mu\text{m}$   
Πλάτος απόληξης: 440.0  $\mu\text{m}$

**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 105°**



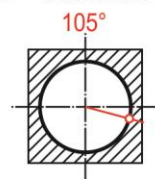
3D απεικόνιση



**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

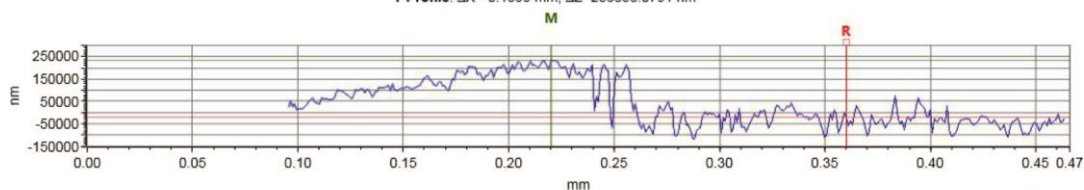
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$



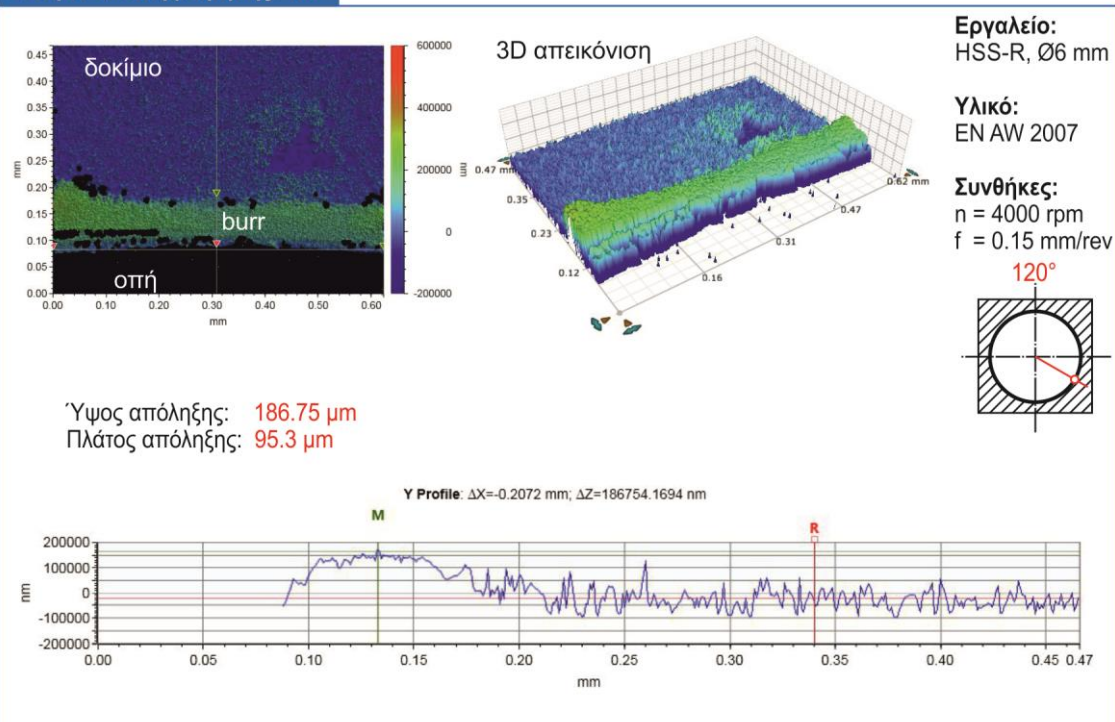
Ύψος απόληξης: 256.86  $\mu\text{m}$   
Πλάτος απόληξης: 167.4  $\mu\text{m}$

Y Profile:  $\Delta X = -0.1399 \text{ mm}$ ;  $\Delta Z = 256858.0791 \text{ nm}$

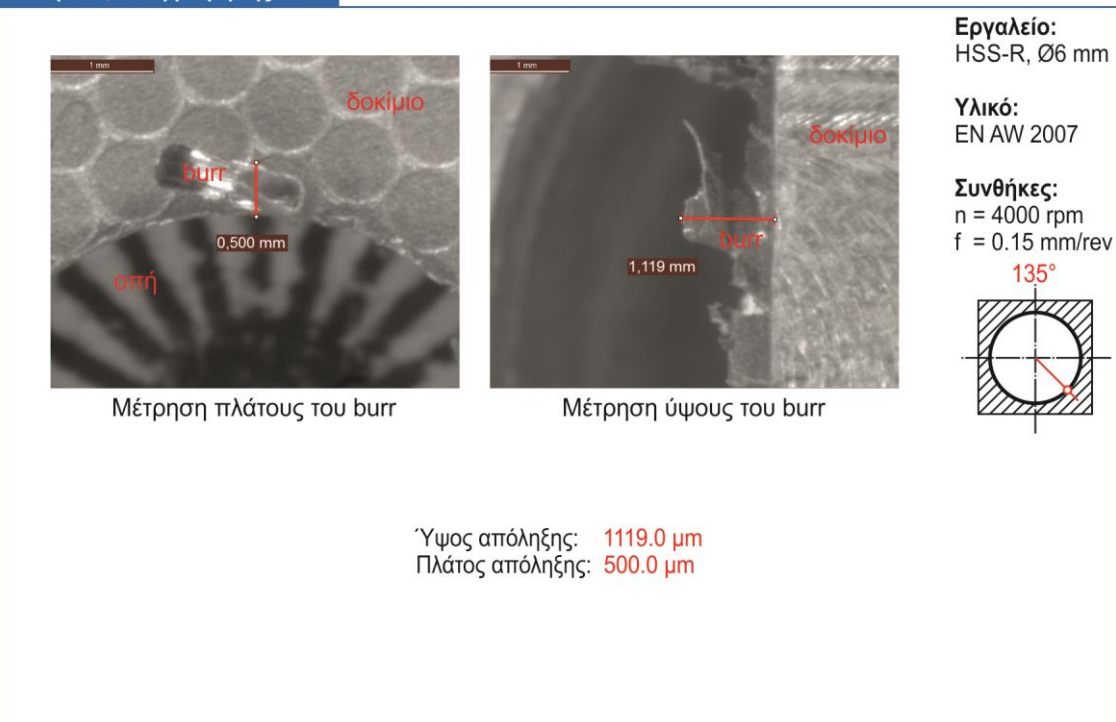




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 120°**



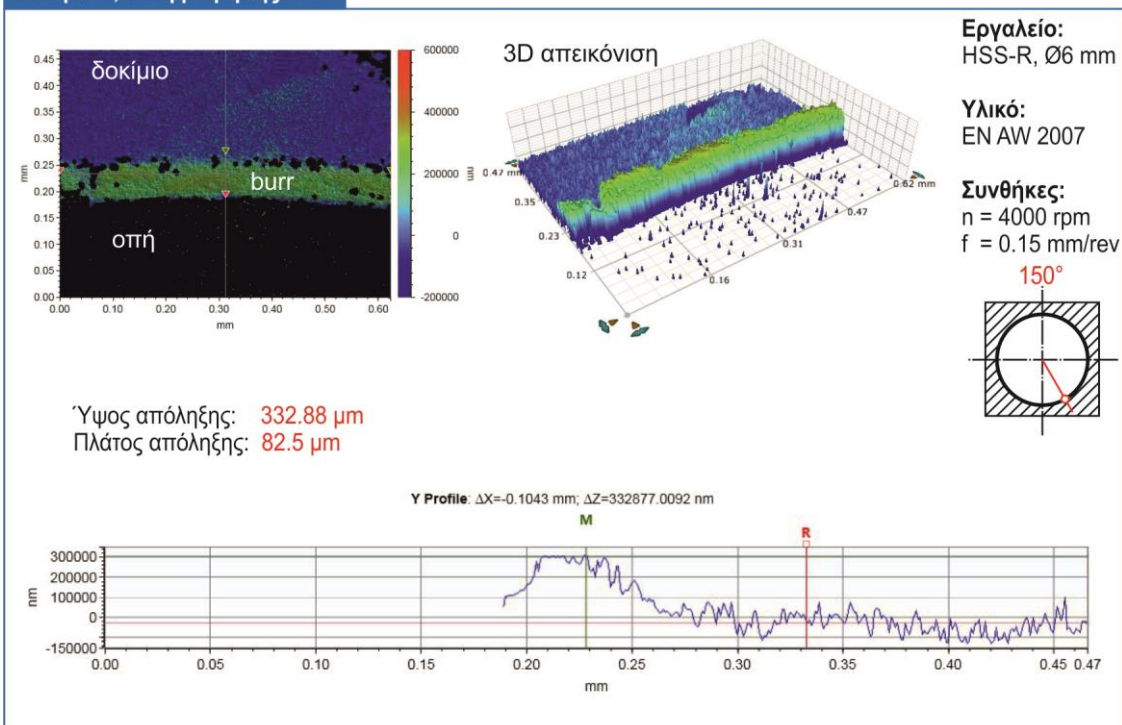
**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 135°**



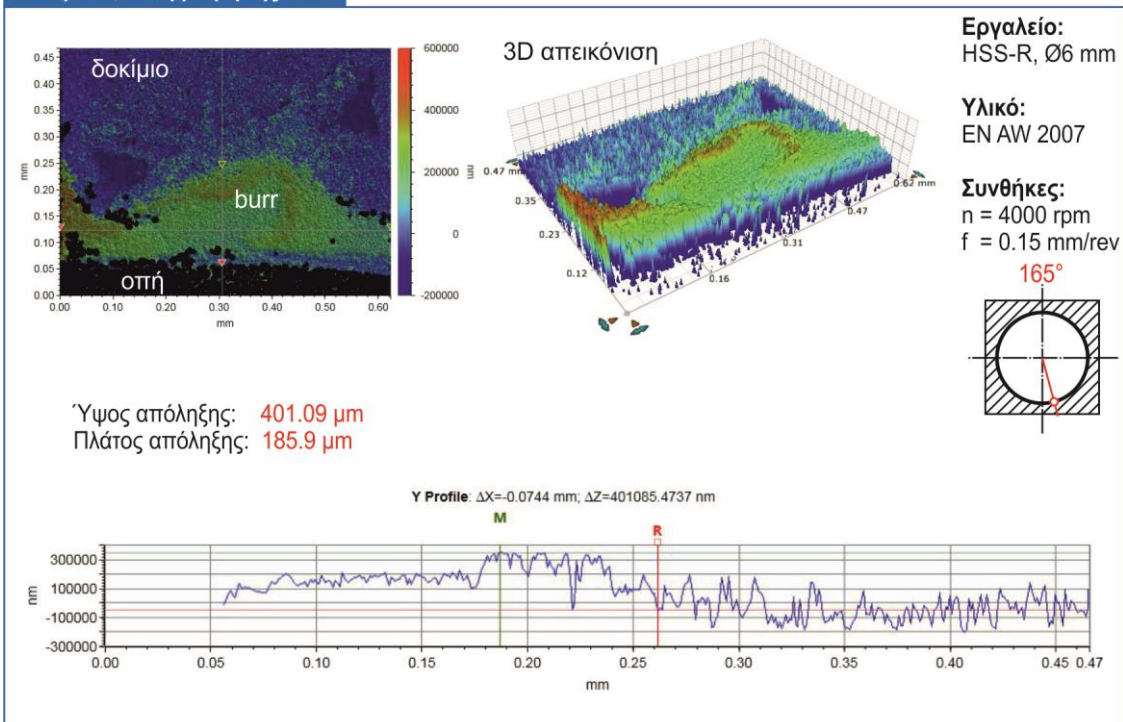




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 150°**



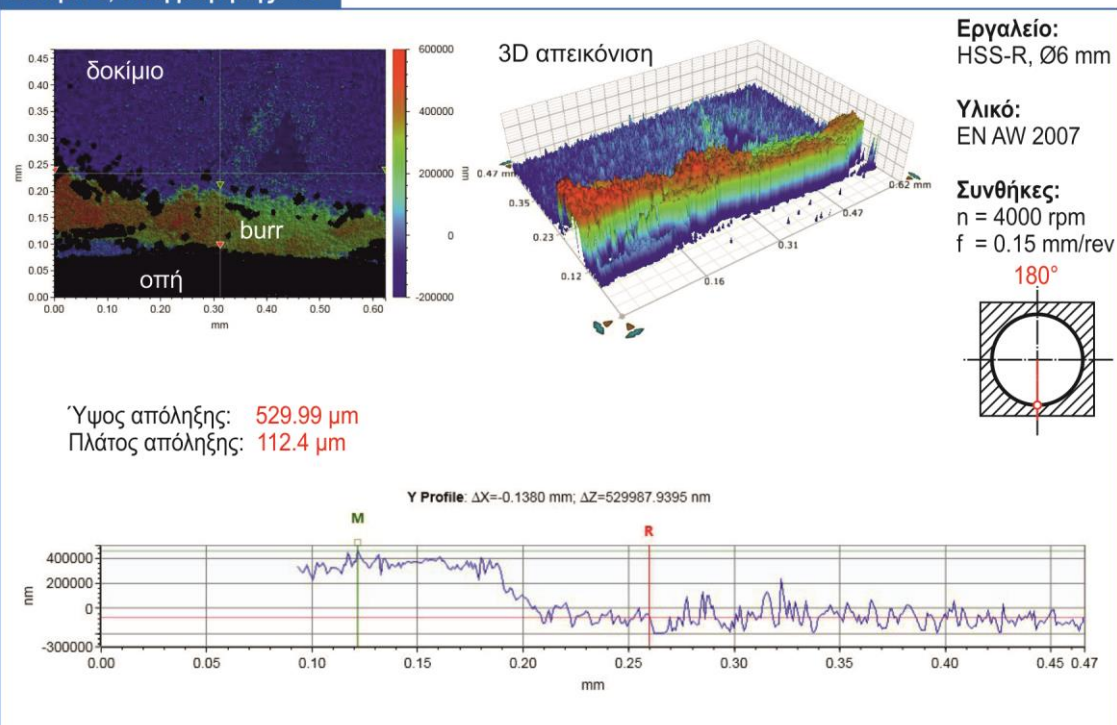
**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 165°**



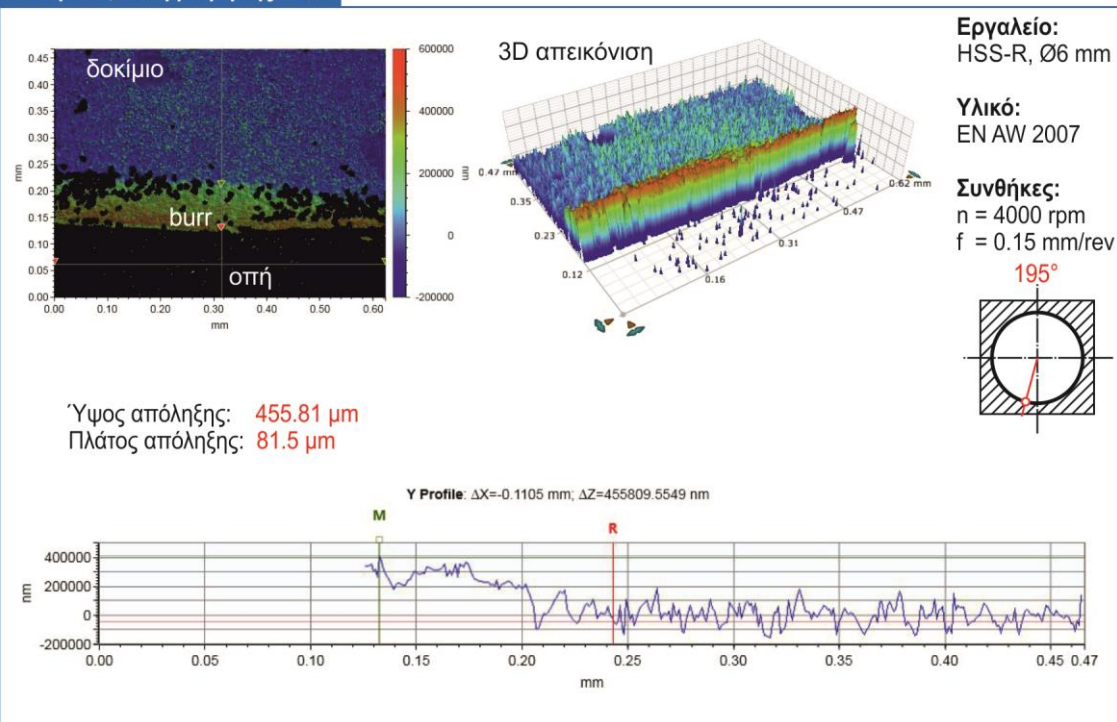




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 180°**

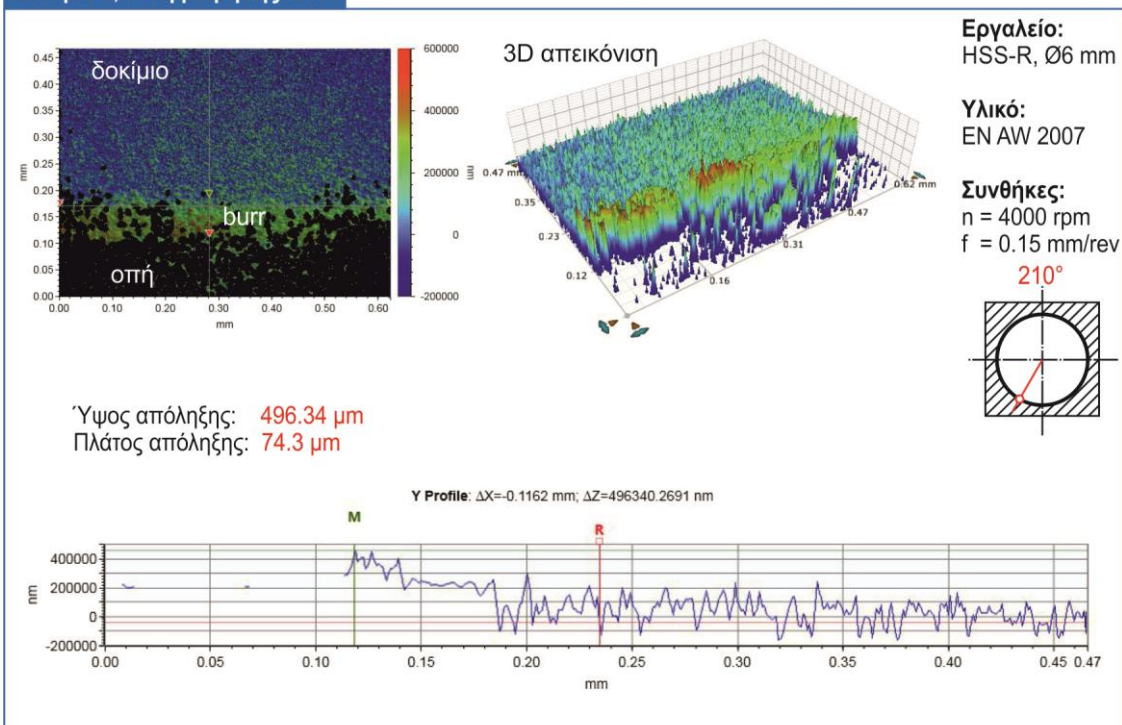


**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 195°**

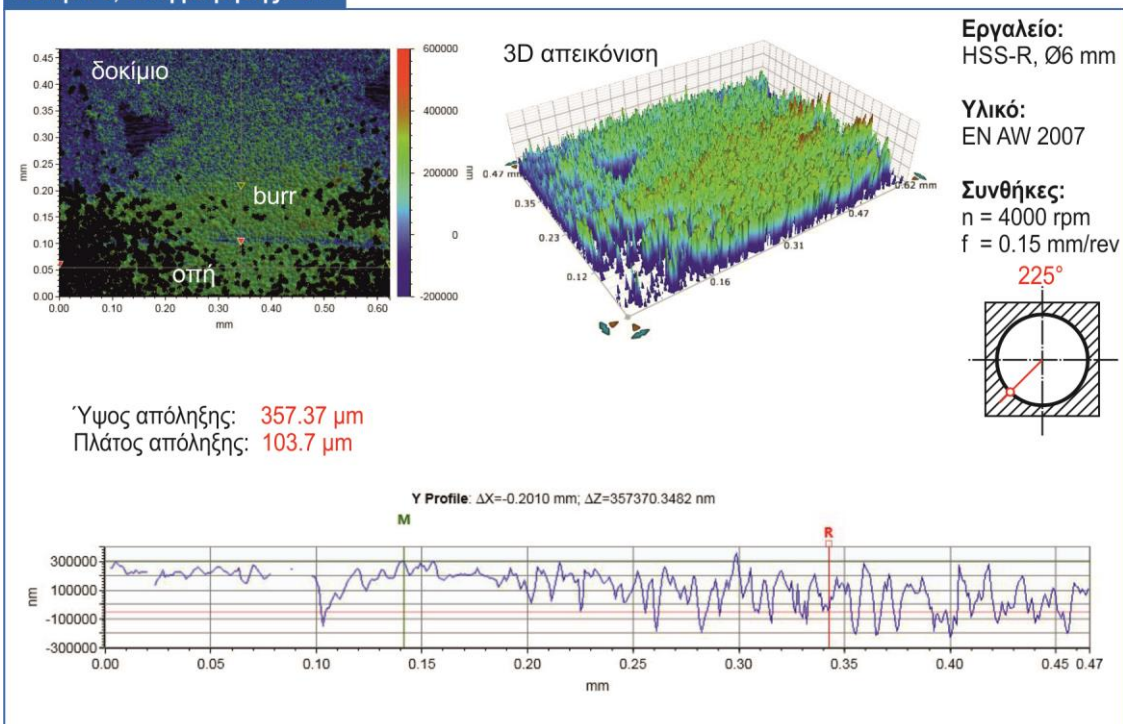




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 210°**



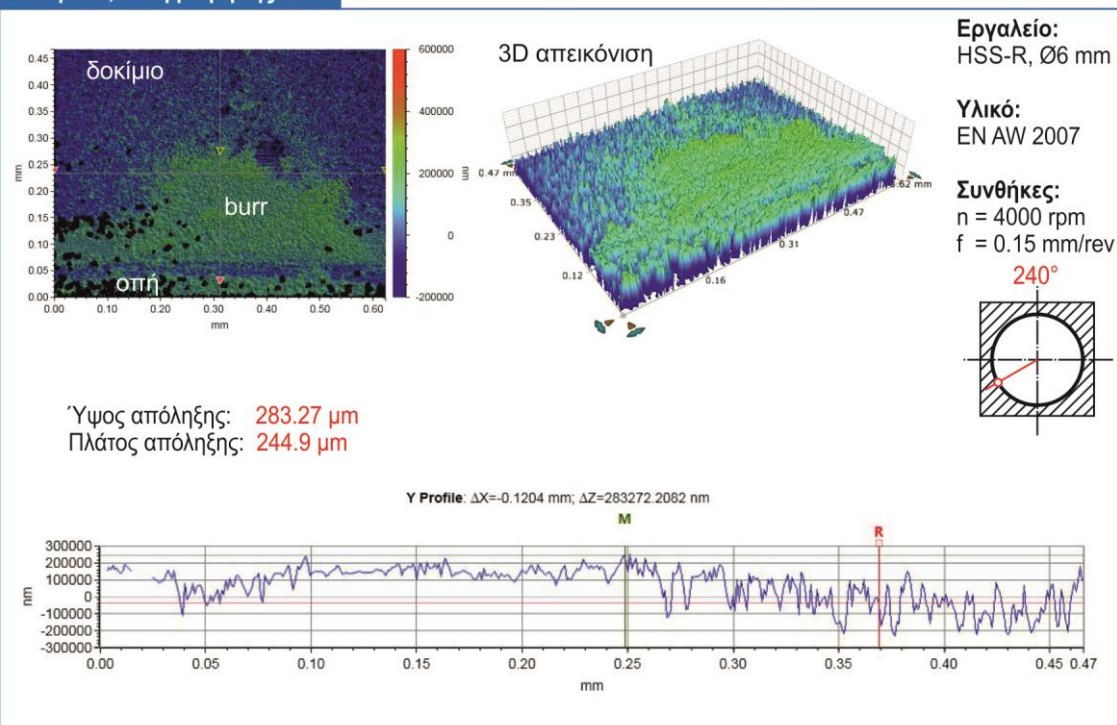
**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 225°**



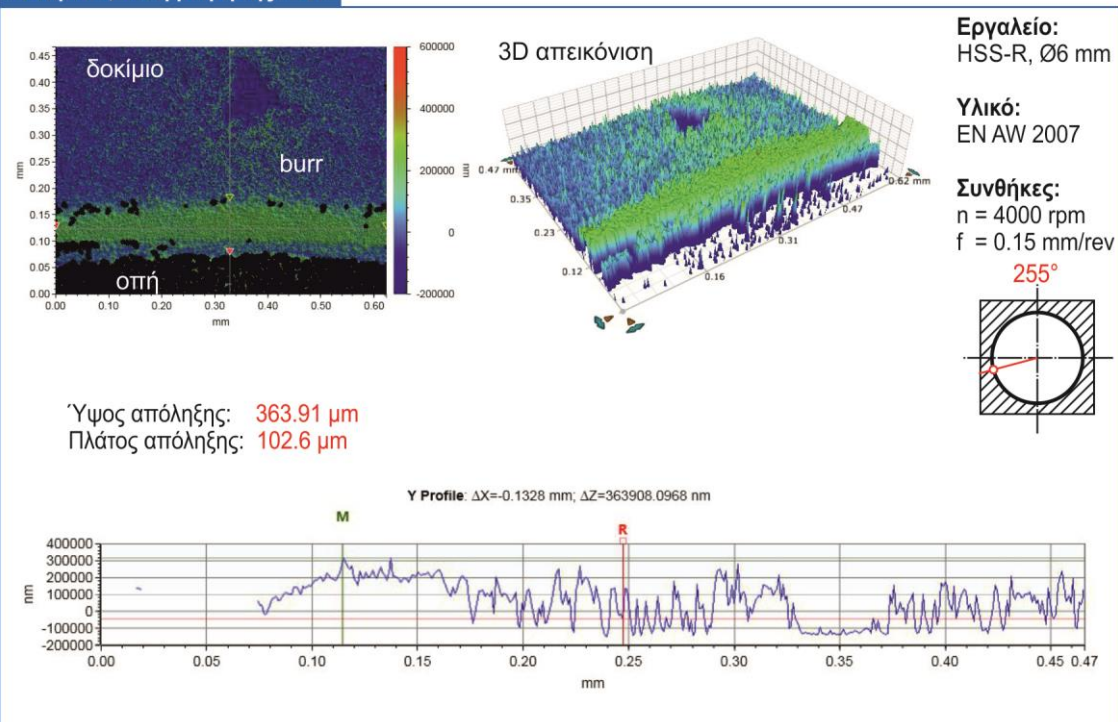




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 240°**

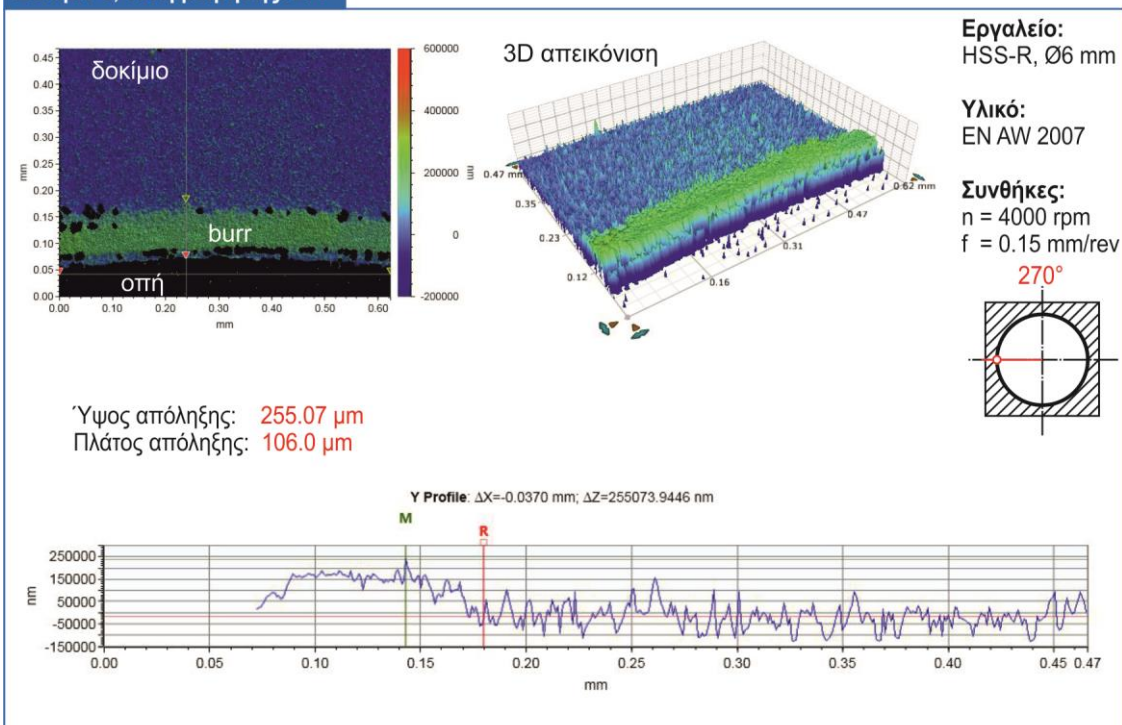


**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 255°**

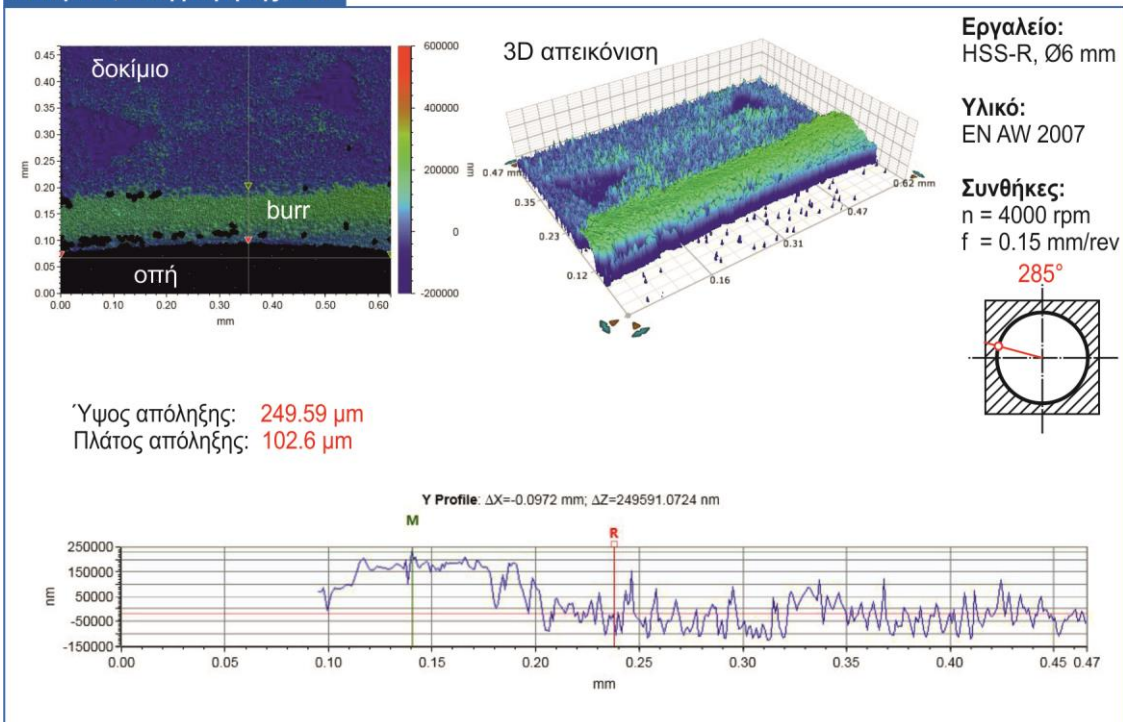




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 270°**



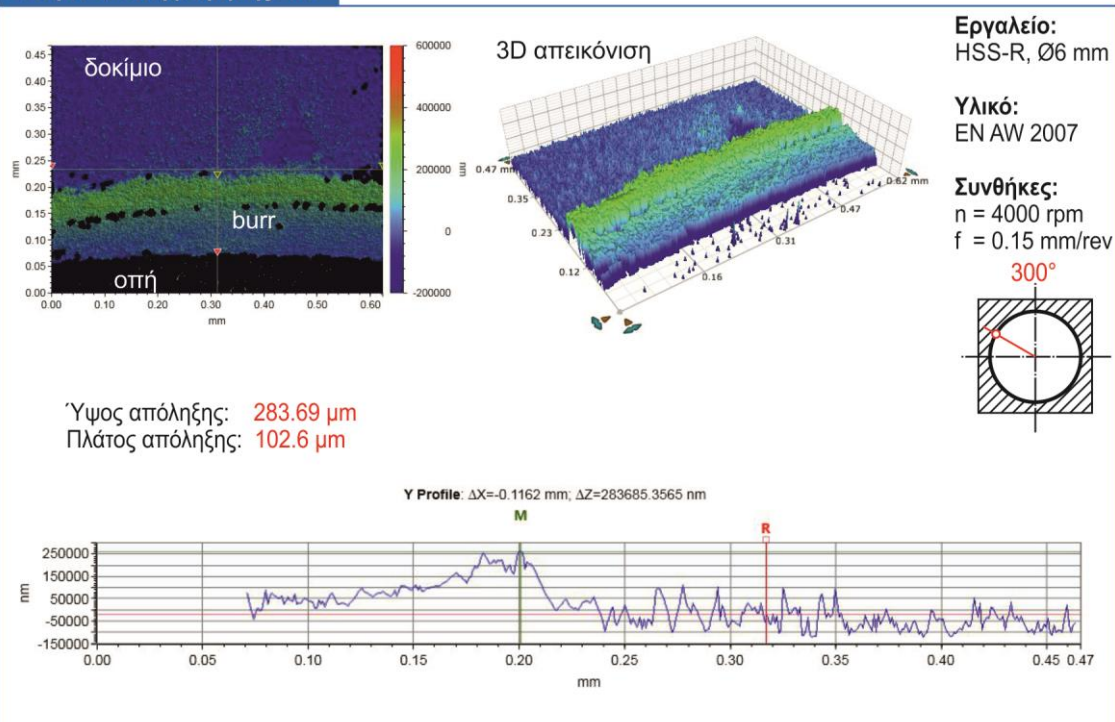
**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 285°**



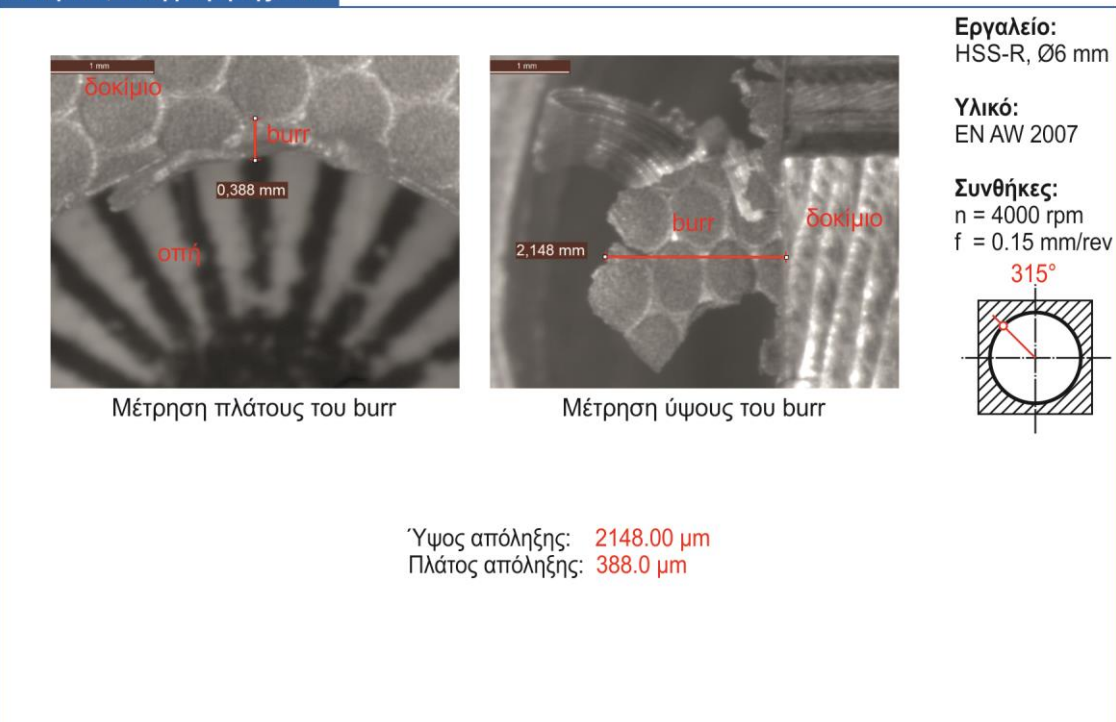




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 300°**

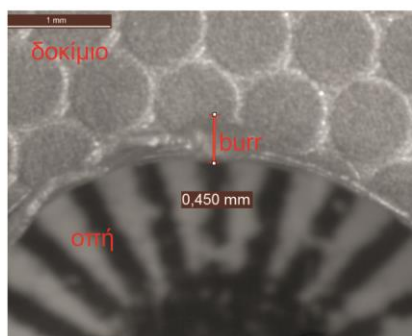


**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 315°**

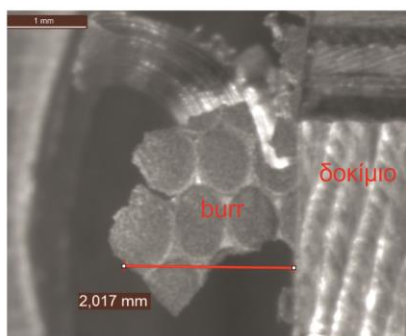




**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 330°**



Μέτρηση πλάτους του burr

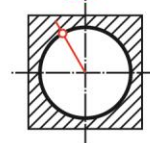


Μέτρηση ύψους του burr

**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

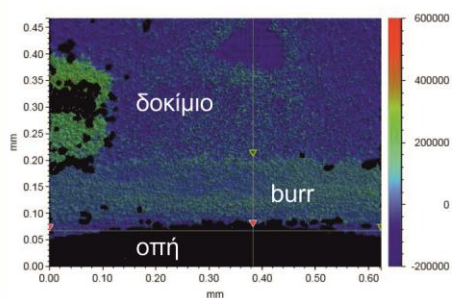
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$   
**330°**

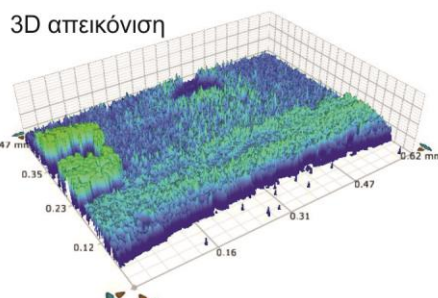


Ύψος απόληξης: **2017.00  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **450.0  $\mu\text{m}$**

**Δοκίμιο 6, θέση μέτρησης: 345°**



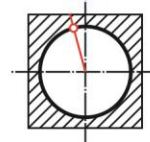
3D απεικόνιση



**Εργαλείο:**  
HSS-R, Ø6 mm

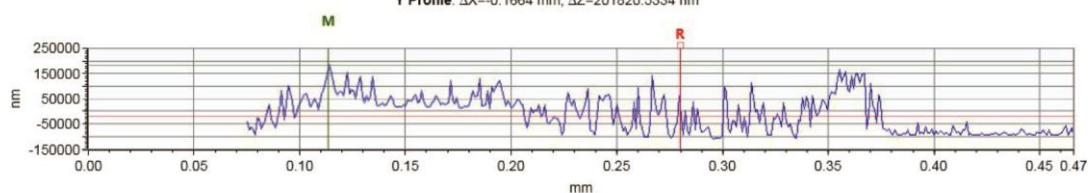
**Υλικό:**  
EN AW 2007

**Συνθήκες:**  
 $n = 4000 \text{ rpm}$   
 $f = 0.15 \text{ mm/rev}$   
**345°**



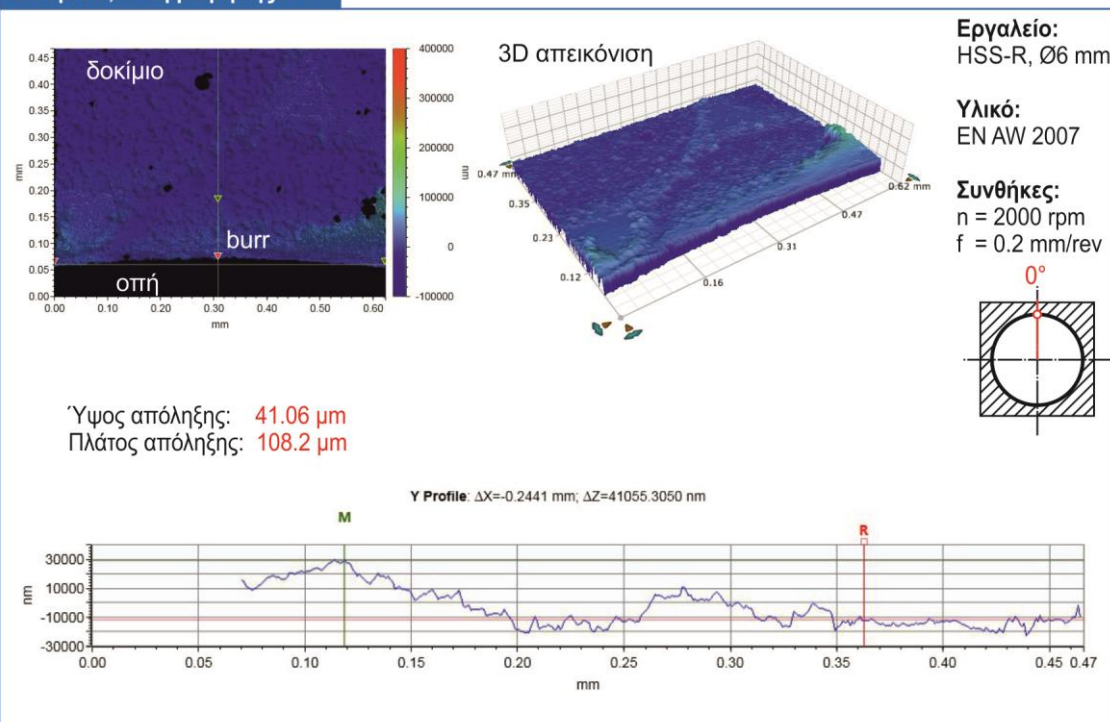
Ύψος απόληξης: **201.82  $\mu\text{m}$**   
Πλάτος απόληξης: **132.3  $\mu\text{m}$**

Y Profile:  $\Delta X = -0.1664 \text{ mm}$ ;  $\Delta Z = 201820.5334 \text{ nm}$

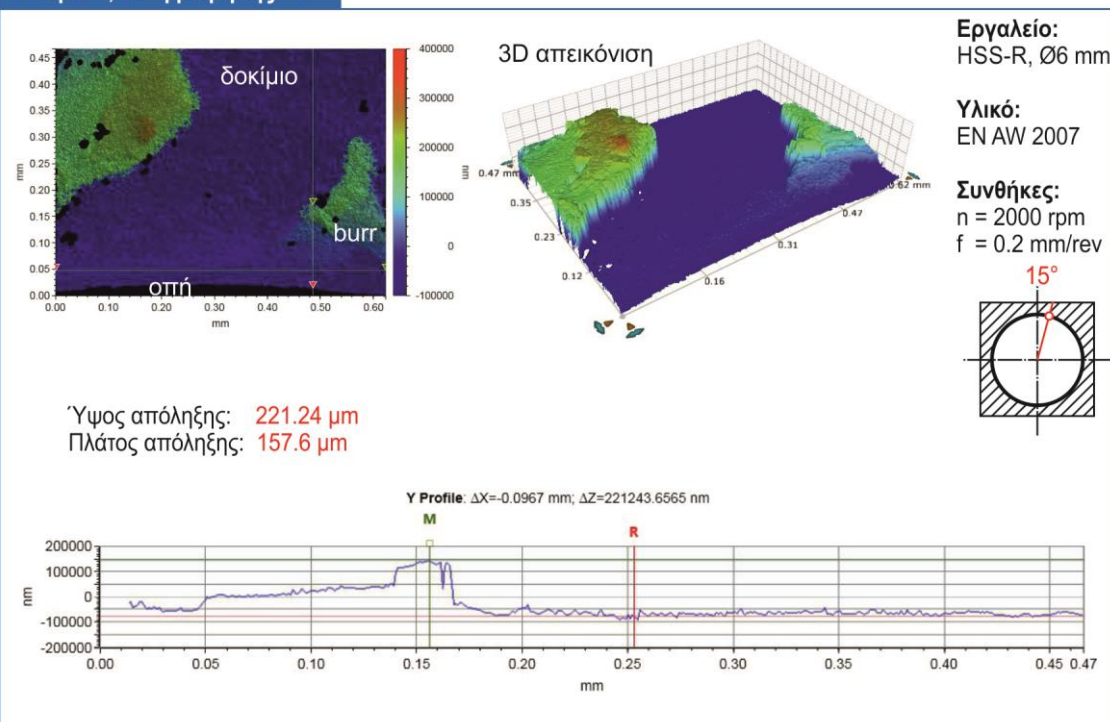




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 0°**



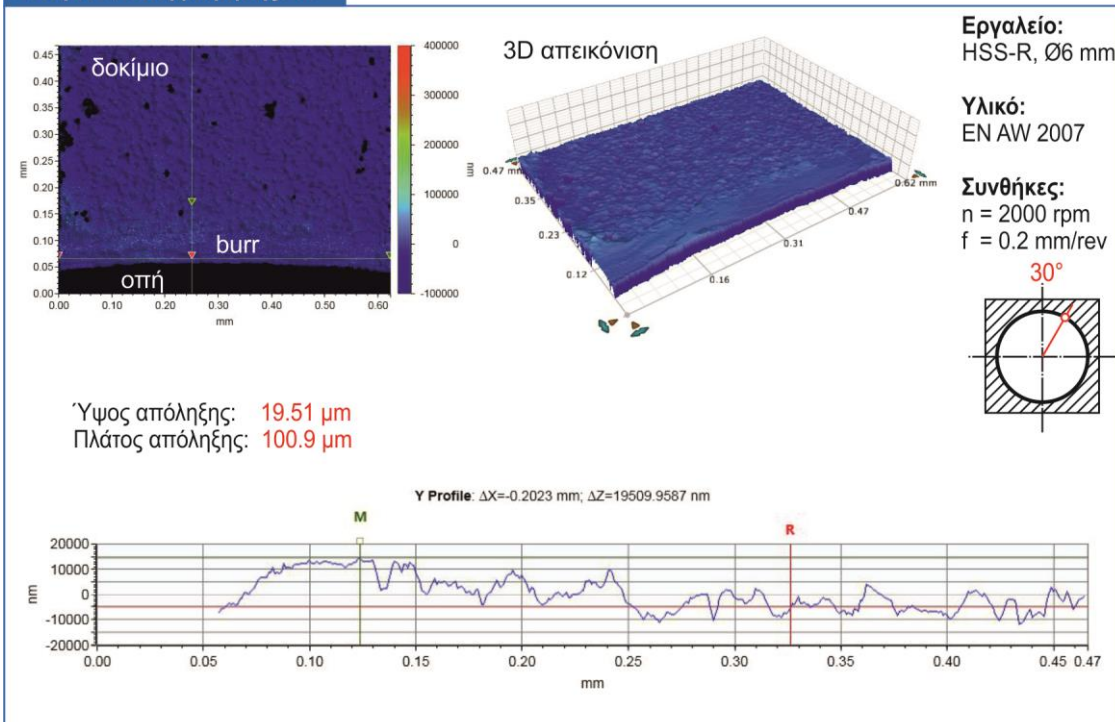
**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 15°**



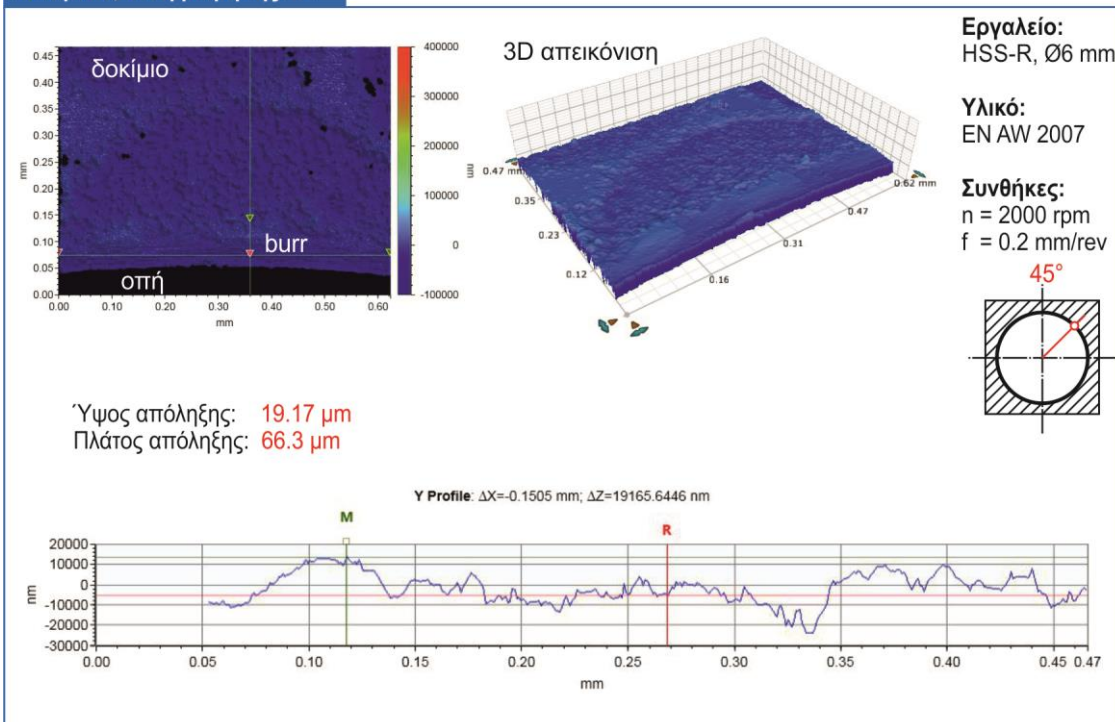




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 30°**



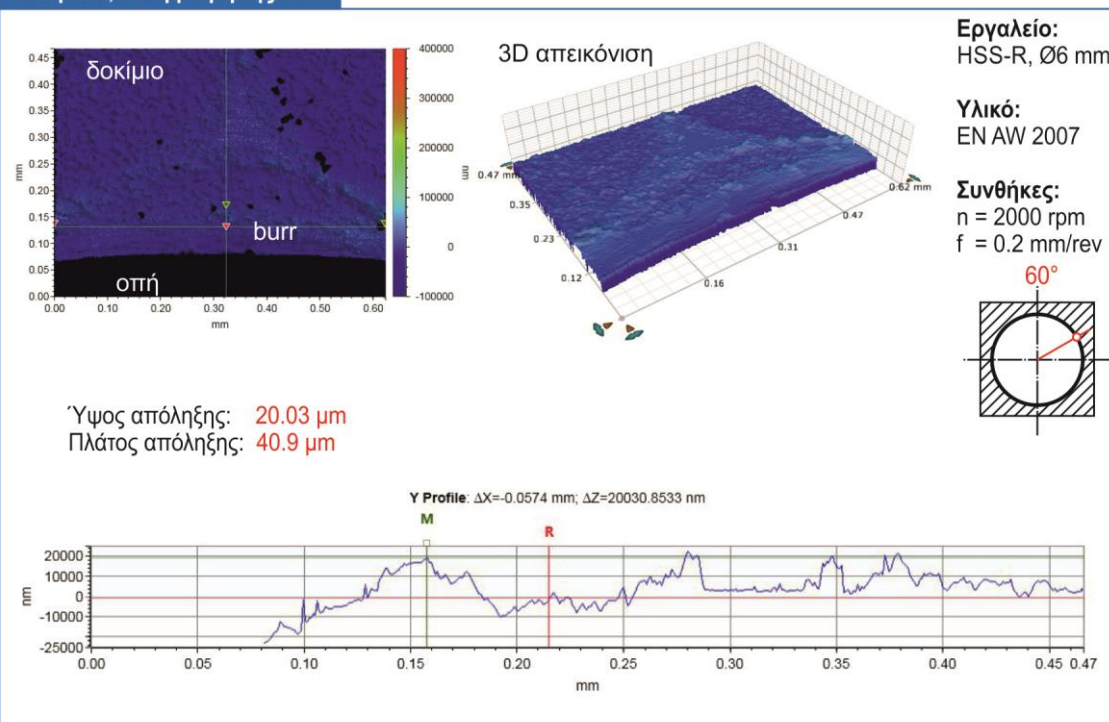
**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 45°**



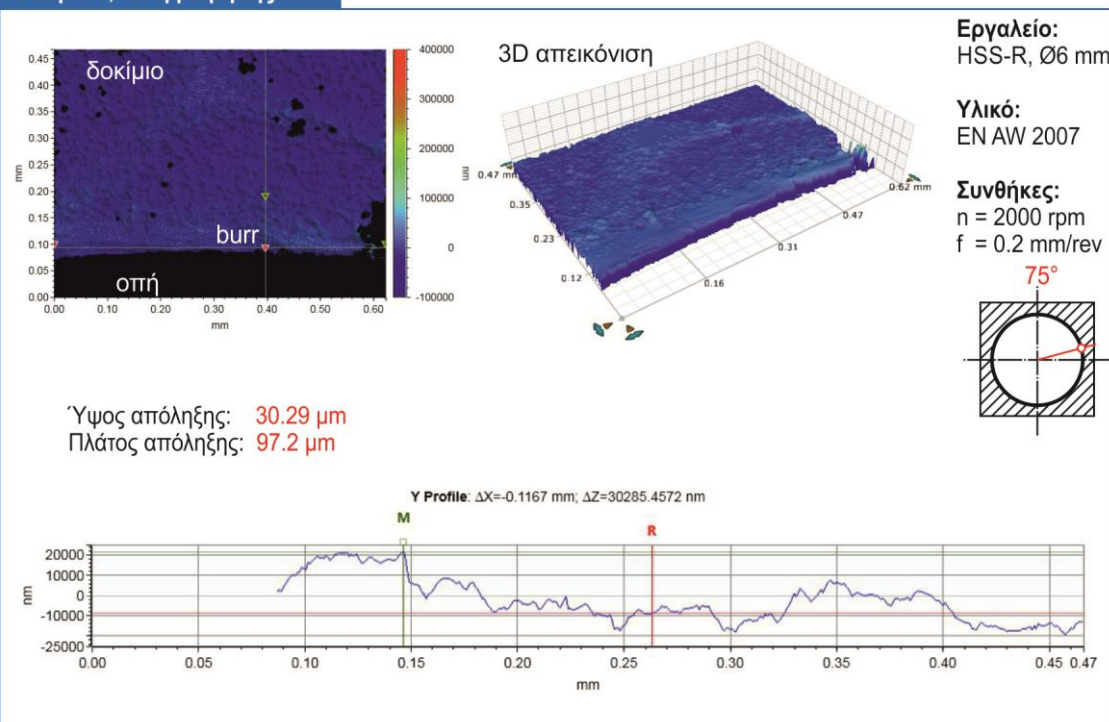




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 60°**

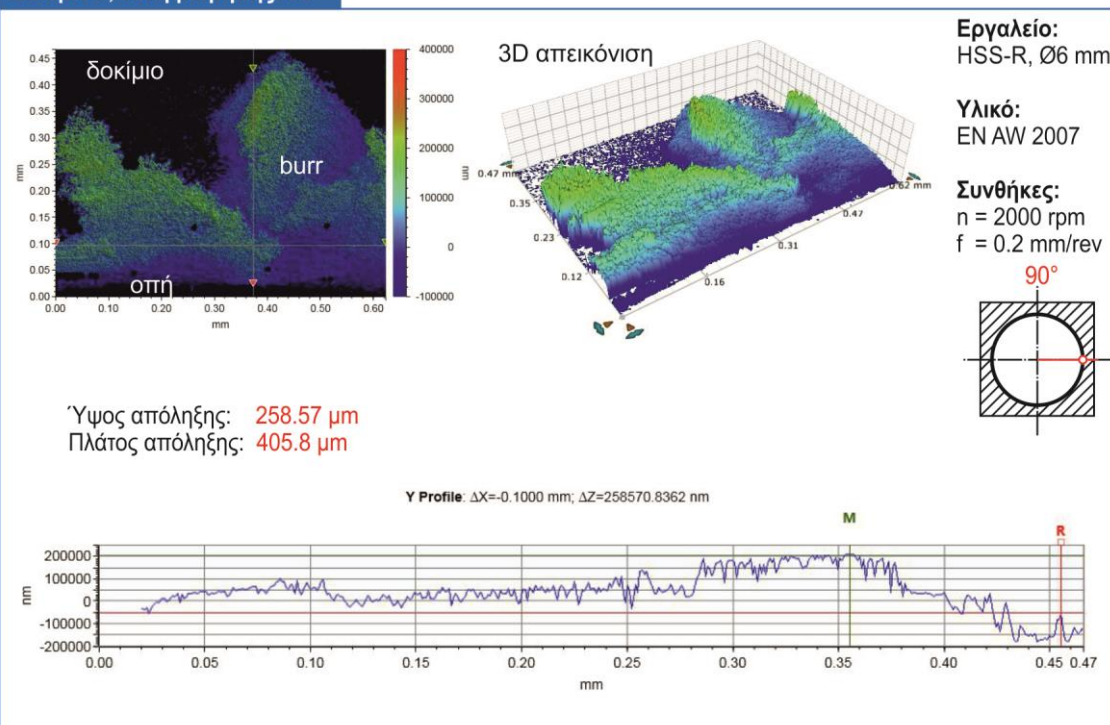


**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 75°**

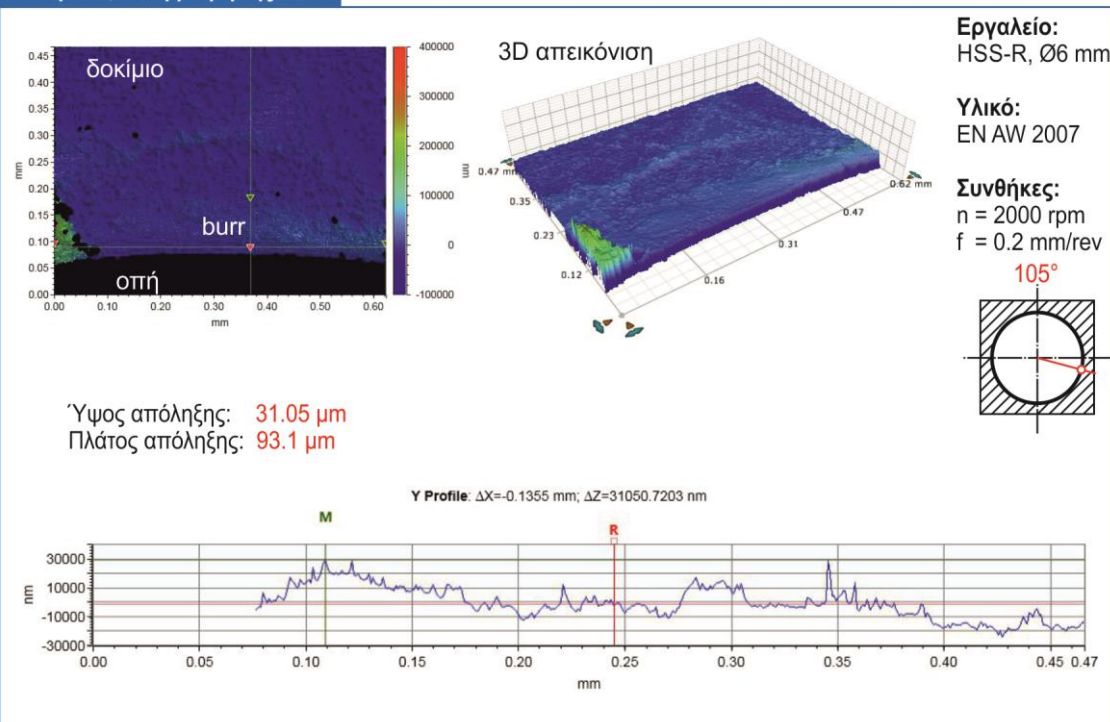




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 90°**

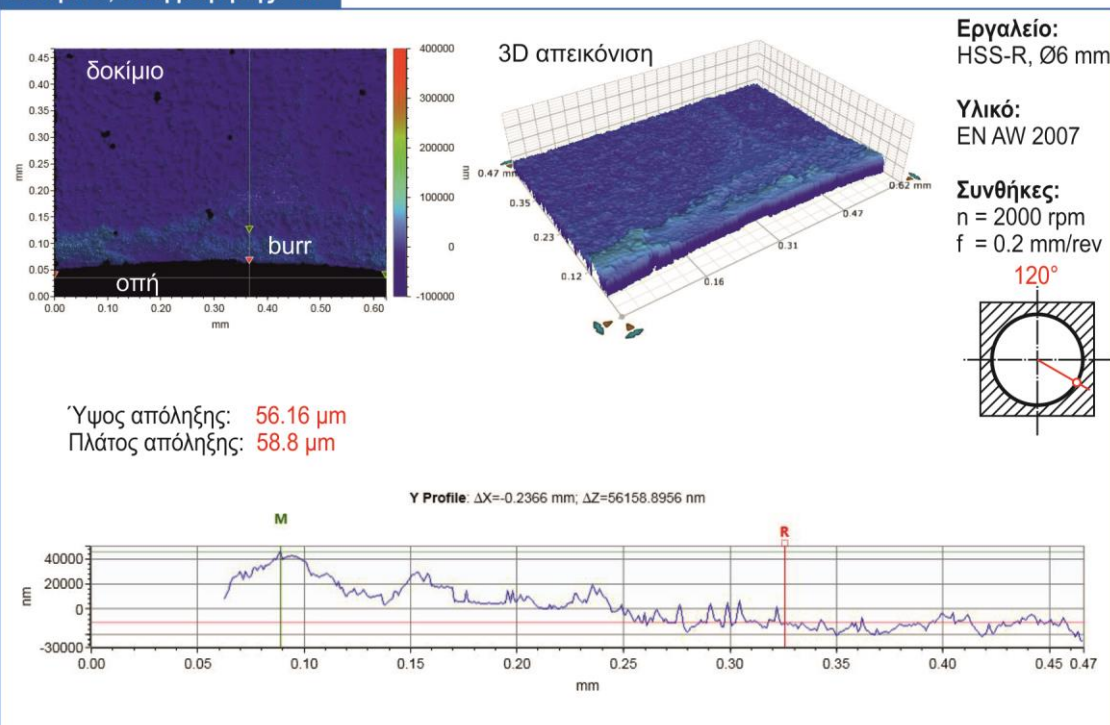


**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 105°**

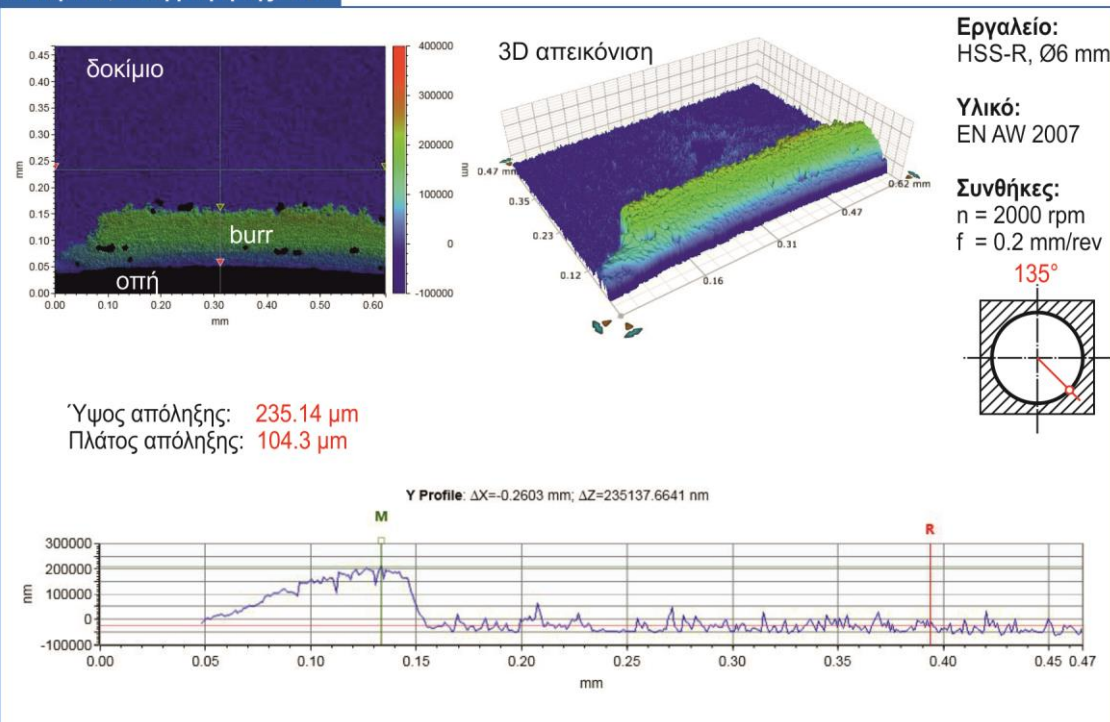




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 120°**



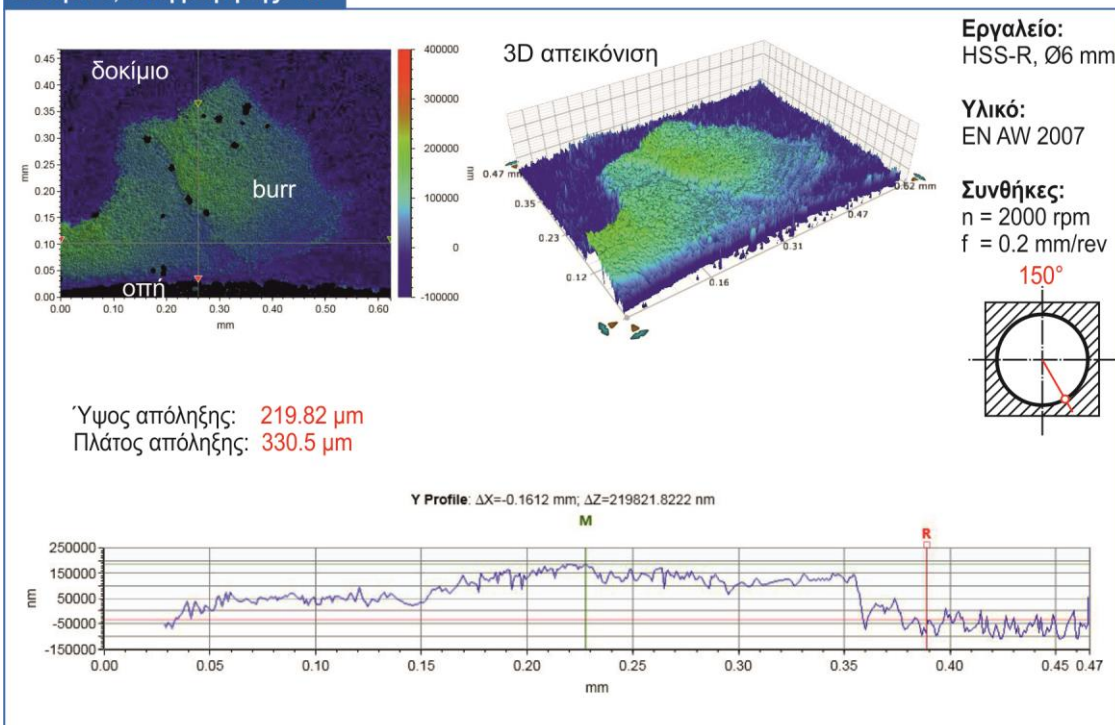
**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 135°**



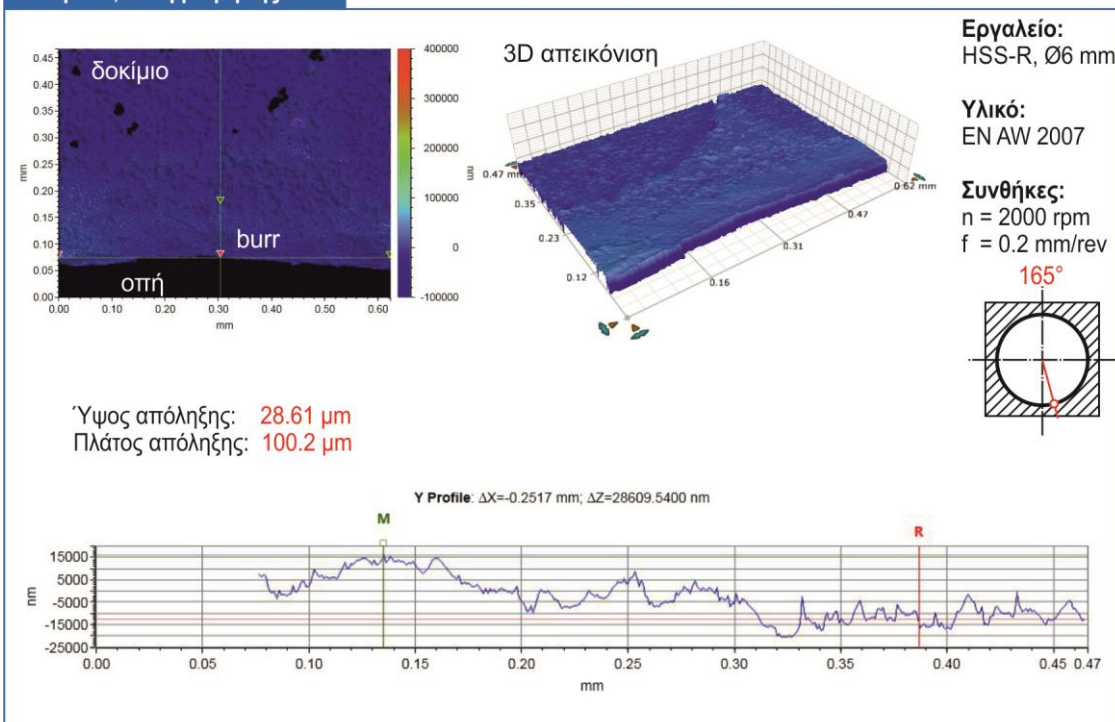




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 150°**



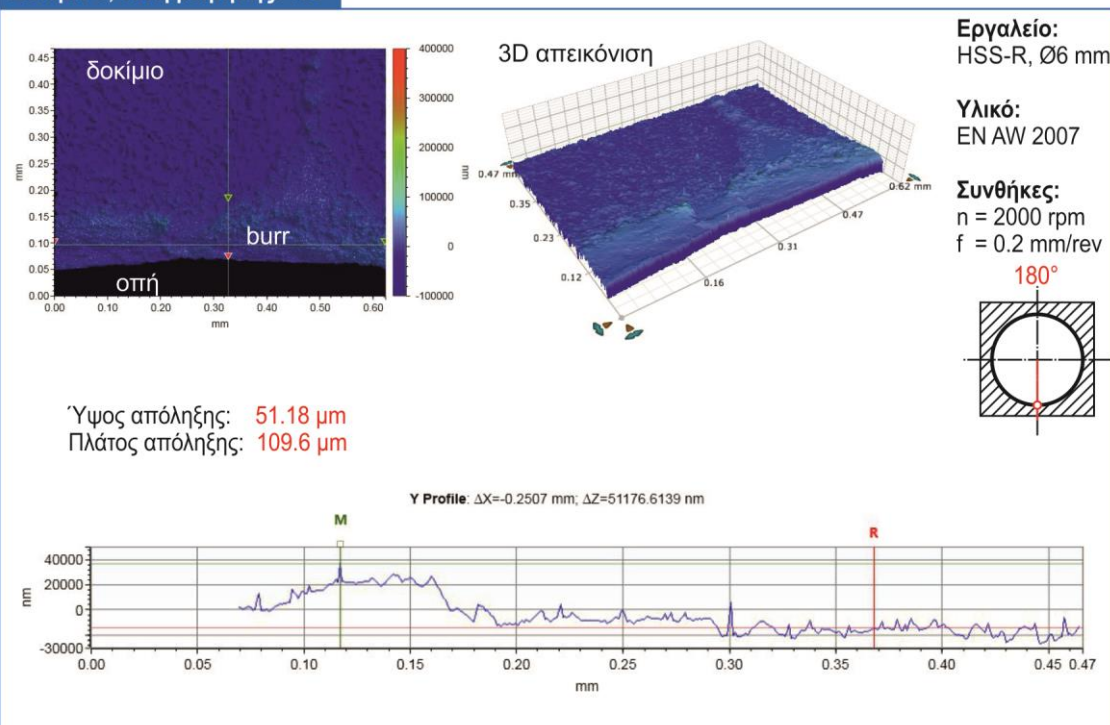
**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 165°**



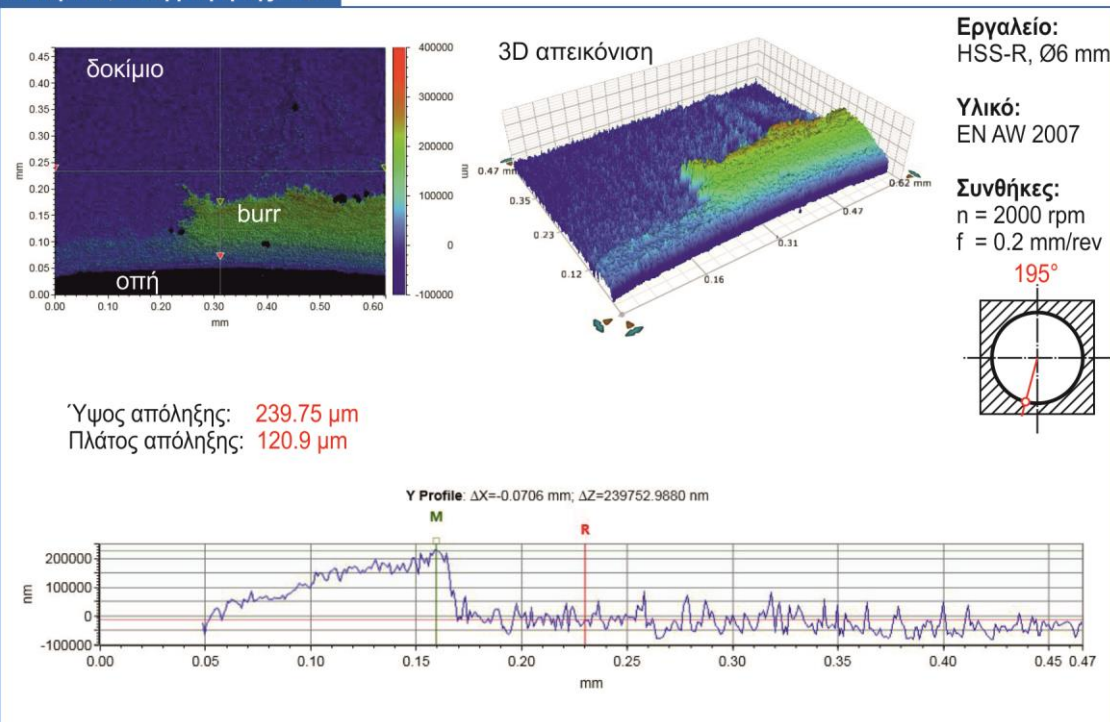




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 180°**

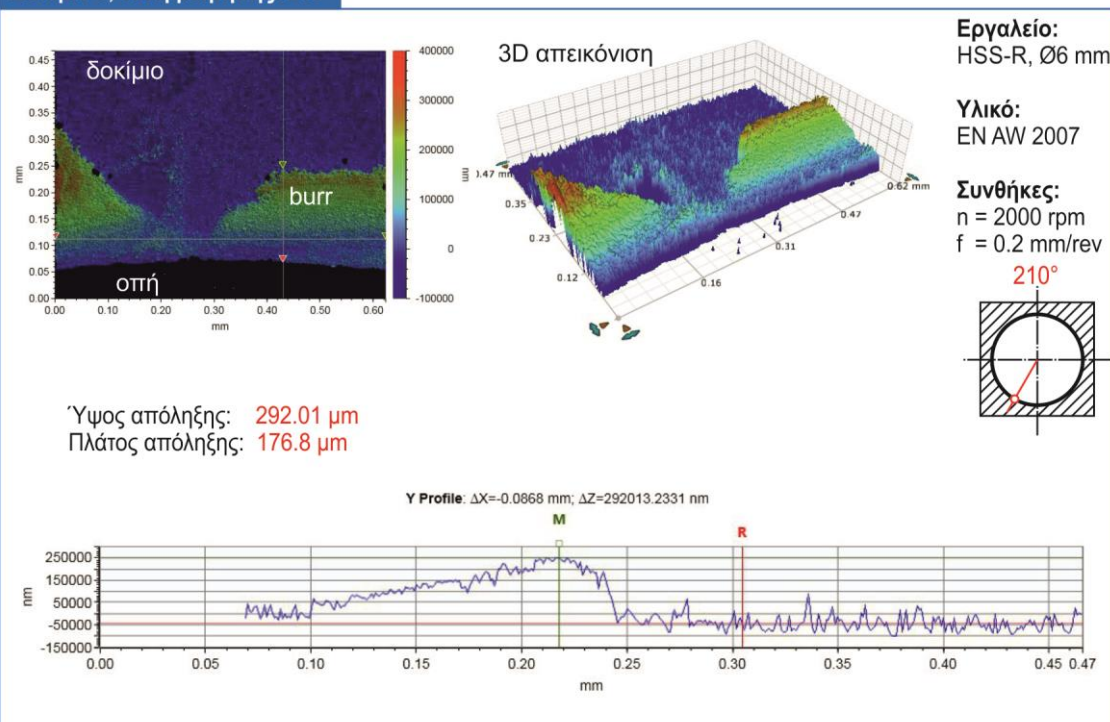


**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 195°**

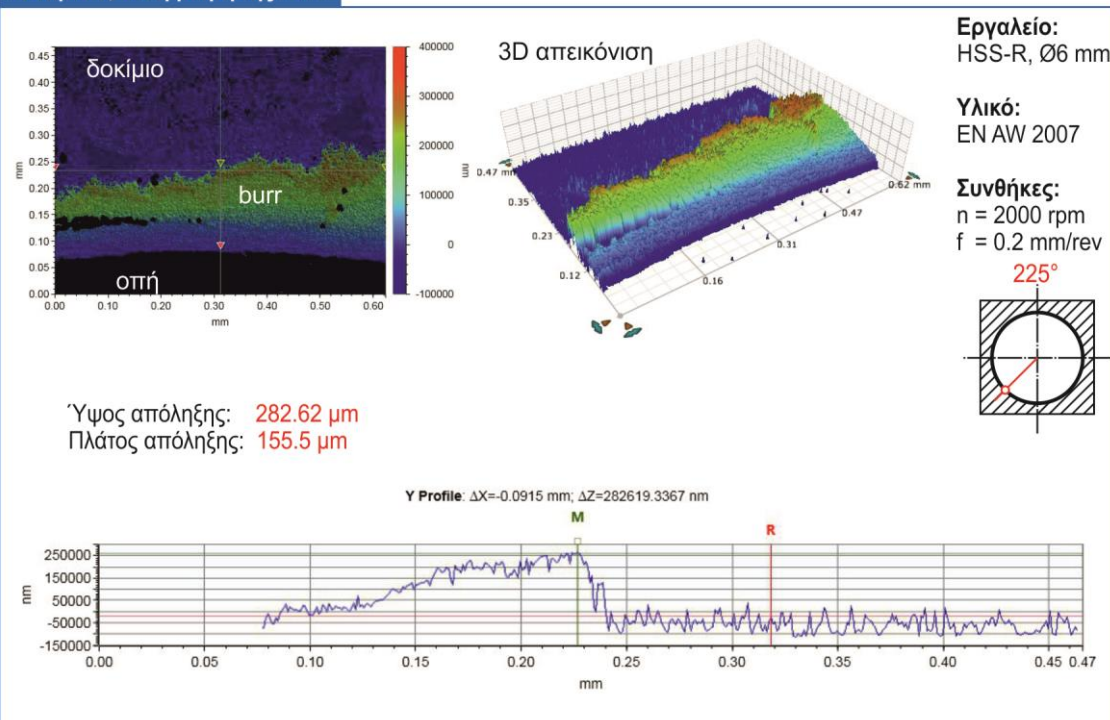




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 210°**

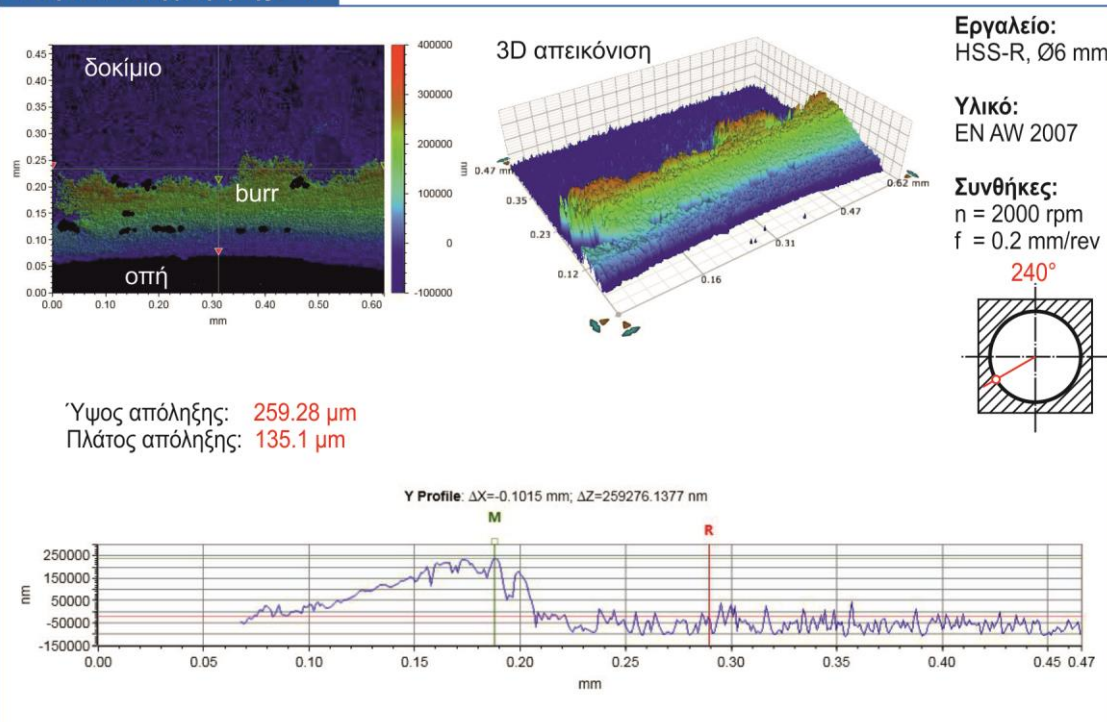


**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 225°**

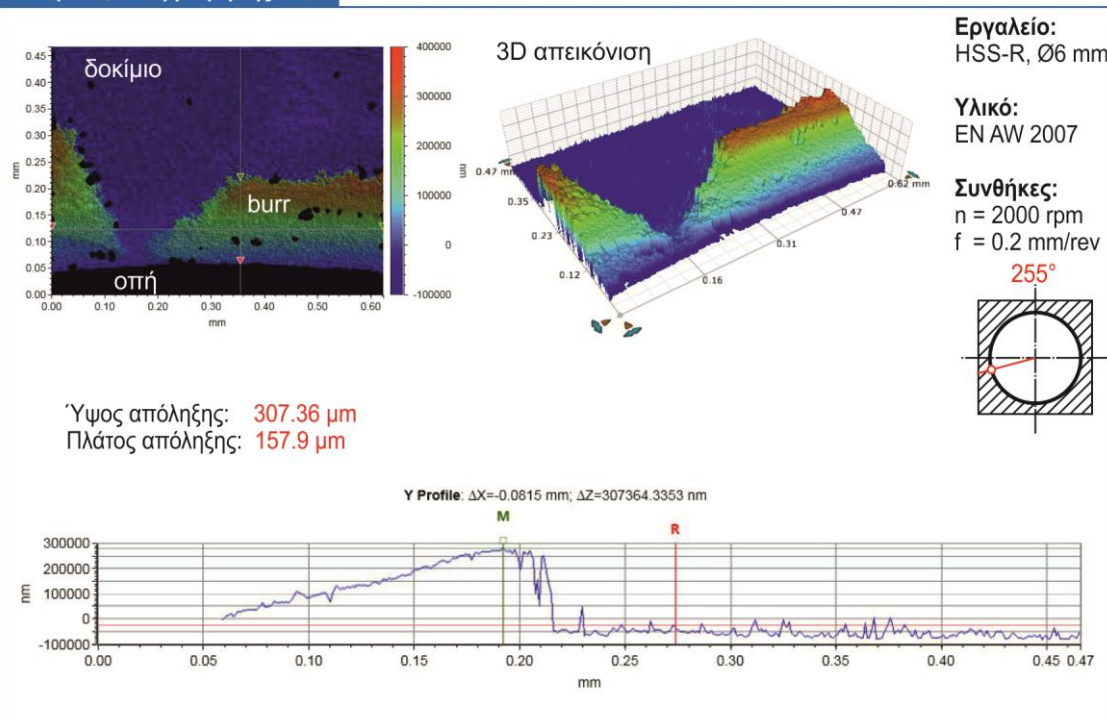




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 240°**



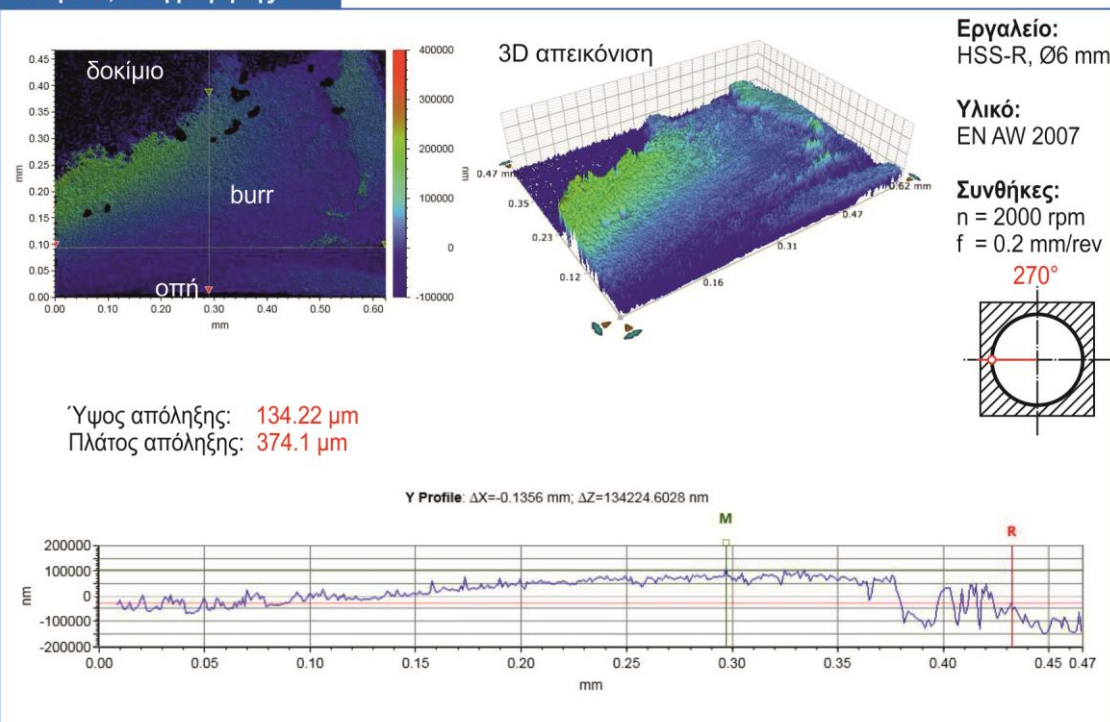
**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 255°**



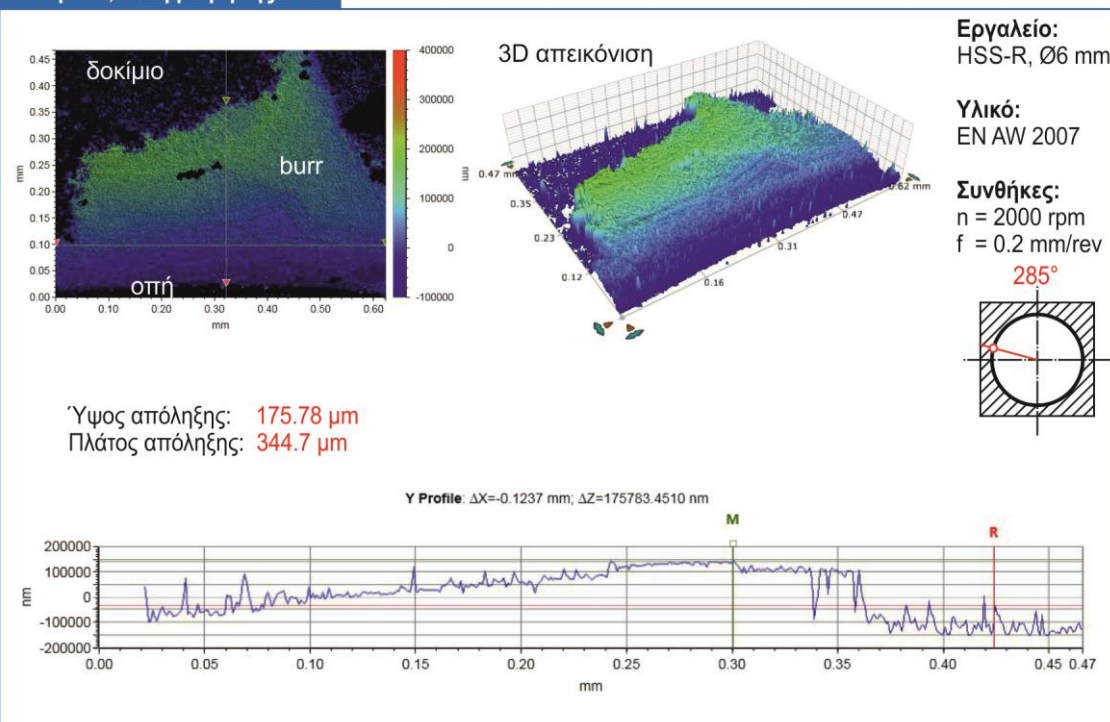




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 270°**

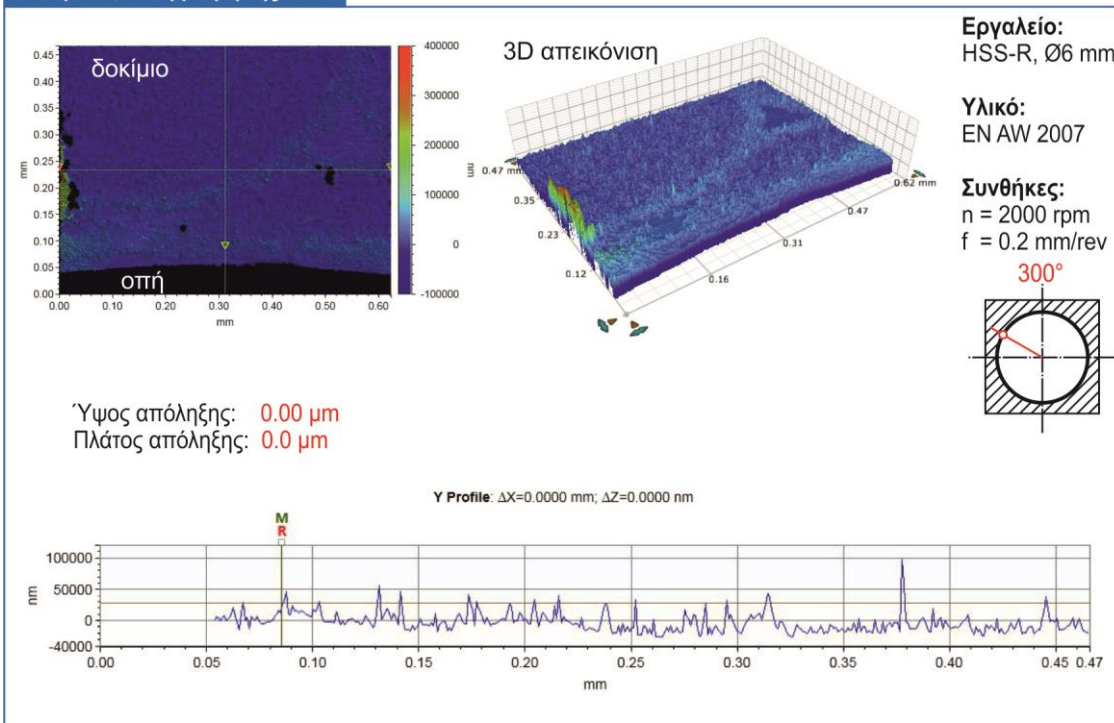


**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 285°**

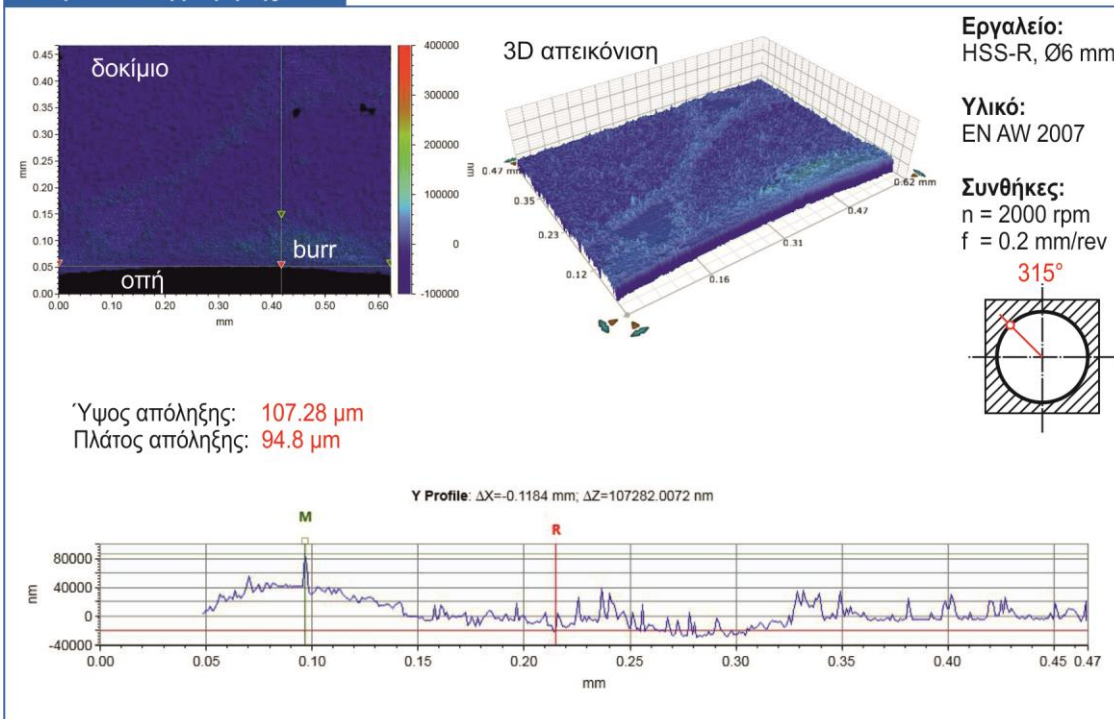




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 300°**

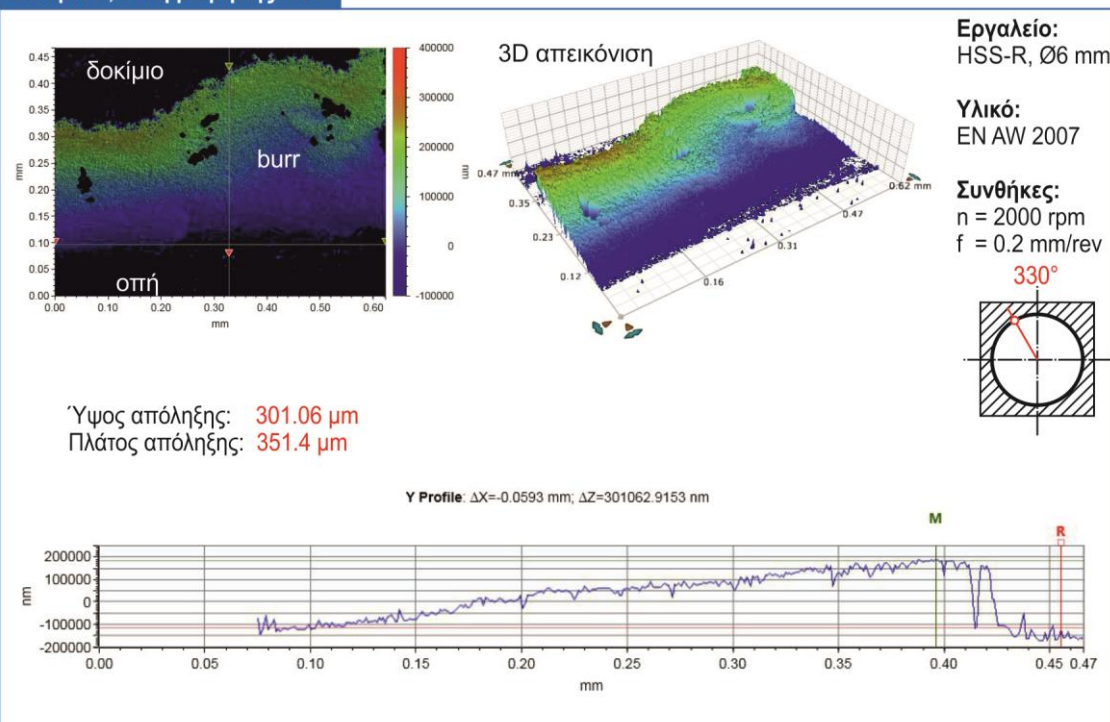


**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 315°**

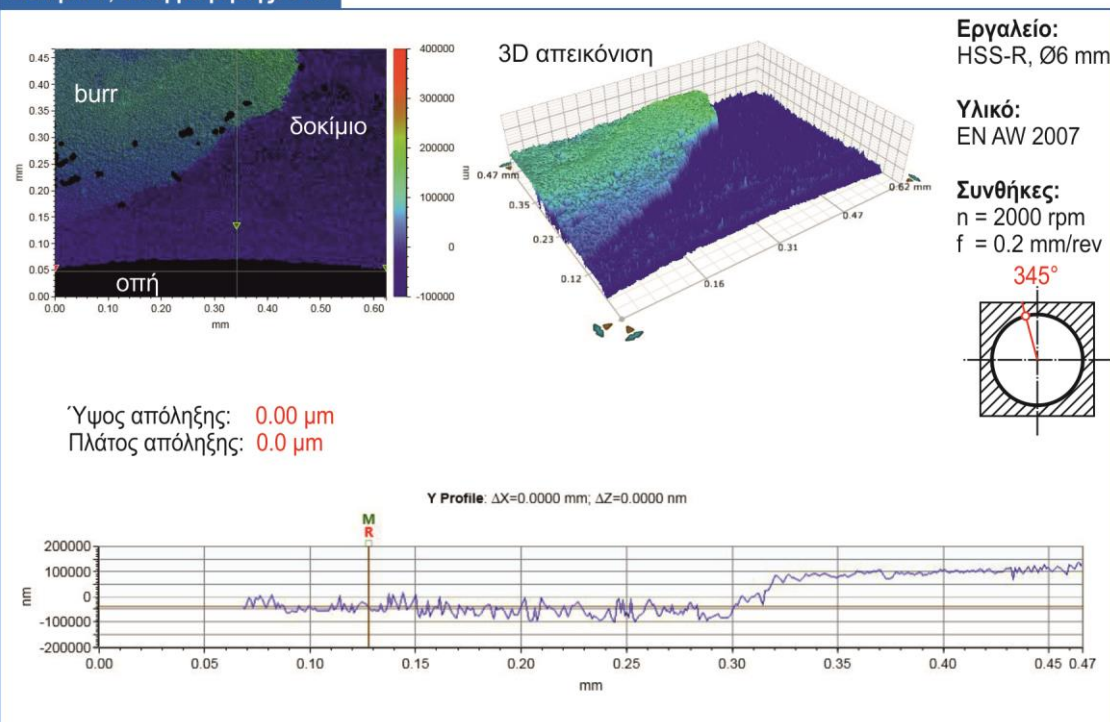




**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 330°**



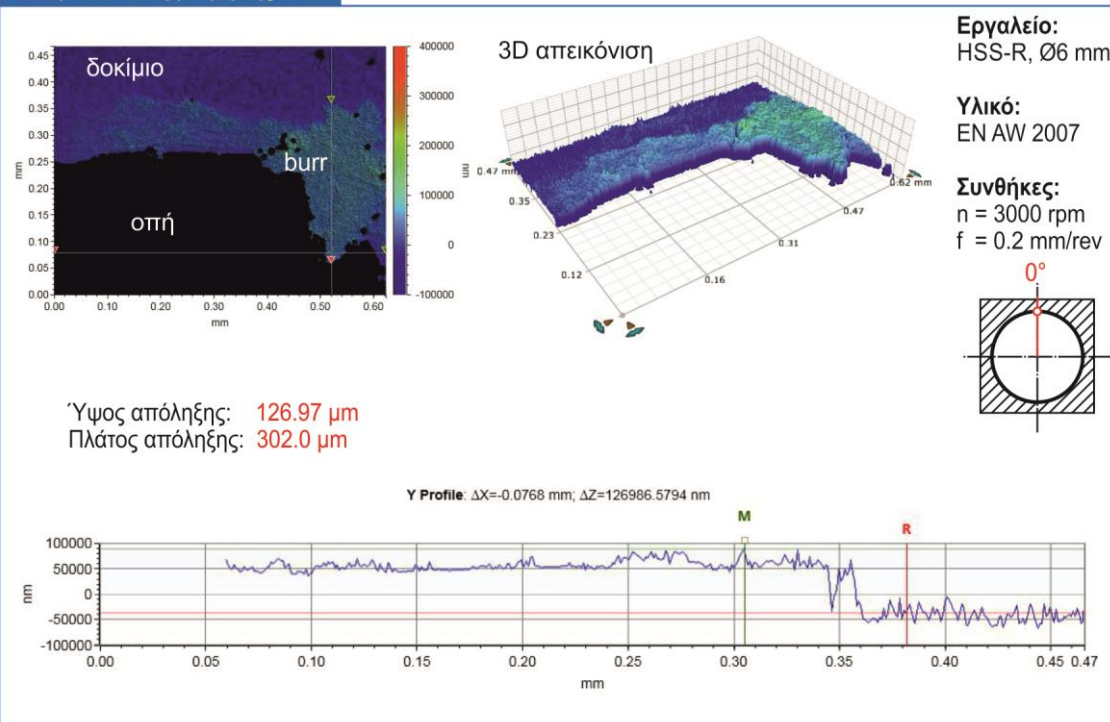
**Δοκίμιο 7, θέση μέτρησης: 345°**



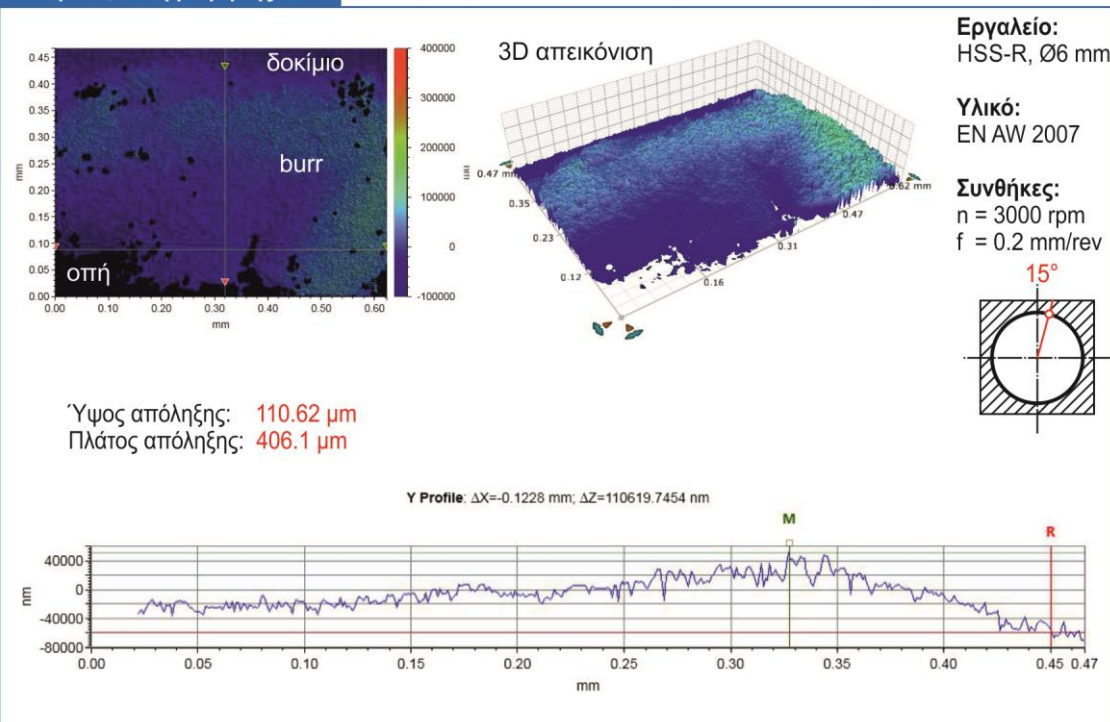




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 0°**

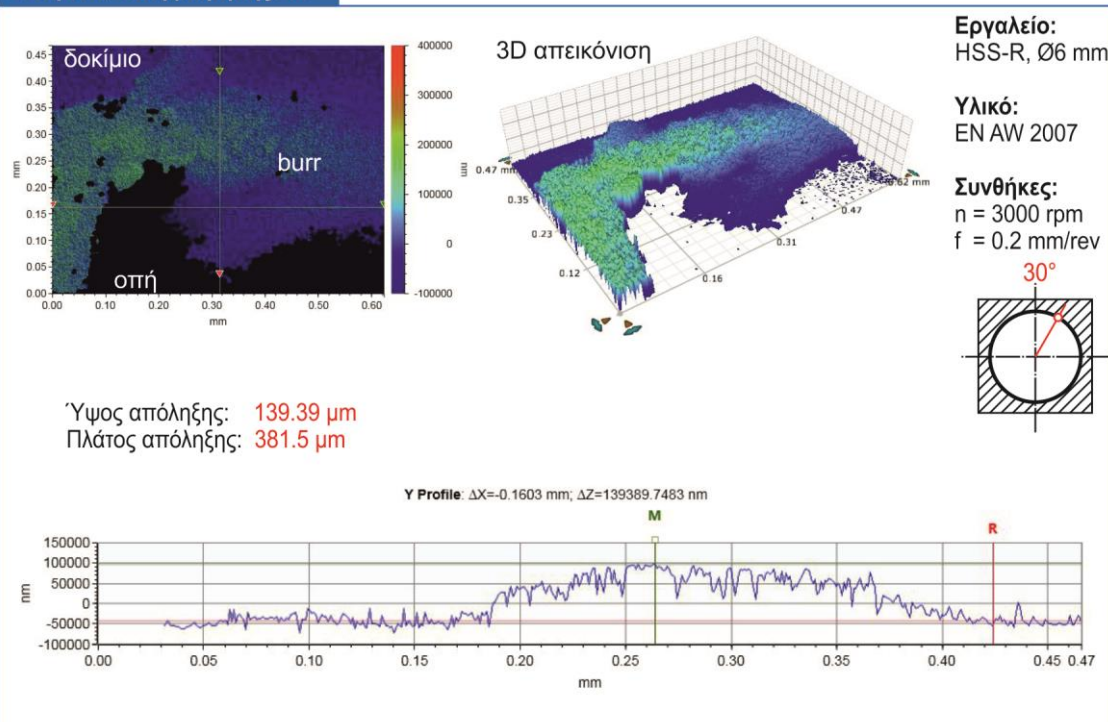


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 15°**

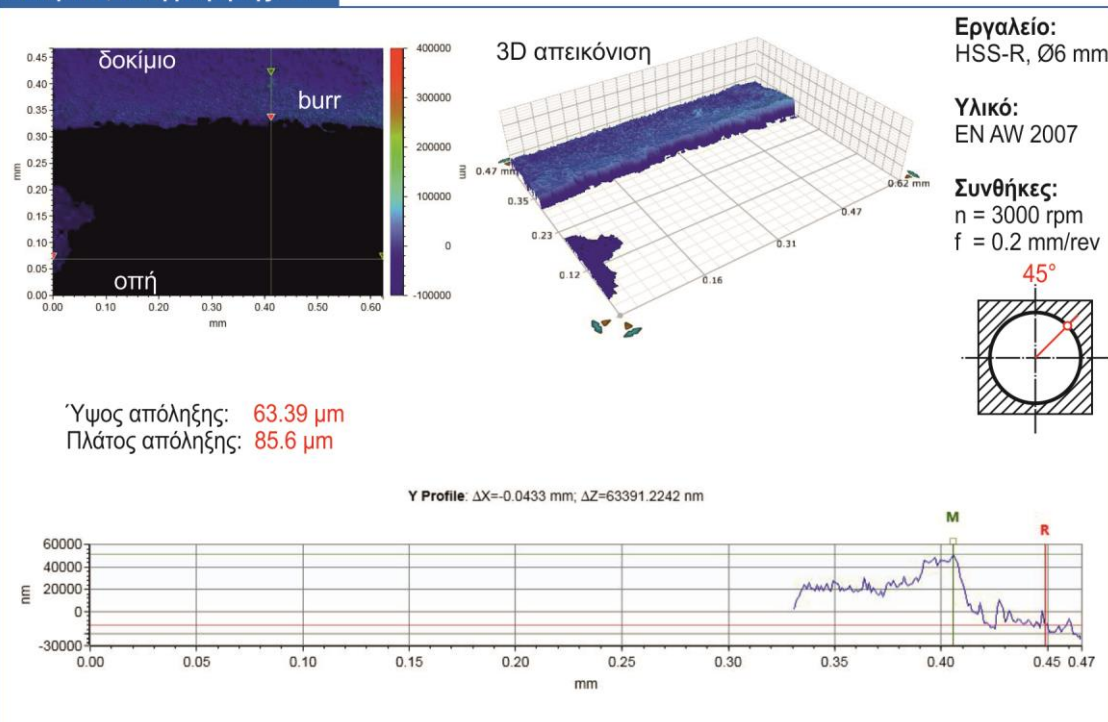




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 30°**

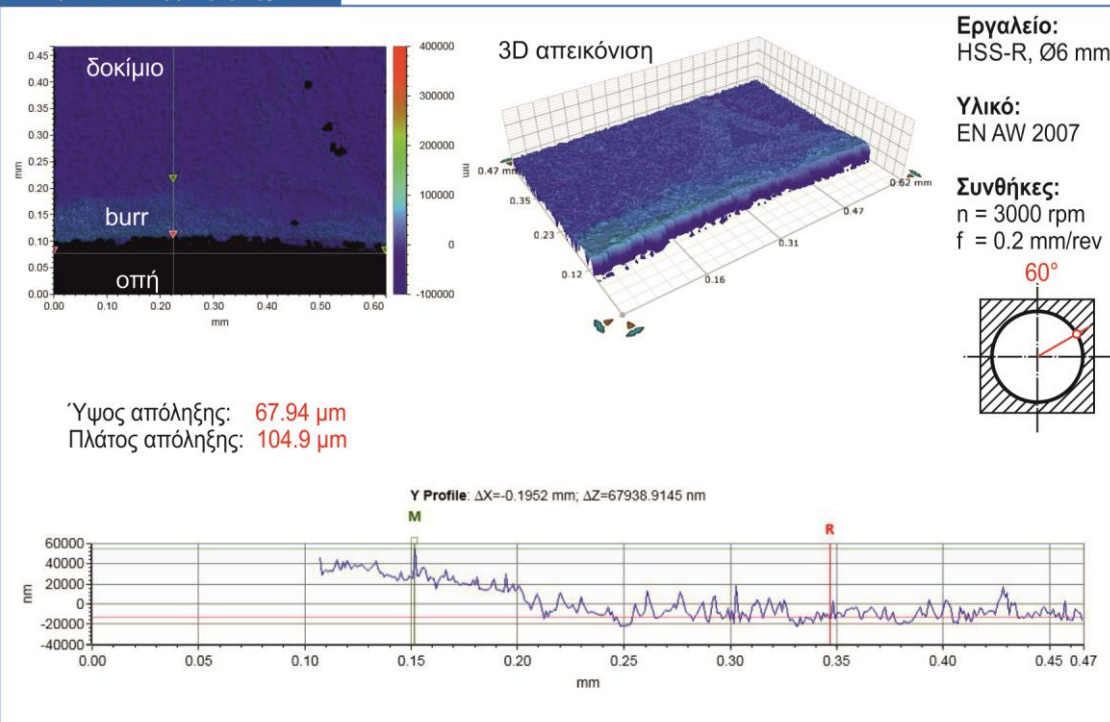


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 45°**

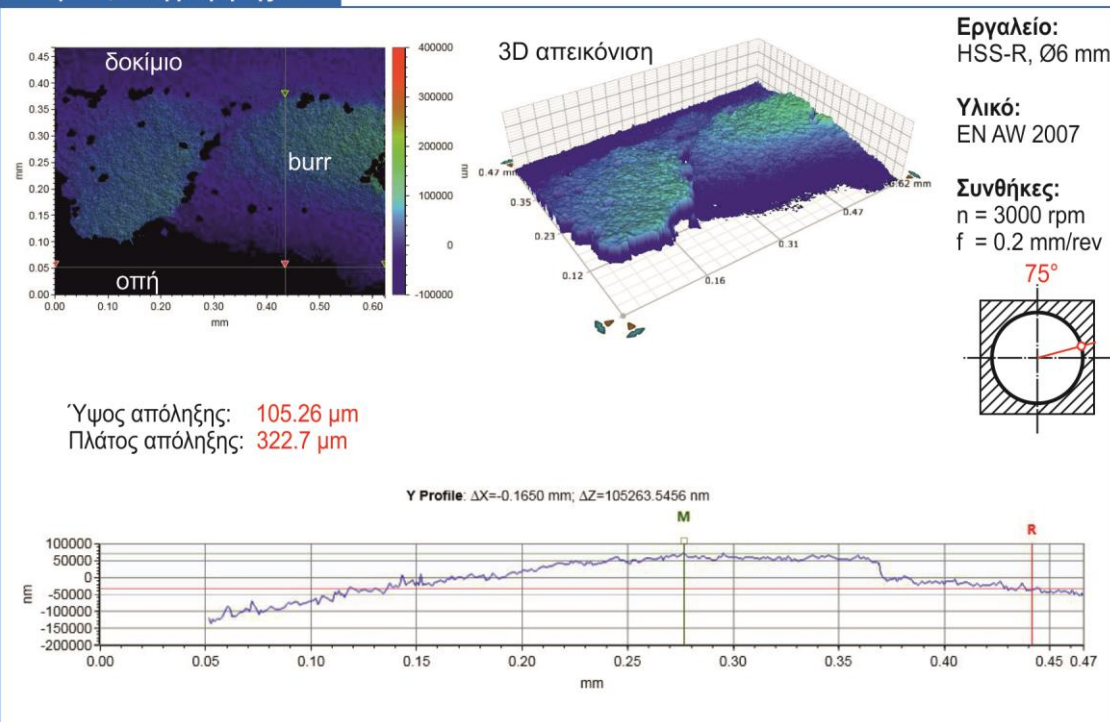




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 60°**



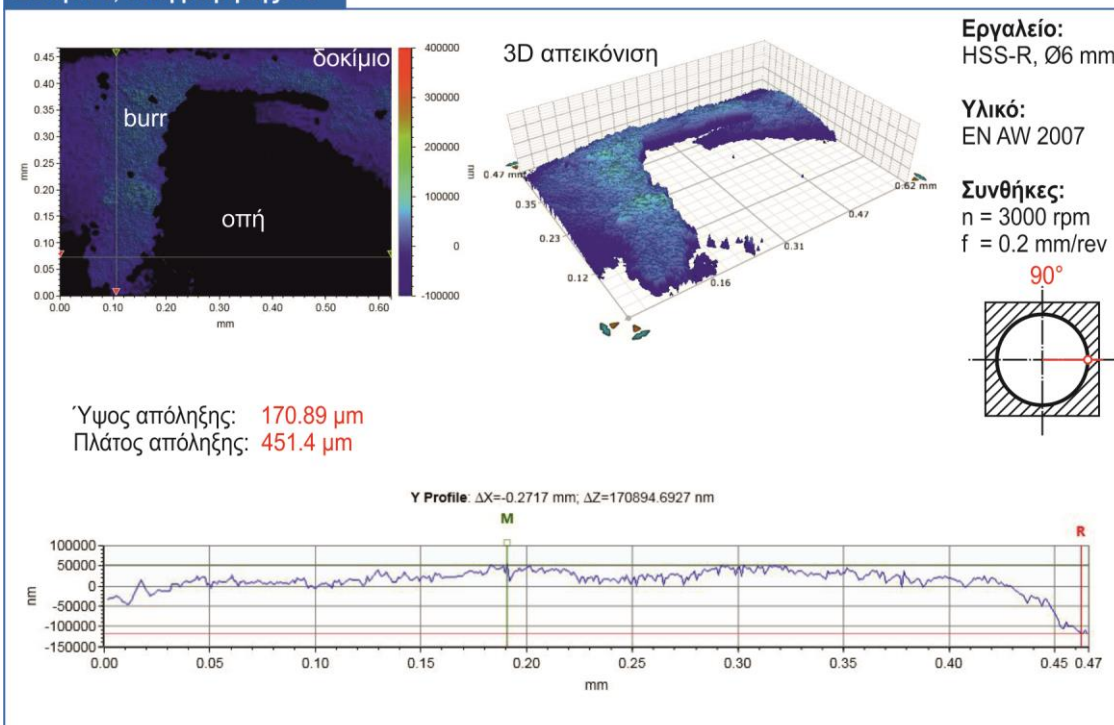
**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 75°**



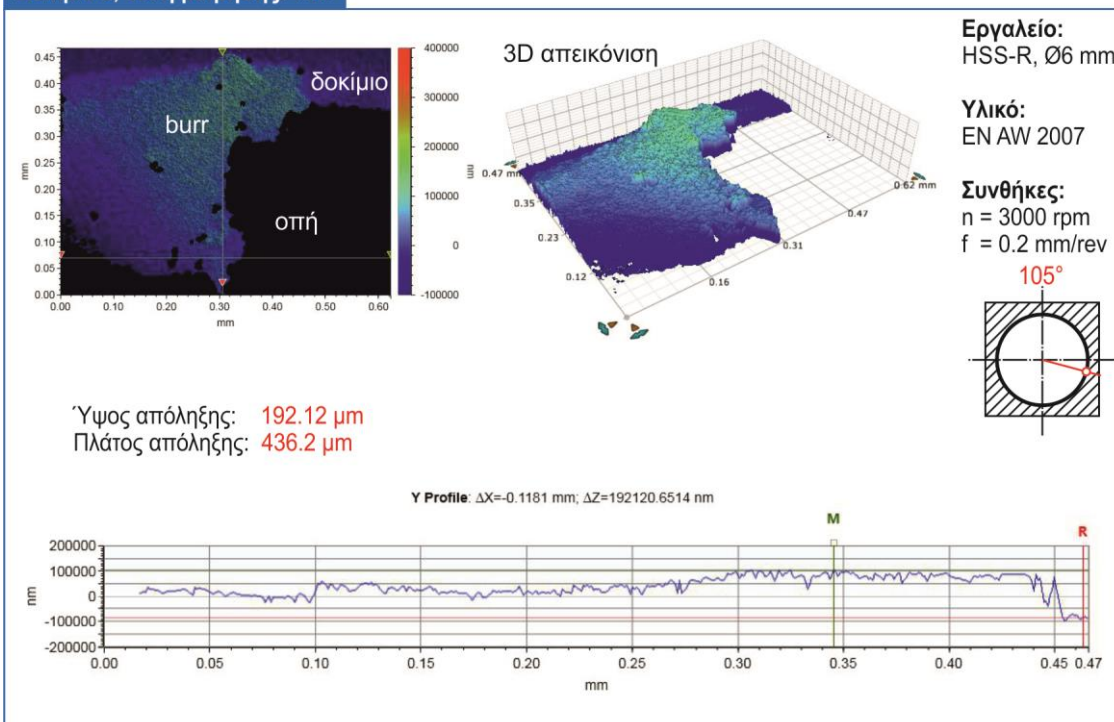




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 90°**

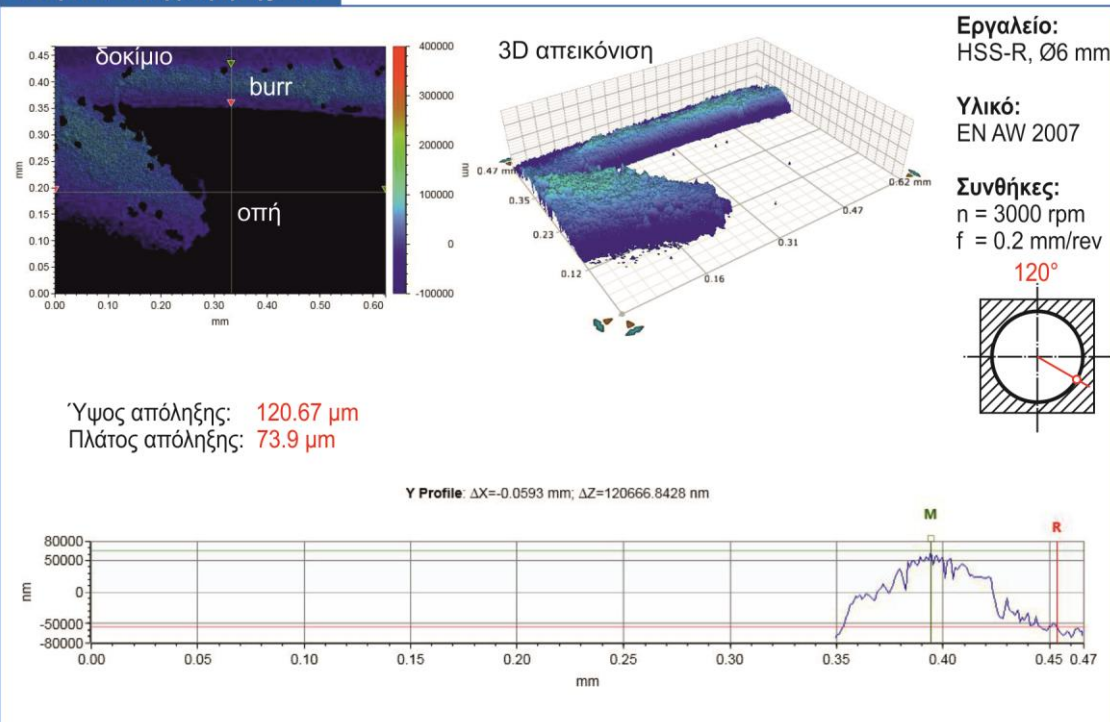


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 105°**

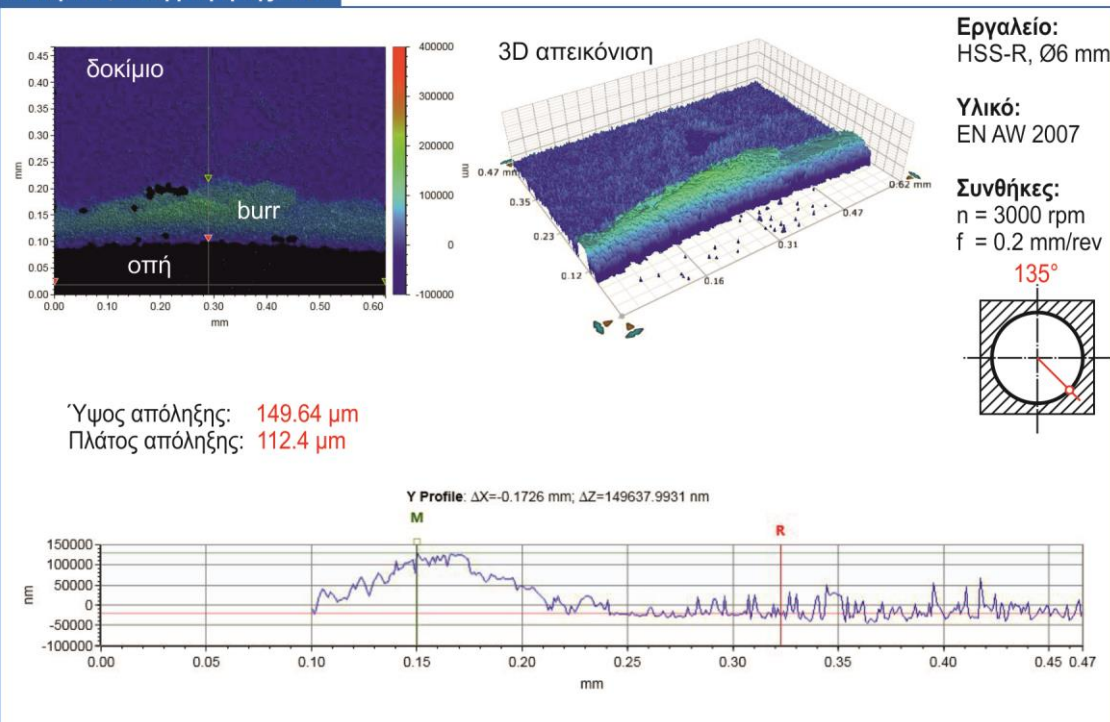




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 120°**

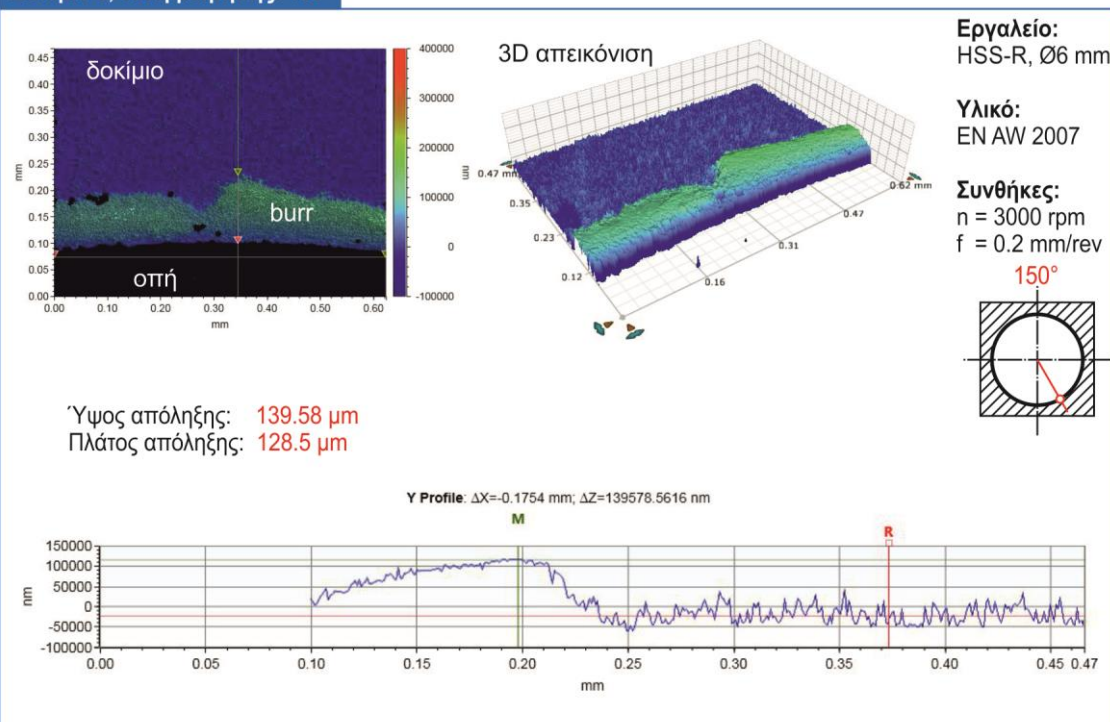


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 135°**

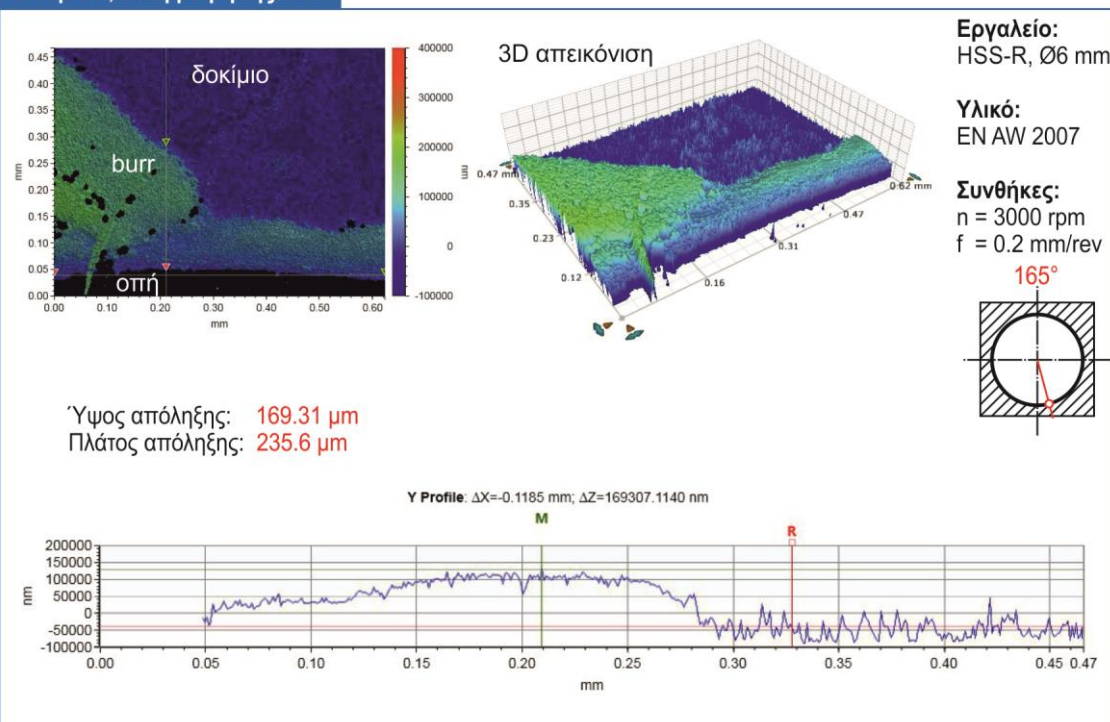




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 150°**



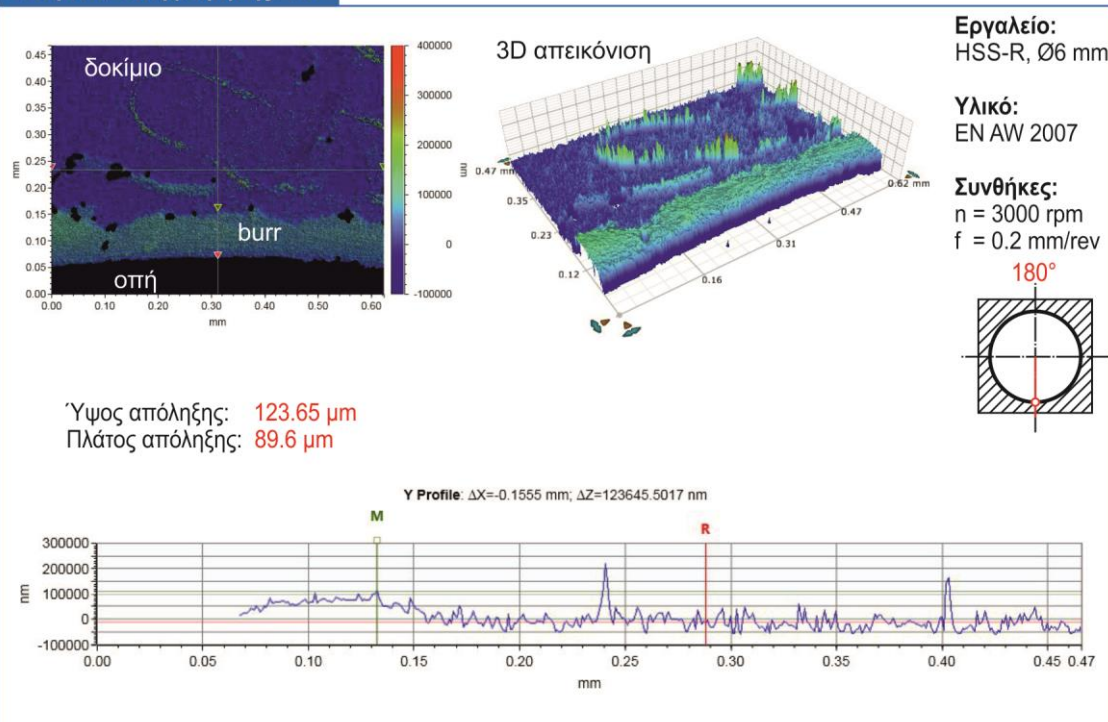
**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 165°**



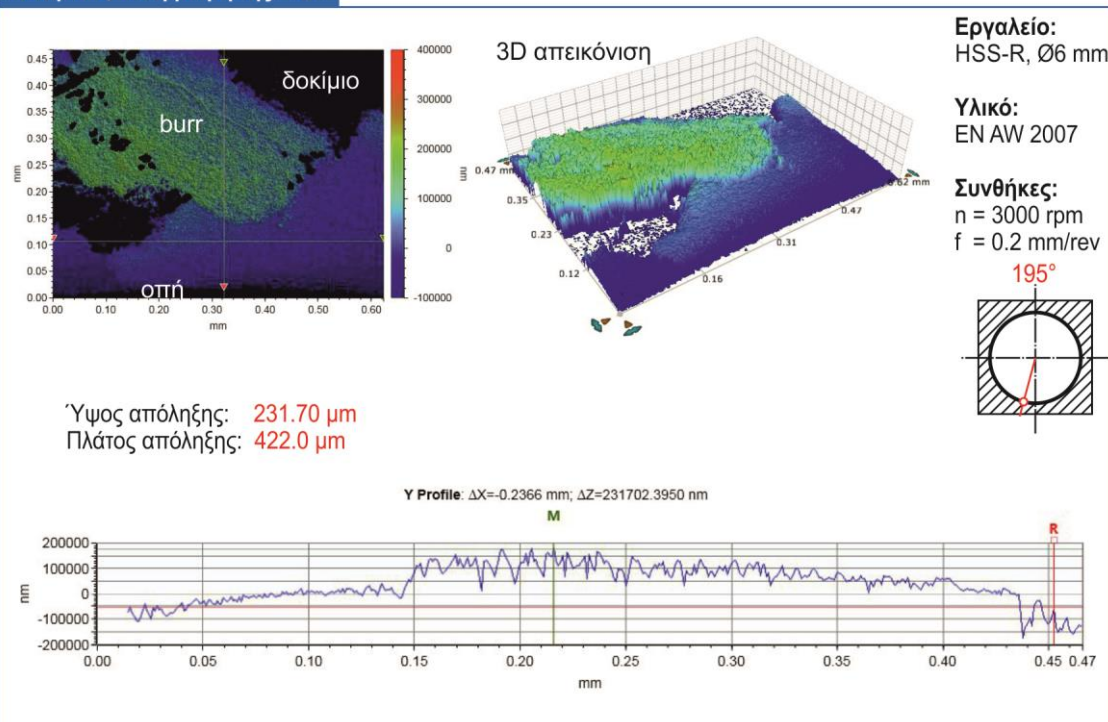




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 180°**

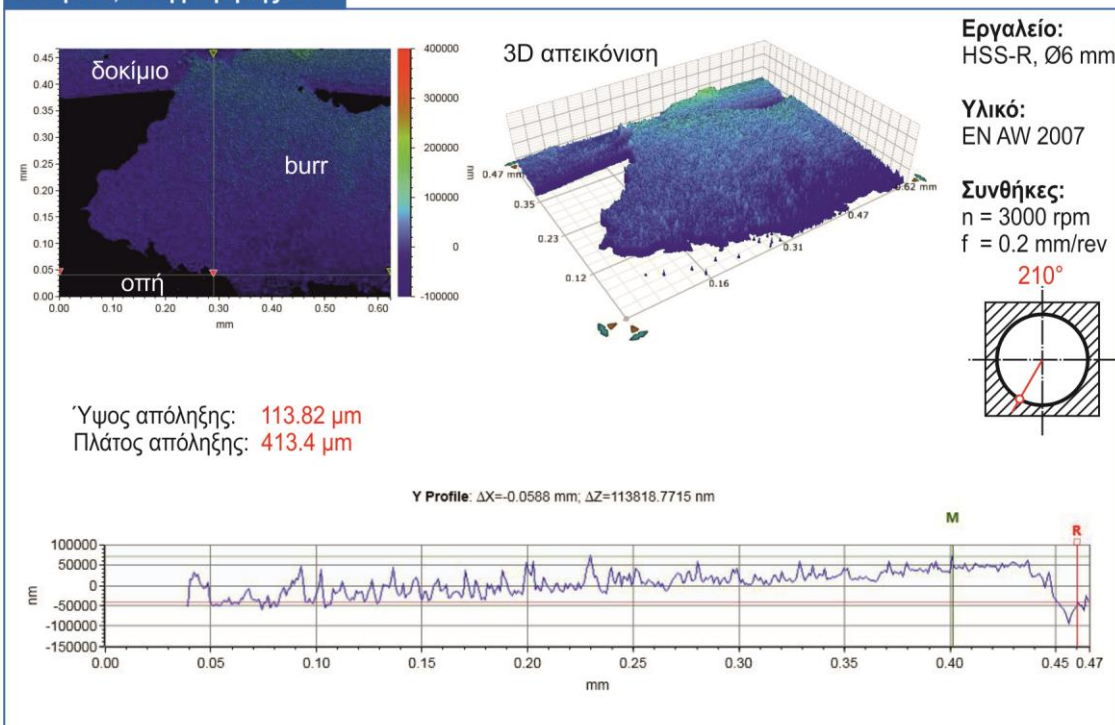


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 195°**

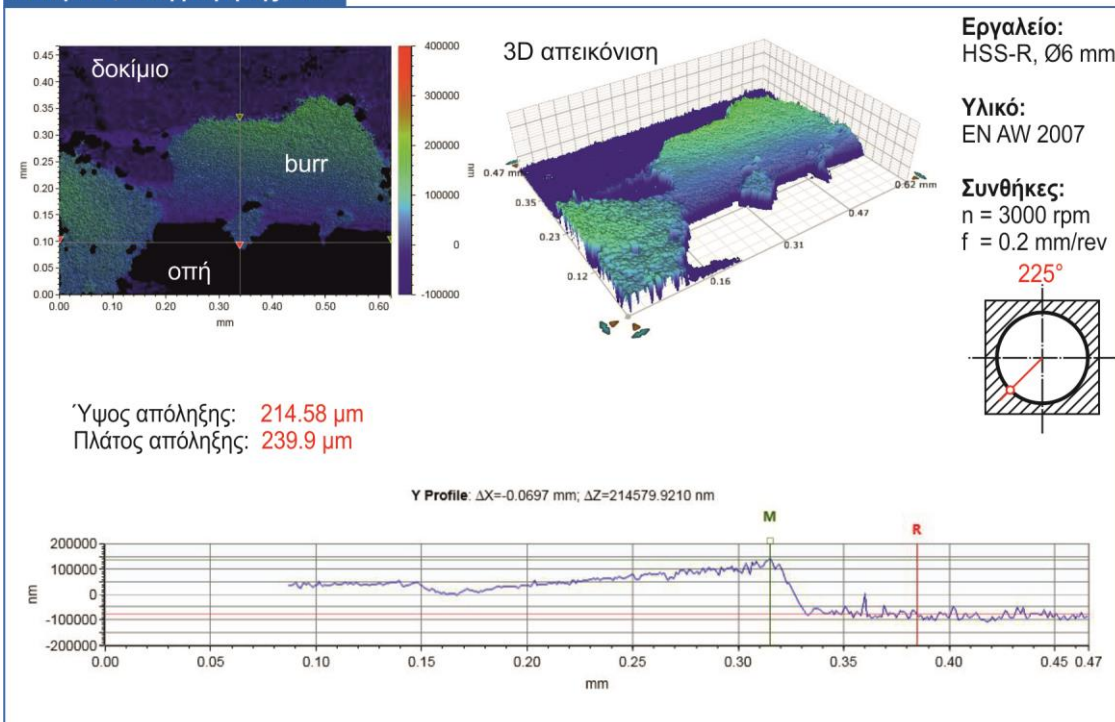




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 210°**

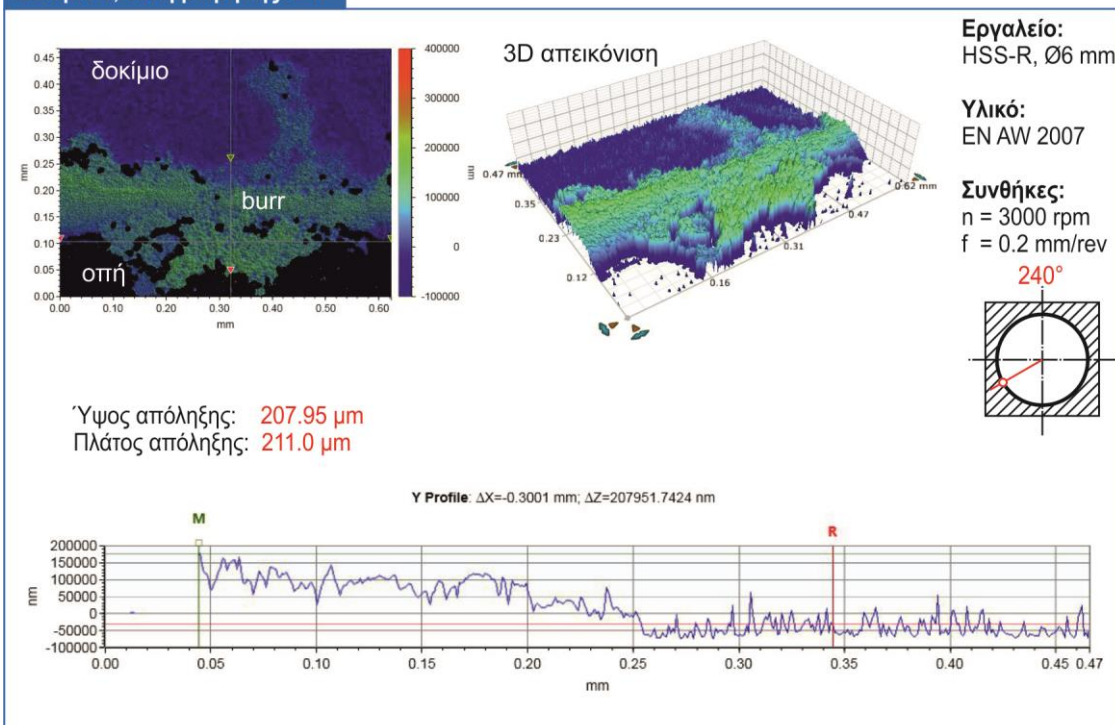


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 225°**

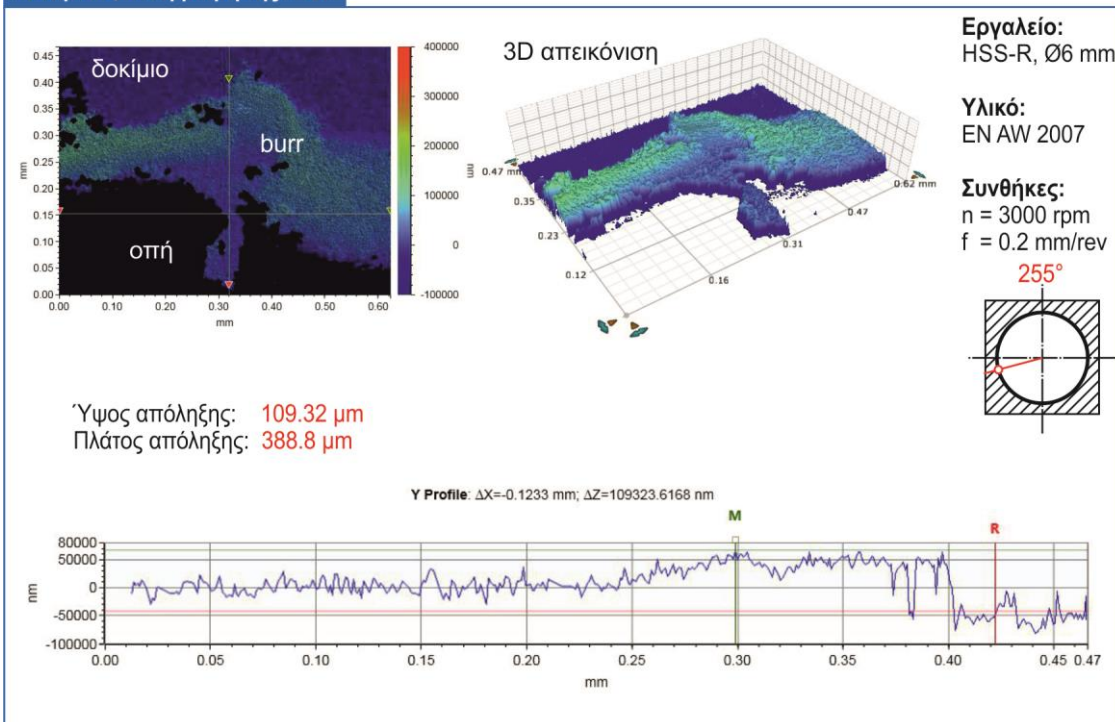




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 240°**



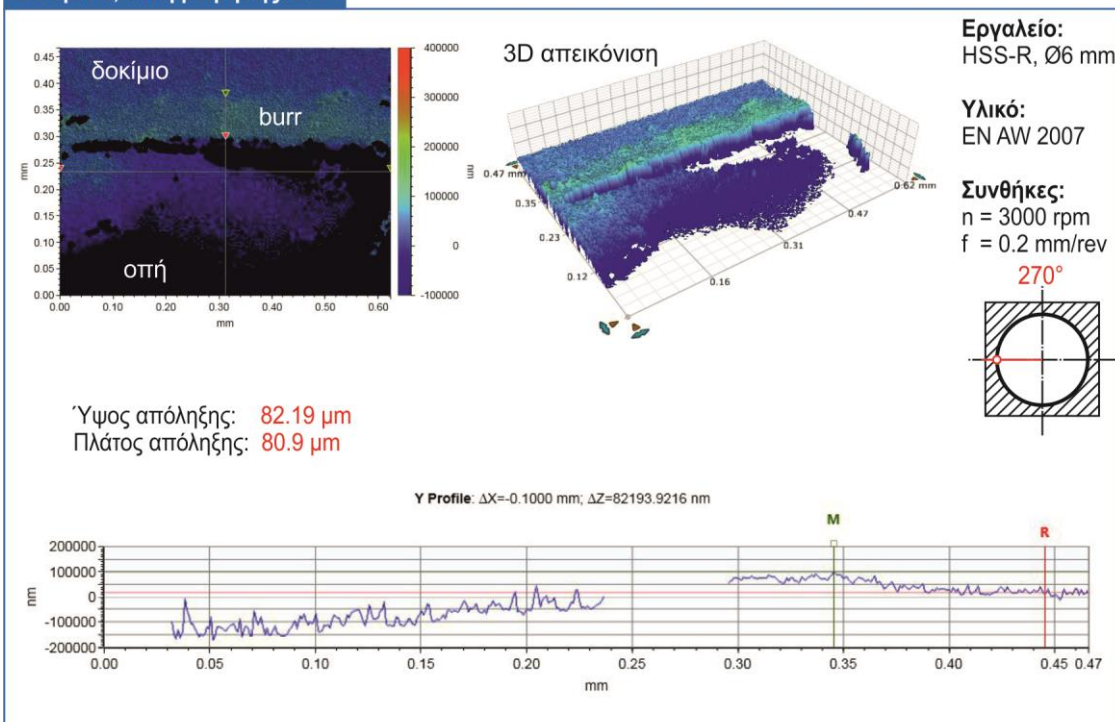
**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 255°**



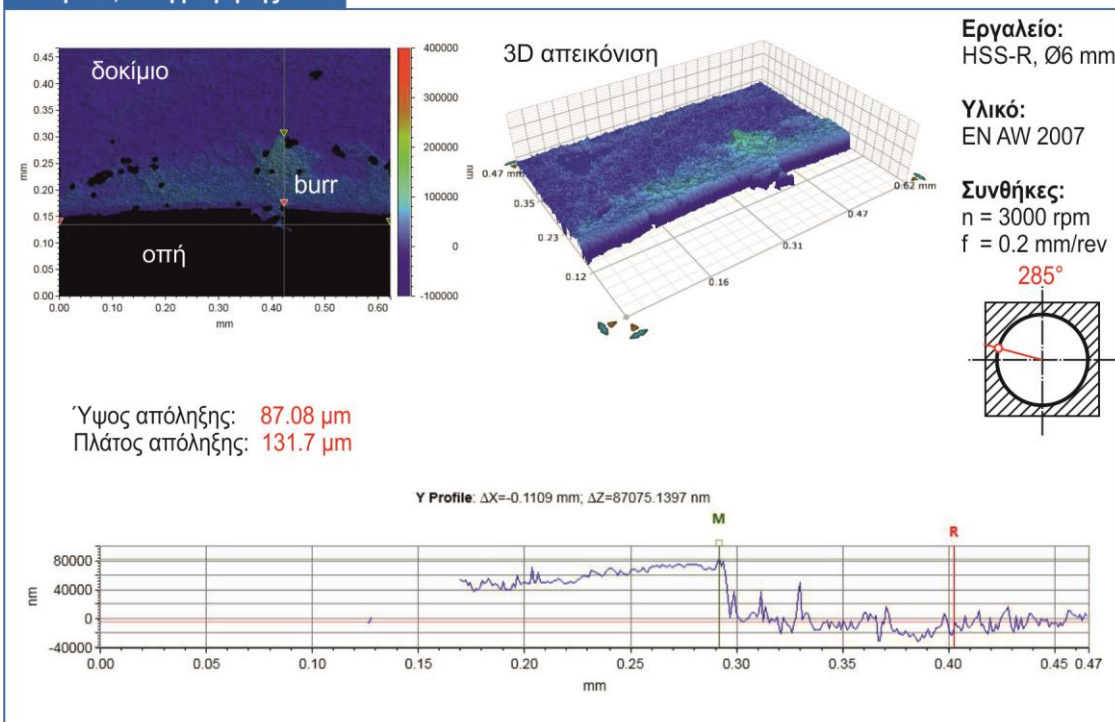




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 270°**

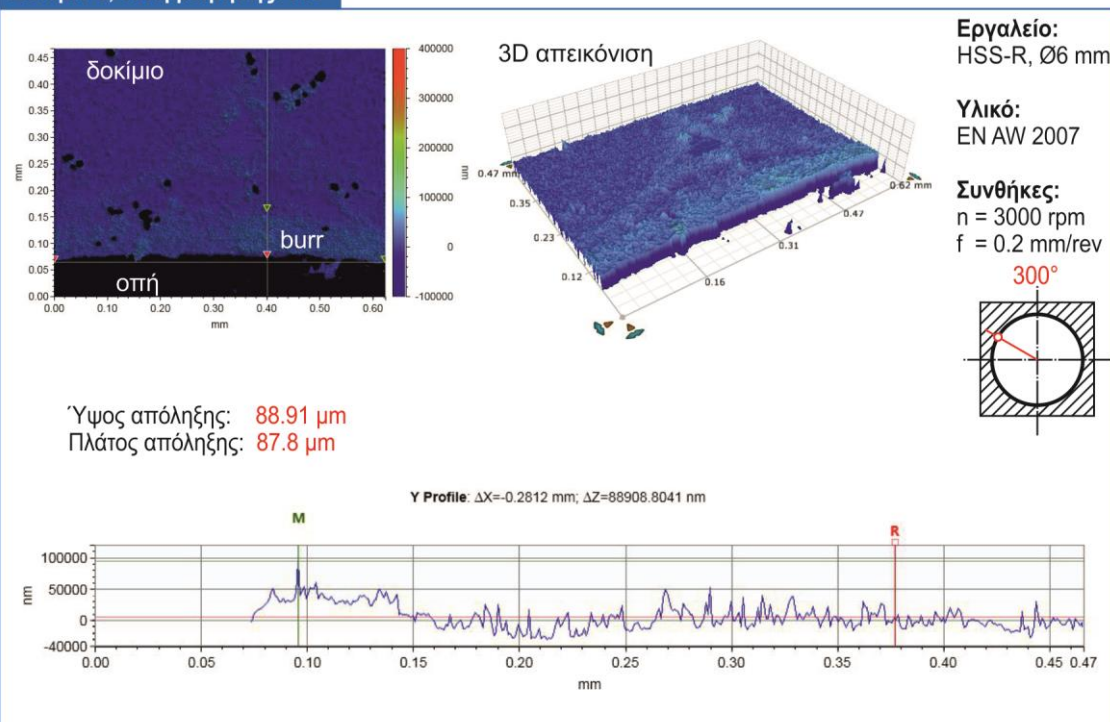


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 285°**

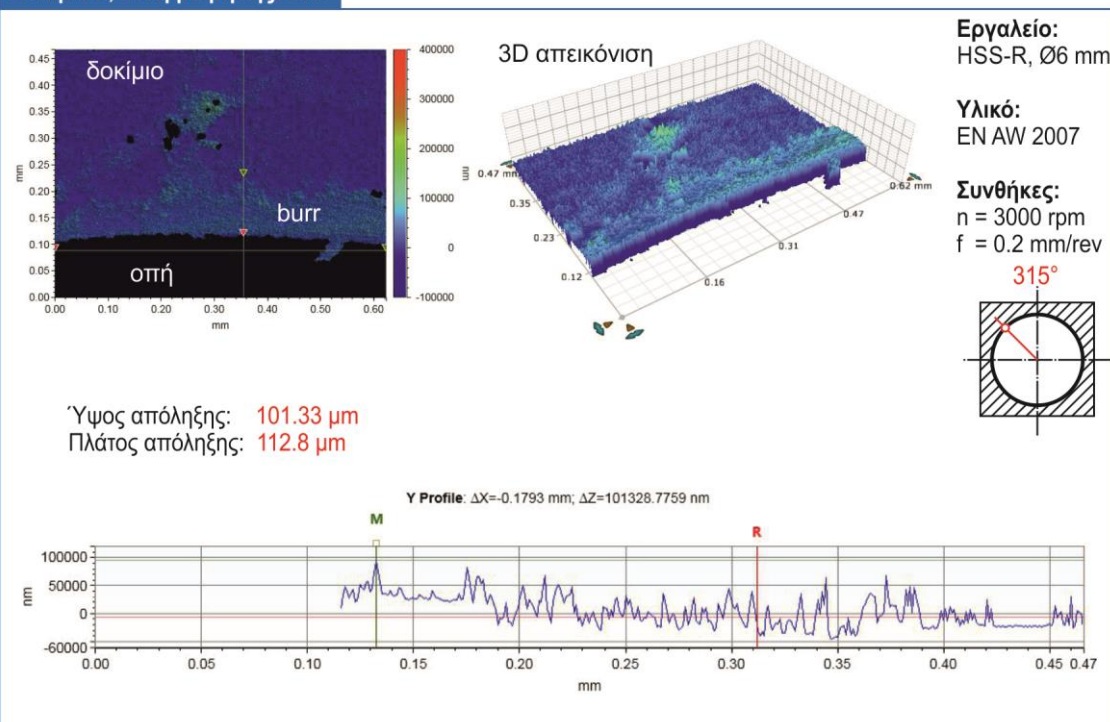




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 300°**

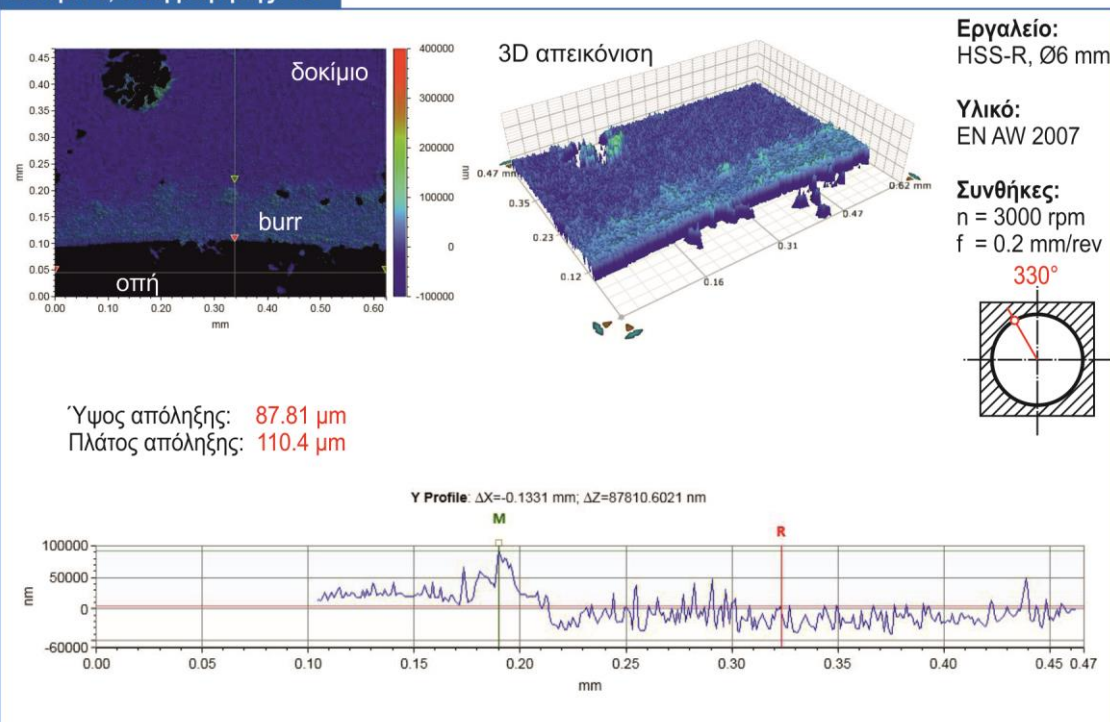


**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 315°**

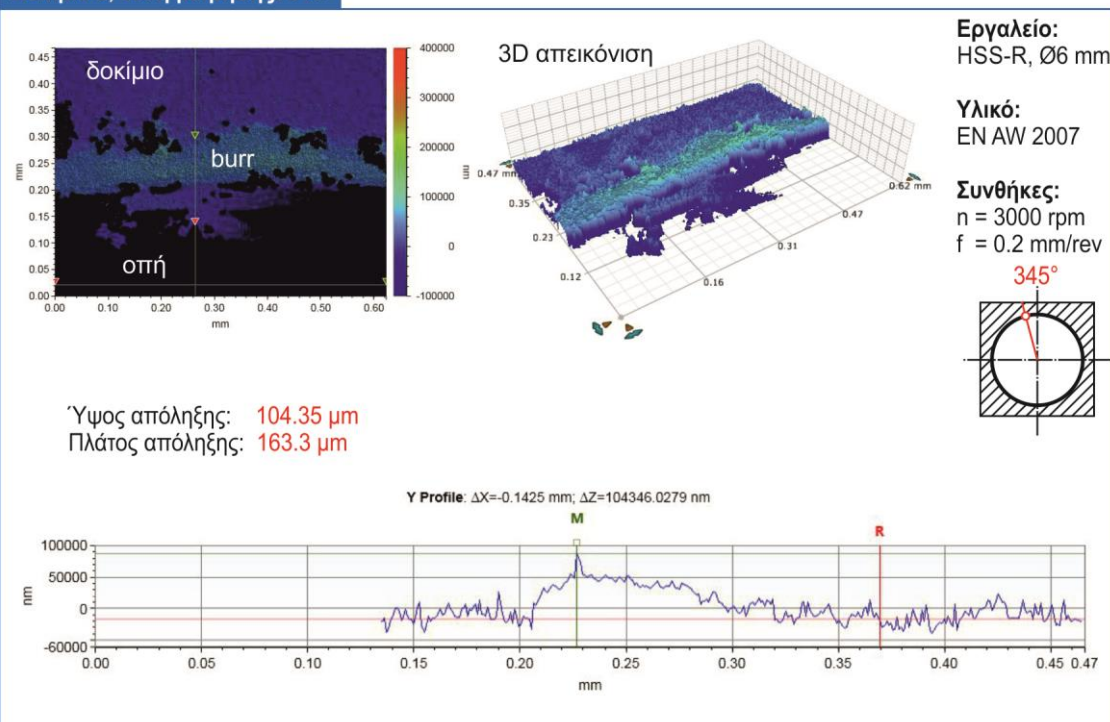




**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 330°**



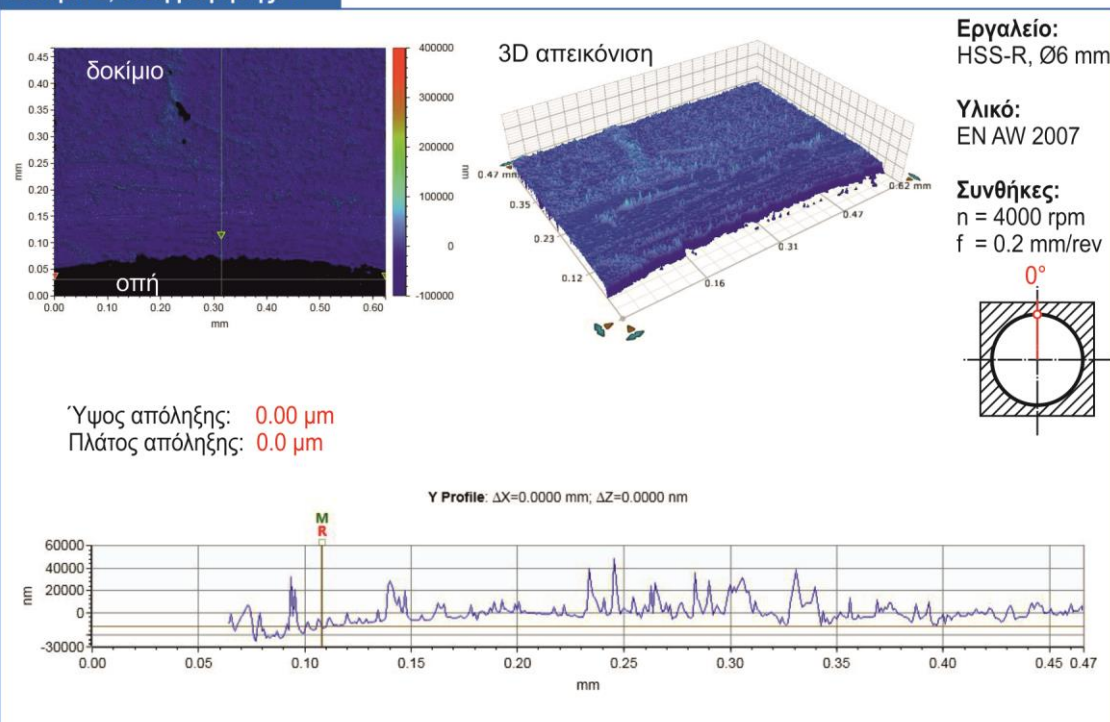
**Δοκίμιο 8, θέση μέτρησης: 345°**



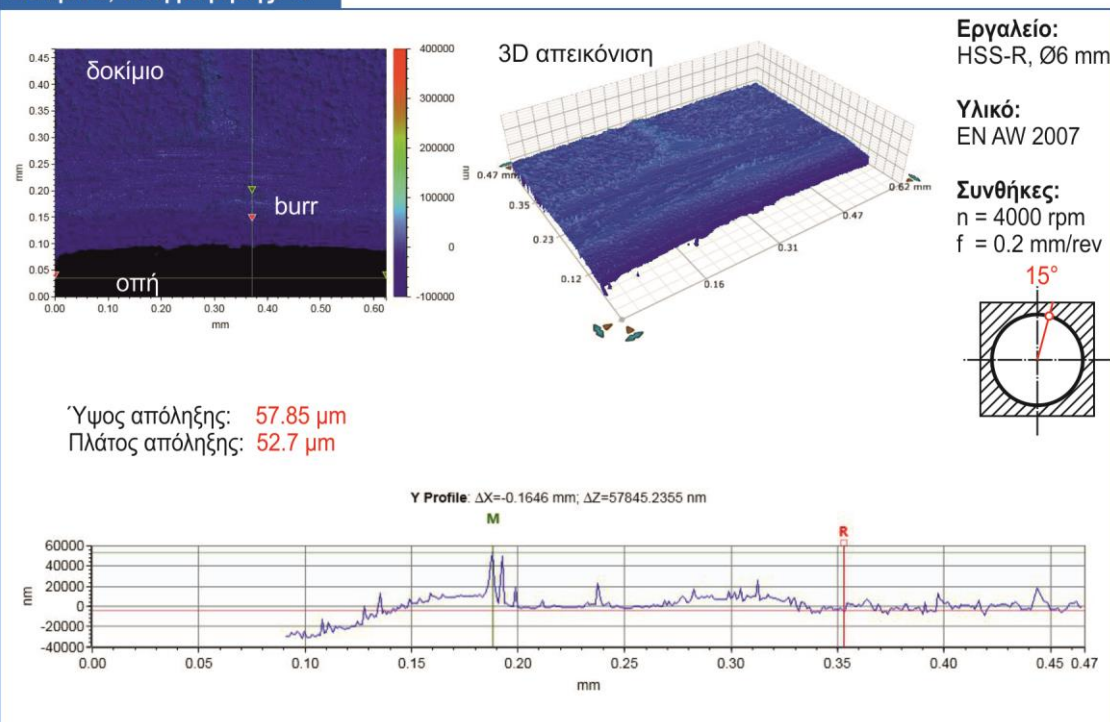




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 0°**

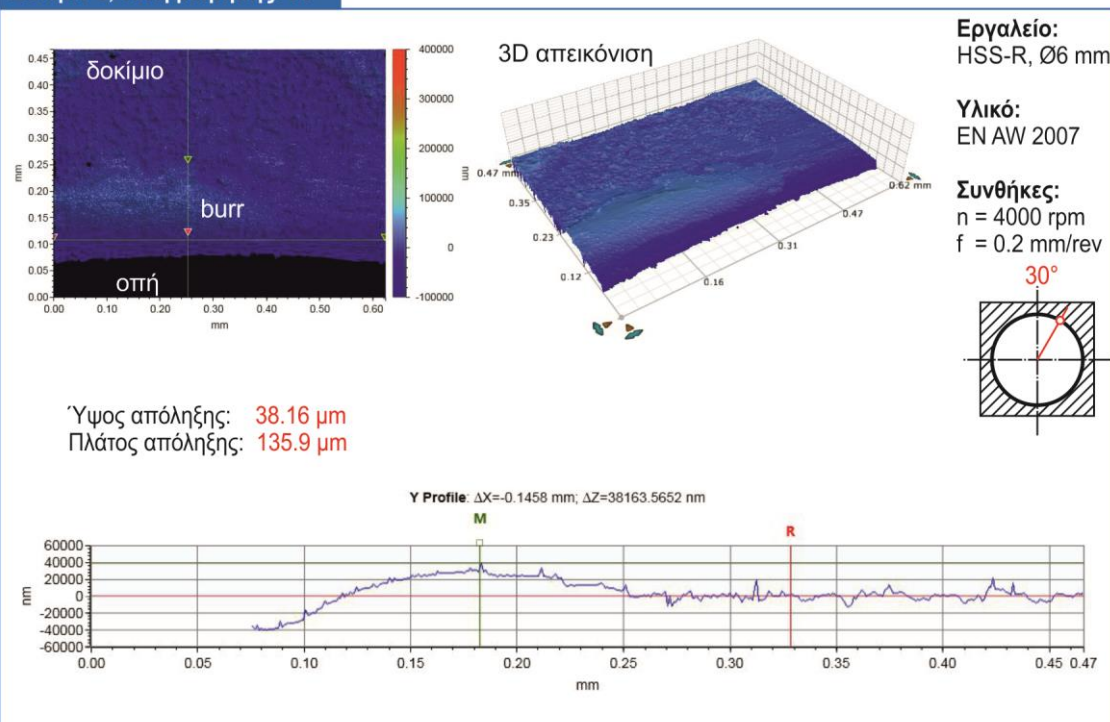


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 15°**

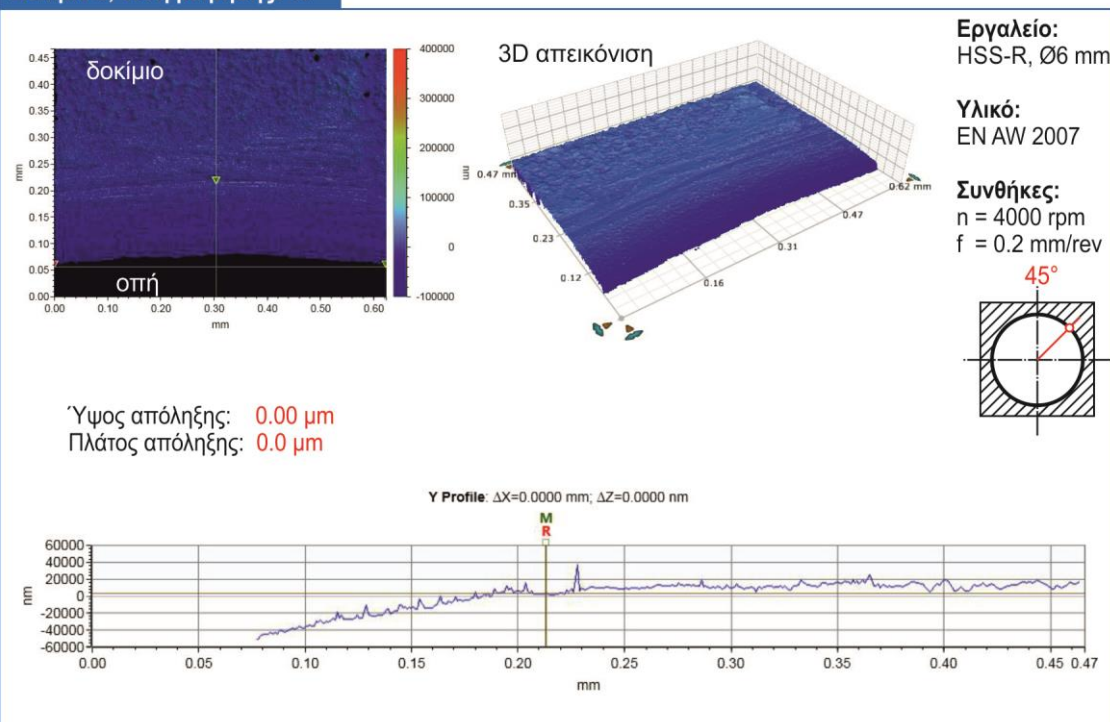




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 30°**

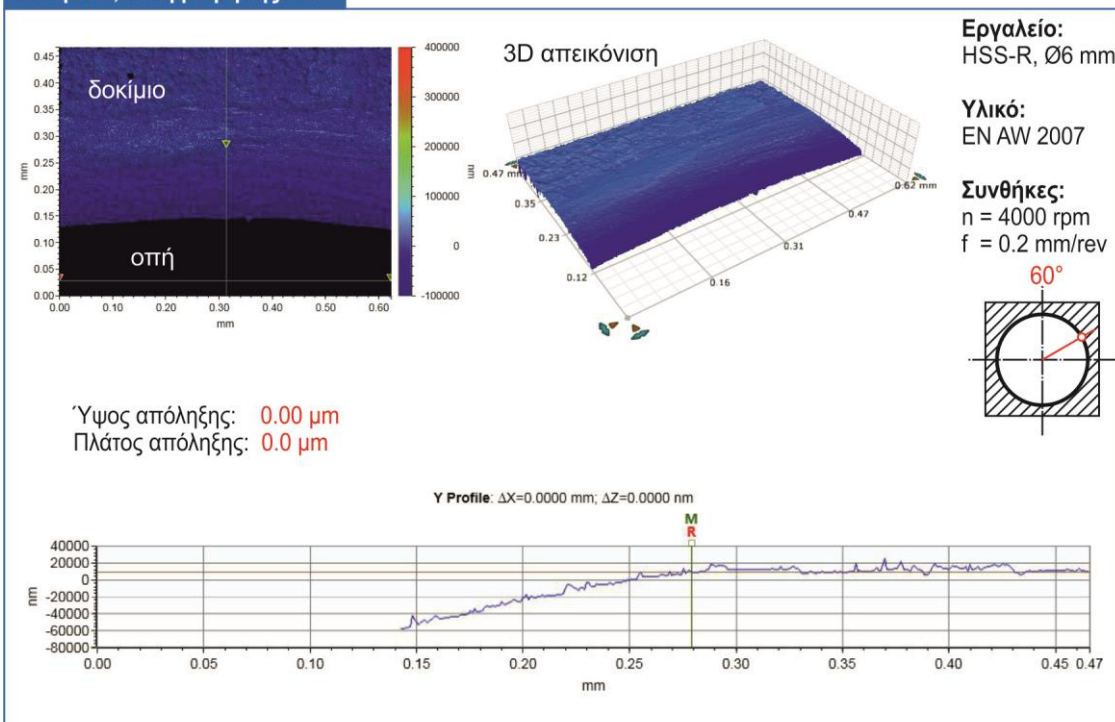


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 45°**

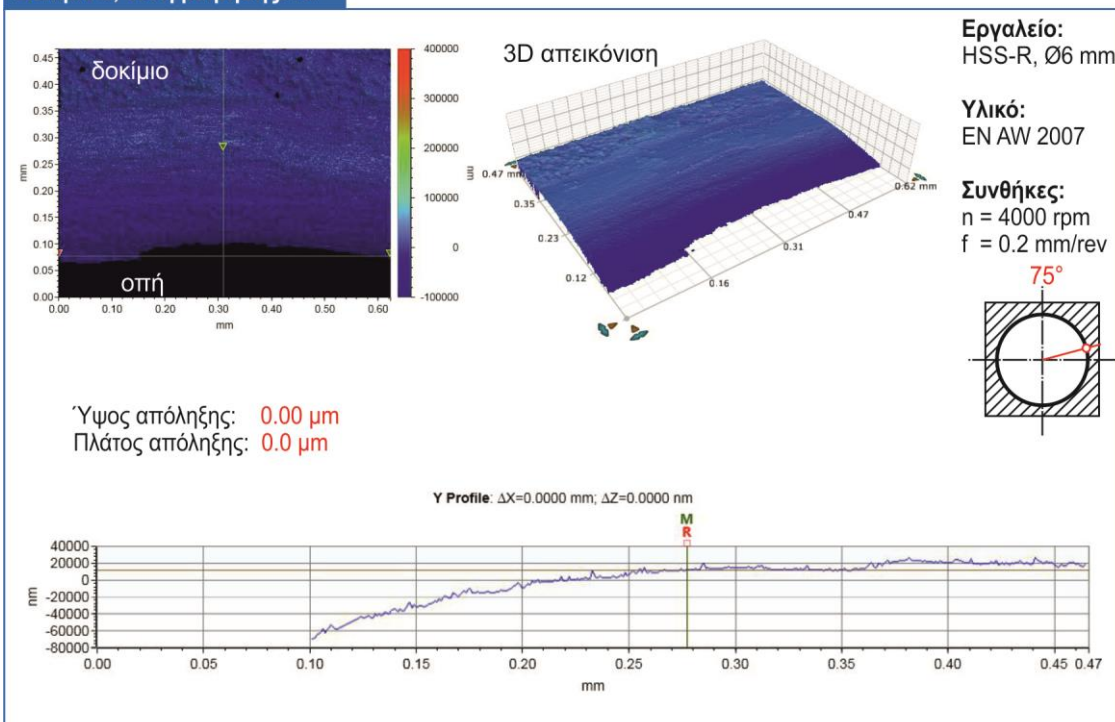




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 60°**



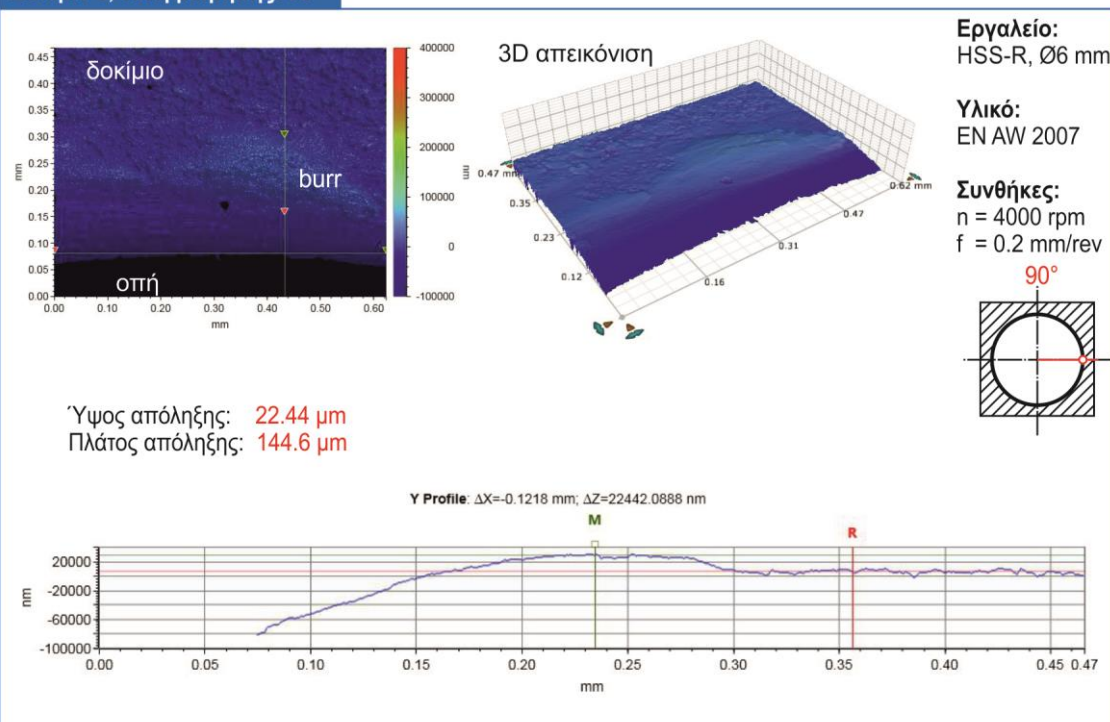
**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 75°**



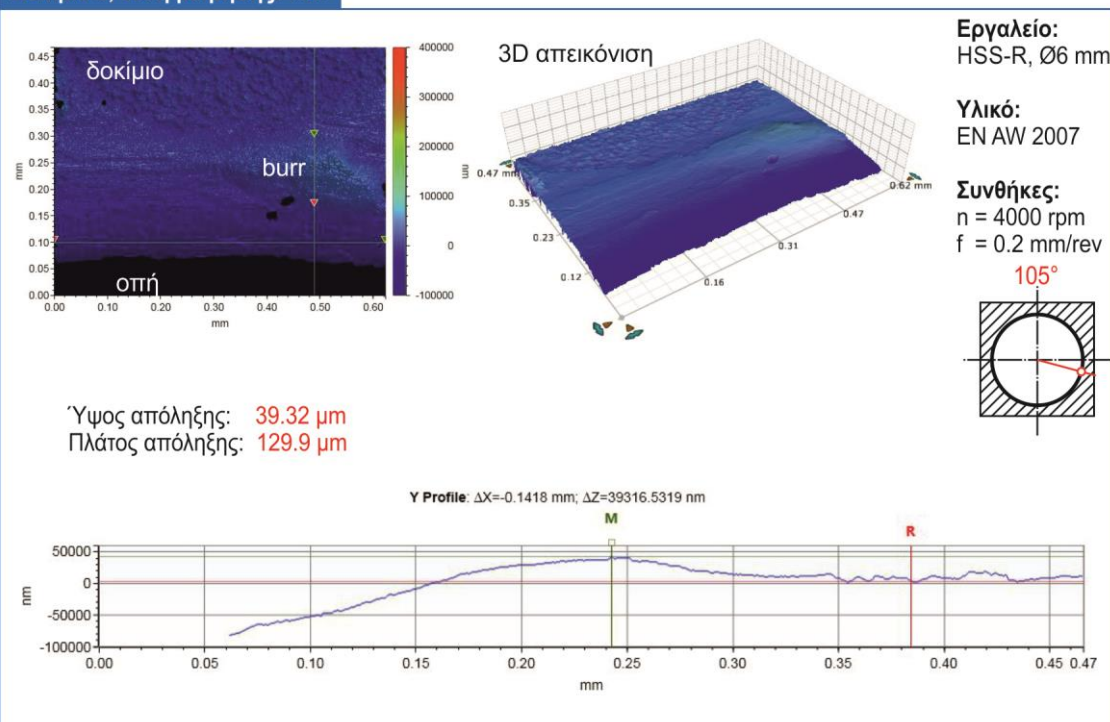




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 90°**

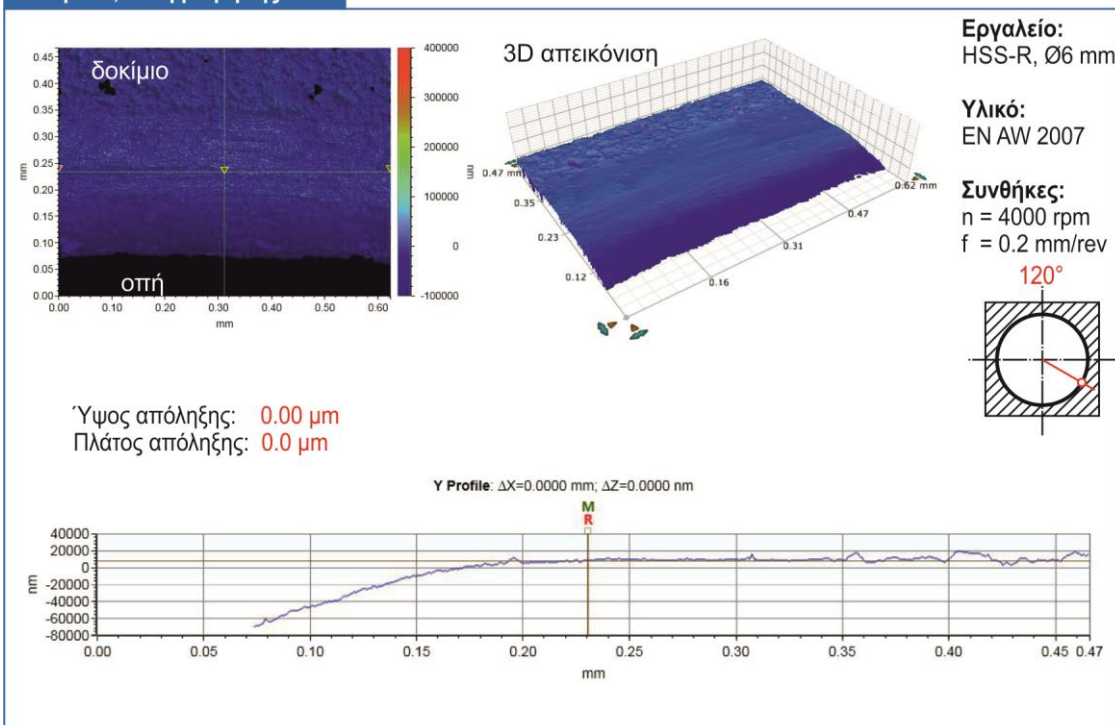


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 105°**

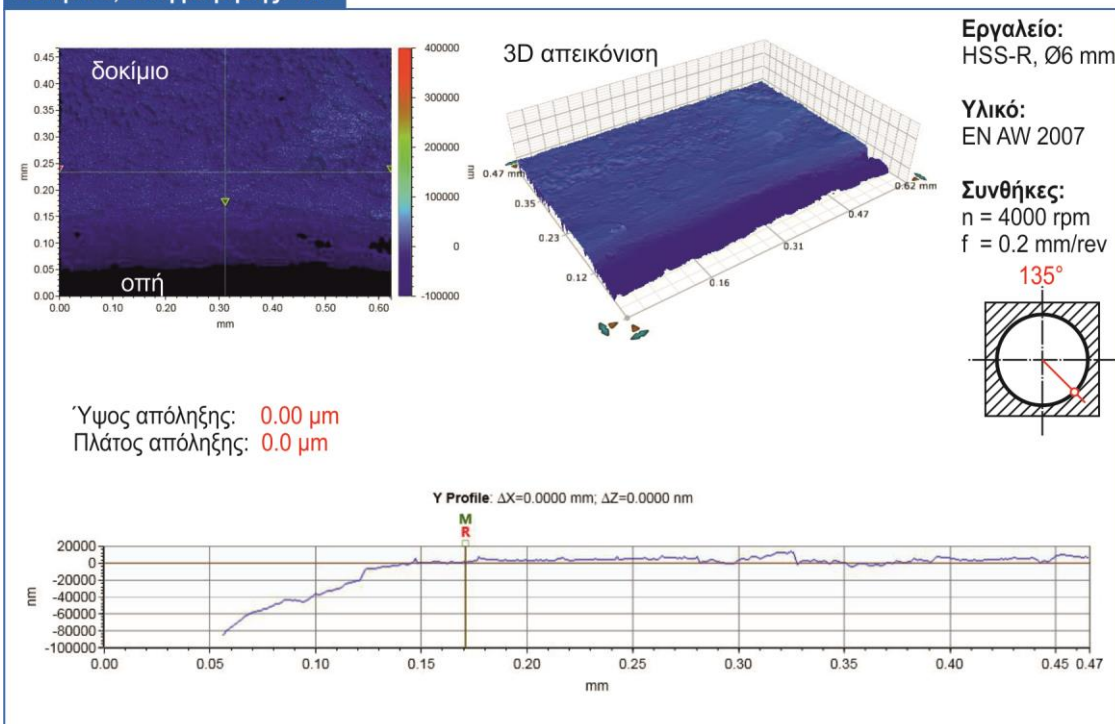




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 120°**

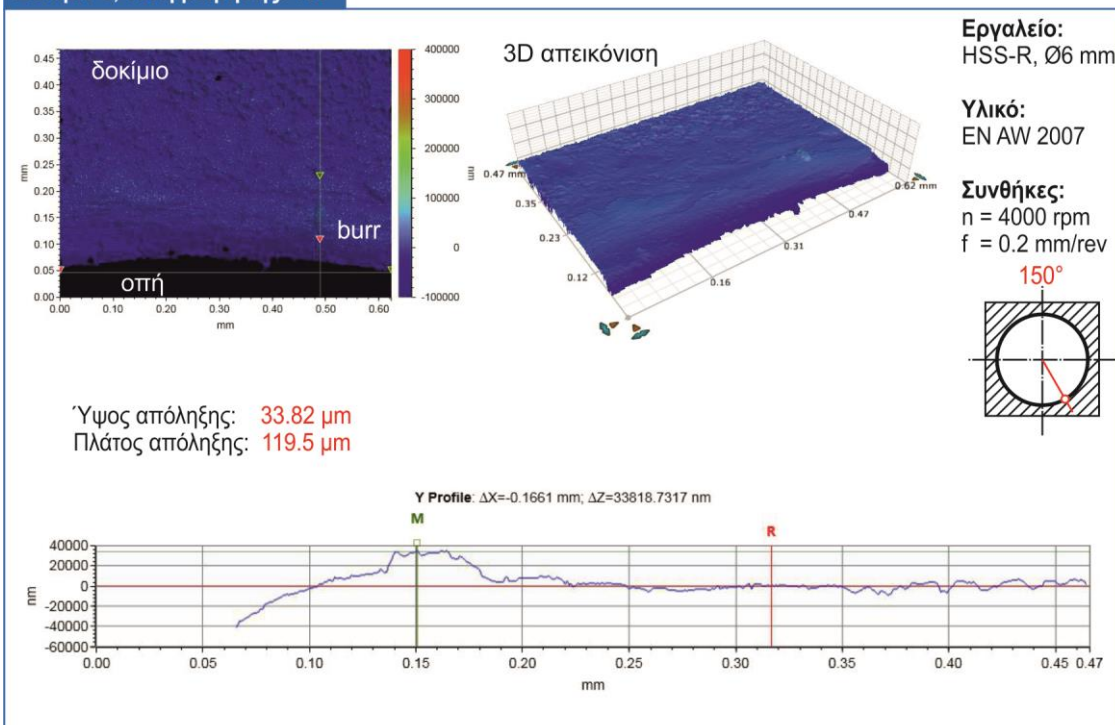


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 135°**

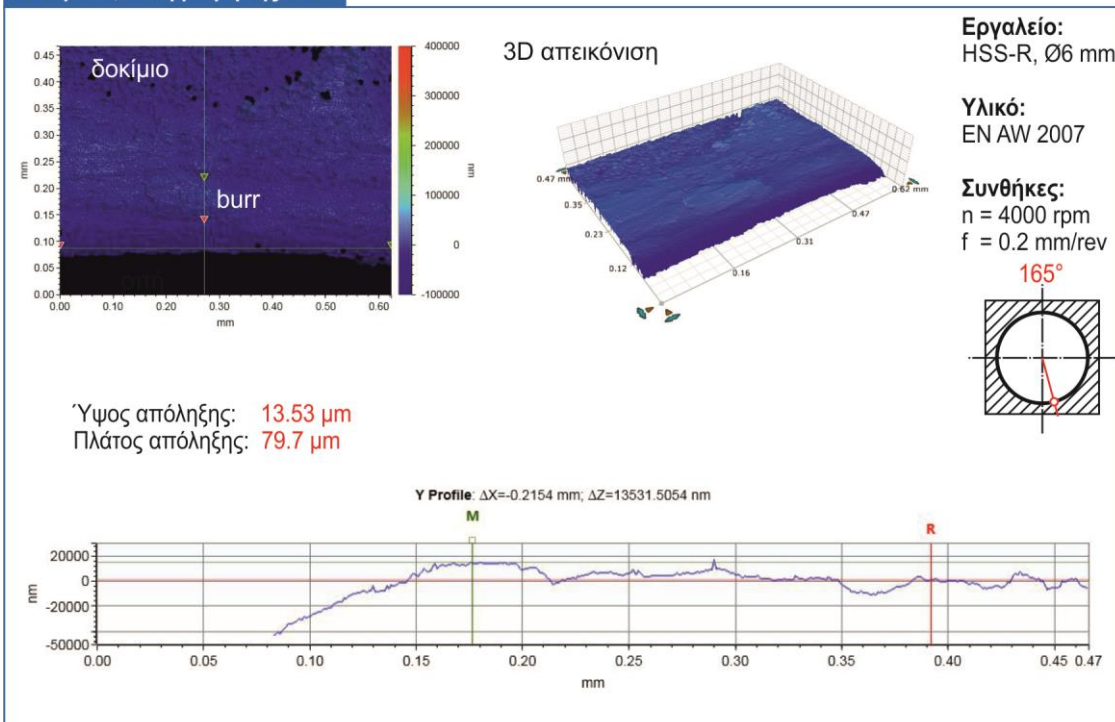




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 150°**



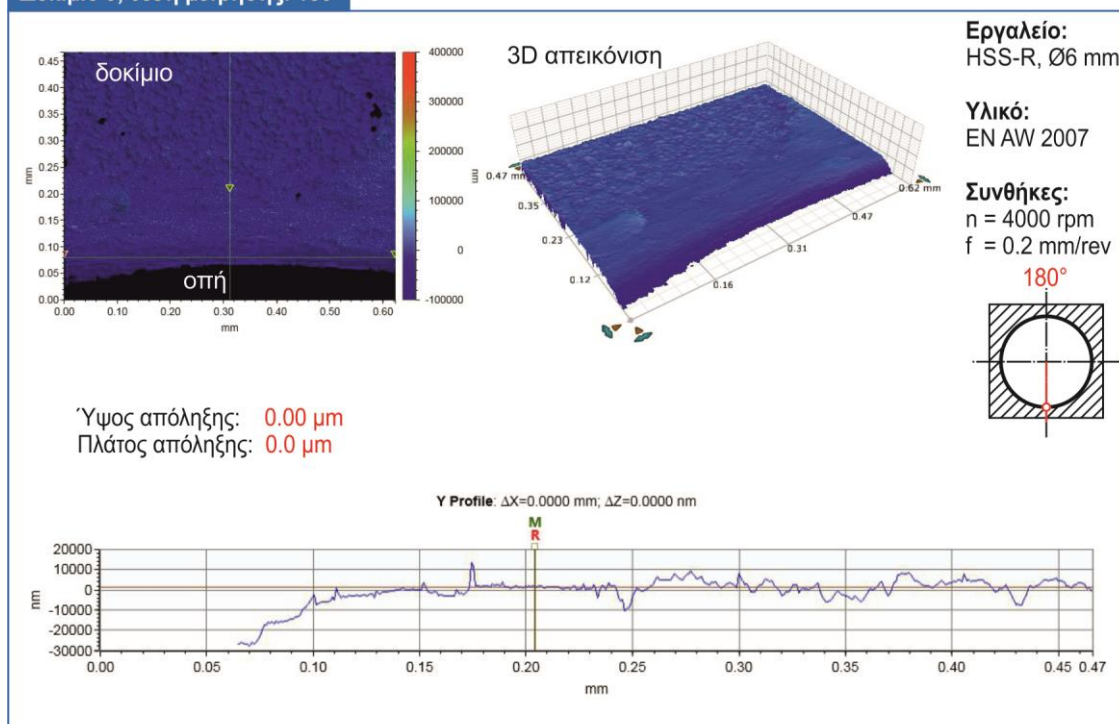
**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 165°**



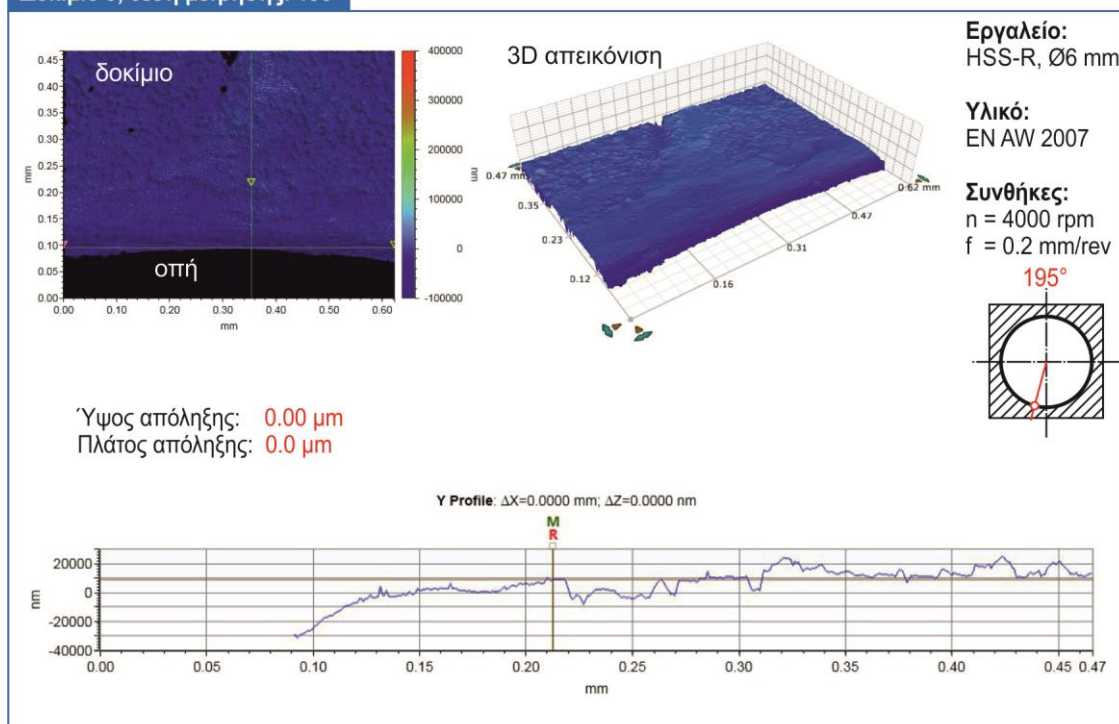




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 180°**

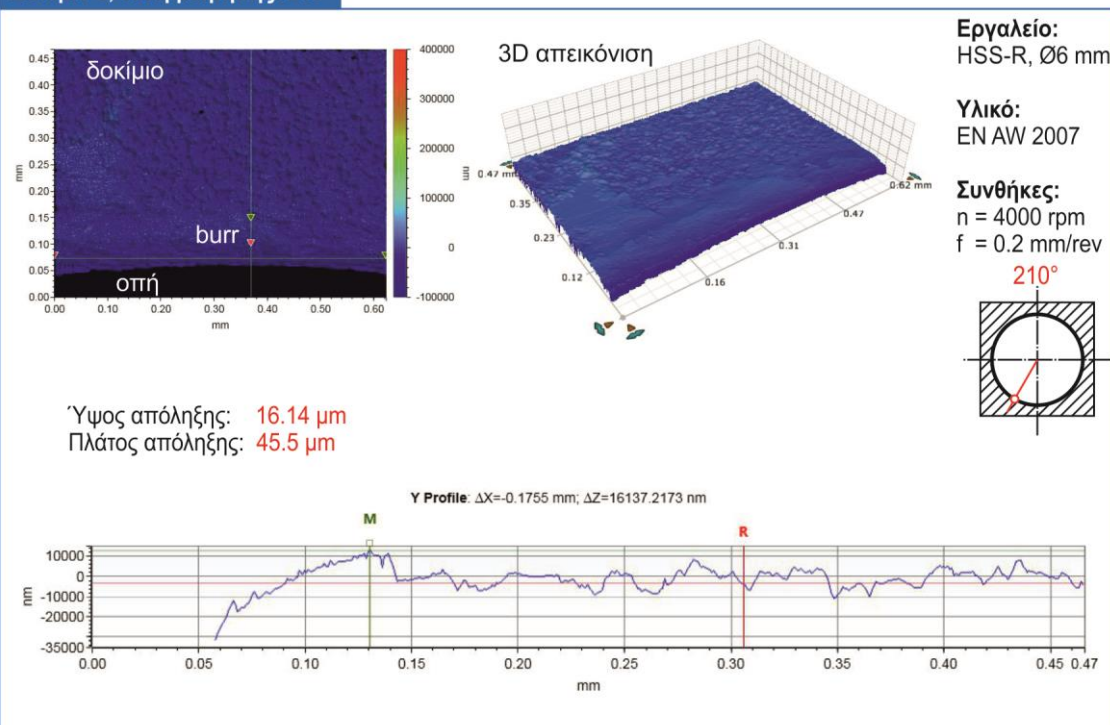


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 195°**

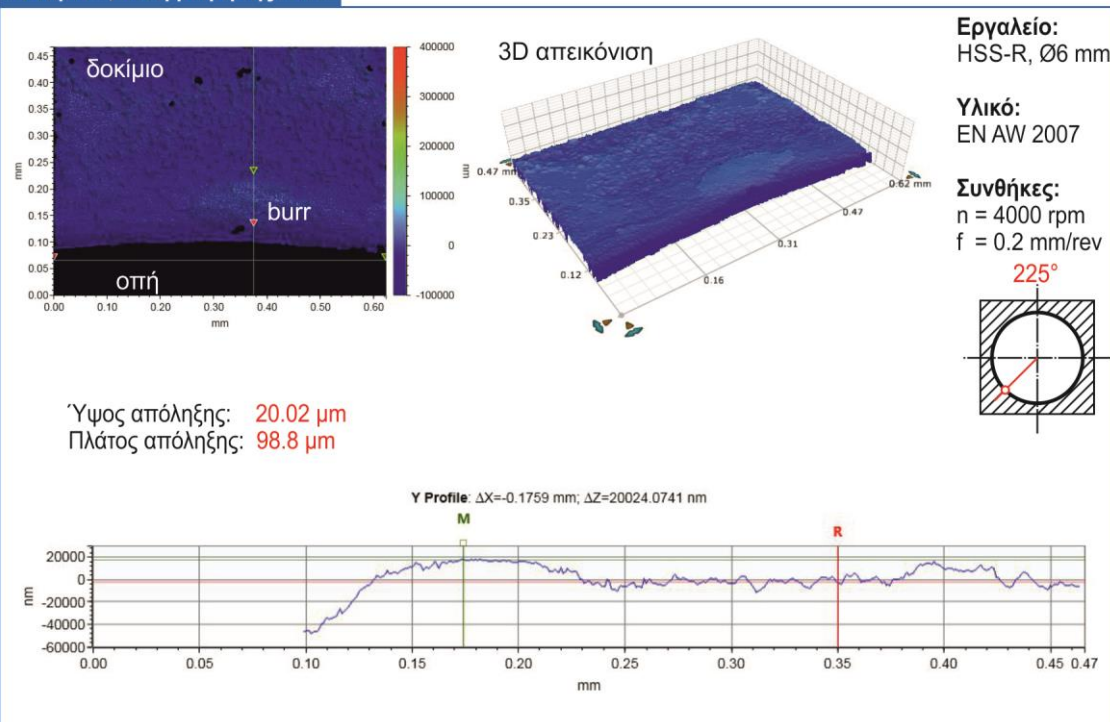




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 210°**

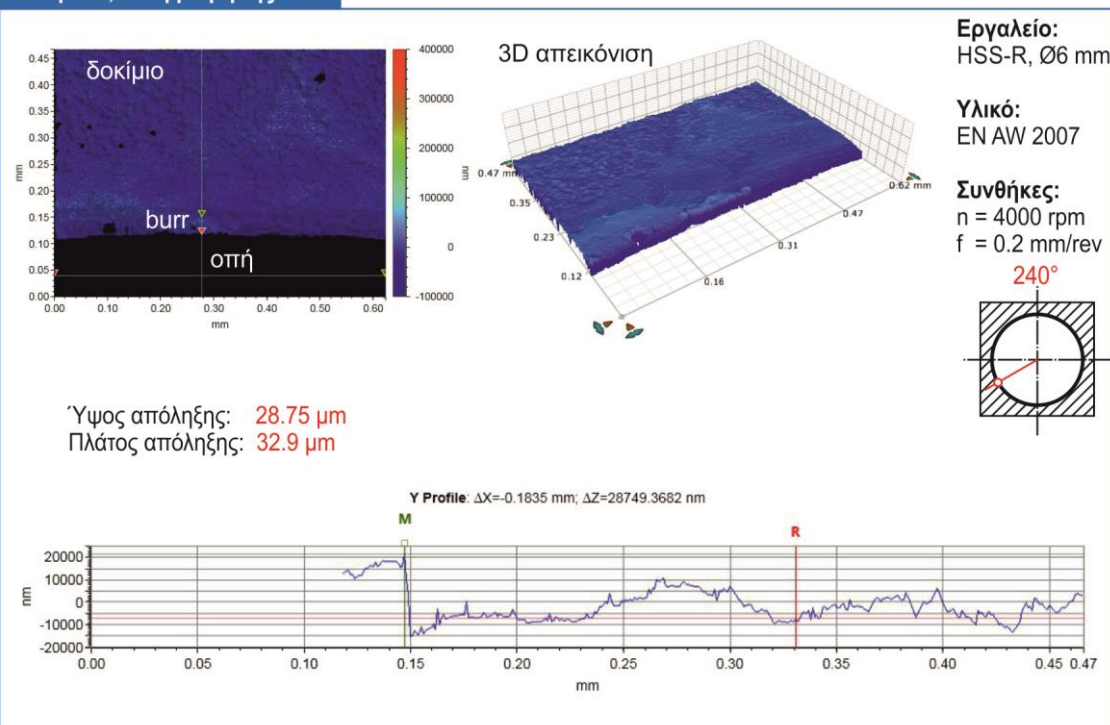


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 225°**

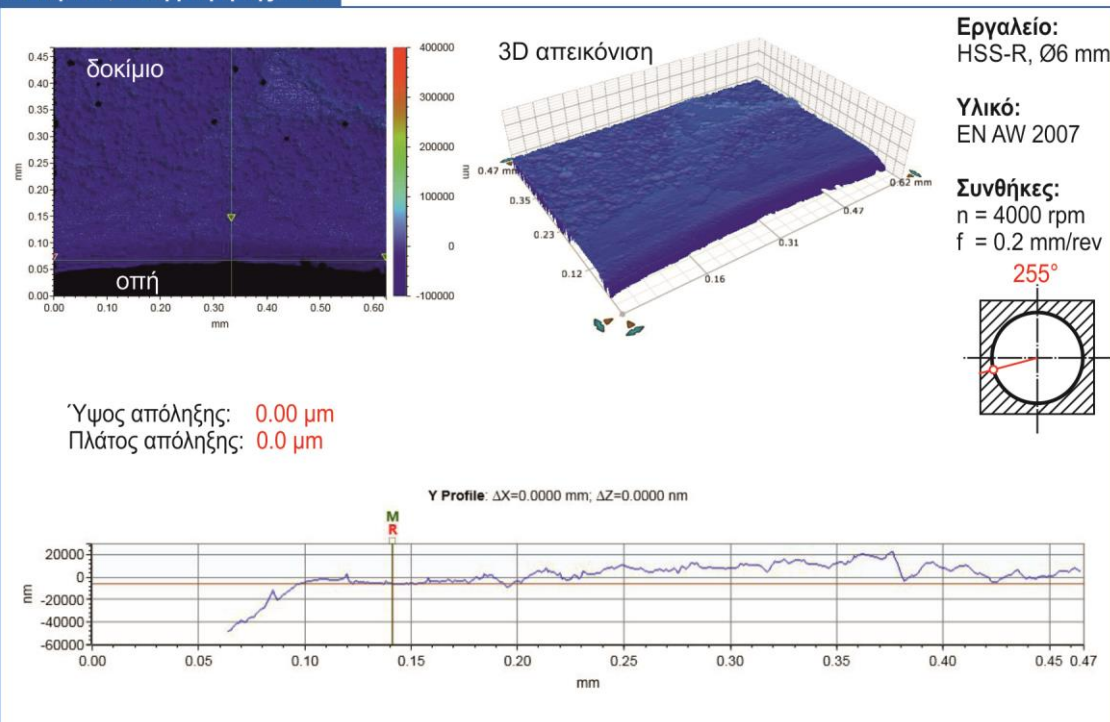




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 240°**



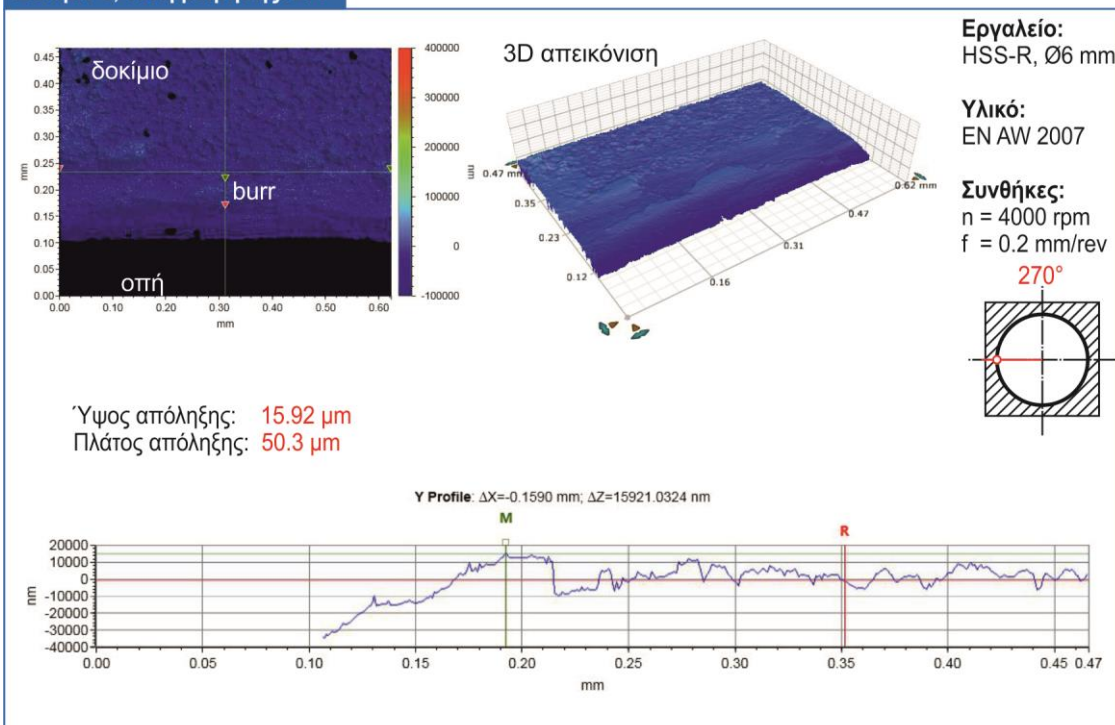
**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 255°**



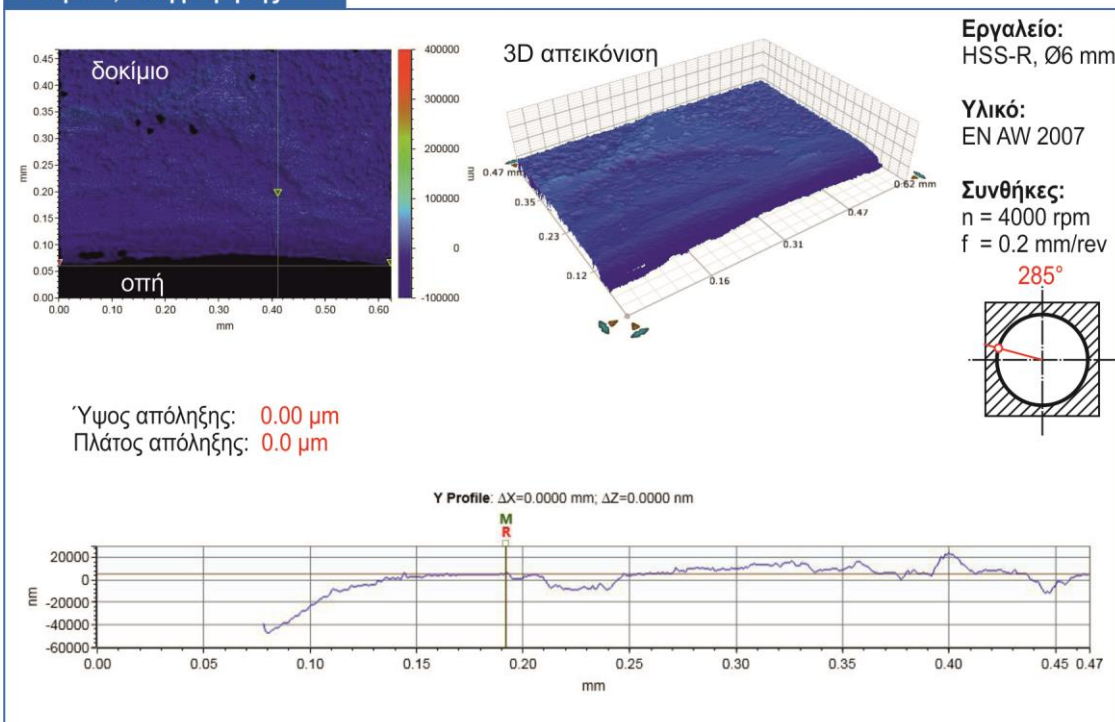




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 270°**

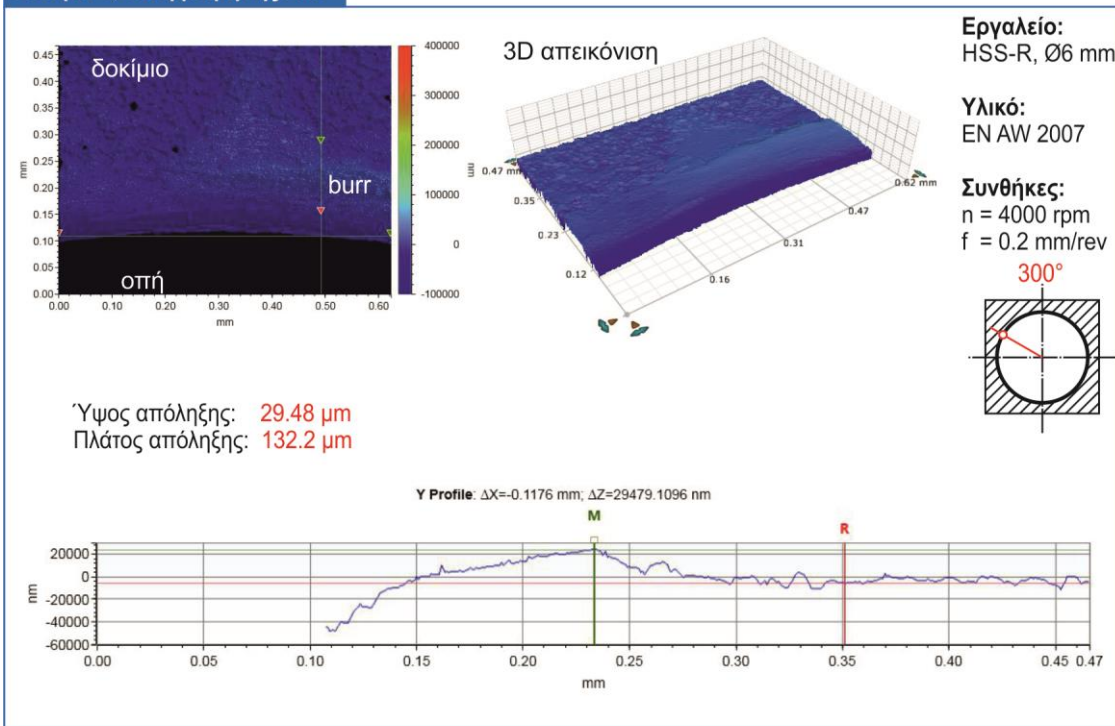


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 285°**

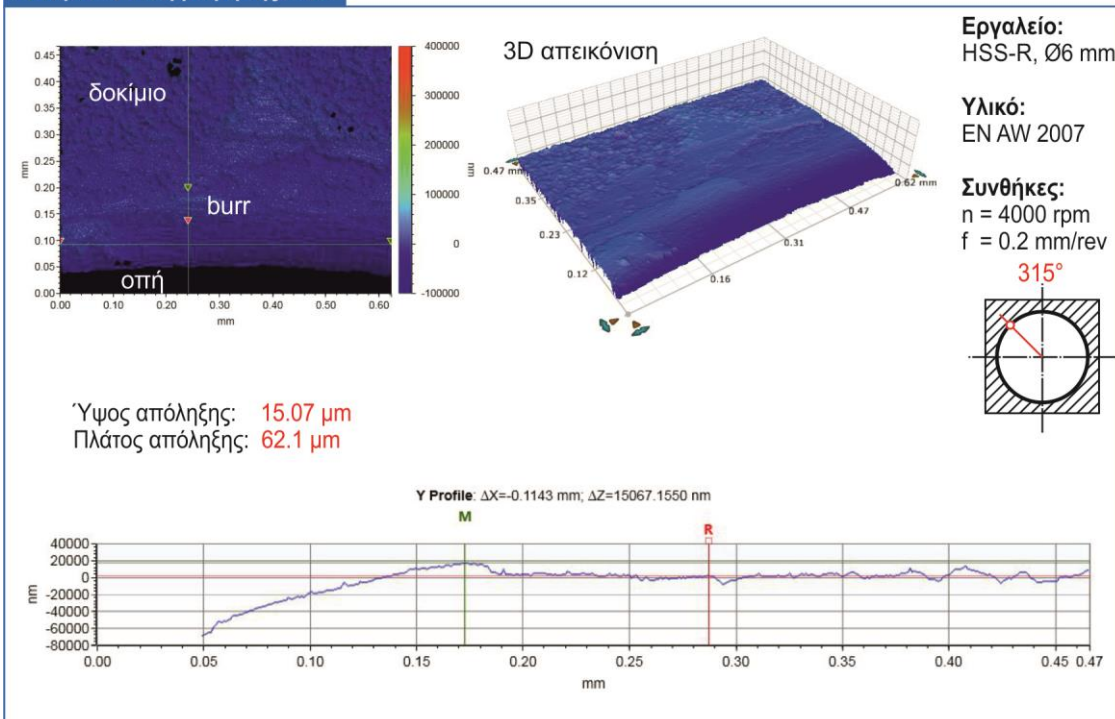




**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 300°**

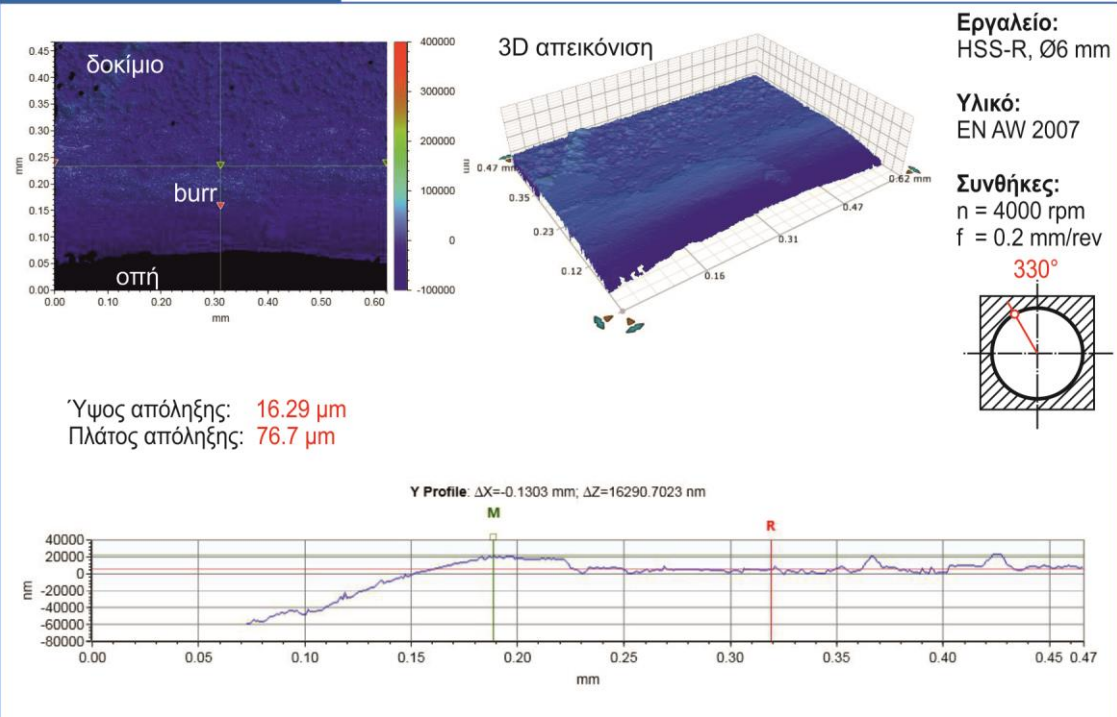


**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 315°**





**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 330°**



**Δοκίμιο 9, θέση μέτρησης: 345°**

