

Σχήμα 4.56: Η παράλληλη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου (B_x) στην επιφάνεια της μέγγενης που χρησιμοποιήθηκε για την κάμψη του ελάσματος 5.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 4.54 και 4.55, παρατηρούμε σχετική ελάττωση της μέσης τιμής της συνιστώσας B_x (κατά ~ 1.5 Oe). Επιπροσθέτως, η B_x εμφανίζει μικρότερη διακύμανση, όπως φαίνεται από την εξομάλυνση των γραφικών παραστάσεων κατά μήκος των αξόνων x και y αντιστοίχως. Κατά μήκος του άξονα y , η μέση τιμή σταθεροποιείται στα $\bar{B}_x = 1.7$ Oe μέχρι την άνω πλευρά του δοκιμίου, όπου οι τιμές κυμαίνονται από $B_x = 1.0$ Oe μέχρι και $B_x = 5.4$ Oe. Κατά μήκος του άξονα x , η μέση τιμή της B_x μειώθηκε σε $\bar{B}_x = 2.8$ Oe, ενώ τα μέγιστα που εμφανίζονταν στα άκρα του δοκιμίου (σχήμα 4.54, πράσινη γραμμή) παρουσιάζουν πτώση. Στην περιοχή του κυκλικού χάσματος, η B_x ελαττώθηκε από $B_x = 5.2$ Oe σε $B_x = 4.5$ Oe.

Η συνολική μείωση του μαγνητικού πεδίου B_x πιθανώς να οφείλεται σε αλλαγή της ανισοτροπίας στην επιφάνεια του δοκιμίου, λόγω παραμενουσών παραμορφωτικών τάσεων. Εκτός από μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, το δοκίμιο πιθανώς να εμφάνισε και ανισοτροπία σχήματος, έπειτα από την εφαρμογή πλαστικής παραμόρφωσης στα άκρα του. Να σημειωθεί επίσης ότι η μέγγενη που χρησιμοποιήθηκε εμφανίζει μη μηδενικές τιμές μαγνητικού πεδίου (σχήμα 4.56), επομένως μπορεί να επηρέασε σε μικρό βαθμό την παραμένουσα μαγνήτιση του ελάσματος 5 κατά την παραμόρφωσή του.

4.3.6 Έλασμα 14 (sheet 14 - κράμα Fe-Si)

Στη συνέχεια, μετρήθηκε το μαγνητικό πεδίο δοκιμίων κατασκευασμένων από μαγνητικό χάλυβα (κράμα Fe-Si). Πρώτα, μετρήθηκε το μαγνητικό πεδίο του αρχικού δείγματος (έλασμα 14). Έπειτα, χρησιμοποιήθηκαν καινούρια δοκίμια μαγνητικού χάλυβα, τα οποία υπέστησαν βαθμιαία αυξανόμενες ψυχρές διελάσεις (υποενότητες 4.3.7-4.3.10).

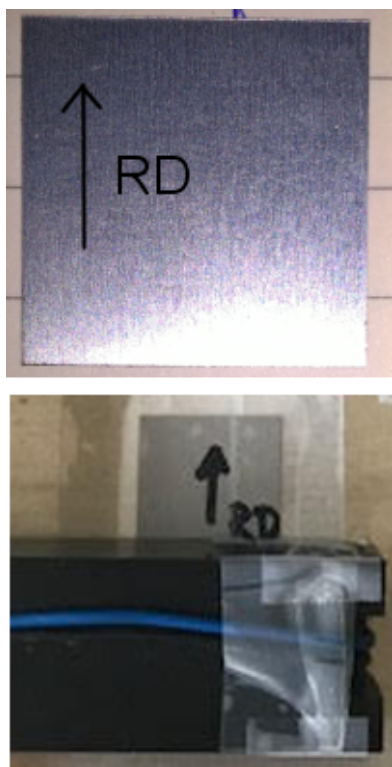
Η ψυχρή διέλαση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε μέσω του ελάστρου του σχήματος 4.57, το οποίο βρίσκεται στο μηχανουργείο του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Κάθε δοκίμιο υπέστη ψυχρή διέλαση πολλαπλές φορές μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή μείωση του πάχους του. Σε επόμενο βήμα, επιχειρήθηκε μαγνήτιση των δοκιμίων με χρήση μόνιμου μαγνήτη $Nd_2Fe_{14}B_2$ είτε κατά μήκος της διεύθυνσης διέλασης (Rolling Direction, RD) είτε κατά μήκος άλλων διευθύνσεων. Για τη μαγνήτιση κάθε δοκιμίου σε συγκεκριμένη διεύθυνση, φέραμε σε το μαγνήτη επαφή με το δοκίμιο και τον μετακινήσαμε παλινδρομικά στην επιφάνεια του δοκιμίου κατ' επανάληψη, κατά μήκος της διεύθυνσης αυτής. Έπειτα, μετρήθηκε το μαγνητικό πεδίο των δοκιμίων και μελετήθηκε η σχετική μεταβολή του, συνυπολογίζοντας και το μικροδομικό χαρακτηρισισμό των δοκιμίων (υποενότητες 4.1 και 4.2).



Σχήμα 4.57: Το έλαστρο που χρησιμοποιήθηκε για την ψυχρή διέλαση (cold rolling) των ελασμάτων Fe-Si, το οποίο βρίσκεται στο μηχανουργείο του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

Το έλασμα 14 (σχήμα 4.58) αποτελεί το αρχικό δοκίμιο του κράματος μαγνητικού χάλυβα, με διαστάσεις $(24.90 \times 24.95) \text{ mm}^2$. Παρόλο που το έλασμα 14 δεν υπέστη ψυχρή διέλαση κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, εφαρμόστηκε σε αυτό κάποια μορφή διέλασης από την εταιρία κατασκευής του. Η διεύθυνση έλασης προσδιορίστηκε από την ύπαρξη χαραγμένων παράλληλων γραμμών στην επιφάνειά του. Στα γραφήματα των σχημάτων 4.60 και 4.61 εμφανίζεται η παράλληλη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του δοκιμίου, με τον άξονα του αισθητήρα GMR παράλληλο και κάθετο στη διεύθυνση έλασης (RD) αντιστοίχως.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο μαγνήτης $Nd_2Fe_{14}B_2$ για τη μαγνήτιση του ελάσματος. Το δοκίμιο μαγνητίστηκε σε διεύθυνση παράλληλη ως προς την επιφάνειά του. Έπειτα, μετρήθηκε η παράλληλη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του ελάσματος, με τον αισθητήρα παράλληλο στην RD (σχήμα 4.62) και κάθετο στην RD (σχήμα 4.63). Ακολούθως, μετρήθηκε η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου παράλληλα (σχήμα 4.64) και κάθετα στην RD (σχήμα 4.65).



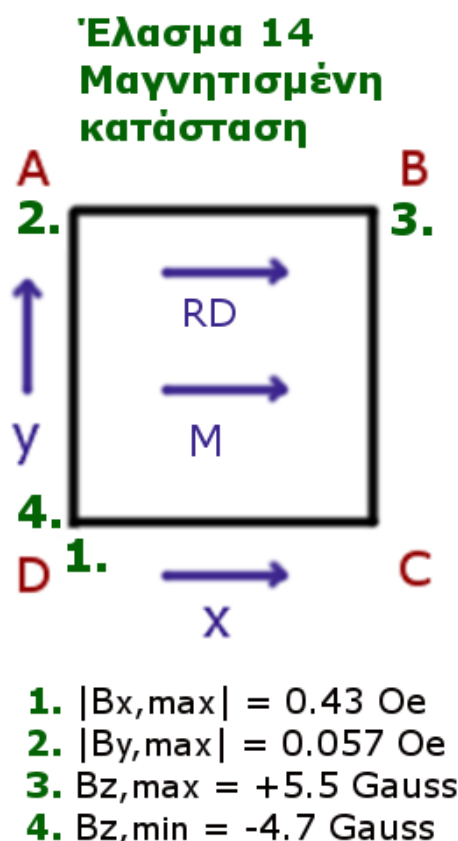
Σχήμα 4.58: Πάνω: Το έλασμα 14 (κράμα Fe-Si), το οποίο έχει διαστάσεις $(24.90 \times 24.95) \text{ mm}^2$ και πάχος 0.51 mm . Κάτω: Το έλασμα 14 (κράμα Fe-Si) κατά τη λήψη μετρήσεων με τον αισθητήρα GMR AA002-02e.

Στο διάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X του ελάσματος 14 (σχήμα 4.7), βλέπουμε ότι η πλειονότητα των κρυσταλλιτών του δοκιμίου είναι προσανατολισμένοι έτσι ώστε τα αντίστοιχα επίπεδα με δείκτες Miller (110) να είναι παράλληλα στην επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτό δείχνει ότι, σε μεγάλο ποσοστό, οι κρυσταλλίτες είναι τυχαία προσανατολισμένοι. Στο διάγραμμα Williamson-Hall (σχήμα 4.13), παρατηρούμε ότι η ανάκλαση (200) αποκλίνει σημαντικά από την ευθεία της σχέσης Williamson-Hall, επομένως οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου εμφανίζουν ανισοτροπία.

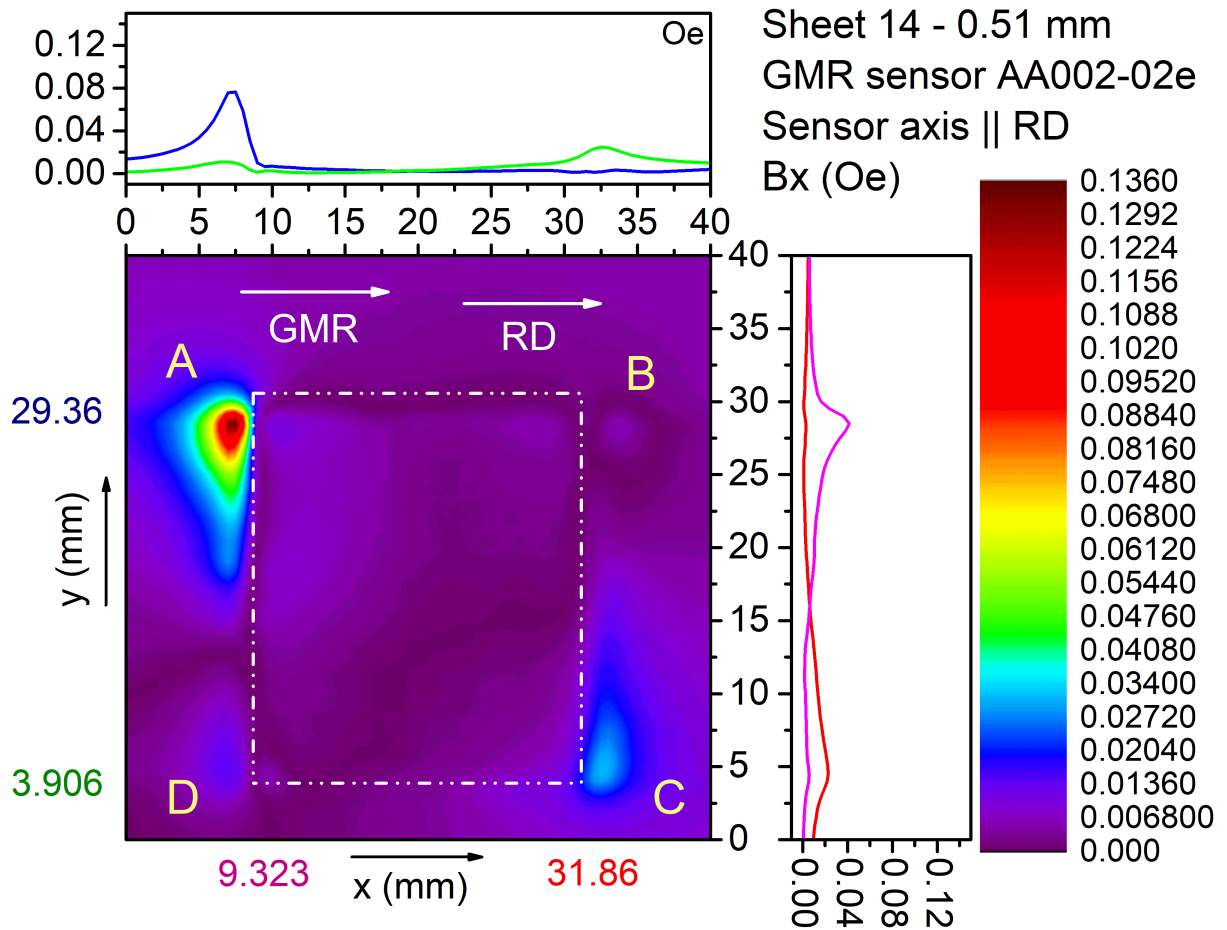
Παρατηρώντας τα σχήματα 4.60 και 4.61, βλέπουμε ότι οι συνιστώσες B_x και B_y παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές στο αμαγνήτιστο δοκίμιο, όπως αναμενόταν. Υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κάθετα στη διεύθυνση έλασης, με μέγιστη τιμή $\sim B_y = 0.15 \text{ Oe}$ στο άκρο B. Στη μαγνητισμένη κατάσταση (σχήματα 4.62 και 4.63), ότι το δοκίμιο χαρακτηρίζεται από πρακτικά μηδενικές τιμές των παράλληλων συνιστωσών. Η αντίστοιχη συνιστώσα B_z (σχήμα 4.64) έχει συγκριτικά υψηλότερες τιμές, με μέγιστη τιμή $\sim B_z = 5.5 \text{ Gauss}$ (άκρο B).

Όπως φαίνεται στα σχήματα 4.64 και 4.65, το δοκίμιο εμφάνισε μαγνητικούς πόλους κατά μήκος των πλευρών AD και BC στη μαγνητισμένη κατάσταση, απόλυτης τιμής $|B_z| = 2.5 \text{ Gauss}$. Συνεπώς, ο προτιμητέος προσανατολισμός μαγνήτισης του δοκιμίου πιθανώς να είναι κάθετος στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στο σχήμα 4.59, εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των επιμέρους συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του μαγνητισμένου ελάσματος.

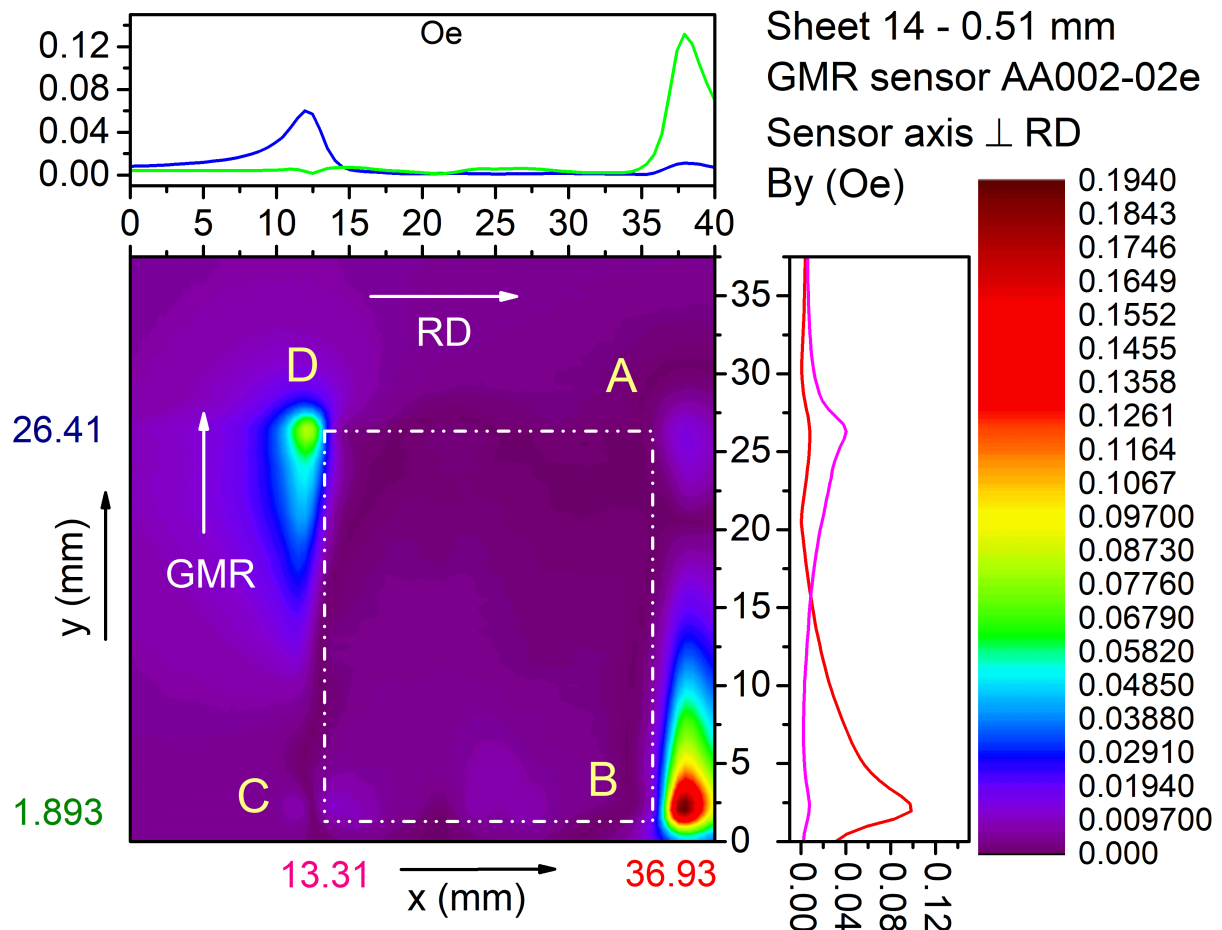
Συνολικά, το έλασμα 14 παρουσίασε μη μηδενική παραμένουσα μαγνήτιση, παρόλο που είναι κατασκευασμένο από μαγνητικώς μαλακό σιδηρομαγνητικό κράμα. Αυτό πιθανώς να σχετίζεται με την ύπαρξη ανισοτροπίας λόγω παραμενουσών τάσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου.



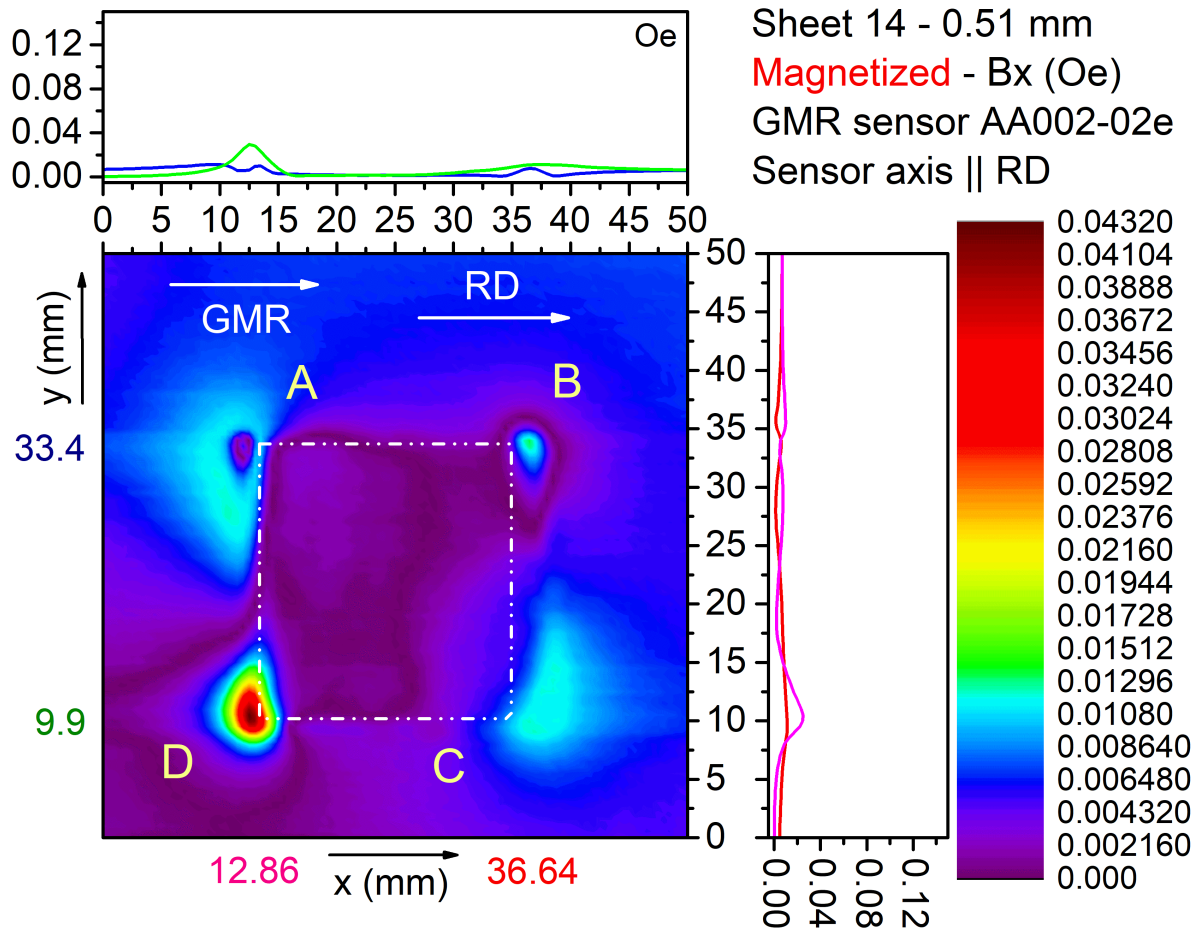
Σχήμα 4.59: Οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών B_x , B_y και B_z στην επιφάνεια του ελάσματος 14 (μαγνητισμένο).



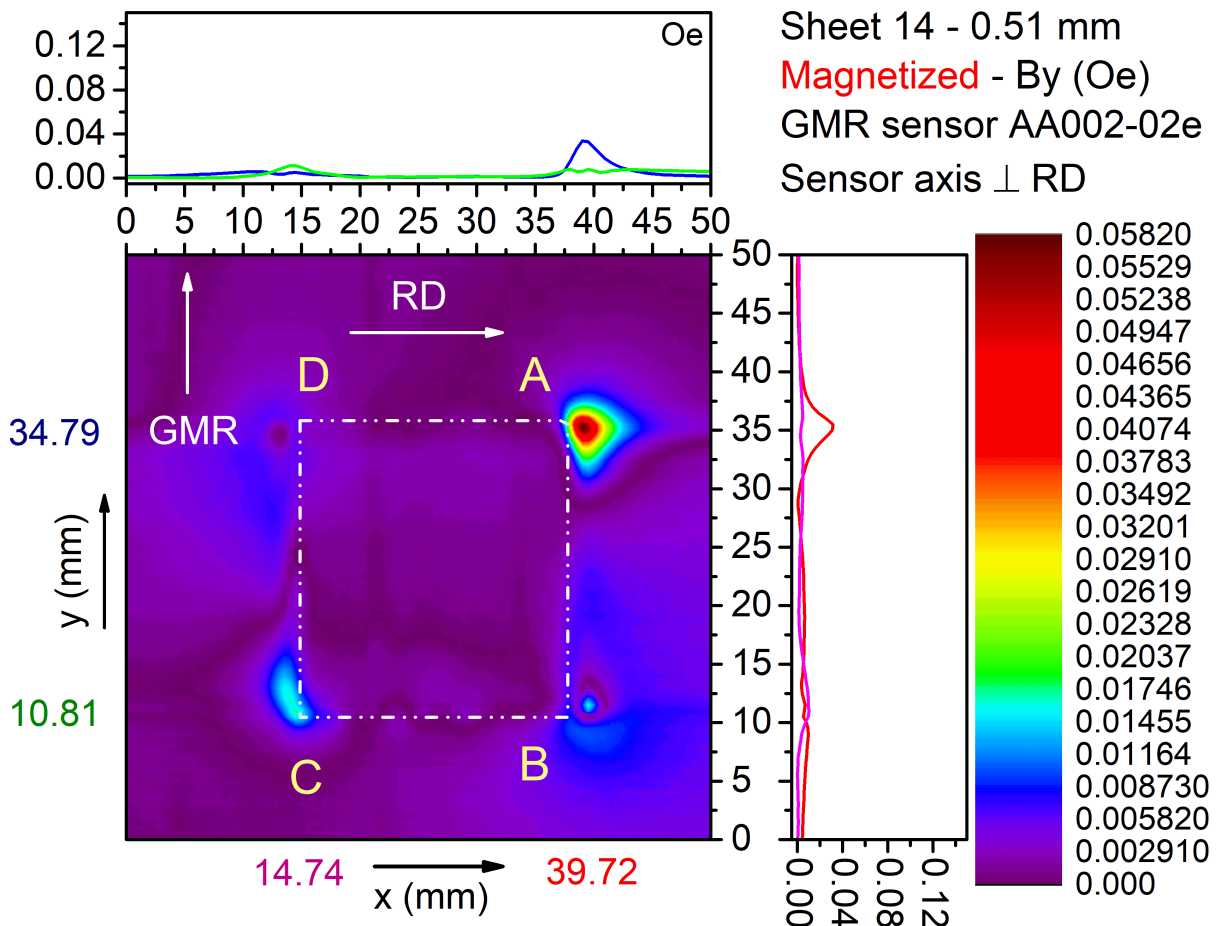
Σχήμα 4.60: Η παράλληλη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στην άνω επιφάνεια του ελάσματος 14 (κράμα Fe-Si). Ο αισθητήρας είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση έλασης.



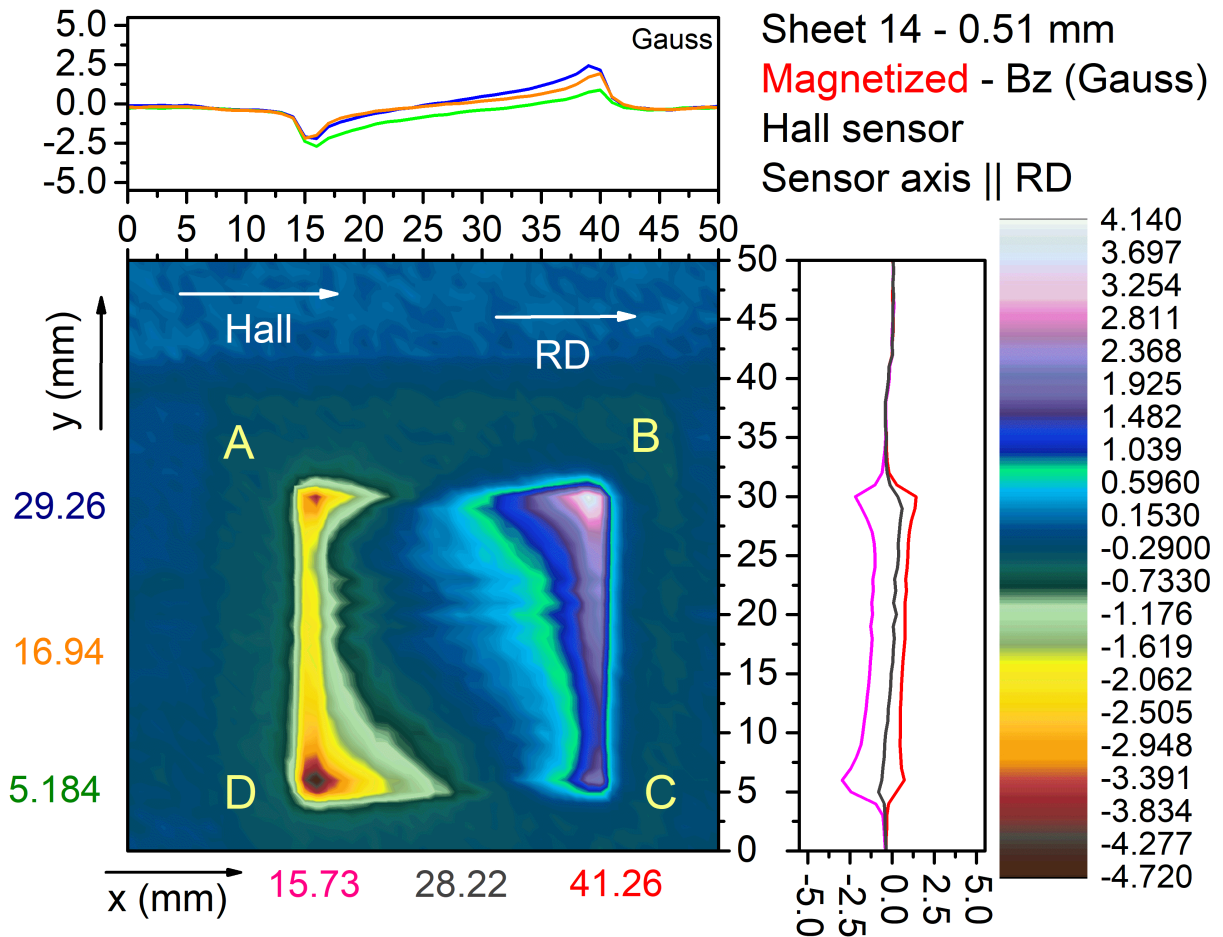
Σχήμα 4.61: Ομοίως, με τον αισθητήρα κάθετο στη διεύθυνση έλασης.



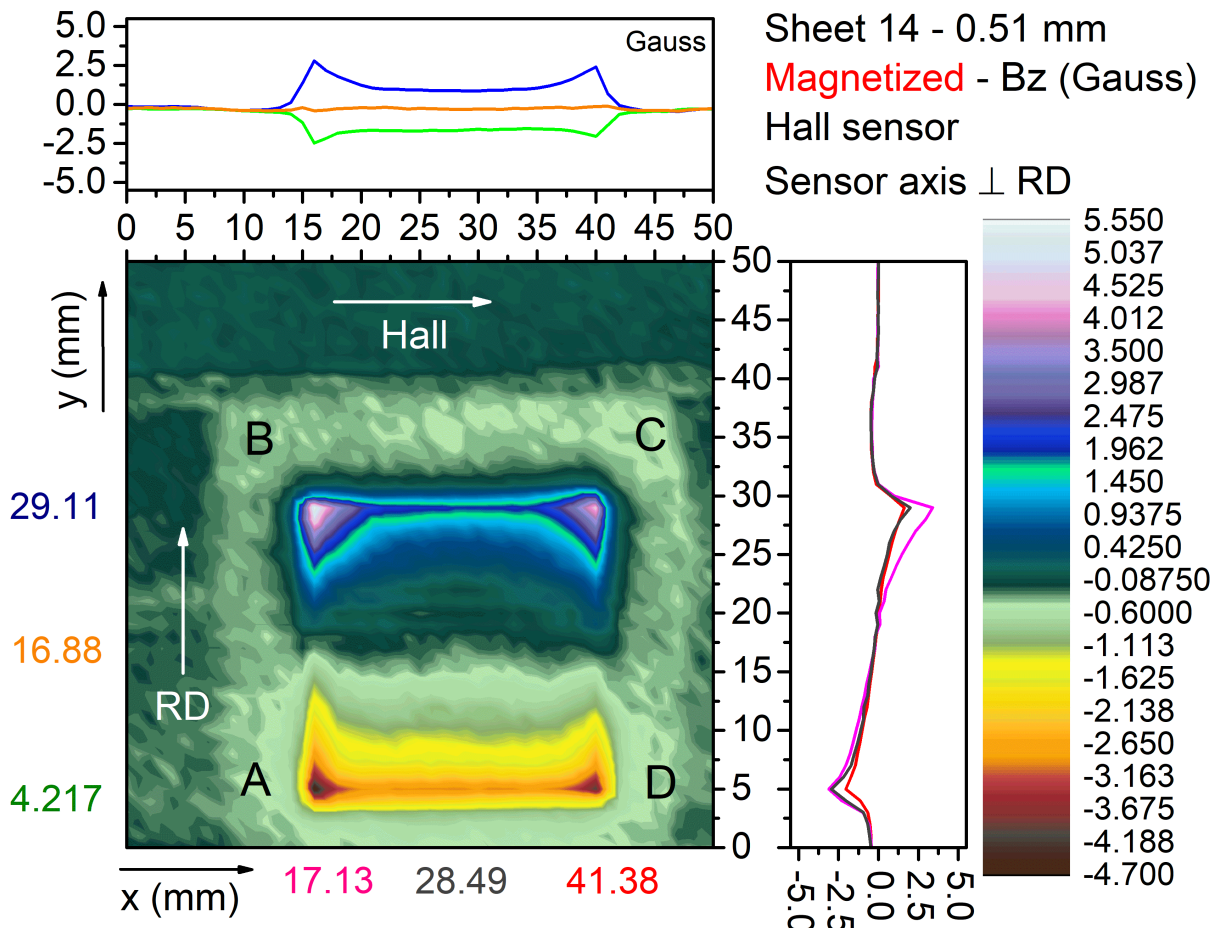
Σχήμα 4.62: Η παράλληλη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στην άνω επιφάνεια του ελάσματος 14 (κράμα Fe-Si), έπειτα από μαγνήτιση. Ο αισθητήρας είναι παράλληλος στη διεύθυνση έλασης.



Σχήμα 4.63: Ομοίως, με τον αισθητήρα κάθετο στη διεύθυνση έλασης.

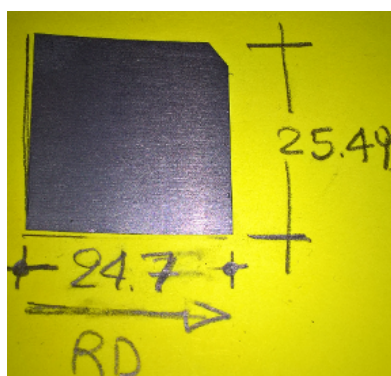


Σχήμα 4.64: Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου (B_z) στην επιφάνεια του ελάσματος 14 (κράμα Fe-Si), μετά από μαγνήτιση του δείγματος. Ο αισθητήρας είναι παράλληλος στη διεύθυνση έλασης.



Σχήμα 4.65: Ομοίως, με τον αισθητήρα κάθετο στη διεύθυνση έλασης.

4.3.7 Έλασμα 15 (sheet 15 - κράμα Fe-Si)



Σχήμα 4.66: Πάνω: Το έλασμα 15 (κράμα Fe-Si), το οποίο έχει διαστάσεις $(24.70 \times 25.49) \text{ mm}^2$ και πάχος 0.31 mm . Κάτω: Το έλασμα 15, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με χρήση αισθητήρα GMR AA002-02e.

Το επόμενο δοκίμιο μαγνητικού χάλυβα (έλασμα 15, σχήμα 4.66) υπέστη διέλαση εν ψυχρώ. Το πάχος του από 0.51 mm μειώθηκε σε 0.31 mm , σε σύγκριση με το αρχικό δοκίμιο κατασκευαστικού χάλυβα (έλασμα 14). Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι $(24.70 \times 25.49) \text{ mm}^2$. Αρχικά, μετρήθηκε η συνιστώσα B_x του μαγνητικού πεδίου, η οποία είναι παράλληλη στην RD του ελάσματος 15 (σχήμα 4.68), καθώς και η συνιστώσα B_y , η οποία είναι κάθετη ως προς την RD (σχήμα 4.69). Εν συνεχεία, το δοκίμιο μαγνητίστηκε παράλληλα ως προς την RD, με χρήση του μαγνήτη $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}_2$. Μετρήθηκαν εκ νέου οι παράλληλες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.70 και 4.71. Επίσης, μετρήθηκε η συνιστώσα B_z , για μαγνήτιση παράλληλη ως προς την RD (σχήμα 4.72). Ακολούθως, επιχειρήθηκε μαγνήτιση δοκιμίου σε διεύθυνση κάθετη ως προς την RD, και μετρήθηκε ξανά η συνιστώσα B_z (σχήμα 4.73).

Στα διάγραμμα περιθλασης ακτίνων-X του ελάσματος 15 (σχήματα 4.9 και 4.8), παρατηρούμε ότι η διέλαση προκάλεσε κατακόρυφη αύξηση των ανακλάσεων με δείκτες Miller (200) και (211), ενώ πρακτικά εξάλειψε την κορυφή με αντίστοιχους δείκτες Miller (110). Επομένως, οι περισσότεροι κρυσταλλίτες επιφανειακά στο δοκίμιο έχουν τουλάχιστον έναν κύριο κρυσταλλογραφικό άξονα (διευθύνσεις $[100]$, $[010]$ και $[001]$) παράλληλο στην επιφάνεια του δοκιμίου. Παράλληλα στην επιφάνεια του δοκιμίου είναι και τα κρυσταλλικά επίπεδα (211). Η μετατόπιση του κεντροειδούς των κορυφών (200) και (110) προς μεγαλύτερες γωνίες, δείχνει την ύπαρξη θλιπτικών παραμενουσών τάσεων κάθετα στην επιφάνεια του ελάσματος. Η σχετική διαπλάτυνση των κορυφών περιθλασης οφείλεται επίσης στη συσσώρευση τάσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου.

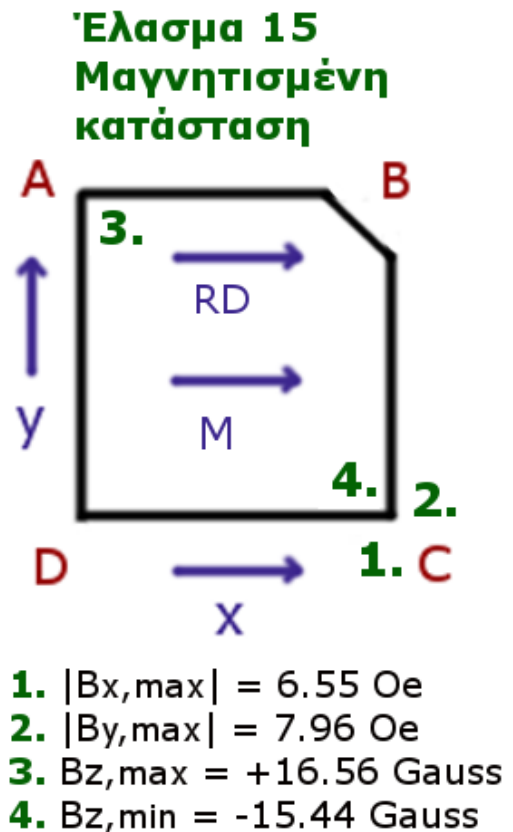
Στο αντίστοιχο διάγραμμα Williamson-Hall του ελάσματος 15 (σχήμα 4.14), βλέπουμε ότι η απόκλιση που παρουσίαζε η ανάκλαση (200) από την ευθεία της σχέσης Williamson-Hall μειώθηκε σημαντικά, σε σύγκριση με την περίπτωση του ελάσματος 14. Αυτό δείχνει σχετική μείωση της ανισοτροπίας που εμφάνιζαν οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου. Επίσης, παρατηρείται αύξηση των τυχαίων παραμορφώσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Συνολικά, η διέλαση προκάλεσε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών, αύξησε τις παραμένουσες μηχανικές τάσεις και μείωσε την ανισοτροπία των παραμορφώσεων. Με βάση τα παραπάνω, το δοκίμιο αναμένεται να εμφανίσει υψηλότερες τιμές παραμένουσας μαγνήτισης και σχετικά ομοιόμορφη κατανομή διαφεύγοντος μαγνητικού πεδίου.

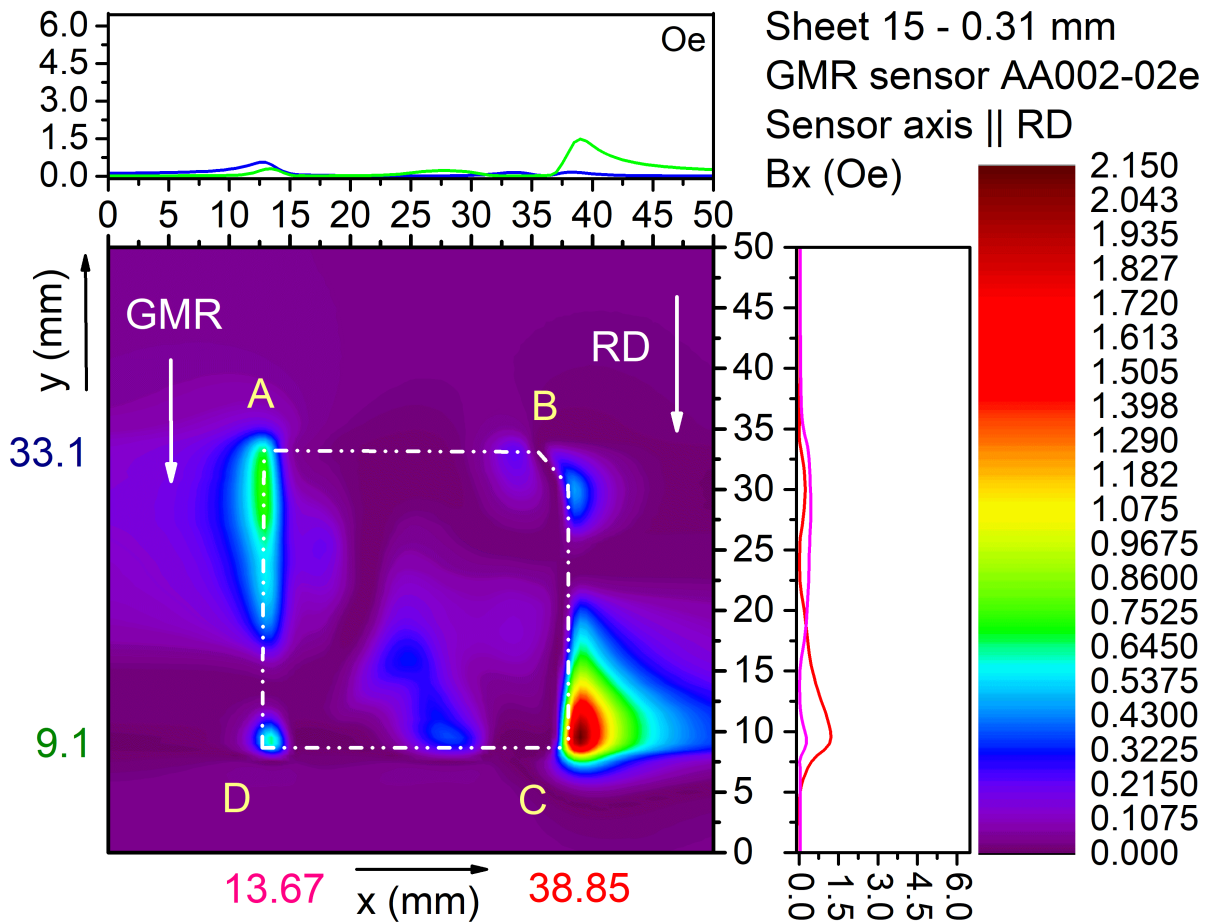
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων μεταξύ της αμαγνήτιστης (σχήματα 4.68 και 4.69) και της μαγνητισμένης κατάστασης (σχήματα 4.70 και 4.71), παρατηρούμε ότι το έλασμα χαρακτηρίζεται από σημαντική αύξηση των συνιστωσών B_x και B_y , όπως αναμενόταν. Κατά μήκος της RD, η παράλληλη συνιστώσα εμφανίζει συμμετρική κατανομή και σχετικά υψηλές τιμές σε όλη την έκταση του ελάσματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.70. Η μέση τιμή της είναι $\sim B_x = 3.0$ Oe, ενώ κατά μήκος των πλευρών AD και BC παρουσιάζει μέγιστο, με τιμή έντασης $\sim B_x = 4.5$ Oe. Κάθετα στη διεύθυνση έλασης, η παράλληλη συνιστώσα είναι πρακτικά μηδενική στην επιφάνεια του δοκιμίου, με εξαίρεση τα σημειακά μέγιστα που εμφανίζονται στα άκρα του, τιμών έντασης από 4.0 Oe μέχρι 6.5 Oe. Παρατηρώντας την αντίστοιχη συνιστώσα B_z στην επιφάνεια του ελάσματος (σχήμα 4.72), βλέπουμε ότι δημιουργήθηκαν μαγνητικοί πόλοι κατά μήκος των πλευρών AD και BC.

Ανάλογη μορφή παρουσιάζει η συνιστώσα B_z και στην περίπτωση μαγνήτισης κάθετης προς τη διεύθυνση έλασης (σχήμα 4.73), με την εμφάνιση μαγνητικών πόλων στις πλευρές AB και DC. Και στις δύο περιπτώσεις, το πεδίο στα ζεύγη των μαγνητικών πόλων έχει τιμές $\sim B_z = \pm 9.0$ Gauss. Επομένως, οι προτιμητέες διευθύνσεις μαγνήτισης του ελάσματος προσανατολίζονται είτε παράλληλα είτε κάθετα στη διεύθυνση έλασης. Στο σχήμα 4.67, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των επιμέρους συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του ελάσματος 15, για μαγνήτιση παράλληλη στην RD. Σε αυτό, βλέπουμε ότι το μαγνητικό πεδίο του ελάσματος είναι κατά μεγάλο ποσοστό κάθετο στην επιφάνειά του.

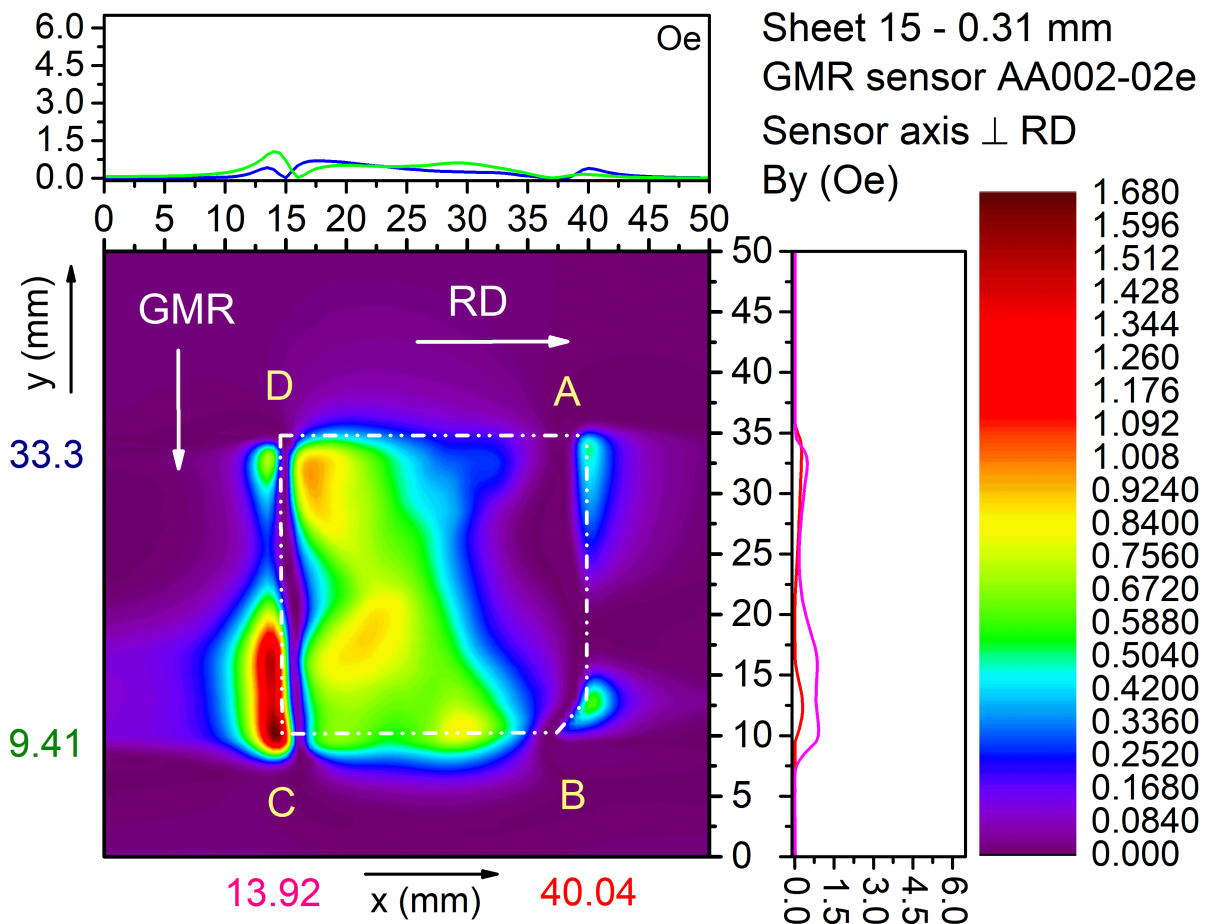
Συνολικά, το έλασμα παρουσίασε αισθητά υψηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση, σε σύγκριση με το αρχικό δοκίμιο μαγνητικού χάλυβα (έλασμα 14). Να σημειωθεί ότι στη συνολική μορφή του μαγνητικού πεδίου του ελάσματος ενδεχομένως να συνέβαλε και η ανισοτροπία σχήματος που εμφανίζει.



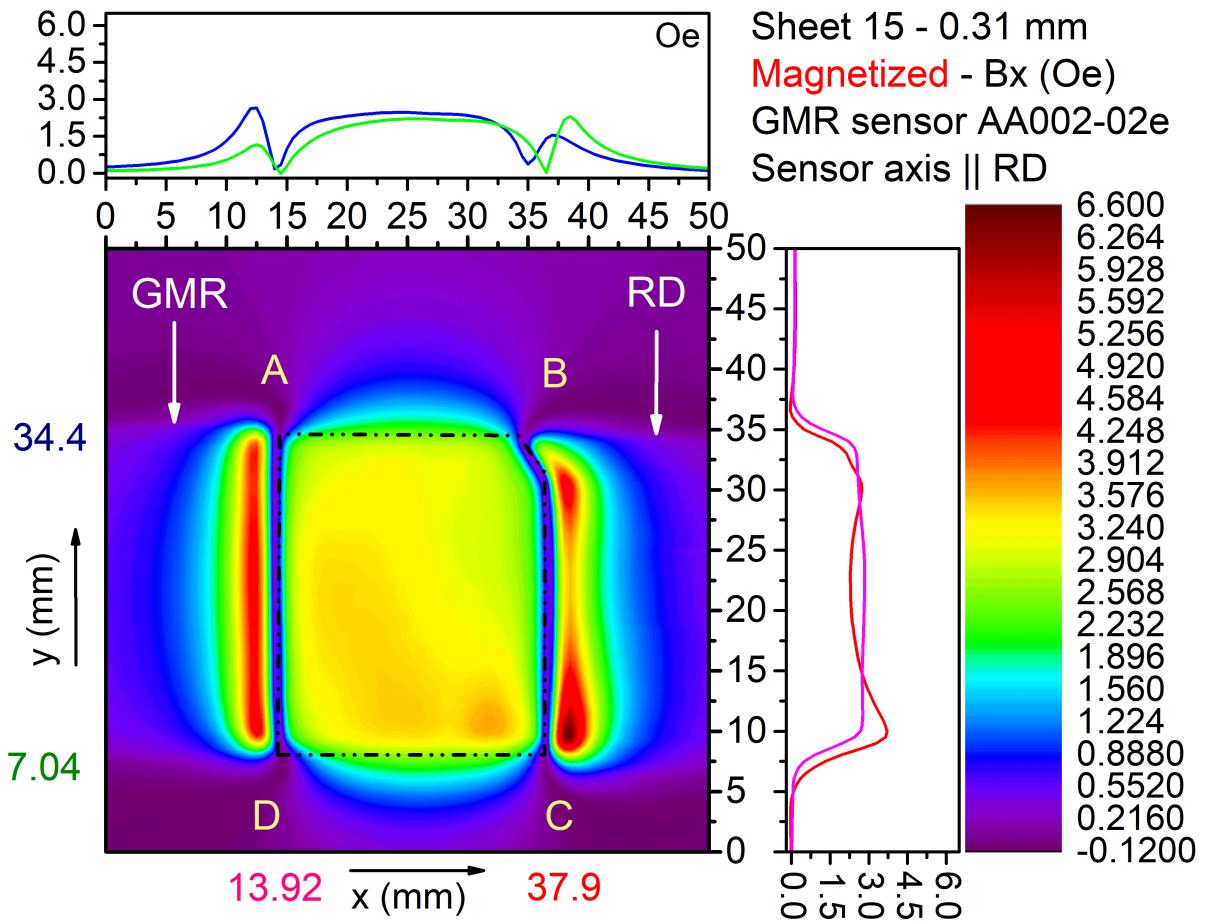
Σχήμα 4.67: Οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών B_x , B_y και B_z του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια του ελάσματος 15, για μαγνήτιση παράλληλη στη διεύθυνση έλασης.



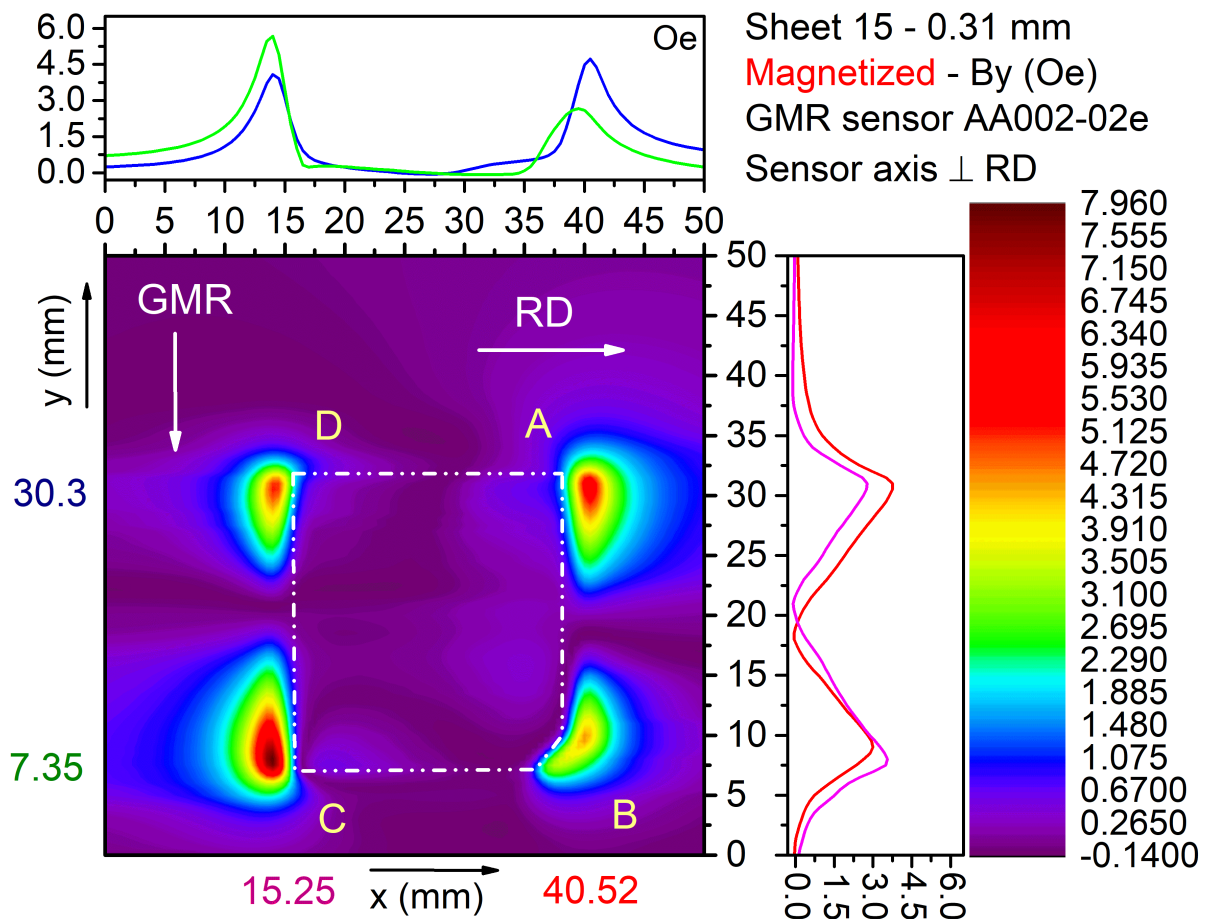
Σχήμα 4.68: Η παράλληλη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στην άνω επιφάνεια του ελάσματος 15 (κράμα Fe-Si). Ο αισθητήρας είναι παράλληλος ως προς τη διεύθυνση έλασης.



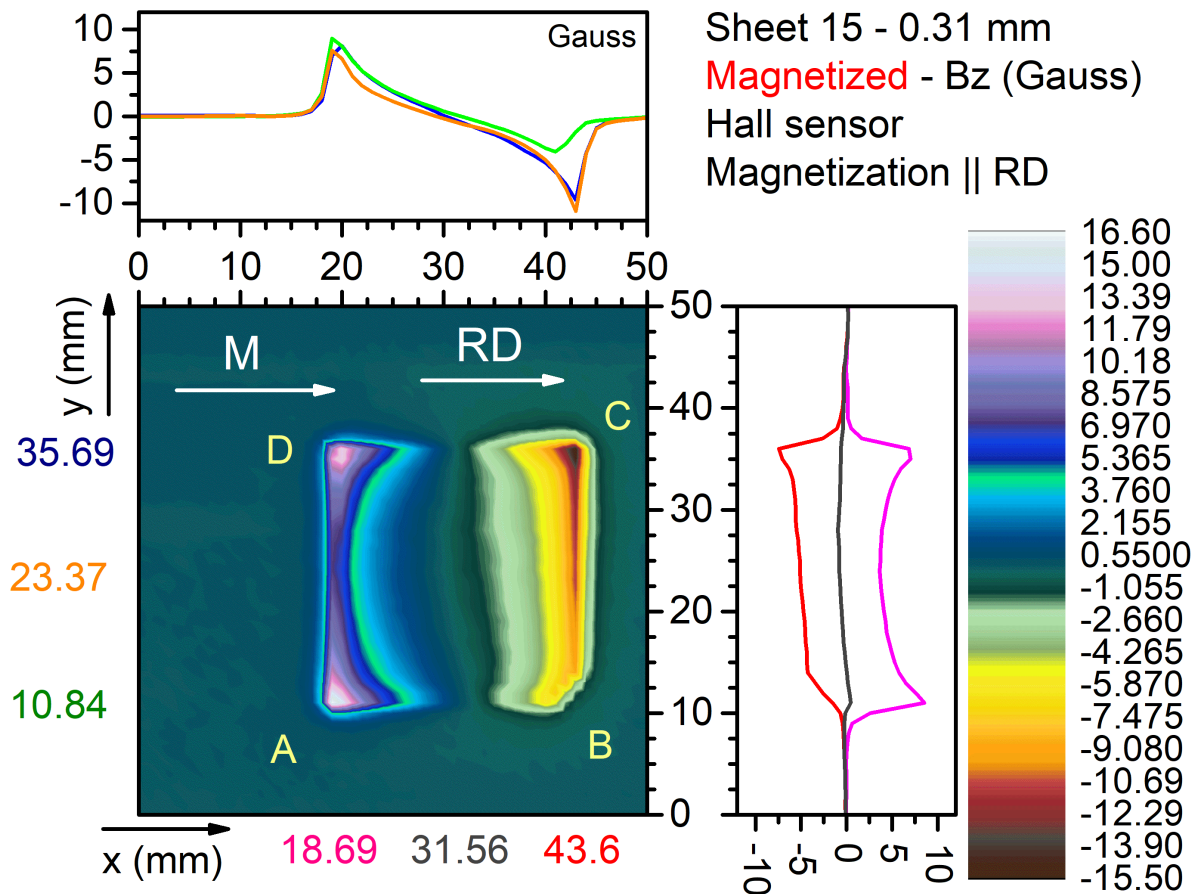
Σχήμα 4.69: Ομοίως, με τον αισθητήρα κάθετο προς τη διεύθυνση έλασης.



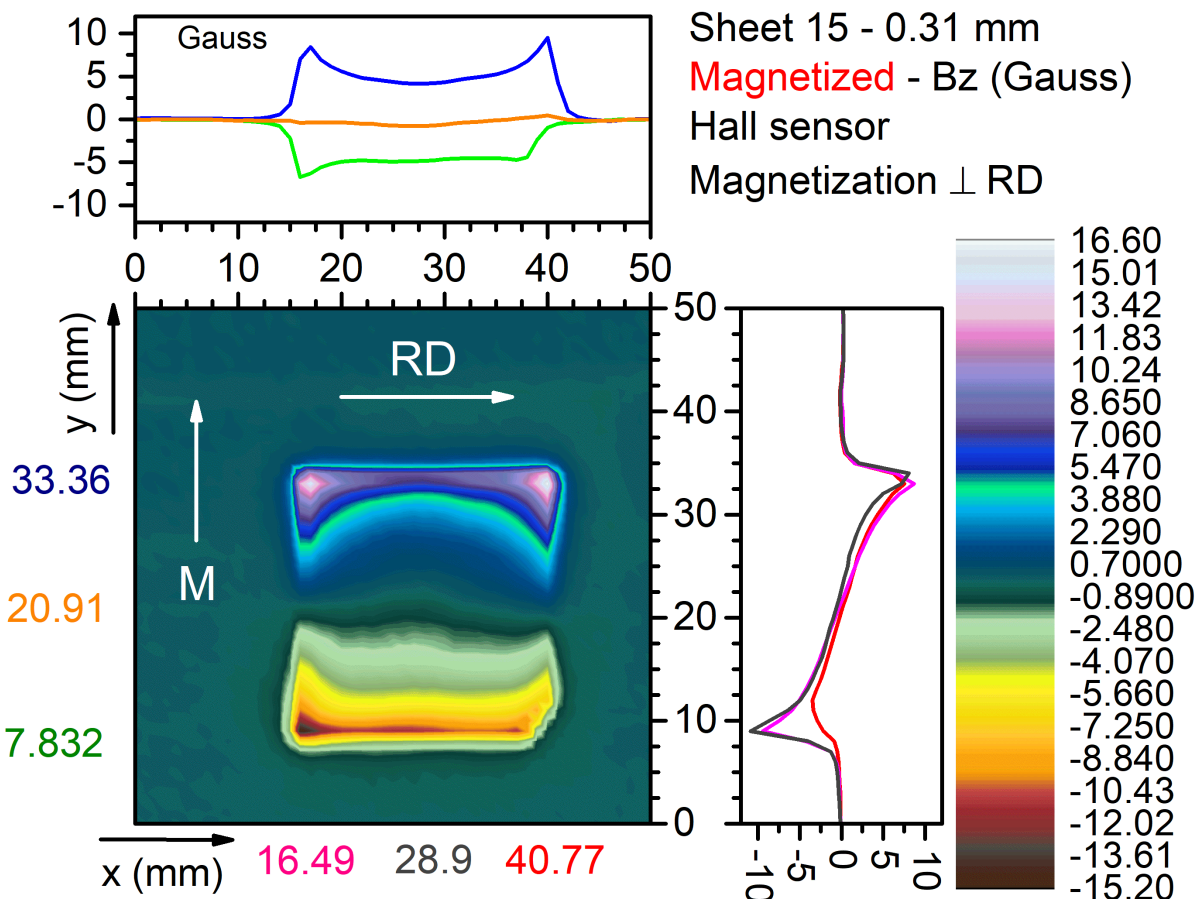
Σχήμα 4.70: Η παράλληλη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στην άνω επιφάνεια του ελάσματος 15 (κράμα Fe-Si), έπειτα από μαγνήτιση με μόνιμο μαγνήτη. Ο αισθητήρας είναι παράλληλος στη διεύθυνση έλασης.



Σχήμα 4.71: Ομοίως, με τον αισθητήρα κάθετο ως προς τη διεύθυνση έλασης.



Σχήμα 4.72: Το μαγνητικό πεδίο B_z στην επιφάνεια του ελάσματος 15 (κράμα Fe-Si). Η μαγνήτιση M είναι παράλληλη στη διεύθυνση έλασης.



Σχήμα 4.73: Ομοίως, για μαγνήτιση M κάθετη ως προς τη διεύθυνση έλασης. Οι πλευρές του ελάσματος διατηρούν τον προσανατολισμό του προηγούμενου σχήματος.