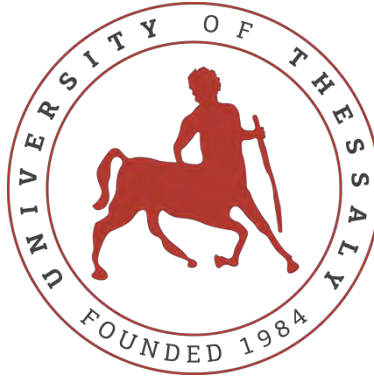


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ



Θέμα Διπλωματικής  
“Διαστολομετρική μελέτη της Ενδοκρίσιμης Ανόπτησης του  
Χάλυβα DP1000”

Από  
Πανταζής Ιωάννης  
Επιβλέπουσα:  
Δρ. Ελένη Καμούτση

Υποβλήθηκε για την μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για  
το πτυχίο των Μηχανολόγων Μηχανικών

© 2019 Πανταζής Ιωάννης

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν συνεπάγεται αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα. (Νόμος 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2).

Πιστοποιήθηκε από τα μέλη της επιτροπής διδακτορικών διατριβών:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπουσα)	Ελένη Καμούτση Ερευνητικό Προσωπικό Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Νικόλαος Αράβας Καθηγητής Υπολογιστικής Μηχανικής των Κατασκευών Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Αλέξης Κερμανίδης Αναπληρωτής Καθηγητής Μηχανικής Συμπεριφοράς Μεταλλικών Υλικών Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....</b>	<b>15</b>
2.1	Γενικά .....	15
2.2	Χάλυβες Διπλής φάσεις (DP steels).....	15
<b>3</b>	<b>Πειραματική διαδικασία - Μεθοδολογία .....</b>	<b>21</b>
3.1	Υλικό .....	21
3.2	Μεθοδολογία .....	23
3.3	Προετοιμασία Δοκιμών .....	24
3.4	Θερμικές Κατεργασίες.....	24
3.4.1	Θερμικές Κατεργασίες στο Διαστολόμετρο .....	25
3.4.2	Θερμικές Κατεργασίες σε Επαγωγικούς Φούρνους.....	26
3.5	Μεταλλογραφία .....	30
3.6	Σκληρομετρήσεις .....	30
3.7	Διαστολομετρία .....	31
3.7.1	Πειραματική διάταξη .....	31
3.7.2	Βασική μονάδα του διαστολομέτρου .....	31
3.7.3	Ο φούρνος.....	32
3.7.4	Διαστολομετρικές Μετρήσεις .....	33
<b>4</b>	<b>Αποτελέσματα.....</b>	<b>33</b>
4.1	Διαστολομετρία .....	33
4.1.1	Αποτελέσματα Πειράματος Διαστολομετρίας .....	33
4.1.2	Ανάλυση Διαστολομετρικών Αποτελεσμάτων – Κρισιμες Θερμοκρασίες Μετασχηματισμου	50
4.2	Μεταλλογραφική Ανάλυση .....	65
4.3	Σκληρομετρήσεις .....	68
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>71</b>

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Όριο θραύσης και διαρροής-παραμόρφωση για πολλούς χάλυβες με (α) 1 <sup>η</sup> ς γενιάς χάλυβες AHSS χαμηλά, 2 <sup>η</sup> ς γενιάς χάλυβες AHSS πάνω δεξιά, και 3 <sup>η</sup> ς γενιάς χάλυβες ανάμεσα από τους προηγούμενους 2 (β) πάνω στο διάγραμμα έχει τοποθετηθεί μια πρόβλεψη ανάμεσα στη σχέση αντοχής και ολκιμότητας για πλασματικά κράματα με διαφοροποίηση στη μικροδομή όπως αυτά προβλέπονται από το μοντέλο Mileiko. [1].....	15
Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα της θερμικής επεξεργασίας των χαλύβων DP1000. ....	22
Εικόνα 3: Αρχική μικροδομή του υλικού (DP1000) [26]. ....	23
Εικόνα 4. Ονομασία των διευθύνσεων και των επίπεδων. Δοκίμιο διαστολομετρίας (α) και Δοκίμιο μεταλλογραφικής μελέτης (β). ....	24
Εικόνα 5. Διαστολόμετρο LINSEIS L 70/2161. ....	31
Εικόνα 6. Βασική μονάδα διαστολομέτρου. ....	32
Εικόνα 7. Ο φούρνος για τις θερμοκρασιακές μεταβολές.....	32
Εικόνα 8. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min.....	34
Εικόνα 9. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min. ....	35
Εικόνα 10. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min. ....	35
Εικόνα 11. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 10 °C/min. ....	36
Εικόνα 12. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 10 °C/min. ....	37
Εικόνα 13. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 10 °C/min. ....	37
Εικόνα 14. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 5 °C/min. ....	38
Εικόνα 15. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 5 °C/min.. ....	38
Εικόνα 16. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 5 °C/min. ....	39
Εικόνα 17. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 min και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min.....	40
Εικόνα 18. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 min και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min.....	40



- Εικόνα 30. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 780 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20 °C/min..... 49
- Εικόνα 31. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 780 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20 °C/min..... 49
- Εικόνα 32. Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ ..... 50
- Εικόνα 33. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min. Το γράφημα είναι αντίστοιχο αυτού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 10..... 51
- Εικόνα 34. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 53). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min. .... 52
- Εικόνα 35. Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ ..... 53
- Εικόνα 36. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min. Το γράφημα είναι αντίστοιχο αυτού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 13..... 53
- Εικόνα 37. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 36). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min. .... 54
- Εικόνα 38. Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 5 °C/min. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ ..... 55
- Εικόνα 39. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 5 °C/min. Το γράφημα είναι αντίστοιχο αυτού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 16..... 55
- Εικόνα 40. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 39). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 5 °C/min. .... 56
- Εικόνα 41. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 750 °C, με την μέθοδο προέκταση

γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες $A_{c1}$ και $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 22. ....	57
Εικόνα 42. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 750 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 41). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	58
Εικόνα 43. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 750 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 41). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	58
Εικόνα 44. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 760 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες $A_{c1}$ και $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 25. ....	59
Εικόνα 45. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 760 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 44). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	60
Εικόνα 46. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 760 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 44). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	60
Εικόνα 47. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 770 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες $A_{c1}$ και $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 28. ....	61
Εικόνα 48. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 770 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 47). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	62
Εικόνα 49. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 770 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 47). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	62



Εικόνα 50. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης (IA) του κράματος στους 780 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες $A_{c1}$ και $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτωση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 31. ....	63
Εικόνα 51. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης (IA) του κράματος στους 780 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 50). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	64
Εικόνα 52. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης (IA) του κράματος στους 780 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 50). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. ....	64
Εικόνα 53α: Μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτωση στους 750°C για (α) 30sec, (β) 1min, (γ) 2min, (δ) 3min. Η μεγέθυνση για όλες τις μεταλλογραφίες είναι x1000. ....	65
Εικόνα 54: Μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτωση στους 790°C για (α) 30sec, (β) 1min, (γ) 2min, (δ) 3min, (ε) 5min, (στ) 10min, (ζ) 30min και (η) 60min. Η μεγέθυνση για όλες τις μεταλλογραφίες είναι x1000. ....	67
Εικόνα 55: Μικροσκληρομετρήσεις δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτωση στους 750°C. ....	69
Εικόνα 56: Μικροσκληρομετρήσεις δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτωση στους 790°C. ....	69

## Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Χημική σύσταση (%wt) του χάλυβα CR700Y980T-DP. ....	21
Πίνακας 2: Ζώνες βιομηχανικής θερμικής επεξεργασίας των χαλύβων. ....	22
Πίνακας 3. Πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε .....	24
Πίνακας 4. Διαστολομετρικά πειράματα πλήρους ανόπτησης στους 900 °C . ....	25
Πίνακας 5. Διαστολομετρικά πειράματα ενδοκρίσιμης ανόπτησης.....	26
Πίνακας 6. Η αρχική θερμική κατεργασία που εφαρμόστηκε, πριν από την ενδοκρίσιμη ανόπτηση. Σχηματισμός μικροδομής φερρίτη-περλίτη.....	26
Πίνακας 7. Πειράματα ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 750 °C σε επαγωγικούς φούρνους . ....	28
Πίνακας 8. Πειράματα ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 790 °C σε επαγωγικούς φούρνους . ....	29
Πίνακας 9. Μικροσκληρομετρήσεις.....	68

# Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εκπλήρωση των απαιτήσεων για το πτυχίο του Μηχανολόγου Μηχανικού στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Δρ. Ελένη Καμούτση, η οποία με τις γνώσεις της με βοήθησε ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των πειραμάτων και της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας. Επίσης οποιαδήποτε απορία είχα ήταν πάντα εκεί και με συμβούλευε και ήμουν πάντα ευπρόσδεκτος στο γραφείο της.

Επιπλέον, είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στον Καθηγητή Νικόλαο Αράβα και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Αλέξη Κερμανίδη για την αποδοχή της συμμετοχής τους στην τριμελή επιτροπή αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου και φίλους μου που με βοήθησαν στο εργαστήριο με τις συμβουλές τους των οποίων ήταν πολύτιμες.

Τέλος ευχαριστώ και τους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν σε όλη την διάρκεια της φοίτησής μου και με βοήθησαν να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα με τις υπερπολύτιμες συμβουλές τους.

## Περίληψη

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων που διεξήχθησαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έγινε μελέτη για την αλλαγή της μικροδομή των χαλύβων DP1000. Συγκεκριμένα κάποια δοκίμια μικρού μήκους υποβλήθηκαν σε μια σειρά διαφόρων θερμικών κατεργασιών μέσα σε ένα διαστολόμετρο και σε κάποια άλλα έγιναν οι διεργασίες αυτές μέσα σε κλιβάνους. Οι θερμικές κατεργασίες ήταν τέτοιες ώστε να φτάσουν τα δοκίμια στην θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης και να προκύψει ένα ποσοστό ωστενίτη-φερρίτη, που κατά την ψύξη των δοκιμίων προέκυψε τελικά μια μικροδομή μαρτενσίτη-φερρίτη.

Από το διαστολόμετρο πάρθηκαν διαγράμματα με σκοπό να μελετηθεί η μεταβολή στη μικροδομή που υπέστησαν τα δοκίμια και σε ποιες θερμοκρασίες γίνεται η μετατροπή των φάσεων στους DP1000 χάλυβες. Στη συνέχεια πάρθηκαν οι αντίστοιχες μεταλλογραφίες τόσο στα δοκίμια του διαστολομέτρου όσο και στα δοκίμια που μπήκαν στους φούρνους.

Έπειτα με την βοήθεια λογισμικών από τις φωτογραφίες βγήκαν αποτελέσματα για το ποσοστό του μαρτενσίτη και του φερρίτη που είχαν τα συγκεκριμένα δοκίμια μετά το πέρας των θερμικών κατεργασιών.

Τέλος μετρήθηκε και η σκληρότητα των δοκιμίων με την μέθοδο Vickers και την βοήθεια μικροσκληρομέτρου.

# 1 Εισαγωγή

## Περιγραφή του προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια οι αυξανόμενες απαιτήσεις των αυτοκινητοβιομηχανιών για την δημιουργία πιο ανθεκτικών, ασφαλών, ελαφριών και οικονομικών αυτοκινήτων έχουν οδηγήσει στην δημιουργία νέων τύπων χαλύβων. Για τον σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί οι DP χάλυβες. Η μικροδομή τους αποτελείται από 2 φάσεις, η μία είναι φερρίτης και η δεύτερη φάση μαρτενσίτης.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εξέλιξη της μικροδομής σε σχέση με τις θερμικές κατεργασίες. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε η ανάπτυξη της φάσης του ωστενίτη από τον φερρίτη και τον περλίτη. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο χάλυβας DP1000, και η εξέλιξη της μικροδομής για θερμικές κατεργασίες πλήρους ανόπτησης καθώς και θερμικές κατεργασίες ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Η μικροδομή των θερμικών κατεργασιών μελετήθηκε με μεθόδους διαστολομετρίας, μεταλλογραφίας και μικροσκοπήσεων.

Οι θερμικές κατεργασίες για τους DP1000 χάλυβες είχαν ως εξής. Αρχικά στο διαστολόμετρο τα δοκίμια έφτασαν σε θερμοκρασία 900 °C με διάφορους ρυθμούς ψύξης 5 °C, 10 °C και 20 °C. Σε όλα τα άλλα δοκίμια αρχικά προηγήθηκε μια θερμική κατεργασία για την δημιουργία φερριτοπερλιτικής μικροδομής και στη συνέχεια ακολούθησε θέρμανση για διάφορους χρόνους στο διαστολόμετρο και στους επαγωγικούς φούρνους σε θερμοκρασίες μεταξύ 750 °C και 790 °C. Αυτή η τελική φάση των θερμικών κατεργασιών έχουν ως στόχο την δημιουργία ωστενίτη στην ενδοκρίσιμη θερμοκρασία και στη συνέχεια μετατροπή του ωστενίτη πλήρως σε μαρτενσίτη.

## Αντικείμενο του θέματος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε με σκοπό να δοθεί απάντηση τελικά στο ποια είναι η πιο κατάλληλη μικροδομή τελικά ώστε να πετύχουμε μέγιστες μηχανικές ιδιότητες στους χάλυβες DP1000 και κάτω από ποιες θερμικές κατεργασίες μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτή.

## Μεθοδολογία του θέματος

Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα που πάρθηκαν ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- A) Προετοιμασία δοκιμίου
- B) Θερμικές κατεργασίες
  - i. Διαστολόμετρα
  - ii. Επαγωγικοί Φούρνοι
- Γ) Μεταλλογραφική Ανάλυση
- Δ) Μικροσκοπήσεις

## **Περίγραμμα του θέματος**

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Πειραματική διαδικασία - Μεθοδολογία

Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Αποτελέσματα

Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα

Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφία

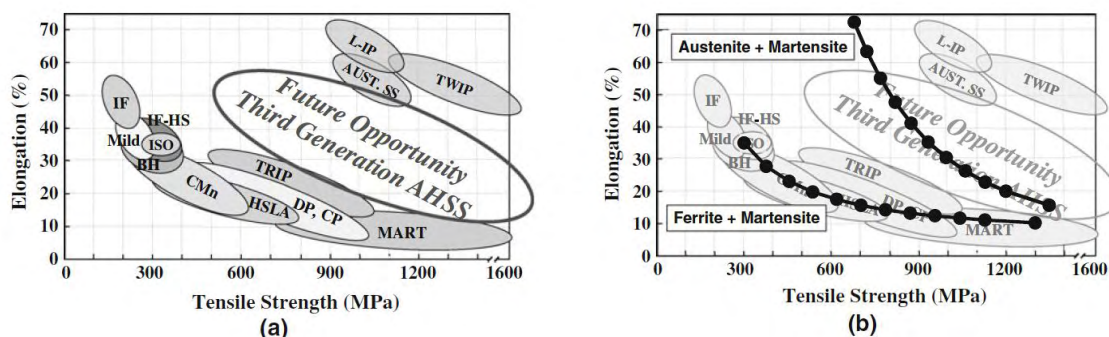
## 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Γενικά

Κατά καιρούς έχουν γίνει πολλές μελέτες και πειράματα γύρω από τους χάλυβες με σκοπό την δημιουργία πιο σκληρών και ανθεκτικών χάλυβων για την εισαγωγή τους σε καινοτόμες τεχνολογίες.

Παγκοσμίως γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη χάλυβων με τέτοια μικροδομή ώστε να έχουν υψηλή αντοχή με σχετικά χαμηλό βάρος. Τέτοιοι χάλυβες πρέπει να χρησιμοποιηθούν στις αυτοκινητοβιομηχανίες για μεγαλύτερη ασφάλεια και υψηλότερη απόδοση. Μια τέτοια προσπάθεια και μελέτη έκαναν οι J. G. Speer, κ.α. Η μικροδομή των χάλυβων αυτών είναι ένας συνδυασμός από φερρίτη, μαρτενσίτη, μπαινίτη και παραμένων ωστενίτη. Τέτοιοι χάλυβες είναι χαμηλής κραμάτωσης διπλής φάσης ή αλλιώς DP, χάλυβες πλαστικότητας μετασχηματισμού (TRIP) που έχουν παραμένοντα ωστενίτη, χάλυβες πολλαπλών φάσεων ή CP και προηγμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής αλλιώς AHSS.

Στην Εικόνα 1 φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες διαφόρων χάλυβων δείχνοντας την μέγιστη αντοχή τους σε συνάρτηση με την πλαστική παραμόρφωση που θα υποστούν. Κάτω χαμηλά στο διάγραμμα υπάρχουν οι 1<sup>ης</sup> γενιάς χάλυβες, πάνω δεξιά οι 2<sup>ης</sup> γενιάς τα οποία είναι υψηλότερης κραμάτωσης και λιγότερης πυκνότητας δίνοντας βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με αυτά της πρώτης γενιάς. Τρίτης γενιάς χάλυβες βρίσκονται σε εξέλιξη και οι οποίοι θα έχουν χαμηλότερη κραμάτωση και υψηλότερη αντοχή σε συνδυασμό με πλαστικότητα του χάλυβα. Αυτού του είδους χάλυβες εντοπίζεται στο διάγραμμα ανάμεσα από αυτούς της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> γενιάς. [1]



Εικόνα 1. Όριο θραύσης και διαρροής-παραμόρφωση για πολλούς χάλυβες με (α) 1<sup>ης</sup> γενιάς χάλυβες AHSS χαμηλά, 2<sup>ης</sup> γενιάς χάλυβες AHSS πάνω δεξιά, και 3<sup>ης</sup> γενιάς χάλυβες ανάμεσα από τους προηγούμενους 2 (β) πάνω στο διάγραμμα έχει τοποθετηθεί μια πρόβλεψη ανάμεσα στη σχέση αντοχής και ολκιμότητας για πλασματικά κράματα με διαφοροποίηση στη μικροδομή όπως αυτά προβλέπονται από το μοντέλο Mileiko. [1]

### 2.2 Χάλυβες Διπλής φάσεις (DP steels)

Στη σύγχρονη εποχή, οι αυτοκινητοβιομηχανίες προσπαθούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της κοινωνίας μας, η οποία δεν είναι άλλη από την κατασκευή ασφαλής αμαξιών εκτός του ότι γίνεται επίσης προσπάθεια για την μείωση του βάρους της κατασκευής και την εξοικονόμηση καυσίμων με όσον τον δυνατόν πιο φιλικά προς το περιβάλλον [2]. Οι χάλυβες διπλής φάσης (DP) είναι οι ιδανικοί για τον σκοπό αυτό. Η μικροδομή τους αποτελείται από

φερρίτη κάνουντάς τα ελαστικά και μια δεύτερη φάση μαρτενσίτη δίνοντάς τους υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (για τους DP1000  $\sigma_{UTS} \approx 1000$  MPa). Αυτά τα πλεονεκτήματα σε συνδυασμό με καλή δυναμική συμπεριφορά, μεγάλη επιμήκυνση εφελκυσμού, καλή ψυχρή ικανότητα μορφοποίησης και συγκόλλησης, καθιστούν τους DP χάλυβες κατάλληλους για σύνθετα δομικά τμήματα όπως πλευρικά μέλη, εγκάρσια μέλη και διάφορα εξαρτήματα για τις συγκρούσεις. Τέλος αυτό που κάνει κατάλληλους τους συγκεκριμένους χάλυβες για συγκρούσεις είναι η ικανότητά τους απορρόφησης υψηλών ποσοτήτων ενέργειας [3]. Οι χάλυβες DP είναι φιλικόι προς το περιβάλλον, ασφαλείς και χαμηλού κόστους και παραγωγής. Όλα τα παραπάνω αποτελούν τον κύριο στόχο των αυτοκινητοβιομηχανιών [2-4].

Η μικροδομή και οι ιδιότητες για τους χάλυβες DP1000 σχηματίζονται από τον συνδυασμό στοιχείων κράματος με μηχανικές και θερμικές κατεργασίες, όπως σε όλους τους χάλυβες. Η συμπεριφορά κάθε στοιχείου εξαρτάται και τροποποιείται από την παρουσία ενός άλλου στοιχείου. Η αλληλεπίδραση των στοιχείων κράματος και η συνδυαστική τους δράση είναι ένα πολύπλοκο θέμα και επηρεάζει τόσο τη θερμοδυναμική όσο και την κινητική του μετασχηματισμού φάσης. Για το λόγο αυτό, περιγράφονται παρακάτω τα αποτελέσματα για κάθε κραματικό στοιχείο.

*Άνθρακας (C)*: Αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο των χαλύβων που συμβάλλει στη σκληρότητά τους. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε C, έχει ως αποτέλεσμα την επακόλουθη αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής ενώ μειώνεται η ολκιμότητα και η συγκολλησιμότητα.

*Μαγγάνιο (Mn)*: Συμβάλλει στην αποθείωση του χάλυβα δημιουργώντας σουλφίδια (MnS) και βελτιώνει την κατεργασιμότητα και τη συγκολλησιμότητα. Επιπλέον, με την προσθήκη Mn, αυξάνεται η αντοχή των χαλύβων.

*Πυρίτιο (Si)*: Αποτελεί ένα από τα δύο στοιχεία (το άλλο είναι το Αλουμίνιο-Al) που χρησιμοποιείται για την αποξείδωση των χαλύβων. Ταυτόχρονα, προωθεί το μετασχηματισμό του φερρίτη.

*Χρώμιο (Cr)*: Το Cr είναι ένα ισχυρό καρβιδιογόνο στοιχείο. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε καρβίδια, αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα και τις αντιδιαβρωτικές του ιδιότητες. Το Cr αυξάνει επίσης την σκληρότητα και την αντοχή στην οξείδωση και τη διάβρωση. Χρησιμοποιείται επίσης για την επιβράδυνση του σχηματισμού σε περλίτη ή μπαινίτη.

*Μόλυβδος (Mo)*: Ένα ισχυρό καρβιδιογόνο στοιχείο, που αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα. Τα καρβίδια του μολυβδαινίου σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της επαναφοράς μετά από βαφή. Το Mo χρησιμοποιείται επίσης για την αποτροπή του σχηματισμού περλίτη ή μπαινίτη.

*Βολφράμιο (W), Βανάδιο (V), Τιτάνιο (Ti), Νιόβιο (Nb)*: Αυτά τα στοιχεία είναι καρβιδιογόνα και έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής μέσω του σχηματισμού καρβιδίων, ενώ παρεμποδίζουν την ανάπτυξη των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες. Το V και Nb χρησιμοποιούνται επίσης για τη σκλήρυνση μέσω καθίζησης και για τη βελτίωση του μεγέθους των κόκκων.

*Κοβάλτιο (Co)*: Το Co είναι το μόνο στοιχείο που μειώνει την αντοχή, δεν σχηματίζει καρβίδια και έχει ελάχιστη επίδραση στη σκληρότητα του χάλυβα. Η κύρια δράση του είναι να



εμποδίζει την ανάπτυξη των κόκκων κατά την ανόπτηση ή τη βαφή του χάλυβα. Με αυτό τον τρόπο το Co συμβάλλει στη διατήρηση της μηχανικής αντοχής [5-7].

Μια μελέτη για τους DP χάλυβες έρχεται από τους G. R. Speich, κ.α. Οι συγκεκριμένοι επιστήμονες προσπάθησαν να μελετήσουν την δημιουργία ωστενίτη σε DP χάλυβες διαφορετικής σύστασης (0.06-0.20 % C και 1.5% μαγγάνιο) με τρεις εναλλακτικούς τρόπους. Ο πρώτος ήταν ο γρήγορος μετασχηματισμός ωστενίτη προερχόμενος από περλίτη, ο δεύτερος ήταν η ανάπτυξη ωστενίτη από φερρίτη με διάχυση άνθρακα στον ωστενίτη σε θερμοκρασίες της τάξης των 850 °C και ο τρίτος τρόπος η δημιουργία ωστενίτη από φερρίτη με διάχυση μαγγανίου στον ωστενίτη. Κατά την εκτέλεση των παραπάνω πειραμάτων μελετήθηκε η συμπεριφορά του χάλυβα για δημιουργία ωστενίτη (ρυθμός ανάπτυξης ωστενίτη, τελικό ποσοστό δημιουργίας του στη μικροδομή) [8].

Σύμφωνα με τους Felipe Manuel Castro Cerda, κ.α. έχουν γίνει θερμικές κατεργασίες με δυο ρυθμούς θέρμανσης (150 °C/s και 1500 °C/s) σε αρχικά κρύους χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα η χημική σύσταση ήταν C-0.14%, Mn-2.05%, Si-1.20%, S-0.001%, P-0.012% και το υπόλοιπο είναι Fe. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε διαστολόμετρο DIL805AD Bähr Dilatometer για τον μικρό ρυθμό θέρμανσης και για το μεγάλο ρυθμό θέρμανσης σε μηχανήμα Gleeble 3800 θερμομηχανικό προσομοιωτή. Μετά την θερμική κατεργασία οι ρυθμοί ψύξης ήταν για το διαστολόμετρο 160 °C/s και για το μηχανήμα Gleeble 3800 2000 °C/s ψύχοντάς το με νερό υπό πίεση. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν οι χάλυβες είχαν στη μικροδομή τους φερρίτη και μαρτενσίτη με διαφορές στο μέγεθος των κόκκων στο ποσοστό του μαρτενσίτη και του φερρίτη καθώς και στο χρόνο που δημιουργήθηκε ο ωστενίτης [9].

Οι C. Bos, κ.α. μελέτησαν τους μετασχηματισμούς που συμβαίνουν κατά την παραγωγή των χαλύβων διπλής φάσης (DP), ανόπτηση, αποκατάσταση, ανακρυστάλλωση, διαλυτοποίηση καρβιδίου, σχηματισμός ωστενίτη, σχηματισμός φερρίτη κ.α., οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά τις τελικές ιδιότητες του προϊόντος. Χρησιμοποίησαν ένα τρισδιάστατο (3-D) μοντέλο εξέλιξης μικροδομής (3D-CA που περιγράφει όλους τους μετασχηματισμούς και τις διαδικασίες που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των χαλύβων DP και μελετήσαν λεπτομερώς την επίδραση των επιμέρους παραμέτρων της διεργασίας στην τελική μικροδομή. Σε αυτή τη μελέτη, δόθηκε έμφαση στο ρόλο που έχει η αρχική μικροδομή στην τελική μικροδομή των χαλύβων DP. Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση που έχει ο ρυθμός θέρμανσης στην τελική μικροδομή που θα έχουν οι DP χάλυβες [10].

Οι F. Hayat, κ.α. μελέτησαν DP χάλυβες μαγγανίου-νικελίου με χαμηλή σύσταση σε άνθρακα και αρχική μικροδομή με διαφορετικό ποσοστό σε μαρτενσίτη (14, 17, 19, και 25%), οι οποίοι θερμάνθηκαν για 20 λεπτά στην θερμοκρασιακή περιοχή 700 °C με 900 °C και στη συνέχεια ψύχθηκαν σε νερό και αέρα. Τέλος μετά τη θερμική κατεργασία έγινε συγκόλληση των δοκιμίων και εξετάστηκε η μικροδομή η σκληρότητα και οι μηχανικές ιδιότητες για τα συγκολλημένα δοκίμια [11].

Έχουν γίνει πειράματα σε DP χάλυβες με χημική σύσταση 0.147% C, 1.868% Mn και 0.403% Si εκτελώντας τα πειράματα της ανόπτησης σε φούρνους υγρών αλάτων καθώς και σε έναν προσομοιωτή ανόπτησης (MULTIPAS), για θέρμανση στους 740 °C με διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης και διαφορετικούς χρόνους παραμονής στις θερμοκρασίες αυτές. Μελετήθηκε η σκληρότητα και η μικροδομή που είχαν τα δοκίμια μετά τις θερμικές κατεργασίες και έγινε σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων αναλόγως την θερμική κατεργασία που

υπέστη το καθένα από αυτά [12]. Σύμφωνα με τον N. Peranio κ.α. στον ίδιο ακριβώς χάλυβα έχει γίνει ανάλυση μικροδομής με SEM, EDX, και EBSD. Αρχικά η μικροδομή τους ήταν 65% φερρίτης και 35% περλίτης. Μετά τις θερμικές κατεργασίες που υπέστησαν τα αποτελέσματα έδειξαν λιγότερο από 30% μαρτενσίτη και το υπόλοιπο φερρίτη [13].

Μια άλλη έρευνα έρχεται από τους M. Šebek κ.α. οι οποίοι έκαναν σε DP χάλυβες με χημική σύσταση C-0.1%, Mn-1.9%, Cr+Mo-1%, P-0.02%, Si-0.8%, S-0.005%, Al  $\leq$ 2%, V-0.002% τρεις διαφορετικές θερμικές κατεργασίες. Στη πρώτη έγινε θέρμανση μέχρι τους 780 °C έπειτα ψύχθηκε στους 495 °C, η δεύτερη θερμική κατεργασία αποτελείται από θέρμανση στους 920 °C και έπειτα ψύξη στους 495 °C και τέλος στη τρίτη όπου αρχικά θερμάνθηκε στους 920 °C, έπειτα έπεσε στους 780 °C και στη συνέχεια ψύχθηκε κι άλλο μέχρι τους 495 °C. Μετά τις κατεργασίες έγινε μικροσκοπική ανάλυση της μικροδομής τους με χημική προσβολή σε Nital και Klemm [14].

Μελέτες για την επίδραση που έχει το ποσοστό του μαρτενσίτη καθώς το φορτίο σε προφίλ μικροσκληρότητας σε χάλυβες DP και σε έναν απλο χάλυβα DC04, έγιναν από τους Weltsch, Z, κ.α.. Πιο αναλυτικά χρησιμοποιήθηκαν οι χάλυβες DP600, DP800, DP1000 και DC04 με ποσοστό φερρίτη-μαρτενσίτη 0.734-0.266 για τον DP600, 0.579-0.421 για τον χάλυβα DP800 και 0.350-0.650 για τον DP1000 και ασκήθηκαν διαδοχικά φορτία 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 και 1 KPa. Αφού έγιναν οι σκληρομετρήσεις με την μηχανή Wilson Wolpert 401 MVD με την μέθοδο Vickers έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων και μελετήθηκε οι επιδράσεις που είχαν στο κάθε χάλυβα ταδιαφορετικά φορτία [15].

Οι Marion Calcagnotto κ.α. εξέτασαν τρεις DP χάλυβες ,με χημική σύσταση 0.17 C%, 1.49 Mn%, 0.22 Si%, 0.033 Al%, 0.0033 N%, 0.0017 P% και 0.0031 S%, με την ίδια περιεκτικότητα σε μαρτενσίτη (γύρω στο 30%) αλλά με διαφορετική φερριτική διάμετρο κόκκων (12.4, 2.4 και 1.2  $\mu$ m). Οι μηχανισμοί παραμόρφωσης και θραύσης μελετήθηκαν με βάση παρατηρήσεις μικροδομής χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και electron backscatter diffraction. Η εκλέπτυνση των κόκκων οδηγεί σε αύξηση τόσο του ορίου αντοχής της απόδοσης όσο και της αντοχής εφελκυσμού, ενώ η ομοιόμορφη επιμήκυνση και η ολική επιμήκυνση επηρεάζονται λιγότερο [16].

Επίσης τέτοιου είδους μελέτες ως προς το μέγεθος των κόκκων πάνω σε DP χάλυβες έγιναν από τους Young II Son κ.α. Η διαφορά σε αυτά τα πειράματα σε σχέση με τους Marion Calcagnotto κ.α. είναι ότι οι DP είχαν διαφορετική χημική σύσταση ως προς το Βανάδιο (V). Συγκεκριμένα ο ένας χάλυβας δεν περιείχε καθόλου ενώ οι άλλοι δύο είχαν 0.06% και 0.12% V. Ο χάλυβας με τον οποίον δούλεψαν είχε εξαιρετικά μικρό μέγεθος κόκκου και μετά από θερμικές κατεργασίες ενδοκρίσιμης ανόπτησης οι μηχανικές ιδιότητες (σε θερμοκρασία δωματίου) συγκρίθηκαν με αυτές αντίστοιχων χαλύβων με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων [17].

Επιπλέον πάνω στο συγκεκριμένο είδος πειραμάτων έχουν ασχοληθεί οι M. Delincé κ.α. Οι DP που έγιναν τα πειράματα έχουν χημική σύσταση C-0.15%, Mn-1.7%, Si-0.5%, Nb-0.012%. Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων μελετήθηκε η επίδραση που μπορεί να έχει η μείωση του μεγέθους κόκκων στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων (σκληρότητα, όριο διαρροής κ.τ.λ.). Εφαρμόστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό αυτών των ιδιοτήτων και το πώς επηρεάζονται από το μέγεθος των κόκκων [18].

Σύμφωνα με το άρθρο των J. Huang κ.α. έγιναν πειράματα σε DP και TRIP χάλυβες προσπαθώντας να μελετήσουν την κινητική του μετασχηματισμού των χαλύβων αυτών κατά

τον σχηματισμό του φερρίτη και του ωστενίτη με διαφορετικές θερμικές κατεργασίες ως προς τους ρυθμούς ψύξης-θέρμανσης καθώς και ως προς τους χρόνους κατά τη διάρκεια ισοθερμοκρασιακών διεργασιών. Για την μοντελοποίηση της κατεργασίας της ενδοκρίσιμης απόπτωσης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Avrami [19].

Έρευνες έκαναν οι G. Miyamoto κ.α. στην επίδραση της προσθήκης Mn, Si, Cr στην κινητική του αντίστροφου μετασχηματισμού στους 1073 K, από σφαιροποιημένο σεμεντίτη, που προέρχεται από επαναφορά μαρτενσίτη υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα ο χάλυβας θερμαίνεται στους 1073 K ώστε να μετατραπεί ο μαρτενσίτης σε ωστενίτη. Ο ρυθμός για τον αντίστροφο μετασχηματισμό είναι η ταχύτερος στον χάλυβα με σύσταση Fe – 0.6 mass% C και γίνεται βραδύτερος με την προσθήκη των Mn, Si και Cr [20].

Έχουν εκτελεσθεί διαστολομετρικές μετρήσεις από τους Ye-Jin Yang κ.α. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές έκαναν πειράματα σε X60 χάλυβες (με χημική σύσταση Nb-0.0181%, Ti-0.0150%, Al-0.0413%, C-0.0830%, S-0.0007%, O-0.0018%, N-0.0035% και το υπόλοιπο Fe), εξετάζοντας διαστολόμετρικά, τις ποιες θερμοκρασίες στις οποίες υπάρχει αλλαγή φάσης. Τα διαγραμμάτων που προέκυψαν από την διαστολή-συστολή των χαλύβων με την αύξηση-μείωση της θερμοκρασίας συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μεταλλογραφίες αυτών [21].

Επίσης οι Dong-Woo Suh κ.α. μελέτησαν σε διαστολόμετρο τη συμπεριφορά χάλυβα TRIP (C-0.144%, Mn-1.1%, Si-0.11%, P-0.01%, S-0.006%), κατά την δημιουργία ωστενίτη. Συγκεκριμένα τα δοκίμια θερμάνθηκαν σε διαστολόμετρο με ρυθμό 1 °C/s στη θερμοκρασία των 950 °C για 1 λεπτό και στη συνέχεια ψύχθηκαν με ρυθμούς 0.3 °C/s, 1 °C/s, και 5 °C/s. Τα δοκίμια διαστέλλονται και συστέλλονται με την αλλαγή φάσης που προκύπτει από τις θερμικές κατεργασίες. Από τους διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης προέκυψαν διαφορετικές καμπύλες ως προς την μεταβολή του μήκους που υπέστησαν τα δοκίμια και τέλος έγινε η ανάλυση αυτών και η σύγκριση τους με αντίστοιχες μεταλλογραφίες. [22].

Εκτενή μελέτη στην αλλαγή μήκους σε έναν υποευτοκτοειδή χάλυβα, κατά την διάρκεια συνεχούς ψύξης ή από μετασχηματισμούς φάσεων κατά την διάρκεια ισόθερων θερμικών κατεργασιών, έγινε από τους J. Z. Zhao κ.α. [23]. Ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο η συστολή-διαστολή του χάλυβα, μπορεί να υπολογισθεί από τα ποσοστά των φάσεων που συμμετέχουν. Το μοντέλο συμπεριλαμβάνει την επίδραση του διαμερισμού του άνθρακα και μπορεί να επεκταθεί σε μετασχηματισμούς φάσεων που προέρχονται από θερμικές κατεργασίες με πολλά βήματα.

Οι Chang-Seok Oh κ.α. ασχολήθηκαν με διαστολομετρικά πειράματα σε χάλυβες TRIP με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Με λίγα λόγια, χρησιμοποίησαν τέσσερις διαφορετικής σύστασης χάλυβες οι οποίοι θερμάνθηκαν στους 780 °C και 810 °C με ρυθμό 10 °C/s και κρατήθηκαν σε αυτή τη θερμοκρασία για 20 λεπτά, στη συνέχεια έφτασαν μέχρι τους 1100 °C με τον ίδιο ρυθμό και τελικά ψύχθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα διαστολομετρικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με θερμοδυναμικούς υπολογισμούς κάτω από συνθήκες ορθο-ισορροπίας και παρα-ισορροπίας [24].

Τέλος οι ερευνητές Yaowen Xu κ.α. ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την κινητική του μπαινίτικου μετασχηματισμού, σε χάλυβες με χημική σύσταση C-0.4%, Si-1.5%, Mn-2.2%, Al-0.033%, P-0.008%, S-0.001%, Mo-0.22%. Αναλυτικά έγινε θέρμανση δοκιμίων σε διαστολόμετρο (DIL805A) αρχικά στους 900 °C για 5 λεπτά, με ρυθμό 10 °C/s και μετά ψύξη με ρυθμό 30 °C/s, μέχρι τις επιθυμητές θερμοκρασίες των 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C για

2000 έως 16200 δευτερόλεπτα , ώστε να δημιουργηθεί μπαϊνίτης. Η θερμική διαστολή κατά τη διάρκεια του ισόθερμου μετασχηματισμού καταγράφηκε στα διαγράμματα που προέκυψαν υπολογίστηκε η πρώτη παράγωγος. Υπολογίστηκε η σχετική αλλαγή του μήκους ( $\Delta L/L$ ) λόγω μετασχηματισμού ως προς την θερμοκρασία, επίσης υπολογίστηκε το κλάσμα όγκου του μπαϊνίτη κατά τον ισόθερμο μετασχηματισμό [25].

## 3 Πειραματική διαδικασία - Μεθοδολογία

### 3.1 Υλικό

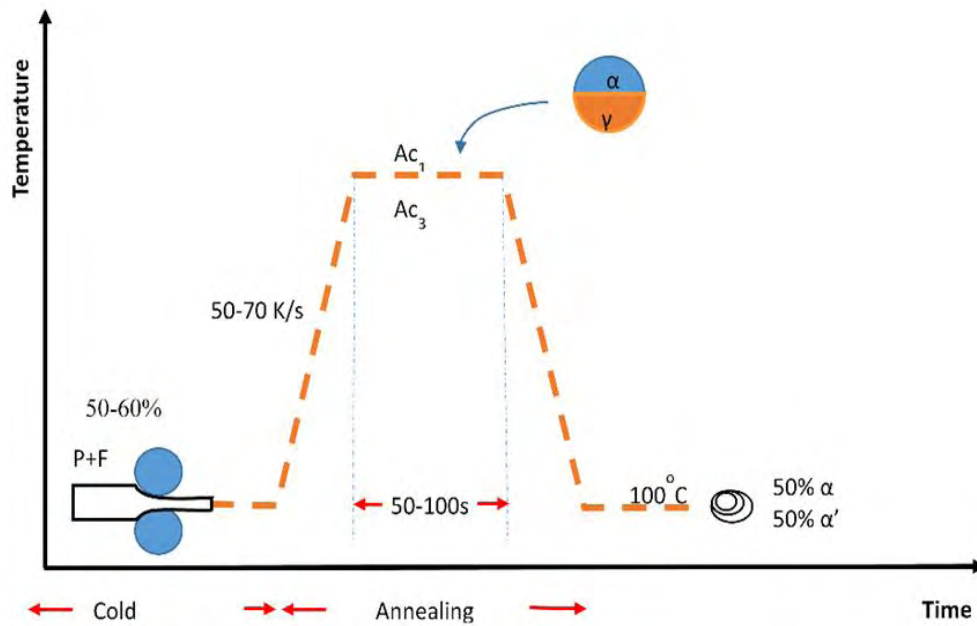
Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα έρευνα είναι ένας χαλυβας διπλής φάσης (Dual Phase Steel-DPsteel). Ο συγκεκριμένος χάλυβας παρασκευάστηκε με την μορφή ελάσματος από την Γερμανική εταιρεία ThyssenKrupp κατά διάρκεια του ευρωπαϊκού προγράμματος RFCS project TOOLKIT [26]. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει κωδική ονομασία CR700Y980T-DP και είναι ευρύτερα γνωστός ως DP 1000. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η χημική σύσταση του χάλυβα DP 1000.

Πίνακας 1: Χημική σύσταση (%wt) του χάλυβα CR700Y980T-DP.

Material	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb	W	Co
DP1000	95.9	0.07	0.298	2.544	0.682	0.116	0.109	0.036	0.071	0.006	0.07	0.016	0.004

Η γραμμή παραγωγής για τους χάλυβες DP απεικονίζεται στην Εικόνα 2. Το αρχικό υλικό είναι λεπτά φύλλα ψυχρής έλασης με μικροδομή φερρίτη-περλίτη ή μπαινίτη Εικόνα 3. Το υλικό τυλίγεται μετά από θερμή έλαση σε θερμοκρασίες μεταξύ 530-580 °C. Στη συνέχεια η ταινία υπόκειται σε ψυχρή έλαση 50-60% προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος κόκκων μετά το ακόλουθο στάδιο ανόπτησης (μέσο μέγεθος κόκκου <2 μm). Ο χάλυβας στη συνέχεια επεξεργάζεται σε μια γραμμή συνεχούς ανόπτησης. Ο ρυθμός θέρμανσης κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70 °C / s. Η θερμοκρασία της ανόπτησης είναι ανάμεσα στις θερμοκρασίες Ac<sub>1</sub> και Ac<sub>3</sub> του χάλυβα και η επιθυμητή ποσότητα ωστενίτη κατά την ανόπτηση είναι 50% γ. Τυπικά, οι θερμοκρασίες είναι μεταξύ 700 °C και 850 °C για χρόνους που κυμαίνονται από 50-100s.

Ο μαρτενσίτης σχηματίζεται μέσω της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (για να επιτευχθεί μικροδομή φερρίτη-ωστενίτη) και επακόλουθη γρήγορη ψύξη. Είτε γίνεται βαφή σε θερμοκρασία δωματίου είτε η βαφή διακόπτεται για τον γαλβανισμό του φύλλου σε θερμές γραμμές γαλβανισμού. Ο ρυθμός ψύξης στην περιοχή της υψηλότερης θερμοκρασίας πρέπει να υπερβαίνει τους 10 °C/s προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητοι μετασχηματισμοί διάχυσης. Λόγω της διαδικασίας θερμής εμβάπτισης, όπου η χαλύβδινη ταινία διέρχεται από ένα δοχείο υγρού Zn, υπάρχει σταμάτημα της ψύξης περίπου στους 460 °C για περίπου 20s [27, 28]. Στο Πίνακα 2 παρατίθενται τα όρια για τη βιομηχανική θερμική επεξεργασία των χαλύβων DP1000, τα οποία έγιναν από την TKSE..

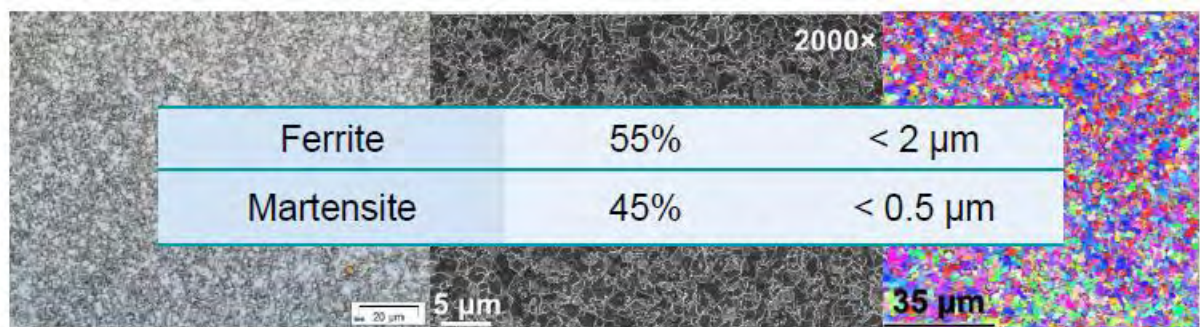
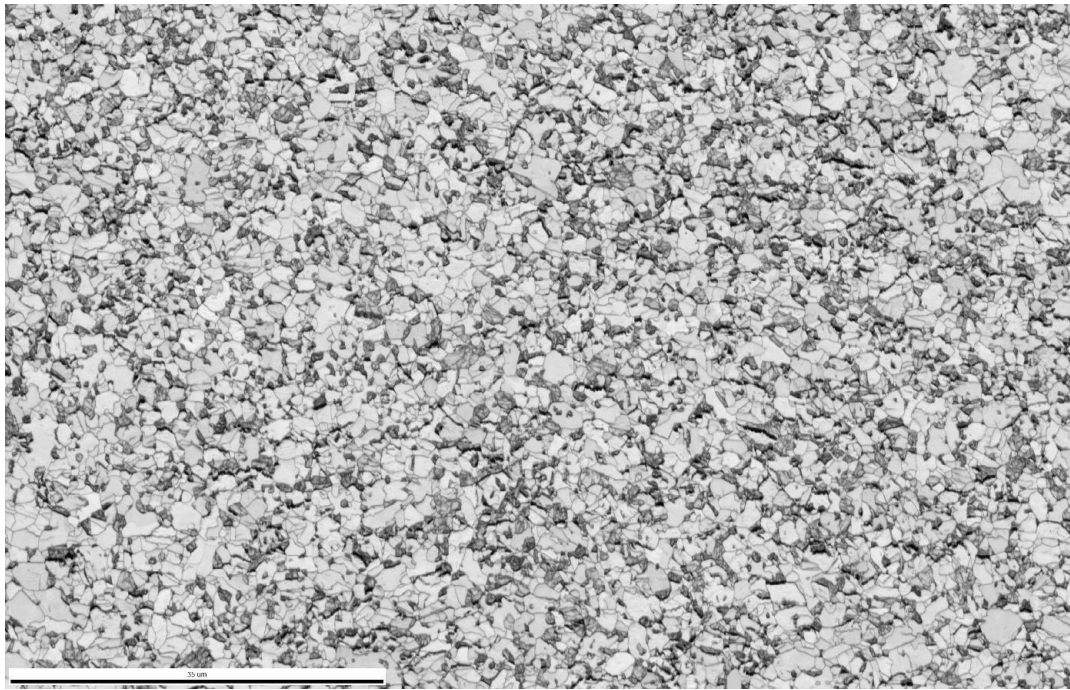


Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα της θερμικής επεξεργασίας των χαλύβων DP1000.

Πίνακας 2: Ζώνες βιομηχανικής θερμικής επεξεργασίας των χαλύβων.

Παράμετροι	Μέση Τιμή	Κατώτερο Όριο	Ανώτερο Όριο
Θερμοκρασία Θερμής «ελασης [°C]	555	530	580
ΙΑ Θερμοκρασία [°C]	775	700	850
ΙΑ Χρόνος [sec]	175	50	300
Τελική Θερμοκρασία [°C]	100	100	100
Ρυθμός Θέρμανσης [°Cs <sup>-1</sup> ]	60	50	70
Ρυθμός Επιταχυνόμενης Ψύξης [°Cs <sup>-1</sup> ]	55	10	100

Η αρχική μικροδομή του υλικού απεικονίζεται στην Εικόνα 3. Αποτελείται από 55% φερρίτη με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 2μm και 45% μαρτενσίτη με μέγεθος κόκκου μικρότερο από 0,5μm.



Εικόνα 3: Αρχική μικροδομή του υλικού (DP1000) [26].

### 3.2 Μεθοδολογία

Η πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας παρουσιάζετε συνοπτικά στον Πίνακα 3. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα θερμικών κατεργασιών του χάλυβα DP1000 με την χρήση της μεθόδου της διαστολομετρίας καθώς και αντίστοιχα πειράματα θερμικών κατεργασιών με συμβατικούς επαγωγικούς φούρνους.

Η διαστολομετρική μελέτη εκπονήθηκε με στόχο την καταγραφή της μεταβολής των ποσοστών των φάσεων  $\alpha$  και  $\gamma$  (φερρίτη και ωστενίτη) κατά την διάρκεια των κατεργασιών της πλήρους ανόπτησης και της ενδοκρίσιμης ανόπτησης.

Η μελέτη της θερμικής κατεργασίας παράλληλα με επαγωγικούς φούρνους έγινε για την μελέτη του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού μετά την ψύξη από την Θερμοκρασιακή περιοχή της ενδοκρίσιμη ανόπτησης.

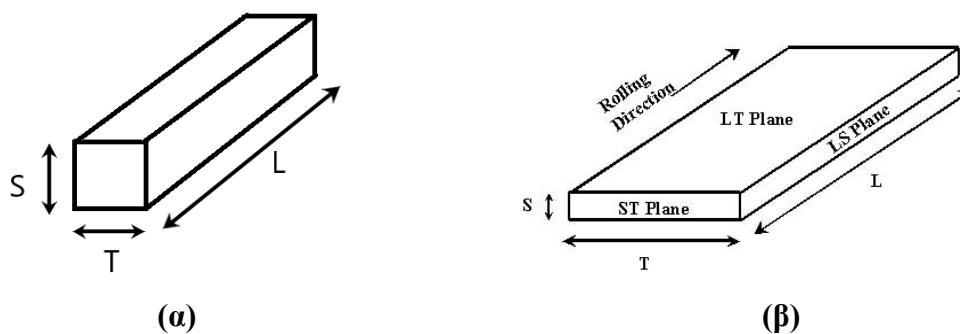
Πίνακας 3. Πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε

Πείραμα Διαστολομετρίας		Επαγωγικοί Φούρνοι	
1	Κοπή δοκιμίων	1	Κοπή δοκιμίων
2.	Θερμική Κατεργασία (Διαστολομετρία)	2	Θερμική Κατεργασία (Επαγωγικοί Φούρνοι)
3	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Διαστολομετρίας	3	Εγκιβωτισμός
4	Εγκιβωτισμός	4	Λείανση
5	Λείανση	5	Στίλβωση
6	Στίλβωση	6	Χημική προσβολή
7	Χημική προσβολή	7	Μεταλλογραφία
8	Μεταλλογραφία	8	Σκληρομέτρησεις
9	Σκληρομέτρησεις		

### 3.3 Προετοιμασία Δοκιμίων

Για την διαστολόμετρική μελέτη έγινε κοπή των δοκιμίων με αποξεστικό τροχό (Struers Accutom) στο εργαστήριο των υλικών. Τα δοκίμια ξεπλύθηκαν με νερό και με αιθανόλη προκειμένου να απαλλαγούν από λιπαντικά και ακαθαρσίες και να αποφευχθεί η διάβρωση. Ακολούθως, στεγνώθηκαν υπό ροή θερμού αέρα.

Σχηματικά, ένα δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα φαίνεται στην Εικόνα 4. Ονομασία των διευθύνσεων και των επίπεδων..Οι διαστάσεις μετρήθηκαν ως εξής:  $L = 15-18$  mm,  $T = 1-2$  mm and  $S = 1.5$  mm.



Εικόνα 4. Ονομασία των διευθύνσεων και των επίπεδων. Δοκίμιο διαστολομετρίας (α) και Δοκίμιο μεταλλογραφικής μελέτης (β).

Αφού παρήχθησαν τα κατάλληλα δοκίμια, υποβλήθηκαν στις αντίστοιχες θερμικές κατεργασίες.

### 3.4 Θερμικές Κατεργασίες

Οι θερμικές κατεργασίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία χαλύβων χαμηλής κραμάτωσης, όπως ο χάλυβας DP1000. Ο ρυθμός θέρμανσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την τελική μικροδομή του υλικού, λόγω της επίδρασης στις θέσεις



πυρήνωσης κατά τη θέρμανση. Σε βιομηχανικό επίπεδο, χρησιμοποιούνται μεγάλα φύλλα ή ογκώδεις μάζες χάλυβα, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφοροποίηση στο ρυθμό θέρμανσης. Στην παρούσα μελέτη, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι αρκετά μικρών διαστάσεων. Συνεπώς, εφαρμόζονται σχετικά υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης. Όταν οι χρόνοι ανόπτησης είναι μικροί, προηγείται προθέρμανση των δοκιμίων.

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά πειράματα θερμικών κατεργασιών. Η μία σειρά πειραμάτων εκτελέστηκε σε διαστολόμετρο και στόχο είχε την μελέτη της θερμικής κατεργασίας της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και το δεύτερο πείραμα έγινε σε απλούς επαγωγικούς φούρνους με στόχο την μελέτη της τελικής μικροδομής μετά την βαφή από την ενδοκρίσιμη ανόπτηση.

### 3.4.1 Θερμικές Κατεργασίες στο Διαστολόμετρο

Η πρώτη σειρά πειραμάτων εκτελέστηκε σε διαστολόμετρο με στόχο είχε την μελέτη των θερμικών κατεργασιών της πλήρους ανόπτησης και της ενδοκρίσιμης ανόπτησης.

Για να μελετηθεί η πλήρης ανόπτηση δοκίμια χάλυβα DP-1000 θερμάνθηκαν στους 900 °C και μόλις έφτασαν την συγκεκριμένη θερμοκρασία ψύχθηκαν έως τους 100 °C με ίδιο ρυθμό για την θέρμανση και την ψύξη, το σύνολο της θερμικής κατεργασίας πραγματοποιήθηκε στο διαστολόμετρο LINSEIS L 70/2161. Ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης πήρε τιμές 5 °C/min, 10 °C/min και 20 °C/min. Ένα δοκίμιο θερμάνθηκε στους 900 °C και παρέμεινε σ' αυτή τη θερμοκρασία για μισή ώρα. Στη συνέχεια ψύχθηκε περίπου έως τους 100 °C με τον ρυθμό των 20 °C/min. Οι θερμοκρασία και οι ρυθμοί της πλήρους ανόπτησης και των αντίστοιχων χρόνων διατήρησης της μαζί με την ονομασία των δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Διαστολομετρικά πειράματα πλήρους ανόπτησης στους 900 °C .

Πείραμα	Θερμική Κατεργασία
1	Θέρμανση του δοκιμίου έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min.
2	Θέρμανση του δοκιμίου έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 10 °C/min.
3	Θέρμανση του δοκιμίου έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι τους 150°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 5 °C/min.
4	Θέρμανση του δοκιμίου έως τους 900°C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 λεπτά και έπειτα ψύξη μέχρι τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min.

Για να μελετηθεί η ενδοκρίσιμη ανόπτηση η σειρά πειραμάτων χωρίζεται σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η θερμική κατεργασία έχει ως στόχο την δημιουργία φερριτοπερλιτικής μικροδομής, η οποία λειτουργεί ως αρχική μικροδομή για το δεύτερο στάδιο στο οποίο θα εξεταστεί η ενδοκρίσιμη ανόπτηση και η δημιουργία φερρίτη και ωστενίτη. Για το πρώτο στάδιο δοκίμια χάλυβα DP-1000 θερμάνθηκαν στους 854 °C όπου και παρέμειναν εκεί για 30 min, έπειτα ψύχθηκαν μέχρι τους 550 °C, έμειναν στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 hr και στη συνέχεια ψύχθηκαν. Στο δεύτερο στάδιο τα ίδια δοκίμια θερμάνθηκαν μέχρι την περιοχί της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και παρέμειναν εκεί για μία ώρα. Οι θερμοκρασίες της θερμικής κατεργασίας είναι 750 °C, 760 °C, 770 °C και 780 °C. Όλες οι διεργασίες έγιναν με ρυθμό 20

°C /min. Οι θερμοκρασία και οι ρυθμοί της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και των αντίστοιχων χρόνων διατήρησης της μαζί με την ονομασία των δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Διαστολομετρικά πειράματα ενδοκρίσιμης ανόπτησης.

Πείραμα	Θερμική Κατεργασία
5	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος ψύξη περαιτέρω μέχρι τους 200 °C και θέρμανση ξανά μέχρι τους 750 °C διατηρώντας το εκεί για 1 ώρα με ρυθμό 20 °C /min.
6	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος ψύξη περαιτέρω μέχρι τους 200 °C και θέρμανση ξανά μέχρι τους 760 °C διατηρώντας το εκεί για 1 ώρα με ρυθμό 20 °C /min.
7	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος ψύξη περαιτέρω μέχρι τους 200 °C και θέρμανση ξανά μέχρι τους 770 °C διατηρώντας το εκεί για 1 ώρα με ρυθμό 20 °C /min.
8	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C , διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος ψύξη περαιτέρω μέχρι τους 200 °C και θέρμανση ξανά μέχρι τους 780 °C διατηρώντας το εκεί για 1 ώρα με ρυθμό 20 °C /min.

### 3.4.2 Θερμικές Κατεργασίες σε Επαγωγικούς Φούρνους

Η αρχική θερμική κατεργασία που εφαρμόστηκε, πριν από την ενδοκρίσιμη ανόπτηση, συνίσταται στη θέρμανση στην πλήρη ωστενιτική ζώνη δηλαδή πάνω από 804 °C. Πιο συγκεκριμένα στους 854°C, για 30 λεπτά και στην συνέχεια παραμονή ισόθερμα στους 550 °C, για 60 λεπτά. Η θερμική κατεργασία απεικονίζεται στον Πίνακα 6. Τέλος, όλα τα δοκίμια ψύχονται στον αέρα. Η κατεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα μια μικροδομή φερρίτη-περλίτη, σύμφωνα με το διαγράμματα φάσης του χάλυβα DP 1000. Αυτό το αρχικό βήμα πραγματοποιήθηκε προκειμένου να εξαλειφθεί το αρχικά εξαιρετικό μικρό μέγεθος κόκκων και να δημιουργηθεί μια νέα μικροδομή με μεγαλύτερους και πιο ευδιάκριτους κόκκους στο οπτικό μικροσκόπιο.

Πίνακας 6. Η αρχική θερμική κατεργασία που εφαρμόστηκε, πριν από την ενδοκρίσιμη ανόπτηση. Σχηματισμός μικροδομής φερρίτη-περλίτη

Δοκίμια	Βήμα 1	Χρόνος	Βήμα 2	Χρόνος	Βήμα 3
όλα	Θέρμανση στους 854°C	30 min	Θέρμανση στους 550°C	60 min	Ψύξη στον αέρα (25°C)

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που αφορά τις θερμικές κατεργασίες είναι η θερμοκρασία ανόπτησης. Η ενδοκρίσιμη ανόπτηση αποτελεί το δεύτερο στάδιο θερμικής επεξεργασίας. Η περιοχή της ενδοκρίσιμης θερμοκρασίας για το DP1000 βρίσκεται μεταξύ των θερμοκρασιών  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει να σχηματίζεται ο ωστενίτης κατά τη θέρμανση ( $A_{c1}$ ) υπολογίστηκε στους  $681,87^{\circ}\text{C}$  και η θερμοκρασία στην οποία ολοκληρώνεται ο μετασχηματισμός του φερρίτη σε ωστενίτη κατά τη θέρμανση ( $A_{c3}$ ) υπολογίστηκε στους  $803,42^{\circ}\text{C}$ , σύμφωνα με τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν με ThermoCalc και Θερμοδυναμική βάση δεδομένων TCFE6. Οι θερμοκρασίες που εφαρμόστηκαν στην τρέχουσα εργασία ήταν  $750^{\circ}\text{C}$ , και  $790^{\circ}\text{C}$ . Οι θερμικές κατεργασίες απεικονίζονται στους Πίνακες 7 και 8.



Πίνακας 8. Πειράματα ενδοκρίσιμης ανόπτησης στους 790 °C σε επαγωγικούς φούρνους .

Πείραμα	Θερμική Κατεργασία
17	Θέρμανση του δοκιμίου στον φούρνο μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 δευτερόλεπτα με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.
18	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 λεπτό με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.
19	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 2 λεπτά με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.
20	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 3 λεπτά με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.
21	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 5 λεπτά με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.
22	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 10 λεπτά με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.
23	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 λεπτά με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.
24	Θέρμανση του δοκιμίου μέχρι τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα και τέλος βαφή του δοκιμίου. Έπειτα έγινε θέρμανση στους 790 °C διατηρώντας το στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και τέλος ξανά βαφή.

Το τελικό, αλλά σημαντικότερο βήμα είναι η ψύξη από τη ενδοκρίσιμη περιοχή σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό επιτυγχάνεται στα δοκίμια των κλιβάνων μέσω ψύξης σε νερό. Αυτό οδηγεί στο σχηματισμό μαρτενσίτη και γενικά στην επιθυμητή μικροδομή DP1000.

### 3.5 Μεταλλογραφία

Μετά τις θερμικές κατεργασίες, κάθε δοκίμιο λειανίνεται με τα κατάλληλα χαρτιά λείανσης SiC προκειμένου να αφαιρεθεί το επιφανειακό οξείδιο που δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας και να δημιουργηθεί μία επίπεδη και λεία επιφάνεια. Τα χαρτιά λείανσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 80, 180, 320, 500, 800 και 1000 grit. Προκειμένου να διαγραφούν γραμμές που δημιουργήθηκαν κατά την λείανση, η κατεύθυνση του δείγματος στις μηχανές λείανσης αλλάζει κατά 90 μοίρες μετά από κάθε χαρτί.

Η λείανση ακολουθείται από στίλβωση. Για αυτό το βήμα χρησιμοποιήθηκε μια πάστα διαμαντιού, με μέγεθος κόκκων 3  $\mu\text{m}$  που απλώθηκε στους δίσκους υφάσματος της μηχανής στίλβωσης. Ως αποτέλεσμα, παράγεται μία ομαλή επιφάνεια. Για να δημιουργηθεί μια εξαιρετικά ομαλή επιφάνεια, εφαρμόστηκε ένα δεύτερο στάδιο στίλβωσης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε σκόνη αλουμίνιας 0.3  $\mu\text{m}$ . Τα δοκίμια που έγιναν στους φούρνους δεν τοποθετήθηκαν σε ρητίνη, σε αντίθεση με εκείνα του διαστολομέτρου, και για το λόγο αυτό η λείανση και η στίλβωση πραγματοποιήθηκαν με ταινία διπλής όψεως. Το αποτέλεσμα ήταν μια ομαλή επιφάνεια που μοιάζει με καθρέφτη. Για να δημιουργηθεί μια αντίθεση ανάμεσα στις υπάρχουσες φάσεις του DP1000, κάθε δείγμα προσβλήθηκε χημικά σε δύο στάδια. Αυτή η τεχνική προτάθηκε από τον Vander Voort και συνίσταται στην αρχική προσβολή με το Nital:

(α) Nital 2% (2ml  $\text{HNO}_3$  σε 98ml αιθανόλη) για 1-2 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια

(β) Aquatic solution Sodium Metabisulfite 10% (10g  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  σε 100ml απεσταγμένο νερό) για 20 δευτερόλεπτα.

Μετά από κάθε βήμα, κάθε δείγμα ξεπλύθηκε με νερό και με αιθανόλη, μία ή δύο φορές και μετά στεγνώθηκε υπό ροή θερμού αέρα. Τέλος, όλα τα δείγματα παρατηρήθηκαν με ένα οπτικό μικροσκόπιο Leica DLM και οι εικόνες λήφθηκαν με μια κάμερα Canon EOS 600D

Για τον εγκιβωτισμό του δοκιμίου επιλέγετε μια εποξική ρητίνη, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από θερμότητα ή πίεση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείτε η ρητίνη Versocit-2. Για την παρασκευή της αναμειγνύονται 2 μέρη σκόνης με 1 μέρος υγρό. Έπειτα τοποθετείτε το δοκίμιο μέσα σε ένα ειδικό κυλινδρικό καλούπι, προστίθεται το μίγμα και μετά από μερικά λεπτά η ρητίνη στερεοποιείται. Το δοκίμιο αφαιρείτε από το καλούπι το οποίο είναι πλέον έτοιμο για τις επόμενες διεργασίες.

### 3.6 Σκληρομετρήσεις

Μετά τη μεταλλογραφική ανάλυση μετρήθηκε η μικροσκληρότητα των δειγμάτων. Γενικά, η σκληρότητα ορίζεται ως η ιδιότητα ενός υλικού που αντιστέκεται στη διείσδυση ενός άλλου σκληρότερου υλικού. Αρχικά, απαιτείται γυάλισμα, προκειμένου να διαγραφεί η προηγούμενη χημική προσβολή και να δημιουργηθεί μια νέα επιφάνεια σαν καθρέφτης. Χρησιμοποιήθηκε μικροσκληρόμετρο Wickpert Vickers. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένας διεισδυτής διαμαντιού με κανονικό σχήμα τετραγωνικής πυραμίδας. Ο διεισδυτής αφήνει στην επιφάνεια δείγματος ένα ρομβικό ίχνος με διαγώνιες  $d_1$  και  $d_2$ . Διεξήχθησαν δοκιμές μικρής σκληρότητας με φορτίο 300 γραμμαρίων (0,3 kg). Οι δύο διαγώνιες του ρόμβου μετρούνται δίνοντας την τελική τιμή της μικροσκληρότητας σε κλίμακα Vickers (HV) σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$HV = F / A = 1.854 * F / d^2$ , όπου F είναι το επιβαλλόμενο φορτίο, A η επιφάνεια και  $d = (d1 + d2) / 2$  (μέση διαγώνιος τιμή).

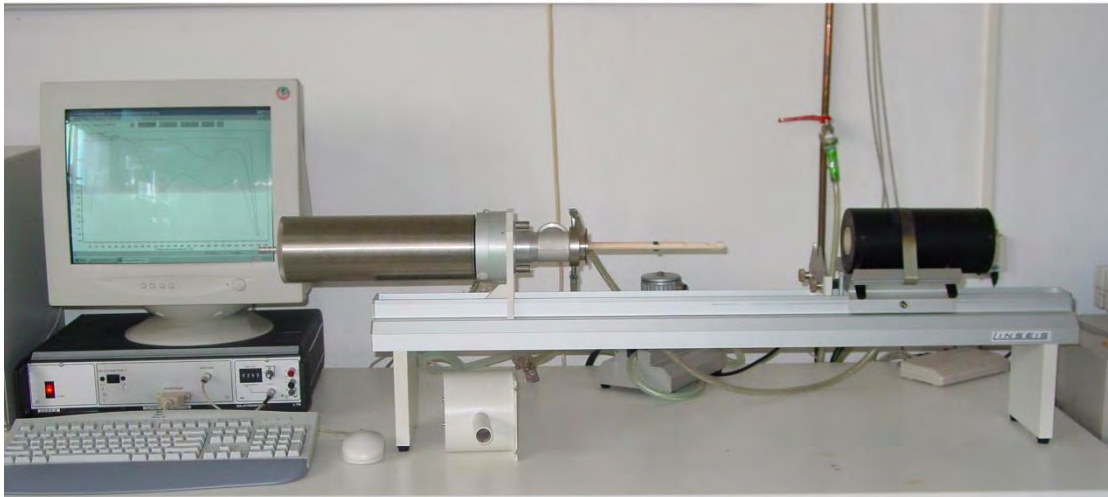
Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν 6 μετρήσεις και υπολογίστηκε μια μέση τιμή.

## 3.7 Διαστολομετρία

### 3.7.1 Πειραματική διάταξη

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο το διαστολόμετρο. Το διαστολόμετρο μετρά την διαστολή και την συστολή ενός οποιουδήποτε δοκιμίου που θα επιβληθεί σε μια θερμική κατεργασία. Ουσιαστικά μετράει τη μεταβολή του μήκους ενός δοκιμίου.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το διαστολόμετρο LINSEIS L 70/2161 που φαίνεται παρακάτω.



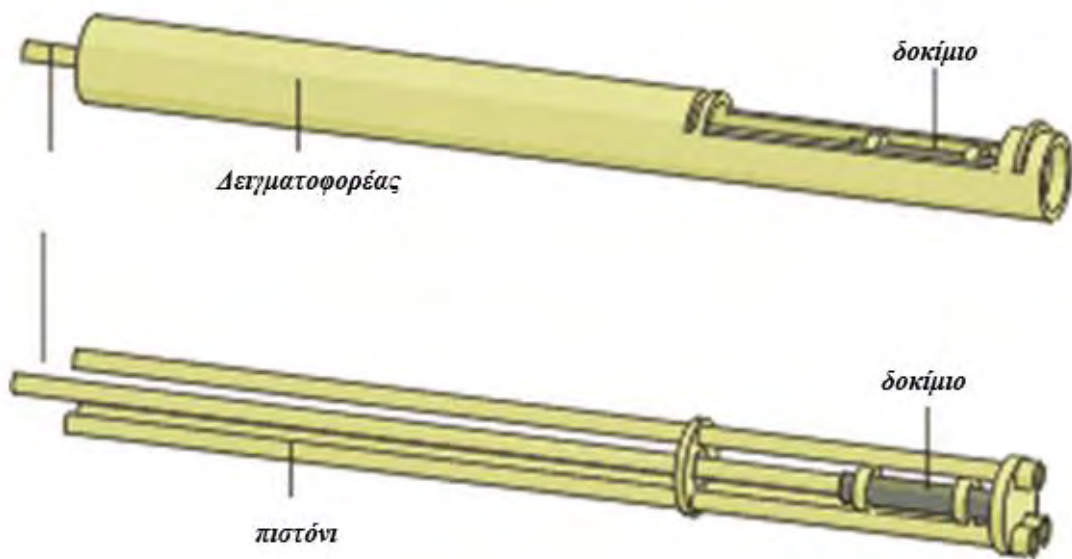
Εικόνα 5. Διαστολόμετρο LINSEIS L 70/2161.

Το συγκεκριμένο διαστολόμετρο αποτελείται από τα εξής τμήματα από τα δεξιά προς τα αριστερά όπως φαίνεται στην Εικόνα 5:

- Ο φούρνος
- Η βασική μονάδα του διαστολομέτρου
- Το κινούμενο μέρος όπου μετακινείται και στηρίζεται ο φούρνος και η βασική μονάδα του διαστολόμετρου αντίστοιχα
- Το λογισμικό

### 3.7.2 Βασική μονάδα του διαστολομέτρου

Η βασική μονάδα του διαστολομέτρου αποτελείται από 4 κύρια μέρη ο δειγματοφορέας, το πιστόνι, το πλαίσιο μέσα στο οποίο βρίσκεται ο αισθητήρας διαστολής και από ένα προστατευτικό σωλήνα (όπως φαίνεται στην Εικόνα 6).



Εικόνα 6. Βασική μονάδα διαστολομέτρου.

Πιο αναλυτικά το πιστόνι, ο δειγματοφορέας και ο προστατευτικός σωλήνας το υλικό από τα οποία αποτελούνται είναι η αλουμίνα  $Al_2O_3$ , το οποίο είναι κεραμικό, για να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες. Το πιστόνι μπορεί και μετακινείται ηλεκτρονικά με τη βοήθεια ενός διακόπτη και το δεξί άκρο του δειγματοφορέα και το οποίο κρατάει "στον αέρα" το δοκίμιο. Η μέγιστη διάμετρος που μπορεί να έχει το δοκίμιο είναι 5mm και το μέγιστο μήκος είναι 25mm με βέλτιστο τα 20mm. Ο προστατευτικός σωλήνας τοποθετείται ώστε να προστατεύει το δειγματοφορέα – πιστόνι – δοκίμιο και να τα διατηρεί σε κανονική ατμόσφαιρα. Το πιστόνι κινείται με το δοκίμιο κατά τη συστολή ή τη διαστολή του και μεταφέρει την κίνηση αυτή έξω από τη ζώνη θέρμανσης στο λογισμικό. Πρόκειται για ένα μόνο διαστολόμετρο και γι' αυτό μετρά την διαστολή του δοκιμίου σε σύγκριση με τον δειγματοφορέα.

### 3.7.3 Ο φούρνος



Εικόνα 7. Ο φούρνος για τις θερμοκρασιακές μεταβολές.



Το διαστολόμετρο LINSEIS L 70/2161 είναι ένα οριζόντιο διαστολόμετρο γι'αυτό και ο φούρνος είναι σε οριζόντια θέση. Είναι κυλινδρικός σε όλη την έκταση του μήκους του και κεντρικά υπάρχει μια οπή. Το εύρος θερμοκρασιών του είναι 20 – 1300°C και η θερμοκρασιακή απόκλιση του είναι +/- 1,5°C. Τέλος το ψυκτικό υγρό που διαχέεται μέσα στα τοιχώματα του φούρνου είναι το νερό.

#### 3.7.4 Διαστολομετρικές Μετρήσεις

Μετά την κοπή των δοκιμίων σειρά έχει η διαστολομετρία όπου υποβάλλονται στις θερμικές κατεργασίες για την λήψη αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα έγιναν 2 σειρές πειραμάτων από 4 πειράματα η κάθε σειρά. Τα δοκίμια αρχικά τοποθετούνται στο δειγματοφορέα αφού πρώτα ο φούρνος μετακινείται και σταθεροποιείται στο δεξί άκρο του καναλιού. Μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου, ο δειγματοφορέας καλύπτεται με τον προστατευτικό σωλήνα και στη συνέχεια ο φούρνος μετακινείται αριστερά και κλειδώνεται στη θέση όπου ο προστατευτικός σωλήνας έχει εισέλθει στην οπή στο κέντρο του φούρνου. Με τον τρόπο αυτό ο δειγματοφορέας το πιστόνι και το δοκίμιο είναι καλυμμένα από τον προστατευτικό σωλήνα και βρίσκονται στο εσωτερικό του φούρνου.

## 4 Αποτελέσματα

### 4.1 Διαστολομετρία

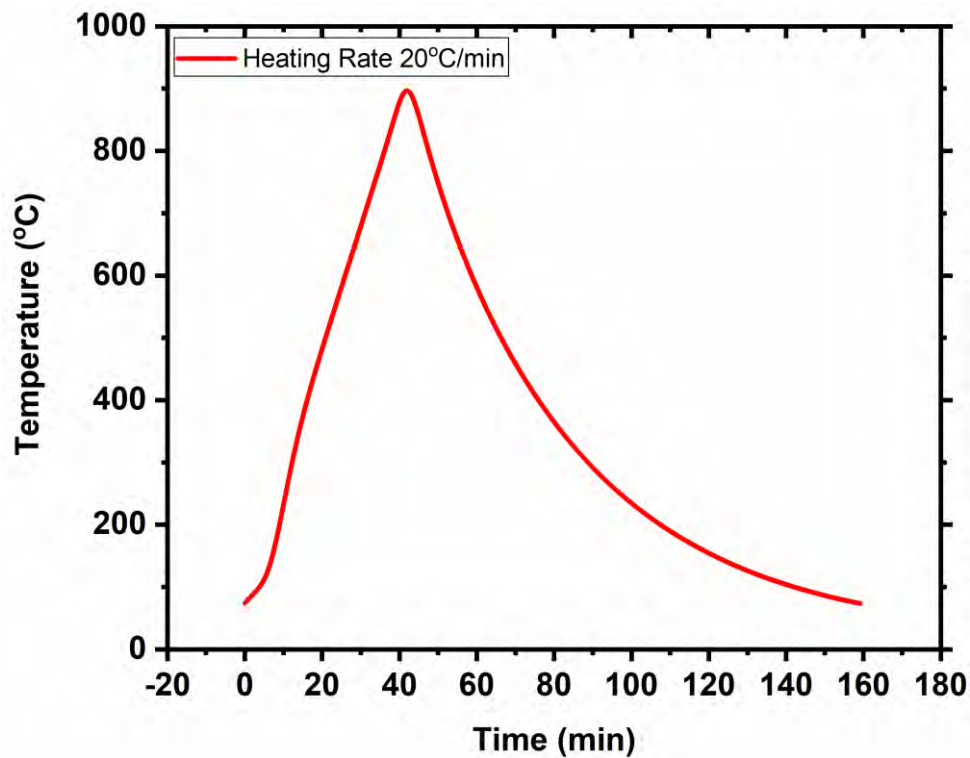
#### 4.1.1 Αποτελέσματα Πειράματος Διαστολομετρίας

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων διαστολομετρίας. Στη πρώτη σειρά πειραμάτων δοκίμια χάλυβα DP-1000 θερμάνθηκαν στους 900 °C και αμέσως μόλις έφτασαν την συγκεκριμένη θερμοκρασία ψύχθηκαν έως τους 100 °C με ίδιο ρυθμό για την θέρμανση και την ψύξη, το σύνολο της θερμικής κατεργασίας πραγματοποιήθηκε στο διαστολόμετρο LINSEIS L 70/2161. Ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης πήρε τιμές 5 °C/min, 10 °C/min και 20 °C/min. Ένα δοκίμιο θερμάνθηκε στους 900 °C και παρέμεινε σ'αυτή τη θερμοκρασία για μισή ώρα. Στη συνέχεια ψύχθηκε περίπου έως τους 100 °C με τον ρυθμό των 20 °C/min.

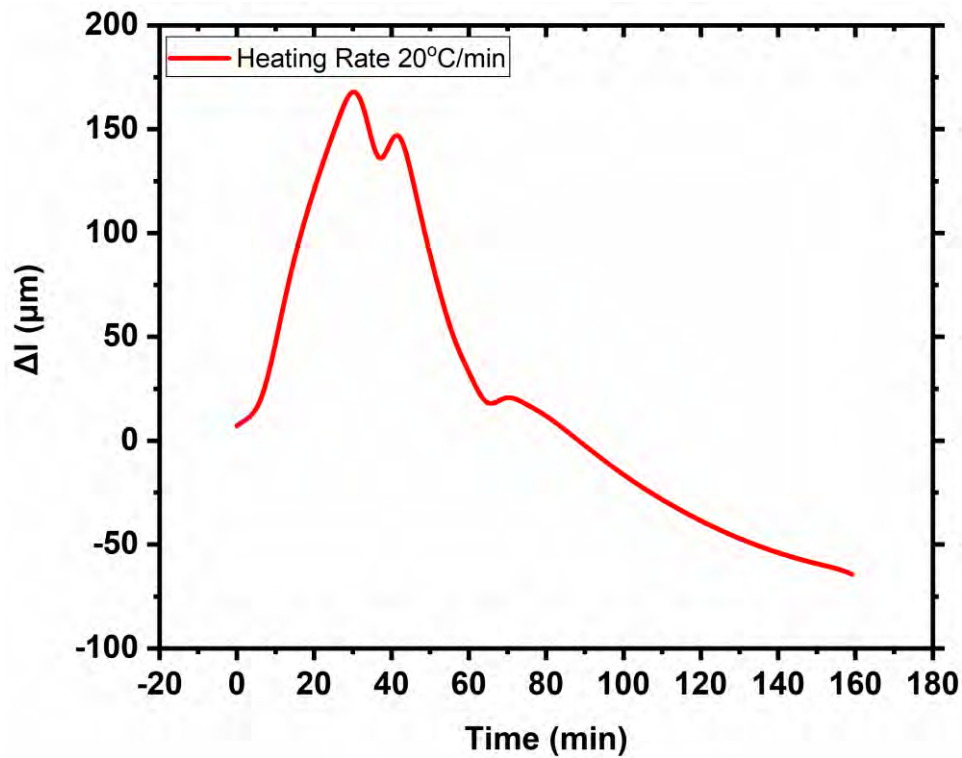
Η δεύτερη σειρά πειραμάτων χωρίζεται σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η θερμική κατεργασία έχει ως στόχο την δημιουργία φερριτοπερλιτικής μικροδομής, η οποία λειτουργεί ως αρχική μικροδομή για το δεύτερο στάδιο στο οποίο θα εξεταστεί η ενδοκρίσιμη ανόπτηση και η δημιουργία φερρίτη και ωστενίτη. Για το πρώτο στάδιο δοκίμια χάλυβα DP-1000 θερμάνθηκαν στους 854 °C όπου και παρέμειναν εκεί για 30 min, έπειτα ψύχθηκαν μέχρι τους 550 °C, έμειναν στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 hr και στη συνέχεια ψύχθηκαν. Στο δεύτερο στάδιο τα ίδια δοκίμια θερμάνθηκαν μέχρι την περιοχή της ενδοκρίσιμης ανόπτησης και παρέμειναν εκεί για μία ώρα. Οι θερμοκρασίες της θερμικής κατεργασίας είναι 750 °C, 760 °C, 770 °C και 780 °C. Όλες οι διεργασίες έγιναν με ρυθμό 20 °C /min.

Στις Εικόνες 8,9 και 10 απεικονίζονται τα διαγράμματα του 1<sup>ου</sup> πειράματος, όπου το δοκίμιο θερμάνθηκε μέχρι τους 900 °C και στη συνέχεια ψύχθηκε έως περίπου τους 100 °C με ρυθμό

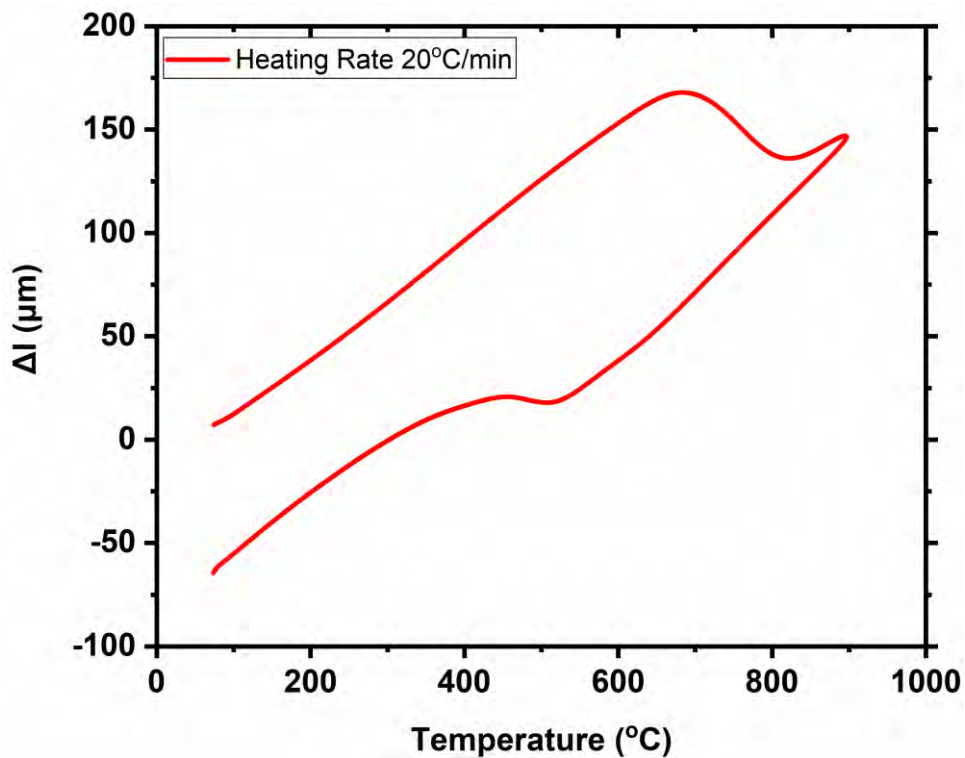
θέρμανσης και ψύξης 20 °C/min. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να αυξηθεί η θερμοκρασία μέχρι τους 900 °C και έπειτα να ψυχθεί το δοκίμιο. Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται η μεταβολή του υλικού (διαστολή-συστολή) με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του πειράματος 1. Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται το πώς διαστέλλεται και συστέλλεται το δοκίμιο κατά την θερμική κατεργασία αφού ο άξονας y δείχνει αυτή την μεταβολή του υλικού (σε μm) και ο άξονας x την θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα.



Εικόνα 8. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min.



Εικόνα 9. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους  $900^\circ\text{C}$  και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους  $100^\circ\text{C}$  με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ .



Εικόνα 10. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους  $900^\circ\text{C}$  και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους  $100^\circ\text{C}$  με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ .

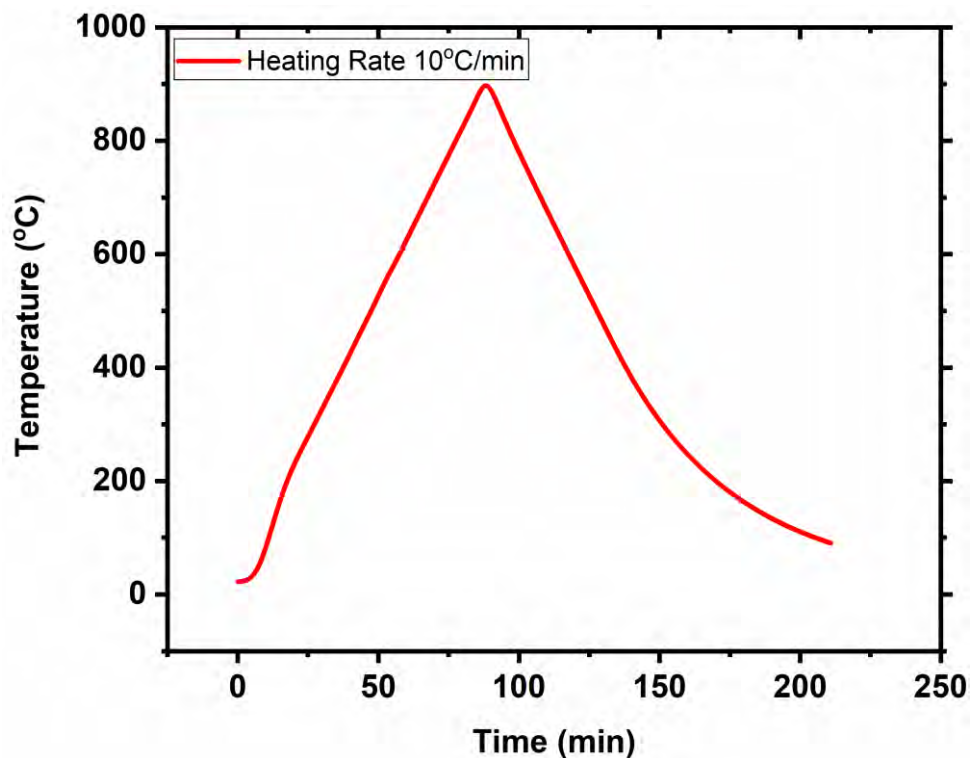
Στις Εικόνες 11,12 και 13 απεικονίζονται τα διαγράμματα του πειράματος 2 όπου θερμάνθηκε το δοκίμιο μέχρι τους 900 °C και μετά ψύχθηκε έως περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης και ψύξης τους 10 °C/min. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να αυξηθεί η θερμοκρασία μέχρι τους 900 °C και έπειτα να ψυχθεί το δοκίμιο. Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται η διαστολή-συστολή του υλικού με την πάροδο του χρόνου κατά την θερμική κατεργασία του πειράματος 2.

Στην Εικόνα 13 φαίνεται το πώς διαστέλλεται και συστέλλεται ο χάλυβας κατά την θερμική κατεργασία. Ο κάθετος άξονας δείχνει αυτή την μεταβολή του υλικού σε  $\mu\text{m}$  και ο οριζόντιος άξονας την θερμοκρασία στο συγκεκριμένο πείραμα.

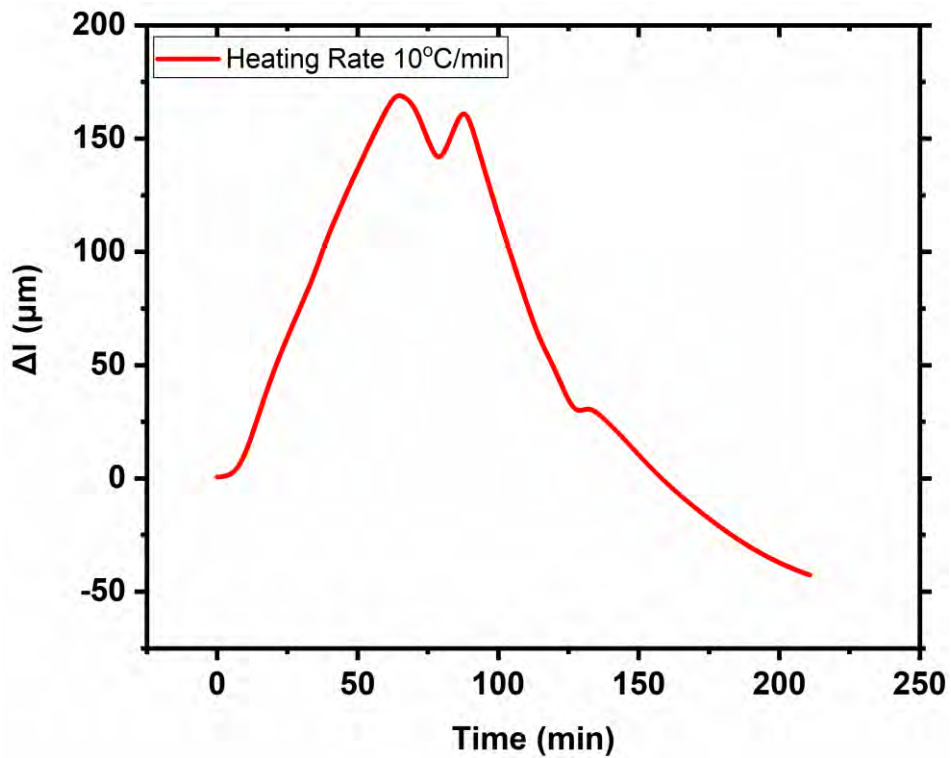
Στις Εικόνες 14,15 και 16 απεικονίζονται τα διαγράμματα του πειράματος 3 όπου το δοκίμιο θερμάνθηκε μέχρι τους 900 °C και μετά ψύχθηκε έως τους 150 °C με ρυθμό θέρμανσης και ψύξης 5 °C/min. Πιο αναλυτικά στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να φτάσει η θερμοκρασία μέχρι τους 900 °C και έπειτα να ψυχθεί το δοκίμιο.

Στην Εικόνα 15 απεικονίζεται η μεταβολή μήκους του υλικού σε σχέση με τον χρόνο κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του πειράματος 3.

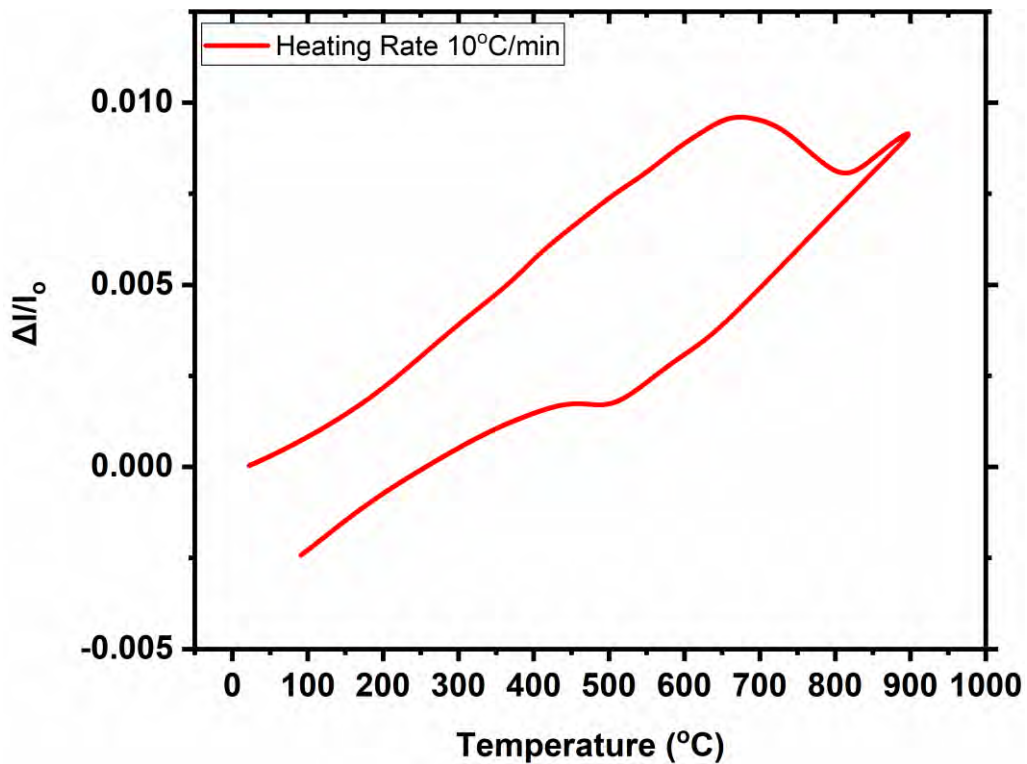
Η Εικόνα 16 δείχνει την διαστολή και συστολή του δοκιμίου κατά την θερμική κατεργασία αφού ο άξονας y δείχνει αυτή την μεταβολή του υλικού (σε  $\mu\text{m}$ ) και ο άξονας x την θερμοκρασία που επιτεύχθει στο συγκεκριμένο πείραμα.



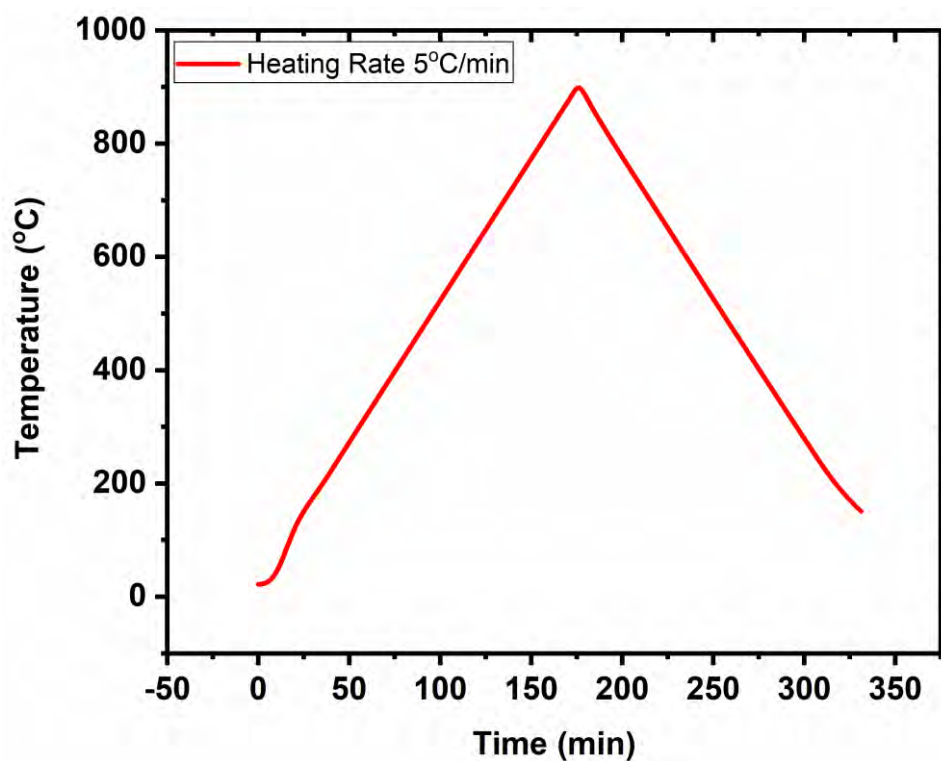
Εικόνα 11. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 10°C/min.



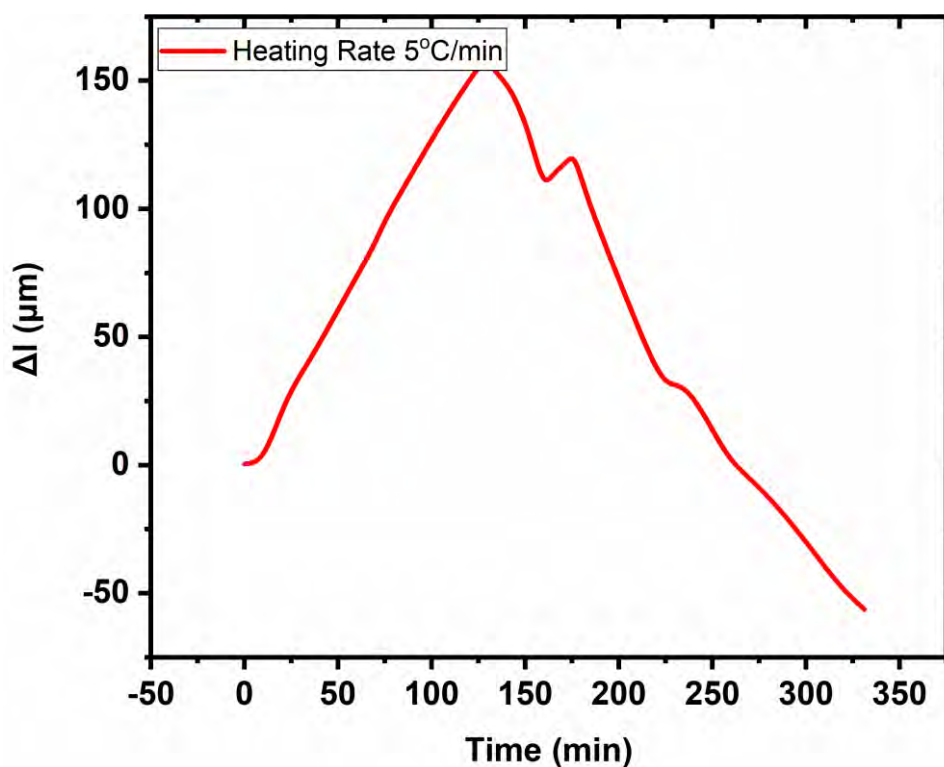
Εικόνα 12. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 10°C/min.



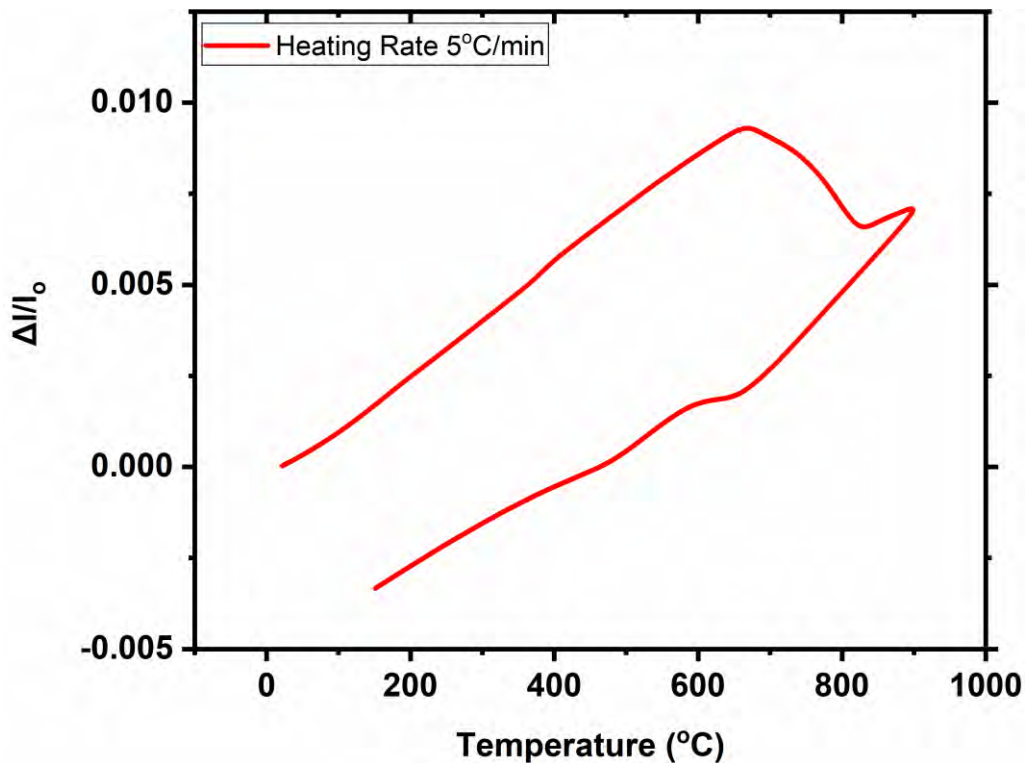
Εικόνα 13. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 10°C/min.



Εικόνα 14. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 5°C/min.



Εικόνα 15. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 5°C/min..

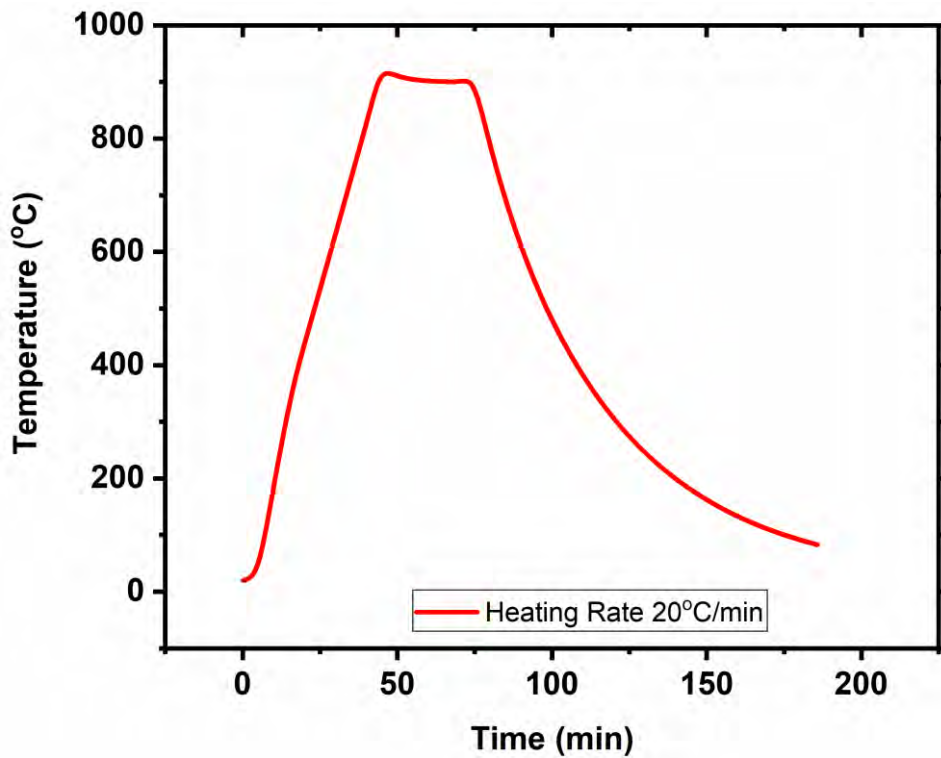


Εικόνα 16. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900°C και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100°C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 5°C/min.

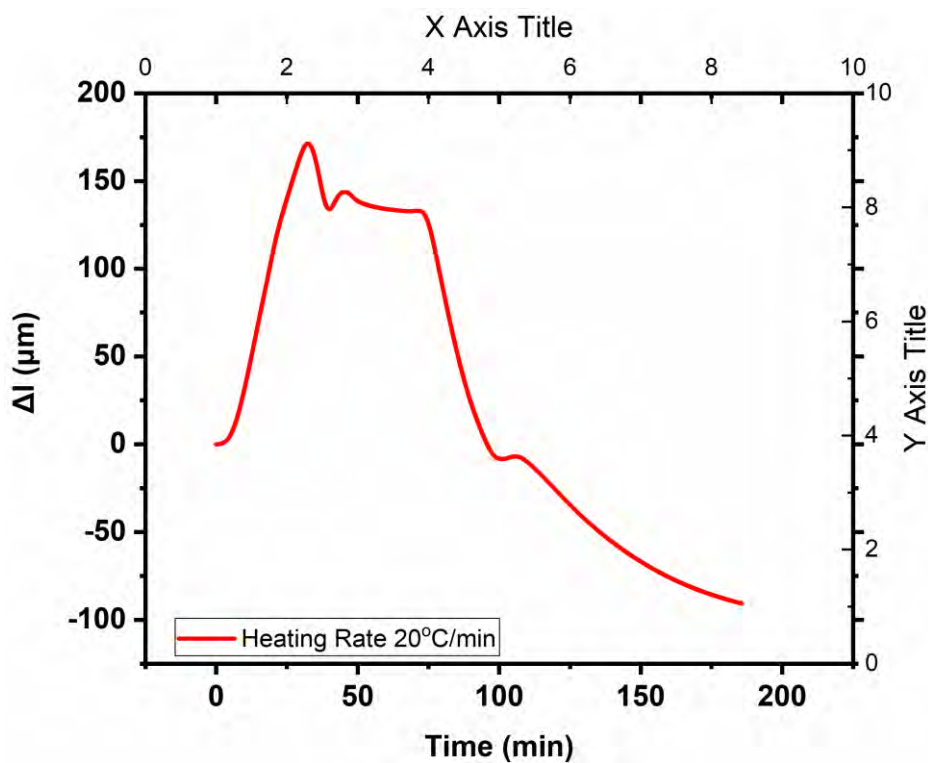
Στις Εικόνες 17,18 και 19 απεικονίζονται τα διαγράμματα του πειράματος 4 όπου το δοκίμιο θερμάνθηκε μέχρι τους 900 °C ,έπειτα διατηρήθηκε στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 min και μετά ψύχθηκε έως τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης και ψύξης 20 °C/min. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να φτάσει η θερμοκρασία μέχρι τους 900 °C και έπειτα να ψυχθεί το δοκίμιο.

Στην Εικόνα 18 απεικονίζεται η μεταβολή του υλικού (διαστολή-συστολή) με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του πειράματος 4.

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται το πώς διαστέλλεται και συστέλλεται ο χάλυβας κατά την θερμική κατεργασία αφού στον άξονα y φαίνεται αυτή την μεταβολή του υλικού (σε μm) και στον άξονα x η θερμοκρασία που φτάνει το δοκίμιο στο συγκεκριμένο πείραμα.

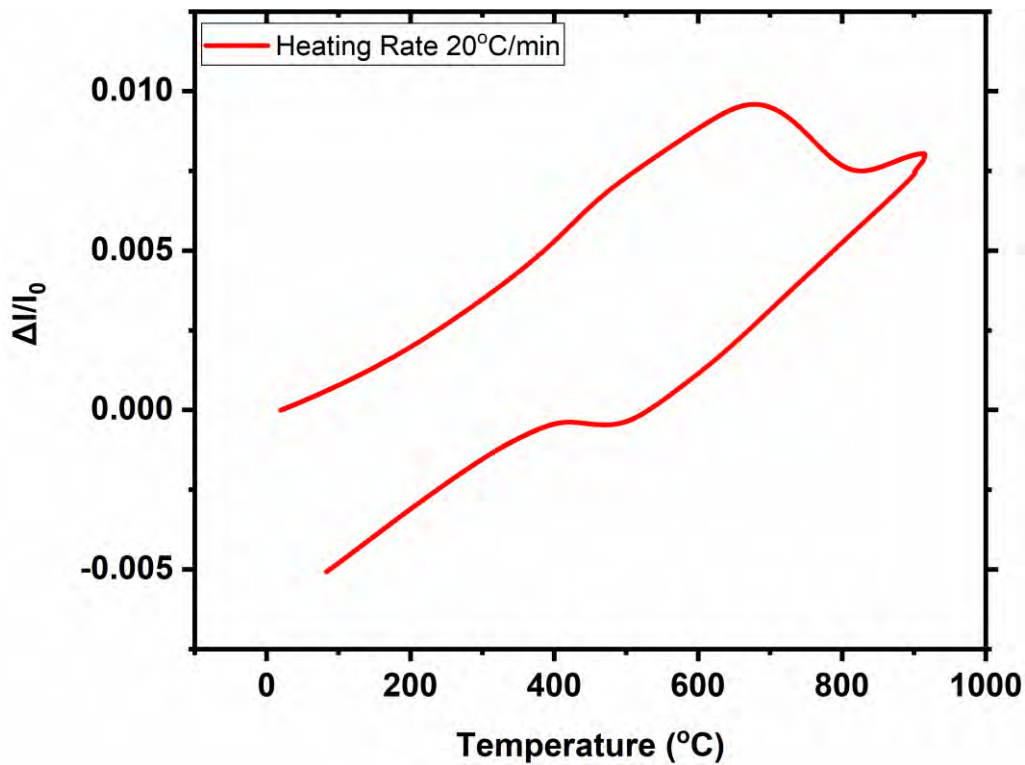


Εικόνα 17. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 min και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min.



Εικόνα 18. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 min και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min..

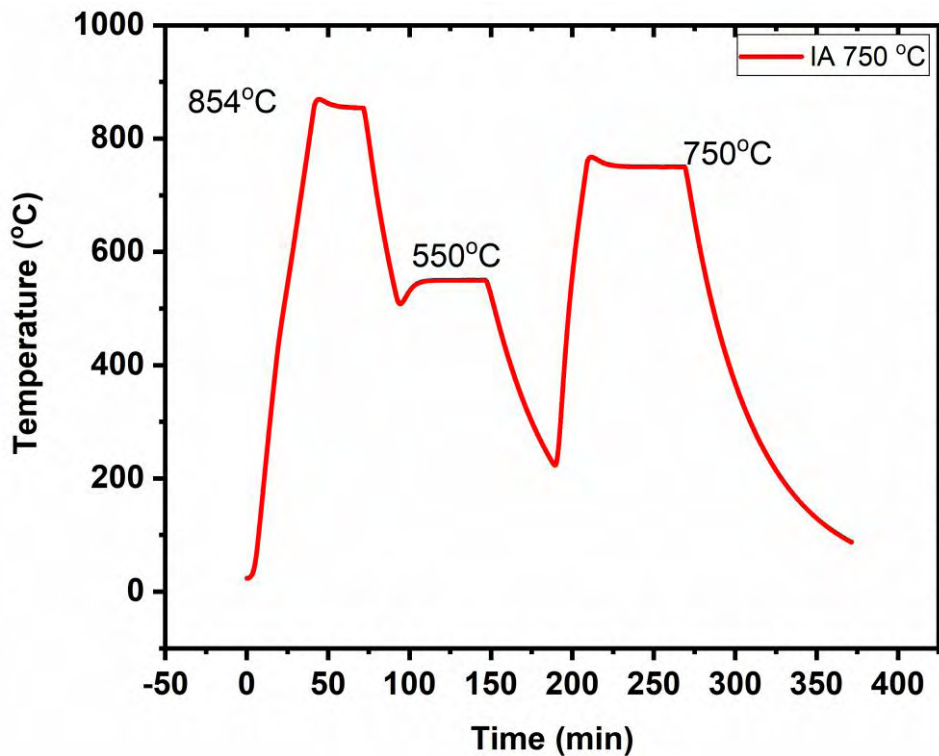




Εικόνα 19. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 30 min και έπειτα ψύξη μέχρι περίπου τους 100 °C με ρυθμό θέρμανσης/ψύξης 20 °C/min..

Στις Εικόνες 20,21 και 22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του πειράματος 5 όπου έγινε η εξής θερμική κατεργασία του χάλυβα DP-1000. Αρχικά θερμάνθηκε στους 854 °C και έμεινε στην εν λόγω θερμοκρασία για 30 min, έπειτα ψύχθηκε μέχρι τους 550 °C και έμεινε στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 hr και τέλος αφού ψύχθηκε περαιτέρω μέχρι τους 200 °C θερμάνθηκε ξανά μέχρι τους 750 °C για 1 hr. Όλες οι διεργασίες έγιναν με ρυθμό 20 °C/min.

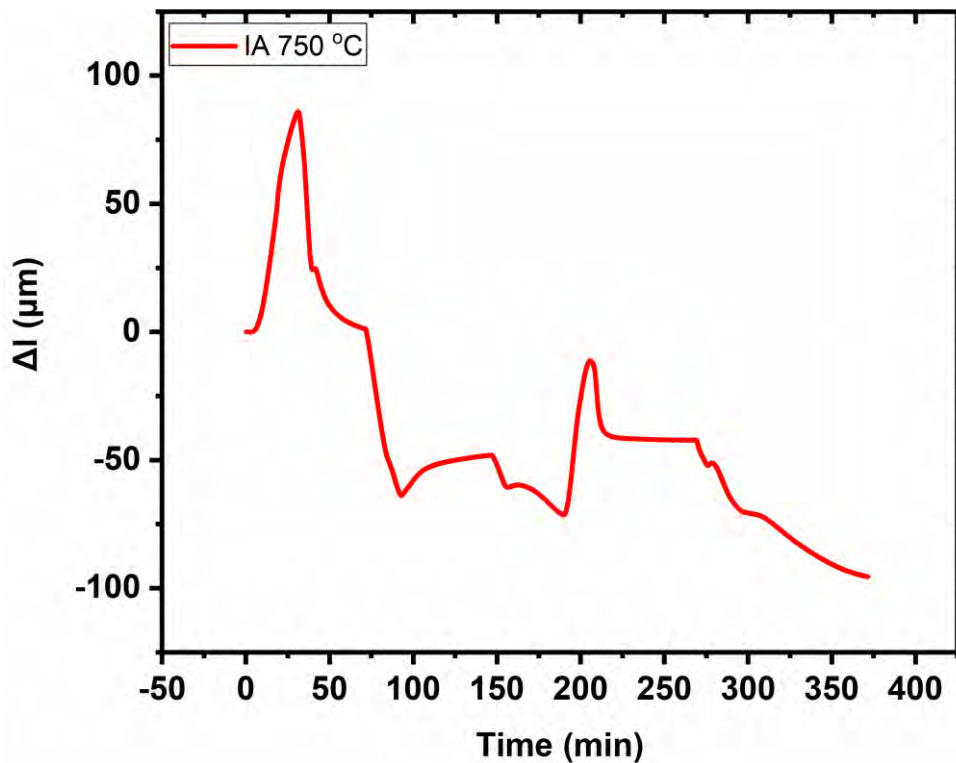
Αναλυτικότερα στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί όλη η παραπάνω θερμική κατεργασία και πως μεταβλήθηκε η θερμοκρασία.



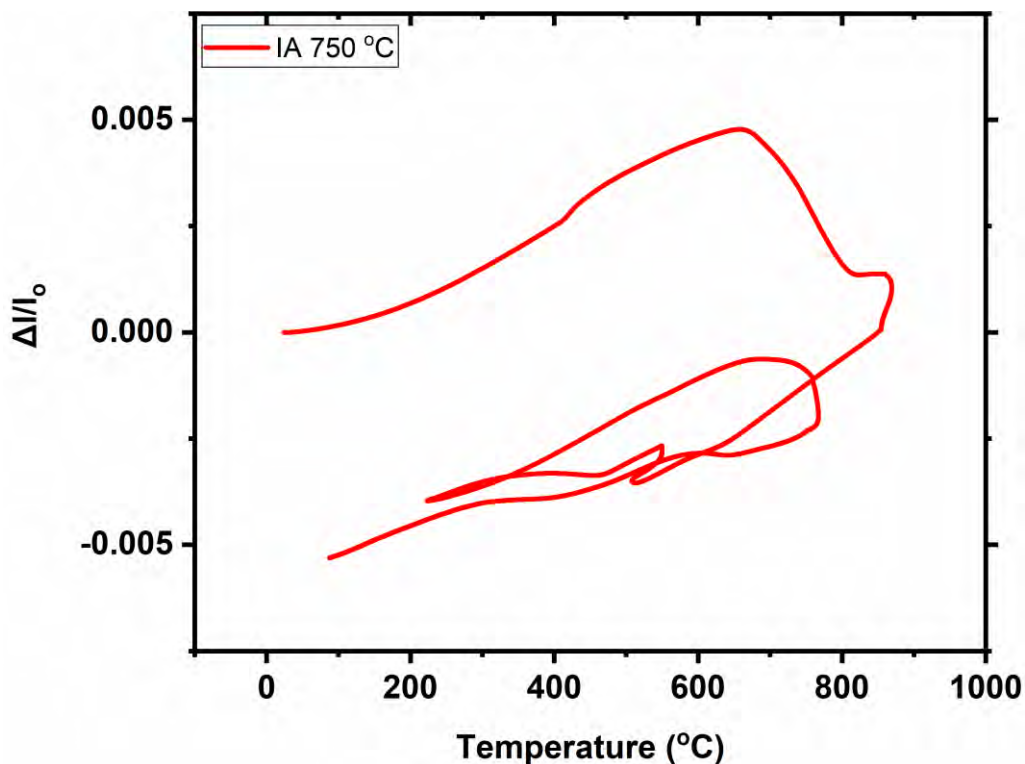
Εικόνα 20. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 750 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min. .

Στην Εικόνα 21 φαίνεται η μεταβολή του μήκους του υλικού (διαστολή-συστολή) με το πέρασμα του χρόνου κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του πειράματος 5.

Η Εικόνα 22 απεικονίζει τη διαστολή και συστολή του υλικού κατά την θερμική κατεργασία με τον άξονα y να δείχνει αυτή την μεταβολή του υλικού (σε μm) και τον άξονα x την θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα.



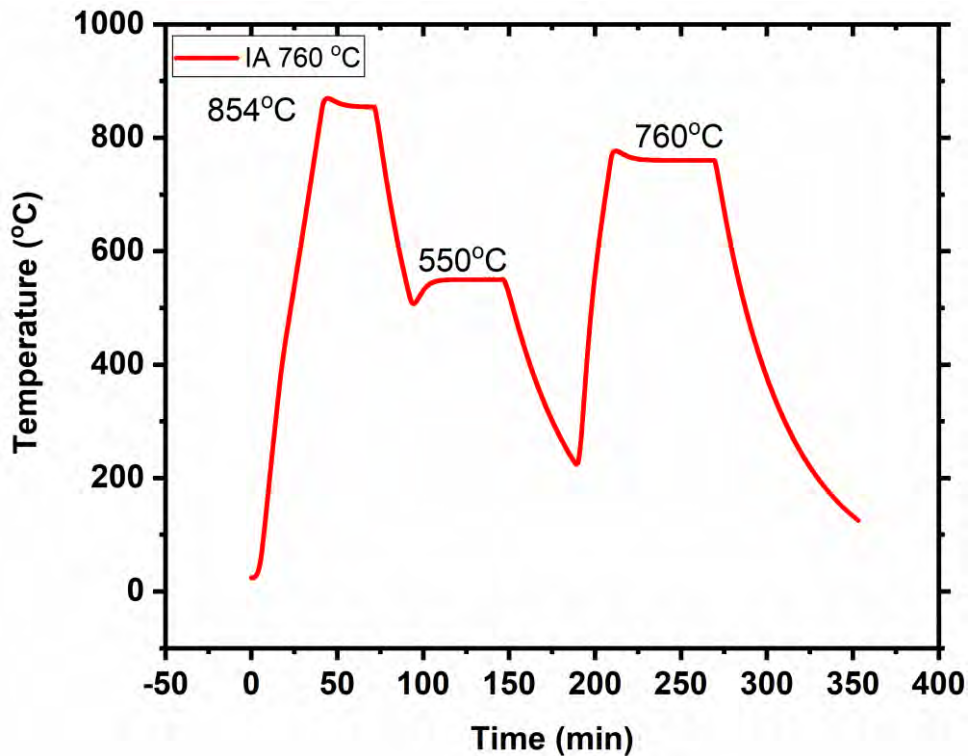
Εικόνα 21. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση εώς τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου εώς τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 750 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min..



Εικόνα 22. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση εώς τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου εώς τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 750 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min..

Στις Εικόνες 23,24 και 25 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του πειράματος 6 όπου έγινε η εξής θερμική κατεργασία του χάλυβα DP-1000. Αρχικά θερμάνθηκε στους 854 °C και έμεινε στην εν λόγω θερμοκρασία για 30 min, έπειτα ψύχθηκε μέχρι τους 550 °C και έμεινε στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 hr και τέλος αφού ψύχθηκε περαιτέρω μέχρι τους 200 °C θερμάνθηκε ξανά μέχρι τους 760 °C για 1 hr. Όλες οι διεργασίες έγιναν με ρυθμό 20 °C/min.

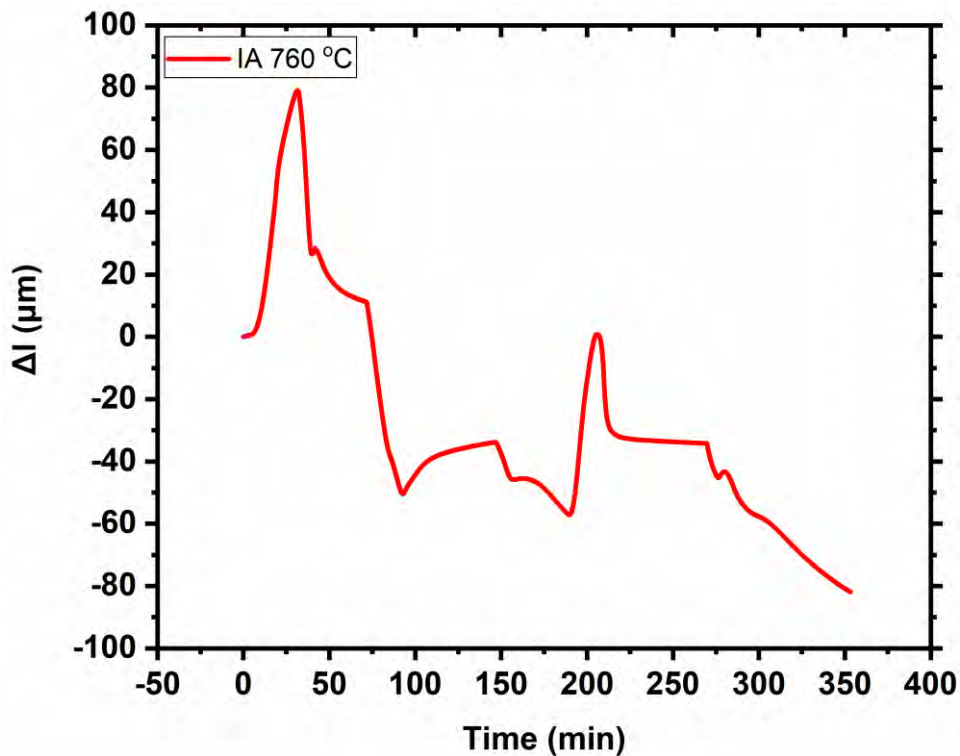
Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί όλη η παραπάνω θερμική κατεργασία σε σχέση με την θερμοκρασία.



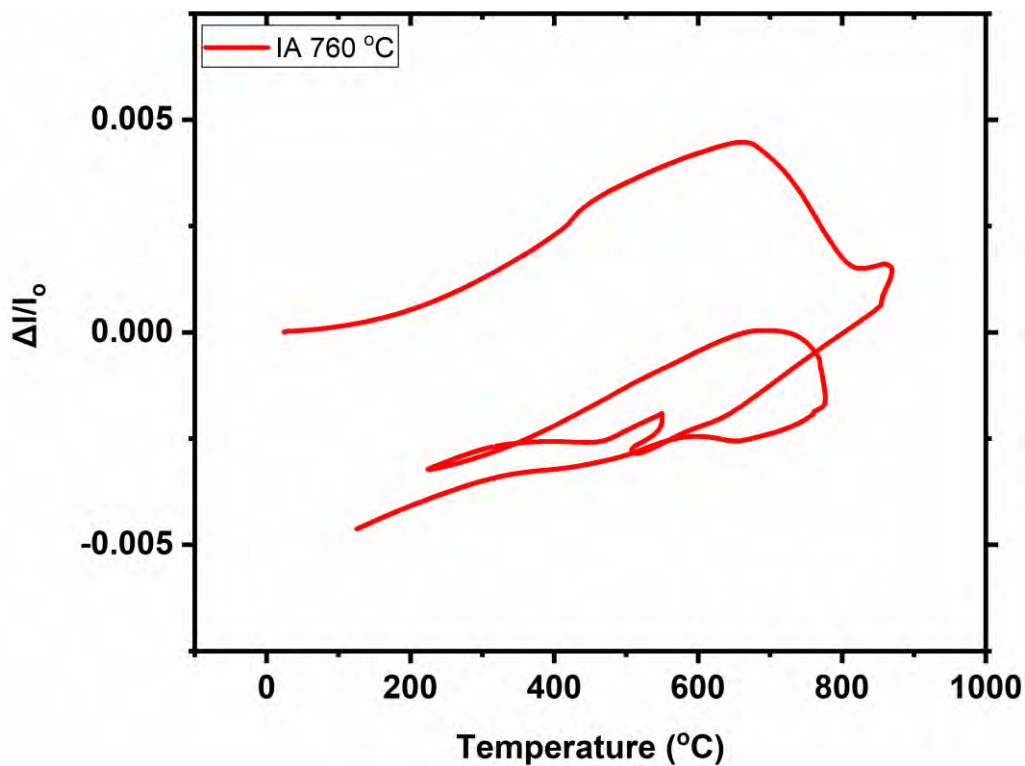
Εικόνα 23. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 760 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min..

Στην Εικόνα 24 απεικονίζεται η μεταβολή του υλικού (διαστολή-συστολή) με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του πειράματος 6.

Στην Εικόνα 25 απεικονίζεται το πώς διαστέλλεται και συστέλλεται το δοκίμιο κατά την θερμική κατεργασία καθώς ο κάθετος άξονας δείχνει αυτή την μεταβολή του υλικού (σε μm) και ο οριζόντιος άξονας την θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα.



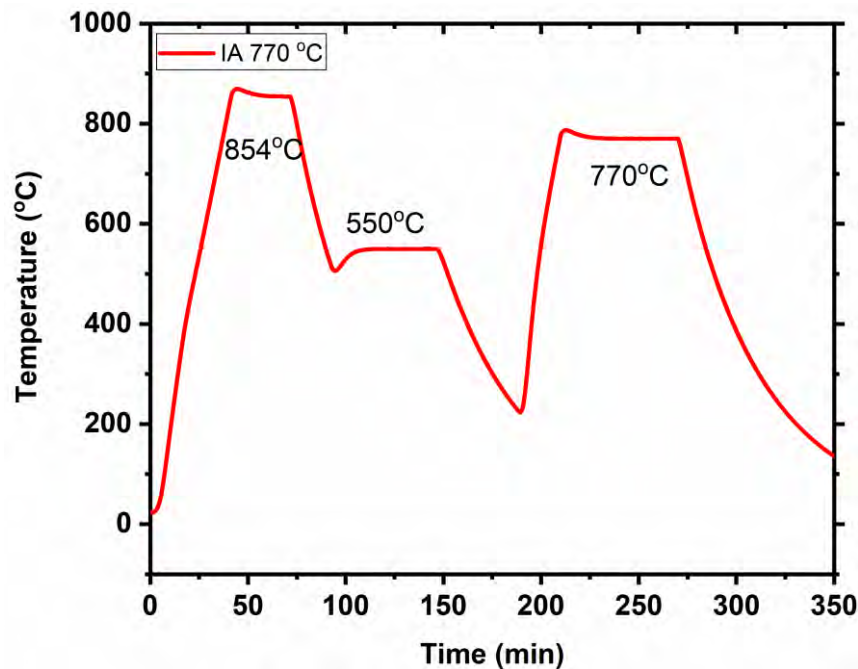
Εικόνα 24. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 760 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min.



Εικόνα 25. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 760 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min.

Στις Εικόνες 26,27 και 28 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του πειράματος 7 όπου έγινε η εξής θερμική κατεργασία του χάλυβα DP-1000. Αρχικά θερμάνθηκε στους 854 °C και έμεινε στην εν λόγω θερμοκρασία για 30 min, έπειτα ψύχθηκε μέχρι τους 550 °C και έμεινε στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 hr και τέλος αφού ψύχθηκε περαιτέρω μέχρι τους 200 °C θερμάνθηκε ξανά μέχρι τους 770 °C για 1 hr. Όλες οι διεργασίες έγιναν με ρυθμό 20 °C/min.

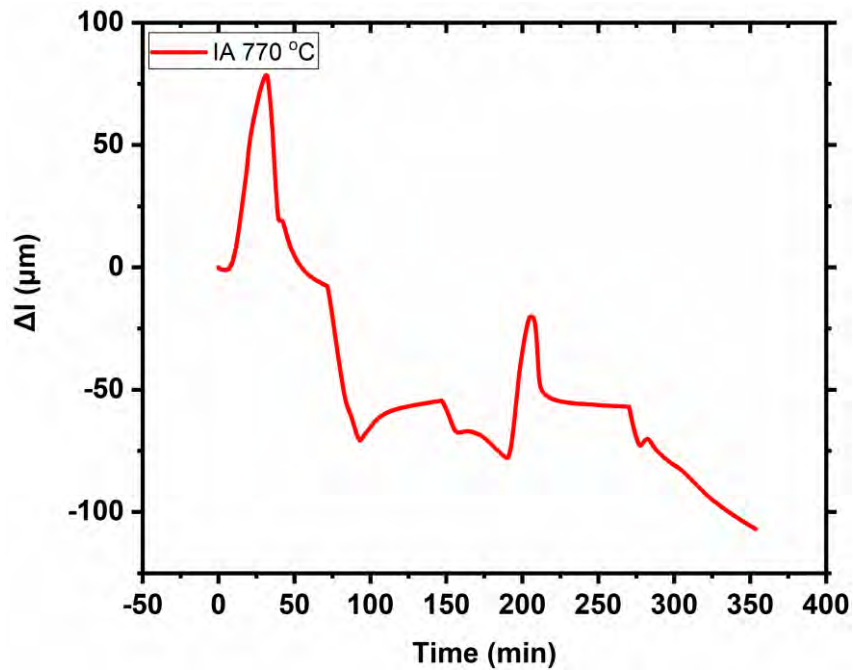
Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί όλη η παραπάνω θερμική διεργασία και η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τον χρόνο.



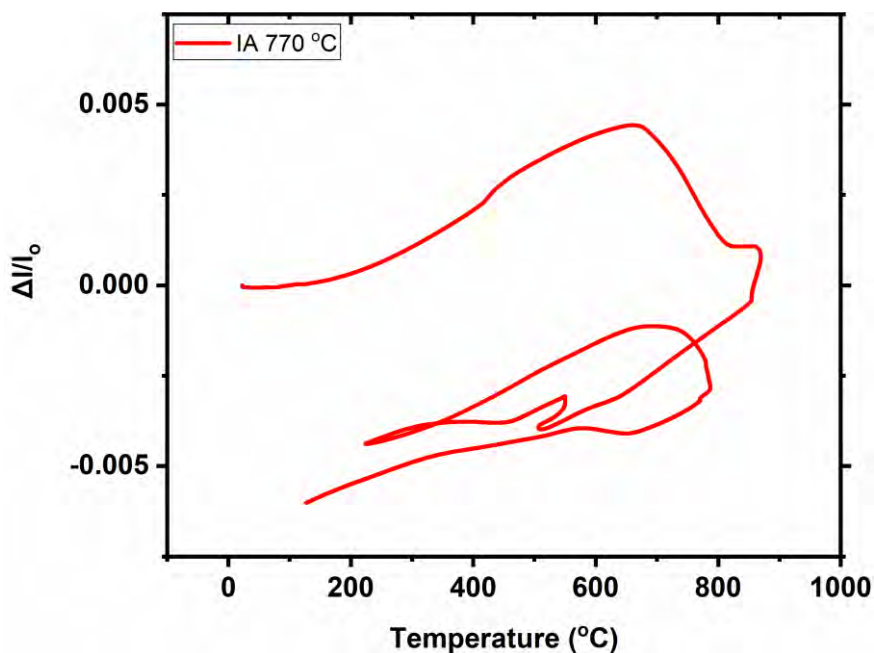
Εικόνα 26. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 770 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20 °C/min.

Η Εικόνα 27 δείχνει τη διαστολή-συστολή του χάλυβα DP-1000 με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του πειράματος 7.

Η Εικόνα 28 παρουσιάζει το πώς διαστέλλεται και συστέλλεται το δοκίμιο κατά την θερμική κατεργασία με τον άξονα y να δείχνει αυτή την μεταβολή του υλικού (σε μm) και στον άξονα x να φαίνεται η θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα.



Εικόνα 27. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 770 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20 °C/min.

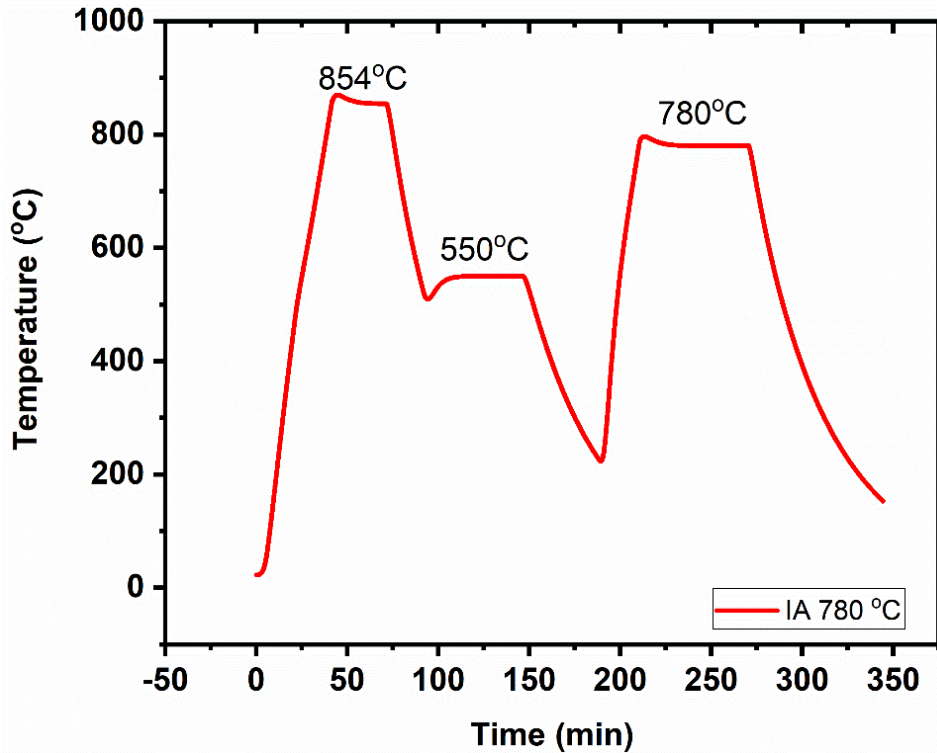


Εικόνα 28. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 770 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20 °C/min.

Στις Εικόνες 29, 30 και 31 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του πειράματος 8 όπου έγινε η εξής θερμική κατεργασία του χάλυβα DP-1000. Αρχικά θερμάνθηκε στους 854 °C και έμεινε στην εν λόγω θερμοκρασία για 30 min, έπειτα ψύχθηκε μέχρι τους 550 °C και έμεινε στη

συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 hr και τέλος αφού ψύχθηκε περαιτέρω μέχρι τους 200 °C θερμάνθηκε ξανά μέχρι τους 780 °C για 1 hr. Όλες οι διεργασίες έγιναν με ρυθμό 20 °C/min.

Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 29 απεικονίζεται ο χρόνος που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί η παραπάνω θερμική κατεργασία και η μεταβολή της θερμοκρασίας.

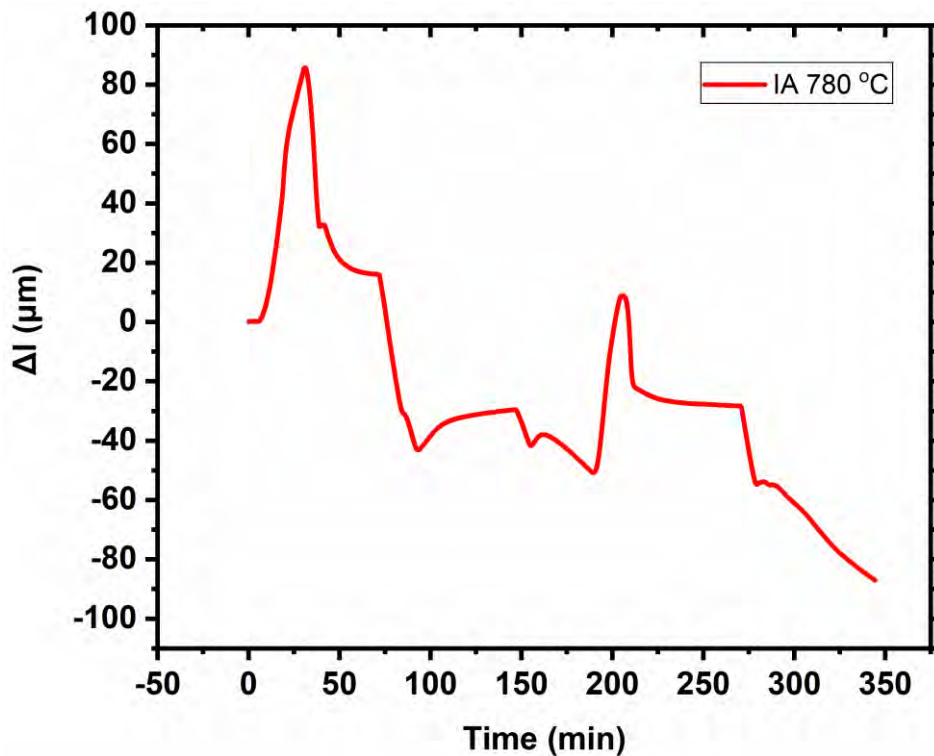


Εικόνα 29. Καμπύλη μεταβολής θερμοκρασίας-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 780 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min.

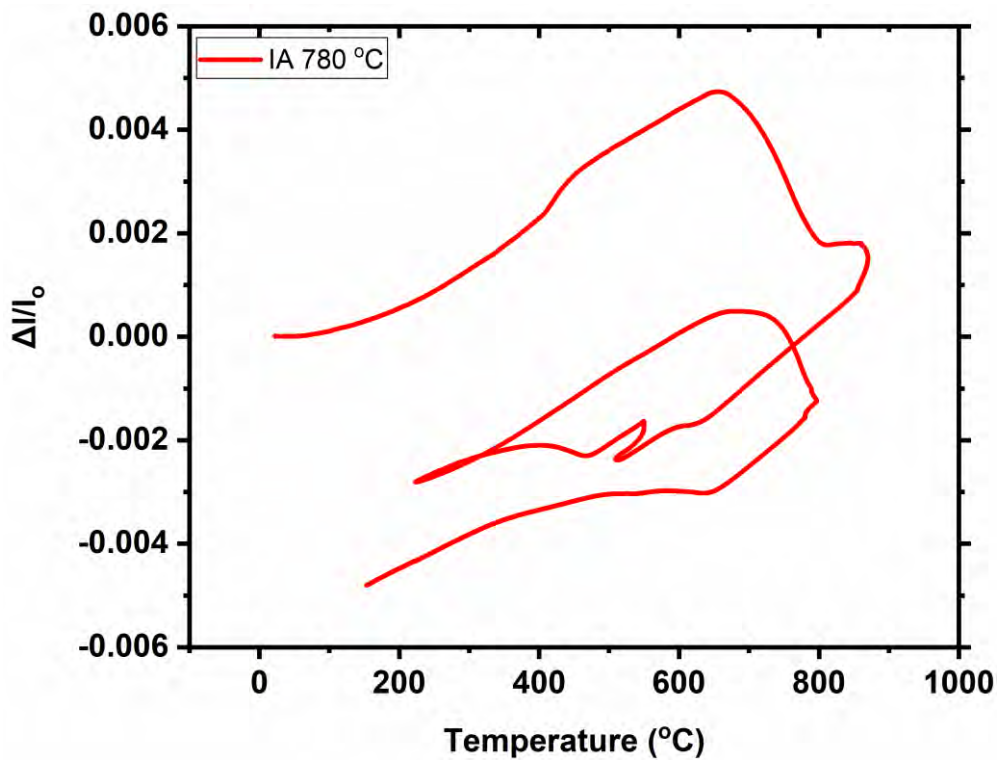
Στην Εικόνα 30 απεικονίζεται η μεταβολή του δοκιμίου (διαστολή-συστολή) με την πάροδο του χρόνου κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του πειράματος 8.

Στην Εικόνα 31 απεικονίζεται το πώς διαστέλλεται και συστέλλεται το δοκίμιο κατά την θερμική κατεργασία καθώς ο άξονας y δείχνει την μεταβολή του υλικού (σε μm) σε συνάρτηση με τον άξονα x όπου φαίνεται η θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε.





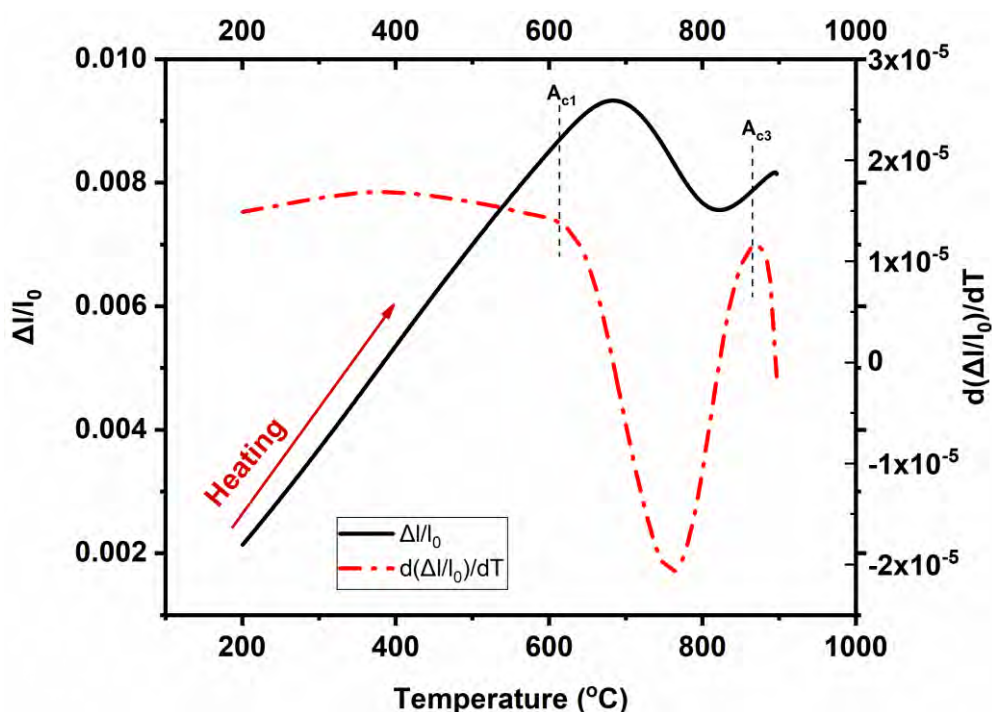
Εικόνα 30. Καμπύλη μεταβολής μήκους-χρόνου του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 780 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min.



Εικόνα 31. Καμπύλη μεταβολής μήκους-θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 854 °C, διατήρηση σε αυτή τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, έπειτα ψύξη έως τους 550 °C, διατήρηση στη συγκεκριμένη θερμοκρασία για 1 ώρα ψύξη περίπου έως τους 200 °C και θέρμανση μέχρι τους 780 °C παραμένοντας για 1 ώρα και τελικά ψύξη με ρυθμό 20°C/min.

#### 4.1.2 Ανάλυση Διαστολομετρικών Αποτελεσμάτων – Κρισιμες Θερμοκρασίες Μετασχηματισμου

Στη παρούσα εργασία οι κρίσιμες θερμοκρασίες μετασχηματισμού  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$  προσδιορίστηκαν με βάση την ανάλυση της διαστολομετρικής καμπύλης. Πιο συγκεκριμένα προσδιορίστηκε η αλλαγή μήκους ( $\Delta l/l_0$ ) σε σχέση με τη θερμοκρασία και η πρώτη παράγωγος της ( $d(\Delta l/l_0)/dT$ ). Η θερμοκρασία  $A_{c1}$  είναι η θερμοκρασία έναρξης του ωστενιτικού μετασχηματισμού και η θερμοκρασία  $A_{c3}$  είναι η θερμοκρασία λήξης του ωστενιτικού μετασχηματισμού. Στην Εικόνα 33 παρουσιάζονται η καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό θέρμανσης 20 °C/min και με κόκκινη γραμμή αποικίζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ .

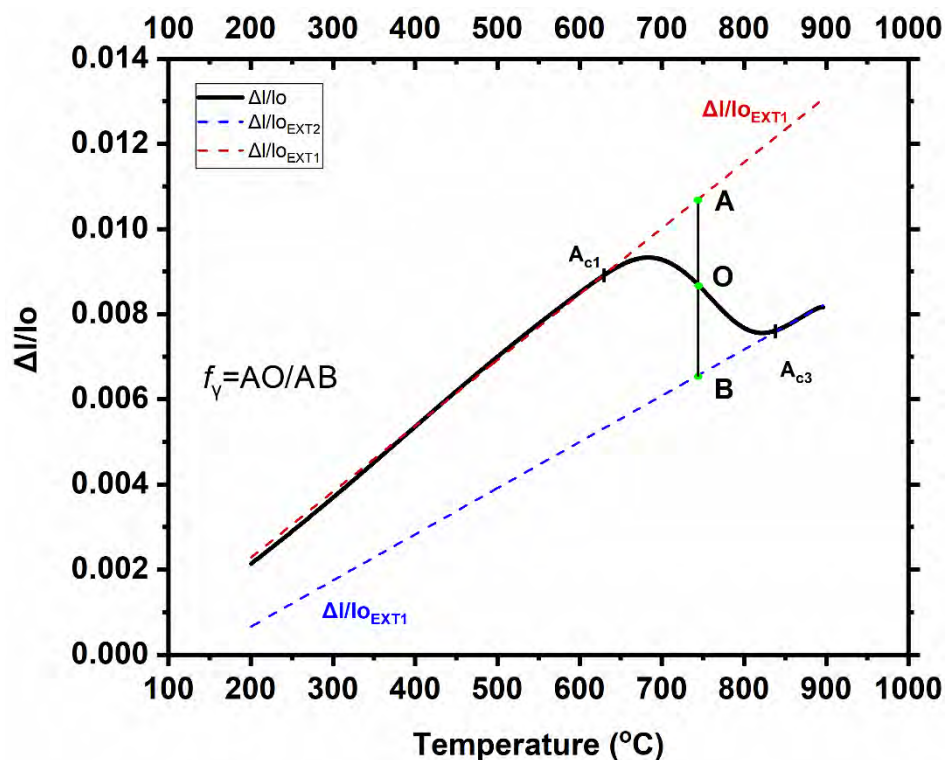


Εικόνα 32. Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ .

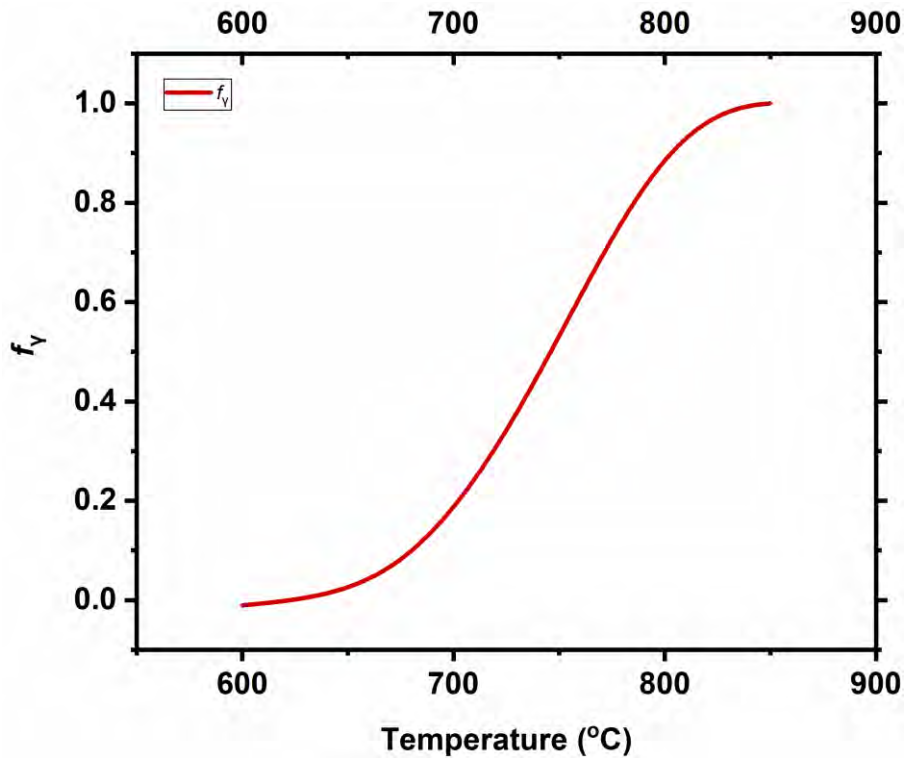
Για τον υπολογισμό του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) που δημιουργείτε κατά τη διάρκεια της συνεχούς θέρμανσης του κράματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προέκτασης γραμμής και η εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Lever rule). Ο κανόνας του μοχλού επιτρέπει την αξιολόγηση των σχετικών μεταβολών στον όγκο του ωστενίτη ως προς τη θερμοκρασία και το χρόνο. Έτσι, το σχετικό κλάσμα όγκου του ωστενίτη που σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ή συγκράτησης (holding) σε μια διακριτή θερμοκρασία υπολογίστηκε με την αναλογία της γραμμής τμήματα AO / AB (Εικόνα 33). Τα σημεία A και B είναι τα σημεία διασταύρωσης της θερμοκρασίας με τα γραμμικά τμήματα της διαστολής. Το σημείο O αντιπροσωπεύει το σημείο διασταύρωσης της θερμοκρασίας με το μη γραμμικό τμήμα της της καμπύλης διαστολής.

Στην Εικόνα 33 γίνεται παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_0$  -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min.

Οι σχετικές μεταβολές στην ποσότητα του ωστενίτη υπολογίσθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 33 (AO / AB) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης. Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 33). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 34, οι αλλαγές στον κλάσμα όγκου του ωστενίτη ακολουθούν μια τυπική καμπύλη S.



Εικόνα 33. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_0$  -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min. Το γράφημα είναι αντίστοιχο αυτού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.

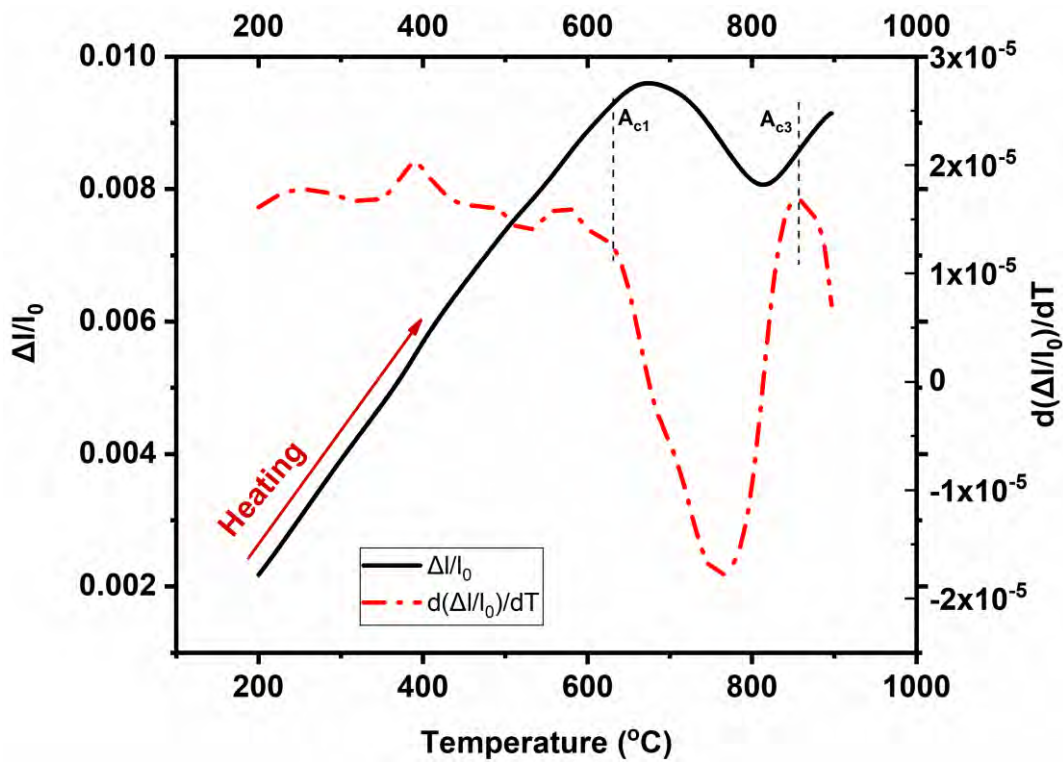


Εικόνα 34. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 53). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 20 °C/min.

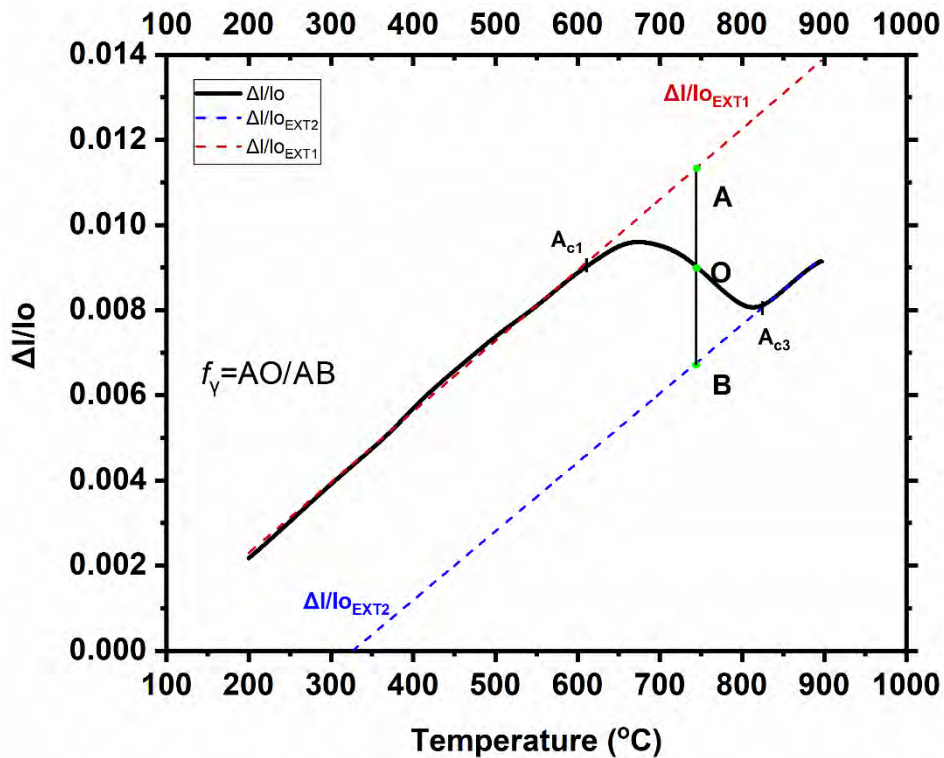
Στην Εικόνα 35 παρουσιάζονται η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας για θέρμανση έως τους 900 °C (μαυρή γραμμή), με ρυθμό θέρμανσης 10 °C/min και με κόκκινη γραμμή αποικίζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ .

Στην Εικόνα 36 γίνεται παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$  και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min.

Οι σχετικές μεταβολές στην ποσότητα του ωστενίτη υπολογίσθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36 (AO / AB) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης. Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 37). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min. Όπως φαίνεται στην, οι αλλαγές στον κλάσμα όγκου του ωστενίτη ακολουθούν μια τυπική καμπύλη S.

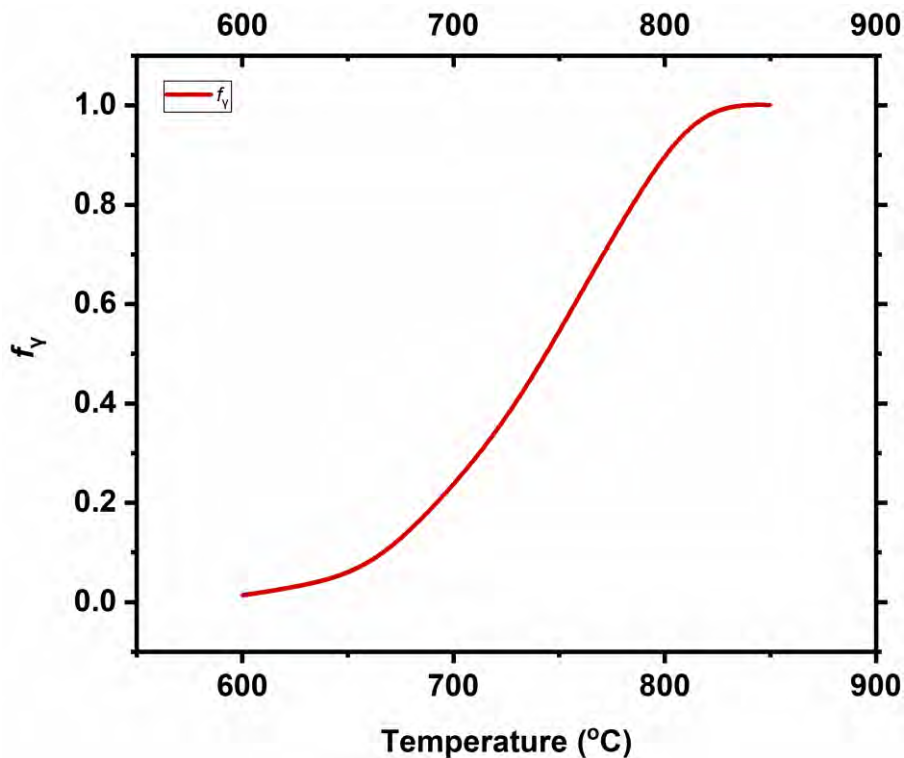


Εικόνα 35. Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ .



Εικόνα 36. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_Y$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του

πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min. Το γράφημα είναι αντίστοιχο αυτού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.

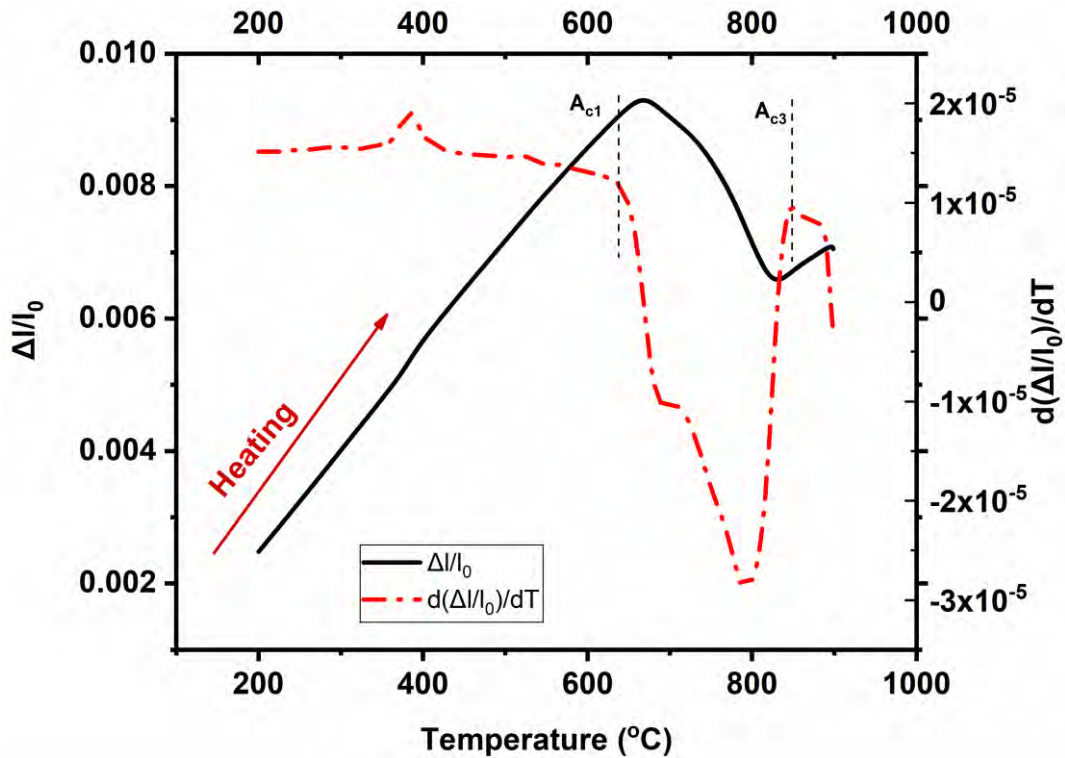


Εικόνα 37. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 36). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min.

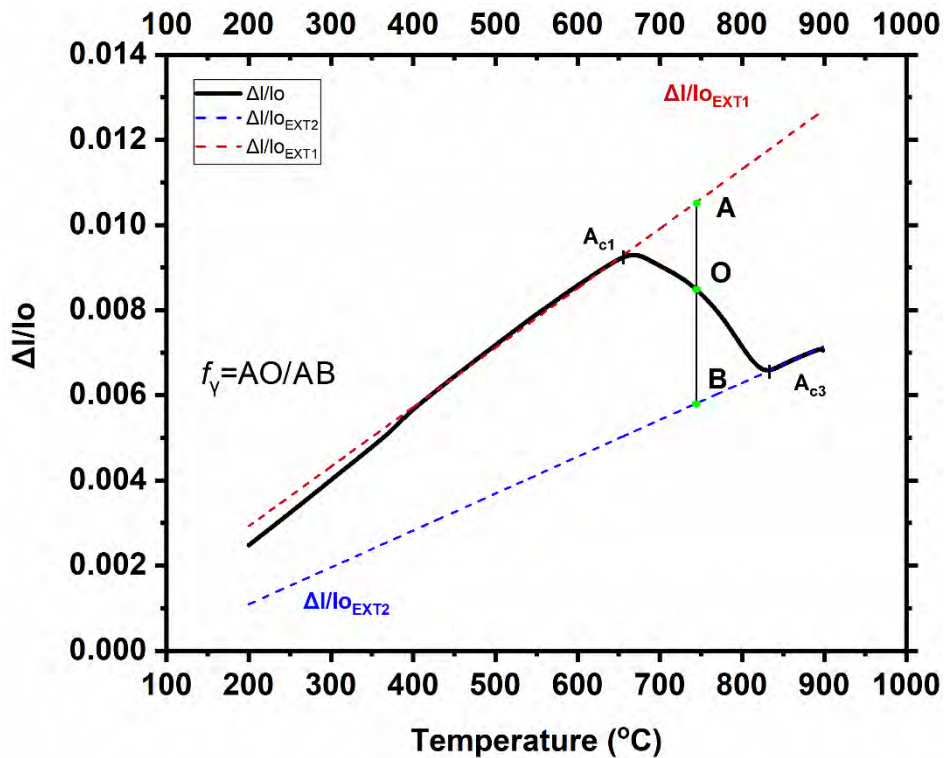
Στην Εικόνα 38 παρουσιάζονται η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_0$ -θερμοκρασίας για θέρμανση έως τους 900 °C (μαυρή γραμμή), με ρυθμό θέρμανσης 5 °C/min και με κόκκινη γραμμή αποικίζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ .

Στην Εικόνα 39 γίνεται παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$  και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_0$  -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 5 °C/min.

Οι σχετικές μεταβολές στην ποσότητα του ωστενίτη υπολογίσθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39 (AO / AB) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης. Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 40). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 10 °C/min. Όπως φαίνεται στην, οι αλλαγές στον κλάσμα όγκου του ωστενίτη ακολουθούν μια τυπική καμπύλη S.

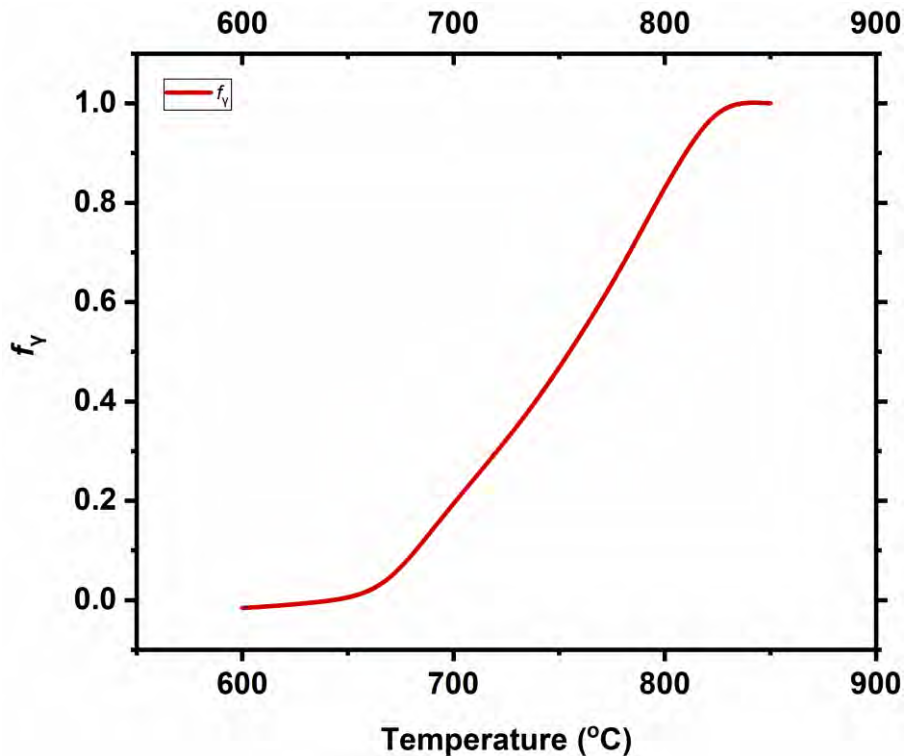


Εικόνα 38. Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$ -θερμοκρασίας του πειράματος για θέρμανση έως τους  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , με ρυθμό  $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ . Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η 1<sup>η</sup> παράγωγος της καμπύλης. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ .



Εικόνα 39. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ . Καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του

πειράματος για θέρμανση έως τους 900 °C, με ρυθμό 5 °C/min. Το γράφημα είναι αντίστοιχο αυτού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 40. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του κράματος DP1000, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 39). Μέγιστη θερμοκρασία 900 °C, με ρυθμό 5 °C/min.

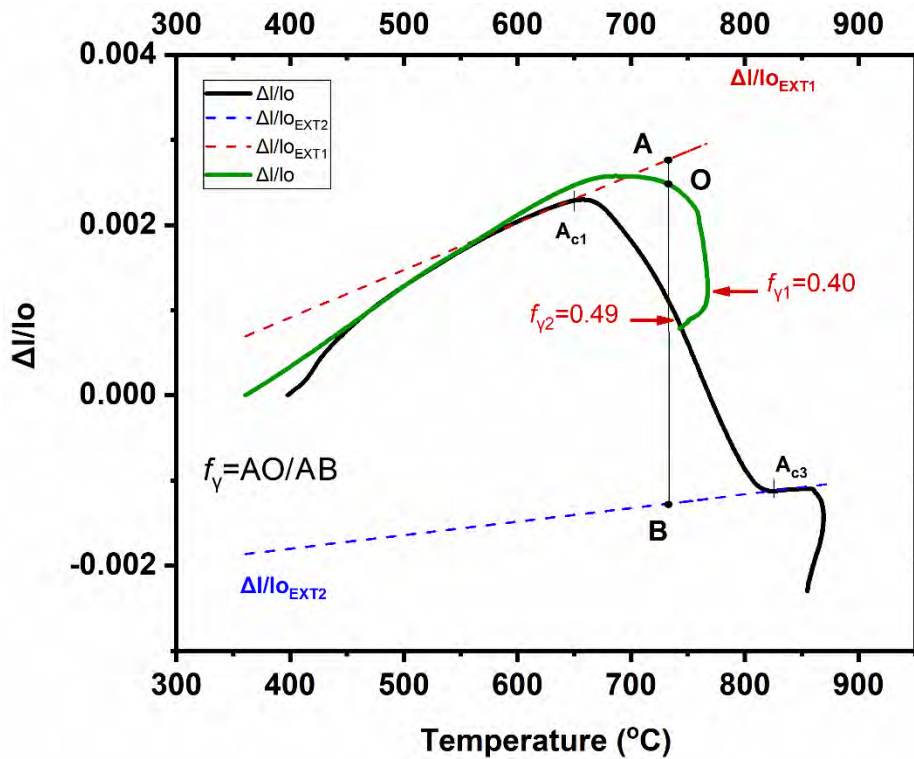
Για τον υπολογισμό του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) που δημιουργείτε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης του χάλυβα DP1000 χρησιμοποιήθηκε ξανά η μέθοδος προέκτασης γραμμής και ο κανόνας του μοχλού (Lever rule). Στην Εικόνα 41 παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης (IA) του κράματος στους 750 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Η καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση απεικονίζεται με μαύρη γραμμή και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτωση με πράσινη γραμμή. Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 22.

Το σχετικό κλάσμα όγκου του ωστενίτη που σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης (holding) σε μια διακριτή θερμοκρασία υπολογίστηκε με την αναλογία της γραμμής τμήματα AO / AB (Εικόνα 41). Τα σημεία A και B είναι τα σημεία διασταύρωσης της θερμοκρασίας με τα γραμμικά τμήματα της διαστολής για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή). Το σημείο O αντιπροσωπεύει το σημείο διασταύρωσης της θερμοκρασίας με το μη γραμμικό τμήμα της της καμπύλης διαστολής της ενδοκρίσιμης ανόπτωσης (πράσινη γραμμή).

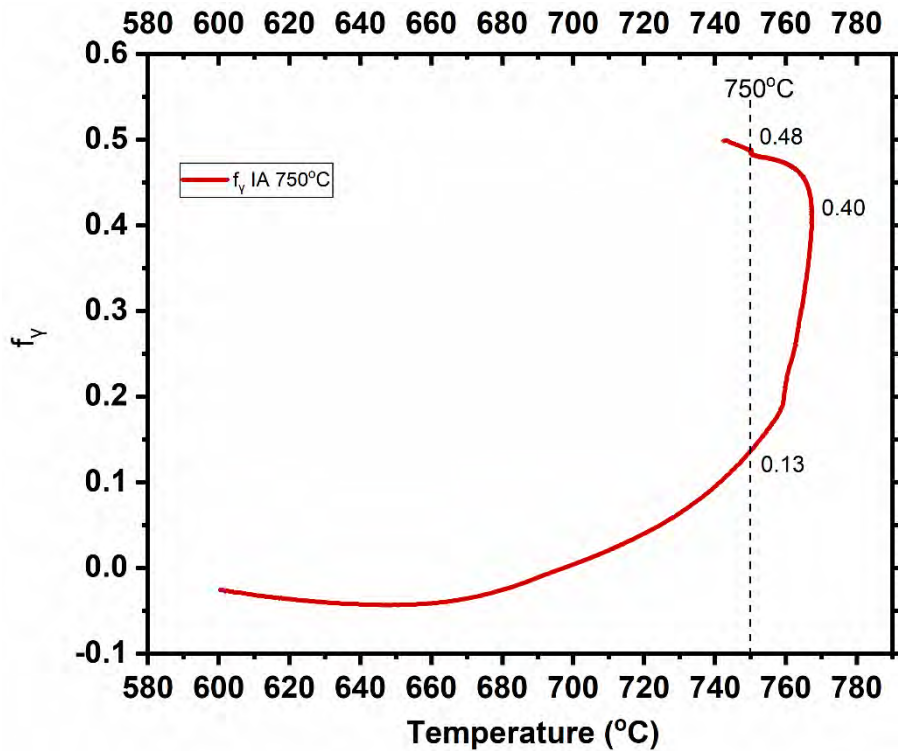
Οι σχετικές μεταβολές στην ποσότητα του ωστενίτη υπολογίσθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 41 (AO / AB) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης. Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της



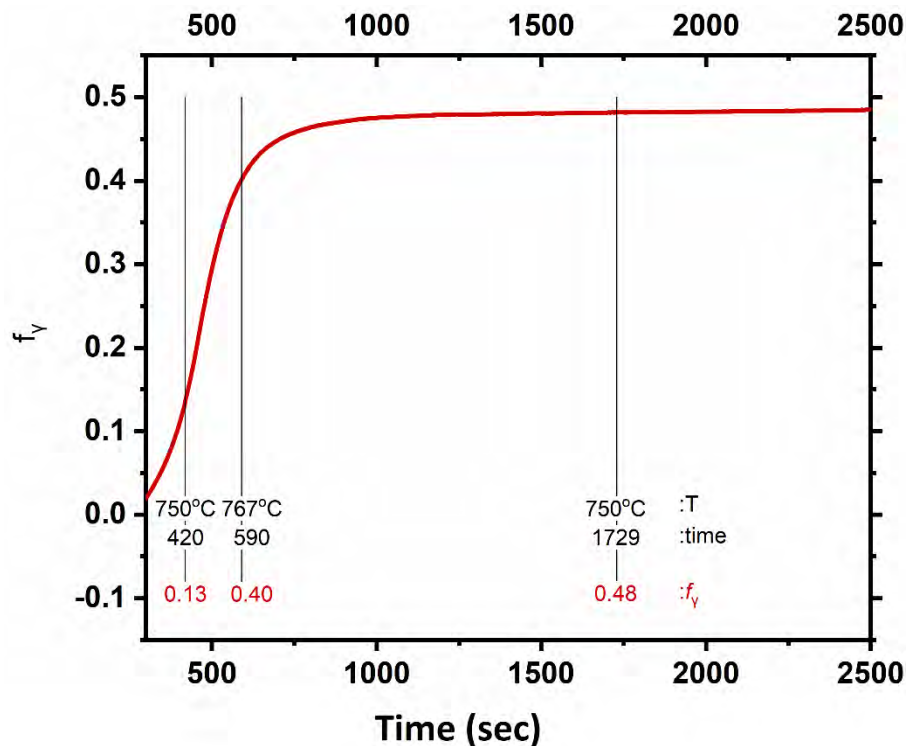
ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τη θερμοκρασία. Ενώ στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τον χρόνο. Η καμπύλη ακολουθεί μια τυπική μορφή καμπύλης S.



Εικόνα 41. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 750 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta l/l_0$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 22.



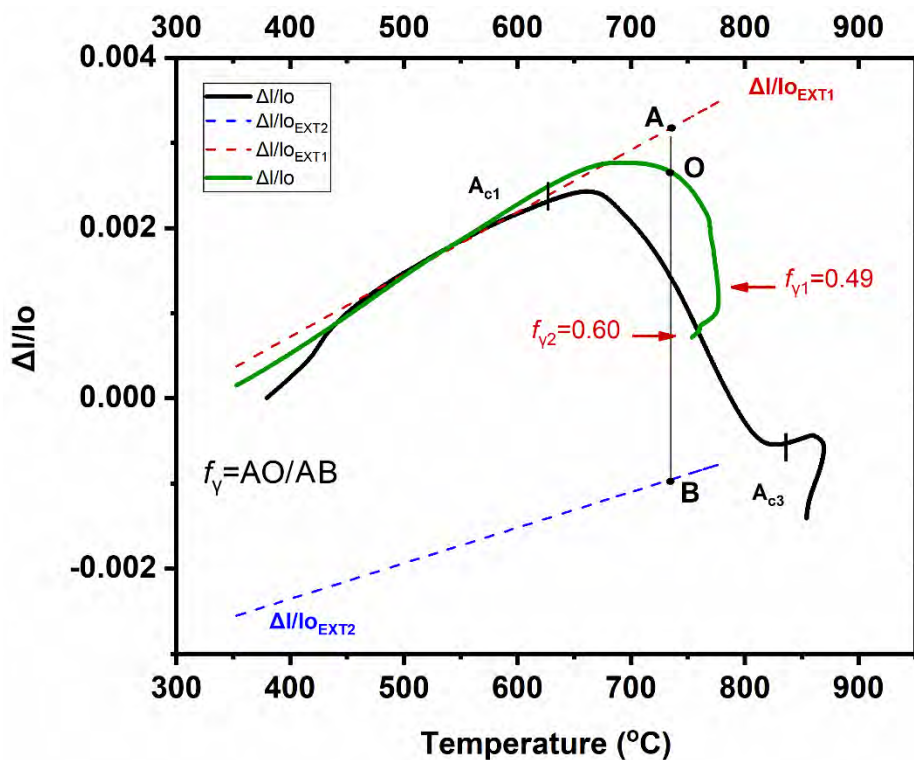
Εικόνα 42. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους  $750^{\circ}\text{C}$ , με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 41). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .



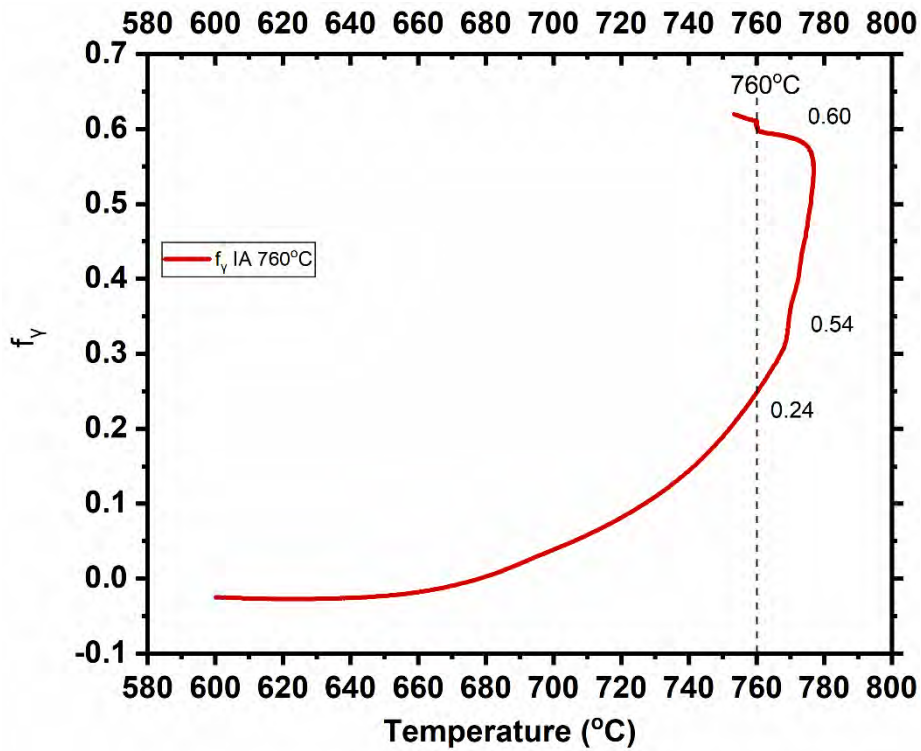
Εικόνα 43. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους  $750^{\circ}\text{C}$ , με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 41). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Στην Εικόνα 44 παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 760 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση απεικονίζεται με μαύρη γραμμή και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση με πράσινη γραμμή. Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min.

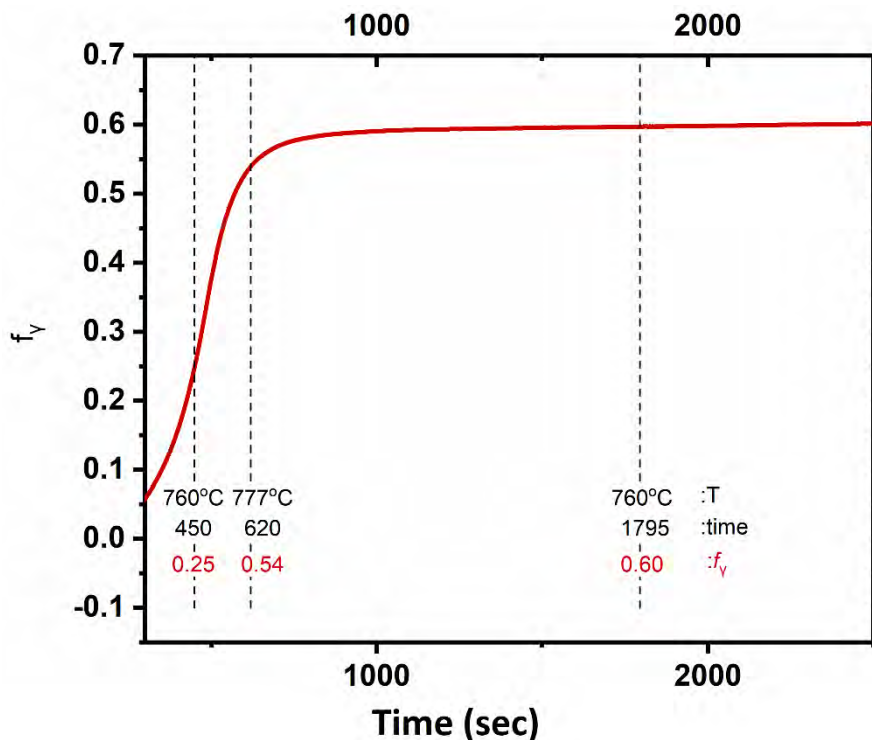
Οι σχετικές μεταβολές στην ποσότητα του ωστενίτη υπολογίσθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 44 ( $AO / AB$ ) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης. Στην Εικόνα 45 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τη θερμοκρασία. Ενώ στην Εικόνα 46 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τον χρόνο. Η καμπύλη ακολουθεί μια τυπική μορφή καμπύλης S.



Εικόνα 44. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 760 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 25.



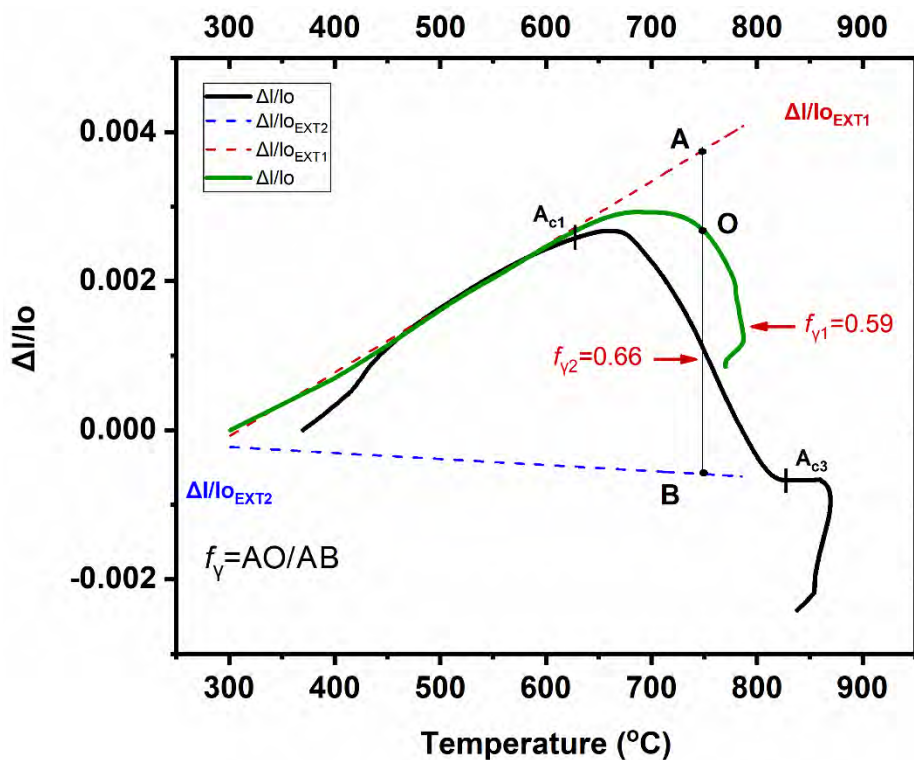
Εικόνα 45. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 760 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 44). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20°C/min.



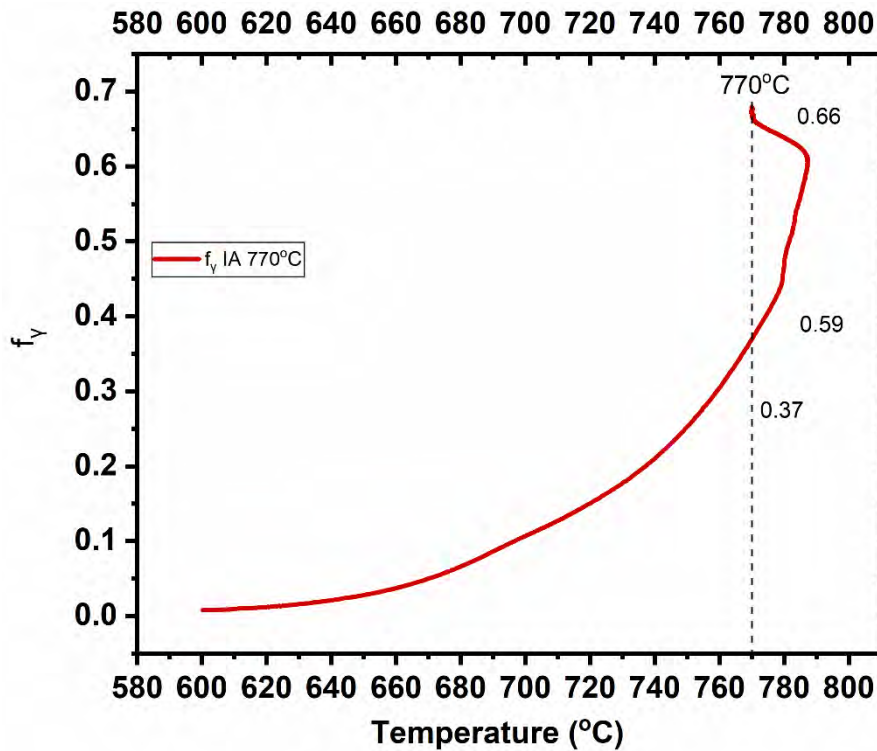
Εικόνα 46. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 760 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 44). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20°C/min.

Στην Εικόνα 47 παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 770 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση απεικονίζεται με μαύρη γραμμή και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση με πράσινη γραμμή. Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min.

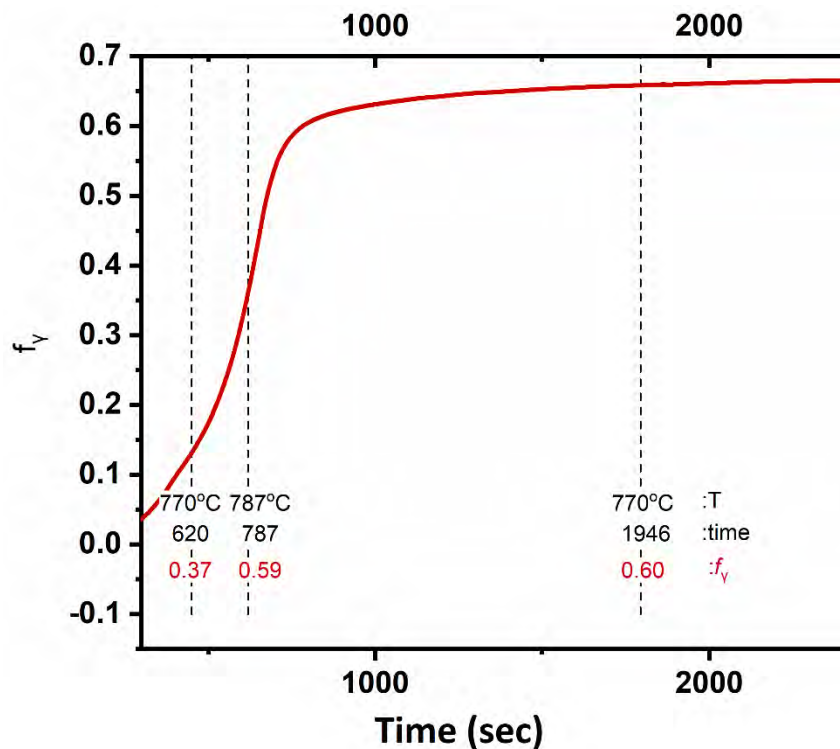
Οι σχετικές μεταβολές στην ποσότητα του ωστενίτη υπολογίσθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 47 (AO / AB) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης. Στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τη θερμοκρασία. Ενώ στην Εικόνα 49 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τον χρόνο. Η καμπύλη ακολουθεί μια τυπική μορφή καμπύλης S.



Εικόνα 47. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 770 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 28.



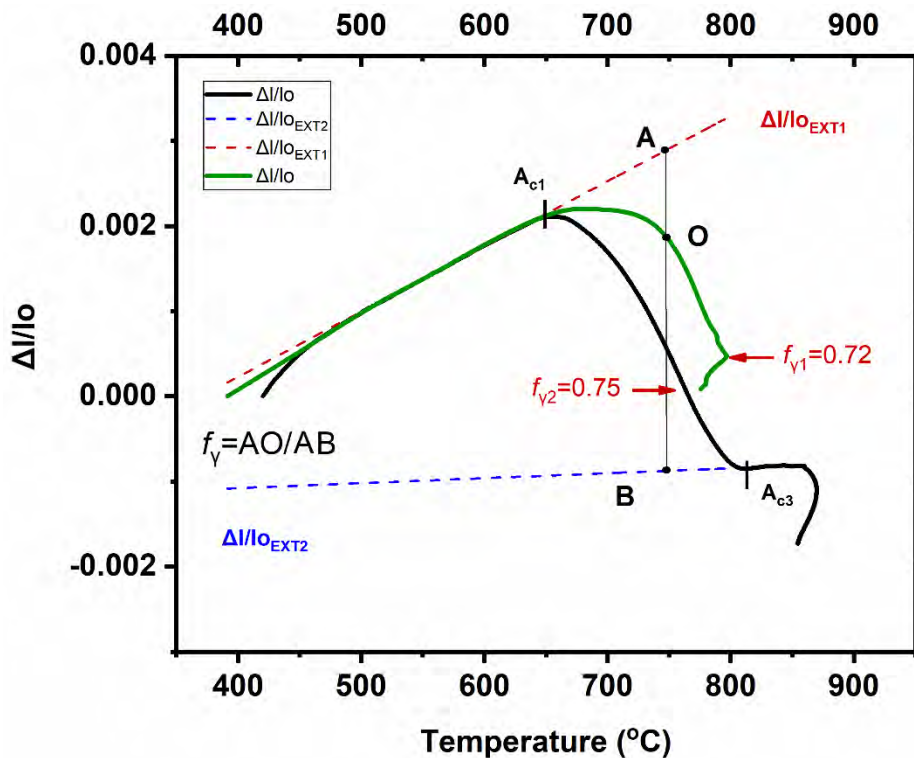
Εικόνα 48. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 770 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 47). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20°C/min.



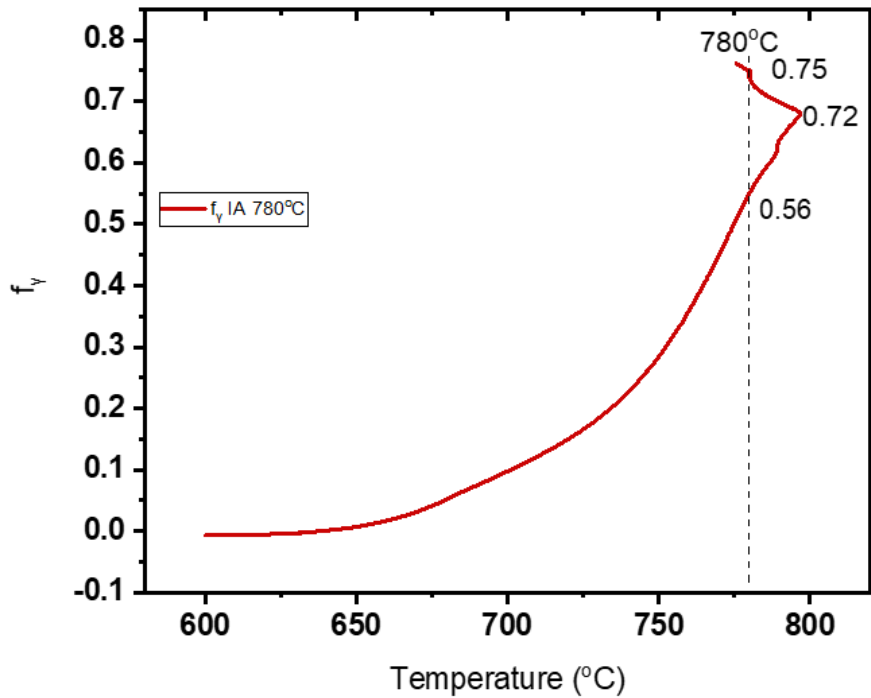
Εικόνα 49. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 770 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 47). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20°C/min.

Στην Εικόνα 50 παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 780 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση απεικονίζεται με μαύρη γραμμή και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση με πράσινη γραμμή. Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min.

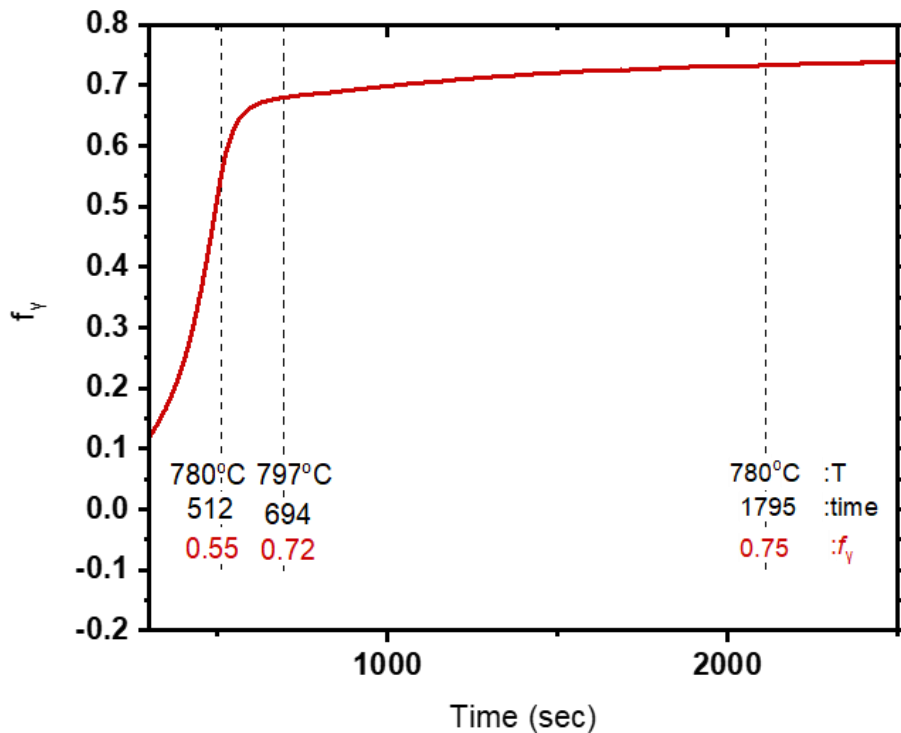
Οι σχετικές μεταβολές στην ποσότητα του ωστενίτη υπολογίσθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 50 (AO/AB) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας θέρμανσης. Στην Εικόνα 51 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τη θερμοκρασία. Ενώ στην Εικόνα 52 παρουσιάζεται το κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ), όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τον χρόνο. Η καμπύλη ακολουθεί μια τυπική μορφή καμπύλης S.



Εικόνα 50. Παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_\gamma$ ) κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 780 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού. Διακρίνονται οι θερμοκρασίες  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ , η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την πλήρη ωστενιτοποίηση (μαύρη γραμμή) και η καμπύλη μεταβολής  $\Delta I/I_o$  -θερμοκρασίας του κράματος για την ενδοκρίσιμη ανόπτηση (πράσινη γραμμή). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min. Το γράφημα προέρχεται από αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 31.



Εικόνα 51. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς την θερμοκρασία, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 780 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 50). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min.

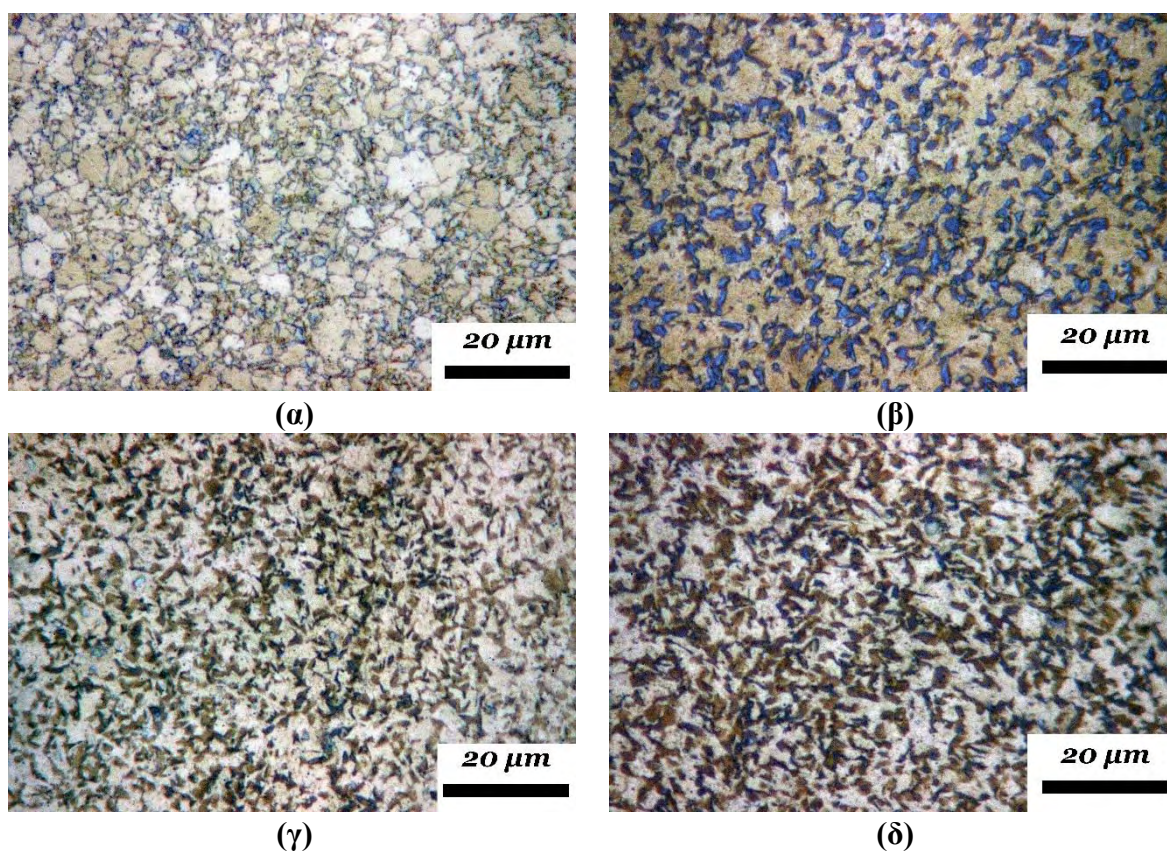


Εικόνα 52. Κλάσμα όγκου του ωστενίτη ( $f_v$ ) ως προς τον χρόνο, όπως υπολογίσθηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης (IA) του κράματος στους 780 °C, με την μέθοδο προέκταση γραμμής και εφαρμογή του κανόνα του μοχλού (Εικόνα 50). Ο ρυθμός θέρμανσης του πειράματος είναι 20 °C/min.



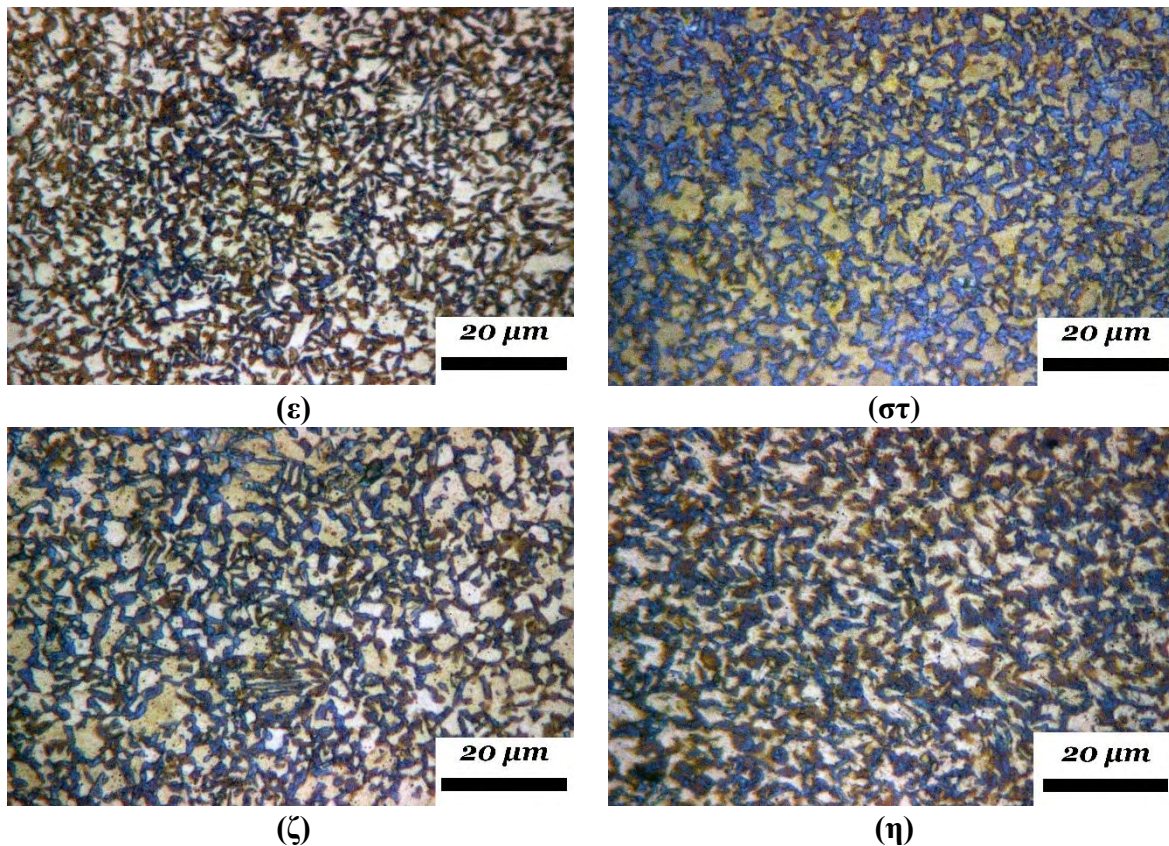
## 4.2 Μεταλλογραφική Ανάλυση

Στην Εικόνα 53α που ακολουθεί, παρουσιάζονται μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση στους 750°C. Ο ρυθμός θέρμανσης από τη θερμοκρασία δωματίου μέχρι και τους 750°C είναι 20°C/min. Στις Εικόνα 53α (α) έως (δ) παρουσιάζονται μεταλλογραφίες για χρόνους έκθεσης στην ενδοκρίσιμη θερμοκρασία 30sec, 1min, 2min, 3min αντίστοιχα. Με λευκό-κίτρινο χρώμα έχουν χρωματισθεί, από τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μεταλλογραφική προετοιμασία, οι κόκκοι του φερρίτη, ενώ με σκούρο καφέ ή μπλε χρώμα έχουν χρωματισθεί οι κόκκοι του ωστενίτη που δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Καθως ο χρόνος έκθεσης στους 750°C αυξάνεται μεγαλώνει και το ποσοστό του ωστενίτη που δημιουργείται.



Εικόνα 53α: Μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση στους 750°C για (α) 30sec, (β) 1min, (γ) 2min, (δ) 3min. Η μεγέθυνση για όλες τις μεταλλογραφίες είναι x1000.

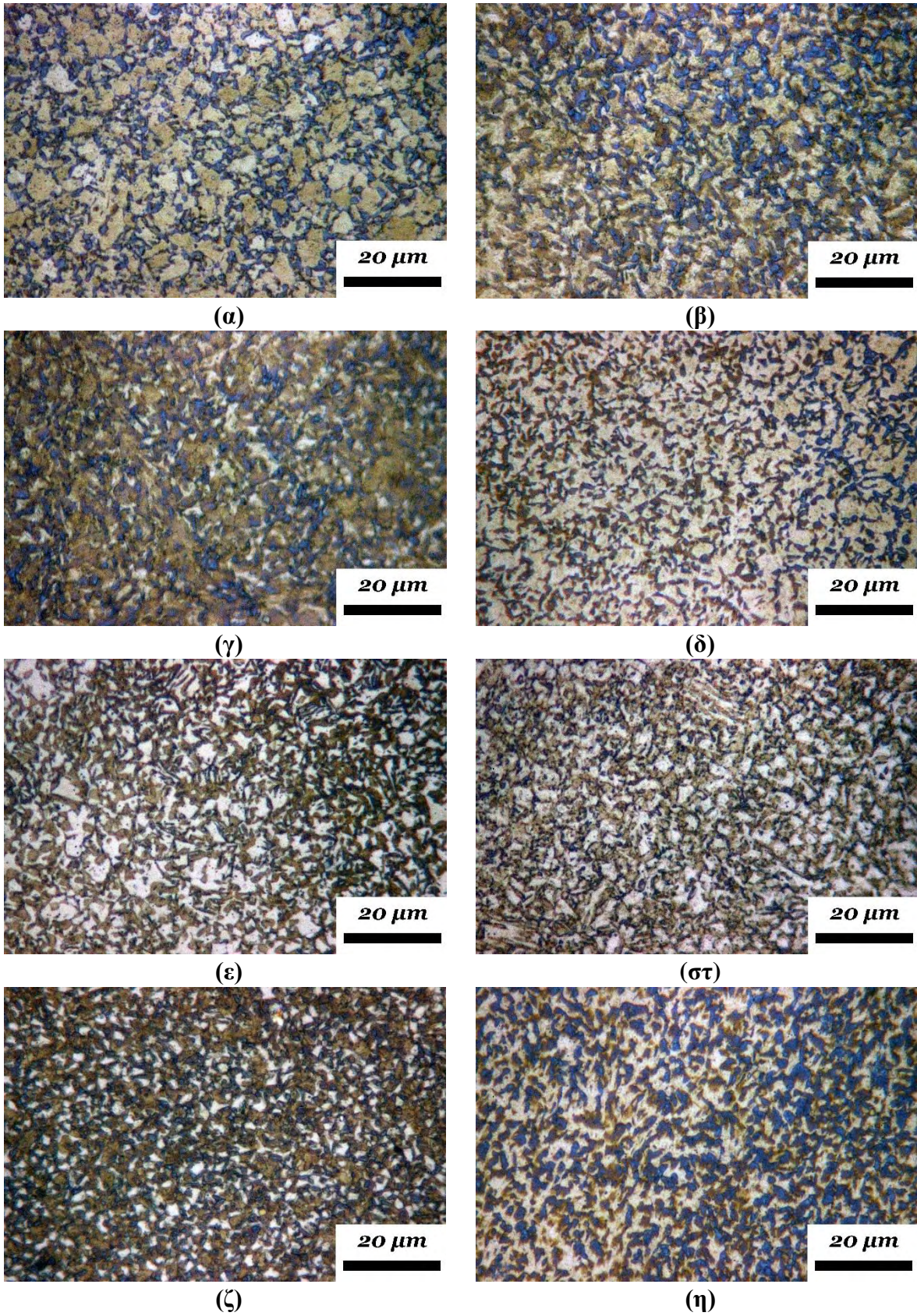
Στην Εικόνα 53β που ακολουθεί, παρουσιάζονται μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση στους 750°C. Ο ρυθμός θέρμανσης από τη θερμοκρασία δωματίου μέχρι και τους 750°C είναι 20°C/min. Στις Εικόνα 53β (ε) έως (δ) παρουσιάζονται μεταλλογραφίες για χρόνους έκθεσης στην ενδοκρίσιμη θερμοκρασία 5min, 10min, 30min και 60min αντίστοιχα.



Εικόνα 53β: Μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση στους 750°C για (ε) 5min, (στ) 10min, (ζ) 30min και (η) 60min.. Η μεγέθυνση για όλες τις μεταλλογραφίες είναι x1000.

Στην Εικόνα 54 που ακολουθεί παρουσιάζονται μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση στους 790°C. Ο ρυθμός θέρμανσης από τη θερμοκρασία δωματίου μέχρι και τους 790°C είναι 20°C/min. Στις Εικόνες 2 (α) έως (η) παρουσιάζονται μεταλλογραφίες για χρόνους έκθεσης στην ενδοκρίσιμη θερμοκρασία 30sec, 1min, 2min, 3min, 5min, 10min, 30min και 60min αντίστοιχα.

Με λευκό-κίτρινο χρώμα έχουν χρωματισθεί, από τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μεταλλογραφική προετοιμασία, οι κόκκοι του φερρίτη, ενώ με σκούρο καφέ ή μπλε χρώμα έχουν χρωματισθεί οι κόκκοι του ωστενίτη που δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης. Καθώς ο χρόνος έκθεσης στους 790°C αυξάνεται μεγαλώνει και το ποσοστό του ωστενίτη που δημιουργείται.



Εικόνα 54: Μεταλλογραφίες δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Ανόπτηση στους 790°C για (α) 30sec, (β) 1min, (γ) 2min, (δ) 3min, (ε) 5min, (στ) 10min, (ζ) 30min και (η) 60min. Η μεγέθυνση για όλες τις μεταλλογραφίες είναι x1000

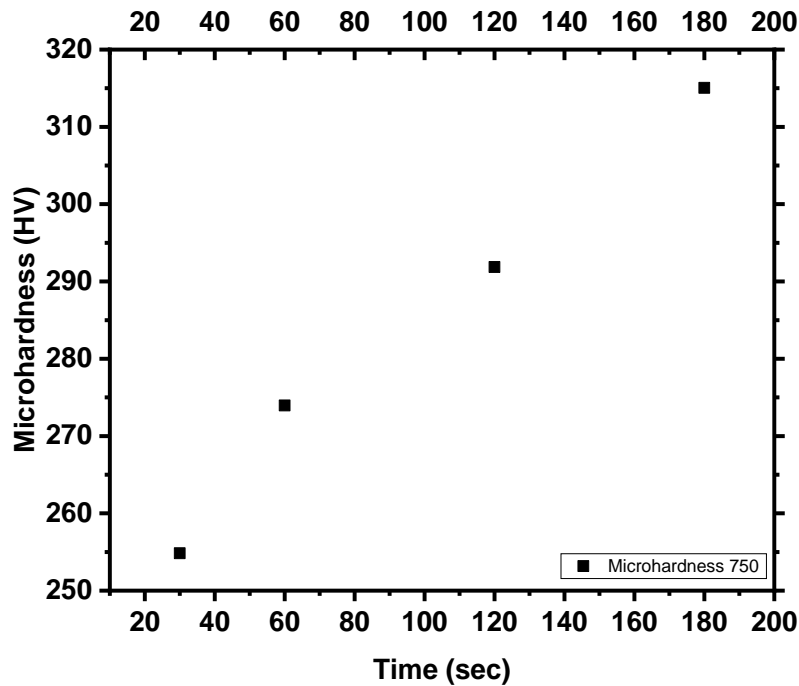
### 4.3 Σκληρομετρήσεις

Στα δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία για ενδοκρίσιμη ανόπτηση και ετοιμάσθηκαν για την μεταλλογραφική μελέτη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγιναν και μετρήσεις σκληρότητας. Για να υπολογιστεί η σκληρότητα του υλικού πάρθηκαν μετρήσεις σε τυχαία σημεία του δοκιμίου. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται διαφορετικές τιμές (σε μονάδες HV) για τη σκληρότητα του DP-1000 μετά από το πέρας των παραπάνω πειραμάτων.

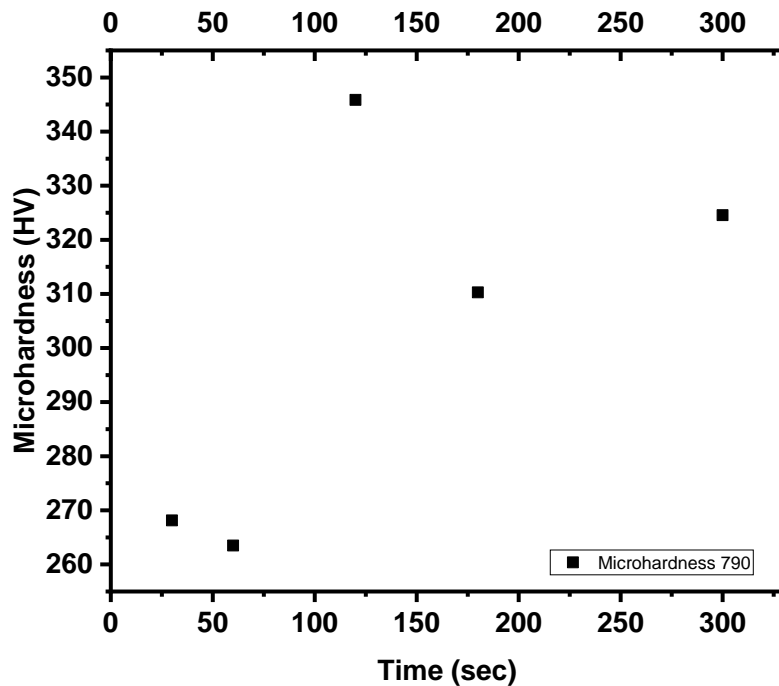
Πίνακας 9. Μικροσκληρομετρήσεις.

<b>Πείραμα/Μετρήσεις</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>M.O</b>
<b>1</b>	282.1	293.1	293.5	285.8	296.3	298.2	291.5
<b>2</b>	323.6	327.3	326	326.9	316.7	282.7	317.2
<b>3</b>	330.4	346.4	300	330.2	325.4	322.6	325.83
<b>4</b>	313.8	332.5	291.5	317.9	308.8	337.6	317.02
<b>5</b>	261.9	234.6	261.1	288.3	283.3	272.4	266.93
<b>6</b>	296.1	284.6	310.7	270	324	262.1	291.25
<b>7</b>	246.1	245.3	247.7	281.6	271.6	250.5	257.13
<b>8</b>	314.7	295.9	286.1	288.7	288.3	301.3	295.83
<b>9</b>	269.5	240.2	247.1	267.2	252.2	252.8	254.83
<b>10</b>	259.3	276.8	281.3	295.5	279.4	251.4	273.95
<b>11</b>	266	288.8	330.8	300.1	304.2	261.3	291.87
<b>12</b>	317.3	323	306.3	312.2	315.8	315.7	315.05
<b>13</b>	297.3	296.3	325.6	310.1	298.2	309.7	306.2
<b>14</b>	300.6	305.6	302.1	299	304.5	296.9	301.45
<b>15</b>	275.1	276.1	268.9	275.3	275.6	279.8	275.13
<b>16</b>	325.8	323.6	325.2	307.8	329.3	327.2	323.15
<b>17</b>	266.8	263	267.4	272.8	268.2	270.6	268.13
<b>18</b>	261.2	267.6	264.3	261.4	268.5	257.9	263.48
<b>19</b>	344.8	330.1	349.3	350.6	343.3	357.1	345.87
<b>20</b>	306	308.4	317.7	321.3	302.2	306.1	310.28
<b>21</b>	284.5	318.2	340.2	354.8	366.8	282.8	324.55
<b>22</b>	290.4	283.4	304.3	289.7	285.5	273.1	287.73
<b>23</b>	360.4	359.6	364.2	373.9	376.2	367.1	366.9
<b>24</b>	313.1	312.1	276.6	284.1	316.4	302.6	300.82

Στις Εικόνα 55 και Εικόνα 56 παρουσιάζονται μικροσκληρομετρήσεις δοκιμίων που έχουν υποστεί ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 750°C και 790°C αντίστοιχα. Καθώς ο χρόνος έκθεσης στους 750°C και 790°C αυξάνεται, μεγαλώνει το ποσοστό του ωστενίτη που δημιουργείται με συνέπεια να αυξάνεται η σκληρότητα.



Εικόνα 55: Μικροσκληρομετρήσεις δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Απόπτωση στους 750°C.



Εικόνα 56: Μικροσκληρομετρήσεις δοκιμίων που έχουν υποστεί Ενδοκρίσιμη Απόπτωση στους 790°C.

## 5 Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση του ρυθμού θέρμανσης στον ο ωστενιτικός μετασχηματισμός κατά τη διάρκεια συνεχούς θέρμανσης του χάλυβα διπλής φάσης DP1000. Παρατηρήθηκε μετατόπιση των θερμοκρασιών μετασχηματισμού,  $A_{c1}$  και  $A_{c3}$ , του ωστενίτη ανάλογα με τον ρυθμό θέρμανσης, για την πλήρη ανόπτηση του χάλυβα DP-1000.

Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια της πλήρους ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τον χρόνο ακολουθεί μια τυπική μορφή καμπύλης S.

Επίσης μελετήθηκε ο ωστενιτικός μετασχηματισμός κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης για τον ίδιο χάλυβα σε διαφορετικές θερμοκρασίες ισόθερμης παραμονής. Η καμπύλη του κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), όπως υπολογίστηκε κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης του κράματος DP1000, ως προς τον χρόνο ακολουθεί μια τυπική μορφή καμπύλης S.

Υψηλότερη θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης οδηγεί σε αύξηση κλάσματος όγκου του ωστενίτη ( $f_{\gamma}$ ), κάτι που επιβεβαιώθηκε και με μεταλλογραφική ανάλυση.

## 6 Βιβλιογραφία

1. Speer, J.G., et al., *Analysis of Microstructure Evolution in Quenching and Partitioning Automotive Sheet Steel*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011. **42**(12): p. 3591-3601.
2. Terada, D., et al., *Reason for high strength and good ductility in dual phase steels composed of soft ferrite and hard martensite*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. **219**: p. 012008.
3. Bergström, Y., Y. Granbom, and D. Sterkenburg, *A Dislocation-Based Theory for the Deformation Hardening Behavior of DP Steels: Impact of Martensite Content and Ferrite Grain Size %J Journal of Metallurgy*. 2010. **2010**: p. 16.
4. *Steel DP-W and PD-K Product information for dual-phase steels*, thyssenkrupp, Editor. 2018.
5. Haidemenopoulos, G., *Physical Metallurgy*. 2007, Greece: Tziolas. 736.
6. Tasan, C.C., et al., *An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design*. Annual Review of Materials Research, 2015. **45**(1): p. 391-431.
7. Papa Rao, M., et al., *Microstructure and Mechanical Properties of V-Nb Microalloyed Ultrafine-Grained Dual-Phase Steels Processed Through Severe Cold Rolling and Intercritical Annealing*. 2017. **48**(3): p. 1176-1188.
8. Speich, G.R., V.A. Demarest, and R.L. Miller, *Formation of Austenite During Intercritical Annealing of Dual-Phase Steels*. Metallurgical and Materials Transactions A, 1981. **12**(8): p. 1419-1428.
9. Castro Cerda, F., et al., *The Effect of Ultrafast Heating on Cold-Rolled Low Carbon Steel: Formation and Decomposition of Austenite*. Metals, 2016. **6**(12).
10. Bos, C., et al., *Application of a Three-Dimensional Microstructure Evolution Model to Identify Key Process Settings for the Production of Dual-Phase Steels*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011. **42**(12): p. 3602-3610.
11. Hayat, F., B. Demir, and M. Acarer, *Tensile shear stress and microstructure of low-carbon dual-phase Mn-Ni steels after spot resistance welding*. Metal Science and Heat Treatment, 2007. **49**(9): p. 484-489.
12. Peranio, N., et al., *Microstructure and texture evolution in dual-phase steels: Competition between recovery, recrystallization, and phase transformation*. Materials Science and Engineering: A, 2010. **527**(16-17): p. 4161-4168.
13. Peranio, N., F. Roters, and D. Raabe, *Microstructure Evolution during Recrystallization in Dual-Phase Steels*. Materials Science Forum, 2012. **715-716**: p. 13-22.
14. Šebek, M., et al., *Influence of annealing process on microstructure and mechanical properties of C-Mn dual phase steel*. Kovove Mater., 2015. **53**: p. 341-348.
15. Weltsch, Z. and G. Béres, *Estimation of Strength Properties from Microhardness Results in Dual Phase Steels with Different Martensite Volume Fraction*. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2018. **47**(3): p. 206-212.
16. Calcagnotto, M., et al., *Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging*. Acta Materialia, 2011. **59**(2): p. 658-670.
17. Son, Y.I., et al., *Ultrafine grained ferrite–martensite dual phase steels fabricated via equal channel angular pressing: Microstructure and tensile properties*. Acta Materialia, 2005. **53**(11): p. 3125-3134.

18. Delincé, M., et al., *Structure–property optimization of ultrafine-grained dual-phase steels using a microstructure-based strain hardening model*. Acta Materialia, 2007. **55**(7): p. 2337-2350.
19. Huang, J., W.J. Poole, and M. Militzer, *Austenite formation during intercritical annealing*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004. **35**(11): p. 3363-3375.
20. Miyamoto, G., et al., *Effects of Mn, Si and Cr addition on reverse transformation at 1073K from spheroidized cementite structure in Fe–0.6 mass% C alloy*. Acta Materialia, 2010. **58**(13): p. 4492-4502.
21. Yang, Y.-J., et al. *Dilatometric Analysis of Phase Fractions during Austenite Decomposition in Pipeline Steel*. 2015. Atlantis Press.
22. Suh, D.-W., et al., *Dilatometric Analysis of Phase Fraction during Austenite Decomposition into Banded Microstructure in Low-Carbon Steel*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007. **38**(12): p. 2963-2973.
23. Zhao, J.Z., C. Mesplont, and B.C. De Cooman, *Model for extracting phase transformation kinetics from dilatometry measurements for multistep transformations*. Materials Science and Technology, 2002. **18**(10): p. 1115-1120.
24. Oh, C.-S., et al., *Dilatometric analysis on phase transformations of intercritical annealing of Fe–Mn–Si and Fe–Mn–Si–Cu low carbon TRIP steels*. Metals and Materials International, 2004. **10**(5): p. 399-406.
25. Xu, Y., et al., *Method to Evaluate the Kinetics of Bainite Transformation in Low-Temperature Nanobainitic Steel Using Thermal Dilatation Curve Analysis*. 2017. **7**(9): p. 330.
26. Toolkit for the design of damage tolerant microstructures, *Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, Grant Agreement Number: 709711*,. 2016.
27. Suwanpinij, P., *Multi-scale Modelling of Hot Rolled Dual-phase Steels for Process Design*. 2012, RWTH: Aachen.
28. Bocharova, E., et al., *Dual-phase steel, flat product made of such dual-phase steel and method for manufacturing a flat product* E.P. Office, Editor. 2007: Germany.