



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Μηχανικής, Υλικών και Κατεργασιών

**ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ REPLICA ΓΙΑ ΤΗΝ  
IN SITU ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΕ  
ΚΡΙΣΙΜΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ**

Επιβλέπουσα: Δρ. Άννα Ζερβάκη

Διπλωματική Εργασία

Του

Λιάτη Χρήστου

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Σεπτέμβρης 2018



Copyright©2018 Λιάτης Χρήστος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εξεταστική Επιτροπή

Πρώτος Εξεταστής : Δρ. Άννα Ζερβάκη

(Επιβλέπουσα) Ε.Δι.Π., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Κώστας Παπαδημητρίου

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Άννα Ζερβάκη για τη σημαντική βοήθεια της, την καθοδήγηση της, την υπομονή της και το χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δύο μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθηγητή κ. Κώστα Παπαδημητρίου και επίκουρο καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη για την συμμετοχή τους και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου που στάθηκε δίπλα μου και με στήριξε με κάθε τρόπο κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας .

## Περίληψη

Η μέθοδος μεταλλογραφίας με replica αποτελεί μια μέθοδο η οποία προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στους σημερινούς μηχανικούς όπου απαιτείται να πραγματοποιήσουν in situ αποτύπωση μικροδομής σε μηχανολογικές κατασκευές. Η επί τόπου αποτύπωση της μικροδομής μπορεί να πραγματοποιηθεί στις εγκαταστάσεις των βιομηχανιών και εντάσσεται στις μεθόδους μη καταστρεπτικού ποιοτικού ελέγχου.

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στην εφαρμογή της μεθόδου μεταλλογραφίας με τη χρήση replica σε δοκίμια των κραμάτων PARALLOY H39WM και INCOLOY 800HT. Τα συγκεκριμένα υλικά, παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες σε ερπυσμό και έχουν ευρεία εφαρμογή σε τμήματα εξοπλισμού που λειτουργεί μακροχρόνια σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, βελτιστοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση replica και αναλύθηκαν οι μορφές αστοχίας που εξελίσσονται λόγω ερπυσμού στα συγκεκριμένα υλικά.

Η προετοιμασία των δειγμάτων καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα αποτελέσματα ευρίσκονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα που προκύπτουν με εφαρμογή της μεθόδου της κλασικής μεταλλογραφίας.

## Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων.....	7
Λίστα Πινάκων.....	9
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	10
1.1 Στόχος και Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	10
1.2 Parallooy H39WM.....	11
1.3 Incoloy 800HT.....	15
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	16
2.1 Το φαινόμενο του Ερπυσμού.....	16
2.1.1 Ιστορική Ανασκόπηση.....	16
2.1.2 Βασικά χαρακτηριστικά ερπυσμού για τα μεταλλικά υλικά.....	19
2.1.3. Παραμόρφωση μεταλλικών υλικών λόγω ερπυσμού.....	21
2.1.3.1. Ερπυσμός διάχυσης.....	22
2.1.3.2. Γραμμοαταξιακός ερπυσμός.....	23
2.1.3.3. Αστοχία μεταλλικού υλικού λόγω ερπυσμού (Μηχανισμοί).....	23
2.1.4 Περιπτώσεις εξέλιξης φαινομένων ερπυσμού.....	24
2.2 Μεταλλογραφία με Replica.....	25
2.2.1 Απαραίτητη προετοιμασία δείγματος.....	26
2.2.2 Τεχνικές.....	26
2.2.3. Replica -Φαινόμενο του ερπυσμού.....	29
Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διαδικασία.....	31
3.1 Προετοιμασία των δειγμάτων.....	31
3.2 Διαδικασία εξαγωγής Replica.....	33
3.3 Ανάλυση στο οπτικό Μικροσκόπιο.....	35
4. Πειραματικά Αποτελέσματα-Συζήτηση.....	36
4.1. Αποτελέσματα οπτικού μικροσκοπίου.....	36
5. Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	48
5.1 Ποιότητα replica.....	48
5.2 Το φαινόμενο του ερπυσμού.....	48
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	49
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	50

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.2 i: Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης των υλικών συναρτήσει της επιθυμητής αντοχής σε ερπυσμό [1].	11
Εικόνα 1.2 ii: Σύγκριση κραμάτων HK-40, IN-519, HP Nb Mod, HP Microalloy [1].	12
Εικόνα 1.2 iii: Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του αυλού[2].	14
Εικόνα 2.1.1 i: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας ατμοπαραγωγών [8].	17
Εικόνα 2.1.2 i: Καμπύλη Ερπυσμού [33].	20
Εικόνα 2.1.2 ii: Επίδραση της τάσης στις καμπύλες ερπυσμού σε σταθερή θερμοκρασία [36].	21
Εικόνα 2.1.3 i: Τυπικός χάρτης μηχανισμών παραμόρφωσης Ashby[36].	22
Εικόνα 2.1.3.3 i: Κατάταξη σταδίων ερπυσμού, αντιστοίχισή τους με τη μικροδομή και προτεινόμενες ενέργειες αποκατάστασης [1].	24
Εικόνα 2.2.2 i: Σχηματική παρουσίαση διαδικασίας μεταλλογραφίας με πλαστική replica [52].	27
Εικόνα 2.2.2 ii: Replica Απόσπασης Positive Carbon α) Τοποθέτηση πλαστικού μετά την πρώτη χημική προσβολή. β) Μετά τη δεύτερη χημική προσβολή γ) Τοποθέτηση Carbon δ) Αφαίρεση πλαστικού και δημιουργία επιθυμητής replica. [52].	29
Εικόνα 2.2.3 i: Απεικόνιση σχηματισμών ρηγματώσεων λόγω ερπυσμού. α) Μικρές κοιλοότητες β) Σύνδεση μεταξύ κοιλοτήτων γ) Σχηματισμός ενδοκοκκικών ρηγμάτων δ) Δημιουργία ρηγμάτων (Αστοχία) [52].	30
Εικόνα 2.2.3 ii: Σύγκριση οπών λόγω ερπυσμού μεταξύ α) replica επιφανείας β) μικροδομή δείγματος που έχει υποστεί ερπυσμό [52].	31
Εικόνα 3.2 i: Φύλλα replica για αποτύπωση μικροδομής STRUERS [53].	33
Εικόνα 3.2 ii: Υγρό μίγμα STRUERS. [53].	34
Εικόνα 3.2 iii: Συνολικός εξοπλισμός διαδικασίας. [53].	34
Εικόνα 3.3 i: Κατάταξη σε επίπεδο ερπυσμού[54].	35
Εικόνα 4.1 i: Μικροδομή replica από το 1ο δείγμα H39WM σε μεγέθυνση x100.	36
Εικόνα 4.1 ii: Αποτύπωση μικροδομής replica ίδιου δείγματος σε μεγέθυνση x200.	37
Εικόνα 4.1 iii: Αποτύπωση μικροδομής ίδιου δείγματος σε μεγέθυνση x500.	38
Εικόνα 4.1 iv: Αποτύπωση μικροδομής replica που δημιουργήθηκε από το δεύτερο δείγμα σε μεγέθυνση x100.	39



Εικόνα 4.1 v: Αποτύπωση μικροδομής replica που δημιουργήθηκε από το δεύτερο δείγμα σε μεγέθυνση x200. ....	39
Εικόνα 4.1 vi: Αποτύπωση μικροδομής replica από το δεύτερο δείγμα σε μεγέθυνση x500.	40
Εικόνα 4.1 vii: Αποτύπωση μικροδομής replica του τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση x100. ....	41
Εικόνα 4.1 viii: Αποτύπωση μικροδομής replica του τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση x200. ....	41
Εικόνα 4.1 ix: Αποτύπωση μικροδομής replica τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση x500. ....	42
Εικόνα 4.1 x: Αποτύπωση μικροδομής σε μεγέθυνση x100. (Μακριά από τη θραύση) .....	43
Εικόνα 4.1 xi: Αποτύπωση μικροδομής replica μεγέθυνσης x100. ( Κοντά στη θραύση) .....	44
Εικόνα 4.1 xii: Αποτύπωση μικροδομής replica τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση x100. (Πάνω στη θραύση).....	44
Το τελευταίο δείγμα στο οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος μεταλλογραφίας με replica είναι INCOLOY 800HT. Στις Εικόνες 4.1 xiii, 4.1 xiv, 4.1 xv, 4.1 xvi και 4.1 xvii απεικονίζεται η μικροδομή της replica του υλικού αυτού σε μεγεθύνσεις x100,x200 και x500. ....	45
Εικόνα 4.1 xviii: Αποτύπωση μικροδομής replica του κράματος INCOLOY 800HT σε μεγέθυνση x100. ....	45
Εικόνα 4.1 xix: Δεύτερη αποτύπωση μικροδομής της ίδιας replica σε μεγέθυνση x100.....	46
Εικόνα 4.1 xx: Αποτύπωση μικροδομής replica δείγματος κράματος INCOLOY 800HT σε μεγέθυνση x200. ....	46
Εικόνα 4.1 xxi: Δεύτερη αποτύπωση μικροδομής replica του δείγματος κράματος INCOLOY σε μεγέθυνση x200. ....	47
Εικόνα 4.1 xxii: Αποτύπωση μικροδομής replica του δείγματος υλικού κράματος INCOLOY 800HT σε μεγέθυνση x500. ....	47
Εικόνα 5.2 i: Κατάταξη στάδιου ερπυσμού με βάση τη καμπύλη ερπυσμού. ....	48

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Σύσταση κραμάτων (% κ.β.) H21, H39W, H39WM και H46M [2].....	14
Πίνακας 2: Χημική σύσταση Incoloy 800, 800H, 800HT [6].....	15
Πίνακας 3: Φυσικές Ιδιότητες [6].....	15
Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα είδη replicas [51].....	26
Πίνακας 5: Κατάταξη αστοχίας λόγω ερπυσμούς [50]. ....	30
Πίνακας 6: Σύσταση κράματος χάλυβα H39WM και κράματος Νικελίου Incoloy 800HT .....	32

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Στόχος και Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Βασικός στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία μεταλλογραφιών εφαρμόζοντας τη μέθοδο της replica σε δείγματα από:

- Κράμα Fe-Ni-Cr H39WM (Paralloy H39WM)
- Κράμα Ni (Incoloy alloy 800HT)

τα οποία προέρχονται από εξοπλισμό διυλιστηρίου μετά από μακροχρόνια έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία.

Τα αποτελέσματα προέκυψαν με τη χρήση οπτικού μεταλλογραφικού μικροσκοπίου στο οποίο αξιολογήθηκαν οι replicas που ελήφθησαν από τα συγκεκριμένα υλικά.

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται γενικές πληροφορίες για τα παραπάνω υλικά (PARALLOY H39WM, INCOLOY 800 HT) .

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της εργασίας που περιλαμβάνει περιγραφή του φαινομένου του ερπυσμού και αρχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος της μεταλλογραφίας με replica.

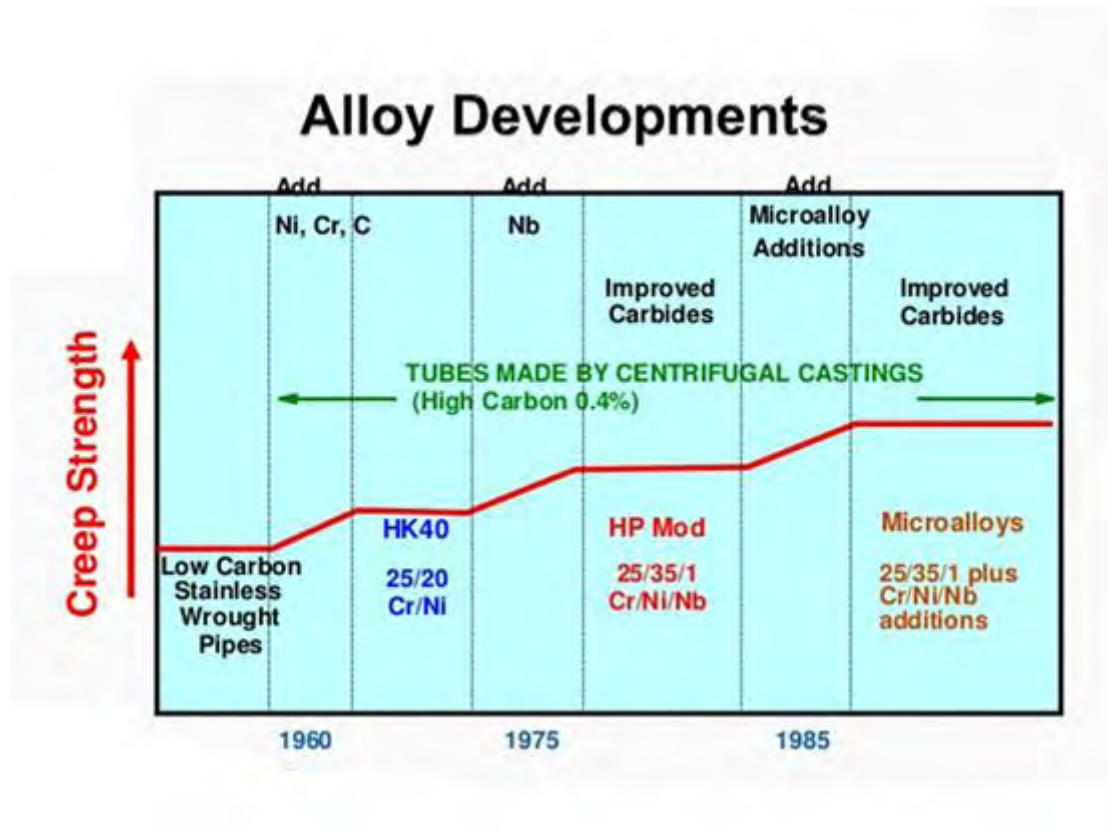
Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο δίδεται η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιέχει το σύνολο των μεταλλογραφιών που προέκυψαν με την τεχνική της replica για τα παραπάνω υλικά με τη βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου του εργαστηρίου καθώς και αναλύσεις και σχόλια.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο τα παραπάνω αποτελέσματα αξιολογούνται και σχολιάζονται και τέλος αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## 1.2 Paralloy H39WM

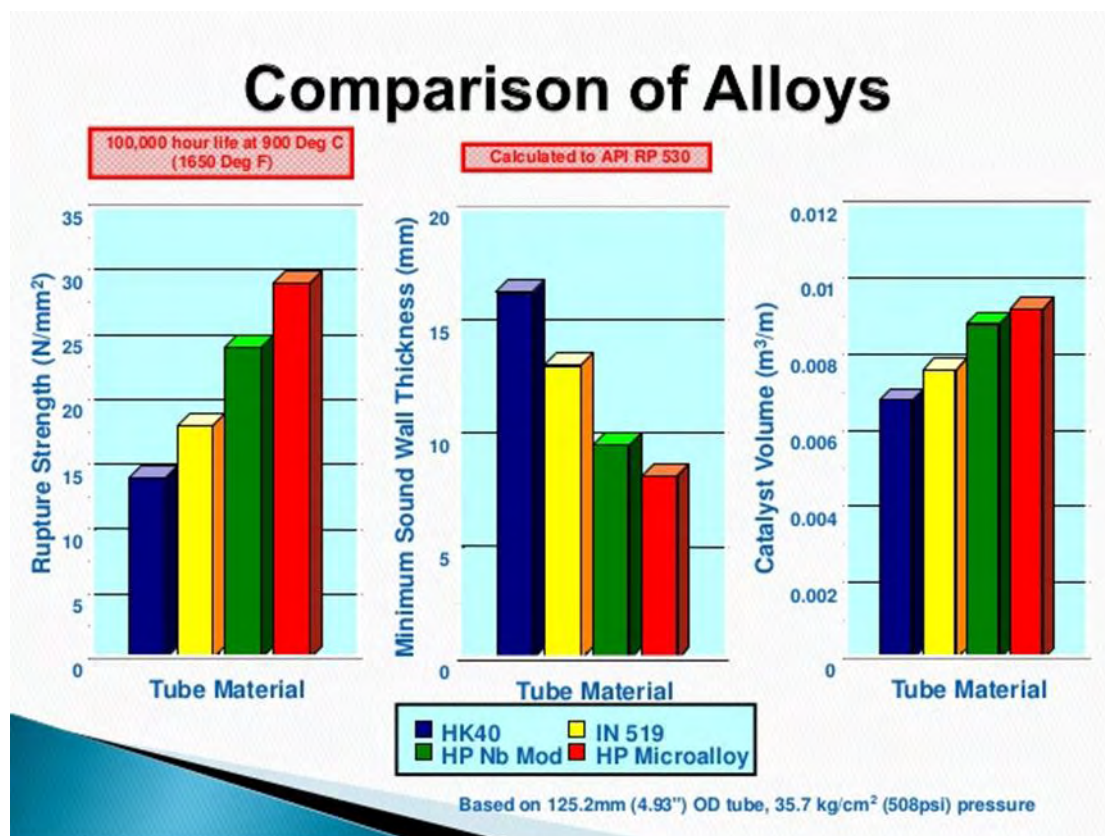
Το PARALLOY H39WM κατασκευάστηκε με στόχο την βελτίωση της απόδοσης των πετροχημικών κλιβάνων με ταυτόχρονη μείωση του κόστους λειτουργίας τους. Το κράμα αυτό έχει αντικαταστήσει τον χάλυβα HK-40, ο οποίος είχε κάποια μειονεκτήματα (Εικόνα 1.2i). Τα κυριότερα από αυτά είναι 1) η χαμηλή ολκιμότητα



Εικόνα 1.2 i: Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης των υλικών συναρτήσει της επιθυμητής αντοχής σε ερπυσμό [1].

σε ερπυσμό και (2) ψαθυροποίηση μετά από λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε σχέση με τον HK-40 ο χάλυβας M36X (25Cr-35Ni-1.5Nb) έχει μεγαλύτερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλότερη ολκιμότητα ερπυσμού, γεγονός που μεταφράζεται σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε ερπυσμό (Εικόνα 1.2 ii).

Οι χρήσιμες ιδιότητες του κράματος επιτρέπουν την παραγωγή λεπτότοιχων αυλών, οι οποίοι μειώνουν τη θερμική αγωγιμότητα και επιπρόσθετα τις θερμικές παραμορφώσεις στο εσωτερικό του τοιχώματος. Οι αυλοί αυτοί προσέφεραν πολλά πλεονεκτήματα όσο αφορά στη ποσότητα της θερμότητας κατά τη μεταφορά της και στην εξοικονόμηση αποθεμάτων ενέργειας.



Εικόνα 1.2 ii: Σύγκριση κραμάτων HK-40, IN-519, HP Nb Mod, HP Microalloy [1].

Τα κράματα προσφέρουν άριστο συνδυασμό σημαντικής αντίστασης σε διάβρωση και υψηλή αντοχή σε ερπυσμό κατά την έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Άλλη κύρια απαίτηση είναι η αντίσταση στην ενανθράκωση. Το φαινόμενο της ενανθράκωσης μειώνει την αντοχή σε ερπυσμό και την ολκιμότητα. Το χρώμιο (Cr), το πυρίτιο (Si) και το νικέλιο (Ni) (το οποίο είναι το κύριο στοιχείο της αντίστασης του υλικού στην απορρόφηση άνθρακα) παρέχουν στο υλικό τη δυνατότητα να εμποδίσει τη διάχυση άνθρακα από το περιβάλλον λειτουργίας προς το εσωτερικό του αυλού.

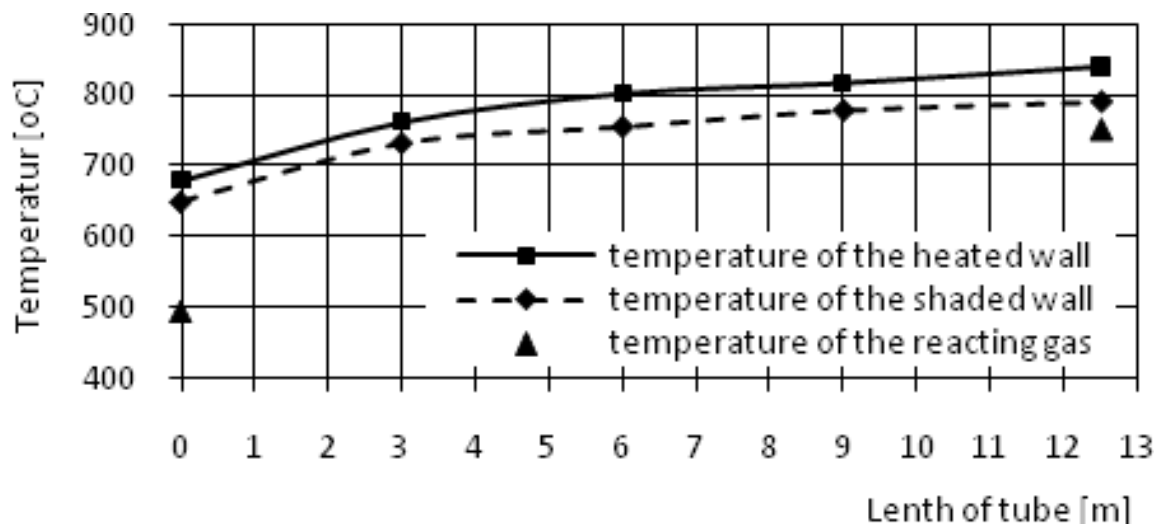
Σχετικά με την αντοχή των υλικών σε ερπυσμό, η χημική τους σύσταση διασφαλίζει τον σχηματισμό 'πρωτογενών' καρβιδίων στη μικροδομή κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και 'δευτερογενών' καρβιδίων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Τα προαναφερθέντα καρβίδια χαρακτηρίζονται ως εμπόδια στην εξάπλωση του φαινομένου του ερπυσμού και συμβάλλουν στην αντοχή του υλικού. Με το πέρασμα των χρόνων, στα υλικά αυτά έχουν γίνει βελτιώσεις στη σύσταση έτσι ώστε να βελτιωθεί η σταθερότητα και η αποδοτικότητα αυτών των καρβιδίων παράγοντας υλικά με ακόμη πιο ενισχυμένη αντοχή σε ερπυσμό. Αναλυτικότερα, κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες σχηματίζονται δευτερογενή καρβίδια τύπου  $M_{23}C_6$  στο εσωτερικό της ωστενιτικής μήτρας. Κάθε καρβίδιο αποτελεί ένα «φράγμα» το οποίο σταματά την κίνηση της ανωμαλίας που δημιουργήθηκε λόγω του ερπυσμού. Οι προσθήκες σε Nb και Ti όχι μόνο βελτιώνουν την αντίσταση του υλικού στη διάβρωση αλλά σταθεροποιούν επίσης τα συγκεκριμένα καρβίδια και

ενισχύουν δραστικά την αντοχή σε ερπυσμό των κραμάτων 'HP Nb Mod.' και 'HP microalloy' σε σύγκριση με τα παλαιότερα κράματα 'HP' [Εικόνα 1.2i].

Η πιο αποδοτική βελτίωση στη σύσταση αφορά στην προσθήκη ελεγχόμενης ποσότητας Nb στη βασική σειρά των 'High Performance' ( HP 25/35/0.4-Cr/Ni/C) κραμάτων. Μετά από μικροαλλαγές στην περιεκτικότητα δημιουργήθηκαν υλικά όπως το PARALLOY H39W και H39WM που αποτελούν τα υλικά με την μεγαλύτερη αντοχή στο φαινόμενο του ερπυσμού.

Το PARALLOY H39WM αποτελεί ένα κράμα υψηλής αντοχής σε μεγάλες θερμοκρασίες με σημαντική περιεκτικότητα σε Ni και Cr ενώ ταυτόχρονα εμφανίζει καλή συγκολλησιμότητα. Πέραν των παραπάνω πλεονεκτημάτων, το συγκεκριμένο κράμα προσφέρει αντοχή στο φαινόμενο της ενανθράκωσης(carburization) που ενεργοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, είναι δυνατόν να συγκολληθεί με διάφορες μεθόδους συγκόλλησης όπως συγκόλληση με επενδυμένα καλώδια (SMAW) ή με τις μεθόδους GMAW και GTAW.

Η υψηλή αντοχή σε ερπυσμό το καθιστά ιδανικό για εγκαταστάσεις φούρνων, για τη ανάμιξη υδρογονανθράκων με ατμό με σκοπό τη δημιουργία αερίων πλούσιων σε υδρογόνο τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αμμωνίας, μεθανόλης κ.α. Στις προαναφερθέντες εγκαταστάσεις γίνεται χρήση αυλών που περιέχουν τα παραπάνω αέρια και θερμαίνονται από τους φούρνους σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται συνήθως από 660°C- 850°C. Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα που παρουσιάζει την κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος ενός τέτοιου αυλού. Το διάγραμμα αποτυπώνει τη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του αυλού που θερμαίνεται άμεσα από τους κλιβάνους, τη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του αυλού όπου η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή μέσω του πάχους και τέλος τη θερμοκρασία του αερίου στο εσωτερικό του αυλού. Τα παραπάνω παρουσιάζονται συναρτήσει του μήκους του αυλού και παρατηρείται ότι η αύξηση της κατανομής θερμοκρασίας είναι ομαλή και σταθεροποιείται και για τις τρεις περιπτώσεις κατά το μήκος του αυλού.



Εικόνα 1.2 iii: Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του αυλού[2].

Η σταθερότητα που προσφέρει η δενδριτική μικροδομή με την ταυτόχρονη ικανοποιητική διασπορά των καρβιδίων είναι κυρίως υπεύθυνες για τη συμπεριφορά του υλικού. Η έκθεση αυτού σε υψηλότερες θερμοκρασίες προκαλεί μεταβολές στη μικροδομή με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και το υλικό γίνεται ευάλωτο στο φαινόμενο του ερπυσμού.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές στις συστάσεις των κραμάτων H21, H39W, H39WM και H46M.

Πίνακας 1: Σύσταση κραμάτων (% κ.β.) H21, H39W, H39WM και H46M [3].

Όνομα Κράματος	Εμπορική Ονομασία	C	Cr	Ni	Nb	W	Άλλα
H21	‘HK40’	0.4	25	20	-	-	-
H39W	‘HP Nb Mod.’	0.4	25	35	1	-	-
H39WM	‘HP Microalloy’	0.4	25	35	1	-	Επιπλέον προσθήκες
H46M	‘35/45 Microalloy’	0.4	35	45	1	-	Επιπλέον προσθήκες

### 1.3 Incoloy 800HT

Τα κράματα INCOLOY 800HT είναι κράματα Ni-Cr-Fe με μικρότερες προσθήκες Ti, Si, Mn και Al. Το INCOLOY 800HT, το οποίο είναι ένα από τα κύρια υλικά για εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας τέταρτης γενιάς, χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες. Η υψηλή περιεκτικότητα του σε Ni ενισχύει την αντίσταση του σε κυκλική οξείδωση λόγω της δημιουργίας επιφανειακού στρώματος οξειδίου του Ni και αυξάνει την ολκιμότητα καθώς και την αντοχή σε ερπυσμό[4]. Το κράμα Incoloy 800H χαρακτηρίζεται από υψηλή μηχανική αντοχή εξαιτίας της φάσης 'γ', η οποία αποτελεί μια ενδομεταλλική ένωση που σε άλλα είδη κράματος με βάση το ασάλι και το νικέλιο υπάρχουν με τη μορφή  $Ni_3(Al,Ti)$ . Η κατακρήμνιση της φάσης 'γ' συμβάλει στην αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και ενισχύει την αντίσταση του υλικού σε ερπυσμό. Ο όγκος της φάσης 'γ' στα παραπάνω υλικά συνήθως αποτελεί λιγότερο του 25% του συνολικού όγκου [5] [6].

Η χημική σύσταση των INCOLOY σειράς 800, 800H και 800HT παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα και ακολουθεί ο πίνακας των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Πίνακας 2: Χημική σύσταση INCOLOY 800,800H,800HT [7].

Incoloy	800	800H	800HT
Ni	30-35	30-35	30-35
Fe	39.5 min	39.5 min	39.5
Cr	19-23	19-23	19-23
Cu	0.75 max	0.75 max	0.75
Ti	0.15-0.60	0.15-0.60	0.25-0.60
Al	0.15-0.60	0.15-0.60	0.85-1.20
C	0.1 max	0.05-0.1	0.06-0.1
Mn	1.5 max	1.5 max	1.5 max
S	0.015 max	0.015 max	0.015 max
Si	1.0 max	1.0 max	1.0 max

Πίνακας 3: Φυσικές Ιδιότητες [7].

Πυκνότητα	7.94 g/cm <sup>3</sup>
Σημείο Τήξης	1386°C (2525 °)
Αντοχή σε εφελκυσμό	Psi- 75.000, Mpa-520
Τάση διαρροής	Psi- 30.000, Mpa-205
Επιμήκυνση	30%



Η βασική διαφορά του συγκεκριμένου υλικού από το βασικό Incoloy 800 είναι ότι περιέχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα (0.06-0.10%). Επιπροσθέτως, άλλο ένα χαρακτηριστικό είναι ότι η σύστασή του περιλαμβάνει πάνω από 1% Al και Ti. Για να αποκτήσει την τελική του μορφή το υλικό εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα την δημιουργία χονδρόκοκκης μικροδομής. Ο συνδυασμός της δομής αυτής μαζί με την σύσταση τους διασφαλίζει σημαντική αντοχή στη πρόκληση ρωγμών και στον ερπυσμό σε θερμοκρασίες άνω των 1290°F (700°C).

Εφαρμογές του υλικού ευρίσκονται σε:

- Εγκαταστάσεις ενέργειας-Πιο συγκεκριμένα, σε εξατμιστήρες και εναλλάκτες θερμότητας σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και συστήματα αγωγών σε εργοστάσια παραγωγής κάρβουνων.
- Χημικές και πετρελαιοχημικές διαδικασίες- Ειδικότερα, σε εξοπλισμό για την παραγωγή αιθυλενίου, διχλωριδίου του αιθυλενίου, οξικού ανιδρώτη, κετόνης και νιτρικού οξέος.
- Θερμικές διαδικασίες- Πιο συγκεκριμένα, σε αποστακτήρες και κλιβάνους.
- Διυλιστήρια πετρελαίου- Σε τμήματα εξοπλισμού που έρχονται σε επαφή με ατμό και υδρογονάνθρακες.

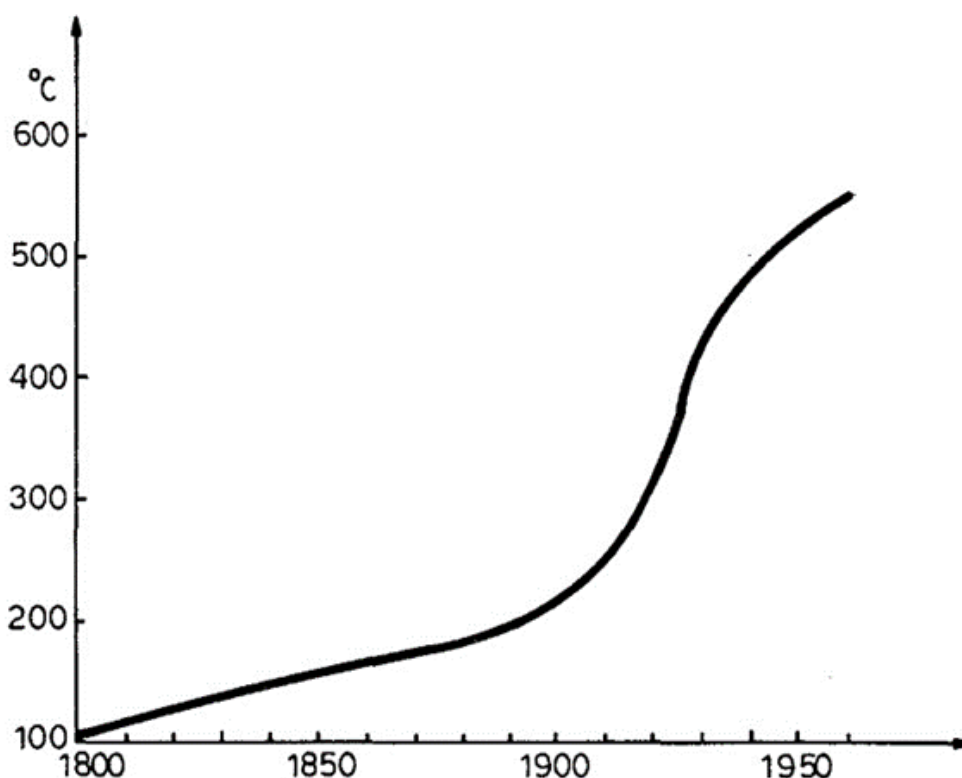
## Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Το φαινόμενο του Ερπυσμού

#### 2.1.1 Ιστορική Ανασκόπηση

Το φαινόμενο του ερπυσμού πρωτομελετήθηκε περίπου τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Τα περιστατικά αφορούσαν στα στοιχεία τεχνικών κατασκευών που λειτουργούσαν σε υψηλή θερμοκρασία. Τα πρώτα παρατηρήθηκαν σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και μεταλλουργικών διεργασιών κατά τη διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πολέμου και του μεσοπολέμου όπου σημαντικές παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού είχαν ήδη οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα. Στον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο οι μηχανικοί της εποχής ωθήθηκαν να μελετήσουν το φαινόμενο καθώς αυτό συνδέθηκε και με τη λειτουργία αεριοστροβίλων, πυραύλων και νέων διατάξεων που λειτουργούσαν σε υψηλή θερμοκρασία.

Οι ατμοπαραγωγοί και οι εξοπλισμοί φούρνων αποτέλεσαν τις πρώτες κατασκευές όπου παρατηρήθηκε το φαινόμενο. Με τον καιρό αλλά και την ταυτόχρονη ανάπτυξη της θερμοδυναμικής επικράτησε η τάση για αύξηση της θερμοκρασίας στους ατμοπαραγωγούς. Παρακάτω παρουσιάζεται η Εικ. 2.1.1i όπου αποτυπώνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας των ατμοπαραγωγών.[8]



Εικόνα 2.1.1 i: Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας ατμοπαραγωγών [8].

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι γύρω στα 1920-1930 συμβαίνει ξαφνική αύξηση ένα γεγονός που οφείλεται στη χρήση υπέρθερμου ατμού γύρω στους 400°C. Αυτή η αύξηση προσεγγίζει την περιοχή ερπυσμού των χαμηλά κεκραμένων χαλύβων.

Στις ανεπτυγμένες βιομηχανικές χώρες της Ευρώπης, από το 1850 πραγματοποιούνταν πειραματικές έρευνες για την εξάρτηση των εφελκυστικών ιδιοτήτων των μετάλλων από τη θερμοκρασία. Οι έρευνες πραγματοποιήθηκαν με υπεύθυνους τον Άγγλο W.Fairbath, τον Γερμανό G.Weher και τον Γάλλο J.Laplace. Ο E.N. da Costa Andrade ο οποίος ήταν ισπανικής καταγωγής αλλά βρετανικής μόρφωσης αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για τη κατανόηση του φαινομένου του ερπυσμού και ήταν ο πρώτος που ξεκίνησε συστηματική μελέτη τον 20<sup>ο</sup> αιώνα για το φαινόμενο στα μεταλλικά υλικά. Ο ίδιος δημοσίευσε για πρώτη φορά το 1910 τα αποτελέσματα των μελετών του εισάγοντας τους όρους «αρχικός ερπυσμός», «ομοιόμορφος ερπυσμός» και «επιταχυνόμενος ερπυσμός», όροι που χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα. [9] [10]

Οι έρευνες για τον ερπυσμό των μετάλλων, είτε πειραματικές είτε θεωρητικές, έγιναν πιο έντονες στον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο κατά τη διάρκεια του οποίου ο καθηγητής του M.I.T. της Βοστώνης, F.Norton, καθόρισε τα όρια τάσεων και θερμοκρασιών κάτω από τα οποία δεν

συμβαίνει το φαινόμενο του ερπυσμού. Ο ίδιος πρότεινε και τον ομώνυμο νόμο για το δεύτερο στάδιο του φαινομένου [11].

Οι μηχανικοί ξεκίνησαν να προσπαθούν εντονότερα για τη διάγνωση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε μηχανές οι οποίες φορτίζονται από υψηλές τάσεις όταν απαιτήθηκαν υψηλές ταχύτητες σε περιστροφικές θερμικές μηχανές. Βασικός παράγοντας της προσπάθειας αυτής ήταν ο R. Bailey της εταιρείας Metropolitan Vickers της οποίας η έδρα βρισκόταν στο Ηνωμένο Βασίλειο [12,13].

Ο Ελβετός καθηγητής A. Stodola ήταν ακόμα ένας βασικός συντελεστής για την ανάπτυξη της μηχανικής του ερπυσμού καθώς έκανε γνωστή την θεωρία του τριαξονικού ερπυσμού. Η συγκεκριμένη θεωρία παρουσιάζει αρκετά κοινά σημεία με τη θεωρία της πλαστικότητας του Von Mises [14]. Η πρώτη επιθεώρηση των γνώσεων γύρω από τον ερπυσμό πραγματοποιήθηκε από τον H. Tarsell του Βρετανικού Εθνικού Εργαστηρίου Φυσικής [15].

Οι G.Taylor, E.Orowan και M.Polanyi πρότειναν τη γενική ιδέα των αταξιών των κρυσταλλικών υλικών κατά το 1934 [16] [17] [18]. Εκτός από την πλαστικότητα, η παραπάνω θεωρία χρησίμευσε για το φαινόμενο του ερπυσμού και συνέβαλε στο να εξηγηθούν πολλά από τα φαινόμενα που έχουν σχέση με αυτόν. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950, αναπτύχθηκαν τεχνικές για παρατήρηση και μελέτη των αταξιών οι οποίες αποδεικνύουν πειραματικά τις περισσότερες από τις αντιλήψεις της αντίστοιχης θεωρίας. [19-23].

Ο Γερμανός K. Richard πραγματοποίησε πειράματα με μεγάλη χρονική διάρκεια με τη βοήθεια των οποίων συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη της έρευνας για τον ερπυσμό. Όλα τα παραπάνω έγιναν κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου και χαρακτηριστικό γεγονός αποτελεί το ότι τα συμμαχικά στρατεύματα σεβάστηκαν το έργο του κατά την κατάληψη του Βερολίνου [24].

Την επόμενη δεκαετία μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, ξεκίνησε το έντονο ενδιαφέρον για τη χρήση νέων ανθεκτικών μεταλλικών υλικών όπως ωστενιτικοί χάλυβες, κράματα Ni κ.α. Η συγκεκριμένη δεκαετία αποτέλεσε την αρχή της δημιουργίας χημικών αντιδραστήρων και θερμικών εγκαταστάσεων. Η συστηματική χρήση των πυρηνικών αντιδραστήρων και οι υψηλότερες θερμοκρασίες αντιδραστήρων και οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αυτή συνεπάγεται, αύξησε την ανάγκη για περισσότερες γνώσεις στον ερπυσμό. Το 1964 ο Gibbs πρωτοεμφάνισε στοιχεία της έννοιας της εσωτερικής τάσης επαναφοράς και του δικτύου αταξιών. Οκτώ χρόνια αργότερα ο M. Ashby δημοσίευσε τους χάρτες παραμόρφωσης και αστοχίας τα οποία αποτέλεσαν βασικό εργαλείο για την αποτύπωση πληροφοριών για τα μέταλλα [25]. Οι συγκεκριμένοι χάρτες ήταν αρκετά χρήσιμοι για το σχεδιασμό κραμάτων καθώς προσφέρουν βασικές πληροφορίες όπως ποιος τύπος ερπυσμού κυριαρχεί στις τάσεις και ποιες οι θερμοκρασίες λειτουργίας.

Με βάση τα παραπάνω, το επόμενο βήμα είναι ποια μέθοδος ισχυροποίησης πρέπει να διαλέξει ο μηχανικός για το σχεδιασμό του κράματος.

Το 1958, ένας καθηγητής του πανεπιστημίου του Λένινγκραντ πέτυχε να δοθεί μια λογική εξήγηση του επιταχυνόμενου ερπυσμού, υποθέτοντας ότι ερπυσμός και φθορά είναι δύο ανεξάρτητες διαδικασίες [27,28]. Το όνομά του, L.Kachanov, και το έργο του αναπτύχθηκε και προόδευσε από μια σειρά επιστημόνων, Y.Rabotnov, N.Hoff και J.Hult [29-31].

Τέλος, ένας ακόμη επιστήμονας ο οποίος συνέβαλε στην έρευνα για το φαινόμενο του ερπυσμού ήταν ο F. Odqvist ο οποίος γεννήθηκε και μεγάλωσε στην Σουηδία. Πιο συγκεκριμένα, ο Odqvist ανέπτυξε τη μαθηματική θεωρία της παραμόρφωσης του ερπυσμού και αστοχίας λόγω ερπυσμού κυρίως με βάση την έννοια του συνεχούς μέσου. Η ενασχόληση του με τον ερπυσμό χρονολογείται από το 1934 [32].

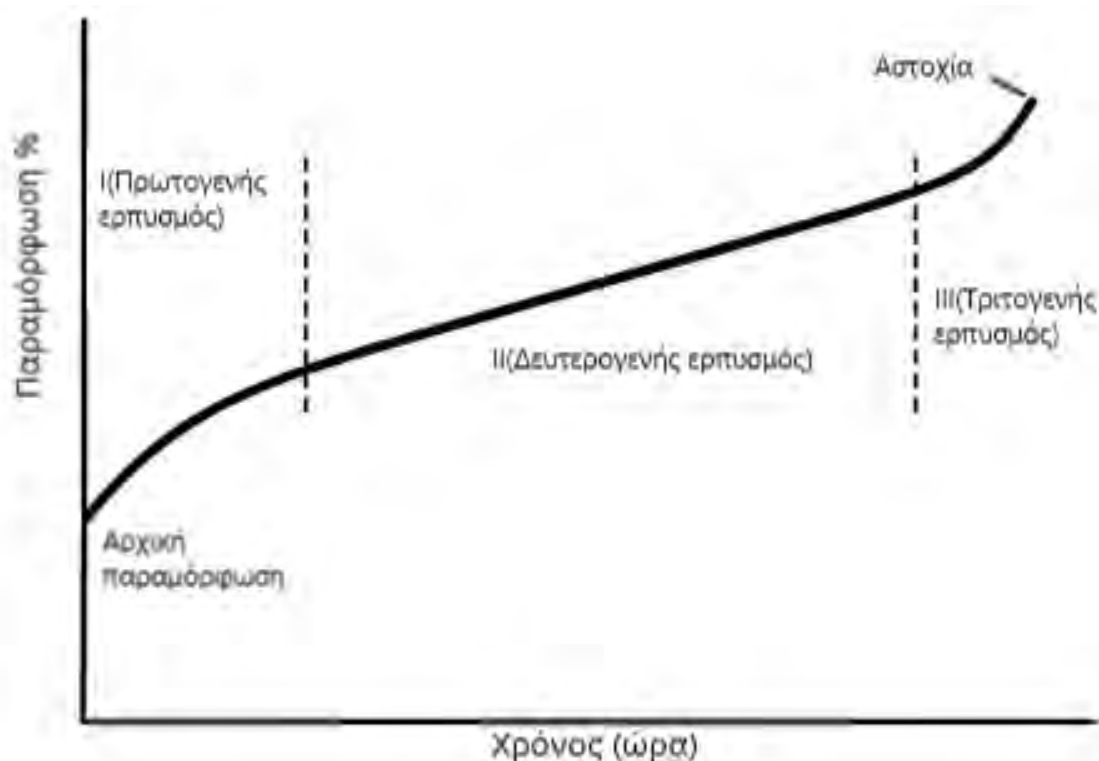
### 2.1.2 Βασικά χαρακτηριστικά ερπυσμού για τα μεταλλικά υλικά

Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες παραμόρφωσης: η ελαστική παραμόρφωση και η μη ελαστική παραμόρφωση. Το φαινόμενο του ερπυσμού όσο αφορά στα μεταλλικά υλικά κατατάσσεται στη δεύτερη κατηγορία, η οποία αφορά άλλα φαινόμενα όπως:

- Δυναμικά φαινόμενα γήρανσης: Τα φαινόμενα αυτά περιλαμβάνουν την σύνδεση και την εξάρτηση του ορίου ζωής από τη θερμοκρασία και το χρόνο έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Πλαστικότητα: Γενικότερα, φαινόμενα ροής που συμβαίνουν μετά την ελαστική παραμόρφωση. Αυτά εξαρτώνται από την ταχύτητα παραμόρφωσης και από την θερμοκρασία.
- Κυκλική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης: Αναλυτικότερα το φαινόμενο Bauschinger, η κυκλική ενδοτράχυνση και η κυκλική αποσκλήρυνση.

Στο σχήμα 2.1i παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαφορετικά στάδια του ερπυσμού σε ένα μεταλλικό υλικό με την πάροδο του χρόνου.

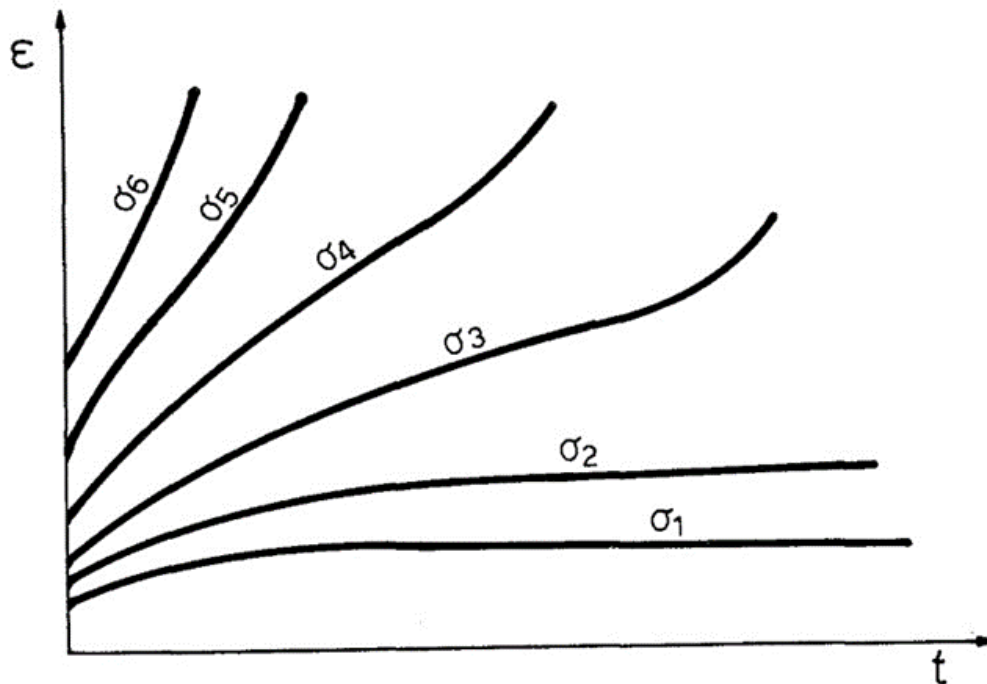
- Αρχική (ελαστική) παραμόρφωση: Εξαιτίας της αρχικής επιβολής φορτίου προκαλείται ελαστική παραμόρφωση  $\epsilon_e$ .
- Στάδιο I (Πρωτογενής ερπυσμός ή μεταβατικός ερπυσμός): Κατάσταση κατά την οποία η ταχύτητα της παραμόρφωσης είναι πολύ χαμηλή.
- Στάδιο II (Δευτερογενής ερπυσμός ή ομοιόμορφος ερπυσμός): Κατάσταση κατά την οποία η ταχύτητα ερπυσμού είναι σχεδόν σταθερή.
- Στάδιο III (Τριτογενής ερπυσμός ή επιταχυνόμενος ερπυσμός): Η ταχύτητα ερπυσμού αυξάνεται μέχρι το υλικό να οδηγηθεί στην αστοχία.



Εικόνα 2.1.2 i: Καμπύλη Ερπυσμού [33].

Η παραπάνω καμπύλη προέκυψε με τη βοήθεια δοκιμίου το οποίο φορτίζεται με μια σταθερή τάση. Ταυτόχρονα, το δοκίμιο εκτίθεται σε υψηλή σταθερή θερμοκρασία. Επομένως, υπολογίζεται η παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου. Ο χρόνος μπορεί να είναι μήνες ενώ υπάρχουν και κάποια πειράματα που διαρκούν χρόνια. Για τη πραγματοποίηση του πειράματος απαιτείται σημαντικός εξοπλισμός αφού η ευαισθησία μέτρησης της παραμόρφωσης καθιστά τη διαδικασία πιο επίπονη από το αναμενόμενο [34,35].

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την επίδραση της εφαρμοσμένης τάσης στην καμπύλη ερπυσμού. Αποδεικνύεται ότι για καθορισμένα τα στάδια της καμπύλης ερπυσμού, μπορεί να ληφθεί για ορισμένους μόνο συνδυασμούς τάσης και θερμοκρασίας.

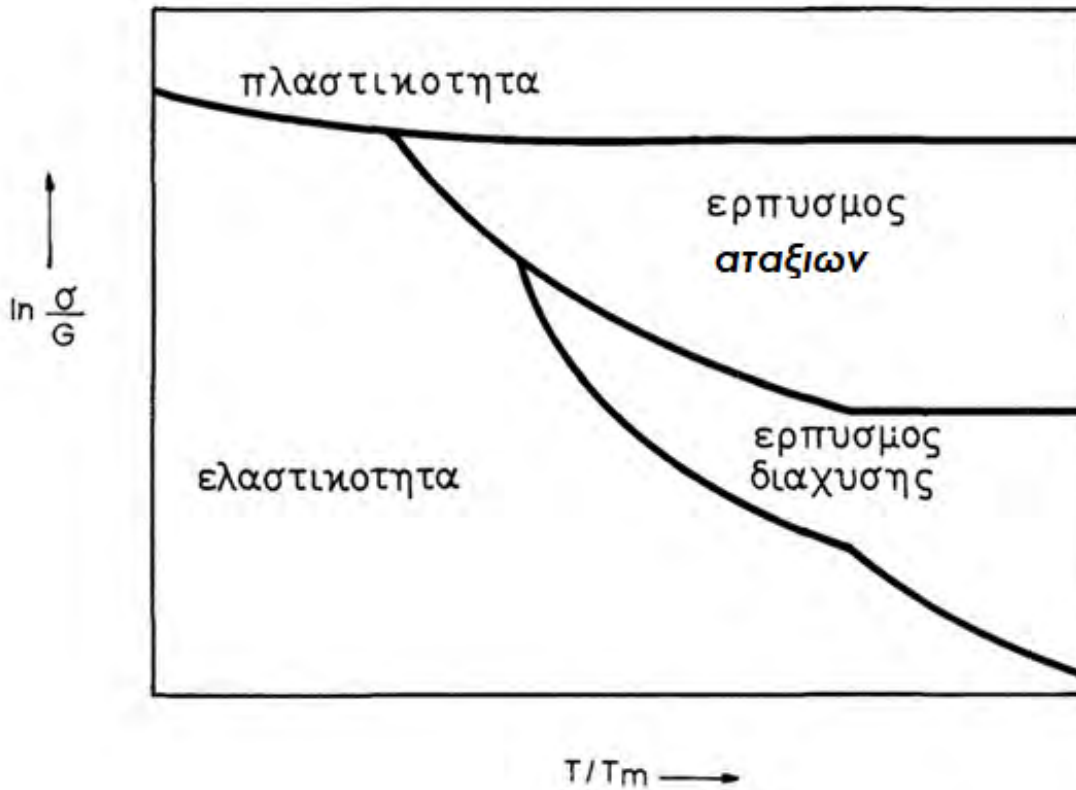


Εικόνα 2.1.2 ii: Επίδραση της τάσης στις καμπύλες ερπυσμού σε σταθερή θερμοκρασία [36].

### 2.1.3. Παραμόρφωση μεταλλικών υλικών λόγω ερπυσμού

Οι σημειακές και οι γραμμικές ατέλειες αποτελούν τα κύρια αίτια ανάπτυξης της μη ελαστικής παραμόρφωσης σε ένα στερεό υλικό. Η κίνηση των ατελειών πραγματοποιείται μέσω των κόκκων ή γύρω από τους κόκκους του πλέγματος (αταξίες) [37].

Στην επόμενη εικόνα αποτυπώνεται ένας τυπικός χάρτης παραμόρφωσης. Ο κάθετος άξονας είναι της μορφής  $\ln \frac{\sigma}{G}$ , όπου  $G$  το μέτρο διάτμησης. Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει την ομόλογη θερμοκρασία  $T/T_m$ , όπου  $T_m$  το σημείο τήξης. Όπως φαίνεται, το διάγραμμα αποτελείται από τμήματα όπου καλύπτουν την περιοχή της τάσης και της θερμοκρασίας στην οποία επικρατεί ένας συγκεκριμένος μηχανισμός παραμόρφωσης. Αμελώντας την ελαστική περιοχή και την πλαστική περιοχή, η ερπυστική περιοχή αποτελείται από δυο μέρη: την περιοχή διάχυσης (σημειακές ατέλειες) και την περιοχή (κίνησης) των αταξιών [38].



Εικόνα 2.1.3 i: Τυπικός χάρτης μηχανισμών παραμόρφωσης Ashby[36].

### 2.1.3.1. Ερπυσμός διάχυσης

Ο μηχανισμός με τον οποίο πραγματοποιείται η διάχυση στα κρυσταλλικά υλικά είναι η μετάσταση των ατομικών κοιλοτήτων. Τα άτομα που υπάρχουν στο πλέγμα δεν βρίσκονται συνήθως σε θερμική ισορροπία εξαιτίας της υψηλής ενέργειας που περιέχουν, ένα γεγονός που ισχύει για τη διάχυση στο εσωτερικό των κόκκων. Παρ' αυτά, η διάχυση κατά μήκος των ορίων των κόκκων μπορεί επίσης να εξηγηθεί με μηχανισμούς διάχυσης ατομικών κοιλοτήτων [39]. Η ροή που προκαλείται λόγω της διάχυσης μέσω ή γύρω από τους κόκκους στα πολυκρυσταλλικά υλικά είναι υπεύθυνη για τη μακροσκοπική παραμόρφωση αφού συνδέεται με τις μετατοπίσεις ολίσθησης στα επίπεδα των ορίων των κόκκων.

Οι πρώτες εξισώσεις για τον ερπυσμό διάχυσης διατυπώθηκαν από τον F.Nabarro [40] και G. Herring [41] οι οποίοι απέδειξαν πως η ροή των ατομικών κοιλοτήτων μέσω ή γύρω από τους κόκκους είναι ο λόγος ώστε αυτοί να επιμηκυνθούν στην διεύθυνση της εφελκυστικής τάσης που ασκείται σε ένα μεταλλικό υλικό.

Η γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας ερπυσμού  $\dot{\epsilon}$  με την τάση και οι πολύ μικρές παραμορφώσεις σε σχέση με τον ερπυσμό αταξίων αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό του ερπυσμού διάχυσης. Η προαναφερθέντα σχέση παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\dot{\epsilon} = \frac{14\sigma\Omega}{kT} \frac{1}{d^2} D_v \left(1 + \frac{\pi\delta_D D_B}{d D_v}\right)$$

όπου  $\Omega$  είναι ο ατομικός όγκος,  $d$  το μέγεθος κόκκου,  $D$  συντελεστής διάχυσης κόκκου,  $D$  συντελεστής διάχυσης ορίου κόκκου και  $\delta$  η ενεργή διατομή του ορίου κόκκου για διάχυση,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία και  $k$  η σταθερά Boltzmann [42].

### 2.1.3.2. Γραμμοαταξιακός ερπυσμός

Ο Bailey και Gowran ήταν οι πρώτοι οι οποίοι διατύπωσαν την ιδέα ότι ο κοινός παρονομαστής όλων των θεωριών γραμμοαταξιακού ερπυσμού είναι η γνώση πως το υλικό σκληραίνει ταυτόχρονα με την πρόοδο της παραμόρφωσης και μειώνεται η σκληρότητά του με το χρόνο ενώ θερμαίνεται [43] [44].

Το μεταλλικό υλικό, καθώς βρίσκεται σε θερμοκρασία που ισούται με το ένα τρίτο της απόλυτης θερμοκρασίας τήξης, επιτρέπει στις αταξίες να αποκτήσουν έναν νέο βαθμό ελευθερίας. Αυτό συμβαίνει γιατί, πέρα από την ολίσθηση, η ύπαρξη της αναρρίχησης δίνει τη δυνατότητα στις αταξίες να μην κινούνται αποκλειστικά στα επίπεδα ολίσθησής τους. Η δομή των αταξιών υφίσταται τη λεγόμενη αποκατάσταση κάτι που σημαίνει ότι αν μία αταξία εμποδίζεται από ένα εμπόδιο, τότε η διαδικασία αποκατάστασης θα την απελευθερώσει, επιτρέποντας την να ολισθήσει μέχρι το επόμενο εμπόδιο. Οι παραπάνω μηχανισμοί που αφορούν στη διαδοχή ολίσθησης και αναρρίχησης αταξιών ονομάζονται μηχανισμοί ενδοτράχυνσης-αποκατάστασης. Οι μηχανισμοί αυτοί διαφέρουν από τους μηχανισμούς πλαστικής ροής σε χαμηλότερες θερμοκρασίες στο ότι οι διαδικασίες σε ένα ατομικό επίπεδο είναι η διαχυτική κίνηση των ατομικών κενών προς ή από την αταξία που ολισθαίνει περισσότερο παρά η ολίσθηση των αταξιών στο σύνολο τους.

### 2.1.3.3. Αστοχία μεταλλικού υλικού λόγω ερπυσμού (Μηχανισμοί)

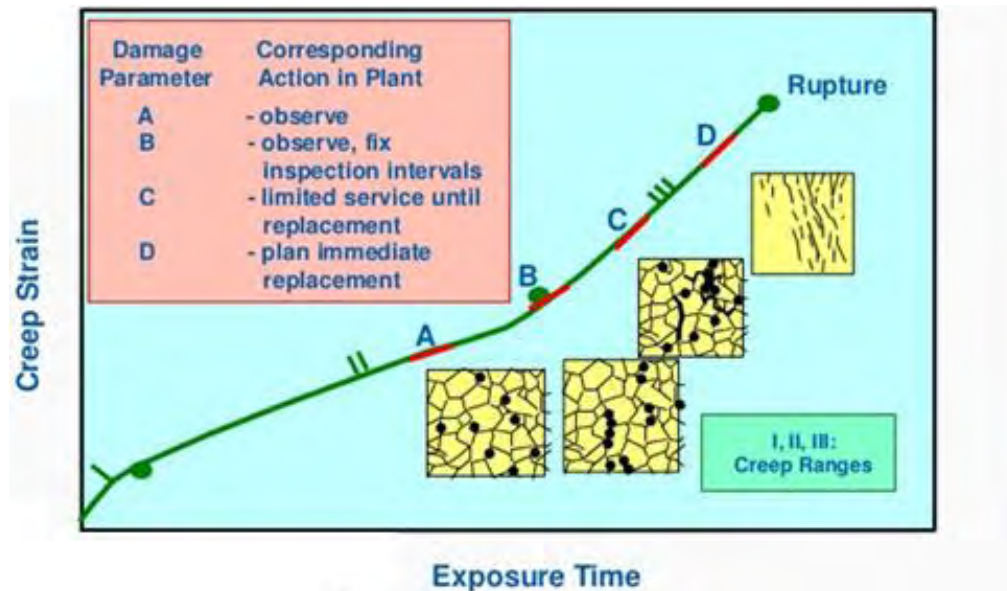
Η αστοχία του υλικού εξαιτίας του συγκεκριμένου φαινομένου ολοκληρώνεται στο τρίτο στάδιο. Αυτή συμβαίνει εξαιτίας του σχηματισμού και της ένωσης των πόρων (κοιλοτήτων) στα όρια των κόκκων κάτι που σημαίνει ότι η θραύση μπορεί να χαρακτηριστεί ως διακρυσταλλική. Οι πόροι μπορεί να έχουν προκύψει ακόμη και στο πρώτο στάδιο του ερπυσμού. Για αρχή, αυτοί επηρεάζουν αμελητέα την ταχύτητα παραμόρφωσης αλλά καθώς πολλαπλασιάζονται και εξαπλώνονται στο υλικό η επίδρασή τους γίνεται σημαντική.

Ο ρυθμός ερπυσμού ο οποίος επιταχύνεται μπορεί να προκληθεί λόγω της μικροδομής του υλικού. Τα σωματίδια δεύτερης φάσης, που υπάρχουν στα μεταλλικά υλικά, αποτελούν εμπόδια στην κίνηση των γραμμοαταξιών, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, και ενδυναμώνουν την



αντοχή του υλικού σε ερπυσμό. Από την άλλη πλευρά, όμως, υπάρχουν πιθανότητες να αναπτυχθούν μεγαλύτερα σωματίδια εξαφανίζοντας τα μικρότερα με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο ρυθμός ερπυσμού. Για υπερκράματα Ni με αρκετό αριθμό σωματιδίων, ο Dyson-McLean απέδειξε ότι το τρίτο στάδιο του ερπυσμού δεν μπορεί να εξηγηθεί με την ανάπτυξη των σωματιδίων [45]. Ένας άλλος λόγος που προκαλεί την επιτάχυνση του ρυθμού του ερπυσμού κατά το τρίτο στάδιο είναι η διάβρωση στην επιφάνεια ή κάτω από αυτή. Η εσωτερική οξείδωση και ο σχηματισμός ρωγμής αποτελούν είδη αυτής της διάβρωσης.

Στην αρχή υπετέθη πως ο σχηματισμός των πόρων οφειλόταν στη ρήξη των ατομικών δεσμών κάτι το οποίο απαιτεί πολύ υψηλές τάσεις που δεν είναι διαθέσιμες. Οι Raj-Ashby ήταν αυτοί που επανέφεραν την ιδέα της συμπύκνωσης των ατομικών κοιλοτήτων [46] [47]. Οι εργασίες τους βασίστηκαν σε μια γενίκευση της θεωρίας των θερμικά ενεργοποιούμενων διαδικασιών που αναπτύχθηκε από τους Wolmer - Weber (1926), Becker - Döring (1935) και Zeldovich (1943) [48, 49]. Στην ανάλυση των Raj - Ashby η κινούσα δύναμη για τη συμπύκνωση των κοιλοτήτων είναι η τάση, ενώ προηγουμένως ερευνητές θεώρησαν τον υπερκορεσμό των κενών που προκαλείται από τις αντιδράσεις των αταξιών σαν κινούσα δύναμη [50]. Οι Brailsford - Bullough [51] ανέπτυξαν μια πλήρη θεωρία για τις συγκεντρώσεις κενών που προκαλούνται λόγω της ακτινοβολίας.



Εικόνα 2.1.3.3 i: Κατάταξη σταδίων ερπυσμού, αντιστοίχισή τους με τη μικροδομή και προτεινόμενες ενέργειες αποκατάστασης [1].

#### 2.1.4 Περιπτώσεις εξέλιξης φαινομένων ερπυσμού

Οι συνηθέστερες περιπτώσεις όπου εκδηλώνεται το παραπάνω φαινόμενο είναι οι εξής:

1. Σταδιακή παραμόρφωση και διάρρηξη δικτύων σωληνώσεων μεταφοράς ατμού υπό την επίδραση του ίδιου του βάρους τους σε εγκαταστάσεις ατμοηλεκτρικών σταθμών
2. Παραμόρφωση των αντιστάσεων των κλιβάνων
3. Αστοχία σε εξαρτήματα στο εσωτερικό θαλάμων καύσης
4. Ερπυσμός των παγετώνων των Πόλων της Γης. Εξαιτίας της μικρής διαφοράς της θερμοκρασίας τους με το σημείο τήξης τους (0 °C), υπό την επίδραση του βάρους τους εκδηλώνεται το φαινόμενο του ερπυσμού και ξεκινάνε να παραμορφώνονται πλαστικά στα θεμέλια τους και να θρυμματίζονται.
5. Πρόβλημα ερπυσμού στις πτερωτές αεροστρόβιλων και ατμοστρόβιλων.

## 2.2 Μεταλλογραφία με Replica

Είναι ευρύτατα γνωστό ότι η μεταλλογραφία με replica αποτελεί μια διαδεδομένη και πρακτική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για μελέτη μικροδομής σε μεταλλικά δείγματα σε συγκεκριμένες περιστάσεις αντικαθιστώντας την τυπική μεταλλογραφία όπου αυτή δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι ότι όντας μια μη καταστρεπτική τεχνική καθιστά την επί τόπου (in situ) μεταλλογραφία εφικτή. Η 'επί τόπου' μεταλλογραφία ορίζεται ως η διαδικασία μεταλλογραφίας κατά την οποία δεν υπάρχει ανάγκη κοπής ή καταστροφής της μεταλλικής κατασκευής η οποία προορίζεται για μελέτη. Η συγκεκριμένη μέθοδος μεταλλογραφίας παρέχει στον μηχανικό πληροφορίες και αποτελέσματα ανάλογης ποιότητας με τα αποτελέσματα που θα κατέληγε στο εργαστήριο με καταστροφικές μεθόδους. Οι συνηθέστερες εγκαταστάσεις στις οποίες εφαρμόζεται η 'επί τόπου' μεταλλογραφία είναι οι αγωγοί φυσικού αερίου και πετρελαίου, τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και κατά τον έλεγχο ποιότητας συγκολλήσεων σε μεταλλικές κατασκευές.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου μεταλλογραφίας με replica παρατίθενται παρακάτω:

### Πλεονεκτήματα

- Είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος.
- Προσφέρει υψηλής ποιότητας αποτελέσματα για μια μεγάλη ποικιλία υλικών.
- Είναι μια οικονομική μέθοδος. Κάποιες μεταλλογραφικές μελέτες απαιτούν εξέταση μεγάλης ποσότητας δειγμάτων τα οποία για να αφαιρεθούν από τις κατασκευές οδηγούν σε μεγάλο κόστος.
- Δείγματα με ανώμαλο μέγεθος, σχήμα και διαστάσεις τείνουν να γίνονται εφικτά για μεταλλογραφική μελέτη αφού οι replicas είναι ιδανικές για επίπεδες, καμπύλες ή ανώμαλες επιφάνειες.

### Μειονεκτήματα

- Replicas χρησιμοποιούνται μόνο για μελέτη της επιφανειακής μικροδομής μιας κατασκευής.
- Για να εφαρμοστεί η μέθοδος απαιτείται φορητός εξοπλισμός.
- Η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως χρονοβόρα και επίπονη σε περιπτώσεις όπου το περιβάλλον μελέτης είναι μολυσμένο ή ομιχλώδες.

#### 2.2.1 Απαραίτητη προετοιμασία δείγματος

Οι μηχανικές κατασκευές που χρειάζονται μεταλλογραφία μέσω replica συνήθως έχουν υποστεί διάβρωση ή οξειδωση σε κάποιο σημείο της επιφάνειάς τους ή υπάρχει ένα απανθρακωμένο στρώμα που πρέπει να αφαιρεθεί για να πραγματοποιηθεί με αξιόπιστο τρόπο η αποτύπωση της μικροδομής στη replica. Ο εξοπλισμός που χρειάζεται στο εργοτάξιο για την προετοιμασία της επιφάνειας από την οποία θα ληφθεί η replica δηλ. φορητές λειαντικές και στίλβωτικές μηχανές, είναι εμπορικά διαθέσιμος και ο μηχανικός μπορεί εύκολα να ολοκληρώσει τα βήματα προετοιμασίας όπως ακριβώς θα έκανε και στο εργαστήριο. Για την αναγνώριση μικροδομών που έχουν υποστεί συγκεκριμένη αστοχία όπως ερπυσμό, οι διαδικασίες της στίλβωσης και της χημικής προσβολής επαναλαμβάνονται αρκετές φορές μέχρι την ύπαρξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

#### 2.2.2 Τεχνικές

Οι μέθοδοι της μεταλλογραφίας με replica μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: replica επιφάνειας και replica απόσπασης. Η πρώτη κατηγορία προσφέρει τη μεταλλογραφία της επιφάνειας ενός δείγματος ενώ η replica απόσπασης, όπως αναφέρεται και στο όνομά της, αποσπά μικροσωματίδια από το δείγμα. Κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των παραπάνω κατηγοριών παρατίθενται στον Πίνακα 4.

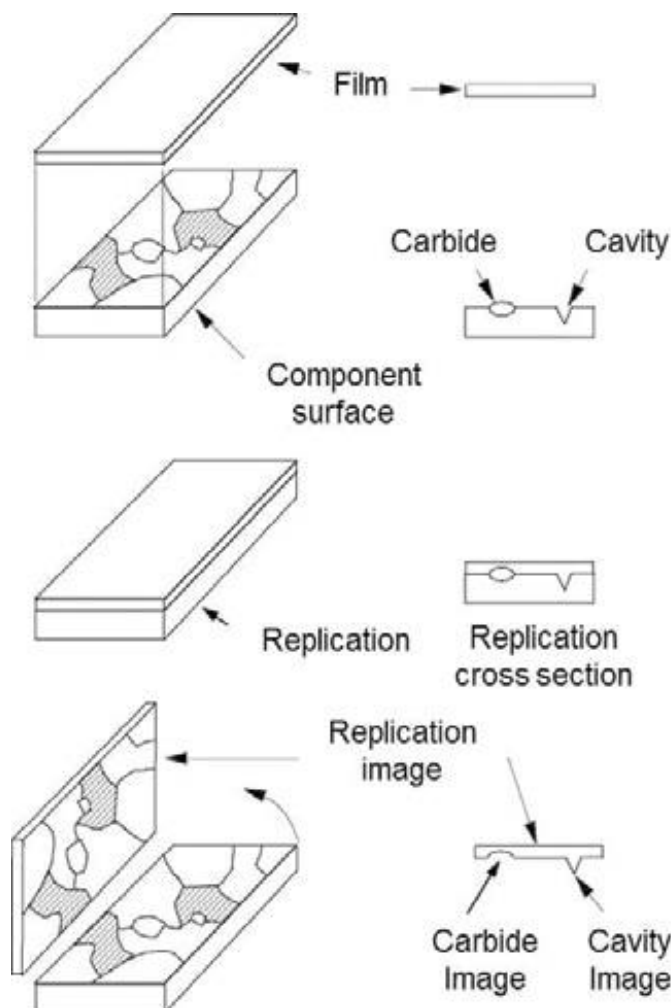
Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα είδη replicas [53].

Τύπος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Replica Επιφάνειας</b>		
Οξικού Άλατος	Άριστη αποτύπωση	Απαιτείται επένδυση
Ακρυλική	Άμεση προβολή	Προσκόλληση
Ελαστικού υλικού	Αφαιρείται εύκολα	Μέτρια ποιότητα αποτύπωσης μικροδομής

Replica Απόσπασης		
Πλαστική (άμεσης αφαίρεσης)	Εύκολη προετοιμασία	Μειωμένη συγκράτηση σωματιδίων
Positive Carbon	Άριστη συγκράτηση σωματιδίων μετά από διπλή χημική προσβολή	Απαιτείται επένδυση
Direct Carbon	Άριστη αποτύπωση μικροδομής	Δεν πραγματοποιείται σε in-situ εφαρμογές

## Replica Επιφάνειας

Η δημιουργία replica από μία επιφάνεια μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε άμεσα είτε με έμμεσες μεθόδους. Όσο αφορά στις άμεσες, η replica αποτυπώνει τη μικροδομή της επιφάνειας του δείγματος και επακολούθως, μελετάται σε οπτικό μικροσκόπιο. Σχετικά με τις έμμεσες μεθόδους, η τελική προς ανάλυση replica αποτυπώνει τη μικροδομή που έχει αποτυπωθεί στην πρωτεύουσα replica που έχει εξαχθεί προηγουμένως από την επιφάνεια του δοκιμίου προς εξέταση. Συνήθως, για τη άμεση μέθοδο χρησιμοποιούνται replica από πλαστικό, άνθρακα ή οξειδίου.



Εικόνα 2.2.2 i: Σχηματική παρουσίαση διαδικασίας μεταλλογραφίας με πλαστική replica [52]

Η μεταλλογραφία με πλαστικές replica είναι μία μη καταστρεπτική μέθοδος. Οι συγκεκριμένες replica εξετάσσονται με οπτικό μικροσκόπιο καθώς και με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM(Scanning Electron Microscope). Όπως παρουσιάζεται στην Εικ. 2.2.2i , η τεχνική της πλαστικής replica περιλαμβάνει ένα λεπτό πλαστικό φιλμ και ένα διαλυτικό μέσο με τη βοήθεια του οποίου εφαρμόσει πάνω στην επιφάνεια και προσκολλάται σε αυτή. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, αυτή σκληραίνει καθώς το διαλυτικό μέσο εξατμίζεται. Έπειτα, αφαιρείται προσεκτικά από την επιφάνεια και η replica περιέχει τη μικροδομή της επιφάνειας η οποία είναι έτοιμη προς παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο ή μετά από μερική προετοιμασία στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Μερικά πλεονεκτήματα της μεταλλογραφίας με replica σε σχέση με τη χρήση φορητών μικροσκοπίων για in-situ μεταλλογραφία είναι τα εξής:

- Η replica λαμβάνεται και αποθηκεύεται για μελλοντική ανάλυση.
- Ποιοτικότερη μικροδομή και καλύτερη ακρίβεια.
- Η replica μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την τεχνική εξαγωγής replica επιφανείας είναι η replica από ασετόνη, η ακρυλική και από καουτσούκ. Η επιλογή υλικού εξαρτάται από τη γεωμετρία του δείγματος και τα χαρακτηριστικά της μικροδομής.

Κατά τη μέθοδο που πραγματοποιείται χρήση replica από ασετόνη, ένα φιλμ διαβρέχεται με ασετόνη και προσκολλάται στην επιφάνεια του δείγματος. Με στόχο την βελτίωση της ποιότητας μικροδομής, η πίσω επιφάνεια της replica βάφεται με μαύρο χρώμα γρήγορης εξάτμισης ή μελάνι πριν την αφαίρεση από το δείγμα.

Σχετικά με την ακρυλική replica επιφανείας, απαιτείται η μίξη σκόνης με συγκεκριμένο υγρό για να αποτυπωθεί η μικροδομή της επιφάνειας του δείγματος στη replica. Μετά την παραπάνω διαδικασία και τη σκλήρυνση του υγρού μίγματος, η replica είναι διαθέσιμη να μελετηθεί στο οπτικό μικροσκόπιο χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Εάν η προσκόλληση αποτελεί πρόβλημα , μια σύνθετη replica από στρώμα βερνικιού υλικού Parlodian μπορεί να χρησιμοποιηθεί πριν την ακρυλική replica.

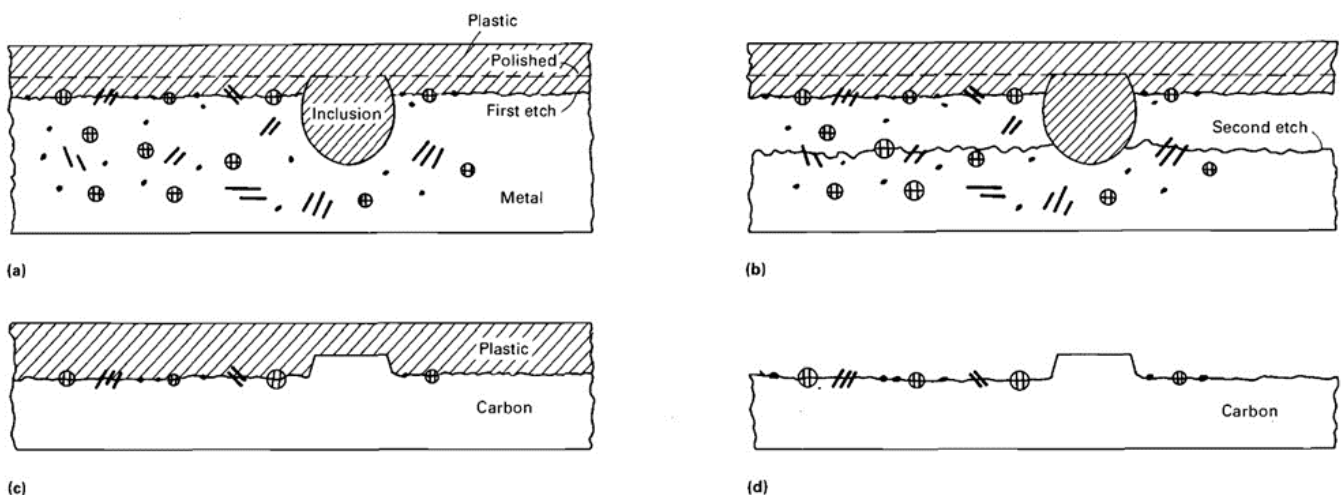
Κατά τη μέθοδο όπου γίνεται χρήση replica από ελαστικό υλικό, υγρό ελαστικό υλικό περιχύνεται στην επιφάνεια του δείγματος έτσι ώστε να δημιουργηθεί η replica. Μετά την αφαίρεση, η replica μπορεί να μελετηθεί άμεσα. Με την κατάλληλη επένδυση η ποιότητα μικροδομής της βελτιώνεται.

## **Replica Απόσπασης**

Πολλές τεχνικές με replica απόσπασης χρησιμοποιούνται για να χαρακτηριστούν μικρά σωματίδια που εμπεριέχονται στη μήτρα της μικροδομής του δείγματος που αναλύεται.

Έπειτα από επιμελή προετοιμασία της επιφάνειας, για την δημιουργία της συγκεκριμένης replica απαιτείται η έντονη χημική προσβολή με αποτέλεσμα τη διακριτοποίηση των σωματιδίων. Όσο αφορά στη replica Positive Carbon, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 2.2.2ii, ένα κομμάτι φιλμ από πολυμερές (πλαστικό) με διαλυτικό μέσο προσκολλάται στην επιφάνεια η οποία έχει υποστεί την πρώτη της χημική προσβολή. Όταν το μέσο εξατμιστεί, ακολουθούνται τα εξής βήματα: το φιλμ αφαιρείται από το δείγμα και είναι έτοιμο για ανάλυση ή το δείγμα μπορεί να υποστεί δεύτερη χημική προσβολή για να απελευθερωθούν τα σωματίδια τα οποία εκτέθηκαν από την πρώτη χημική προσβολή. Κατά την δεύτερη χημική προσβολή, το δείγμα μπορεί να προσβληθεί μέσω της πλαστικής replica καθώς τα περισσότερα πλαστικά υλικά αντιδρούν εύκολα. Το υλικό από άνθρακα προσκολλάται στην πλαστική replica. Η τελευταία αφαιρείται και δημιουργείται η επιθυμητή replica.

Εικόνα 2.2.2 ii: Replica Απόσπασης Positive Carbon α) Τοποθέτηση πλαστικού μετά την πρώτη χημική προσβολή. β) Μετά τη δεύτερη χημική προσβολή γ) Τοποθέτηση Carbon δ) Αφαίρεση πλαστικού και δημιουργία επιθυμητής replica. [52]

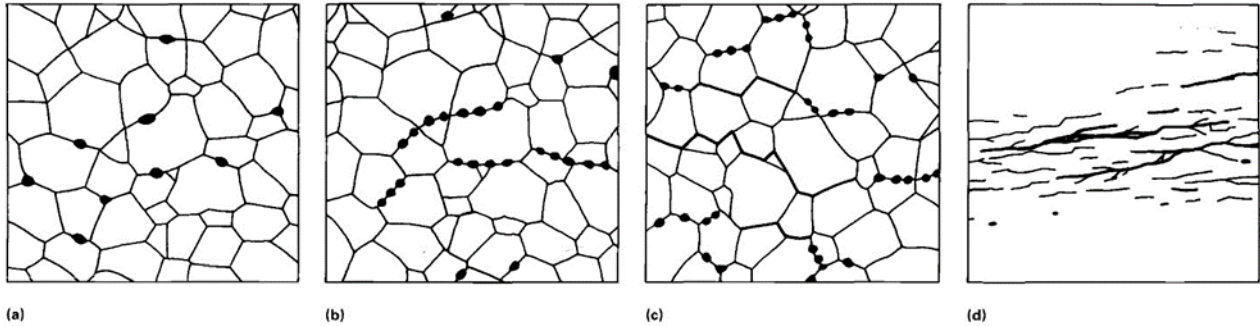


### 2.2.3. Replica -Φαινόμενο του ερπυσμού

Τα προβλήματα λόγω ερπυσμού προκαλούνται στην πλειονότητά τους σε μηχανολογικές κατασκευές σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας οι οποίες εκτίθενται σε

υψηλές θερμοκρασίες και φορτίζονται με τάσεις. Η μέθοδος της replica αποτελεί τον καταλληλότερο τρόπο για τον εντοπισμό των παραπάνω προβλημάτων. Η συγκεκριμένη

#### Replication Microscopy Techniques for NDE / 55



Εικόνα 2.2.3 i: Απεικόνιση σχηματισμών ρηγματώσεων λόγω ερπυσμού. a) Μικρές κοιλότητες b) Σύνδεση μεταξύ κοιλότητων c) Σχηματισμός ενδοκοκκικών ρηγματών d) Δημιουργία ρηγματών (Αστοχία) [52].

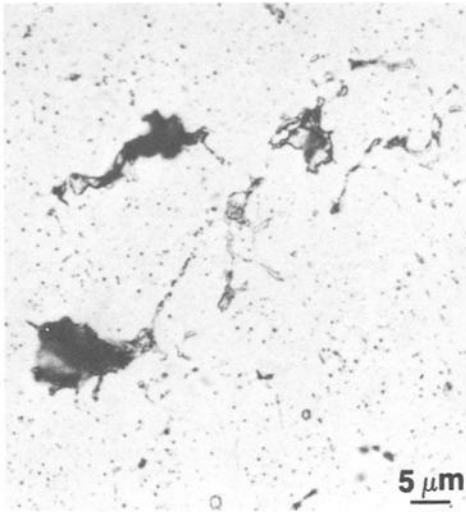
μέθοδος χαρακτηρίζεται ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής κατασκευών όπως αυλοί για λέβητες, αγωγοί ατμού και εξαρτήματα τουρμπίνας. Σχετικά με άλλες μη-καταστρεπτικές μεθόδους, η μεταλλογραφία με replica εντοπίζει τα φαινόμενα ερπυσμού σε πολύ αρχικό στάδιο συγκριτικά με αυτές. Αυτά τα φαινόμενα ξεκινούν με την μορφή οπής ή κοιλότητας στα όρια των κόκκων ή σε δευτερογενείς φάσεις. Με την πάροδο του χρόνου και με την άσκηση τάσης, οι οπές συνδέονται μεταξύ τους και αποκτούν την μορφή ρηγματώσεων με αποτέλεσμα την αστοχία της μηχανολογικής κατασκευής [Εικόνα 2.2.3 ii ].

Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής υπολογίζεται με τη βοήθεια εκτιμήσεων, που διατυπώνονται στον παρακάτω πίνακα και συνοδεύονται από αντίστοιχους υπολογισμούς με βάση τους κώδικες API.

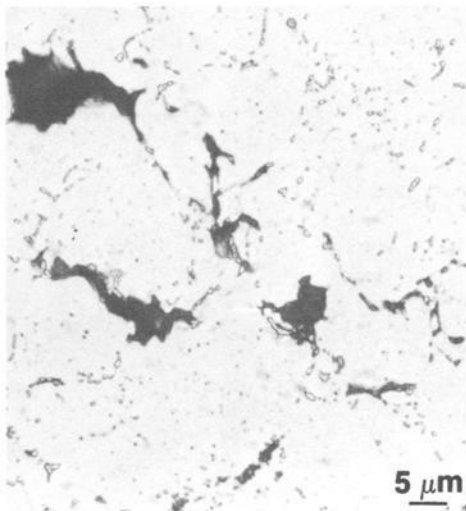
Πίνακας 5: Κατάταξη αστοχίας λόγω ερπυσμού [52].

Στάδιο	Κατάσταση	Διαδικασία
1	Χωρίς σημάδια ερπυσμού	Καμία
2	Μερικές κοιλότητες	Επανεξέταση μετά από 20000 ώρες λειτουργίας
3	Συμφυείς κοιλότητες	Επανεξέταση μετά από 15000 ώρες λειτουργίας
4	Μικροσκοπικές ρηγματώσεις λόγω ερπυσμού	Επανεξέταση μετά από 10000 ώρες λειτουργίας
5	Μακροσκοπικές ρηγματώσεις λόγω ερπυσμού	Διαχείριση κατάστασης από ειδικούς μηχανικούς

Η εικόνα απεικονίζει τη σύγκριση μεταξύ της μικροδομής που παρουσιάζει μία replica επιφάνειας και το αντίστοιχο δείγμα που έχει υποστεί ερπυσμό.



(a)



(b)

Εικόνα 2.2.3 iii: Σύγκριση οπών λόγω ερπυσμού μεταξύ α) replica επιφάνειας β) μικροδομή δείγματος που έχει υποστεί ερπυσμό [52].

## Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διαδικασία

### 3.1 Προετοιμασία των δειγμάτων

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής μελέτης, δείγματα από τα υλικά που προαναφέρθηκαν εξετάστηκαν και προετοιμάστηκαν καταλλήλως για να βελτιστοποιηθεί η απεικόνιση της μικροδομής τους στις αντίστοιχες replicas. Αναλυτικότερα, τέσσερα δείγματα χρησιμοποιήθηκαν από το κράμα υψηλής αντοχής PARALLOY H39WM και ένα δείγμα από το κράμα Νικελίου INCOLOY 800HT.



Το πρώτο υλικό που μελετήθηκε ανήκει στην κατηγορία των HP (High performance) κραμάτων χάλυβα ενώ το δεύτερο ανήκει στην σειρά Incoloy 800 κραμάτων Νικελίου και στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται η σύσταση του κάθε υλικού:

Πίνακας 6: Σύσταση κράματος χάλυβα H39WM και κράματος Νικελίου Incoloy 800HT

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Mo	Al	Ti
H39WM	0.4	1.5	1.0	-	-	25.0	35.0	1.2	-	-	-
INCOLOY 800HT	0.1	0.27	1.15	-	-	22.0	31.8	-	-	0.44	0.48

Πριν την μεταλλογραφία με replica, για να πραγματοποιηθεί η μεταλλογραφική παρατήρηση των ανώτερων δοκιμίων των παραπάνω υλικών ακολουθήθηκαν οι εξής διαδικασίες:

- Κοπή του δοκιμίου
- Εγκιβωτισμός
- Λείανση
- Χημική προσβολή
- Παρατήρηση στο μικροσκόπιο

Τα δείγματα κοπήκαν σε κατάλληλο μέγεθος έτσι ώστε να είναι κατάλληλα για την ανάλυση με μικροσκόπιο. Ακολουθεί η διαδικασία της λείανσης με στόχο την άριστη και λεία επιφάνεια του δείγματος. Τέλος, χημική προσβολή πραγματοποιείται στα δείγματα έτσι ώστε να γίνει πιο διακριτή η μικροδομή των δοκιμίων.

Κατά την λείανση χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά SiC 80, 120, 220, 320, 500, 800,1000 grit.

Βασική ήταν η διαδικασία της χημικής προσβολής που ακολούθησε την λείανση καθώς αποτέλεσε το παράγοντα που ρύθμιζε την ποιότητα των μικροδομών από τις replica. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε χημική προσβολή χρησιμοποιώντας κατάλληλα όπως το αντιδραστήριο Kalling's και το αντιδραστήριο Marbles με σκοπό την αποκάλυψη της μικροδομής. Τα αντιδραστήρια παρέμεναν αρκετά δευτερόλεπτα πάνω στα δείγματα με σκοπό την υπερπροσβολή (overetching). Έπειτα από πολλές δοκιμές με τα δύο αντιδραστήρια επιλέχθηκε ως καταλληλότερο αντιδραστήριο Marbles .

### 3.2 Διαδικασία εξαγωγής Replica

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξήχθη μια σειρά από replicas με στόχο την βελτιστοποίηση της ποιότητας της μικροδομής των δειγμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν replicas επιφανείας και πιο συγκεκριμένα 'φύλλα' replica για αποτύπωση μικροδομής της εταιρείας Struers κατασκευασμένες από οξική κυτταρίνη (cellulose acetate) με επένδυση αλουμινίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2i.



*Εικόνα 3.2 i: Φύλλα replica για αποτύπωση μικροδομής STRUERS [53]*

Εικόνα 3.2 ii: Υγρό μίγμα STRUERS. [53]



Η κάθε replica προσκολλήθηκε στην επιφάνεια του κάθε δείγματος προς ανάλυση με τη βοήθεια ενός υγρού μίγματος που δίνεται από την εταιρεία [Εικόνα

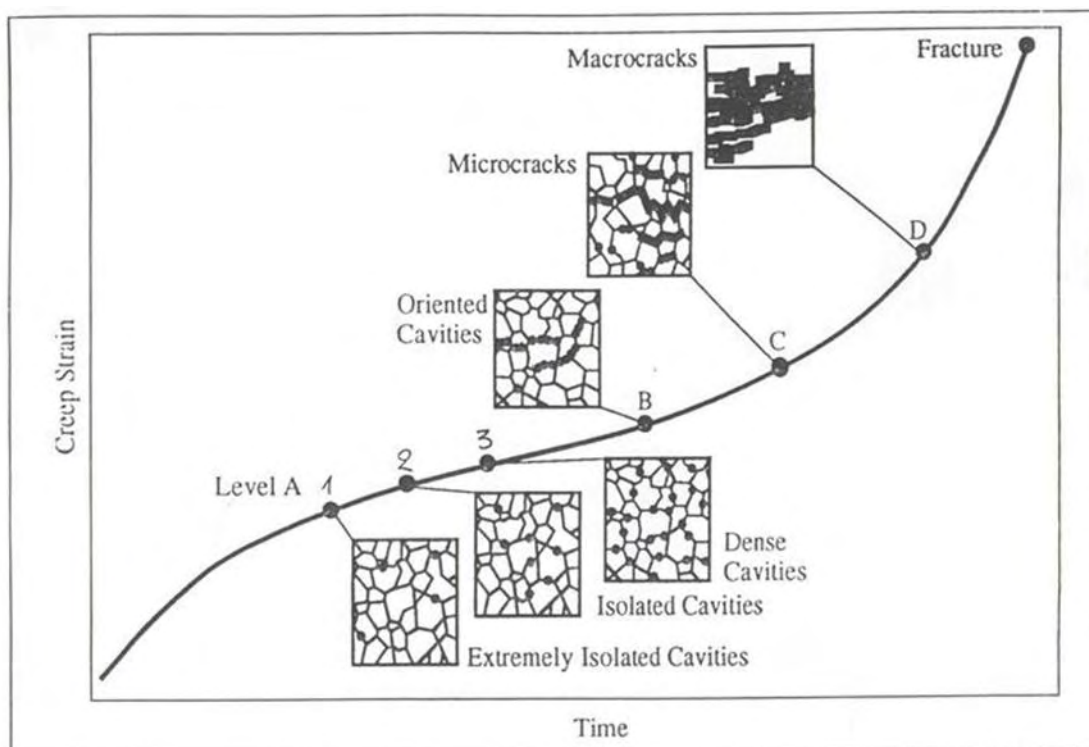


Εικόνα 3.2 iii: Συνολικός εξοπλισμός διαδικασίας. [53]

3.2ii]. Η διαδικασία περιλάμβανε έγχυση ελάχιστης ποσότητας του υγρού στην επιφάνεια της replica με τη βοήθεια ενός σταγονομέτρου που υπήρχε στο συνολικό εξοπλισμό. Με προσοχή η replica τοποθετούταν πάνω στην επιφάνεια του δείγματος υπό την άσκηση πίεσης από το χέρι του μηχανικού για ένα χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων. Έπειτα, μετά από χρόνο έξι λεπτών δηλαδή μετά την εξάτμιση του υγρού μίγματος και την αποτύπωση της μικροδομής, το φύλλο της replica αποκολλιόταν από το δείγμα. Η επιφάνεια κάτω από την επένδυση αλουμινίου που υπήρχε στο πίσω μέρος της replica ήταν χρήσιμη για την προσκόλληση της replica σε γυάλινες επιφάνειες έτσι ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυση στο οπτικό μικροσκόπιο.

### 3.3 Ανάλυση στο οπτικό Μικροσκόπιο

Οι replicas που προέκυψαν από την προηγούμενη διαδικασία μελετήθηκαν σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο με στόχο τον χαρακτηρισμό της κατάστασης ερπυσμού. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο Leitz "Aristomet" σε μεγεθύνσεις 50x-200x. Η μελέτη βασίστηκε στο ακόλουθο διάγραμμα για την ποιοτική κατάταξη σε επίπεδα του φαινομένου του ερπυσμού που υπέστησαν τα δείγματα.



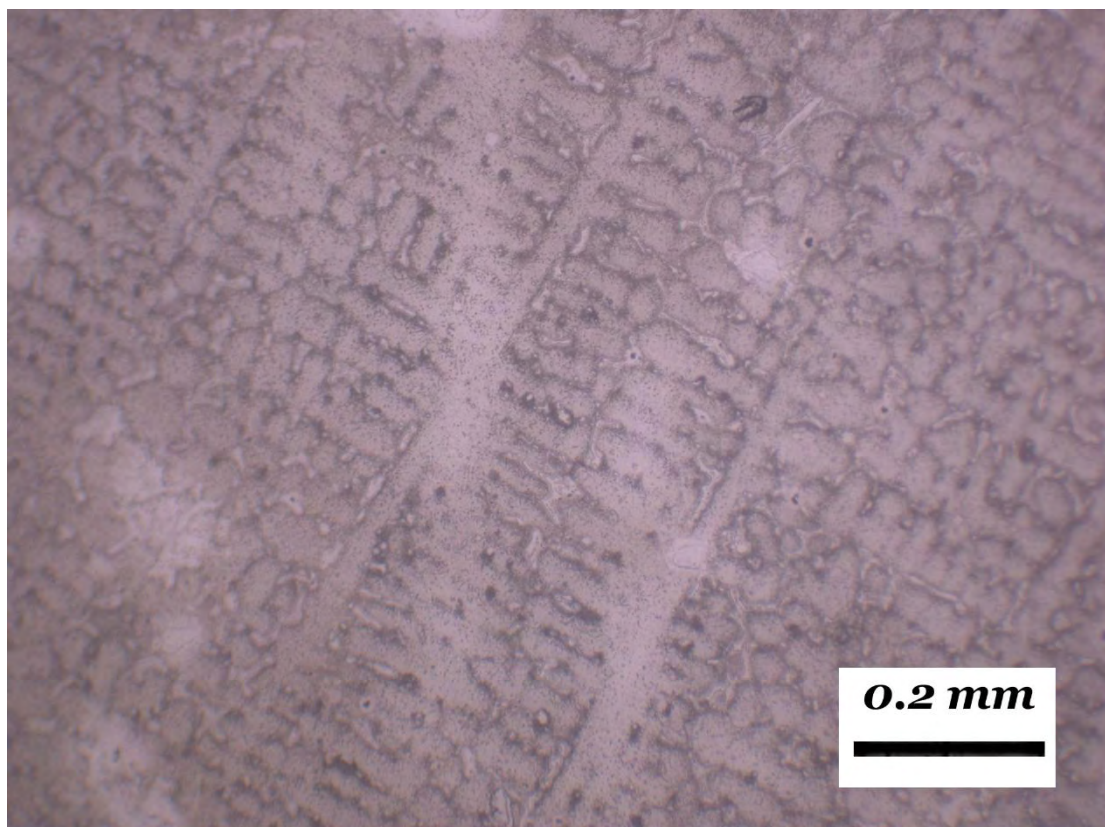
Εικόνα 3.3 i: Κατάταξη σε επίπεδο ερπυσμού[54].

## 4. Πειραματικά Αποτελέσματα-Συζήτηση

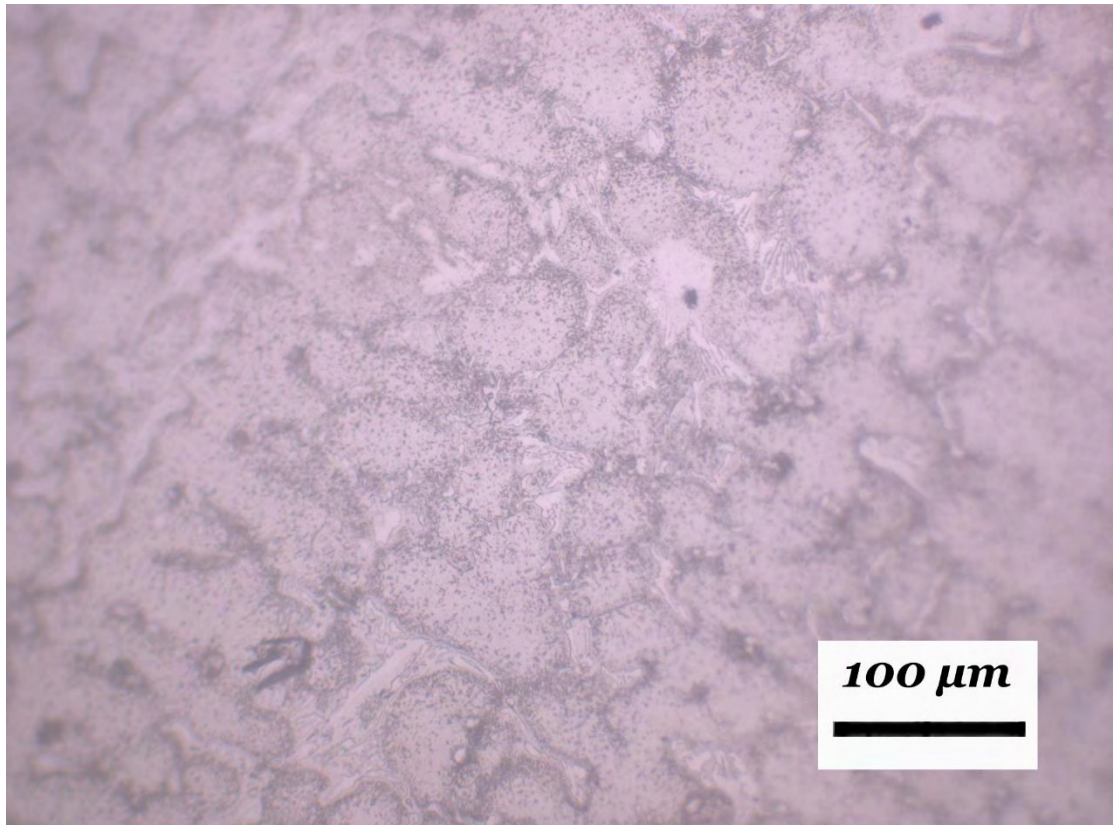
### 4.1. Αποτελέσματα οπτικού μικροσκοπίου

Το πρώτο δείγμα της μελέτης αφορούσε στο υλικό PARALLOY H39WM το οποίο εμφάνιζε αρχικά στάδιο ερπυσμού.

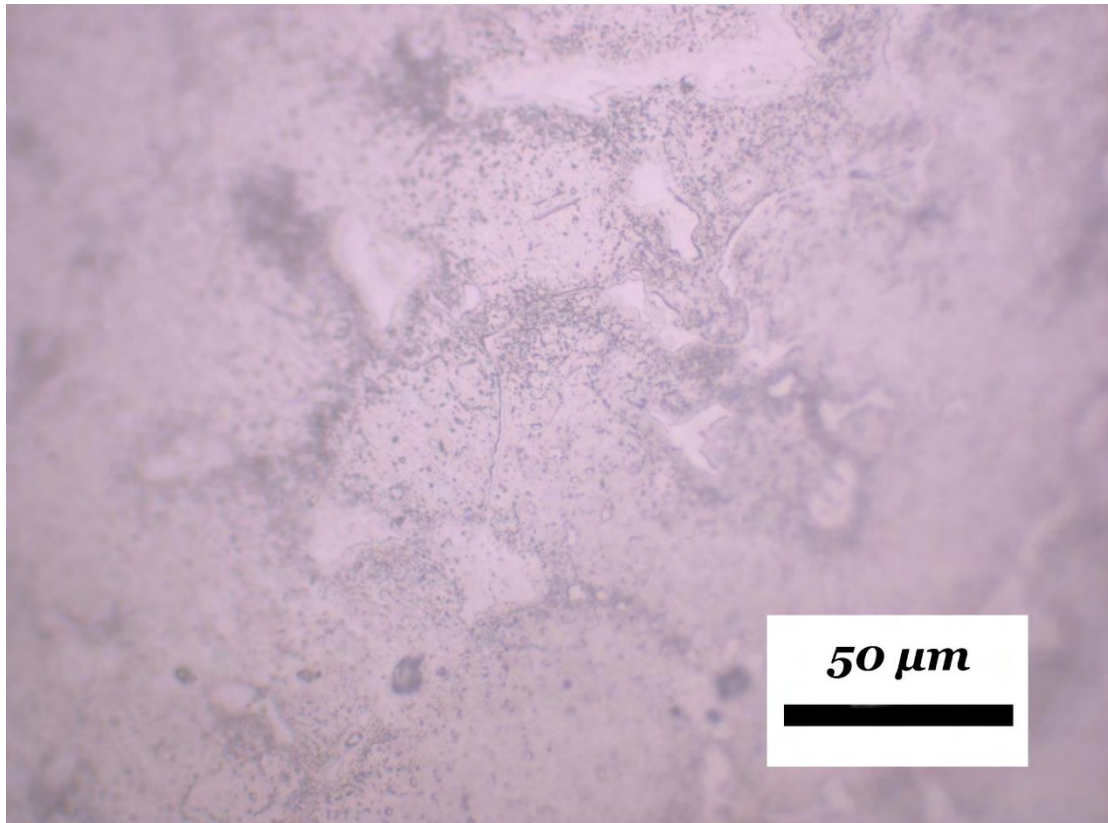
Η μικροδομή της replica που εξήχθη από το πρώτο δείγμα του PARALLOY H39WM παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες σε μεγεθύνσεις x100, x200 και x500. Όπως αποτυπώνεται, η μεταλλογραφία δείχνει την ύπαρξη δενδριτικής ωστενιτικής μήτρας με την ταυτόχρονη παρουσία ενδοδενδριτικού δικτύου ευτηκτικού τύπου πρωτογενών καρβιδίων τύπου  $M_7C_3$  και  $M_{23}C_6$  πλούσιων σε Cr και τύπου MC πλούσιων σε Nb. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ύπαρξη δευτερογενών καρβιδίων πλούσιων σε Nb και Ni.



Εικόνα 4.1 i: Μικροδομή replica από το 1ο δείγμα H39WM σε μεγέθυνση x100.



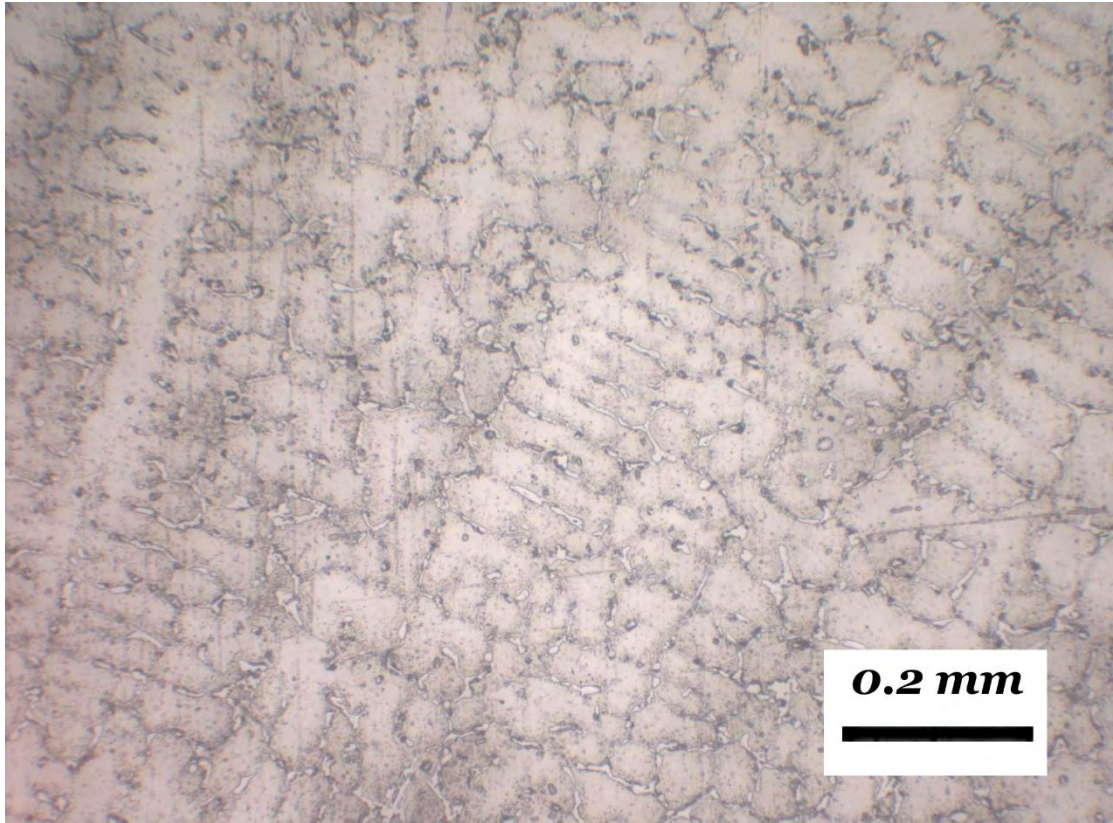
Εικόνα 4.1 ii: Αποτύπωση μικροδομής replica ίδιου δείγματος σε μεγέθυνση x200.



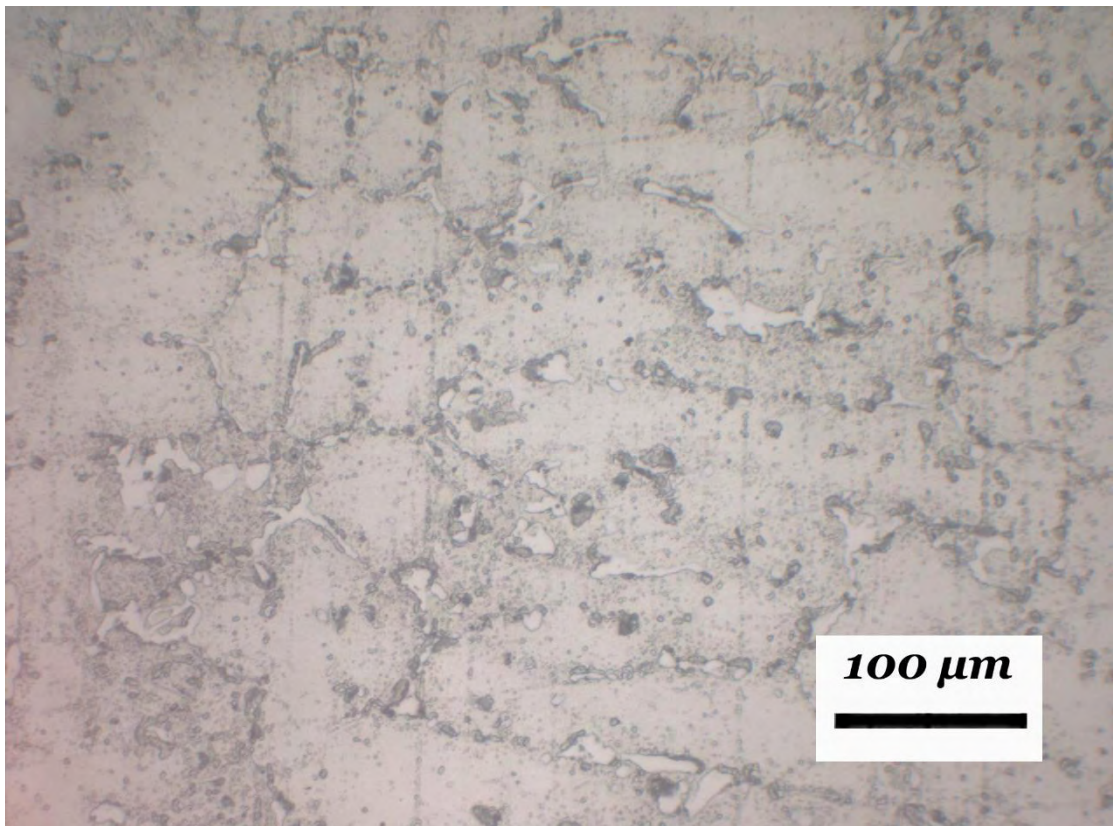
Εικόνα 4.1 iii: Αποτύπωση μικροδομής ίδιου δείγματος σε μεγέθυνση x500.

Σε όλες τις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρούνται οι μαύρες κηλίδες οι οποίες αποδεικνύουν την ύπαρξη του φαινομένου του ερπυσμού στο δείγμα που μελετήθηκε. Σύμφωνα με το διάγραμμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3i και με βάση τα αποτελέσματα της replica, το δείγμα έχει υποστεί πρωτογενή ερπυσμό και βρίσκεται στο επίπεδο A1 με πολύ απομονωμένες οπές.

Στις παρακάτω εικόνες και σε μεγεθύνσεις x100, x200 και x500 απεικονίζεται η μικροδομή της replica που προέκυψε από την επιφάνεια του δεύτερου δείγματος. Αποδεικνύεται ότι οι οπές έχουν πολλαπλασιαστεί και έχουν αυξήσει την πυκνότητά τους στη μικροδομή που αποτυπώνει η replica. Επομένως, ο ερπυσμός που υπέστη το δεύτερο δείγμα είναι επιπέδου 2 αφού είναι προφανής η ύπαρξη απομονωμένων κοιλοτήτων ερπυσμού σε μεγαλύτερο όμως αριθμό σε σχέση με το προηγούμενο δείγμα.

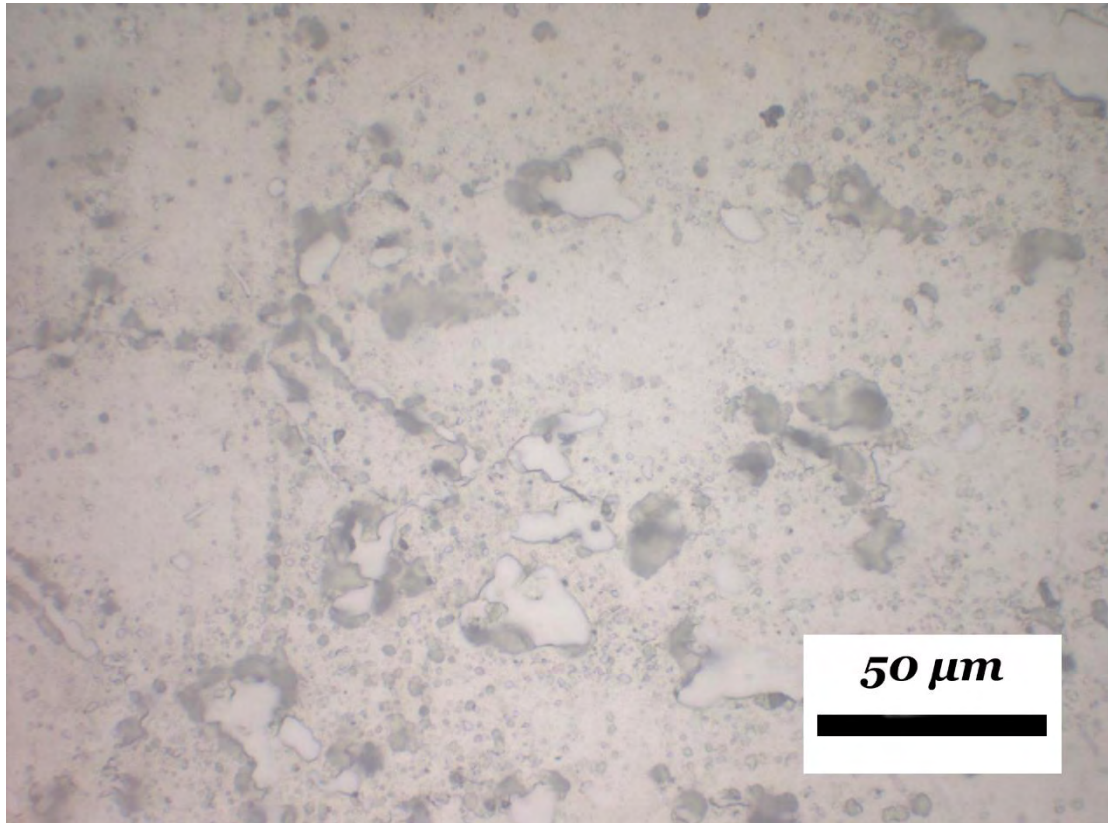


Εικόνα 4.1 ιν: Αποτύπωση μικροδομής gerlisa που δημιουργήθηκε από το δεύτερο δείγμα σε μεγέθυνση x100.



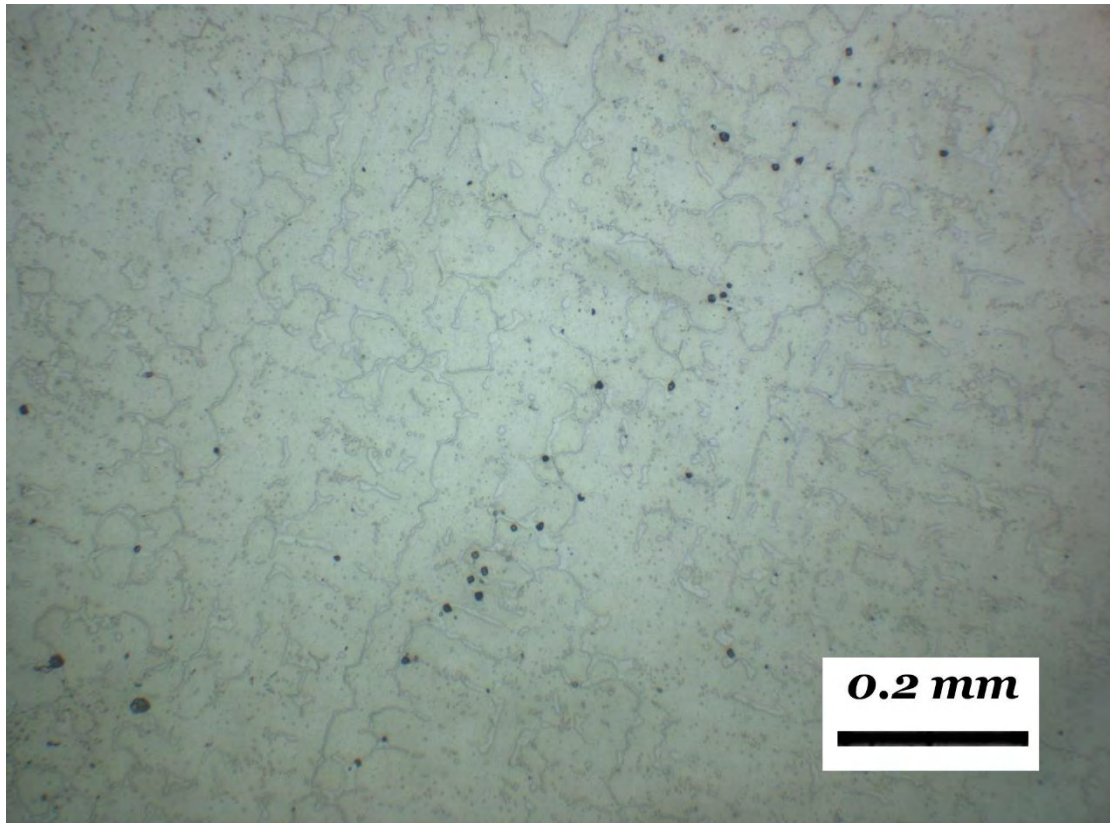
Εικόνα 4.1 ν: Αποτύπωση μικροδομής gerlisa που δημιουργήθηκε από το δεύτερο δείγμα σε μεγέθυνση x200.



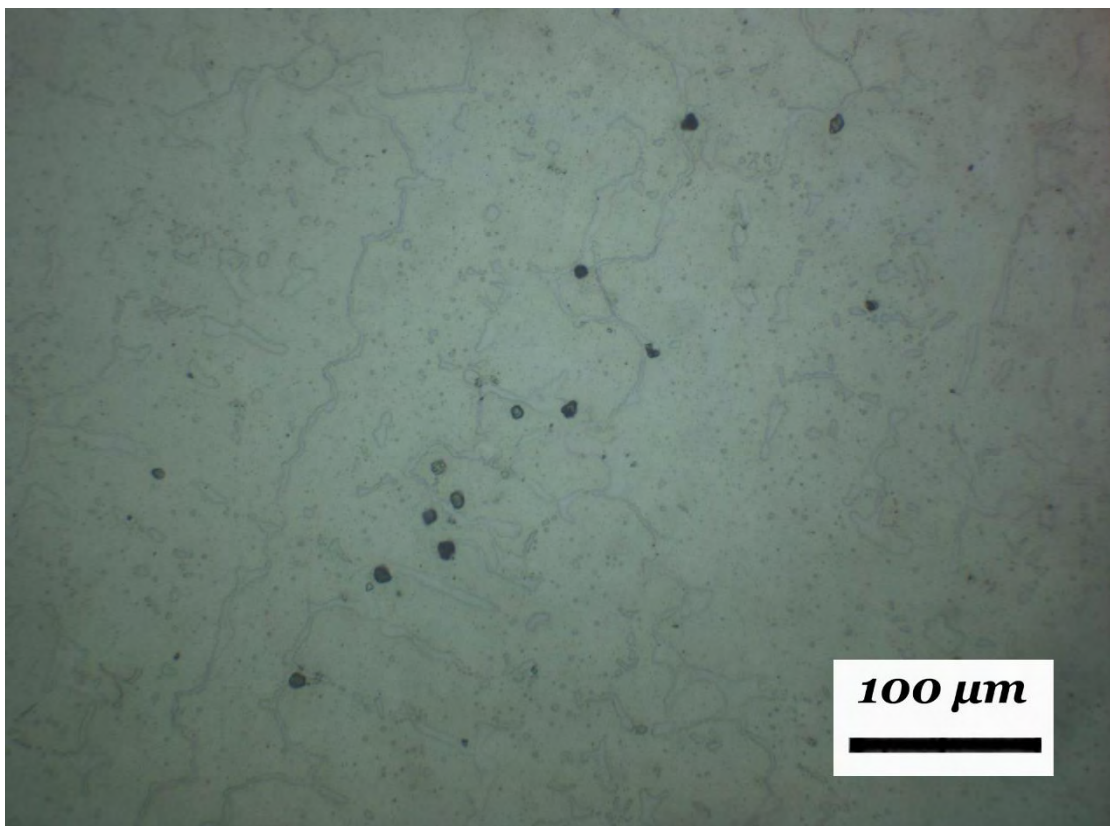


Εικόνα 4.1 vi: Αποτύπωση μικροδομής replica από το δεύτερο δείγμα σε μεγέθυνση x500.

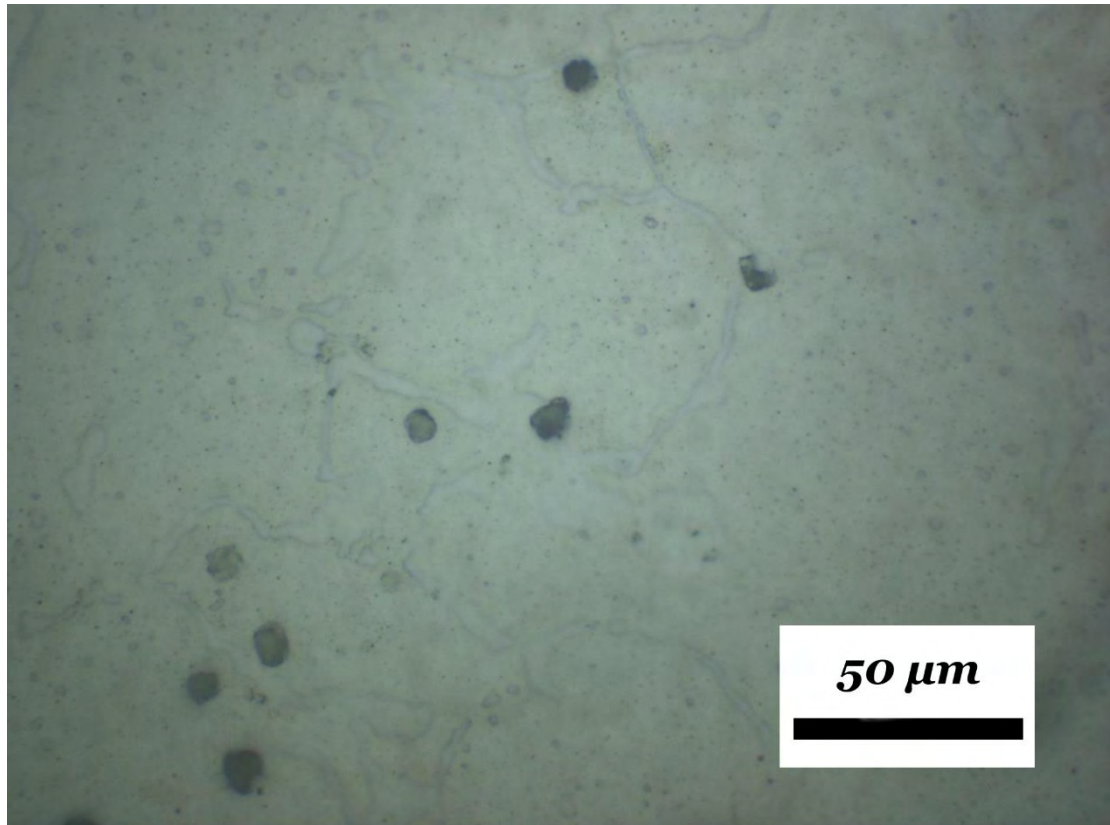
Οι επόμενες μικροδομές που απεικονίζονται στις Εικόνες 4.1vii, 4.1viii και 4.1ix προέρχονται από τη replica που δημιουργήθηκε από την επιφάνεια του τρίτου δείγματος και οι μεγεθύνσεις των φωτογραφιών είναι x100, x200 και x500. Το τρίτο δείγμα προέρχεται από το ίδιο υλικό (Paralloy H39WM) και η replica αποδεικνύει την ύπαρξη προσανατολισμένων κοιλοτήτων ερπυσμού. Επομένως, το επίπεδο ερπυσμού είναι το Β.



Εικόνα 4.1 vii: Αποτύπωση μικροδομής replica του τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση  $\times 100$ .

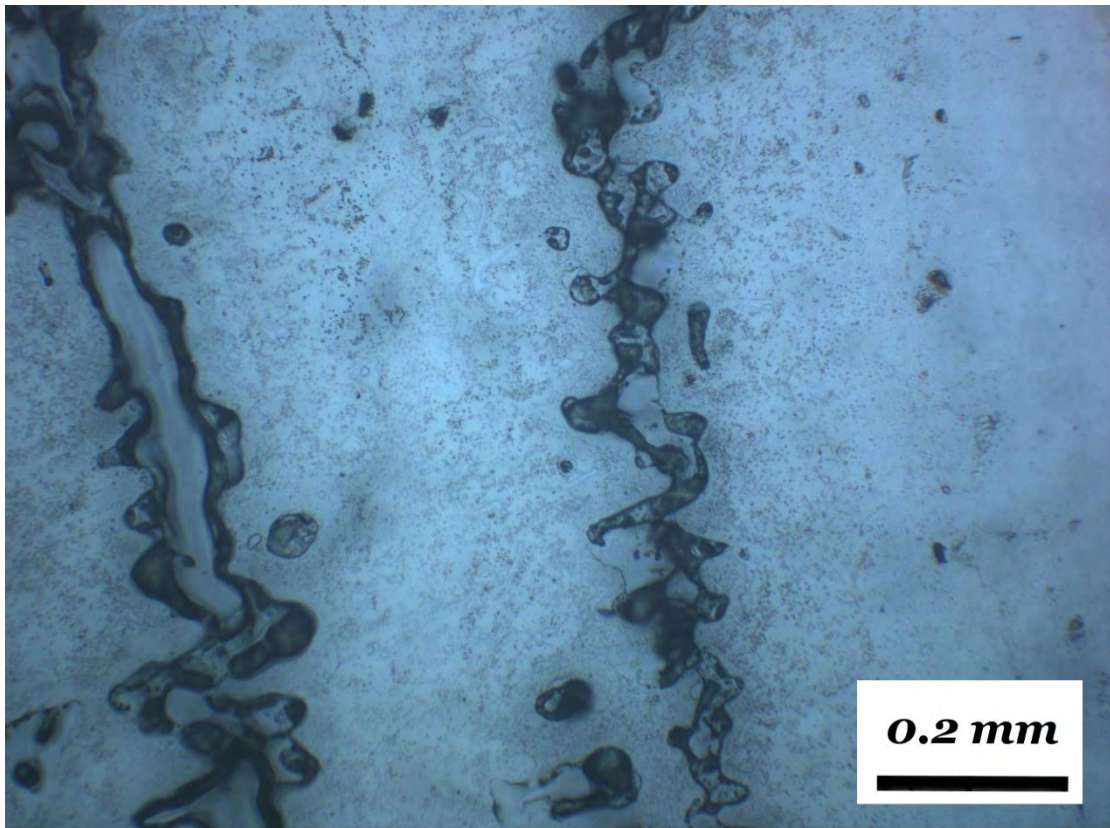


Εικόνα 4.1 viii: Αποτύπωση μικροδομής replica του τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση  $\times 200$ .

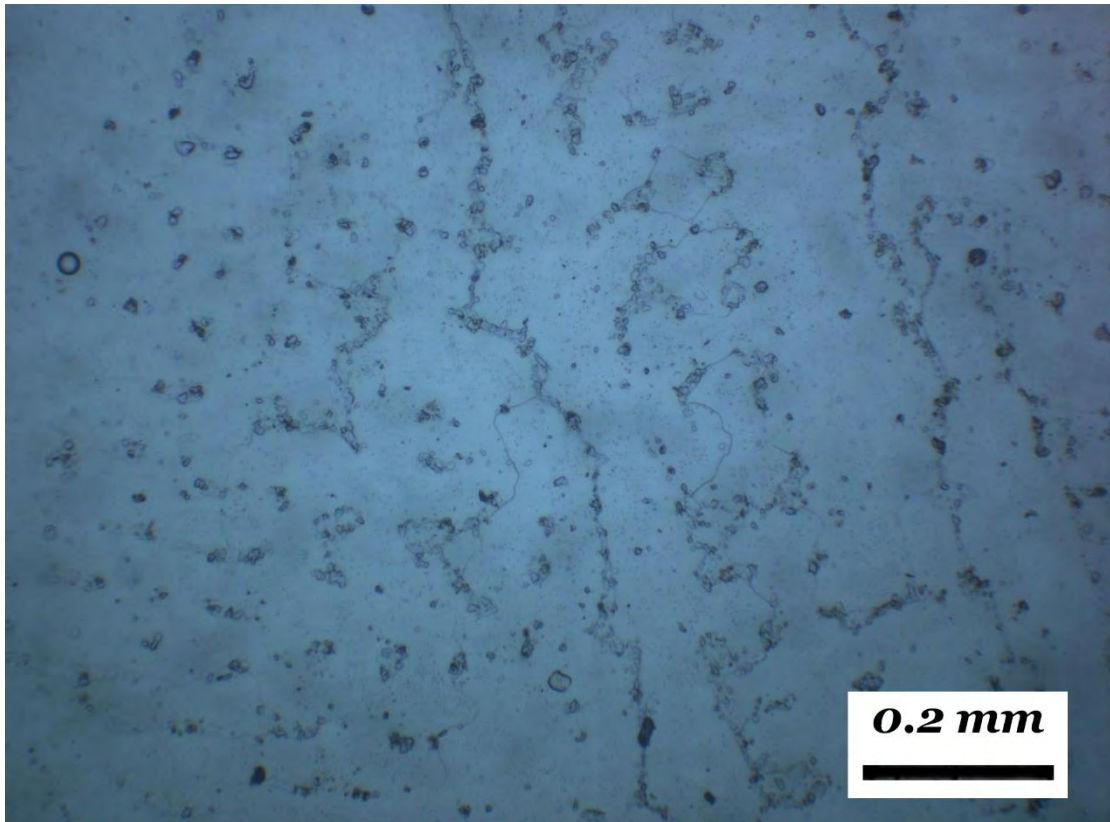


Εικόνα 4.1 ix: Αποτύπωση μικροδομής replica τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση x500.

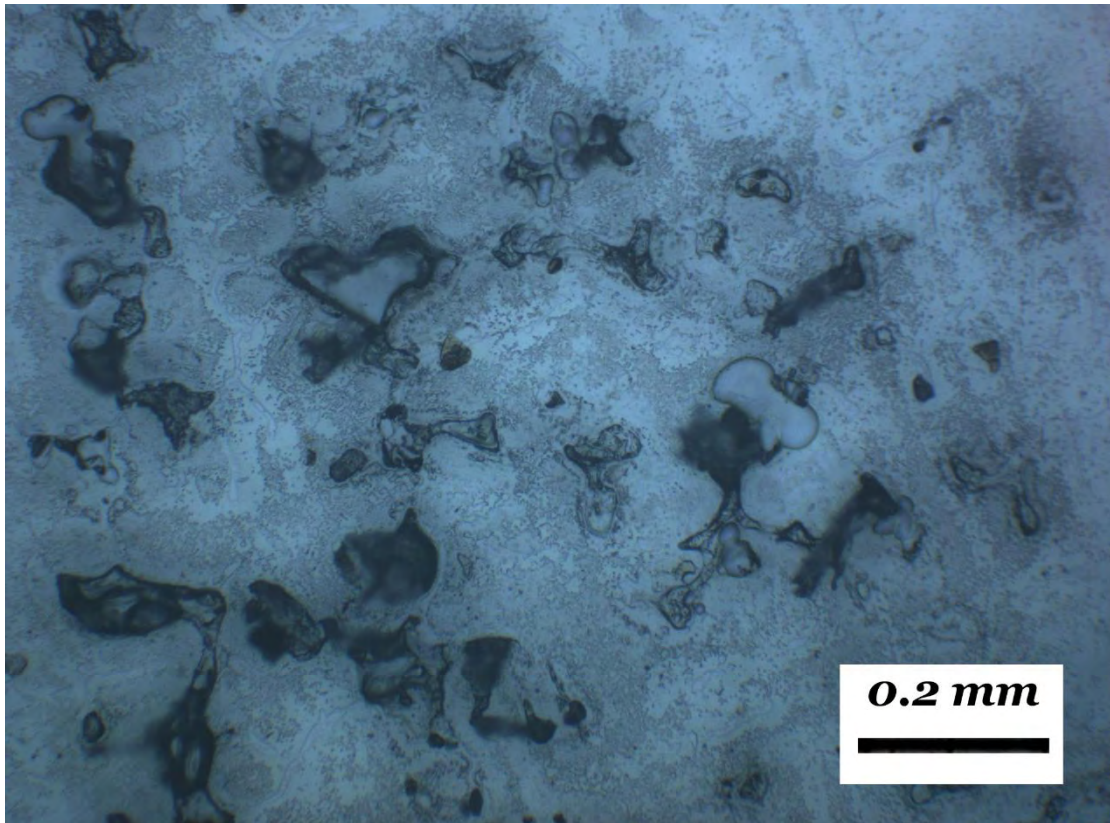
Η τελευταία replica από το PARALLOY H39WM προήλθε από την επιφάνεια του δείγματος που υπέστη θραύση. Στη συγκεκριμένη replica λήφθηκαν αρκετές φωτογραφίες σε ίδια μεγέθυνση γιατί δεν ήταν διακριτή η μικροδομή λόγω της ανόμοιογένειας της επιφάνειας και της θραύσης. Επιπλέον, οι φωτογραφίες αφορούν τρία σημεία που είναι τα εξής: Μακριά από τη θραύση, κοντά στη θραύση και πάνω στη θραύση.



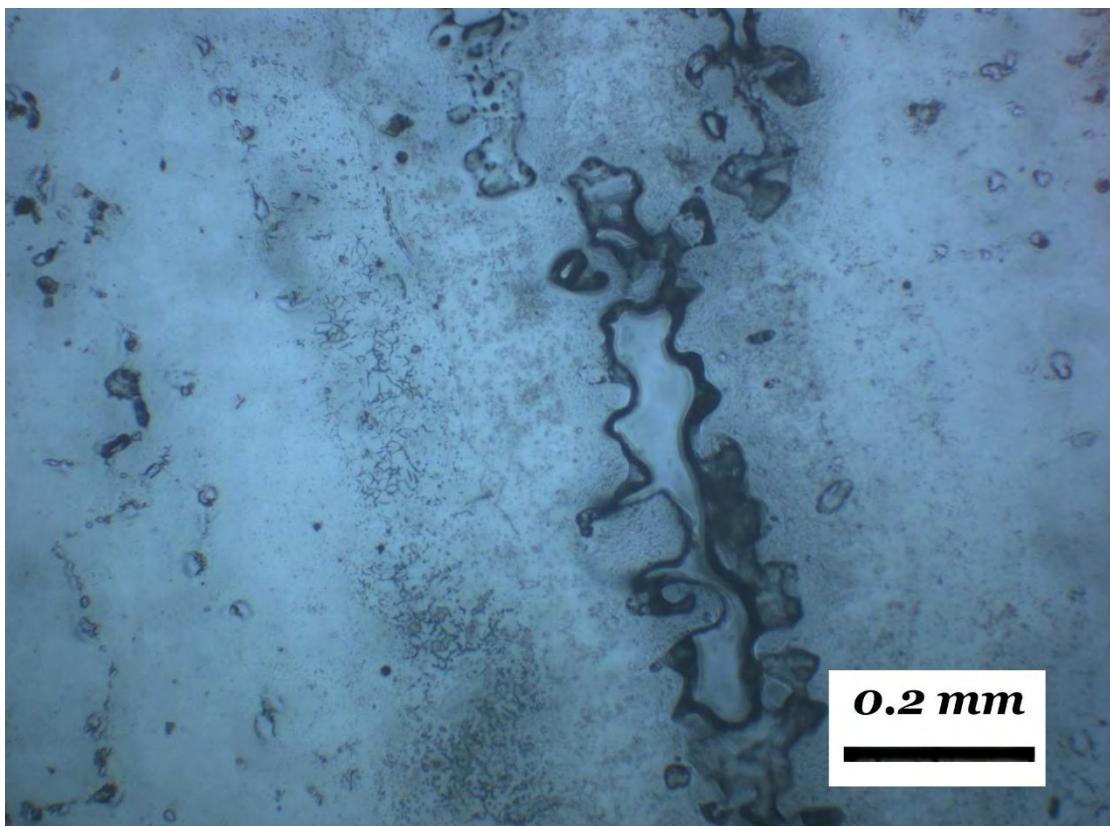
Εικόνα 4.1: Αποτύπωση μικροδομής replica τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση  $\times 100$ . (Μακριά από τη θραύση)



Εικόνα 4.1  $\chi$ : Αποτύπωση μικροδομής σε μεγέθυνση  $\times 100$ . (Μακριά από τη θραύση)



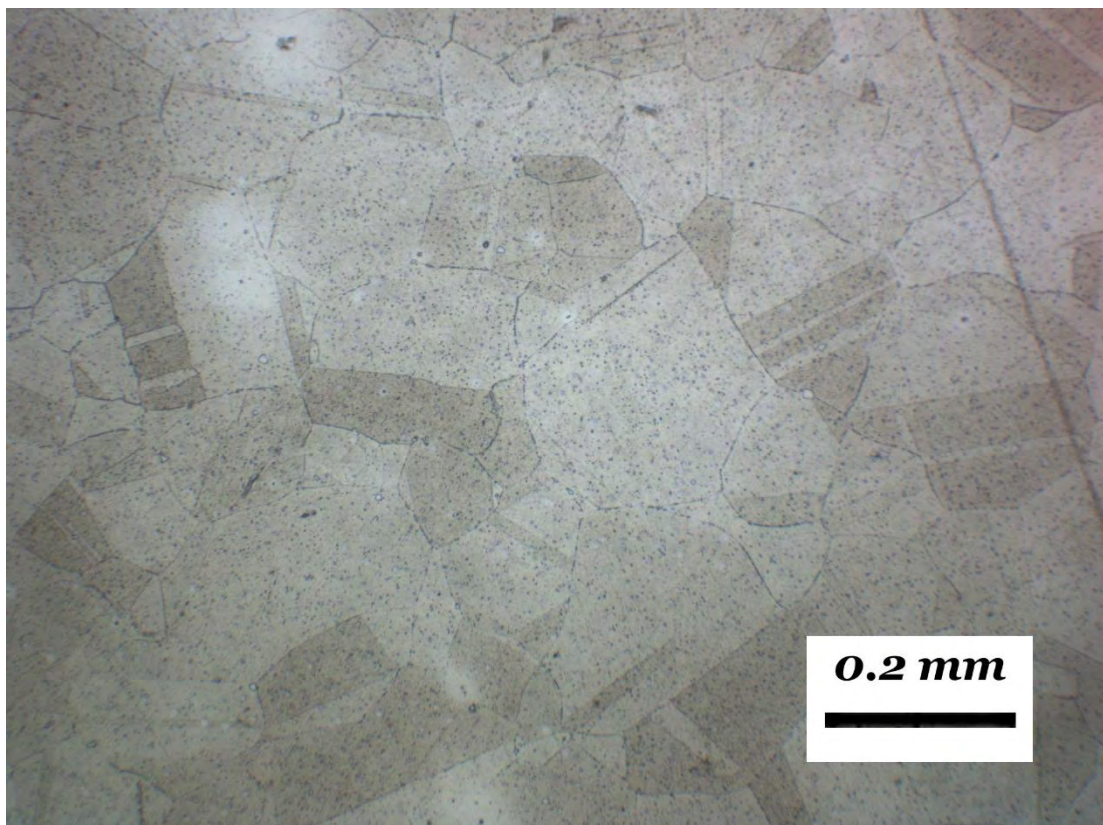
Εικόνα 4.1 xi: Αποτύπωση μικροδομής replica μεγέθυνσης x100. (Κοντά στη θραύση)



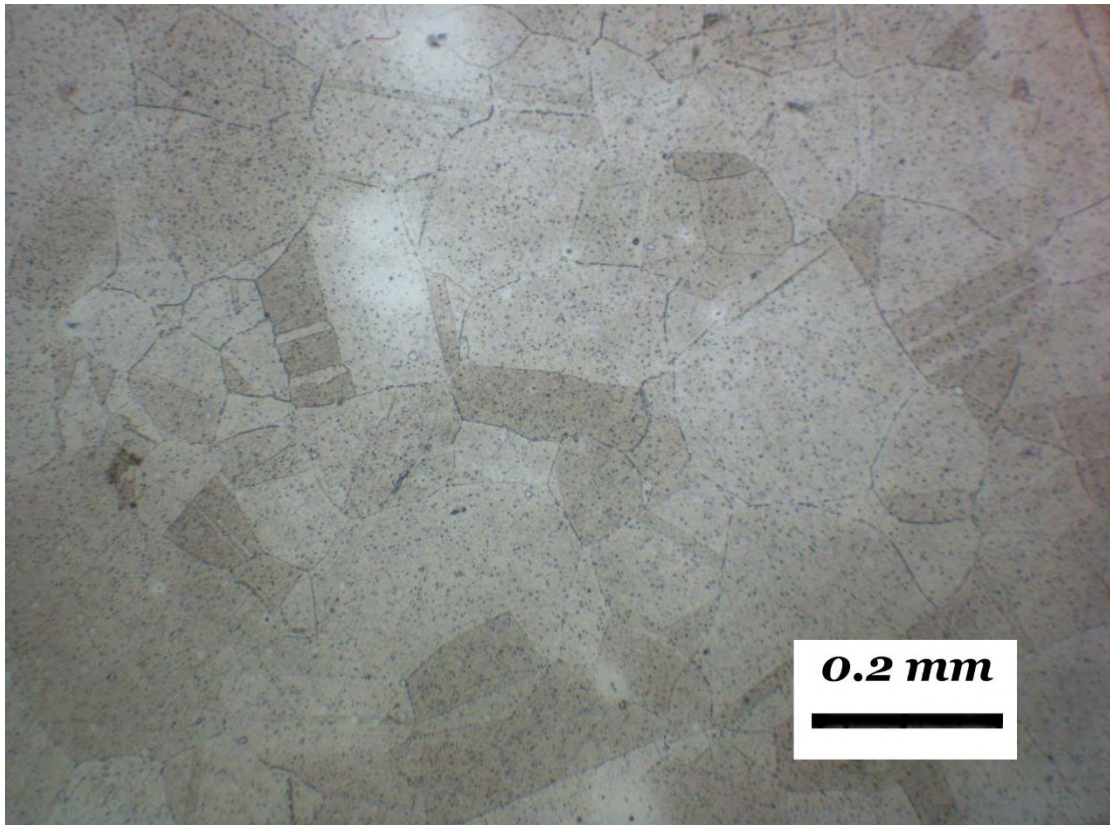
Εικόνα 4.1 xii: Αποτύπωση μικροδομής replica τέταρτου δείγματος σε μεγέθυνση x100. (Πάνω στη θραύση)

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες, αποδεικνύεται η ύπαρξη μακρορωγμών με αποτέλεσμα η μικροδομή να οδηγεί στην κατάταξη ερπυσμού στο τελευταίο επίπεδο D.

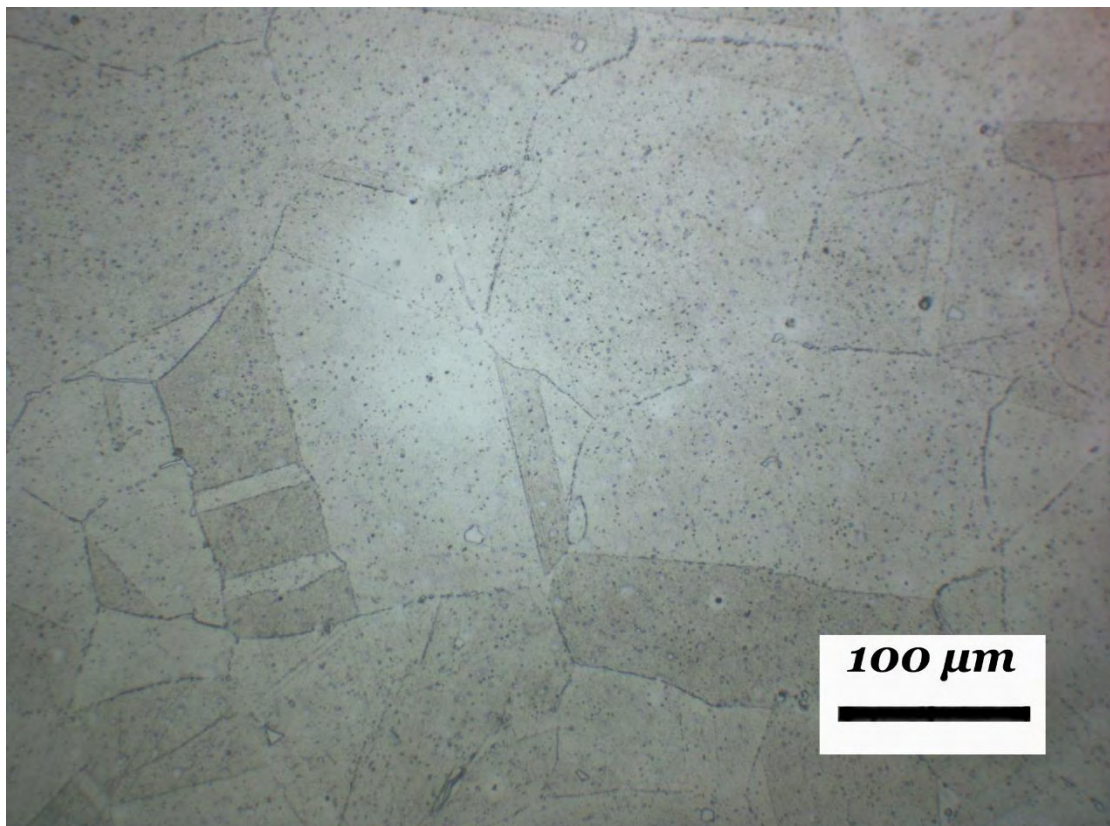
Το τελευταίο δείγμα στο οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος μεταλλογραφίας με replica είναι INCOLOY 800HT. Στις Εικόνες 4.1 xiii, 4.1 xiv, 4.1 xv, 4.1 xvi και 4.1 xvii απεικονίζεται η μικροδομή της replica του υλικού αυτού σε μεγεθύνσεις x100, x200 και x500.



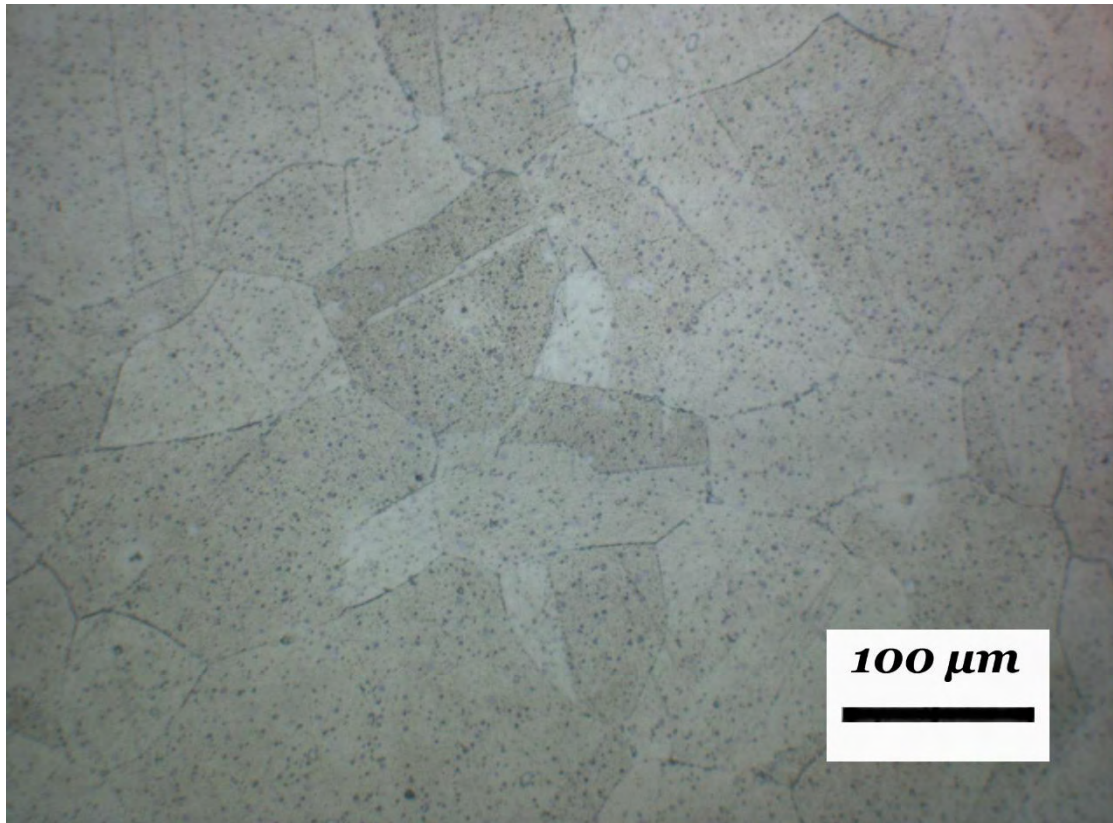
Εικόνα 4.1 xviii: Αποτύπωση μικροδομής replica του κράματος INCOLOY 800HT σε μεγέθυνση x100.



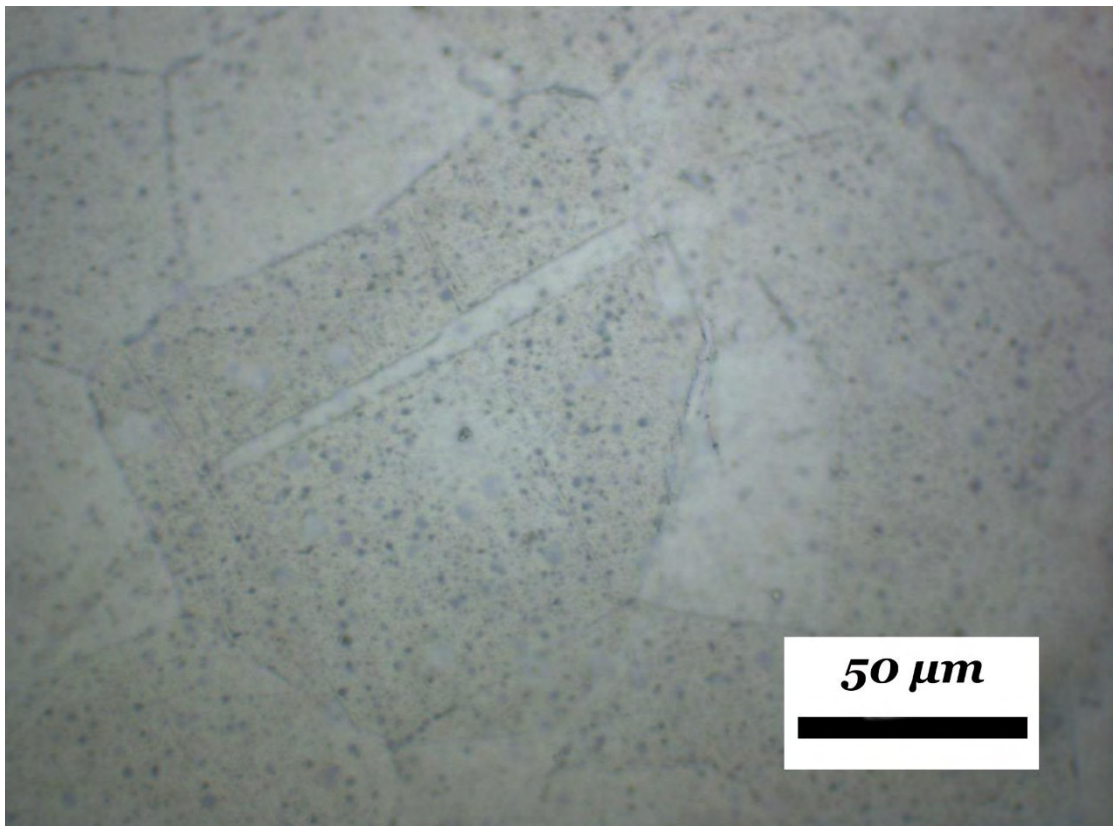
Εικόνα 4.1 χix: Δεύτερη αποτύπωση μικροδομής της ίδιας replica σε μεγέθυνση x100.



Εικόνα 4.1 xh: Αποτύπωση μικροδομής replica δείγματος κράματος INCOLOY 800HT σε μεγέθυνση x200.



Εικόνα 4.1 xxi: Δεύτερη αποτύπωση μικροδομής replica του δείγματος κράματος INCOLOY σε μεγέθυνση x200.



Εικόνα 4.1 xxii: Αποτύπωση μικροδομής replica του δείγματος υλικού κράματος INCOLOY 800HT σε μεγέθυνση x500.



Με βάση τις παραπάνω φωτογραφίες, παρατηρείται ότι η μικροδομή του δείγματος του υλικού INCOLOY 800HT αποτελείται πλήρως από ωστενίτη. Κατά τη μεταλλογραφία παρατηρούνται διαφορετικοί χρωματισμοί των κόκκων ένα γεγονός που οφείλεται στους διαφορετικούς προσανατολισμούς του ωστενίτη.

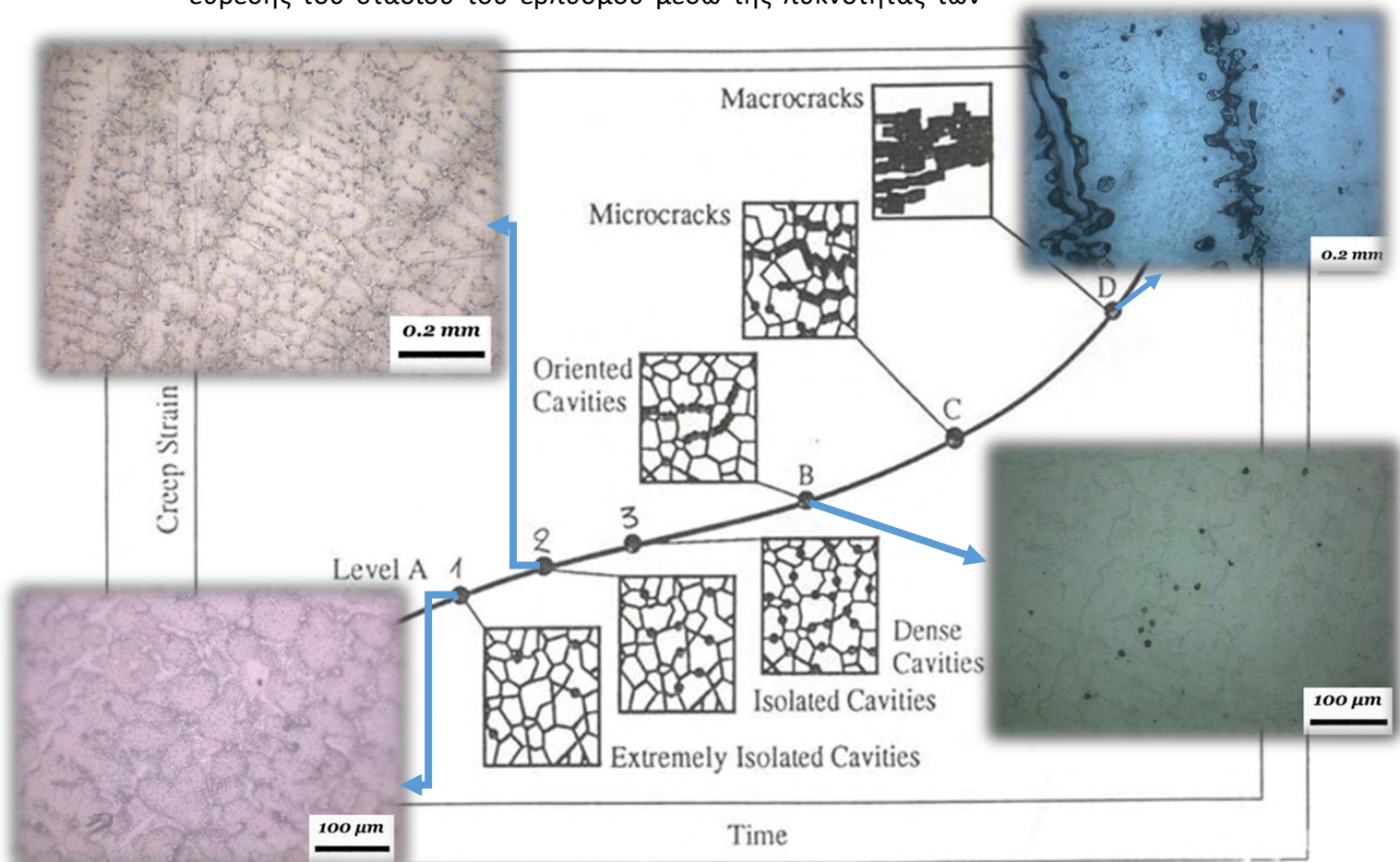
## 5. Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 5.1 Ποιότητα replica

Οι φωτογραφίες που λήφθηκαν με τη βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου από τις replicas που εξήχθησαν από τις επιφάνειες των δειγμάτων που υπέστησαν ερπυσμό αποδεικνύουν ότι η ποιότητα της μικροδομής που αυτές παρουσιάζουν είναι εξαιρετική και διευκολύνουν τον μηχανικό να αντιληφθεί τα προβλήματα που υπάρχουν στην μηχανολογική κατασκευή που εξετάζει.

### 5.2 Το φαινόμενο του ερπυσμού

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το οπτικό μικροσκόπιο έδειξαν ότι με τη βοήθεια της replica εντοπίστηκε το φαινόμενο του ερπυσμού στο πολύ αρχικό του στάδιο και στο τελικό στάδιο της θραύσης. Οι replicas έδωσαν την δυνατότητα εύρεσης του σταδίου του ερπυσμού μέσω της πυκνότητας των



Εικόνα 5.2 i: Κατάταξη στάδιου ερπυσμού με βάση τη καμπύλη ερπυσμού.

οπών που παρατηρήθηκαν. Στην Εικόνα 5.2i δίδεται το διάγραμμα ερπυσμού με

πραγματικές απεικονίσεις της μικροδομής μέσω της μεθόδου της replica που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

### 5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μία επέκταση της παρούσας μελέτης θα μπορούσε να ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μικροδομής που αποτύπωσαν οι replicas που παρήχθησαν με τα αποτελέσματα που μπορούν να ληφθούν από άμεση επαφή του οπτικού μικροσκοπίου με το δείγμα. Η σύγκριση αυτή θα αφορά στην ποιότητα μεταξύ των δύο μεθόδων.

Επιπλέον, μια άλλη πιθανή πρόταση θα ήταν η χρήση άλλου είδους replica. Μετά την ολοκλήρωση της μεθόδου με άλλο είδος replica, σημαντική θα ήταν η σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την replica από οξική κυτταρίνη που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά , όπως και προηγουμένως, και με τα αποτελέσματα που προήλθαν από την άμεση οπτική επαφή του οπτικού μικροσκοπίου με την επιφάνεια του δείγματος.

Τελικά, ενδιαφέρουσα θα ήταν η χρήση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω για τον χαρακτηρισμό και μελέτη μηχανικών κατασκευών που υπέστησαν άλλο είδος αστοχίας.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1]: Gerard B.Hawkings, Steam Reforming: Tube Design, <https://www.slideshare.net/GerardBHawkings/steam-reforming-tube-design>.
- [2]: Walenty Jasinski, Degradation of iron superalloys H39WM catalytic pipe in steam reforming conditions, West Pomeranian University of Technology in Szczecin (2010).
- [3]: J.Jones, T.Barker, J.Huber, D.Pool, DONCASTERS PARALLOY, Improve coil efficiency by using Paralloy "P.E.P" tubes (1999).
- [4]: H. Rahmel, J. Grabke, W. Steinkusch, Mater. Corros. 49, 221-225 (1998).
- [5]: J.C. Langevoort, L.J. Hanekamp, P.J. Gellings, Appl. Surf. Sci. 28, 189-203 (1987).
- [6]: J.R. Davis, ASM Specialty Handbook Committee-Stainless steels, ASM International, Materials Park, Ohio (1994).
- [7]: Alloy 800H/HT, <https://www.corrosionmaterials.com> .
- [8]: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Δ. ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ.  
‘ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΡΠΥΣΜΟΥ’, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1 (1992).
- [9]: da COSTA ANDRADE, E.N.Proc. Roy. Soc. London, 8.4A, 1-20 (1910).
- [10]: da COSTA ANDRADE, E.N.Proc. Roy. Soc. London, 90A, 329-350 (1914).
- [11] NORTON, F.H., Creep of steel at high temperatures, Me Graw Hill, New York (1929).
- [12]: BAILEY, R.W. The engineer, 148, 528-535 (1929).
- [13]: BAILEY, R.W.Engineering, 129, 265-270 (1930).
- [14]: STODOLA, A.Z. angew. Math. Mech., 13, 143-150 (1933).
- [15]: TAPSELL, H.J.Creep of metals, Oxford University Press, London (1931).
- [16]: TAYLOR, G.J.Proc. Roy- Soc. London, 154A, 132-138 (1934).
- [17]: OROWAN, E. Z. Phys. 89 , 614-620 (1934).
- [18]: POLANYI, M. Z. Phys., 89, 660-665 (1934).
- [19]: HEDGES, J.M., MITCHELL, J.W. Phil. Mag., 44, 223-230 (1953).
- [20]: AMELINCKX, S. Dislocations and mechanical properties of crystals, John Willey and sons, New York (1957).
- [21]: LOWELL, L.C, VOGEL, F.L. Met. Prog. 75, 96-105 (1959).
- [22]: THOMAS, G. Transmission Electron Microscopy of metals, John Wiley and Sons, New York (1962).

- [23]: MULLER, E.W. Direct observation of imperfections in crystals, Interscience Publishers, New York (1962).
- [24]: RICHARD, K. Mitt. Ver. Grossdampf. Bes. , 39, 836-846 (1955).
- [25]: ASHBY, M.F. Acta Met. 20, 146-150 (1972).
- [26]: ASHBY, M.F., RAJ, R. In: Proc. Conf. Mechanics and Physics of Metals, Inst. of Physics, Cambridge, 250-260 (1975).
- [27]: KACHANOV, L.M. Theory of creep, Boston Spa, Wetherby (1960).
- [28]: KACHANOV, L.M. In: Problems of continuum mechanics, Contributions in honor of 70th Birthday of N.I. Muskhelishvili, (ed. J.R.M. Radok), Society for Industrial and applied Mathematics, Philadelphia, 100-110 (1961).
- [29]: RABOTNOV, Y.N. Creep problems in structural members, North-Holland Publishers, Amsterdam 1969. (Πρωτότυπο στα ρώσικα, Μόσχα) (1966).
- [30]: HULT, J. In: Proc. IUTAM Symp. I on Creep in structures, Springer - Verlag, Berlin, 35-40 (1960).
- [31]: HOFF, N.J. In: Proc. IUTAM Symp. I on Creep in structures, Springer - Verlag, Berlin, 300-310 (1960).
- [32]: K.P. Shah, The Hand Book on Mechanical Maintenance, <http://practicalmaintenance.net/?p=989> .
- [33]: HOFF, N.J. J. Roy. Aero. Soc. London 58, 31-40 (1954).
- [34]: ΚΕΡΜΑΝΙΔΗΣ, Θ. ,, ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ, Χ. , ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ, Ν. , ΠΑΥΛΟΥ, Δ. Εργαστηριακές Ασκήσεις Αντοχής Υλικών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα (1990).
- [35]: ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ, Ν., ΣΙΔΕΡΗΣ, Λ., ΦΟΥΝΤΑΔΑΚΗΣ, Γ. Μηχανή Ερπυσμού Mayes - Περιγραφή και Διαδικασία Πειράματος, Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα (1991).
- [36]: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Δ. ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ  
 ‘ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΡΠΥΣΜΟΥ’, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 6 (1992).
- [37]: COURTNEY, T., H., Mechanical behavior of materials, McGraw-Hill, New York (1990).
- [38]: GITTUS, J. Creep viscoelasticity and creep fracture, Applied Science Publishers, London (1975).
- [39]: PETERSON, N.L. In: ASM Materials Science Seminar on Grain-Boundary structure and kinetics, American Society for Metals, Ohio, 209-238 (1979).
- [40] : NABARRO, F.R.N. In: Proc. Conf. on strength of solids, Physical Society, London (1948).
- [41]: HERRING, C.J. Appi. Phys. 21, 437-445 (1950).

- [42]: RAJ, R., ASHBY, M.F. *Met. Trans. 2A*, 1113-1127 (1971).
- [43]: OROWAN, E.J. W. *Scotland Iron Steel 1st.*, 54, 45-55 (1946).
- [44]: DYSON, B.F., McLEAN, M. *Acta Met.*, 31, 17-27 (1983).
- [45]: RAJ, R., ASHBY, M.Q. *Acta Met.*, 23 (1975), 653-666 (1975).
- [46]: RIEDEL, H. *Fracture at high temperatures*, Springer-Verlag, Berlin (1986).
- [47]: VOLMER, M., WEBER, A.Z. *Phys. Chem.*, 119, 227-301 (1926).
- [48]: BECKER, R., DÖRING, W. *Ann. Phys.*, 24, 719-752 (1935).
- [49]: RESNICK, R., SEIGLE, L. *Trans. AIME*, 209, 87-94 (1957).
- [50]: BRAILSFORD, A.D., BULLOUGH, R.J. *Nucl. Mat.*, 44, 121-135 (1972).
- [51]: 'An overview of Non-Destructive Field Metallography' από <https://www.azom.com>.
- [52]: A.R. Marder, Energy Research Center, Lehigh University 'Replication Microscopy Techniques for NDE'.
- [53]: <https://e-shop.struers.com>.
- [54]: VGB-TW 507 – Guidelines for the assessment of microstructure and damage development of creep exposed materials for pipes and boiler components, VGB Technical Association of Large Power Plant Operators (1992).