



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΔΑΜΑΣΚΗΝΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Διπλωματική εργασία
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΤΣΑΡΟΣ

Επιβλέπων: Άγγελος Μαρκόπουλος,
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Ευχαριστίες

Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον αναπληρωτή καθηγητή κ. Άγγελο Μαρκόπουλο της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να μου αναθέσει τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Σκόνδρα για τη βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ θερμά το προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη που παρείχαν στο δύσκολο κομμάτι της διεξαγωγής του πειραματικού μέρους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου έδειξαν όλο αυτό το διάστημα της φοίτησης μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Κωνσταντίνος Κατσαρός

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	7
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	7
1.2 Μηχανισμός δημιουργίας μοτίβου.....	9
1.3 Τεχνικές κατασκευή.....	14
1.3.1 Αρχαία τεχνική.....	14
1.3.2 Σύγχρονη τεχνική πλινθώματος.....	16
1.3.3 Μέθοδος πολλαπλών στρώσεων.....	19
1.3.4 Μέθοδος με Κάνιστρο.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	21
2.1 Πειραματική Διάταξη.....	21
2.1.1 Οι Χάλυβες.....	21
Πίνακες Ιδιοτήτων Χαλύβων.....	21
2.1.2 Ο Φούρνος.....	23
2.1.3 Το φλόγιστρο.....	26
2.2 Η Σφυρηλάτηση.....	29
2.2.1 Προετοιμασία.....	29
2.2.2 Σφυρηλάτηση.....	31
2.2.3 Χημική προσβολή.....	33
2.3 Τελικό προϊόν.....	35
3 Ανάλυση και Αποτελέσματα.....	36
3.1 Ανόπτηση.....	36
3.2 Βαφές.....	41
3.2.1 Βαφή σε λάδι.....	41
3.2.2 Βαφή σε νερό.....	44
3.3 Μοτίβο.....	47
4 Συμπεράσματα.....	49
Βιβλιογραφία.....	50

Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι κατασκευή και μελέτη του δαμασκηνού χάλυβα. Ο δαμασκητός χάλυβας αποτελεί για εκατοντάδες χρόνια ένα μυστήριο για την υπεροχή και τις ιδιαίτερες ιδιότητες που έχει συγκριτικά με τους υπόλοιπους κοινούς χάλυβες.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται αναδρομή στην ιστορία και καταγωγή του δαμασκηνού χάλυβα. Επίσης, μελετώνται ο σχεδιασμός της δομής καθώς και των ιδιοτήτων του. Ακόμη, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται και παρουσίαση των μεθόδων κατασκευής του δαμασκηνού χάλυβα από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται είναι η τεχνική του πλινθώματος, η μέθοδος των πολλαπλών στρώσεων και η μέθοδος του κανίστρου.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει την κατασκευή δύο δοκιμίων δαμασκηνού χάλυβα, ενός με χάλυβες 15N20-1095 και ενός δευτέρου με χάλυβες 15N20-1084 με τη μέθοδο των επάλληλων στρώσεων, όπως επίσης και την κατασκευή της διάταξης του φούρνου για την επίτευξη των αναγκαίων υψηλών θερμοκρασιών.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται ανάλυση του εσωτερικού των δοκιμίων σε μικροσκόπιο, αναφέρονται οι τιμές των σκληρομετρήσεων κατά Vickers και παρουσιάζονται τα μοτίβα που εμφανίστηκαν.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά από τη μελέτη και ανάλυση των μετρήσεων και αποτελεσμάτων.

Abstract

Purpose of this diploma thesis is the forging and study of Damascus steel. Damascus steel has been a mystery for hundreds of years for its superiority and all the special properties comparatively with other common steels.

In **Chapter 1** is made a historical retrospective about how the Damascus steel was made and where it was originally coming from. Also, a reference is made about all the different methods that are used for the production of Damascus steel from the ancient years since nowadays. The methods which we mention in this chapter are the ingot method, the layering damascus and the canister damascus.

In **Chapter 2** is presented the experimental process of this diploma thesis. Here is described the forging two different billets of layered damascus steel with the one billet was made from 15N20-1095 steels and the other one from 15N20-1084 steels, as well as the construction of the forge so that we can achieve the needed temperatures.

In **Chapter 3** is being made a microscopic analysis internal of the damascus' pieces, there are presented the hardness values that were taken with the Vickers method and finally is made a presentation of the damascus steel patterns that came up.

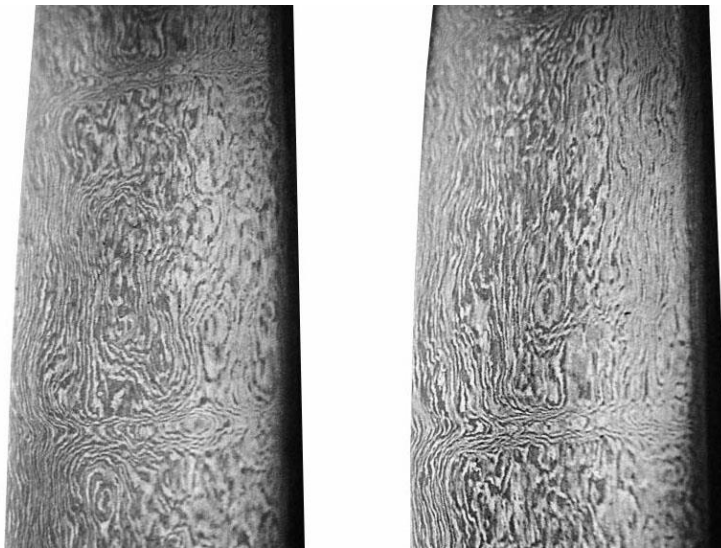
In **Chapter 4** there are mentioned the conclusions that have been made after the analysis and study of the results.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΑΜΑΣΚΗΝΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο χάλυβας της Δαμασκού είναι ένας ιστορικός χάλυβας γνωστός με πολλά ονόματα όπως *Rulad* (Περσία), *Wootz* (Ινδία), *Fulad* (Αραβία) and *Bulat* (Ρωσία). Πρόκειται για έναν χωνευτό χάλυβα “*crucible steel*”, του οποίου τα μοναδικά διακοσμητικά μοτίβα έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον των ανθρώπων για περισσότερο από 2000 χρόνια. Μπορεί ο χάλυβας της Δαμασκού να εντοπίζεται κυρίως σε σπαθιά και ξίφη, ωστόσο η επιρροή του εντοπίζεται και μελετάται και σε πολλές άλλες εφαρμογές σχετικές με την ιστορική μεταλλουργία. Από τους σιδηρουργούς έως τους μηχανικούς, σχεδόν όποιος ενδιαφέρεται για το χάλυβα έχει κάποιο ενδιαφέρον για τον χωνευτό χάλυβα ιδιαίτερα τον χωνευτό χάλυβα που παρουσιάζει χαρακτηριστικό μοτίβο του χάλυβα της Δαμασκού. Ακόμα και μετά από πολλά χρόνια έρευνας και εκατοντάδες δημοσιεύσεις, υπάρχουν ακόμα πολλά ερωτήματα να απαντηθούν για την ιστορία και την παραγωγή αυτού του ειδικού χάλυβα.[1]



Εικόνα 1.1 δαμασκήνος χάλυβας πηγή (Verhoeven, Pendray, Dauksch and Wagstaff, 2018)

Φαίνεται ότι ένας από τους λόγους που υπάρχουν τόσες πολλές παρανοήσεις σχετικά με την ιστορία της παραγωγής χυτοσιδήρου με μοτίβο οφείλεται στα διάφορα ονόματα και τις γεωγραφικές τους συσχετίσεις. Όλα τα τρέχοντα στοιχεία δείχνουν

ότι ο χωνευτός χάλυβας παράχθηκε στην Κεντρική Ασία και την Ινδία και όχι στη Συρία ή σε άλλες χώρες της Μέσης Ανατολής. Ωστόσο, τα εισαγόμενα μέταλλα σφυρηλατήθηκαν πιθανώς σε αντικείμενα και πωλήθηκαν σε πολλά από τα παζάρια της Μέσης Ανατολής. Η Δαμασκός και άλλες πόλεις ήταν πιθανότατα μέρη διανομής και όχι παραγωγής. Πράγματι, υπάρχουν δύο άλλες πιθανές πηγές για τον όρο Δαμασκός. Η λέξη για το νερό στα αραβικά είναι «damas» και οι λεπίδες των σπαθιών φτιαγμένες από χάλυβα της Δαμασκού περιγράφονται συχνά πως έχουν ένα μοτίβο νερού στην επιφάνειά τους. Επιπλέον, ο al-Beruni αναφέρει έναν ξιφομάχο που ονομάζεται Damasqui, ο οποίος έφτιαξε ξίφη από χωνευτό χάλυβα. [1]

Ο ινδικός χωνευτός χάλυβας αναφέρεται συνήθως ως wootz. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πρώτες μελέτες δεν συσχετίζουν το wootz με κανένα διακοσμνητικό μοτίβο. Η πρώτη αναφορά σε μια προφανή σχέση μεταξύ του wootz και του μοτίβου της Δαμασκού εμφανίζεται στο άρθρο του Stodart και του Faraday το 1820 για κράματα. Είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε ότι η σύνδεση του Faraday μεταξύ του wootz και του μοτίβου της Δαμασκού βασίστηκε στα πειράματα αναπαραγωγής του κράματος, όχι στην εξέταση των εισαγόμενων ράβδων wootz.[2]

Παρόλο που η έρευνα κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχει ρίξει φως σε μερικούς από τους μηχανισμούς που προκαλούν τα διακοσμνητικά σχέδια, η γνώση του πώς τα διαφορετικά μοτίβα έγιναν στο παρελθόν ακόμα παραμένουν μυστήριο. Βασικά, ο χωνευτός χάλυβας είναι ένας ομογενής χάλυβας που παράγεται με το συνδυασμό σιδήρου χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (σφυρήλατο σίδηρο) με ένωση υψηλού άνθρακα όπως χυτοσίδηρο ή φυτική ύλη σε ένα χωνευτήριο. Ο άνθρακας διαχέεται στον σίδηρο χαμηλού άνθρακα και το επιθυμητό προϊόν είναι ένας χάλυβα χωρίς υπολείμματα.[1]

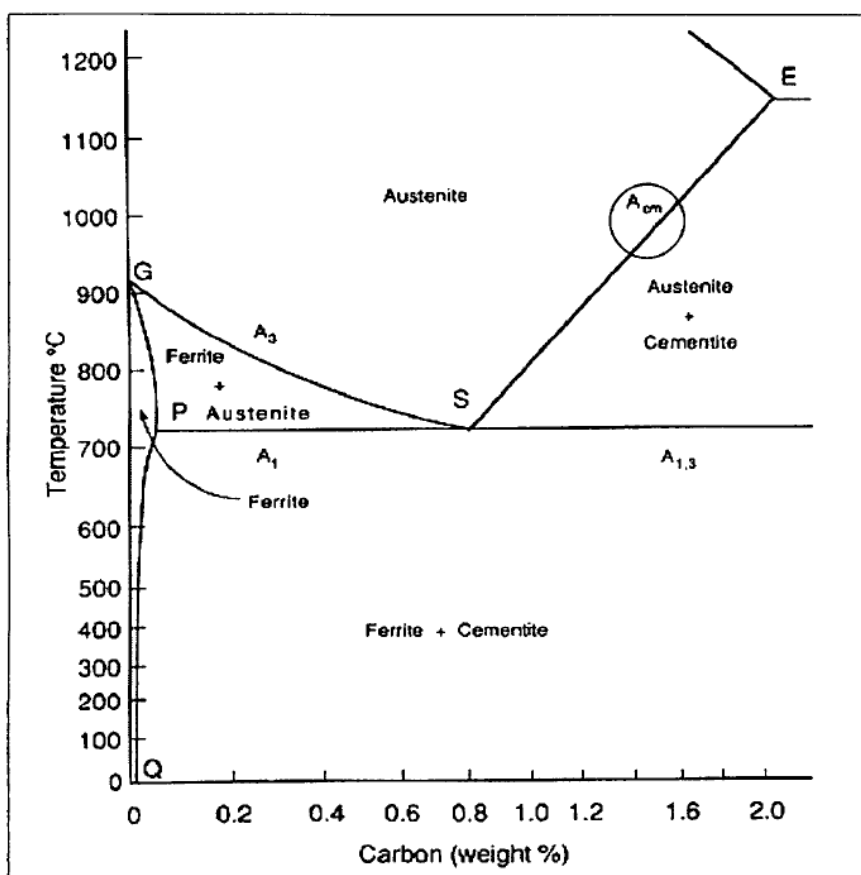
1.2 Μηχανισμός δημιουργίας μοτίβου

Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις παράγοντες που θα επηρεάζουν έντονα τα τελικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου χάλυβα: το φορτίο του χωνευτηρίου και η μέθοδος σφυρηλάτησης. Τα υλικά και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και τη σφυρηλάτηση του πλινθώματος θα επηρεάσουν άμεσα εάν μπορεί να παραχθεί ή όχι ένα μοτίβο. Σύγχρονα πειράματα, ιστορικές και εθνογραφικές αναφορές καταδεικνύουν ότι υπάρχουν πολλά πιθανά συστατικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το φορτίο του χωνευτηρίου για την παραγωγή ενός χαλύβδινου πλινθώματος με μοτίβο. Έχουν επίσης καθορίσει συγκεκριμένους παράγοντες που είναι απαραίτητοι για την παραγωγή ενός μοτίβου. Ο Al-Beruni δήλωσε ότι το «farand» (το μοτίβο της Δαμασκού) δεν ήταν αποτέλεσμα της βιομηχανίας και του σχεδιασμού, αλλά ήταν ένα τυχαίο προϊόν. Περιέργως, ο Wilkinson [1] έκανε μια παρόμοια δήλωση χίλια χρόνια αργότερα, "η μορφή των γνήσιων αρχαίων και σύγχρονων σπαθιών της Δαμασκού είναι αποτέλεσμα της φύσης και όχι της τέχνης".

Διάφοροι μελετητές έχουν καθορίσει τους παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό του σχεδίου και είναι πλέον γνωστό ότι το μοτίβο είναι πράγματι το αποτέλεσμα της φύσης του χάλυβα, αν και απαιτείται επίσης ένα ορισμένο ποσό "τέχνης και επεξεργασίας" κατά τη διαδικασία της σφυρηλάτησης. Ουσιαστικά ο χάλυβας χωνευτηρίου μπορεί να παραχθεί από έναν άπειρο αριθμό πιθανών συστατικών φορτίου χωνευτηρίου που περιέχουν σίδηρο και άνθρακα. Η παρουσία ιχνοστοιχείων στο φορτίο του χωνευτηρίου, μέσω της πηγής σιδήρου, άνθρακα ή πρόσθετων ουσιών που προστίθενται στο φορτίο, θα επηρεάσει επίσης το χαλύβδινο πλινθώμα. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να επηρεάσουν τη σφυρηλάτηση του πλινθώματος και την εμφάνιση του τελικού προϊόντος. Το ποσοστό της περιεκτικότητας σε άνθρακα του χάλυβα χωνευτηρίου είναι σημαντικό για τη δημιουργία διαφορετικών τύπων μοτίβων και την απόδοση της λεπίδας.[1]

Τόσο ο υποευτηκτοειδής χάλυβας (< 0, 8% C) όσο και ο υπερευτηκτοειδής (> 0, 8% C) μπορούν να παράγουν ένα μοτίβο, αλλά η μικροδομή τους και, ως εκ τούτου, το σχέδιο θα είναι αισθητά διαφορετικά. Ο υποευτηκτοειδής χάλυβας θα παραγάγει ένα ενωμένο σχέδιο (π.χ. Sham pattern), ωστόσο, τα πιο χαρακτηριστικά σχέδια χάλυβα της Δαμασκού (π.χ. Kara, Khorasan, pattern) παράγονται από υπερευτηκτοειδή χάλυβα.

Τα υπερευτεκτοειδή πλινθώματα παράγουν ζώνες φερρίτη-περλίτη. Ένας παράγοντας στην παραγωγή αυτών των ζωνών είναι η παρουσία στοιχείων, τα οποία κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του υγρού πλινθώματος, παραμένουν στην ενδοδενδριτική περιοχή. Ο περλίτης θα σχηματιστεί στη ενδοδενδριτική ζώνη, πιθανώς επηρεασμένος από την παρουσία μαγγανίου. Ο δενδρίτης αποτελείται κυρίως από φερρίτη ο οποίος ψύχθηκε αργά. Μελέτες, κυρίως με επικεφαλής τον Verhoeven έχουν διαπιστώσει ότι ο σχηματισμός του σχεδίου σε υπερευτεκτοειδείς χάλυβες οφείλεται στην ευθυγράμμιση του σφαιρικού σεμεντίτη στις ενδοδενδριτικές ζώνες. Ο σεμεντίτης ευθυγραμμίζεται λόγω της παρουσίας στοιχειωδών ακαθαρσιών που υπάρχουν στη ενδοδενδριτική ζώνη. Ο Verhoeven διαπίστωσε ότι στοιχεία όπως το βανάδιο και το μολυβδαίνιο, ακόμη και σε ποσότητες τόσο χαμηλές όσο το 0,003%, προάγουν την ευθυγράμμιση του σεμεντίτη. Άλλα στοιχεία, τα οποία επίσης συμβάλουν στην ανάπτυξη της ζώνης, είναι το χρώμιο, το νιόβιο και το μαγγάνιο.[3]



Εικόνα 1.2 διάγραμμα φάσεων χάλυβα-άνθρακα, πηγή(Verhoeven, Pendray, Dauksch and Wagstaff, 2018)

Η επίδραση του ρυθμού ψύξης στη σφυρηλάτηση του πλινθώματος και του προκύπτοντος σχεδίου δεν έχει μελετηθεί. Ο Richard Furrer σημείωσε ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διαπίστωσε πως τα ταχέως ψυχόμενα πλινθώματα ήταν

πιο εύκολο να σφυρηλατηθούν σε σχέση με τα αργά ψυχόμενα πλινθώματα. Αυτό είναι ίσως το αποτέλεσμα των διαφόρων θέσεων ανάπτυξης του σεμεντίτη. Ο Verhoeven δήλωσε ότι ο ρυθμός ψύξης του πλινθώματος δεν είναι απαραίτητος παράγοντας για το σχηματισμό του μοτίβου. Ωστόσο, φαίνεται λογικό να υποθέσουμε ότι ο ρυθμός ψύξης επηρεάζει την εμφάνιση του σχεδίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο ταχύτερα ψύχεται το πλίνθωμα, τόσο μικρότεροι είναι οι δενδρίτες και επομένως βρίσκονται πιο κοντά οι μεσοδενδριτικές ζώνες. Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι μεσοδενδριτικές ζώνες, τόσο πιο κοντά είναι ο ευθυγραμμισμένος σφαιροειδής σεμεντίτης και επομένως εκλεπτυσμένο το τελικό σχέδιο της επιφάνειας. Ως εκ τούτου, μια λεπίδα σφυρηλατημένη από ένα αργά ψυχόμενο πλίνθωμα θα είχε ένα πιο χονδροειδές μοτίβο από μια λεπίδα σφυρηλατημένη από μια ταχέως ψυχόμενη ράβδωση, υποθέτοντας ότι οι λεπίδες θα απαιτούσαν παρόμοια ποσότητα σφυρηλάτησης.

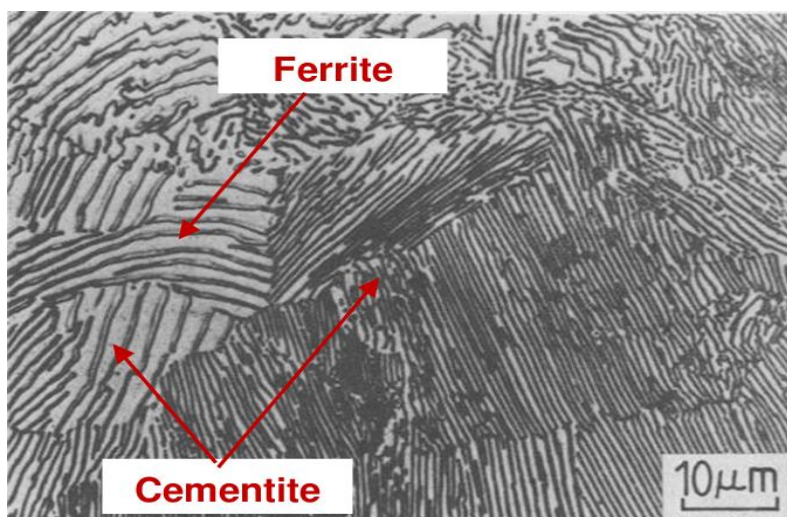
Επιπλέον, οι Verhoeven και Jones υποδηλώνουν ότι το όριο των κόκκων του σεμεντίτη μεγαλώνει σε πιο χονδροειδείς περιοχές με κάθε κύκλο σφυρηλάτησης. Συνεπώς υπεύθυνα για το παχύτερο "νήμα" των μοτίβων της Δαμασκού είναι τα μεγάλα σωματίδια του σεμεντίτη. Η έκταση της σφυρηλάτησης και κατά συνέπεια η έκταση της παραμόρφωσης των δενδριτών επηρεάζει επίσης την λεπτότητα και την εμφάνιση του σχεδίου. Η επίδραση του ρυθμού ψύξης έχει διαπιστωθεί επίσης και από τις εθνογραφικές αναφορές. Πολλοί εθνογραφικοί παρατηρητές πρότειναν ότι το μοτίβο της Δαμασκού είναι αποτέλεσμα της ψύξης των αρχικών περιεχομένων του χωνευτηρίου με εξαιρετικά αργό ρυθμό. Ωστόσο, ο Bronson συνεχίζει με την υπόθεση ότι αυτό "δεν υποστηρίζεται καλά από τα δεδομένα σχετικά με την πραγματική παραγωγή Wootz". Επομένως, φαίνεται πιθανό ότι η λεπτότητα ή η τραχύτητα του τελικού σχεδίου θα εξαρτιόταν από τον ρυθμό ψύξης του υγρού χάλυβα επιπλέον της ποσότητας σφυρηλάτησης. Μια βραδέως ψυχθείσα ράβδος θα μπορούσε να κάνει ένα χονδροειδές μοτίβο ή, εάν σφυρηλατηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, ένα λεπτό μοτίβο, αλλά ένα γρήγορα ψυχθέν πλίνθωμα δεν θα μπορούσε ποτέ να γίνει μια χονδροειδή λεπίδα με σχέδια, αλλά μόνο μια με λεπτό μοτίβο.[4]

Τα πειράματα των Verhoeven και Pendray διαπίστωσαν ότι το πλίνθωμα παρουσίαζε το ελάττωμα «hot short» όπου επρόκειτο για θραύση κατά την σφυρηλάτηση, λόγω μικροπροσμίξεων φωσφόρου και θείου. Αν και λίγοι αρχαίοι χάλυβες περιέχουν θείο, συχνά περιέχουν φωσφόρο. Δεδομένου ότι τα πλινθώματα που στερεοποιούνται από την υγρή φάση, έχουν περιοχές ιδιαίτερα υψηλές σε φώσφορο που εμφανίζονται ως ο σιδηρούχος άνθρακας σταθερής φάσης φωσφόρου, αντί να διανέμεται ομοιόμορφα, έτσι τα πλινθώματα παρουσιάζουν επίσης το «hot short»

Τα ευρήματα του Verhoeven, ότι τα χωνευτά πλινθώματα χάλυβα ήταν "hot short", είναι σημαντικά για τρεις λόγους:

- 1) Υποστηρίζει το γεγονός ότι ο Μοχορ μεταξύ άλλων σημείωσε ότι το "hot shortness" ήταν ένα χαρακτηριστικό του χωνευτού χάλυβα.
- 2) Όντας οι λεπίδες "hot short", απαιτούσαν διαφορετική τεχνική σφυρηλάτησης από ό, τι χρησιμοποιούταν για άλλους τύπους χάλυβα.
- 3) Η σφυρηλάτηση χαμηλής θερμοκρασίας θα παράγει σφαιροειδή σεμεντίτη.

Ο φωσφόρος στα πλινθώματα ευθυνόταν για το ότι τα πλινθώματα ήταν "hot short" και επομένως θα έπρεπε να σφυρηλατούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο Verhoeven διαπίστωσε ότι κατά τη σφυρηλάτηση στις απαραίτητες χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης του ωστενίτη, ο σεμεντίτης συγκεντρώνεται στις ενδοδενδριτικές περιοχές, ίσως λόγω των ακαθαρσιών, οι οποίες συμπυκνώνονται στις ενδοδενδριτικές περιοχές. Η θερμοκρασία μετάπτωσης του ωστενίτη είναι η θερμοκρασία στην οποία ο φερρίτης και ο σεμεντίτης αρχίζουν να διαχωρίζονται κατά τη διάρκεια της αργής ψύξης. Η θερμοκρασία μετάπτωσης του ωστενίτη εξαρτάται από την στοιχειώδη σύνθεση του χάλυβα, και ιδιαίτερα από της περιεκτικότητας του σε άνθρακα. Η θερμοκρασία μετάβασης ξεκινά στην περιοχή των 730 ° C, γύρω από την ευτηκτοειδή σύσταση (0.8%). Η θερμοκρασία μετάπτωσης του ωστενίτη αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε άνθρακα έως ότου η περιεκτικότητα σε άνθρακα φτάσει περίπου το 2% (χυτοσίδηρος) όπου η θερμοκρασία είναι πάνω από 1100 ° C.[5]



Εικόνα 1.3 περιοχές φερρίτη και σεμεντίτη πηγή (Verhoeven, Pendray and Berge, 1993)

Ο χρόνος και η θερμοκρασία της σφυρηλάτησης είναι σημαντικοί παράγοντες στο σχηματισμό του μοτίβου. Κατά τα πειράματα τους οι Verhoeven και Pendray [6] θέρμαιναν τις λεπίδες μέχρις ότου 50 °C κάτω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης του ωστενίτη και κατόπιν σφυρηλατούσαν την λεπίδα ενώ ψυχόταν αργά από τον περιβάλλοντα αέρα μέχρι τους 250 °C κάτω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης ωστενίτη. Με αυτή τη διαδικασία κατέγραψαν ότι αρχικά τα καρβίδια κατανέμονται τυχαία αλλά μετά από επιπλέον θέρμανση και σφυρηλάτηση σε αυτές τις θερμοκρασίες, ο σεμεντίτης άρχισε να ευθυγραμμίζεται. Όσο περισσότεροι οι κύκλοι της κατεργασίας, τόσο πιο διακριτό γινόταν το μοτίβο. Προκειμένου το μοτίβο να διακρίνεται εμφανώς στην επιφάνεια της λεπίδας, το οξειδωμένο στρώμα έπρεπε να αφαιρεθεί, η λεπίδα έπρεπε να καθαριστεί και να γυαλιστεί πριν δημιουργηθεί η κόψη. Καταγράφεται ότι η τέφρα ξύλου και το νερό χρησιμοποιήθηκαν στην Ινδία για να απομακρυνθεί οποιαδήποτε γράσο στην επιφάνεια. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό του χάλυβα περιλαμβάνουν ξηρό ασβέστη με τέφρα και καπνό. Για να χαράξουν τις λεπίδες με οξύ, γινόταν λουτρά νιτρικών και θειικών οξέων κατά την κοπή.

Η χάραξη με οξύ αντιδρά κατά προτίμηση στις περιοχές σιδήρου και καρβιδίου και η επίδραση εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου οξέος και του χρόνου που αντιδρά με το μέταλλο. Σύμφωνα με τον Verhoeven και τον Jones το λευκό συστατικό των υπερευαικτοτοειδών λεπίδων με μοτίβο της Δαμασκού είναι ο σεμεντίτης. Σε υποευαικτοειδής λεπίδες, το λευκό συστατικό είναι ο φερρίτης. Το πιο σκούρο χρώμα "φόντο" είναι συχνά μία μορφή περλίτη που φαίνεται πιο σκούρος. Ωστόσο, ποιες φάσεις εμφανίζονται πιο φωτεινές ή πιο σκούρες εξαρτάται επίσης από τη μικροδομή και της μεθόδου χάραξης.[6]



Εικόνα 1.4 πηγή (Verhoeven, Pendray and Berge, 1993)

1.3 Τεχνικές κατασκευής

1.3.1 Αρχαία τεχνική

Όσο αφορά την κατασκευή των πλινθωμάτων η διαδικασία ήταν η εξής. Σε ένα πήλινο χωνευτήριο τοποθετούνταν ένα μείγμα σκληρού και μαλακού σιδήρου που συχνά αναφέρεται ως αρσενικός και θηλυκός σίδηρος καθώς και κάποια φυτική ύλη όπως τσόφλια, φύλλα και κομμάτια ξύλου. Η αιτία ύπαρξης αυτής της φυτικής ύλης εξυπηρετεί δύο βασικούς σκοπούς. Ο πρώτος είναι η εναπόθεση άνθρακα στο σίδηρο χωρίς τον οποίο θα ήταν αδύνατη η τήξη του με τους φούρνους της εποχής, καθιστώντας έτσι αδύνατη την επεξεργασία του σιδήρου. Ο δεύτερος σκοπός ήταν η δημιουργία αερίων τα οποία λειτουργούσαν ως μέσο μόνωσης του σιδήρου από τον περιβάλλοντα αέρα, προστατεύοντας τον από την ταχεία οξείδωση. Ο χρόνος θέρμανσης των πλινθωμάτων διακυμαινόταν από 6 ώρες έως και 6 ημέρες αναλόγως τη διαδικασία. [4]

Τα πλινθώματα, συχνά αναφερόμενα ως «κουμπιά» μετά τη θέρμανση τους, παρουσίαζαν δύο διακριτές περιοχές στην επιφάνεια τους. Η άνω πλευρά είχε μία τραχιά επιφάνεια και συχνά χρησιμοποιούταν για τη διαμόρφωση της ραχοκοκαλιάς του όπλου ενώ η κάτω πλευρά είχε μία πιο λεία επιφάνεια, η οποία συχνά χρησιμοποιούταν για τη διαμόρφωση της λεπίδας.



Εικόνα 1.5 κιάθιο, πηγή (Verhoeven, Pendray and Berge, 1993)



Εικόνα 1.6 πλινθωμα, πηγή (Verhoeven, Pendray and Berge, 1993)

Στην περίπτωση που κάποιο κουμπί αποτύγγανε να εμφανίσει όμορφα διακοσμητικά μοτίβα μετά από έναν τοπικό έλεγχο, τότε κάποιες φορές τα πλινθώματα θα επέστρεφαν στο φούρνο για επιπλέον θέρμανση. Σε ορισμένες μεθόδους, εάν το κουμπί ήταν ικανοποιητικό, τότε γινόταν μία διαδικασία ανόπτησης, δηλαδή το κουμπί θερμαινόταν σε ένα δωμάτιο για μερικές μέρες ώστε να γίνει ανακούφιση του υλικού από παραμένουσες τάσεις, πριν τη σφυρηλάτηση του, μειώνοντας τον κίνδυνο θραύσης σε περίπτωση λάθος χειρισμού.[4]

Αναμφισβήτητα, στην αρχαιότητα η ποιότητα και οι ιδιότητες των πλινθωμάτων θα ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό, ιδιαίτερα σε περιεκτικότητα σε άνθρακα και ιχνοστοιχεία, λόγω της διακύμανσης της ικανότητας του χωνευτηρίου. Στην ιδανική περίπτωση, όλα αυτά τα πλινθώματα θα μπορούσαν να σφυρηλατηθούν και να γυαλιστούν ώστε να αποκαλύψουν το χαρακτηριστικό μοτίβο του χάλυβα της Δαμασκού. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν επαληθεύεται καθώς δεν μπορούν όλα τα πλινθώματα να παράγουν ένα διακοσμητικό μοτίβο ούτε και όλοι οι χωνευτοί χάλυβες προορίζονταν για σπαθιά ή μαχαίρια, αλλά και για χρηστικά αντικείμενα όπως ψαλίδια ή λίμες. Ακόμα, φαίνεται πως δεν υπάρχει κανένα πρότυπο που μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το τυπικό μοτίβο χάλυβα της Δαμασκού, ούτε υπάρχει ένας παράγοντας που προκαλεί τους διαφορετικούς τύπους μοτίβων. Ορισμένοι μελετητές υποστηρίζουν ότι μόνο χάλυβας υψηλού άνθρακα είναι ο "αληθινός" χάλυβας της Δαμασκού επειδή μόνο ο χάλυβας υψηλού άνθρακα μπορεί να παράγει τα ισχυρά μοτίβα αντίθεσης, όπως ο Kara Khorasan [1]. Ωστόσο, από μια ιστορική – τεχνολογική άποψη, αυτή η υπόθεση είναι παραπλανητική. Στο παρελθόν, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του χάλυβα δεν ήταν τυποποιημένα στον βαθμό που είναι σήμερα.

Η διαφορά μεταξύ ενός χάλυβα υψηλού άνθρακα και ενός χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι μόνο ένα κλάσμα ενός ποσοστού. Παρόλο που οι τεχνίτες θα μπορούσαν να διακρίνουν ένα χάλυβα χαμηλού άνθρακα και ένα χάλυβα υψηλού άνθρακα και να εκλέξουν την ποσότητα του ανθρακούχου υλικού που βάζουν στο χωνευτήριο, είναι απίθανο να μπορούσαν να εκλέξουν την περιεκτικότητα σε άνθρακα σε ένα τόσο μικρό βαθμό, ιδιαίτερα όταν κάποιος θεωρεί ότι και οι ίδιοι οι σίδηροι συχνά περιείχαν άνθρακα. Επιπλέον, σε αντίθεση με τους σημερινούς επιστήμονες που μετρούν τις ακριβείς ποσότητες με ειδικό εξοπλισμό, είναι εύλογο να υποθέσουμε ότι οι τεχνίτες της εποχής εκτιμούσαν τις ποσότητες εμπειρικά. [7]

Τέλος, τα υλικά που χρησιμοποιούνταν για να γυαλίζουν και να χαράζουν το αντικείμενο επηρεάζουν επίσης την εμφάνισή του. Έρευνα για το πώς όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν την εμφάνιση του σχεδίου και εάν τα συγκεκριμένα πρότυπα μπορούν να συσχετιστούν οριστικά με διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη

1.3.2 Σύγχρονη τεχνική πλινθώματος

Τα τελευταία χρόνια οι Verhoeven και Pendray έχουν διεξάγει εκτεταμένη έρευνα προκειμένου να προσδιορίσουν με ακρίβεια την αρχαία τεχνική που χρησιμοποιούσαν. Η τελευταία τους έρευνα καταλήγει στο εξής προτεινόμενο μοντέλο.[3]

Το προτεινόμενο μοντέλο απαιτεί επιλεκτική συμπύκνωση του πλινθώματος κατά τη διάρκεια των πολλαπλών κύκλων σφυρηλάτησης των σωματιδίων σεμεντίτη στα ενδοδενδριτικά φύλλα. Σε καθαρούς χάλυβες σιδήρου - άνθρακα, ο σεμεντίτης έχει τον χημικό τύπο Fe_3C . Όταν κραματικά στοιχεία διαλύονται στον σεμεντίτη, είναι σύνηθες να ορίζεται ο χημικός τύπος ως M_3C όπου $M = Fe + X$. Κατά τη διάρκεια της φάσης προθέρμανσης ενός κύκλου σφυρηλάτησης, τα σωματίδια σεμεντίτη θα αρχίσουν να διαλύονται στον γειτονικό ωστενίτη. Εάν η υψηλότερη θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, μερικά από τα σωματίδια σεμεντίτη θα παραμείνουν στην υψηλότερη θερμοκρασία και στη συνέχεια θα αυξηθούν σε μέγεθος καθώς η θερμοκρασία πέφτει. Εάν το στοιχείο κράματος στο καρβίδιο M_3C μειώνει την κινητικότητα της διεπαφής καρβιδίου / ωστενίτη, τότε τα καρβίδια του M_3C στα ενδοδενδριτικά φύλλα θα γίνουν μεγαλύτερα από τα καρβίδια Fe_3C στα ενδοδενδριτικά φύλλα καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. [3]

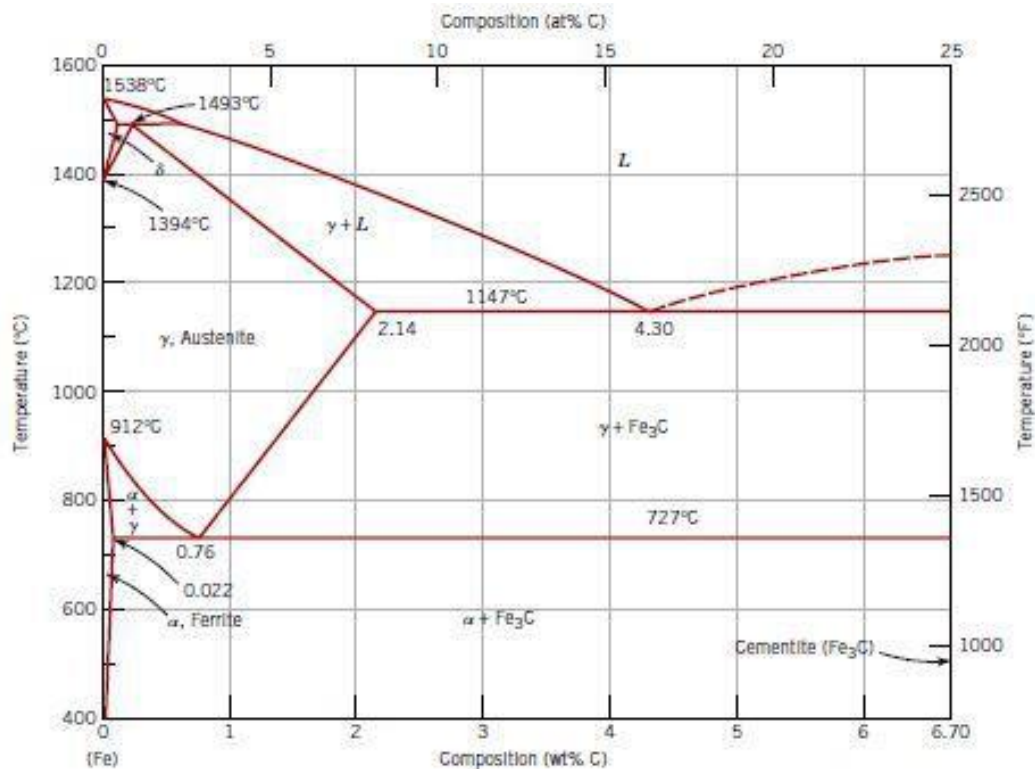
Υπάρχουν τρεις δυνατότητες:

Περίπτωση 1: Στην υψηλότερη θερμοκρασία σφυρηλάτησης, επιβιώνουν και μερικά σωματίδια Fe_3C και μερικά M_3C . Αλλά τα σωματίδια M_3C είναι μεγαλύτερα και περισσότερα.

Περίπτωση 2: Στην υψηλότερη θερμοκρασία σφυρηλάτησης, όλα τα σωματίδια Fe_3C έχουν διαλυθεί αλλά μερικά από τα σωματίδια M_3C έχουν επιβιώσει.

Περίπτωση 3: Στην υψηλότερη θερμοκρασία σφυρηλάτησης, όλα τα σωματίδια τσιμέντου έχουν διαλυθεί.

Κατά την ψύξη, τα σωματίδια σεμεντίτη θα αυξηθούν σε μέγεθος. Στην περίπτωση 1, είναι πιθανό τα υπόλοιπα σωματίδια Fe_3C , τα οποία αναπτύσσονται ταχύτερα από τα σωματίδια M_3C , να αυξάνουν το μέγεθός τους και να ταιριάζουν με εκείνα των μεγαλύτερων αλλά πιο αργά αναπτυσσόμενων σωματιδίων M_3C . Στη συνέχεια, εάν αρκετά από τα σωματίδια Fe_3C πυκνώνονται στα ενδοδενδριτικά φύλλα ώστε να ταιριάζουν σε πλήθος στα ενδοδενδριτικά φύλλα, δεν παρατηρείται αυξημένη χονδρόπτωση στα ενδοδενδριτικά φύλλα. Αλλά αν λίγα ή καθόλου πρόσθετα σωματίδια καρβιδίου Fe_3C πυκνωθούν στα ενδοδενδριτικά φύλλα όταν κρυστάλλουν, τότε παρατηρούνται μεγαλύτερα καρβίδια στα ενδοδενδριτικά φύλλα μετά από κάθε βήμα ψύξης και σφυρηλάτησης, το οποίο τελικά θα προκαλέσει την επιλεκτική χόνδριση καρβιδίων στα ενδοδενδριτικά φύλλα καθώς ο αριθμός των κύκλων σφυρηλάτησης αυξάνεται.



Εικόνα 1.7 διάγραμμα φάσεων Fe-C πηγή (Verhoveen, Pendray, Dauksch and Wagstaff, 2018)

Το παραπάνω μοντέλο προκειμένου να υλοποιηθεί σωστά χρειάζεται απαραίτητος ένας έμπειρος τεχνίτης. Το όνομα αυτού είναι Alfred Pendray και παρακάτω παρουσιάζονται τα 22 βήματα που απαιτούνται για την παραγωγή του αληθινού δαμασκηνού μοτίβου όπως προέκυψε από την εκτεταμένη και πολύχρονη έρευνα τους. [7]

Βήματα:

1. Συγκέντρωση των απαραίτητων εργαλείων
2. Πλήρωση του δοχείου με τα υλικά
3. Σφράγισμα του δοχείου με πηλό
4. Τοποθέτηση του δοχείου στο φούρνο
5. Θέρμανση του μείγματος για ώρες
6. Αφαίρεση του δοχείου από το φούρνο
7. Αφαίρεση του σφραγιστικού μέσου
8. Αφαίρεση της κρούστας
9. Καθαρισμός του μεταλλικού κέικ
10. Καθαρισμός του μεταλλικού κέικ
11. Αφαίρεση του κέικ από τη φωτιά.

12. Σφυρηλάτηση του κέικ
13. Διαφορετικά σχήματα του κέικ κατά τη σφυρηλάτηση
14. Χρήση υπέρυθρης κάμερας για έλεγχο της θερμοκρασίας
15. Έλεγχος με μαγνήτη για την ύπαρξη του red-hot
16. Περεταίρω μορφοποίηση της λεπίδας.
17. Κόψιμο του μαχαιριού.
18. Τρόχισμα της λεπίδας
19. Δημιουργία τυφλών οπών σε διάσταση της 1/10 της ίντσας
20. Χάραξη της λεπίδας
21. Αναθέρμανση και σφυρηλάτηση
22. Ολοκλήρωση της λεπίδας

1.3.3 Μέθοδος πολλαπλών στρώσεων

Η διαδικασία κατασκευής λεπίδων από δαμασκηνό χάλυβα με πολλαπλές στρώσεις συνίσταται στη στοιβάξη εναλλασσόμενων φύλλων δύο διαφορετικών ειδών χάλυβα το ένα πάνω στο άλλο και στη συνέχεια σφυρηλάτηση για τη θερμή συγκόλληση μεταξύ τους. Αφού σφυρηλατηθεί αυτό το σύνθετο σε περίπου δύο φορές το αρχικό του μήκος, αναδιπλώνεται και σφυρηλατείται ξανά, διπλασιάζοντας έτσι τον αριθμό των στρώσεων στο τεμάχιο. Το δίπλωμα και η συγκόλληση συνεχίζονται μέχρι να σχηματιστεί ένας μεγάλος αριθμός στρωμάτων. Οι χάλυβες που επιλέγονται έχουν και οι δυο υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, (>0,8%), ενώ ο ένας από τους δυο πρέπει να έχει και σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο. [8]

Σύνηθες παράδειγμα, είναι η επιλογή των χαλύβων 15N20 και 1095. Ένας ασφαλής αριθμός ελασμάτων που μπορεί κανείς να ξεκινήσει είναι τρία φύλλα χάλυβα 15N20 και δύο φύλλα χάλυβα 1095 στοιβαγμένα εναλλάξ. Καθώς ο αριθμός των πτυχώσεων αυξάνεται, ο αριθμός των στρωμάτων στη σφυρηλατημένη λεπίδα αυξάνεται δραματικά. Μετά από 3 αναδιπλώσεις, οι 5 αρχικές στρώσεις αυξήθηκαν σε 40. Όσο περισσότερο αυξάνει ο αριθμός των αναδιπλώσεων, τόσο πιο γρήγορα μεγαλώνει και ο αριθμός των στρώσεων.

Μετά τέλος της σφυρηλάτησης και έχοντας φτάσει στον επιθυμητό αριθμό στρώσεων, σειρά έχει η χημική προσβολή της επιφάνειας για την ανάδειξη του μοτίβου. Για να υπάρχει καλύτερη ευκρίνεια ανάμεσα στις αποχρώσεις θα πρέπει η επιφάνεια του τεμαχίου πριν τη χημική χάραξη να είναι λεία και απαλλαγμένη από κάθε είδους ακαθαρσίες και ρύπους. Έτσι, η αντίδραση μεταξύ του χάλυβα και οξέος θα εμφανίσει ένα περίπλοκο και αισθητικά ωραίο μοτίβο. Ένας τυπικός αριθμός στρώσεων για την εμφάνιση τέτοιων περίτεχνων σχεδίων είναι οι 150 στρώσεις. Κάτω από αυτόν τον αριθμό στρώσεων δεν υπάρχει αρκετή ανάμιξη των δυο χαλύβων, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται περισσότερο ξεκάθαρες ρίγες παρά τυχαία μοτίβα.[9]

1.3.4 Μέθοδος με Κάνιστρο

Με τον τρόπο αυτόν, το κράμα δημιουργείται σε ένα δοχείο στο οποίο τοποθετούνται και εδώ διαφορετικοί χάλυβες, μόνο που ο ένας είναι σε σκόνη και ο άλλος είναι σε κομματάκια, ψήγματα και γενικά σε μικρό μέγεθος. Συνηθέστερα, σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται μπίλιες ρουλεμάν ή κρίκοι αλυσίδας μετάδοσης κίνησης.

Για τη δημιουργία της μπιγιέτας, ως κάνιστρο, χρησιμοποιείται ένα κομμάτι τετραγωνικού κοιλοδοκού ή οποιουδήποτε άλλου μεταλλικού σωλήνα/αγωγού. Μια τυπική διάσταση κανίστρου είναι 50X50X120 mm. Αρχικά, για ευκολία αποκόλλησης του περιβλήματος του δοχείου από το υλικό χρησιμοποιείται μια ενδιάμεση στρώση από χαρτί, κάρβουνο, διορθωτικό σπηλών (μπλάνκο) ή οτιδήποτε μπορεί να αποτρέψει την επικόλληση του κανίστρου στο υλικό. Αφού στεγνώσει η επίστρωση, τοποθετούνται η σκόνη και τα κομμάτια και συγκολλάται το καπάκι, όχι όμως ερμητικά. Πρέπει να υπάρχει μια μικρή τρύπα, προκειμένου να διαφεύγουν τυχόν παγιδευμένα αέρια και οι αναθυμιάσεις από τις χημικές αντιδράσεις, για να μην γίνει έκρηξη. [10]

Το κάνιστρο πρέπει να φτάσει σε θερμοκρασία αρκετά υψηλή 1200-1350 C° προκειμένου να γίνει επιτυχημένα η συγκόλληση. Μόλις φτάσει στην κατάλληλη θερμοκρασία, πιέζεται ελαφρώς περιμετρικά σε πρέσα για να κολλήσουν τα υλικά μεταξύ τους. Ύστερα, αφήνεται να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου για να γίνει η αφαίρεση του περιβλήματος. Έχοντας ένα συμπαγές προϊόν, προχωράμε στη γνωστή διαδικασία της σφυρηλάτησης για τη δημιουργία της λεπίδας.[8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Πειραματική Διάταξη

2.1.1 Οι Χάλυβες

Η επιλογή των υλικών για την κατασκευή του δαμασκηνού χάλυβα έγινε βάσει των ιδιοτήτων τους. Οι χάλυβες που επιλέχθηκαν είναι οι 15N20, 1095 και 1084. Κοινό χαρακτηριστικό των χαλύβων αυτών είναι η υψηλή περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, πράγμα που είναι και ζητούμενο στο δαμασκηνό χάλυβα. Ως κοινός χάλυβας και στα δυο δοκίμια επιλέχθηκε ο 15N20 για την περιεκτικότητά του σε νικέλιο. Το νικέλιο είναι που ύστερα από τη χημική χάραξη θα εμφανίσει στην επιφάνεια τα ανοιχτόχρωμα σχέδια. Οι υπόλοιποι δυο χάλυβες 1095 και 1084 είναι παρόμοιοι σε σύσταση και ιδιότητες. Επίσης, η επιλογή τους έγινε επειδή οι 1095 και 1084 έχουν παρεμφερή συμπεριφορά στις θερμικές κατεργασίες.



Εικόνα 2.1 χάλυβες 1084, 15N20, 1095

ΠΙΝΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Πίνακας χημικής σύστασης χάλυβα 15N20

Carbon	0.75 %
Chromium	0.11 %
Manganese	0.4 %
Silicium	0.3 %
Nickel	2 %

Πίνακας χημικής σύστασης χάλυβα 1095

Iron, Fe	98.38 - 98.8
Carbon, C	0.90 - 1.03
Sulfur, S	≤ 0.050
Phosphorous, P	≤ 0.040
Manganese, Mn	0.30 - 0.50

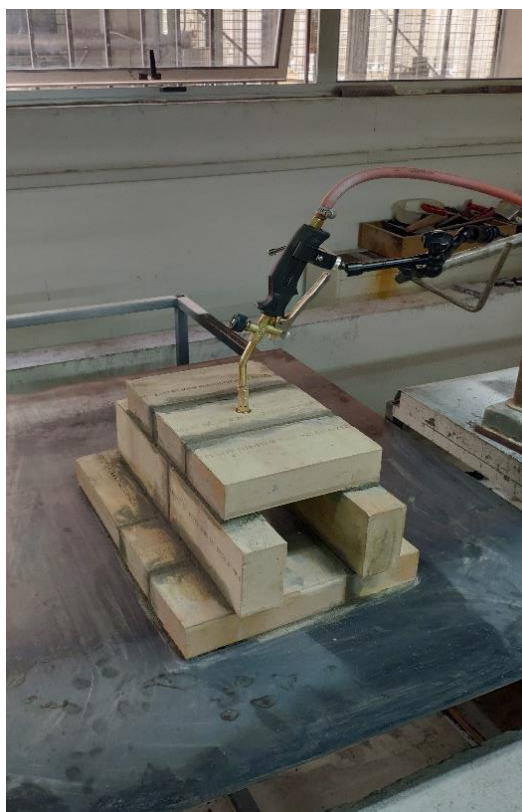
Πίνακας χημικής σύστασης χάλυβα 1084

Iron, Fe	98.08 - 98.6
Carbon, C	0.800 - 0.930
Manganese, Mn	0.60 - 0.90
Phosphorous, P	0.050
Sulfur, S	0.040

2.1.2 Ο Φούρνος

Προκειμένου να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του δαμασκινού χάλυβα, απαραίτητος είναι ένας φούρνος ο οποίος να έχει τη δυνατότητα να φτάνει τουλάχιστον στους 1350°C. Τέτοιος φούρνος δεν υπάρχει στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου, οπότε έπρεπε να κατασκευαστεί και αυτός. Η δομή καθώς και ο σχεδιασμός του φούρνου πέρασαν από αρκετά στάδια μέχρι να πετύχουμε την τελική διάταξη που φτάνει και να αντέχει τις επιθυμητές θερμοκρασίες.

Αρχικά, η κατασκευή του φούρνου έγινε με κοινά κεραμικά τούβλα χτισμένα με πυρόχρωμα, κατάλληλο για υψηλές θερμοκρασίες. Κάνοντας τις πρώτες δοκιμές, οι μετρούμενες θερμοκρασίες δεν πλησίαζαν τις επιθυμητές. Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό θερμόμετρο υπερύθρων. Στα εσωτερικά τοιχώματα η θερμοκρασία έφτανε τους 250°C, το εξωτερικό του φούρνου ήταν περίπου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 28-35°C, ενώ το δοκίμιο δεν ξεπερνούσε τους 750°C.



Εικόνα 2.2 Αρχικός φούρνος

Στη συνέχεια, για την αύξηση της απόδοσης του φούρνου, έγινε επένδυση στο εσωτερικό του με κομμάτια από κυάθια χύτευσης. Αυτό έγινε επειδή το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κυάθιο χύτευσης έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και μικρότερη θερμοχωρητικότητα από αυτό των τούβλων. Έτσι δημιουργείται μια περιοχή η οποία συγκεντρώνει όλη την θερμική ενέργεια από την προδιδόμενη φλόγα και την διοχετεύει στο δοκίμιο. Για τη μείωση των απωλειών, καλύφθηκε το εμπρόσθιο και οπίσθιο μέρος του φούρνου όσο ήταν επιτρεπτό από τις συνθήκες που υπήρχαν για τη σωστή καύση του προπανίου στο εσωτερικό.



Εικόνα 2.3 επένδυση του φούρνου με κυάθιο χύτευσης



Εικόνα 2.4 εσωτερικό του φούρνου κατά την καύση

Όμως, ούτε και αυτές οι αλλαγές έφεραν το αποτέλεσμα που αναμενόταν. Η θερμοκρασία του δοκιμίου, όπως και αυτή του κυαθίου, δεν ξεπερνούσαν τους 1000°C , τα τούβλα στο εσωτερικό καθώς και το εξωτερικό μέρος της κατασκευής εξακολουθούσαν να βρίσκονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα 250°C και $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Σε αυτό το στάδιο, χρειάστηκε να γίνει μια μετατροπή και στο φλόγιστρο (πράγμα που θα παρουσιαστεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο). Με την αλλαγή του φλόγιστρου, ναι μεν αυξήθηκε η θερμοκρασία, αλλά λόγω της δομής και το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τούβλα, δεν κατάφεραν να αντέξουν. Η ραγδαία πρόσδοση θερμότητας που προσέφερε η νέα φλόγα, είχε ως συνέπεια να μην μπορούν τα τούβλα να την απορροφήσουν με τον ίδιο ρυθμό που προσφερόταν. Οπότε μέσα σε ένα πολύ σύντομο διάστημα, 10-15 δευτερολέπτων, άρχιζαν να σπάνε.

Αυτό το γεγονός οδήγησε στην απόρριψη ολόκληρης της διάταξης αυτής και στην ανάγκη κατασκευής μιας άλλης.

Τελικά, μετά από έρευνα και μελέτη επάνω σε παρόμοιες ιδιοκατασκευές, ο καινούριος και πλέον υπάρχων φούρνος αποφασίστηκε να κατασκευαστεί με στοιχεία πορομπετόν Alfablok. Οι διαστάσεις των στοιχείων είναι 60cmX25cmX12,5cm. Το μεγάλο τους μέγεθος βοήθησε ιδιαίτερα στην συναρμολόγηση και τοποθέτηση τους κατά την κατασκευή. Συνολικά, χρειάστηκαν τέσσερα τεμάχια για την ολοκλήρωση του έργου. Δεν χρειάστηκε να γίνει σύνδεση ή αρμολόγηση μεταξύ τους με κάποιο κονίαμα. Για τη σύσφιξη και στερεοποίηση των χρησιμοποιήθηκαν αυτοσχέδια τσέρκια από στραντζαριστά χαλύβδινα ελάσματα, πάχους 1mm και πλάτους 30mm.

Η δομή και το υλικό των Alfablok, τα καθιστούν κατάλληλα για την κατασκευή του καμινιού. Επειδή, τα μπλοκ είναι πορώδη έχουν τη δυνατότητα να διαχειριστούν υπερυψηλές θερμοκρασίες. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως η κύρια χρήση τους είναι η θερμομόνωση. Λόγω αυτής της ιδιότητάς τους, μας επέτρεψαν να φτάσουμε ή και ξεπεράσουμε ίσως τους 1500°C στο εσωτερικό του φούρνου, ενώ η εξωτερική επιφάνεια είχε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η μοναδική αστοχία που αξίζει να αναφερθεί, είναι πως στο εσωτερικό μέρος του κλιβάνου δημιουργήθηκαν ρωγμές. Αυτό συνέβη, ως αποτέλεσμα της κόπωσης του υλικού μέσα από τους πολλαπλούς θερμικούς κύκλους και των απότομων αλλαγών στις θερμοκρασίες.



Εικόνα2.5 τελική διάταξη του φούρνου

2.1.3 Το φλόγιστρο

Εξίσου σημαντικό ρόλο για τη λειτουργία του φούρνου στα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασιών, προκειμένου την επιτυχή κατασκευή του δαμασκηνού χάλυβα, ήταν και το φλόγιστρο. Η τελική μορφή του καμινέτου ήρθε μετά από πολλές προσπάθειες και δοκιμές.

Αρχικά, στην πρώτη διάταξη του φούρνου χρησιμοποιήθηκε ένα κοινό εμπορικό φλόγιστρο προπανίου. Το ακροφύσιο που επιλέχθηκε ήταν το μικρότερο δυνατό σε μέγεθος, ούτως ώστε να παρέχει την περισσότερο συγκεντρωμένη φλόγα. Το σετ των ακροφυσίων που προμηθευτήκαμε είχε τρία διαφορετικά μπεκ διαμέτρου 0,28mm, 0,50mm και 1,10mm. Μετά από δοκιμές και των τριών, επιλέχθηκε το μπεκ διαμέτρου 0,28mm, αφού αυτό έκανε την καλύτερη μίξη καυσίμου-αέρα προσφέροντας έτσι την επιθυμητή μορφή της φλόγας. Όμως στις δοκιμές με τον πρώτο φούρνο, επειδή ήταν υπερβολικά κλειστός, για τη μείωση των θερμικών απωλειών, το περιβάλλον στο εσωτερικό του δεν είχε τις συνθήκες για σωστή καύση. Έτσι στην πίσω πλευρά της κατασκευής προστέθηκε ένας φυσητήρας, συνδεδεμένος στο κύκλωμα παροχής αέρα του εργαστηρίου, και φυσούσε αέρα για τη σωστή ρύθμιση της μίξης του καυσίμου.



Εικόνα 2.6 το πρώτο φλόγιστρο στον αρχικό φούρνο

Παρ' όλα αυτά, δεν ήταν αρκετό. Η φλόγα ήταν σχετικά μικρή για το μέγεθος και τη φύση της κατασκευής. Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας από τη δεδομένη παροχή ήταν πολύ μικρότερος από αυτόν που απορροφούσε ο φούρνος, λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας των τούβλων, δημιουργώντας ένα ανεπιθύμητο άνω όριο, που

δεν ξεπερνούσε τους 1.000°C. Έτσι λοιπόν, κατέληξε πάλι να γίνει ιδιοκατασκευή για μετατροπή και στο φλόγιστρο. Προκειμένου το φλόγιστρο να φτάσει σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 1300°C, κατέληξε να κατασκευαστεί ακροφύσιο με φλόγα προανάμιξης. Αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο αναμειγνύεται με τον αέρα μέσα στον θάλαμο, πριν την έξοδο του στο περιβάλλον όπου γίνεται και η καύση.

Η πρώτη προσπάθεια δεν απέδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, οπότε χρειάστηκε περεταίρω έρευνα και τροποποίηση του εξοπλισμού. Σε ένα από τα ακροφύσια τύπου “μπουρού” , που περιέχονταν στο σετ με το φλόγιστρο, προσαρμόσαμε έναν σωλήνα διαμέτρου φ 1” και μήκους 25cm. Ο σωλήνας αυτός είχε το ρόλο του θαλάμου μίξης. Επιπλέον, κοντά στο σημείο γύρω από το μπεκ ανοίξαμε τρύπες για την εισαγωγή του αέρα και τοποθετήσαμε έναν αυτοσχέδιο ρυθμιστή “chock”, για την παροχή του αέρα. Μετά από δοκιμές, το βέλτιστο μπεκ για την παροχή του προπανίου ήταν αυτό των 0.5mm.

Παρόλα αυτά, έγινε σημαντική πρόοδος ως προς την απόδοση. Επιτεύχθηκαν οι αναμενόμενες θερμοκρασίες, αλλά δημιουργήθηκε ένα πρόβλημα ως προς τη μορφή της φλόγας και την απόσταση της καύσης της από την έξοδο του ακροφυσίου. Όταν άρχιζε να ανεβαίνει η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κλιβάνου, πάνω από τους 500°C, η καύση άρχιζε να μετατοπίζεται από το στόμιο προς το εσωτερικό του σωλήνα, περίπου 5cm πιο μέσα. Αυτό, εκτός από μη λειτουργικό ήταν και επικίνδυνο λόγω της υπερθέρμανσης του όλου σώματος του καμινέτου. Έτσι λοιπόν, ύστερα από περεταίρω αναζήτηση και μελέτη πάνω και σε αυτό το κομμάτι, προέκυψε το τελικό σχέδιο.

Το καμινέτο για να συνεχίσει να δουλεύει σωστά μέσα στον φούρνο, όταν αυτός είναι ήδη ζεστός και θερμαίνεται ακόμη περισσότερο, θα πρέπει η φλόγα να δημιουργείται στην έξοδο του ακροφυσίου και να μην εισέρχεται στο εσωτερικό. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να υπάρχει ροή από έξω προς τα μέσα, δηλαδή από το περιβάλλον προς το εσωτερικό του φούρνου. Η ροή αυτή, δημιουργείται από τη διαφορά πίεσης. Επειδή η ροή αυτή γίνεται φυσικά, με αναρρόφηση χωρίς τη χρήση φυσητήρα ή κάποιου άλλου μέσου, δημιουργήσαμε εμείς αυτή τη διαφορά πίεσης.

Για την κατασκευή του νέου καμινέτου χρησιμοποιήθηκε μια συστολή 1¼” x 3/4”, ένας σωλήνας διαμέτρου 3/4” και μήκους 22 cm και μια διαστολή 3/4” x 1”. Τα υλικά αυτά είναι από χυτοσίδηρο και χρησιμοποιούνται σε υδραυλικές εγκαταστάσεις. Επιλέχθηκαν για τη στιβαρότητα που προσφέρουν στην κατασκευή και για την αντοχή τους στις υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμα, για τη ρύθμιση παροχής του αέρα, παίζοντας το ρόλο του “chock” , τοποθετήθηκε μια ροδέλα στην είσοδο του θαλάμου μίξης, που βιδώνοντας προς ή από το στόμιο καθόριζε τη ροή ανάλογα με τις εκάστοτε επιθυμητές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, ξεπεράστηκε το πρόβλημα που δημιουργούνταν με το προηγούμενο ακροφύσιο. Έτσι η φλόγα κάθε στιγμή βρισκόταν ακριβώς στο τέλος του στομίου, χωρίς να έχουμε θέρμανση του σώματος του καμινέτου.



Εικόνα 2.7 συστολή 1 1/4" x 3/4"



Εικόνα 2.8 διαστολή 3/4" x 1"



Εικόνα 2.9 μεταλλικός σωλήνας 3/4"



Εικόνα 2.10 τελική διάταξη του φούρνου

Τελικά, μετά από αυτές τις μετατροπές στο φλόγιστρο και την προσαρμογή του στον βελτιωμένο φούρνο, κατάφεραν να διατηρηθούν και να ελεγχθούν οι αρχικά ζητούμενες θερμοκρασίες.

2.2 Η Σφυρηλάτηση

2.2.1 Προετοιμασία

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να αναφερθεί πως σε όλη τη διάρκεια των κατεργασιών χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα μέσα ατομικής προστασίας.

Οι διαδικασίες και τεχνικές που ακολουθήθηκαν κατά την κατασκευή των δυο δοκιμών δαμασκινού χάλυβα (15N20-1095 και 15N20-1084) ήταν ίδιες σε κάθε βήμα. Το κάθε δοκίμιο αποτελούνταν συνολικά από 9 τεμάχια χάλυβα, 15N20-1095 και 15N20-1084 αντίστοιχα, με αναλογία 4 των 15N20 και 5 των 1095/1084 τοποθετημένα εναλλάξ. Οι διαστάσεις των τεμαχίων ήταν 60x35x3mm.



Εικόνα 2.11 τεμάχια 15N20(x4) και 1095(x5)



Εικόνα 2.12 τεμάχια 15N20(x4) και 1084(x5)

Αρχικά, αφότου τα τεμάχια κόπηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις, τροχίστηκαν επιφανειακά σε λειαντικό τροχό πέτρας για την απομάκρυνση οξειδίων και κάνοντας την επιφάνεια όσο το δυνατόν περισσότερο επίπεδη. Στη συνέχεια, καθαρίστηκαν από τυχόν έλαια και άλλες ακαθαρσίες με ακετόνη και τοποθετήθηκαν σε στοίβα η οποία συγκολλήθηκε στις άκρες, με συγκόλληση ηλεκτροδίου τύπου MMA. Αυτό έγινε, για την καλύτερη επαφή και την αποφυγή κενών μεταξύ των επιφανειών τους, έτσι ώστε να μην εμφανιστούν ελαττώματα κατά τη θερμή συγκόλληση τους στο φούρνο (forge weld). Επίσης, για τον καλύτερο έλεγχο της κάθε μπιγιέτας κατά τη διαδικασία της σφυρηλάτησης, συγκολλήθηκε και μια μεταλλική ράβδος στη μια πλευρά τους.



Εικόνα 2.13 μπιγιέτα 15N20-1095



Εικόνα 2.14 μπιγιέτα 15N20-1084

2.2.2 Σφυρηλάτηση

Όντας λοιπόν έτοιμα τα τεμάχια, τοποθετήθηκαν στο καμίνι. Για επιπρόσθετο καθαρισμό των επιφανειών, έγινε και χρήση βόρακα. Ο βόρακας χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά που επρόκειτο να γίνει θερμή κόλληση με σφυρηλάτηση (forge weld) των στρώσεων του χάλυβα. Μόλις το τεμάχιο έφτασε στους 1300°C, βγήκε γρήγορα από το καμίνι και ξεκίνησε η σφυρηλάτηση για την ένωση των ελασμάτων σε ένα σώμα. Η φάση αυτή έγινε σε τρία βήματα. Την πρώτη φορά δεν χρειάστηκε η άσκηση δύναμης. Πρέπει απλώς να πιεστούν μεταξύ τους για στενότερη επαφή και αποκλεισμό τυχών εγκλωβισμένων ακαθαρσιών. Η διαδικασία αυτή διαρκεί το πολύ 15 δευτερόλεπτα, επειδή η θερμοκρασία του χάλυβα δεν πρέπει να πέσει κάτω από τους 800°C. Έπειτα, η μπιγιέτα πασπαλίζεται με βόρακα και εισέρχεται ξανά στο φούρνο μέχρι να φτάσει τουλάχιστον 1300°C. Στη δεύτερη και τρίτη φορά της κόλλησης, γίνεται σταδιακή αύξηση της δύναμης που ασκείται από το σφυρί. Η φορά που γίνονται τα χτυπήματα είναι από το μέσον προς τις άκρες. Η μέθοδος αυτή, έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση τυχόν φυλακισμένου αέρα με σκοπό την επιτυχή κόλληση των τεμαχίων μεταξύ τους.



Εικόνα 2.15 καθαρισμός με βόρακα στους 600°C



Εικόνα 2.16 τεμάχιο έτοιμο για πρώτη θερμή συγκόλληση

Μετά το πέρας της φάσης της συγκόλλησης, ακολούθησε η σφυρηλάτηση του τεμαχίου προκειμένου τη μείωση του πάχους και την αύξηση της επιφάνειάς του. Στη φάση αυτή, η επιφάνεια του τεμαχίου πρέπει να φτάσει περίπου τη διπλάσια της αρχικής, όπως επίσης το αυτό συμβαίνει και με το πάχος. Η αύξηση της επιφάνειας θα βοηθήσει στο επόμενο βήμα που είναι η αναδίπλωση του τεμαχίου, που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Οι θερμοκρασίες σε αυτό το στάδιο είναι χαμηλότερες από αυτές στη φάση της συγκόλλησης. Το επιτρεπτό εύρος θερμοκρασιών για αυτή τη κατεργασία είναι μεταξύ 800°C και 1100°C. Όμοια την πρώτη φάση, μόλις το τεμάχιο έφτανε τους 1100°C έβγαινε από το φούρνο και ξεκινούσε η σφυρηλάτηση μέχρι ότου η θερμοκρασία του να φτάσει τους 800°C - 850°C, όπου και αναθερμαίνεται μέχρι τους 1100°C. Η διαδικασία της αναθέρμανσης πρέπει να επαναληφθεί όσες λιγότερες φορές είναι δυνατόν. Κάθε φορά που το τεμάχιο εξέρχεται από το φούρνο, δημιουργείται περιμετρικά του μια στρώση από οξειδία. Τα οξειδία αυτά απομακρύνονται κατά κρούση αλλά αυτό έχει ως αποτέλεσμα απώλεια υλικού.

Η κύρια διαφορά που παρατηρήθηκε μεταξύ των δυο δοκιμών ήταν η μεγάλη διαφορά του τελικού όγκου του υλικού από το αρχικό. Το πρώτο δοκίμιο 15N20-1095 μετά την ολοκλήρωση όλης της διαδικασίας κατασκευής του δαμασκινού χάλυβα είχε το 40% του αρχικού όγκου του υλικού, ενώ το δεύτερο δοκίμιο 15N20-1084 είχε το 70% του αρχικού όγκου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στο πρώτο δοκίμιο έγιναν αρκετά περισσότεροι κύκλοι αναθέρμανσης έναντι του δεύτερου. Σημαντικός παράγοντας σε αυτό ήταν η έλλειψη εμπειρίας επάνω στο πρακτικό κομμάτι της σφυρηλάτησης.

Αφότου το τεμάχιο έχει έρθει στο επιθυμητό μέγεθος, σειρά έχει αναδίπλωση. Με την αναδίπλωση, επιτυγχάνεται η αύξηση των στρώσεων του τεμαχίου. Στην πρώτη αναδίπλωση οι εννέα αρχικές στρώσεις θα γίνουν δεκαοχτώ. Ο τρόπος που επιλέχθηκε να γίνει η αναδίπλωση ήταν με την ψυχρή μέθοδο. Αυτό σημαίνει ότι, το τεμάχιο φτάνει σε θερμοκρασία δωματίου, από εκεί και πέρα καθαρίζεται επιφανειακά από τις ακαθαρσίες και τα οξειδία, μετά κόβεται στη μέση και τέλος ακολουθείται η θερμή συγκόλληση όπως και στην αρχή. Ο καθαρισμός των τεμαχίων έγινε με γωνιακό τροχό λείανσης χειρός, με γυαλόχαρτο κοκκομετρίας (grit) 100. Η κοπή έγινε σε τεμαχιστική κορδέλας. Για τη συγκράτηση των τεμαχίων σε στενή επαφή μέχρι τη θέρμανσή τους, έγινε συγκόλληση στις γωνίες των τεμαχίων περιμετρικά με ηλεκτροσυγκόλληση τύπου MMA.



Εικόνα 2.17 τεμαχισμός τεμαχίου



Εικόνα 2.18 αναδίπλωση τεμαχίου

Η διαδικασία για τη θερμή συγκόλληση στη φάση της αναδίπλωσης ακολούθησε ακριβώς τα ίδια βήματα με την αρχική συγκόλληση. Έγινε και εδώ χρήση βόρακα για

επιπλέον καθαρισμό και στους τρεις κύκλους θέρμανσης μέχρι τους 1300°C τουλάχιστον, για την επιτυχή συγκόλληση μεταξύ τους. Ύστερα, ακολούθησε επιπλέον σφυρηλάτηση για το «άπλωμα» του τεμαχίου μέχρι το διπλασιασμό της επιφάνειάς του. Στη συνέχεια, έγινε επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας για την αναδίπλωση των τεμαχίων.

Συνολικά έγιναν τέσσερις αναδιπλώσεις σε όλη τη διαδικασία κατασκευής του δαμασκινού χάλυβα. Ο τελικός αριθμός στρώσεων που αποτελούνταν το κάθε τεμάχιο είναι 144 στρώσεις. Ο αριθμός αυτός των στρώσεων είναι ένα τυπικό σημείο αναφοράς για τη συγκεκριμένη μέθοδο κατασκευής του δαμασκινού χάλυβα. Σε αυτές τις στρώσεις, έχει μια καλή ανάμιξη των δυο χαλύβων που από τελούν το κάθε τεμάχιο και εμφανίζεται και ένα σχετικά ενδιαφέρον και πολύπλοκο μοτίβο, που είναι και το ζητούμενο σε κάθε δαμασκινό χάλυβα, πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων του ως υλικό. Οι τελικές διαστάσεις των τεμαχίων μετά την ολοκλήρωση της σφυρηλάτησης ήταν για το πρώτο (15N20-1095) 40x130x4 mm και για το δεύτερο (15N20-1084) 40x125x10 mm.

2.2.3 Χημική προσβολή

Τέλος, αφού τελείωσε η σφυρηλάτηση σειρά είχε η χημική προσβολή των επιφανειών για την ανάδειξη του πολυπόθητου μοτίβου. Τα τεμάχια λειάνθηκαν με γωνιακό τροχό χειρός, μέχρις ότου οι επιφάνειές τους να είναι επίπεδες και λείες. Τα γυαλόχαρτα που χρησιμοποιήθηκαν για τη λείανση ήταν κοκκομετρίας 100, 240 και 360. Μετά τη λείανση, έγινε καθαρισμός των επιφανειών με καθαρή ακετόνη, για την απομάκρυνση ακαθαρσιών και ελαίων προκειμένου να γίνει σωστά και παντού η χημική προσβολή. Το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για τη ανάδειξη του μοτίβου ήταν χλωριούχος σίδηρος (FeCl₃). Το διάλυμα του χλωριούχου σιδήρου είναι ένα ισχυρό οξύ, με αποτέλεσμα να αντιδρά με τον χάλυβα, αναδεικνύοντας έτσι τις αποχρώσεις μεταξύ των δυο διαφορετικών σε σύσταση υλικών στα τεμάχιά μας και δημιουργώντας το μοτίβο του δαμασκινού χάλυβα, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 2.19 τεμάχιο 15N20-1095



Εικόνα 2.20 τεμάχιο 15N20-1084

2.3 Τελικό προϊόν

Μετά το πέρας των κατεργασιών και την ολοκλήρωση των τεμαχίων, έγινε λήψη δοκιμών για ανάλυση και μελέτη. Στη συνέχεια, έγινε σύνθεση των τεμαχίων που περίσσεψαν 15N20-1095 και 15N20-1084 με σκοπό την κατασκευή ενός μαχαιριού. Η κατασκευή έγινε καθαρά για εκπαιδευτικό σκοπό και την αξιοποίηση του εναπομείναντος υλικού.

Για την κατασκευή του μαχαιριού ακολουθήθηκαν ακριβώς οι διαδικασίες που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα τεμάχια αφού καθαρίστηκαν επιφανειακά, συγκολλήθηκαν θερμά στο φούρνο. Ύστερα, ακολούθησε περεταίρω σφυρηλάτηση για τη μορφοποίηση του χάλυβα από μπιγιέτα σε μαχαίρι. Η διαδικασία της σφυρηλάτησης σε αυτό το στάδιο έγινε περισσότερο απαιτητική από προηγουμένως που το ζητούμενο ήταν η κατασκευή μιας ορθογωνικής διατομής. Η πρόσδοση μορφής στο τεμάχιο έχρηζε σχολαστικών και αποφασιστικών κινήσεων κατά τη σφυρηλάτηση, όπου αφορά και το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας. Μόλις το τεμάχιο ήρθε στο επιθυμητό σχήμα, έγινε τρόχισμα και λείανση των επιφανειών σε τροχό πέτρας. Επόμενο βήμα, για την ολοκλήρωση του μαχαιριού ήταν το ακόνισμα της αιχμής της λεπίδας.

Τέλος, έγινε εμβάπτιση του τελικού προϊόντος σε διάλυμα χλωριούχου σιδήρου για την ανάδειξη του μοτίβου, που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός δαμασκηνού χάλυβα. Το μαχαίρι αποτελείται από 288 στρώσεις, το συνολικό μήκος του είναι 18cm ενώ η αιχμή είναι μόλις 12cm.



Εικόνα 2.21 μαχαίρι, τελικό προϊόν



Εικόνα 2.22 μαχαίρι, τελικό προϊόν

3 Ανάλυση και Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσίαση και ανάλυση τριών σειρών δοκιμίων που μετά το τέλος της σφυρηλάτησης δέχθηκαν διαφορετικές θερμικές κατεργασίες. Στην πρώτη σειρά δοκιμίων έχει γίνει μόνο ανόπτηση, ενώ στις υπόλοιπες δυο έχει γίνει βαφή σε λάδι και νερό αντίστοιχα.

Ακόμη, γίνεται παρατήρηση με μικροσκόπιο στο εσωτερικό των δοκιμίων αυτών και περιγραφή της δομής που παρουσιάζουν. Στο μικροσκόπιο είχε προσαρμοστεί μια κάμερα, συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, που επέτρεψε την καλύτερη προβολή των επιφανειών καθώς και τη λήψη των φωτογραφιών που ακολουθούν.

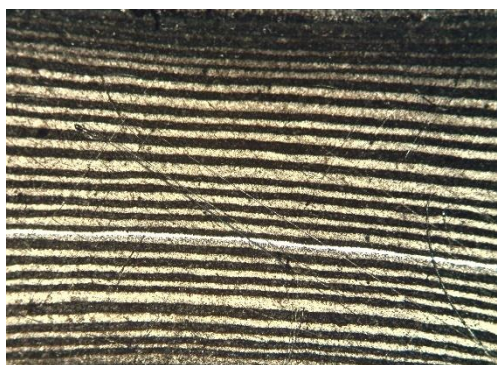
Τέλος, γίνεται αναφορά και σύγκριση ανάμεσα στις τιμές των σκληρομετρήσεων που ελήφθησαν. Οι σκληρομετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο Vickers. Στη μέθοδο αυτή η μέτρηση γίνεται σε μια πρέσα με ενσωματωμένο στερεοσκόπιο. Η πρέσα αυτή ασκεί πίεση στο δοκίμιο μέσω μιας τετράπλευρης ακίδας. Ανάλογα με τα κιλά που έχουν τοποθετηθεί για την άσκηση δύναμης από την ακίδα, αυτή αφήνει ένα αποτύπωμα στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ύστερα, βλέποντας το αποτύπωμα της ακίδας από το στερεοσκόπιο, μετρούνται οι διαγώνιοι του ίχνους. Τέλος, τα μήκη τοποθετούνται στον παρακάτω τύπο για τον υπολογισμό της σκληρότητας. Τα μήκη των ιχνών μετρήθηκαν σε μικρόμετρα και η δύναμη ήταν 20kg .

$$HV = 1.8544 \frac{F}{D^2} \quad , \quad \text{όπου } D = \frac{d_1+d_2}{2000} \text{ και } F \text{ η δύναμη που ασκείται.}$$

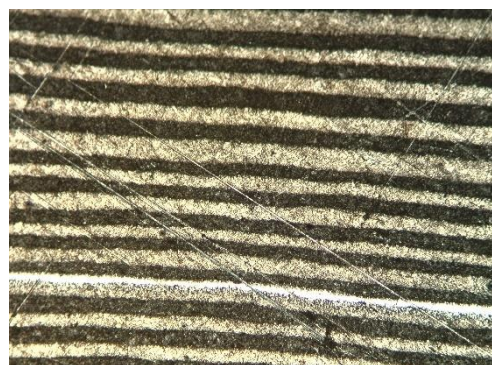
3.1 Ανόπτηση

Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζεται η εσωτερική δομή του κάθε ενός δοκιμίου που προέρχονται από ανόπτηση. Τα δυο τεμάχια χαλύβων 15N20-1095 και 15N20-1084 θερμάνθηκαν μέχρι τους 1000°C και έπειτα αφέθηκαν να ψυχθούν αργά στον αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή έχει σκοπό την ανακούφιση του χάλυβα από παραμένουσες τάσεις που υπάρχουν στο εσωτερικό του.

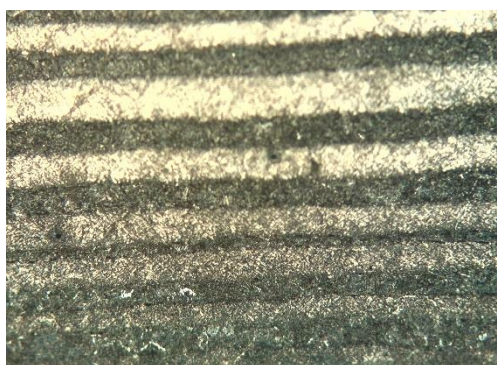
Πρώτα παρουσιάζεται το δοκίμιο από 15N20-1095



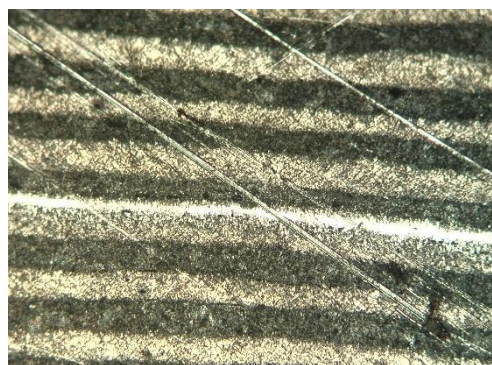
Εικόνα 3.1 15N20-1095 ανόπτηση (x50)



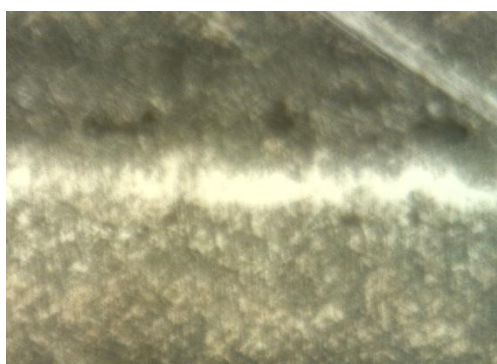
Εικόνα 3.2 15N20-1095 ανόπτηση (x100)



Εικόνα 3.3 15N20-1095 ανόπτηση (x200)



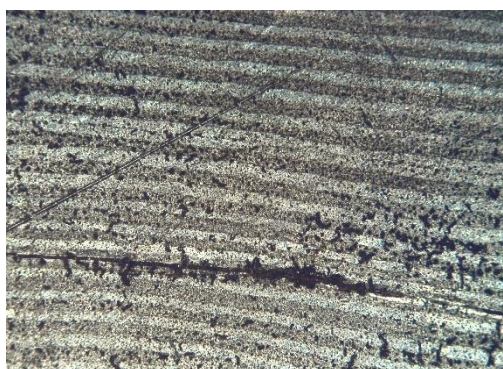
Εικόνα 3.4 15N20-1095 ανόπτηση (x500)



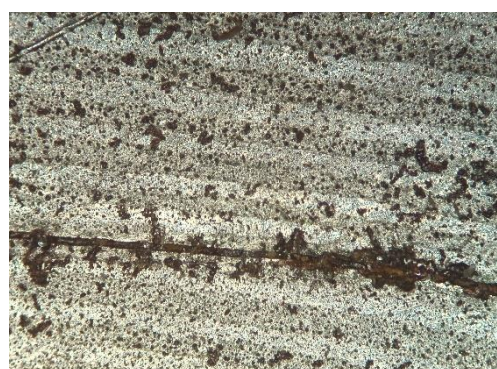
Εικόνα 3.5 15N20-1095 ανόπτηση (x1000)

Η επιφάνεια δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποια εσωτερική ρωγμή ή κενό που να δείχνει αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία κατασκευής του δαμασκινού χάλυβα ήταν επιτυχής και δεν υπήρξε πρόβλημα κατά τις αναδιπλώσεις. Μερικές στρώσεις είναι λεπτότερες από άλλες. Πιθανώς, οι πιο λεπτές στρώσεις να ήταν αυτές που πριν από κάθε αναδίπλωση βρίσκονταν στην εξωτερική επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι δέχονταν περισσότερη δύναμη από το σφυρί σε σχέση με τις στρώσεις που είναι στο κέντρο του τεμαχίου. Να επισημανθεί πως οι ανοιχτόχρωμες ρίγες είναι ο χάλυβας 15N20 και οι σκούρες είναι ο 1095.

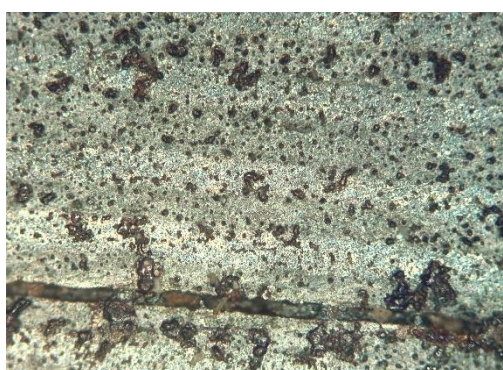
Επόμενο είναι το δοκίμιο από 15N20-1084.



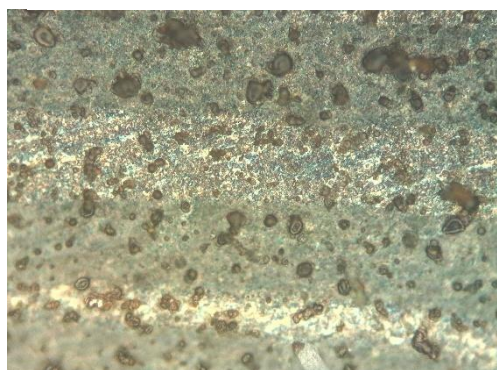
Εικόνα 3.6 15N20-10984 ανόπτηση (x50)



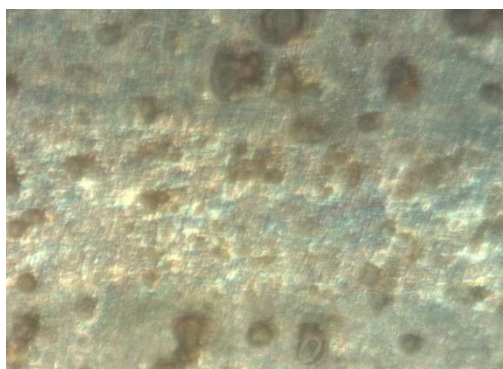
Εικόνα 3.7 15N20-10984 ανόπτηση (x100)



Εικόνα 3.8 15N20-10984 ανόπτηση (x200)



Εικόνα 3.9 15N20-10984 ανόπτηση (x500)

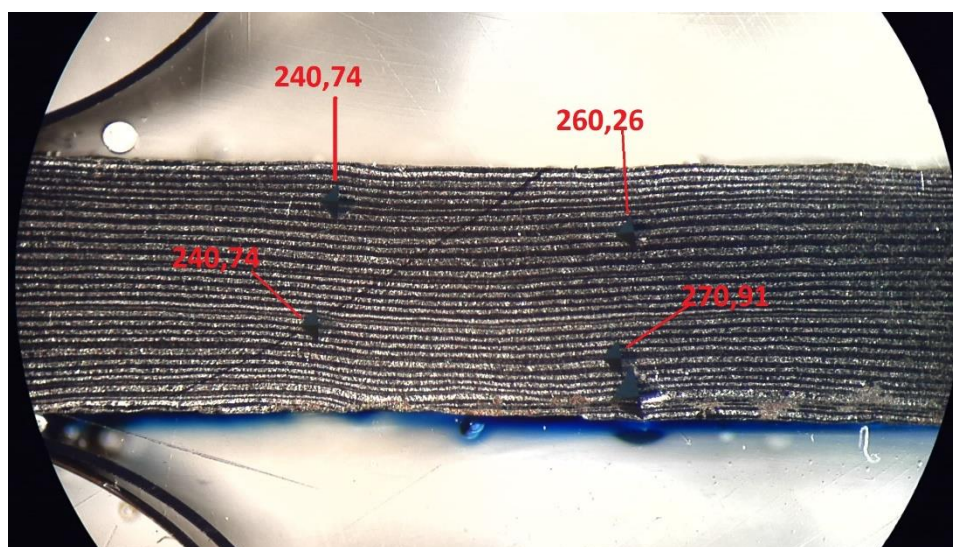


Εικόνα 3.10 15N20-10984 ανόπτηση (x1000)

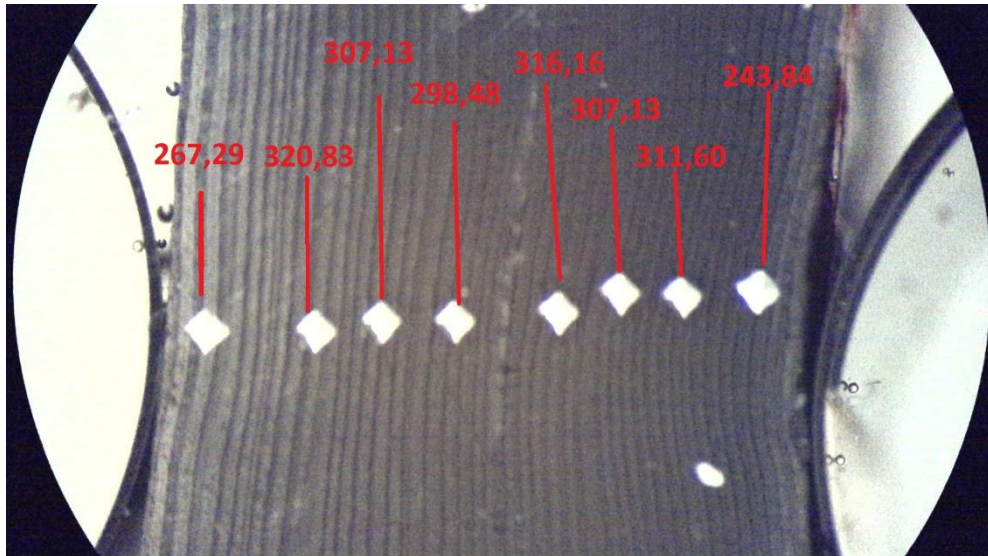
Σε αυτό το δοκίμιο, παρατηρείται ένα κενό στο κέντρο του. Το κενό αυτό βρίσκεται ακριβώς στη μέση του δοκιμίου, πράγμα που δηλώνει ότι η τελευταία αναδίπλωση δεν ήταν επιτυχημένη. Αποτέλεσμα αυτού του ελαττώματος ήταν να παγιδευτεί αέρας στο εσωτερικό του τεμαχίου και να δημιουργήσει αποκόλληση των στρώσεων (delamination). Για τη μη σωστή συγκόλληση αυτή, τρία είναι τα πιθανά σενάρια. Πρώτον, πριν την αναδίπλωση οι επιφάνειες δεν ήταν απόλυτα επίπεδες κατά την τοποθέτησή τους της μιας επάνω στην άλλη, με σκοπό να εγκλωβιστεί αέρας μεταξύ των κοιλοτήτων στο εσωτερικό του τεμαχίου. Δεύτερον, πιθανώς να μην έγινε αρκετή χρήση βόρακα και παρέμειναν ακαθαρσίες στο εσωτερικό ή τρίτον, μπορεί η θερμοκρασία κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης να μην ήταν αρκετά υψηλή. Τα μαύρα σημάδια που φαίνονται, έχουν σχηματιστεί από τα υπολείμματα του χλωριούχου σιδήρου, λόγω της χημικής διάβρωσης που είχε προηγηθεί για την εμφάνιση των στρώσεων.

Επίσης, οι στρώσεις στο δοκίμιο αυτό φαίνονται να έχουν το ίδιο πάχος σε όλο το ύψος του. Αυτό συνέβη λόγω της διαφοράς στο χρόνο σφυρηλάτησης και στον αριθμό των χτυπημάτων που δέχθηκε το συγκεκριμένο τεμάχιο σε σύγκριση με αυτό από το 15N20-1095. Το πρώτο τεμάχιο (15N20-1095) δέχθηκε υπερβολικά περισσότερα σφυροκοπήματα από το δεύτερο (15N20-1084). Τα χτυπήματα στο πρώτο τεμάχιο, λόγω και της έλλειψης εμπειρίας και τεχνογνωσίας πάνω στη σφυρηλάτηση, ήταν πιο ανεξέλεγκτα και βίαια από ότι στο δεύτερο. Όπως επίσης, η απώλεια υλικού από τον αριθμό των φορών που το κάθε τεμάχιο αναθερμάνθηκε έπαιξε σημαντικό ρόλο στο τελικό τους μέγεθος. Προκειμένου να έχουν τις ίδιες διαστάσεις σε μήκος και πλάτος, κατέληξε τελικά να έχουν και μεγάλη διαφορά στο πάχος.

Παρακάτω εμφανίζονται οι τιμές σκληρότητας των δυο αυτών δοκιμίων. Το εύρος που κυμαίνονται οι τιμές και στα δυο δοκίμια δείχνουν ότι το υλικό είναι μαλακό για δαμασκηνός χάλυβας.



Εικόνα 3.11 15N20-1095 απόπτηση



Εικόνα 3.12 15N20-1084 ανόπτηση

3.2 Βαφές

Στις επόμενες δυο σειρές δοκιμών ακολούθησε βαφή πριν την ανάλυση στο μικροσκόπιο και τη λήψη σκληρομετρήσεων. Για τη βαφή, τα δοκίμια θερμάνθηκαν μέχρι τους 800°C και στη συνέχεια ψύχθηκαν απότομα. Στη μια σειρά δοκιμών ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε λεπτόρρευστο υδραυλικό λάδι, ενώ στην άλλη σειρά έγινε βαφή σε νερό.

3.2.1 Βαφή σε λάδι

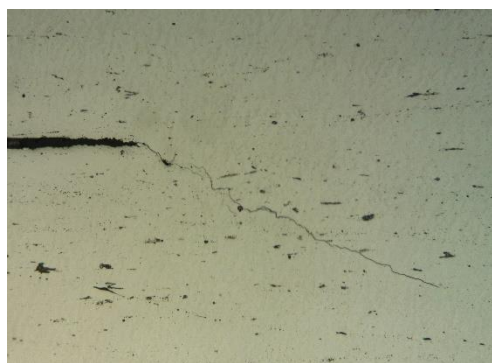
Αρχικά, το δοκίμιο που παρουσιάζεται είναι 15N20-1095.



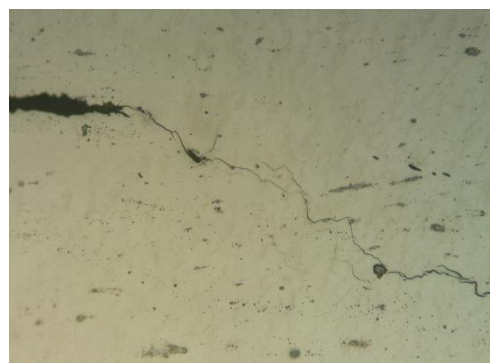
Εικόνα 3.13 15N20-1095 βαφή σε λάδι (x50)



Εικόνα 3.14 15N20-1095 βαφή σε λάδι (x100)



Εικόνα 3.15 15N20-1095 βαφή σε λάδι (x200)



Εικόνα 3.16 15N20-1095 βαφή σε λάδι (x500)

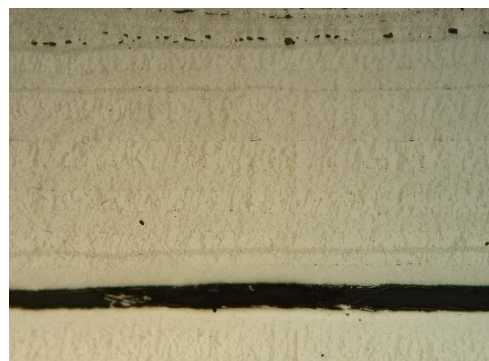
Στο δοκίμιο αυτό δεν έχει γίνει χημική προσβολή, έτσι δεν είναι ευδιάκριτες οι στρώσεις των χαλύβων. Παρατηρούνται κάποιες μικρές αποκολλήσεις στην εικόνα 3.13. Η μία προέρχεται από την εξωτερική επιφάνεια παράλληλα με τις στρώσεις, ενώ οι άλλες δυο είναι εσωτερικές. Όπως και προηγουμένως, αυτές οι αποκολλήσεις οφείλονται σε κακή αναδίπλωση. Εντύπωση όμως προκαλεί μια ρωγμή που έχει δημιουργηθεί στο άκρο της μεγαλύτερης αποκόλλησης. Αυτή η ρωγμή πολύ πιθανώς να δημιουργήθηκε κατά τη βαφή. Επειδή, το υλικό δεν ήταν όλο κακώς

κολλημένο αλλά μόνο σε μια μικρή περιοχή, οι δυνάμεις που απελευθερώθηκαν κατά τη βαφή βρήκαν άλλο δρόμο να διαφύγουν, σχηματίζοντας έτσι τη ρωγμή αυτή.

Επόμενο είναι το δοκίμιο 15N20-1084.



Εικόνα 3.17 15N20-1084 βαφή σε λάδι (x50)



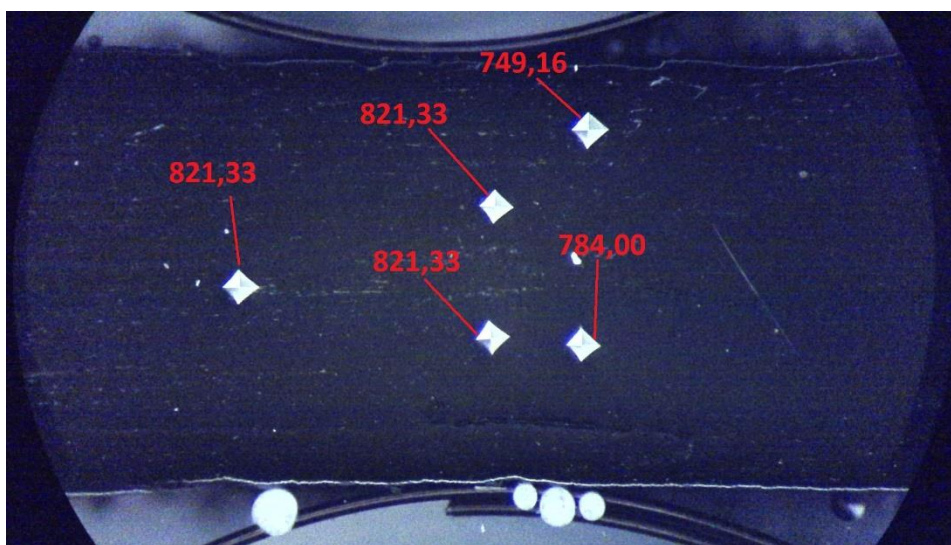
Εικόνα 3.18 15N20-1084 βαφή σε λάδι (x100)



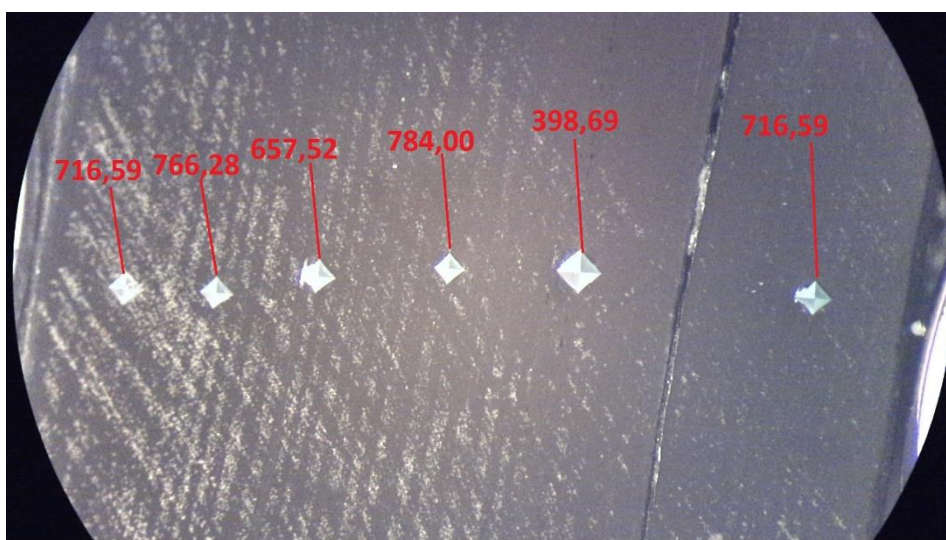
Εικόνα 3.19 15N20-1084 βαφή σε λάδι (x200)

Στο δοκίμιο αυτό έχει δημιουργηθεί μια αποκόλληση που φτάνει από το ένα άκρο στο άλλο. Η αποκόλληση βρίσκεται 1/4 του συνολικού ύψους του δοκιμίου, πράγμα που δείχνει ότι η προτελευταία, η τρίτη κατά σειρά, αναδίπλωση ήταν τελείως ελαττωματική. Επίσης, στις εικόνες 3.17 και 3.18 παρατηρείται μια σκουρόχρωμη ζώνη με αρκετές ακαθαρσίες. Αυτή η ζώνη αποτελεί την τελευταία αναδίπλωση του τεμαχίου. Προφανώς και εδώ υπήρξε κακή διαχείριση κατά την προετοιμασία του τεμαχίου για την αναδίπλωση. Στην εικόνα 3.19 υπάρχει μια περιοχή που φαίνεται πως το υλικό παρουσιάζει ομοιογένεια.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σκληρομετρήσεις των δοκιμίων. Στα συγκεκριμένα δοκίμια υπάρχει μια ξεκάθαρη διαφορά στις τιμές της σκληρότητας. Το δοκίμιο 15N20-1095 εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές από αυτές του δοκιμίου 15N20-1084. Παρόλα αυτά οι τιμές τους είναι αρκετά υψηλές και σε επίπεδο κοντά σε αυτό του δαμασκηνού χάλυβα.[11]



Εικόνα 3.20 15N20-1095 βαφή σε λάδι



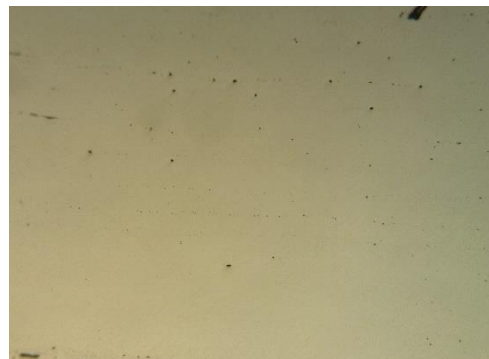
Εικόνα 3.21 15N20-1084 βαφή σε λάδι

3.2.2 Βαφή σε νερό

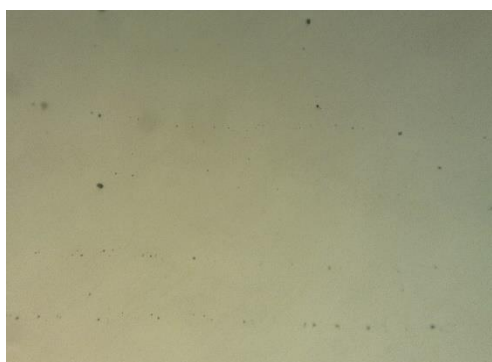
Πρώτο, παρουσιάζεται το δοκίμιο 15N20-1095.



Εικόνα 3.22 15N20-1095 βαφή σε νερό (x100)



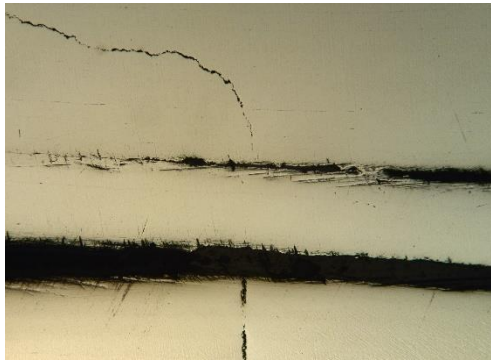
Εικόνα 3.23 15N20-1095 βαφή σε νερό (x200)



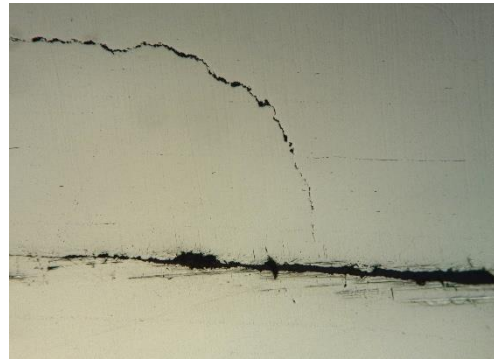
Εικόνα 3.24 15N20-1095 βαφή σε νερό (x500)

Στο δοκίμιο αυτό δεν παρατηρείται κάποιο ιδιαίτερο ελάττωμα ή αποκόλληση. Στην εικόνα 3.22 υπάρχει μια ζώνη που περιέχει μικρά κενά σε όλο της το μήκος. Από την περιοχή στην οποία εμφανίζεται η ζώνη αυτή, φαίνεται ότι και εδώ δεν ήταν επιτυχής η τρίτη αναδίπλωση. Ακόμη, στις εικόνες 3.22 και 3.23 εμφανίζονται ποικίλα μικρά σε μέγεθος σημάδια, που οφείλονται είτε σε κενό μεταξύ των επιφανειών, είτε σε ακαθαρσίες που παγιδεύτηκαν κατά τις αναδιπλώσεις. Εκτός αυτών μικρών κενών, υπάρχουν και περιοχές που παρουσιάζουν ομοιογένεια.

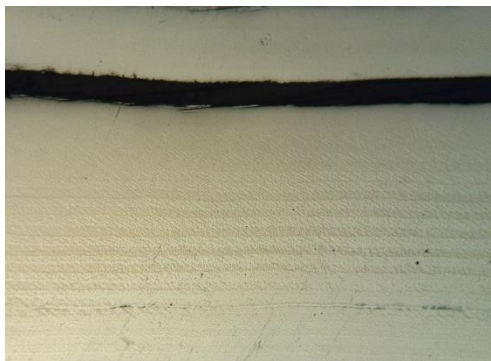
Τέλος, το επόμενο δοκίμιο είναι το 15N20-1084.



Εικόνα 3.25 15N20-1084 βαφή σε νερό (x50)



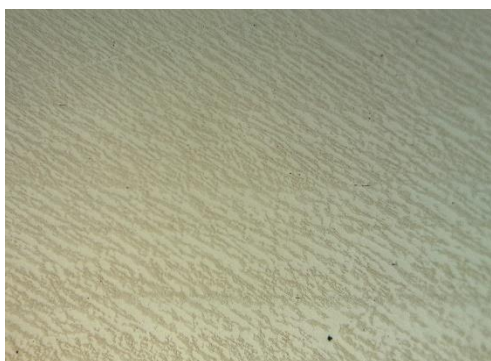
Εικόνα 3.26 15N20-1084 βαφή σε νερό (x100)



Εικόνα 3.27 15N20-1084 βαφή σε νερό (x50)



Εικόνα 3.28 15N20-1084 βαφή σε νερό (x100)



Εικόνα 3.29 15N20-1084 βαφή σε νερό (x200)

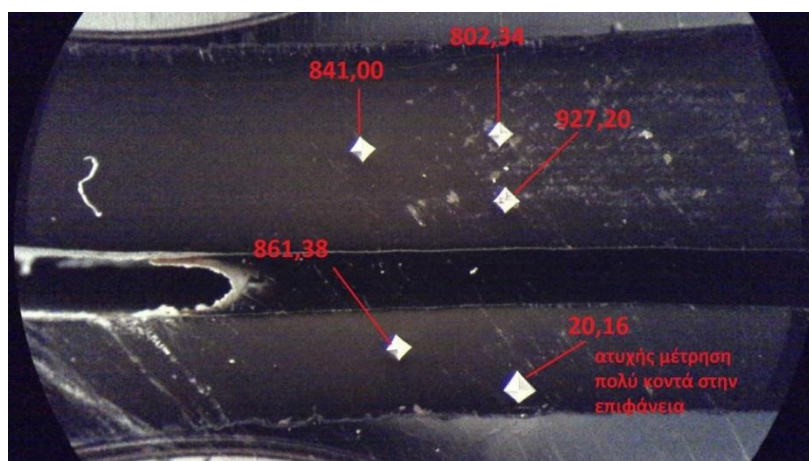


Εικόνα 3.30 15N20-1084 βαφή σε νερό (x500)

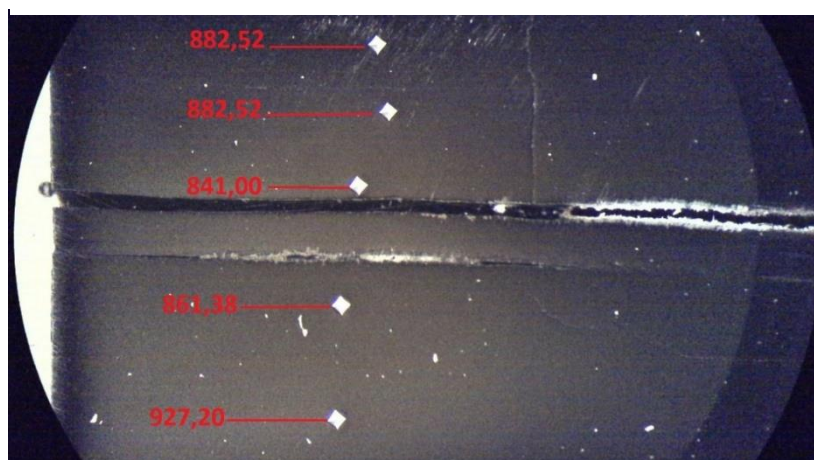
Στο δοκίμιο αυτό στις εικόνες 3.25 και 3.26 παρατηρούνται δυο αποκόλλησεις. Η μία αποκόλληση είναι διαμπερής ενώ δεύτερη, η μικρότερη, είναι εσωτερική. επίσης παρατηρείται μια ρωγμή καθώς και κενά που βρίσκονται κάθετα στη φορά των στρώσεων. Παρόμοιο γεγονός εμφανίστηκε και στο δοκίμιο 15N20-1095 στο οποίο είχε γίνει βαφή σε λάδι, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό. Από την πορεία και το μέγεθος της ρωγμής, πιθανώς θα υπήρχαν αρκετές παραμένουσες τάσεις στο εσωτερικό του δοκιμίου και απελευθερώθηκαν με βίαιο τρόπο κατά τη βαφή, μέχρις ότου εκτονώθηκαν βρίσκοντας την αποκόλληση.

Στις εικόνες 3.27 μέχρι 3.30 σε άλλο σημείο του ίδιου δοκιμίου, οι στρώσεις φαίνονται να έχουν κολλήσει χωρίς ελαττώματα μεταξύ τους. Πλησιάζοντας περισσότερο την περιοχή της αποκόλλησης, από κάτω προς τα πάνω, οι στρώσεις φαίνεται να είναι λεπτότερες. Με αποτέλεσμα ο χάλυβας να παρουσιάζει ομοιογένεια στην περιοχή αυτή.

Στις σκληρομετρήσεις, φαίνεται ξεκάθαρη αύξηση των τιμών από αυτές των δοκιμίων που έγινε βαφή σε λάδι. Πράγμα που φαίνεται λογικό, καθώς το νερό έχει χαμηλότερο ιξώδες από το λάδι, κάνοντας έτσι τη ψύξη του χάλυβα πιο ραγδαία κατά τη βαφή στο νερό έναντι στο λάδι. [12]



Εικόνα 3.31 15N20-1095 βαφή σε νερό

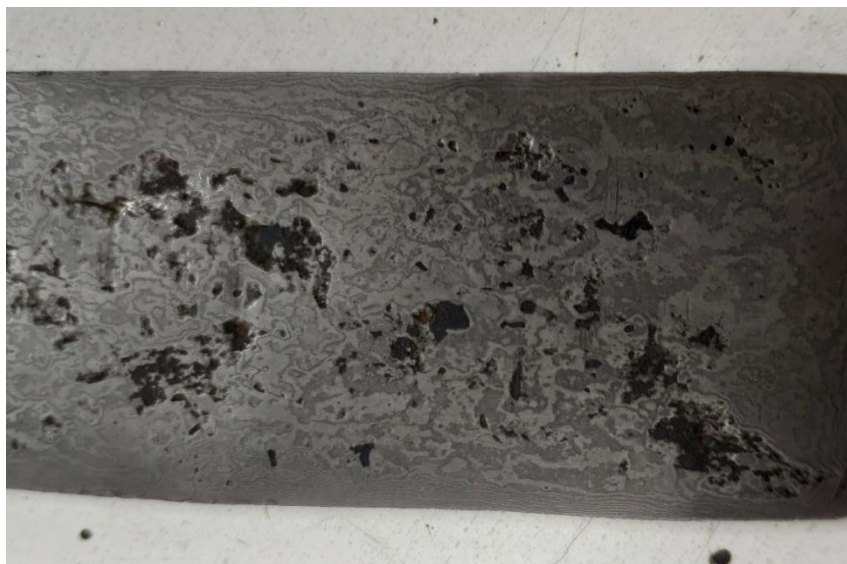


Εικόνα 3.32 15N20-1084 βαφή σε νερό

3.3 Μοτίβο

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα μοτίβα που εμφανίστηκαν στις επιφάνειες των τεμαχίων, κάνοντας τα με αυτόν τον τρόπο να εντάσσονται στην κατηγορία του δαμασκηνού χάλυβα.

Το τεμάχιο του χάλυβα εμφανίζει ένα ευδιάκριτο και αισθητικά αποδεκτό μοτίβο που παραπέμπει σε παραδοσιακό δαμασκηνό χάλυβα. Αντίθετα, το μοτίβο στο τεμάχιο του χάλυβα 15N20-1084 δεν παρουσιάζει μεγάλη ευκρίνεια και διαχωρισμό ανάμεσα στις αποχρώσεις των στρώσεων. Σημαντικός παράγοντας στη διαφορά του μοτίβου είναι η ανάμιξη των στρώσεων κατά τη σφυρηλάτηση και τη διατάραξη της επιφάνειας των τεμαχίων. Το τεμάχιο από χάλυβα 15N20-1095 σφυρηλατήθηκε πολλές περισσότερες φορές από όσες το αντίστοιχο 15N20-1084. Έτσι προφανές είναι ότι αφού κάθε ένα έχει διαφορετικό βαθμό ανάμιξης, θα παρουσιάζει και διαφορετικής πολυπλοκότητας μοτίβο.



Εικόνα 3.33 χάλυβας 15N20-1095



Εικόνα 3.34 χάλυβας 15N20-1095



Εικόνα 3.35 χάλυβας 15N20-1084



Εικόνα 3.36 χάλυβας 15N20-1084

4 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η κατασκευή και μελέτη του δαμασκηνού χάλυβα. Για τη μελέτη αυτή κατασκευάστηκαν δυο δοκίμια με τη μέθοδο των επάλληλων στρώσεων. Τα υλικά τα οποία επιλέχθηκαν ήταν οι χάλυβες 15N20, 1095 και 1084. Στο ένα δοκίμιο έγινε μίξη των 15N20 και 1095, ενώ στο άλλο έγινε μίξη μεταξύ των 15N20 και 1084. Ο τελικός αριθμός στρώσεων του κάθε δοκίμιου ήταν 144. Ο αριθμός αυτός οδήγησε σε ένα αρκετά όμορφο και περίπλοκο μοτίβο. Παρόλο που ο αριθμός αυτός δεν είναι υπερβολικά μεγάλος, τα δοκίμια παρουσίασαν στο εσωτερικό τους ομοιογένεια σε πολλά σημεία. Σε πολλά σημεία, και στα δυο δοκίμια, υπήρχαν αποκολλήσεις μεταξύ των στρώσεων, αλλού περισσότερο και αλλού λιγότερο.

Φυσικό είναι να υπάρχουν ελαττώματα στα δοκίμια. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη πείρας επάνω στη πρακτική διαδικασία κατασκευής του δαμασκηνού χάλυβα. Δεδομένου ότι όλη η διαδικασία έγινε με σφυρηλάτηση στο χέρι, χωρίς τη βοήθεια μηχανικών μέσων όπως μηχανική πρέσα ή σφύρα, το τελικό προϊόν δεν παρουσιάζει σημαντικές κατασκευαστικές ατέλειες και αστοχίες.

Τελικά, από τις τιμές των σκληρομετρήσεων διαπιστώθηκε ότι όντως οι χάλυβες βρίσκονται στα αναμενόμενα επίπεδα σκληρότητας. Η μέθοδος σκληρομέτρησης που επιλέχθηκε ήταν κατά Vickers, στα 20kg. Η μέγιστη τιμή και στα δυο δοκίμια 927HV σε βαφή σε νερό, ενώ στη βαφή σε λάδι στο δοκίμιο 15N20-1095 ήταν 821,33HV και στο δοκίμιο 15N20-1084 ήταν 784HV. Η ύπαρξη της διαφοράς αυτής στις τιμές, λόγω της διαφοράς του ψυκτικού μέσου, συμφωνεί με τη βιβλιογραφία.[12] Οι σκληρότητες αυτές υποδηλώνουν ότι ο δαμασκηνός χάλυβας είναι πράγματι σκληρότερος από τους κοινούς χάλυβες, καθώς οι τιμές που έχουν καταγραφεί από δαμασκηνούς χάλυβες είτε από την αρχαιότητα, είτε κατασκευασμένους με σύγχρονες τεχνικές, ξεπερνούν τα 900HV. Οι βασικοί λόγοι της διαφοράς αυτής βρίσκονται στη διαδικασία κατασκευής του, που περιλαμβάνει τη μίξη διαφόρων ειδών χάλυβα και τη σφυρηλάτηση.[11]

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Verhoeven, J., Pendray, A. and Gibson, E., 1996. Wootz Damascus steel blades. *Materials Characterization*, 37(1)
2. Black, J. Temple. (2008). DeGarmo's materials and processes in manufacturing. Hoboken, NJ :Wiley.
3. Verhoeven, J. and Pendray, A., 1993. Studies of Damascus steel blades: Part 1—Experiments on reconstructed blades. *Materials Characterization*, 30(3), pp.175-186.
4. Juha Perttula, Wootz Damascus steel of ancient orient, *Scandinavian Journal of Metallurgy*,(2004)
5. Doege, E. and Behrens, B., 2010. *Handbuch Umformtechnik*. Berlin: Springer.
6. Verhoeven, J. and Pendray, A., 1992. Experiments to reproduce the pattern of Damascus steel blades. *Materials Characterization*, 29(2), pp.195-212.
7. Verhoeven, J. D. Genuine Damascus steel: a type of banded microstructure in hypereutectoid steels. *Steel Res.* 73, 356–365 (2002)
8. Martinez, M. A., Abenojar, J., Mota, J. M., & Calabrés, R. (2006). Ultra High Carbon Steels Obtained by Powder Metallurgy. In *Materials Science Forum* (Vols. 530–531, pp. 328–333). Trans Tech Publications, Ltd.
9. O.D. Sherby, J. Wadsworth, Ancient blacksmiths, the Iron Age, Damascus steels, *Journal of Materials Processing Technology* 117 (2001)
10. Strobl, S., & Haubner, R. (2015). Characterisation of Steel Composites Produced by the Damascus Technique. *Materials Science Forum*.
11. Das, A. K., Ohba, T., Morito, S., & Yaso, M. (2010). Evidence of Lath Martensite in High-C Japanese Sword Produced from Tamahagane Steel by Tataru Process. *Materials Science Forum*, 654–656, 138–141.
12. ČERNÝ MICHAL, FILIPEK JOSEF, MAZAL PAVEL, DOSTAL PETR: Basic mechanical properties of layered steels. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2013, LXI, No. 1,
13. Verhoeven, J., Pendray, A. and Berge, P., 1993. Studies of Damascus steel blades: Part II—Destruction and reformation of the patterns. *Materials Characterization*, 30(3), pp.187-200.

14. Verhoeven, J., Pendray, A., Dauksch, W. and Wagstaff, S., 2018. Damascus Steel Revisited. JOM, 70
15. J. D. Verhoeven, In situ composites prepared by solidification and mechanical techniques, in In Situ Composites IV, (F. D. Lempkey, H. E. Cline, and M. McLean, Eds.), Elsevier, New York (1982), pp. 267-276.
16. L. E. Samuels, Ferrite-pearlite banding, in Optical Microscopy of Carbon Steels, Amer.Soc. Metals, Metals Park, OH (1980)
17. J. Piaskowski, Damascus steel: the greatest achievement of early metallurgy, in Proc.First Int. Symp. for Hist. Arabic Science, Vol. II, (A. Y. A1-Hassan, G. Karmi, and N.Namnum, Eds.) University of Aleppo (1976)
18. K. R. Hortin, Imperial College of Sci. Tech., Royal School Mines, Prince Consort Road, London SW7 2BP, private communication (1986)
19. J. Wadsworth and O. F. Sherby, On the Bulat-Damascus steels revisited, Prog. Mater. Science, 25:35 (1980).
20. Wadsworth, J., & Sherby, O. D. (1982). Damascus steel-making. Science (New York, N.Y.), 218(4570), 328–330.
21. S. Latham, Knifecraft, chap. 10, Stackpole Books, Harrisburg, PA, (1978)
22. Strobl, S., Haubner, R., & Scheiblechner, W. (2018). New Steel Combinations Produced by the Damascus Technique. In Advanced Engineering Forum (Vol. 27, pp. 14–21). Trans Tech Publications, Ltd.
23. Hermann Becker, T. and Dimitrov, D. (2016), "The achievable mechanical properties of SLM produced Maraging Steel 300 components", Rapid Prototyping Journal, Vol. 22 No. 3, pp. 487-494.
24. Kürnsteiner, P., Wilms, M.B., Weisheit, A. *et al.* High-strength Damascus steel by additive manufacturing. *Nature* **582**, 515–519 (2020).
25. Dildin, A. N., Gerasimov, V. Yu., & Trofimov, E. A. (2018). The Influence of Heat Treatment on the Size of the Carbide Inclusions and Hardness of Multilayer Composite Material ZD-0803. In Solid State Phenomena (Vol. 284, pp. 501–506). Trans Tech Publications, Ltd.