



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Δημιουργία στρωματικών δομών με τεχνικές συγκόλλησης.
Τριβολογικές ιδιότητες**

Συγγραφέας: Κωνσταντίνος Καλογεράς (Α.Μ.: 18392100)

Επιβλέπων: Αθανάσιος Μουρλάς

Αιγάλεω, Ιούλιος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Diploma Thesis

**Elaboration of stratified structures with welding techniques.
Tribological properties.**

Student: Costantinos Kalogeris (Register No: 18392100)

Supervisor: Athanasios MOURLAS

Egaleo, July 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δημιουργία στρωματικών δομών με τεχνικές συγκόλλησης.
Τριβολογικές ιδιότητες

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Πανδώρα Ψυλλάκη	Καθηγήτρια	
2.	Γεράσιμος Παναγιωτάτος	Καθηγητής	
3.	Αθανάσιος Μουρλάς	Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Καλογερός του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 18392100, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Κωνσταντίνος Καλογερός

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα, κ. Μουρλά Αθανάσιο, Ακαδημαϊκό Υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ), της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την κα. Ψυλλάκη Πανδώρα, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω όλους αυτούς τους λίγους που έχω κρατήσει δίπλα μου τόσα χρόνια και, περιέργως, ακόμη με ανέχονται.

Αιγάλεω, Ιούνιος 2023

Καλογερός Κωνσταντίνος

Περίληψη

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια πρωτοποριακή τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιεί σήματα υπολογιστή για τη δημιουργία διαδοχικών στρωμάτων υλικού για την παραγωγή τρισδιάστατων εξαρτημάτων σε διάφορες μορφές σε αντίθεση με της παραδοσιακές μεθόδους στις οποίες έχουμε αποκλειστικά και μόνο αφαίρεση υλικού. Αυτού του είδους οι τεχνολογίες έχουν γνωρίσει τα τελευταία χρόνια τεράστια ανάπτυξη. Μια από τις πρωταρχικές κατηγορίες προσθετικής κατασκευής αποτελεί η Direct Energy Deposition · κατηγορία την οποία απαρτίζουν αρκετές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης με βασικότερη όμως *-και με αυτή που ασχολείται η παρούσα μελέτη-* την τεχνική Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Υπάρχουν αρκετές ερευνητικές εργασίες οι οποίες μελετούν τη δημιουργία εξαρτημάτων με την χρήση υλικών που παρασκευάζονται για εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης, ωστόσο δεν υπάρχουν μελέτες που να ερευνούν την κατασκευή δείγματος από το συγκεκριμένο παραγεμιστό υλικό πλήρωσης με εμπορική ονομασία OA 4923, το οποίο ενδείκνυται για εφαρμογές αναγόμωσης σε σκαπτικά μηχανήματα από τον κατασκευαστή.

Με την ανάπτυξη της αριθμητικής ανάλυσης η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) βρήκε σημαντικές εφαρμογές και στον κλάδο των συγκολλήσεων, δημιουργώντας έτσι προβλέψεις για σημαντικές παραμέτρους που την αφορούν, όπως της παραμένουσες τάσεις και της παραμορφώσεις. Αυτή η μέθοδος της μοντελοποίησης δίνει πληροφορίες σχετικά με την λήψη βάσης δεδομένων και αποτελεσμάτων από την εκτέλεση του εικονικού πειράματος για την βελτιστοποίηση της τεχνικής WAAM, αλλά και των παραμέτρων συγκόλλησης για την ομαλή εναπόθεση των στρώσεων και το συντονισμό των θερμικών κύκλων που προκαλούνται από το τόξο της συγκόλλησης, ώστε να μην επηρεάζουν αρνητικά τις ιδιότητες του προς δημιουργία εξαρτήματος.

Στην παρούσα εργασία αξιολογούνται οι τριβολογικές ιδιότητες δύο διαφορετικών υλικών, ενός χάλυβα Hardox και του υλικού του δείγματος που κατασκευάσαμε, χρησιμοποιώντας την τυποποιημένη δοκιμή τριβής τύπου στυλίσκου - δίσκου (pin-on-disk). Σαν ανταγωνιστικό υλικό (στυλίσκος) χρησιμοποιήθηκε σφαίρα από Al_2O_3 , η οποία ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια των υλικών. Η μεταβολή του συντελεστή τριβής

μ και του όγκου φθοράς καταγράφηκαν συναρτήσει του εφαρμοσμένου κάθετου φορτίου (5N και 10N) και του αριθμού περιστροφών, με σταθερή ταχύτητα ολίσθησης (0,3 m/s). Η εξέλιξη του όγκου φθοράς και του συντελεστή τριβής μ μαζί με τις πρόσθετες μικροσκοπικές παρατηρήσεις των φθαρμένων επιφανειών οδηγούν στην αξιολόγηση της αντίστασης στη φθορά και στην αποκάλυψη των εμπλεκόμενων μηχανισμών φθοράς, με αποτέλεσμα να γίνεται εφικτή η σύγκριση των τριβολογικών ιδιοτήτων των δυο εξεταζόμενων υλικών με σκοπό την χαρτογράφηση της τριβολογικής συμπεριφοράς του δείγματος που δημιουργήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία.

Καθώς κρίνεται αναγκαίο να καλυφθεί το συγκεκριμένο βιβλιογραφικό κενό, δημιουργώντας το κίνητρο για την έρευνα αυτής της επίδρασης, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά την κατασκευή δείγματος με την χρήση τεχνικής τρισδιάστατης εκτύπωσης WAAM από υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές αναγόμεσης. Έπειτα πραγματοποιείται προσομοίωση της εκτύπωσης μέσω κατάλληλου λογισμικού FEM με σκοπό την πρόβλεψη των θερμομηχανικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κατασκευή του δείγματος. Τέλος, κομμάτι του δείγματος που κατασκευάστηκε επεξεργάστηκε κατάλληλα, ώστε να μπορέσουμε να εξετάσουμε την τριβολογική του συμπεριφορά αλλά και να την συγκρίνουμε με την αντίστοιχη συμπεριφορά ενός χάλυβα Hardox.

Abstract

The technology of additive manufacturing, known as 3D printing is a pioneering approach that uses computer signals to create successive layers of material, in order to produce 3D parts in various forms, as opposed to traditional methods, which are solely limited to material removal. This type of technology has gained enormous growth recently. One of the primary categories of additive manufacturing is the Direct Energy Deposition one. It is composed of several 3D printing techniques, with Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) *-this will be the topic of the present paper-* being the most essential one. There are several research papers that study the creation of components by using material designed for 3D printing applications, but there are no studies that examine the construction of a sample of the specific filled filler material with the trade name OA 4923. The latter is suitable for building up applications in excavators designed by the manufacturer.

Due to the development of numerical analysis, the Finite Element Method (FEM) was intensively applied to the welding industry, giving important parameters related to it (e.g. residual stresses and deformations) field to flourish. This modeling method provides information on obtaining a database and tracking the results that occur after the completion of the virtual experiment, which aimed to optimize the WAAM technique. The method also caters for the welding parameters related to the smooth deposition of the layers and the coordination of the thermal cycles caused by the arc braze welding, so that they do not negatively affect the properties of the component to be designed.

The present paper evaluates the friction properties of both two different materials of a Hardox steel and the material of the sample we created using the standard pin-on-disk friction test. A sphere made of Al₂O₃, which slides on the surface of the materials, was used as the competitive material (stylus), while the variation of the friction coefficient μ and the attrition volume were recorded, according to the applied vertical load (5N and 10N) along with the number of rotations, with a fixed sliding speed (0.3 m/s). In order to examine both the microstructure and the attrition track surfaces of the materials under investigation, we used optical microscopy. The evolution of the attrition volume and the coefficient of friction μ along with the additional microscopic observations of the

worn out surfaces lead to the evaluation of the attrition resistance and the revelation of the involved attrition mechanisms, thus enabling the comparison of the friction properties of the two examined materials, in order to map the tribological behavior of the sample created during the experimental process.

As it is deemed necessary to cover the literature gap mentioned above, creating the motivation for the research of this effect, the thesis of this work concerns the construction of a sample using WAAM 3D printing technique from a filler material used for retreading applications. Then, through the appropriate FEM software, a simulation of the printing is carried out, in order to predict the thermomechanical phenomena that take place during the manufacturing of the sample. On a final note, part of the manufactured sample was properly processed, so that we could examine its friction behavior but also compare it to the corresponding behavior of a Hardox steel.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	vii
Περίληψη	ix
Abstract.....	xi
Περιεχόμενα.....	xiii
Περιεχόμενοι πίνακες.....	xvi
Περιεχόμενα σχήματα.....	xviii
Συμβολισμοί.....	xxii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση	1
1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας.....	3
1.3 Δομή της εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2 Τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Μεθοδολογίες προσθετικής κατασκευής	8
2.3 Παράμετροι τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	20
Κεφάλαιο 3 Ανάπτυξη μοντέλου.....	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Δημιουργία μοντέλου	24
3.2.1 Γεωμετρία και πλέγμα	24
3.2.2 Θερμική ανάλυση	26
3.2.3 Μηχανική ανάλυση	30
3.3 Διαδικασία προσομοίωσης	33
3.3.1 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων.....	33
3.3.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης	35
Κεφάλαιο 4 Πειραματικό μέρος	41
4.1 Εισαγωγή.....	41

4.2	Σχεδιασμός της μελέτης.....	41
4.2.1	Υλικό και μέθοδος.....	41
4.2.2	Τεχνική μεταφοράς υλικού.....	46
4.3	Πειραματική διαδικασία	47
4.3.1	Κατασκευή δείγματος.....	47
4.3.2	Αποτελέσματα θερμικής κάμερας	49
Κεφάλαιο 5 Μελέτη τριβολογικών ιδιοτήτων.....		53
5.1	Μέτρηση τριβής – φθοράς.....	53
5.1.1	Γενικά.....	53
5.1.2	Μέθοδοι μέτρησης τριβής	54
5.1.3	Μέθοδοι μέτρησης φθοράς.....	56
5.2	Επιλογή μεθόδων μέτρησης Τριβής – Φθοράς.....	58
5.2.1	Ανάλυση μεθόδου	58
5.2.2	Κύριος πειραματικός εξοπλισμός	59
5.2.3	Τριβόμετρο	60
5.2.4	Ταχύμετρο – Κατατομόμετρο	61
5.3	Επιλογή ανταγωνιστικού υλικού.....	62
5.4	Πειράματα Τριβής – Φθοράς	64
5.4.1	Γενικά.....	64
5.4.2	Μεθοδολογία μετρήσεων.....	65
5.4.3	Στατιστικός έλεγχος μετρήσεων φθοράς	66
5.4.4	Δοκιμές Τριβής – Φθοράς	67
5.5	Τριβολογική συμπεριφορά δείγματος	67
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα		77
Βιβλιογραφία		81

Περιεχόμενοι πίνακες

Πίνακας 4.1 Ονομαστική χημική σύνθεση του μεταλλικού κελύφους (wt %)

Πίνακας 4.2 Πειραματικές παράμετροι της διαδικασίας WAAM

Πίνακας 5.1 Διακριτική ικανότητα διαφόρων μεθόδων μέτρησης φθοράς

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες υλικών σφαίρας στυλίσκου (csm-instruments)

Πίνακας 5.3 Όγκος φθοράς υλικών για φορτίο 5 και 10 Newton

Πίνακας 5.4 Συντελεστής φθοράς υλικών για φορτίο 5 και 10 Newton

Πίνακας 5.5 Αντίσταση στη φθοράς υλικών για φορτίο 5 και 10 Newton

Περιεχόμενα σχήματα

Εικόνα 2.1 Σχήμα της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης

Εικόνα 2.2 Σχήμα με την ταξινόμηση των διεργασιών AM ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογία που χρησιμοποιείται

Εικόνα 2.3 Σχήμα αναπαράστασης λειτουργίας τεχνολογίας Fused Deposition Modeling (FDM)

Εικόνα 2.4 Εικόνα 2.3 Σχήμα της λειτουργίας μεθόδου Stereo Lithography (SLA)

Εικόνα 2.5 Σχήμα αναπαράστασης λειτουργίας μεθόδου Material Jetting

Εικόνα 2.7 Σχήμα λειτουργίας μεθόδου Sheet lamination

Εικόνα 2.7 Σχήμα ανάρπαστης λειτουργίας τεχνικής Selective Laser Melting (SLM)

Εικόνα 2.8 Σχήμα αναπαράστασης τεχνικής Binder Jetting

Εικόνα 2.9 Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος WAAM

Εικόνα 3.2 Δημιουργία πλέγματος των αντίστοιχων στοιχείων για την ανάγκη της προσομοίωσης

Εικόνα 3.2 Σχήμα του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου

Εικόνα 3.3 Μεταβολή πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

Εικόνα 3.4 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

Εικόνα 3.5 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

Εικόνα 3.6 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

Εικόνα 3.7 Μεταβολή ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

Εικόνα 3.8 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

Εικόνα 3.9 Κατασκευή μοντέλου με εφαρμοσμένες οριακές συνθήκες

- Εικόνα 3.10** Σταδιακή δημιουργία δείγματος με την χρήση προσομοίωσης
- Εικόνα 3.11** Διάγραμμα χρόνου – θερμοκρασίας 4 σημείων κατά μήκος της κατεύθυνσης δημιουργίας
- Εικόνα 3.12** Διαγράμματα μεταβολής θερμοκρασίας από του 800°C στους 500°C και ρυθμού ψύξης
- Εικόνα 3.13** Διάγραμμα παραμορφώσεων συναρτήσει της αποστάτης στην Y κατεύθυνση
- Εικόνα 3.14** Διάγραμμα παραμορφώσεων συναρτήσει της απόστασης στην X κατεύθυνση
- Εικόνα 4.1** Μορφολογία α) του σύρματος β) της κόνεως
- Εικόνα 4.2** Χρησιμοποιούμενη μηχανή συγκόλλησης
- Εικόνα 4.3** Χρησιμοποιούμενο ρομπότ κίνησης
- Εικόνα 4.4** IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας
- Εικόνα 4.5** Τρεις κύριες λειτουργίες μεταφοράς σταγονιδίων στο GSMAW
- Εικόνα 4.6** Σταδιακή δημιουργία στρωμάτων του δείγματος με την μέθοδο WAAM
- Εικόνα 4.7** Παρασκευασμένο δείγμα στην τελική του μορφή
- Εικόνα 4.8** Λήψη από την θερμική κάμερα κατά την εναπόθεση ενός ενδιάμεσου στρώματος του δείγματος
- Εικόνα 4.9** Πειραματικό διάγραμμα χρόνου – θερμοκρασίας 4 σημείων κατά μήκος της κατεύθυνσης δημιουργίας
- Εικόνα 5.1** Τυπικές γεωμετρίες για δοκιμές τριβής – φθοράς
- Εικόνα 5.2** Μέθοδος δοκιμής τριβής στυλίσκου – δίσκου
- Εικόνα 5.3** Κατατομή αύλακας φθοράς με κατατομόμετρο (stylus profiler)
- Εικόνα 5.4** Εκτίμηση όγκου φθοράς με κατατομετρία αύλακας φθοράς
- Εικόνα 5.5** Κυρίως πειραματικός εξοπλισμός
- Εικόνα 5.6** Τριβόμετρο csm-instruments
- Εικόνα 5.7** Διάγραμμα συντελεστή τριβής συναρτήσει του μήκους ολίσθησης (τριβόμετρο csm-instruments)

Εικόνα 5.8 (α),(β) Τραχύμετρο-προφιλόμετρο taylor-hobson

Εικόνα 5.9 Στυλίσκος τρίμετρου με σφαίρα SiC

Εικόνα 5.10 Τρόπος λήψης ενδιάμεσης μέτρησης του όγκου φθοράς

Εικόνα 5.11 Συντελεστής τριβής μ υλικών συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 5 Newton

Εικόνα 5.12 Συντελεστής τριβής μ υλικών συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 10 Newton

Εικόνα 5.13 Όγκος φθοράς υλικών V_w συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 5 Newton

Εικόνα 5.14 Όγκος φθοράς υλικών V_w συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 10 Newton

Εικόνα 5.15 Συντελεστής φθοράς k για το υλικό του δείγματος σε φορτία 5 και 10 Newton αντίστοιχα

Εικόνα 5.16 Συντελεστής φθοράς k για τον χάλυβα Hardox σε φορτία 5 και 10 Newton αντίστοιχα

Εικόνα 5.17 Αντίσταση στην φθορά για τα υλικά σε 5 Newton

Εικόνα 5.18 Αντίσταση στην φθορά για τα υλικά σε 10 Newton

Συμβολισμοί

V	Τάση, Volt
I	Ένταση ρεύματος, Ampere
u	Ταχύτητα συγκόλλησης, mm/s
C	Θερμοχωρητικότητα/Ειδική θερμότητα, J/kg°C
T	Θερμοκρασία, °C
t	Χρόνος, sec
qf, qr	Κατανομή ροή θερμότητας, W/m ²
a, bf, br, c	Διαστάσεις θερμικής πηγής, mm
ff, fr	Αδιάστατες μεταβλητές μέρους ενέργειας για κάθε τμήμα της κινουμένης πηγής θερμότητας
κ	Θερμική αγωγιμότητα, W/m°C
Q	Ροή θερμότητας, W/m ³
Es	Εμβαδόν της κάθετης τομής της αύλακας ολίσθησης, mm ²
R	Ακτίνα της κυκλικής τροχιάς ολίσθησης, rad
μ	Συντελεστής τριβής
Vw	Όγκος φθοράς, mm ³
k	Συντελεστής φθοράς, mm ³ *N ⁻¹ *laps ⁻¹
f	Επιβαλλόμενο φορτίο, N
SL	Αριθμός των κύκλων ολίσθησης

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η τεχνολογία αιχμής προσθετικής κατασκευής, γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια πρωτοποριακή τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί σήματα υπολογιστή για τη δημιουργία διαδοχικών στρωμάτων υλικού για την παραγωγή τρισδιάστατων εξαρτημάτων σε διάφορες μορφές (Lupton and Turner, 2016) σε αντίθεση με της παραδοσιακές μεθόδους στις οποίες έχουμε αποκλειστικά και μόνο αφαίρεση υλικού. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για να φτάσουμε στην τελική τρισδιάστατη εκτύπωση κάποιου αντικειμένου είναι συγκεκριμένη και αριθμητέ από 4 σταδιακά βήματα τα οποία περιλαμβάνουν την δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD, τον κατάλληλο διαχωρισμό του εξαρτήματος σε διατομές ελάχιστου πάχους, την σωστή επιλογή υλικού και εξοπλισμού καθώς και την μετατροπή του αρχείου από CAD σε STL μορφή και τέλος την εκτύπωση του αντικειμένου (Behm, et al., 2018). Πλέον η φιλοσοφία της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει εκμεταλλευθεί την ραγδαία ανάπτυξη του φάσματος της τεχνολογίας δημιουργώντας έτσι πληθώρα τεχνικών οι οποίες ταξινομούνται σε 7 κατηγορίες σύμφωνα με τους (Kanishka and Acherjee, 2023). Μια από τις πρωταρχικές κατηγορίες προσθετικής κατασκευής αποτελεί η Direct Energy Deposition κατηγορία την οποία την απαρτίζουν αρκετές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης με βασικότερη όμως και με αυτή που ασχολείται η παρούσα μελέτη την τεχνική WAAM Wire Arc Additive Manufacturing (Treutler and Wesling, 2021). Η τεχνική αυτή έχει τις ρίζες της στο 1920 που καθιερώθηκε επίσημα για πρωταρχική φορά και από τότε έως σήμερα έχει κάνει μεγάλα άλματα εξέλιξης καθώς αποτέλεσε το επίκεντρο των ερευνών για πολλές δεκαετίες βρίσκοντας μετέπειτα εφαρμογές σε πληθώρα κλάδων της βιομηχανίας (He, et al., 2023).

Με την ανάπτυξη της αριθμητικής ανάλυσης η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) βρήκε σημαντικές εφαρμογές και στον κλάδο των συγκολλήσεων δημιουργώντας έτσι προβλέψεις για σημαντικές παραμέτρους που της αφορούν όπως της παραμένουσες τάσεις και της παραμορφώσεις (Amal, Panicker and

Senthilkumar, 2019). Αυτή η μέθοδος μοντελοποίησης ονομάζεται και Forward Modeling και στόχος της αποτελεί η λήψη βάσης δεδομένων και αποτελεσμάτων από την εκτέλεση του εικονικού πειράματος για την βελτιστοποίηση της τεχνικής WAAM αλλά και των παραμέτρων συγκόλλησης για την ομαλή εναπόθεση των στρώσεων και το συντονισμό των θερμικών κύκλων που προκαλούνται από το τόξο της συγκόλλησης ώστε να μην επηρεάζουν αρνητικά της ιδιότητες του προς δημιουργία εξαρτήματος (Amal, Panicker and Senthilkumar, 2019). Στην παρούσα διπλωματική μελετη αλλά και γενικότατα στο πλήθος των βιβλιογραφικών αναφορών που αφορούν την δημιουργία στρωματιών δομών με τεχνικές συγκόλλησης χρησιμοποιείται το διπλό ελλειψοειδές μοντέλο που προτάθηκε από τους (Goldak, Chakravarti and Bibby, 1984) στο οποίο ένα καρτεσιανό σύστημα (x', y', z') ορίζει την κινουμένη διανομή ισχύος χωριστά σε δυο περιοχές. Η μέθοδος αυτή για το μοντέλο είναι μια από της πιο αξιόπιστες λύσεις που επιχειρούν να απλοποιήσουν ένα σύνθετο μαθηματικό μοντέλο μιας πηγής θερμότητας με κατάλληλη κατανομή ισχύος για να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα (Oyama, et al., 2019).

Με τις δοκιμές ταχείας τριβής – φθοράς αξιολογείται η αντίσταση των υλικών σε τριβή και φθορά, με σκοπό τη βελτιστοποίηση επιλογής υλικών ή και των κατεργασιών τους για εξειδικευμένες εφαρμογές. Τα υλικά αξιολογούνται και κατατάσσονται μέσω δοκιμών τριβής – φθοράς με αποτελέσματα τα περισσότερο υποσχόμενα να δοκιμάζονται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (function tests) (Bushan and Gupta, 1991). Συνήθεις μέθοδοι μέτρησης φθοράς είναι η μέτρηση της απώλειας βάρους (weight loss), της απώλειας όγκου (volume loss), του πλάτους η του βάθους της αύλακας φθοράς η άλλων γεωμετρικών μεγεθών. Εκτός από τις παραπάνω, που αποτελούν μεθόδους άμεσης μέτρησης τις φθοράς, εφαρμόζονται κι άλλες μέθοδοι έμμεσης μέτρησης φθοράς, όπως η μέτρηση του απαιτούμενου χρόνου για την φθορά ενός υλικού η του απαιτούμενου φορτιού που θα πρέπει να εφαρμοστεί για να προκαλέσει ορισμένη φθορά η μεταβολή της ποιότητας της επιφάνειας (Kaushik, et al., 2022).

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας

Όπως έγινε αντιληπτό από την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση οι αναφορές απασχολούνται με διαφορά αντικείμενα. Αυτές αναφέρονται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή δειγμάτων με την χρήση της τεχνικής τρισδιάστατης εκτύπωσης WAAM από διάφορα υλικά που στην πλειοψηφία τους ενδείκνυνται για χρήση σε τέτοιου είδους εφαρμογές, από τα δείγματα αυτά εξετάζουν της επιπτώσεις του θερμοκρασιακού πεδίου στις ιδιότητες. Ωστόσο δεν υπάρχει κάποια μελετη στην οποία να κατασκευάζετε δείγμα από το συγκεκριμένο υλικό το οποίο ενδείκνυται για άλλες εφαρμογές κυρίως αναγόμενης από τον κατασκευαστή μέσω της προσθετικής τεχνικής την οποία αναφέραμε και να μελετά την τριβολογική του συμπεριφορά αλλά τόσο της παραμένουσες τάσεις όσο και της παραμορφώσεις ως αποτέλεσμα προσομοιώσεων συγκόλλησης τόξου.

Καθώς κρίνεται αναγκαίο να καλυφθεί το συγκεκριμένο βιβλιογραφικό κενό, δημιουργώντας το κίνητρο για την έρευνα αυτής της επίδρασης, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά την κατασκευή δείγματος με την χρήση τεχνικής τρισδιάστατης εκτύπωσης WAAM από υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται για εφαρμογές αναγόμενης. Έπειτα πραγματοποιείται προσομοίωση της εκτύπωσης μέσω κατάλληλου λογισμικού FEM με σκοπό την πρόβλεψη των θερμομηχανικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κατασκευή του δείγματος. Τέλος, κομμάτι του δείγματος που κατασκευάστηκε επεξεργάστηκε καταλληλά ώστε να μπορέσουμε να εξετάσουμε την τριβολογική του συμπεριφορά αλλά και να την συγκρίνουμε με την αντίστοιχη συμπεριφορά ενός χάλυβα Hardox με σκοπό την χαρτογράφηση της τριβολογικής συμπεριφοράς του δείγματος που δημιουργήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία.

Για την ανάπτυξη της εργασίας υιοθετείται η τεχνολογία συγκόλλησης τόξου GMAW η οποία προσαρμόστηκε καταλληλά ούτως ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί τρισδιάστατη εκτύπωση με χρήση παραγεμιστού υλικού πλήρωσης με εμπορική ονομασία OA 4923. Το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει εξαιρετική τριβολογική συμπεριφορά που όμως επειράζεται αισθητά από τους μετασχηματισμούς δομής που πραγματοποιούνται κατά την διάρκεια μιας θερμικής κατεργασίας. Η διαδικασία των διαδοχικών εναποθέσεων υλικού μέσω της συγκόλλησης συνδιάζει μέγιστο εύρος

θερμοκρασιών σε κάθε στρώση (layer) που εναποτίθεται συμπεριλαμβάνοντας τη φάση της θέρμανσης, ψύξης, στερεοποίησης. Παράλληλα η ευαισθησία των τριβιολογικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη εκτύπωση δειγμάτων τόσο κατά την διάρκεια όσο και μετά το πέρας της κατασκευής καθιστά την υιοθέτηση από ένα ολοκληρωμένο αντικείμενο μελέτης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιεί ως βασικό εργαλείο επιβεβαίωσης τον αριθμητικό υπολογισμό με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Το μοντέλο που δημιουργήσαμε αποσκοπεί στο να προβλέψει αν είναι δυνατή η τρισδιάστατη δημιουργία δείγματος με το συγκεκριμένο υλικό αλλά και την θερμική και μηχανική απόκριση των στρώσεων και κατά ακολουθία του δείγματος πριν από την πειραματική πραγματοποίηση των εναποθέσεων υλικού, δεδομένου ότι η εύστοχη και ταχεία «πρόβλεψη» αποτελεί σήμερα το ζητούμενο στη κατασκευαστική, και όχι μόνο, βιομηχανία. Εν κατακλείδι, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα

1.3 Δομή της εργασίας

Στην παρούσα μελέτη διερευνάται κατά ποσο είναι δυνατή η εκτέλεση τρισδιάστατης προσθετικής κατασκευής με την χρήση υλικού το οποίο πρώτη φορά χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους εφαρμογές μέσω της τεχνικής WAAM. Έπειτα εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο η επιβολή των θερμικών φαινομένων, που δημιουργούνται λόγω των συγκολλήσεων τόξου, επηρεάζουν της ιδιότητες του υλικού αλλά και την διαδικασία της εκτύπωσης, η δε εργασία αποτελείται από έξι (6) κεφάλαια.

Στο παρόν (πρώτο) κεφάλαιο, βάσει βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αναδεικνύεται και περιγράφεται το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η παρούσα διπλωματική εργασία και παρουσιάζονται οι στόχοι και η δομή της εργασίας, προκειμένου να παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα ακόλουθα κεφάλαια και το περιεχόμενό τους.

Στο κεφάλαιο 2, εξετάζετε η διαχρονική εξέλιξη της προσθετικής κατασκευής και έπειτα γίνεται μια εκτενής περιγραφή όλων των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσα από βιβλιογραφικές αναφορές σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που παρουσιάζετε από τα αντίστοιχα πρότυπα.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στην χρήση πεπερασμένων στοιχείων αναφορικά με τον τομέα των συγκολλήσεων και μετέπειτα της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ακολούθως περιγράφεται και αναπτύσσεται αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης συγκόλλησης τόξου έπειτα αφού επιβεβαιώθηκε η ορθότητα και η πιστότητα του πλήρως θερμομηχανικού μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση.

Περνώντας στο πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι που ορίστηκαν για την διεκπεραίωση της συγκόλλησης τόξου, ο χρησιμοποιούμενος πειραματικός εξοπλισμός, και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν καθώς ακόμα αναλύεται και η σταδιακή διαδικασία κατασκευής του δείγματος.

Καθώς ολοκληρώθηκε η δημιουργία του δείγματος πραγματοποιήθηκε η διάσπαση του σε επιμέρους κομμάτια με απώτερο σκοπό την μελετη της επίδρασης των θερμοκρασιακών φαινομένων στις τριβολογικές ιδιότητες του υλικού. Στην μελετη αυτή εξεταστικέ η τριβολογική συμπεριφορά του υλικού αλλά και ενός χάλυβα τύπου Hardox με σκοπό την σύγκριση των ιδιοτήτων των δυο υλικών, από την μελετη αντλήθηκαν αποτελέσματα από την μορφή διαγραμμάτων τα οποία παραβιάζονται στο κεφάλαιο 5.

Τέλος, το κεφάλαιο 6, περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πολυεπίπεδη μελέτη πάνω σε όλα τα θέματα που αφορούν στην δημιουργία στρωματιών δομών με τεχνικές συγκόλλησης και ουσιαστικά, μέσα από τη διπλωματική αυτή εργασία αναδεικνύεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ πειράματος και μοντέλου προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 2

Τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης

2.1 Εισαγωγή

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια νέα επαναστατική τεχνολογία προσθετικής κατασκευής η οποία χρησιμοποιεί σήμα υπολογιστή για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων για να σχηματίσουν διαφορετικά σχήματα προσθέτοντας συνεχώς στρώματα υλικών (Lupton and Turner, 2016) σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους αφαιρετικής κατασκευής όπου το υλικό αφαιρείται από ένα μεγαλύτερο μπλοκ. Αυτή η καινοτόμος τεχνολογία έχει κερδίσει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω των δυνατοτήτων της να φέρει επανάσταση στις διαδικασίες παραγωγής και σχεδιασμού. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους κλάδους, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, η αρχιτεκτονική και τα καταναλωτικά αγαθά, μεταξύ άλλων. Αυτή η μεγάλη γκάμα εφαρμογών της τρισδιάστατης εκτύπωσης οφείλετε στην δυνατότητα για δημιουργία πρωτοτύπων, προσαρμογή και παραγωγή σε μικρές παρτίδες, δίνοντας την ικανότητα σε σχεδιαστές, μηχανικούς και επιχειρηματίες να δημιουργούν πολύπλοκα και περίπλοκα αντικείμενα με πρωτοφανή ελευθερία και ευελιξία. Αυτή η νέα τεχνολογία έχει συγκεντρώσει τα βλέμματα της επιστημονικής κοινότητας καθώς προσφέρει επίσης τη δυνατότητα για αυξημένη βιωσιμότητα και μειωμένα απόβλητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Χρησιμοποιώντας μόνο το υλικό που απαιτείται για το αντικείμενο που εκτυπώνεται, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη σπατάλη υλικών και την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, η δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων κατ' απαίτηση και τοπικά μπορεί να μειώσει το κόστος μεταφοράς και τις εκπομπές άνθρακα που σχετίζονται με τη μεταφορά και την αποθήκευση.

2.2 Μεθοδολογίες προσθετικής κατασκευής

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την τρισδιάστατη εκτύπωση σύμφωνα με την μελέτη των (Behm, et al., 2018), αποτελείται από τα εξής βήματα:

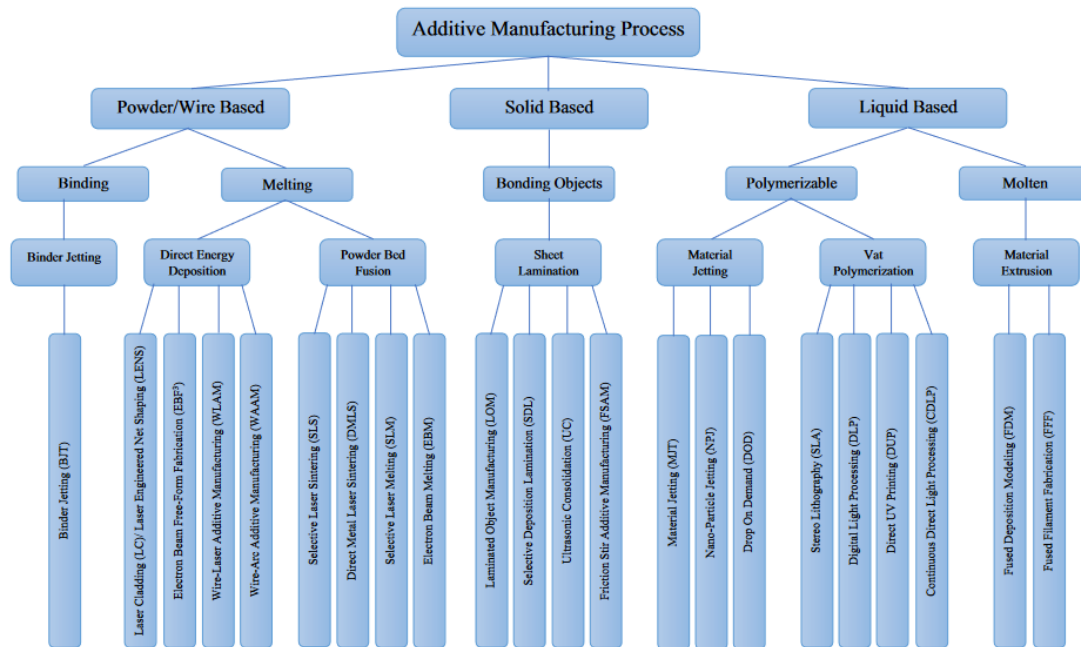
- 1) Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD του σχεδίου ή του σκαναρισμένου αντικειμένου.
- 2) Επιλογή εκτυπωτή και υλικού και μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL αρχείο. Ορισμένοι παράγοντες για το βήμα αυτό είναι το κόστος, η αντοχή του υλικού, η ποιότητα της επιφανείας, και ο χρόνος εκτύπωσης
- 3) “Τεμαχισμό” με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, του αρχείου STL σε λεπτές διατομές ελαχίστου πάχους. Αφότου πραγματοποιηθεί μια δοκιμαστική εκτύπωση και όλα ελεγχθούν καλά, πραγματοποιείται η τελική εκτύπωση
- 4) Μετά την εκτύπωση, μία σειρά διεργασιών μετά-επεξεργασίας είναι πιθανό να χρειάζεται, όπως αφαίρεση περιττού υλικού, βαφή, προσθήκη πηλού ή και συναρμολόγηση κομματιών.



Εικόνα 2.1 Σχήμα της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης υιοθετημένο από (Δημογιώργη, 2020)

Οι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής μπορούν να ταξινομηθούν σε επτά κατηγορίες ανάλογα με το είδος της τεχνολογίας η οποία χρησιμοποιείται (Kanishka and Acherjee, 2023). Σύμφωνα με το ISO/ASTM52900-15 αυτοί οι επτά (7) μέθοδοι προσθετικής κατασκευής ταξινομούνται με βάση την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή στις εξής ονομαστικές κατηγορίες : (1) Inter jetting, (2) Direct energy deposition, (3) Material extrusion, (4) Material jetting, (5) Powder bed fusion, (6) Sheet lamination, (7) Vat Photo-polymerization . Οι ουσιαστικές διαφορές μεταξύ αυτών των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης εστιάζονται στα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται , στην αρχική μορφή που εισάγονται αυτά στην εκάστοτε τεχνολογία

αλλα και την τεχνική που δημιουργείται το κάθε επίπεδο και ενσωματώνεται με το επόμενο (Δημογιώργη, 2020).



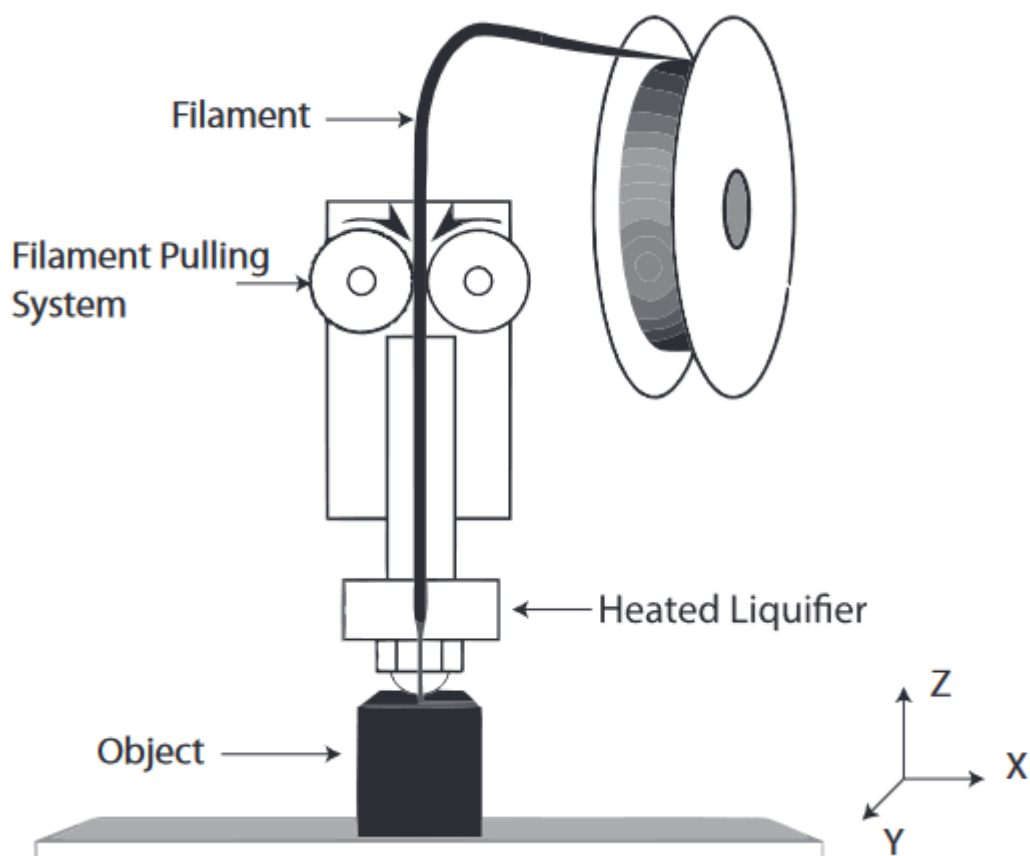
Εικόνα 2.2 Σχήμα με την ταξινόμηση των διεργασιών AM ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογία που χρησιμοποιείται υιοθετημένο από (Kanishka and Acherjee, 2023).

Έπειτα θα ακολουθήσει σύντομη περιγραφή όλων τύπων προσθετικής κατασκευής καθώς και των υποκατηγοριών τους .

- **Material extrusion – FFF/FDM**

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης Material extrusion αποτελείται από δυο ακόμα επιμέρους υποκατηγορίες την Fused Filament Fabrication (FFF) η διαφορετικά Fused Deposition Modeling (FDM) και την 3D Dispensing. Περαιτέρω θα αναλυθεί εκτενέστερα μόνο η πρώτη κατηγορία καθώς είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη προσθετική κατασκευή η οποία βρίσκει πληθώρα εφαρμογών σε πολλαπλούς κλάδους της βιομηχανίας και μη. Η τεχνολογία FDM είναι από τις πολλά υποσχόμενες τεχνικές της προσθετικής κατασκευής. Ανακαλύφθηκε από το Scott Crump στα τέλη της δεκαετίας του '80 και συγκεκριμένα το 1989. Το Fused Deposition Modeling (FDM) είναι ένας τύπος τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζεται σε εξώθηση υλικού, που χρησιμοποιείται συνήθως στην προσθετική κατασκευή όπως ακριβώς

φαίνεται στην **Εικόνα 2.3**. Το FDM λειτουργεί τροφοδοτώντας ένα θερμοπλαστικό νήμα σε ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο, το οποίο λιώνει το υλικό σε ημι-υγρή κατάσταση. Το λιωμένο υλικό στη συνέχεια εναποτίθεται με ακρίβεια στρώμα προς στρώμα σε μια πλατφόρμα κατασκευής, όπου στερεοποιείται γρήγορα για να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Το FDM είναι γνωστό για την ευελιξία του, καθώς μπορεί να εκτυπώσει ένα ευρύ φάσμα θερμοπλαστικών, συμπεριλαμβανομένων των ABS, PLA, PETG αλλά και άλλων τύπων πλαστικού όπως πολυανθρακικά, πολυαμίδια και πολυστυρένιο. Το FDM είναι επίσης δημοφιλές λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους και της προσβασιμότητας του, με ένα ευρύ φάσμα εκτυπωτών FDM που διατίθενται για προσωπική και επαγγελματική χρήση.



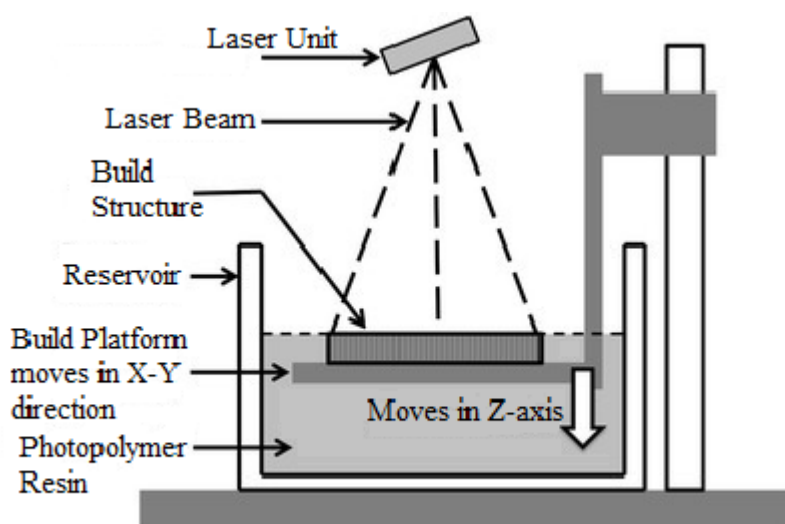
Εικόνα 2.3 Σχήμα αναπαράστασης λειτουργίας τεχνολογίας Fused Deposition Modeling (FDM) υιοθετημένο από (Carneiro, Silva and Gomes, 2015).

Ωστόσο, τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με FDM μπορεί να έχουν ορατές γραμμές στρώματος στην επιφάνεια και οι μεγαλύτερες εκτυπώσεις μπορεί να είναι ευαίσθητες

σε ζητήματα όπως παραμόρφωση. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η τεχνολογία FDM έχει βρει εκτεταμένες εφαρμογές στην ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων, στην κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων, ακόμη και στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία, καθιστώντας την μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης σήμερα (Carneiro, Silva and Gomes, 2015).

- **Vat Photo-Polymerization**

Vat Photopolymerization είναι η τεχνολογία Additive Manufacturing (AM) που παράγει τρισδιάστατα αντικείμενα με την ανά επίπεδο στερεοποίηση υγρού υλικού – ρητίνης φωτοπολυμερούς χρησιμοποιώντας υπεριώδους ακτινοβολίας (Ian Gibson, et al., 2017). Κάποιες από τις κυριότερες τεχνικές Vat Photopolymerization που αναπτύχθηκαν είναι η Stereo Lithography (SLA), Digital Light Processing (DLP), Direct UV Printing (DUP) και Continuous Direct Light Processing (CDLP) με την μέθοδο της Stereo Lithography (SLA) να είναι αυτή που έχει επικρατήσει και αναλύεται εκτενέστερα στην επόμενη παράγραφο. Η στερεοφωνική λιθογραφία (SLA) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί υγρές ρητίνες και εστιασμένο λέιζερ UV για τη δημιουργία περίπλοκων τρισδιάστατων αντικειμένων με εξαιρετική ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Ξεκινώντας με ένα αρχείο CAD, το σχέδιο κόβεται σε λεπτές στρώσεις και η υγρή ρητίνη στη συνέχεια σκληραίνει επιλεκτικά με το λέιζερ UV, στερεοποιώντας το υλικό στρώμα προς στρώμα για να σχηματιστεί ένα πλήρες αντικείμενο.



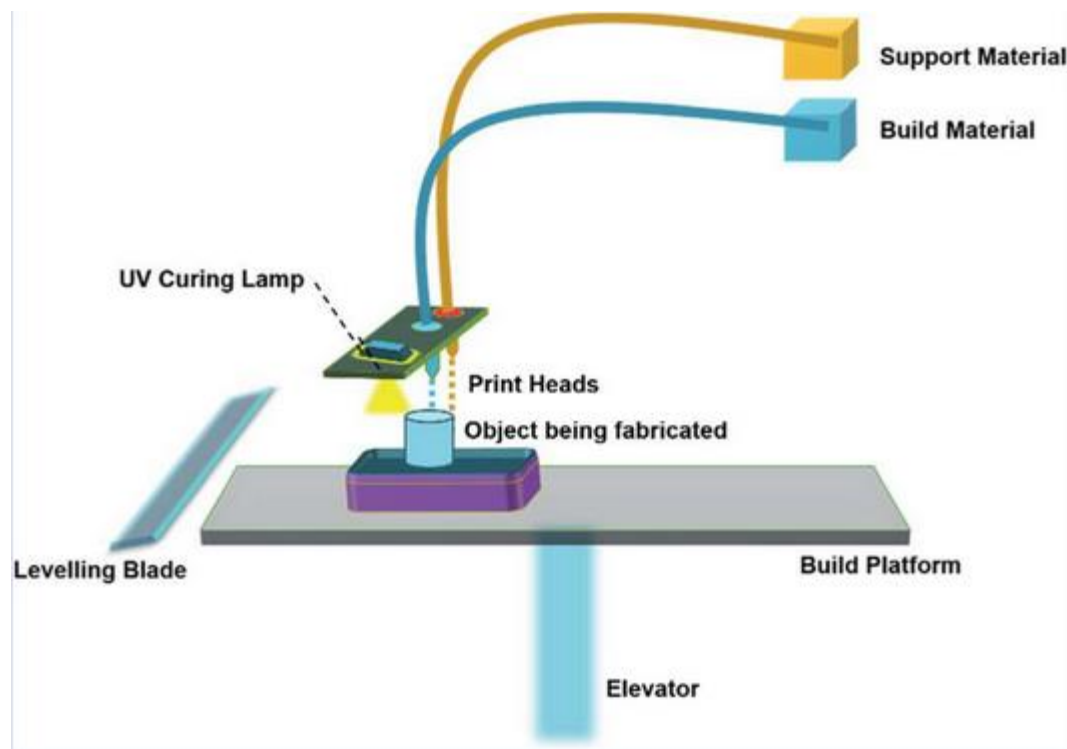
Εικόνα 2.4 Σχήμα της λειτουργίας μεθόδου Stereo Lithography (SLA) υιοθετημένο από (Suresh, Reddy and Gurrām, 2019).

Συγκεκριμένα, το υλικό βυθίζεται σε μία λεκάνη με υγρή ρητίνη. Τα στρώματα δημιουργούνται ως αποτέλεσμα βαθύτερης εμβάπτισης των δημιουργημένων εξαρτημάτων στη δεξαμενή ρητίνης. Η πρώτη στρώση τοποθετείται ελαφρώς κάτω από τη στάθμη υγρού. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του SLA είναι η αποτελεσματικότητά του στην παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών και λεπτών λεπτομερειών σε μια ενιαία διαδικασία παραγωγής. Οι δυνατότητες υψηλής ανάλυσης του SLA έχουν ως αποτέλεσμα λείες επιφάνειες και εξαιρετική ακρίβεια, εξαλείφοντας την ανάγκη για μετα-επεξεργασία και μειώνοντας τον χρόνο παραγωγής. Η SLA είναι επίσης ικανή να παράγει εξαρτήματα με υψηλή μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα, καθιστώντας την κατάλληλη για λειτουργικά πρωτότυπα και ανταλλακτικά τελικής χρήσης σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των καταναλωτικών αγαθών. Επιπλέον, το SLA επιτρέπει ένα ευρύ φάσμα υλικών ρητίνης, συμπεριλαμβανομένων βιοσυμβατών ρητινών και ρητινών οδοντικής ποιότητας, καθιστώντας το κατάλληλο για την παραγωγή ιατρικών και οδοντικών εμφυτευμάτων. Με τον συνδυασμό ταχύτητας, ακρίβειας και ευελιξίας, η SLA έχει γίνει μια κορυφαία μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή πολύπλοκων και υψηλής ποιότητας τρισδιάστατων αντικειμένων με αποτελεσματικό τρόπο (Suresh, Reddy and Gurram, 2019).

- **Material Jetting**

Η τεχνολογία Material Jetting έχει τις ρίζες της για την δημιουργία αντικειμένων στην μέθοδο ink – jet Printing και έχουν αναπτυχθεί επιμέρους υποκατηγορίες που έχουν όμως την ίδια λογική γύρο από την προσθετική δημιουργία αντικειμένων. Το υλικό εκτοξεύεται μέσω λεπτών ακροφυσίων σε μια πλατφόρμα κατασκευής χρησιμοποιώντας είτε συνεχή είτε προσέγγιση Drop on Demand (DOD). Το βοηθητικό υλικό (το οποίο είναι κάποια κολλώδης ουσία) εκτοξεύεται στην επιφάνεια κατασκευής ή στην πλατφόρμα ώστε να κολλήσει, έπειτα η πούδρα στερεοποιείται και το μοντέλο κατασκευάζεται με αυτό τον τρόπο στρώμα-στρώμα. Το υλικό εναποτίθεται από ένα ακροφύσιο που κινείται οριζόντια κατά μήκος της πλατφόρμας κατασκευής. Οι μηχανές ποικίλουν ως προς την πολυπλοκότητα και τις μεθόδους ελέγχου της εναπόθεσης υλικού. Τα στρώματα του υλικού στη συνέχεια σκληρύνονται χρησιμοποιώντας υπεριώδες φως (UV). Καθώς το υλικό πρέπει να εναποτεθεί σε σταγόνες, ο αριθμός των διαθέσιμων υλικών για χρήση είναι περιορισμένος. Τα πολυμερή και τα κερία είναι κατάλληλα και κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά, λόγω της

παχύρρευστης φύσης τους και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες (Qian, et al., 2023).

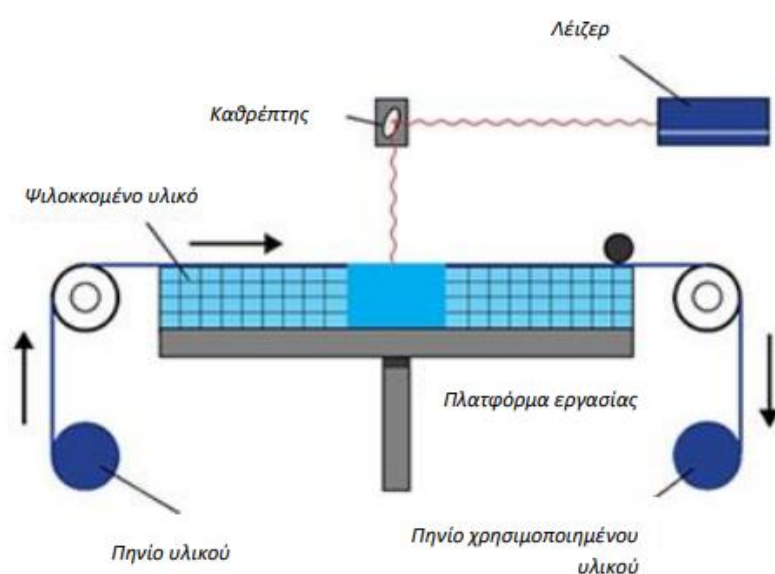


Εικόνα 2.5 Σχήμα αναπαράστασης λειτουργίας μεθόδου Material Jetting υιοθετημένο από (Gülcan, Günaydin and Tamer, 2021).

- **Sheet Lamination**

Η κύρια κατηγορία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί την τεχνολογία Sheet lamination είναι τεχνική Laminated Object Manufacturing (LOM). Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε από την αμερικάνικη εταιρία Helisys, κατά την οποία η δημιουργία των εξαρτημάτων πραγματοποιείται με την ένωση λεπτών φύλλων υλικού που φέρουν μικρή επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας. Οι μηχανές που χρησιμοποιούν την τεχνική LOM λειτουργούν με τον εξής τρόπο, μια διάταξη τροφοδοσίας τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού πάνω σε μια βάση στην συνέχεια ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από αυτό το πρώτο φύλλο πιέζοντας το έτσι ώστε να κολλήσει πάνω στην βάση. Έπειτα μια δέσμη λέιζερ κόβει το επιθυμητό σχήμα πάνω από το χαρτί και ύστερα χαράζει μικρά τετραγωνάκια στο υπόλοιπο τμήμα με σκοπό να διευκολύνεται η απόσπαση του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η δημιουργία του. Η διαδικασία αυτή

επαναλαμβάνεται συνεχώς με διαφορετικά φύλλα υλικού ως την πλήρης κατασκευή του αντικειμένου. Κάθε τύπος τεχνολογίας που χρησιμοποιεί την μέθοδο του Sheet lamination λειτουργεί οριακά διαφορετικά από τον άλλο, αν και η κύρια αρχή παραμένει η ίδια. Οι κύριες διαφορές σε αυτές της υποκατηγορίες εντοπίζονται στα φύλλα υλικού που χρησιμοποιούνται που αρχικά ήταν από χαρτί ενώ πλέον έχουν ενταχθεί υλικά όπως το αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά και λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών η μετάλλων υπό την μορφή σκόνης αλλά και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η κοπή αυτών αλλά και η τροφοδοσία τους (Παπαθανάσης, 2005).



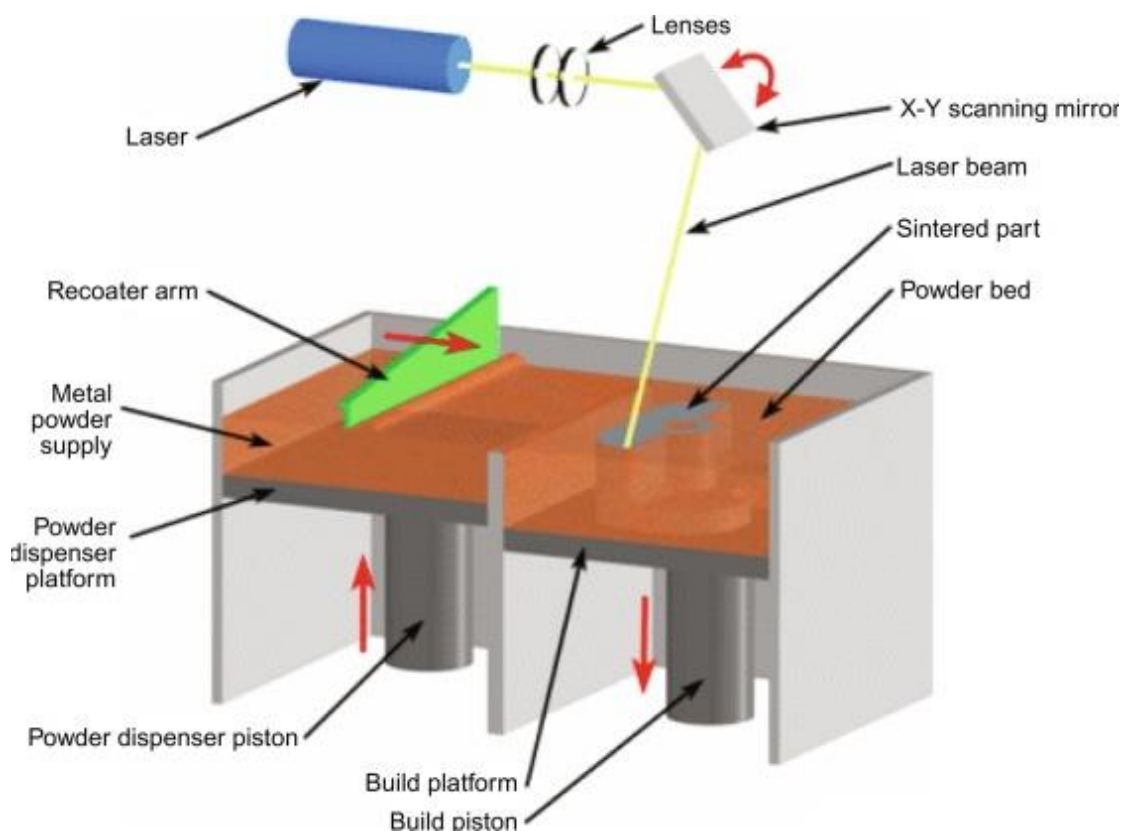
Εικόνα 2.6 Σχήμα λειτουργίας μεθόδου Sheet lamination, υιοθετημένο από

(Δημογιώργη, 2020)

- **Powder Bed Fusion**

Η προσθετική κατεργασία Powder Bed Fusion είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που λιώνουν και στην συνέχεια στερεοποιούν επίπεδα πούδρας υλικού για την δημιουργία του επιθυμητού εξαρτήματος. Με της μεθόδους Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) να αξιοποιούν αυτή την τεχνολογία στην ευρύτερη βιομηχανία. Οι τεχνικές SLM και SLS είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες από τις βιομηχανίες για την κατασκευή μεταλλικών λειτουργικών εξαρτημάτων με περίπλοκη γεωμετρία. Η διαδικασία SLM ξεκινά με ένα

λεπτό στρώμα μεταλλικής σκόνης απλωμένο ομοιόμορφα σε μια πλατφόρμα κατασκευής.



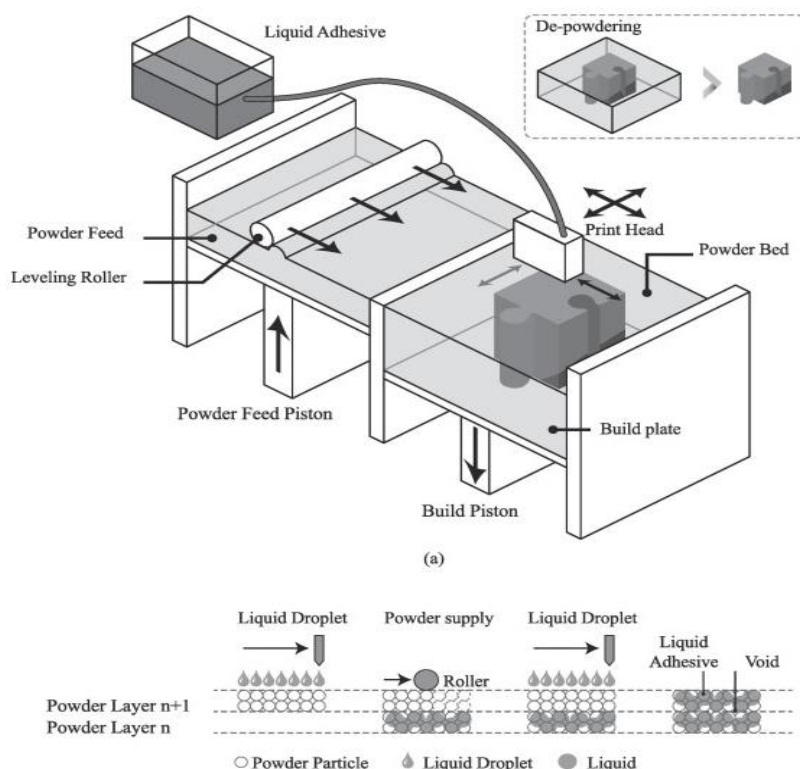
Εικόνα 2.7 Σχήμα ανάρπαστης λειτουργίας τεχνικής Selective Laser Melting (SLM) υιοθετημένο από (Ashwath, et al., 2022).

Στη συνέχεια, το λέιζερ κατευθύνεται σε συγκεκριμένες περιοχές του στρώματος πούδρας, όπου λιώνει επιλεκτικά και συγχωνεύει τα σωματίδια μεταξύ τους με βάση τα δεδομένα ψηφιακής σχεδίασης. Καθώς το λέιζερ σαρώνει πάνω από το στρώμα πούδρας, στρώμα προς στρώμα, το λιωμένο υλικό στερεοποιείται και σχηματίζει το επιθυμητό σχήμα. Μόλις ολοκληρωθεί ένα στρώμα, ένα νέο στρώμα σκόνης απλώνεται στην κορυφή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθεί ολόκληρο το αντικείμενο. Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, το αντικείμενο αφήνεται να κρυώσει πριν αφαιρεθεί από το στρώμα πούδρας. Η διαδικασία της μεθόδου SLS δεν έχει διαφορετική αρχή λειτουργίας στην δημιουργία αντικειμένων από την μέθοδο SLM που περιγράψαμε αλλά η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στο υλικό που χρησιμοποιείται το οποίο στην τεχνική SLS είναι πλαστικό και όχι μέταλλο. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των τεχνικών είναι η ικανότητα τους να παράγουν εξαρτήματα με υψηλή πολυπλοκότητα και περίπλοκες λεπτομέρειες που είναι δύσκολο

ή αδύνατο να επιτευχθούν με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής (Ashwath, et al., 2022).

- **Binder Jetting**

Σε αυτήν τη διαδικασία, ένας εκτυπωτής επικαλύπτει στρώση πούδρας υλικού σε ένα κρεβάτι εκτύπωσης και στη συνέχεια ψεκάζει ένα υγρό δεσμευτικό υλικό πάνω σε αυτήν τη στρώση μια κινητή μονάδα inkjet. Το δεσμευτικό υλικό στερεοποιείται και συγκολλά τα σωματίδια της πούδρας μαζί, σχηματίζοντας ένα στερεό αντικείμενο στη μορφή του σχεδιασμένου μοντέλου CAD. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα εκτύπωσης



Εικόνα 2.8 Σχήμα αναπαράστασης τεχνικής Binder Jetting υιοθετημένη από

(Park, et al., 2021).

κινείται κάτω για να επιτρέψει στον εκτυπωτή να επικαλύψει την επόμενη στρώση πούδρας στο κρεβάτι εκτύπωσης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθεί ολόκληρο το αντικείμενο. Η κατασκευή εξαρτημάτων με την χρήση της τεχνικής Binder Jetting είναι ιδανική για την παραγωγή αντικειμένων μεγάλου μεγέθους, χωρίς τους περιορισμούς των παραδοσιακών μεθόδων προσθετικής κατασκευής. Απαιτεί επίσης λιγότερο χρόνο και κόστος σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες παραγωγής. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του Binder Jetting είναι η δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων με πολλαπλά υλικά, επιτρέποντας τη δημιουργία πολύπλοκων και προσαρμοσμένων σχεδίων (Park, et al., 2021).

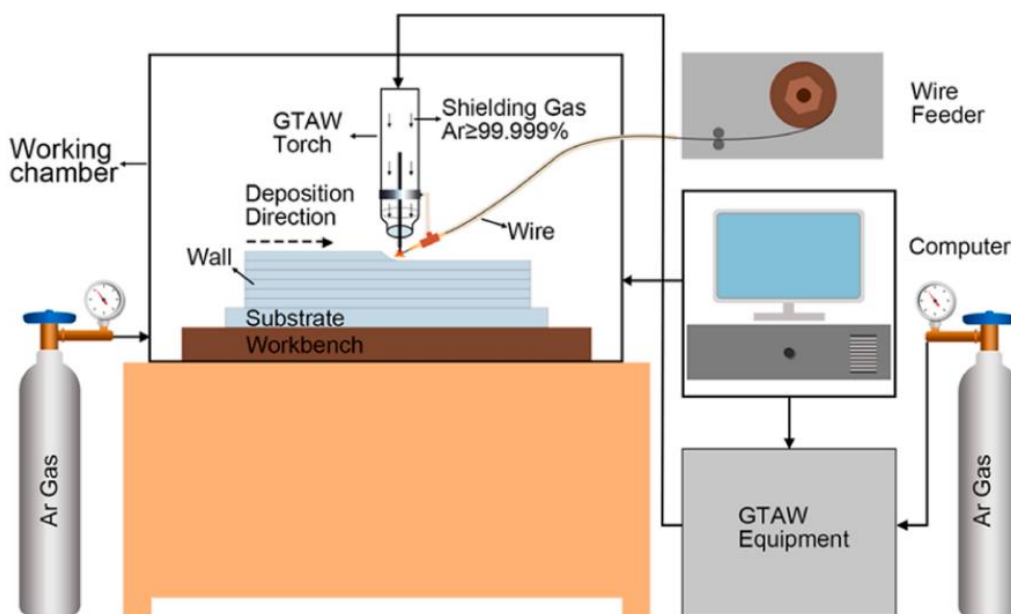
- **Direct Energy Deposition**

Η τεχνική προσθετικής κατασκευής Direct Energy Deposition (DED) είναι μια τεχνολογία αιχμής που επιτρέπει την παραγωγή πολύπλοκων και λειτουργικών μεταλλικών εξαρτημάτων ανεξάρτητος μεγέθους με υψηλή ακρίβεια και απόδοση. Την τεχνική αυτή την έχουν εκμεταλλευτεί διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί, μια από αυτές που είναι ευρέως διαδεδομένη σε πόλους κλάδους της βιομηχανίας να αποτελεί και η μέθοδος Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) στην οποία και βασιστήκαμε για την διάκια μας τρισδιάστατη εκτύπωση που πραγματοποιήσαμε, την μέθοδο αυτή θα αναλύσουμε εκτενέστερα παρακάτω. Η ανάπτυξη της προσθετικής κατασκευής Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), γνωστή πλέον ως τόξο κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας (DED-arc), καθοδηγείται από την ανάγκη για αυξημένη παραγωγική απόδοση των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η ικανότητά του να παράγει εξαρτήματα χωρίς την ανάγκη περίπλοκων εργαλείων, καλουπιών ή μήτρες προσφέρει δυνατότητες για σημαντικές μειώσεις κόστους και χρόνου παράδοσης, αυξημένη απόδοση, βελτιωμένη διάρκεια ζωής εξαρτημάτων και μείωση του κόστους αποθέματος και υλικοτεχνικής υποστήριξης από τοπική, κατ' απαίτηση κατασκευή. Κατοχυρώθηκε για πρώτη φορά με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1920, το WAAM είναι πιθανώς η παλαιότερη, εξωτερικά απλούστερη, αλλά λιγότερο πολυσυζητημένη από το φάσμα των διαδικασιών προσθετικής κατασκευής (κοινώς γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση). Χρησιμοποιώντας το σύρμα ως πρώτη ύλη, η βασική διαδικασία έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση τοπικών επισκευών σε κατεστραμμένα ή φθαρμένα εξαρτήματα και για την κατασκευή στρογγυλών εξαρτημάτων και δοχείων πίεσης για δεκαετίες. Ωστόσο, η έλευση του υψηλής ποιότητας λογισμικού σχεδιασμού και κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD/CAM) κατέστησε την AM γενικά δυνατή, με το WAAM, ειδικότερα, να αποτελεί τομέα σημαντικής ανάπτυξης (Gibson, et al., 2021).

Το WAAM χρησιμοποιεί την τεχνική συγκόλλησης τόξου ώστε να εκμεταλλευτεί την παραγόμενη θερμότητα του τόξου συγκόλλησης για να παρέχει μια πηγή θερμότητας κατά την διάρκεια της εργασίας και να λιώνει το μεταλλικό σύρμα που παρέχεται από την μηχανή συγκόλλησης, ενώ συχνά μαζί με την τροφοδοσία του σύρματος μπορεί να παρέχεται και κάποιο προστατευτικό αέριο όπως αργό (Ar) η ήλιο (He) για την προστασία του τόξου με την ροή αυτού να κυμαίνεται από 0,71 έως 0,99 m³/h. Ένας ρομποτικός βραχίονας ή μια εργαλειομηχανή υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιείται ως

μηχανισμός κίνησης του πυρσού συγκόλλησης ο οποίος ακολουθεί προκαθορισμένη διαδρομή έτσι ώστε να διαμορφώσει το επιθυμητό εξάρτημα στρώμα – στρώμα (Ying, et al., 2021). Ένας υπολογιστής χρησιμεύει ως κύριος έλεγχος για τον συντονισμό του ενεργοποιητή, της μηχανής συγκόλλησης, και διάφοροι αισθητήρες εξυπηρετούν την εκτέλεση των εργασιών κατασκευής. Οι διεργασίες WAAM μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστατευτικό αέριο (GMAW), συγκόλληση τόξου με μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου με χρήση προστατευτικού αερίου (GTAW) και συγκόλληση τόξου πλάσματος (PAW).

Το WAAM μπορεί να εφαρμοστεί σε μια σειρά πεδίων, από τη ναυτιλία έως την αεροδιαστημική, τη χημική βιομηχανία, την ενέργεια, την αυτοκινητοβιομηχανία, την υψηλή τεχνολογία, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής όπως η χύτευση και η σφυρηλάτηση μετάλλων, το WAAM και άλλες διαδικασίες κατασκευής πρόσθετων υπάρχουν για σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Το WAAM ξεπερνά τις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής και άλλες τεχνικές DED με διάφορους τρόπους καθώς το μέγιστο εκτυπώσιμο μέγεθος



Εικόνα 2.9 Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος WAAM υιοθετημένη από (He, et al., 2023).

εξαρτάται κυρίως από την απόσταση του ρομπότ συγκόλλησης που χρησιμοποιείται και ουσιαστικά με τον κατάλληλο εξοπλισμό δεν έχει περισπασμό στο μέγεθος, έχει

χαμηλό κόστος εκκίνησης, έχει μεγάλη διαθεσιμότητα υλικού, είναι κατάλληλη μέθοδος για υβριδική κατασκευή, μειώνει τα απορρίμματα σε συμβατικό ποσοστό το οποίο μπορεί να φτάσει και το 50% και κατασκευάζει εξαρτήματα των οποίων οι μηχανικές ιδιότητες ξεπερνούν ακόμα και της συμβατικές μεθόδους παραγωγής (Treutler and Wesling, 2021).

Υπάρχουν πολλά εμπόδια στην πρόοδο της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής WAAM, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγικότητας, της γεωμετρικής ακρίβειας, της διασφάλισης ποιότητας και της ύπαρξης εικονικού συστήματος. Η Παραγωγικότητα είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα του WAAM σε σύγκριση με άλλα μεταλλικές τεχνικές AM (Additive Manufacturing) με αρκετά υψηλό ποσοστό εναπόθεσης υλικού. Για την κατασκευή εξαρτημάτων με απλά, κανονικές και επαναλαμβανόμενες δομές, μπορεί να επιτύχει η διαδικασία WAAM ποσοστό εναπόθεσης 3-5 kg/h για φερριτικά υλικά και 1-2 kg/h για κράματα αλουμινίου. Ωστόσο, αυτό το ιδανικό ποσοστό εναπόθεσης δεν μπορεί να επιτευχθεί σε πολλές πρακτικές καταστάσεις για τεμάχια εργασίας με σύνθετες ή ακανόνιστες γεωμετρίες και μοναδικά χαρακτηριστικά λόγω της έλλειψης καθολικής στρατηγικής προγραμματισμού που μπορεί να δημιουργήσει διαδρομές εναπόθεσης αλλά και λόγω έλλειψης λογισμικού το οποίο έχει την ικανότητα επικοινωνεί σε πραγματικό χρόνο με τους χειριστές δίνοντας τους έτσι πληροφορίες σχετικά με τα θερμομηχανικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την κατασκευή.

Η γεωμετρική ακρίβεια της διαδικασίας WAAM επηρεάζεται κυρίως από δύο πτυχές αρχικά η ίδια η διαδικασία συγκόλλησης τόξου περιορίζει το επίπεδο επιτεύξιμης ακρίβειας στην περιοχή χιλιοστόμετρου καθώς το σύρμα τροφοδοσίας είναι συνήθως 0,9 ή 1,2 mm και έπειτα η παραμόρφωση λόγω της συσσώρευσης θερμότητας είναι ένας άλλος κύριος παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει αστοχίες. Η συσσώρευση θερμότητας μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία παραμένων τάσεων με αποτέλεσμα αυτές να δημιουργούν παραμορφώσεις στο υπόστρωμα και στο τεμάχιο εργασίας, οι οποίες θα μπορούσαν φέρνουν δυσκολίες για την ακρίβεια των επόμενων στρωμάτων που εναποτίθενται προκαλώντας μετατοπίσεις. Η εφαρμογή του WAAM στην αεροδιαστημική και της ναυτιλιακές βιομηχανίες απαιτούν κατασκευασμένα μεταλλικά δομικά και λειτουργικά εξαρτήματα να ακολουθούν αυστηρά πρότυπα ποιότητας, καθώς η κακή η ποιότητα ή τα ελαττώματα του προϊόντος μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικά αποτελέσματα. Λόγω της φύσης της διαδικασίας προσθετικής κατασκευής (που περιλαμβάνει μια περίπλοκη μεταφορά θερμότητας και

υλικού διαδικασία που διαρκεί ώρες ή και μέρες για να ολοκληρωθεί), διάφορα ελαττώματα όπως κενά, πορώδες και ρωγμές μπορεί να εμφανιστούν. Πολλά από αυτά τα ελαττώματα σχετίζονται με τα σήματα διεργασίας, όπως τα ηλεκτρικά, μηχανικά και φυσικά τα χημικά. Έτσι, κάθε τι σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση και έλεγχος, ανίχνευση ελαττωμάτων και αποκατάσταση είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας. Η ύπαρξη εικονικών συστημάτων αναφέρεται στην έννοια καθιέρωσης ενός εικονικού περιβάλλοντος παραγωγής που μπορεί να αναπαραστήσει σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής, λειτουργίες του υλικού και ανατροφοδότηση σήματος. Το εικονικό σύστημα επιτρέπει στους ανθρώπινους χειριστές να αλληλοεπιδρούν απομακρυσμένα και να μπορούν να ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο μέσω cyber-physical συστήματος με την χρήση πολλαπλών αισθητήρων. Όμως έως σήμερα τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί δεν είναι δυνατόν να προσφέρουν όλα τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε (He, et al., 2023).

2.3 Παράμετροι τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης

Αυτές οι βασικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που αναλύσαμε και στην προηγούμενη ενότητα εκτενέστερα έχουν φέρει επανάσταση στις διαδικασίες κατασκευής και δημιουργίας πρωτοτύπων. Κάθε τεχνολογία έχει τα μοναδικά πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της και η επιλογή της εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιθυμητή ανάλυση, οι ιδιότητες του υλικού, η ταχύτητα και οι απαιτήσεις εφαρμογής. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να προοδεύει, νέες παραλλαγές και υβριδικές προσεγγίσεις αναπτύσσονται για την περαιτέρω ενίσχυση των δυνατοτήτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Η σημασία της επιλογής της σωστής τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί ίσως το σημαντικότερο βήμα για την κατασκευή ενός 3D αντικειμένου αυτή η επιλογή πραγματοποιείται με την μελέτη και το προσδιορισμό των εξής παραγόντων :

Ακρίβεια και ανάλυση: Οι διαφορετικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρουν διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας και ανάλυσης. Όταν απαιτούνται περίπλοκες λεπτομέρειες ή υψηλή ακρίβεια, είναι πιο κατάλληλες οι τεχνολογίες όπως η Στερεολιθογραφία (SLA) ή η Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (DLP) που παρέχουν λεπτή ανάλυση. Από την άλλη πλευρά, εάν η εφαρμογή δεν απαιτεί υψηλή ακρίβεια,

τεχνολογίες όπως το Fused Deposition Modeling (FDM) μπορεί να είναι μια οικονομικά αποδοτική επιλογή.

Συμβατότητα υλικού: Κάθε τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις υλικού. Ορισμένες τεχνολογίες, όπως το Selective Laser Sintering (SLS), υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά. Είναι σημαντικό να επιλέξετε μια τεχνολογία που να είναι συμβατή με τις επιθυμητές ιδιότητες υλικού, όπως αντοχή, ευκαμψία, αντίσταση στη θερμότητα ή αγωγιμότητα.

Όγκος και Ταχύτητα Παραγωγής: Ανάλογα με τον επιθυμητό όγκο παραγωγής και τον χρόνο διεκπεραίωσης, διαφορετικές τεχνολογίες υπερέχουν σε διαφορετικές πτυχές. Το FDM είναι γνωστό για τη γρήγορη ταχύτητα εκτύπωσης του, καθιστώντας το κατάλληλο για γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων και παραγωγή χαμηλού όγκου. Από την άλλη πλευρά, τεχνολογίες όπως το SLS ή η Στερεολιθογραφία προσφέρουν ταχύτερους χρόνους παραγωγής σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής και είναι ιδανικές για μεσαίους έως υψηλούς όγκους παραγωγής.

Θέματα κόστους: Η επιλογή της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το συνολικό κόστος του έργου. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το κόστος εξοπλισμού, τα έξοδα υλικών, οι απαιτήσεις μετά την επεξεργασία και η συντήρηση. Το FDM είναι γενικά πιο αποδοτικό λόγω του χαμηλότερου κόστους εξοπλισμού και υλικών του, ενώ τεχνολογίες όπως το SLA ή το SLS μπορεί να περιλαμβάνουν υψηλότερες αρχικές επενδύσεις, αλλά προσφέρουν βελτιωμένες δυνατότητες.

Γεωμετρική πολυπλοκότητα: Ορισμένες εφαρμογές ενδέχεται να απαιτούν την παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών, συμπεριλαμβανομένων των προεξοχών, των εσωτερικών κοιλοτήτων ή των περίπλοκων σχεδίων. Τεχνολογίες όπως το SLA ή το DLP διαπρέπουν στη δημιουργία περίπλοκων λεπτομερειών και πολύπλοκων σχημάτων με λείες επιφάνειες. Το SLS είναι επίσης κατάλληλο για πολύπλοκες γεωμετρίες, καθώς χρησιμοποιεί υλικά σε σκόνη που μπορούν να υποστηρίξουν περίπλοκες δομές κατά τη διαδικασία εκτύπωσης.

Απαιτήσεις ειδικές για τον κλάδο: Διαφορετικοί κλάδοι έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις και προδιαγραφές που ορίζονται από μια βάση προτύπων που εξελίσσονται συνεχώς. Για παράδειγμα, στον ιατρικό τομέα, οι τεχνολογίες που μπορούν να παράγουν βιοσυμβατά ή αποστειρώσιμα μέρη είναι απαραίτητες. Οι αεροδιαστημικές

βιομηχανίες ενδέχεται να απαιτούν τη χρήση ελαφρών υλικών και αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες. Η κατανόηση των ειδικών απαιτήσεων του κλάδου θα βοηθήσει στην επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Η επιλογή της σωστής τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση τις απαιτήσεις είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση επιτυχημένων αποτελεσμάτων, οικονομικής αποδοτικότητας και επίτευξης των στόχων του έργου. Είναι σημαντικό να αξιολογηθούν παράγοντες όπως η ακρίβεια, η συμβατότητα υλικών, ο όγκος παραγωγής, η ταχύτητα, το κόστος, η γεωμετρική πολυπλοκότητα και οι ειδικές απαιτήσεις της βιομηχανίας για να ληφθεί μια τεκμηριωμένη απόφαση και να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά οι δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Κεφάλαιο 3

Ανάπτυξη μοντέλου

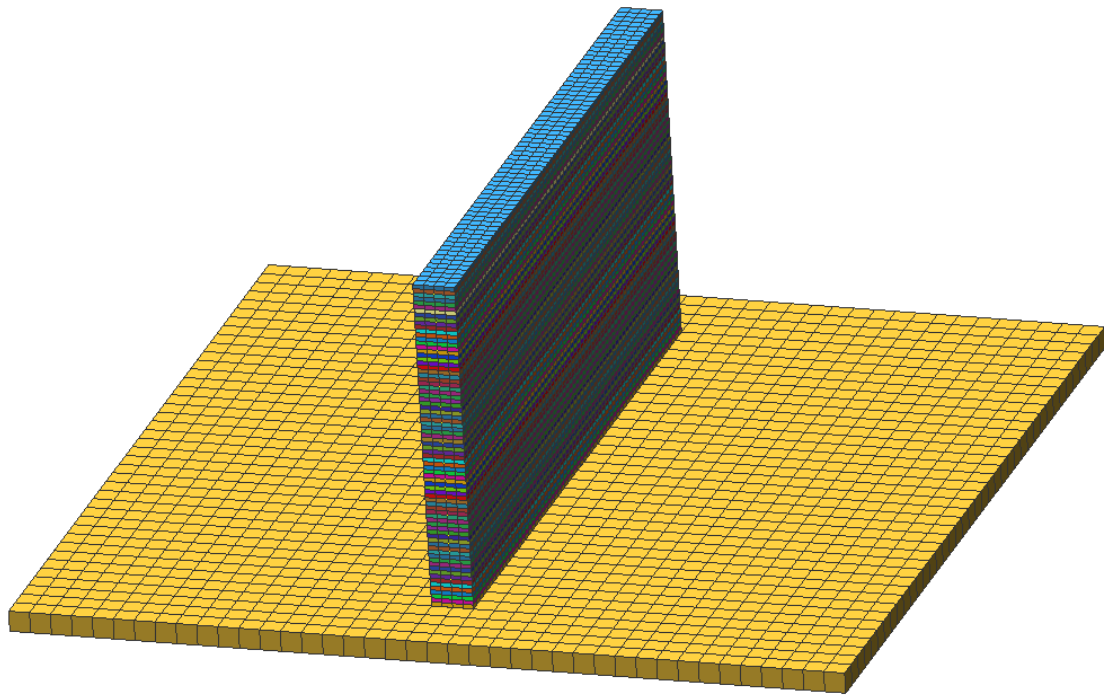
3.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά μοντέλα προσομοίωσης του GMAW στην διαδικασία WAAM που είναι χρήσιμη για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι παράμετροι διεργασίας επηρεάζουν ορισμένες πτυχές της ποιότητας των εξαρτημάτων WAAM. Για παράδειγμα σχεδιάζοντας το ίχνος του τόξου καθώς το πλάτος και το ύψος της ραφής συγκόλλησης βοηθάνε στην απόκτηση ποιοτικών εξαρτημάτων χωρίς ελαττώματα και ελέγχοντας τη διαμόρφωση της μικροδομικής φάσης κατά τη συγκόλληση πολλαπλών στρώσεων. Η ψύξη επηρεάζει όλες αυτές τις πτυχές που αναφέραμε συνήθως χρησιμοποιείται ενός αλγόριθμος δοκιμής για τη λήψη παραμέτρων για τον προσδιορισμό της εκτύπωσης. Της τελευταίες δεκαετίες οι ερευνητές έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένα αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση τις μεταφοράς θερμότητας, της ροής ρευστού και μετασχηματισμού μικροδομής στην διαδικασία WAAM. Αν και αυτά τα μοντέλα προσομοιώνουν τη διαδικασία WAAM με αρκετά μεγάλη ακρίβεια και προβλέπουν τα τελικά αποτελέσματα περιορίζονται σε σχετικά μικρές πειραματικές διατάξεις. Πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν γίνει πάνω στην προσομοίωση των συγκολλήσεων και της βελτιστοποιήσεις των μεταβλητών τους. Ο Roy εφάρμοσε τα μοντέλα για να υπολογίσει πολλαπλά σύνολα παραμέτρων συγκόλλησης τα οποία περιέχουν τα χαρακτηριστικά συγκόλλησης όπως η γεωμετρία, ρυθμός ψύξης, θερμοκρασία αιχμής και άλλες μεταβλητές. Πρόσφατα ο αλγόριθμος τεχνητού νευρωτικού δικτύου εισήχθη σε αυτό το πεδίο και πλέον χρησιμοποιείται ευρέως για πολλαπλές λειτουργίες και βελτιστοποίηση μεταβλητών σε πολλά διαφορετικά πεδία (Ling, et al., 2023). Σε αυτό το έγγραφο κατασκευάζεται μια κλιμακούμενη πειραματική πλάκα με την χρήση της τεχνικής WAAM από την οποία λάβαμε γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ραφής για την πραγματοποίηση αριθμητικών προσημειώσεων και σύγκριση αυτών με τα εξαγόμενα πειραματικά δεδομένα εκτιμώντας εάν είναι εφικτή η αντικατάσταση των φυσικών πειραματικών διαδικασιών τριδιάστατης εκτύπωσης με την χρήση της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

3.2 Δημιουργία μοντέλου

3.2.1 Γεωμετρία και πλέγμα

Η διαδικασία εναπόθεσης προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση προκειμένου να ληφθεί το πλήρες πεδίο θερμοκρασίας του εξαρτήματος. Αρχικά λήφθηκε η γεωμετρία της ραφής πειραματικά αφού εκτελέστηκε δοκιμαστική ραφή με ακριβώς της ίδιες παραμέτρους λειτουργίας με αυτές που θέσαμε και κατά την κατασκευή της κλιμακούμενης πειραματικής πλάκας ώστε να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε το κατάλληλο πλέγμα για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Σύμφωνα με αυτή την γεωμετρία δομής προσθετικής κατασκευής την οποία και μετρήσαμε κατά την δημιουργία των στρώσεων πειραματικά κατασκευάσαμε μέσω του προγράμματος CAD το πλέγμα το οποίο αποτελείται από σειρές στρωμάτων (layers) τα οποία ήταν σε αριθμό 80 και σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου ακριβώς όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.1**. Αυτός ο αριθμός των στρωμάτων που δημιουργήσαμε ήταν και ο πραγματικός αριθμός των εναποθέσεων που εκτελέσαμε κατά την διάρκεια του πειράματος. Έπειτα τα στρωματά χωρίστηκαν σε μικρότερα επιμέρους κυβάκια (elements) για το σχεδιασμό του πλέγματος των οποίων οι διαστάσεις είναι $2,5 \times 2,5 \times 1$ mm και ο αριθμός των στοιχείων αυτών ανέρχεται σε 20.480 ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων είναι ίσος με 52.000. Με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε πραγματοποιήθηκε και ο σχεδιασμός του πλέγματος των δυο χαλύβδινων πλακών που χρησιμοποιήσαμε πειραματικά οι οποίες αποτελούνται από στοιχεία διαστάσεων $5 \times 5 \times 5$ mm. Η πλάκα στην οποία και έγινε η εναπόθεση αποτελείται από 1600 στοιχεία και 3362 κόμβους ενώ αντίστοιχα η πλάκα στήριξης απαρτίζεται από 5120 στοιχεία και 6519 κόμβους. Έγινε χρήση κατά τον σχεδιασμό του πλέγματος των πλακών στοιχείων μεγαλύτερων διαστάσεων διότι τα θερμικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα σε αυτές της περιοχές είναι πολύ μικρότερα όμως εξίσου σημαντικά με αποτέλεσμα αυτή να είναι η ιδανική πυκνότητα χωρίς να καταναλώνεται πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύς χωρίς να υπάρχει η πραγματική ανάγκη λαμβάνοντας έτσι όλες της πληροφορίες για την μεταβολή του θερμομηχανικών φαινομένων που πραγματοποιούνται.



Εικόνα 3.1 Δημιουργία πλέγματος των αντίστοιχων στοιχείων για την ανάγκη της προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως για την ολοκληρωμένη ανάλυση είναι απαραίτητο να ορισθεί η κατάλληλη πυκνότητα του πλέγματος (mesh). Η πυκνότητα στην οποία καταλήξαμε και αναφέραμε παραπάνω τόσο για το δείγμα όσο και για της πλάκες είναι η μέγιστη δυνατή έτσι ώστε να λαμβάνουμε όλες της πληροφορίες στο καλύτερο δυνατό επίπεδο χρησιμοποιώντας από την άλλη την μικρότερη δυνατή υπολογιστική ισχύ. Έπειτα δεδομένου ότι αποτυπώσαμε την δημιουργία του δείγματος στο μοντέλο μας στις πραγματικές του διαστάσεις αλλά όχι όμως στην πραγματική του γεωμετρία όπως αναφέραμε και προηγούμενος. Αναπαραστήσαμε την μορφή της ραφής συγκόλλησης σαν ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο βασισμένη κατά (Prajadhiana, et al., 2023) οι οποίοι εκτέλεσαν σειρά από πειράματα καταλήγοντας πως αυτή η προσέγγιση αυτή της γεωμετρία αποτελεί και την βέλτιστη λύση ούτως ώστε να λαμβάνουμε όλες της πληροφορίες που θέλουμε να εξάγουμε από το μοντέλο μας χωρίς αυτές να έχουν αλλοιωθεί από την προσέγγιση της γεωμετρίας την οποία πραγματοποιήσαμε μειώνοντας έτσι εσθίτα το χρόνο υλοποίησης και την υπολογιστική ισχύ που απαιτεί το μοντέλο.

3.2.2 Θερμική ανάλυση

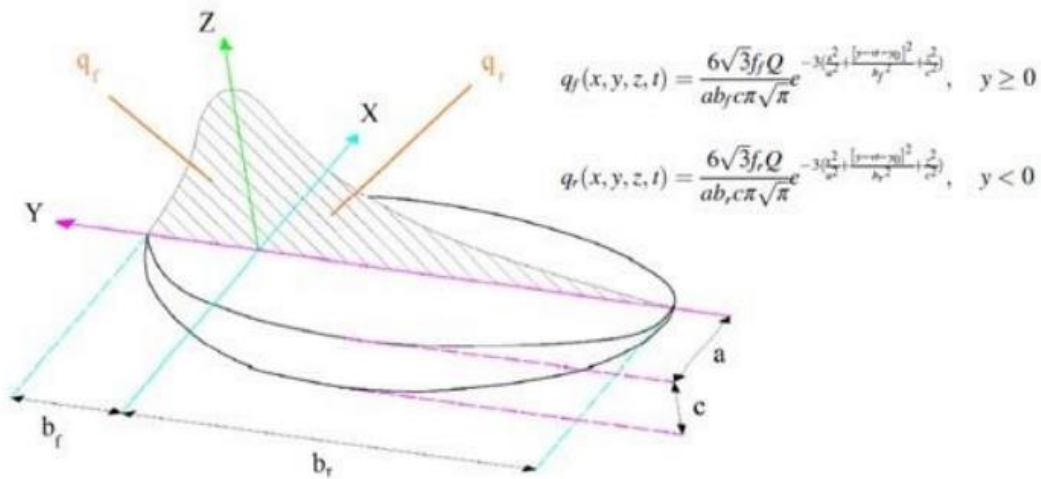
Η θερμική ανάλυση είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών φαινομένων κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Για την προσομοίωση μιας διεργασίας προσθετικής κατασκευής με την χρήση της τεχνικής WAAM είναι απαραίτητο η αντικατάσταση των πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που δημιουργούνται από την θερμότητα που παράγεται από το τόξο της συγκόλλησης με ένα μαθηματικό μοντέλο μιας πηγής θερμότητας με την κατάλληλη κατανομή ισχύος για να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα. Όπως γίνεται σε όλες τις άλλες παρόμοιες διαδικασίες η πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του λουτρού συγκόλλησης με την τήξη του μετάλλου χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που παράγεται από το βολταϊκό τόξο. Αυτά τα φαινόμενα περιγράφονται ως συναρτήσεις του χρόνου (t) και των χωρικών συντεταγμένων (x, y, z) και περιγράφονται από την εξίσωση μη γραμμικής μετάδοσης θερμότητας (βλ. **Εξίσωση 3.1**).

$$\text{Εξίσωση 3.1} \quad Cp \frac{\partial T}{\partial x^2} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q$$

Στην Εξίσωση 4.1, οι μεταβλητές C , ρ , T , t , Q και κ περιγράφουν την θερμοχωρητικότητα σε $J/kg^\circ C$, την πυκνότητα σε kg/m^3 , την θερμοκρασία σε $^\circ C$, τον χρόνο σε sec , την ροή θερμότητας σε W/m^3 και, τέλος, την θερμική αγωγιμότητα σε $W/m^\circ C$.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούμε το διπλό ελλειψοειδές μοντέλο που προτάθηκε από τους (Goldak, Chakravarti and Bibby, 1984) στο οποίο ένα καρτεσιανό σύστημα (x', y', z') ορίζει την κινούμενη διανομή ισχύος χωριστά σε δυο περιοχές. Η μέθοδος αυτή για το μοντέλο είναι μια από της πιο αξιόπιστες λύσεις που επιχειρούν να απλοποιήσουν ένα σύνθετο μαθηματικό μοντέλο μιας πηγής θερμότητας με κατάλληλη κατανομή ισχύος για να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα (Oyama, et al., 2019).

Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.2**, όπου φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το ηλεκτρικό τόξο στο μέταλλο βάσης και στο υλικό πλήρωσης.



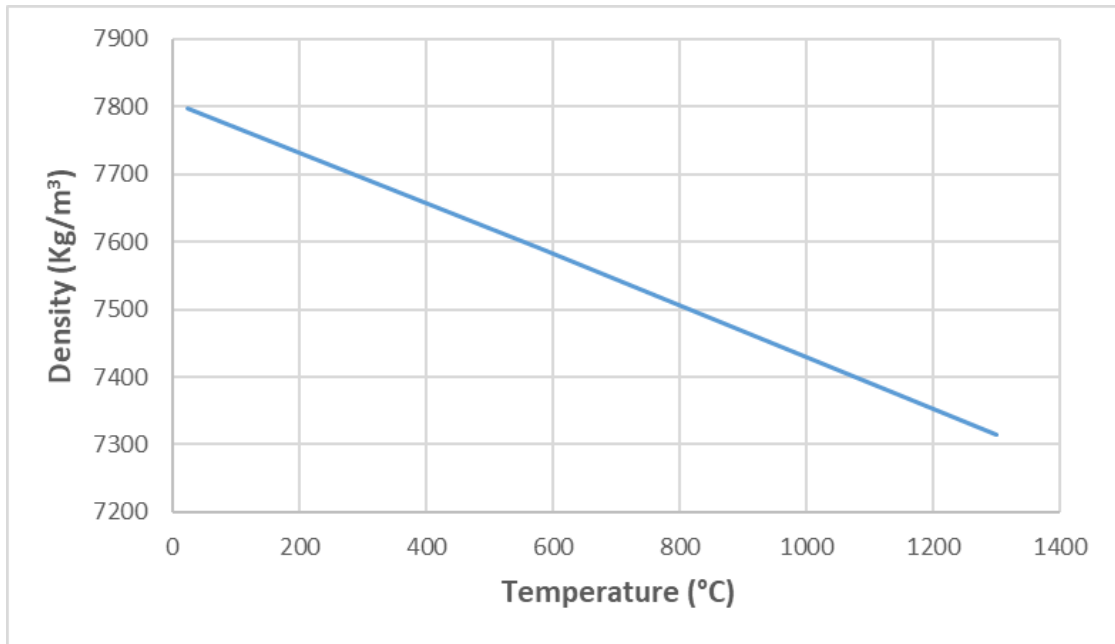
Εικόνα 3.2 Σχήμα του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου υιοθετημένη από (Ghafouri, et al., 2022)

Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.2** το μαθηματικό μοντέλο ορίζει δύο κατανομές ροής θερμότητας, μία για το εμπρός μισό τμήμα και μία για το πίσω, όπως περιγράφονται και από τις εξισώσεις q_f και q_r , αντίστοιχα, του σχήματος. Ως προς τις εξισώσεις, η μεταβλητή Q περιγράφει την ενέργεια του ηλεκτρικού τόξου και υπολογίζεται ως το γινόμενο της τάσης V , της έντασης ρεύματος I και του συντελεστή απόδοσης της μεθόδου συγκόλλησης. Έπειτα, οι μεταβλητές a , b_f , b_r και c αποτελούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη – διαστάσεις της θερμικής πηγής. Οι αδιάστατες μεταβλητές f_f και f_r περιγράφουν το μέρος της ενέργειας που αποδίδεται στο εμπρός και πίσω τμήμα της θερμικής πηγής, αντίστοιχα. Οι μεταβλητές f_f και f_r συνδέονται μεταξύ τους με την παρακάτω σχέση (**Εξίσωση 3.2**):

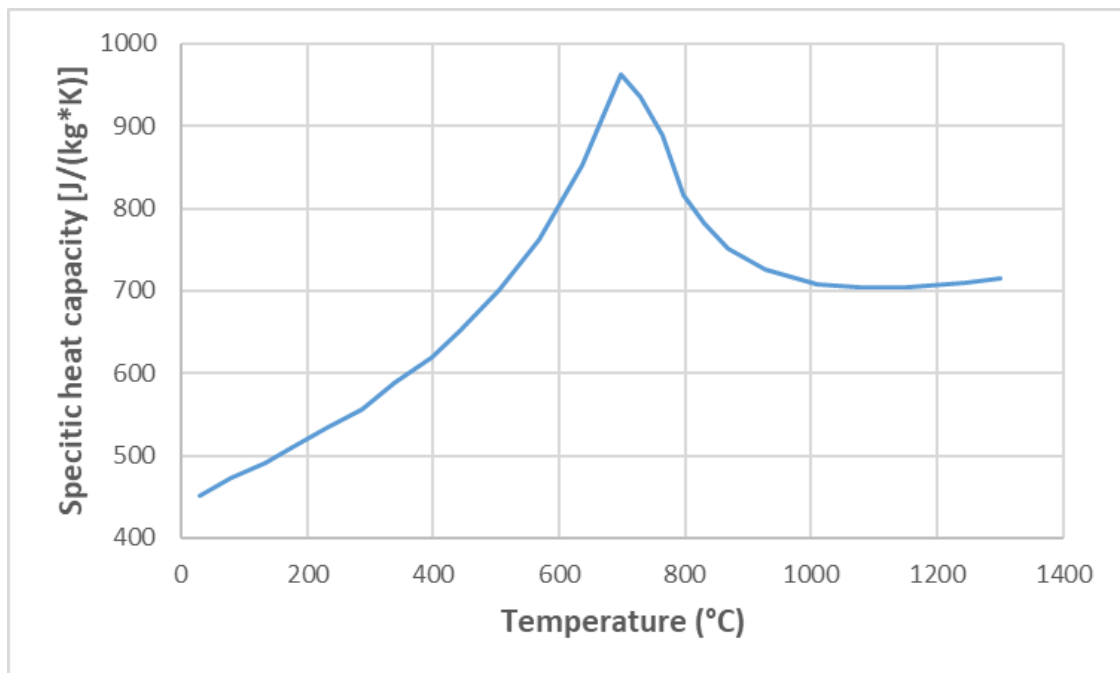
Εξίσωση 3.2
$$f_r + f_f = 2$$

Επιστρέφοντας στην **Εξίσωση 3.1**, φαίνεται ότι η πυκνότητα (density), η θερμοχωρητικότητα (heat capacity) και η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity), δηλαδή οι θερμικές ιδιότητες του υλικού, είναι απαραίτητες για την θερμική ανάλυση. Για το παραγεμιστό υλικό πλήρωσης με εμπορική ονομασία OA 4923, οι συγκεκριμένες ιδιότητες παρουσιάζονται στις **Εικόνες 3.3**, **3.4** και **3.5**. Όπως φαίνεται,

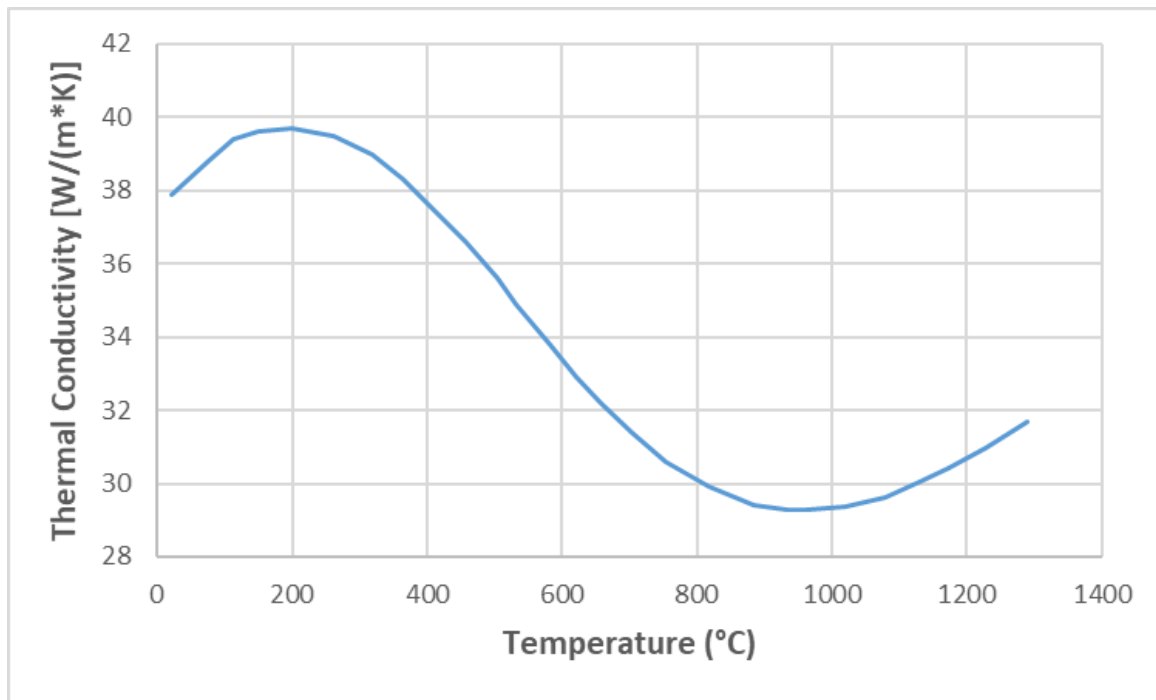
οι συγκεκριμένες ιδιότητες μεταβάλλονται σημαντικά, αλλά και ακανόνιστα, συναρτήσει της θερμοκρασίας (Σκάρως, 2022).



Εικόνα 3.3 Μεταβολή πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης



Εικόνα 3.4 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

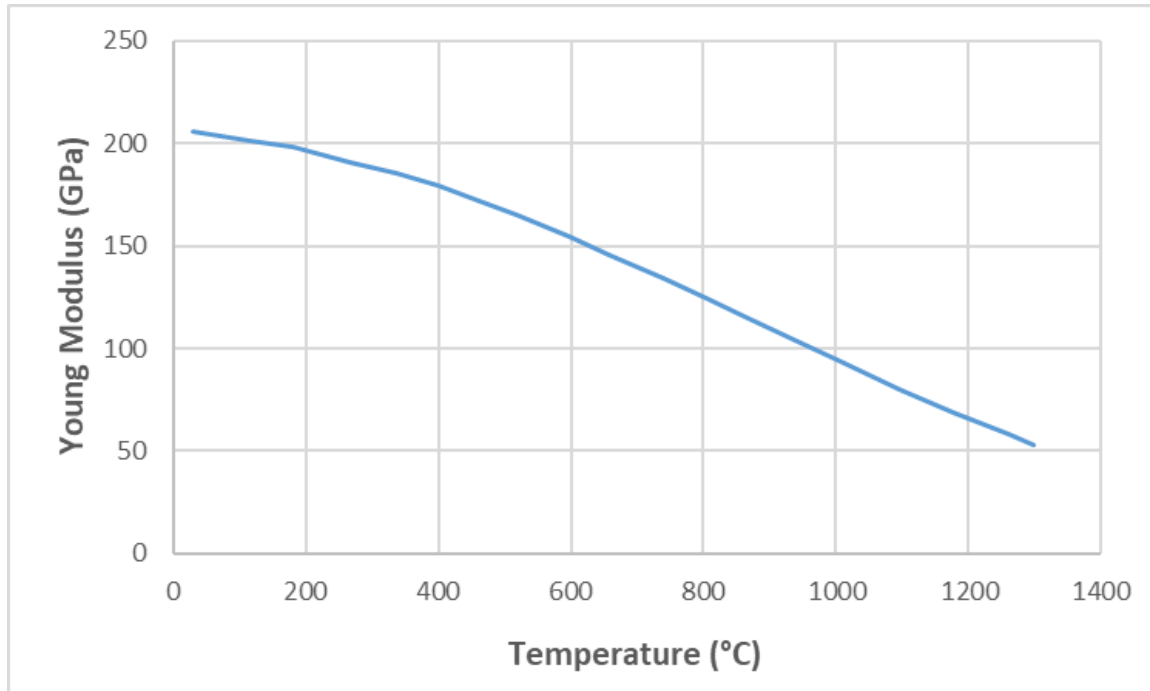


Εικόνα 3.5 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

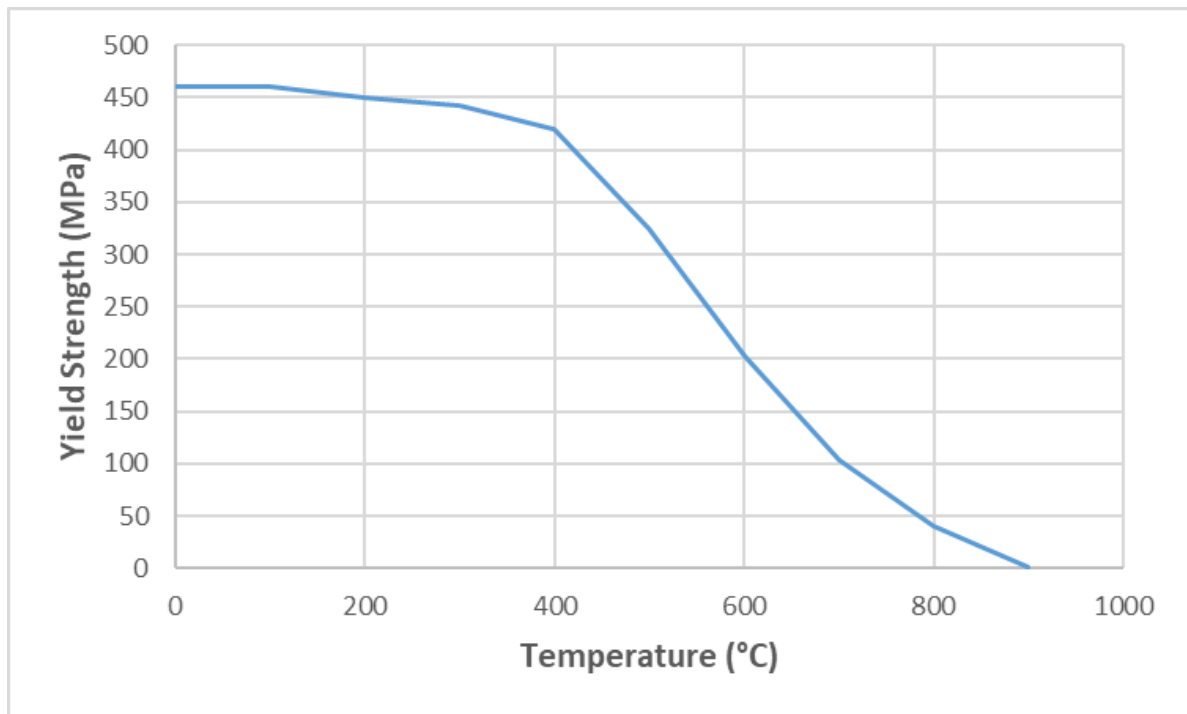
Στο λογισμικό FEM, η προσομοίωση μοντελοποιείται με βάση το διπλό ελλειψοειδές μοντέλο που εξηγήσαμε και αναλυτικά προηγούμενος. Η διαδικασία της εναπόθεσης των στρωμάτων αντιπροσωπεύεται στο πρόγραμμα από ένα ρομπότ. Μια ενιαία διαδικασία μπορεί να περιλαμβάνει πολλά ρομπότ ανάλογα με τις ανάγκες της δοκιμής. Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα ρομπότ για της διαδοχικές εναποθέσεις υλικού. Το ρομπότ αυτό περιέχει τις διαδρομές συγκόλλησης, τη διαμόρφωση τροχιάς, τις ακολουθίες καθώς και την γεωμετρία του πλέγματος. Τα αρχεία τροχιάς δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια της Python, η οποία περιέχει τις συντεταγμένες μέσω των οποίων πρέπει να κινείται κάθε φορά η πηγή θερμότητας ενώ οι γωνίες του πυρσού συγκόλλησης προσαρμόστηκαν στις ιδιότητες του ρομπότ. Κάθε ρομπότ είναι αναγκαίο να περιέχει διαδρομές συγκόλλησης, αρχικές ρυθμίσεις θερμοκρασίας και υλικό πλήρωσης (Amal, Panicker and Senthilkumar, 2019). Για το λόγο αυτό ως υλικό πλήρωσης θέσαμε το παραγεμιστό συρμα με εμπορική ονομασία OA 4923 το οποίο ήταν και αυτό που εκτελέσαμε την κατασκευή του δείγματος του οποίου οι ιδιότητες τόσο θερμικές όσο και μηχανικές παρουσιάζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας στα αντίστοιχα διαγράμματα στις υποενότητες 3.2.2 και 3.2.3 αντίστοιχα. Έπειτα ως υλικό για της χαλύβδινες πλάκες ορίσαμε το S235 υλικό από το οποίο και αποτελούνται.

3.2.3 Μηχανική ανάλυση

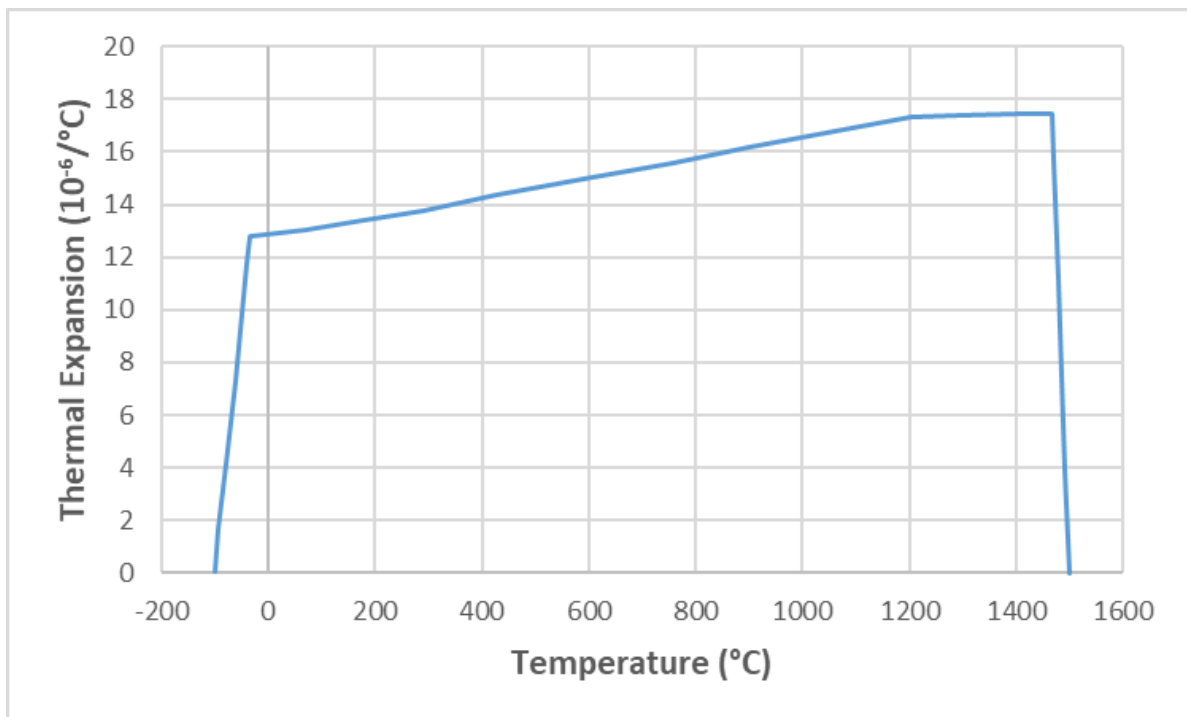
Αντίστοιχα με την θερμική ανάλυση, εξίσου σημαντική είναι και η μηχανική ανάλυση. Για την επίτευξη αυτής είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν οι μηχανικές ιδιότητες του παραγεμιστού υλικού πλήρωσης που εξαρτώνται άμεσα από την θερμοκρασία καθώς επίσης και το μοντέλο που χρησιμοποιείται, το οποίο ακολουθεί με ακρίβεια το αντίστοιχο πειραματικό. Απαραίτητες ιδιότητες για την μηχανική ανάλυση είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young (Young modulus) καθώς επίσης και ο συντελεστής θερμικής διαστολής (thermal expansion) (Σκάρος, 2022). Οι συγκεκριμένες ιδιότητες παρουσιάζονται στις **Εικόνα 3.6** και **Εικόνα 3.8**. Όπως φαίνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας το υλικό πλήρωσης χάνει το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής του, δηλαδή μειώνεται η δυσθραυστότητα του ενώ ταυτόχρονα γίνεται σημαντικά πιο όλκιμο. Παράλληλα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας φαίνεται να παρουσιάζει αύξηση από τους -100°C έως τους 1500°C ενώ μετά τους $\sim 1500^{\circ}\text{C}$, μειώνεται κατακόρυφα γεγονός που οφείλεται στην μετάβαση του υλικού πλήρωσης από στερεό σε ρευστό.



Εικόνα 3.6 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

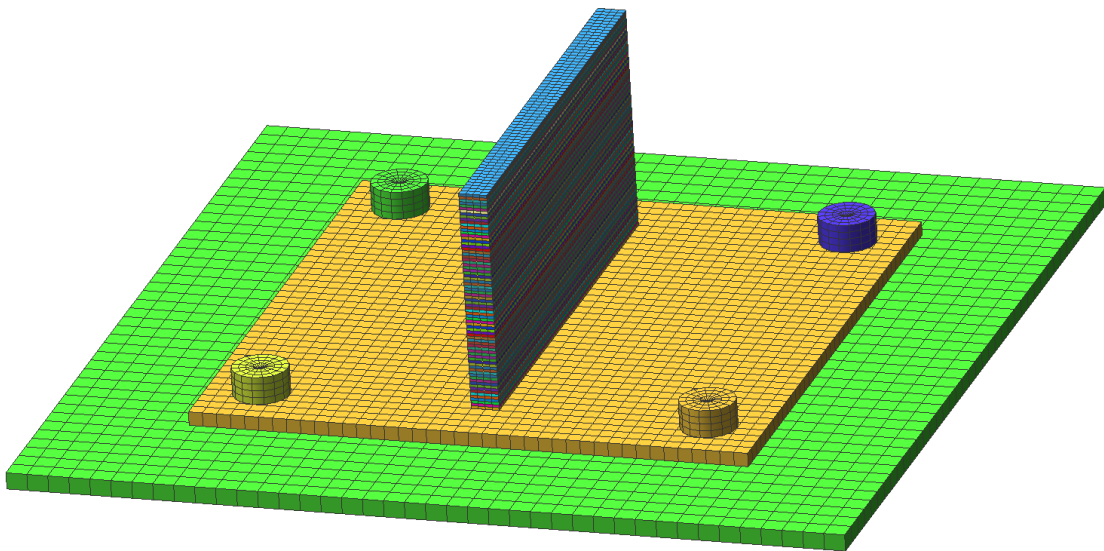


Εικόνα 3.7 Μεταβολή ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης



Εικόνα 3.8 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας υλικού πλήρωσης

Αφού έχουμε εισάγει όλες της απαραίτητες παραμέτρους στο λογισμικό FEM και μελετήσει της ιδιότητες του υλικού τοποθετήσαμε στο πρόγραμμα της προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων της γεωμετρίας των πλεγμάτων τόσο των εξαρτημάτων (πλάκες) όσο και των εναποθέσεων του δείγματος με τρόπο τέτοιο όπως ακριβώς πραγματοποιήθηκε και στην πειραματική δοκιμή. Έπειτα εφαρμόσαμε της κατάλληλες οριακές συνθήκες (πακτώσεις) στα αντίστοιχα σημεία στα οποία πειραματικά τοποθετήθηκαν οι σφικτήρες συγκράτησης φυσικά με το αντίστοιχο φορτίο όπως ακριβώς φαίνεται στην **Εικόνα 3.9** προκειμένου να υπάρξει πλήρης ταύτιση της εικονικής εκτύπωσης με αυτή που πραγματοποιήθηκε πειραματικά ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα από το θερμομηχανικό μοντέλο να μπορέσουν να είναι συγκρίσιμα με τα ανάλογα πειραματικά .



Εικόνα 3.9 Κατασκευή μοντέλου με εφαρμοσμένες οριακές συνθήκες

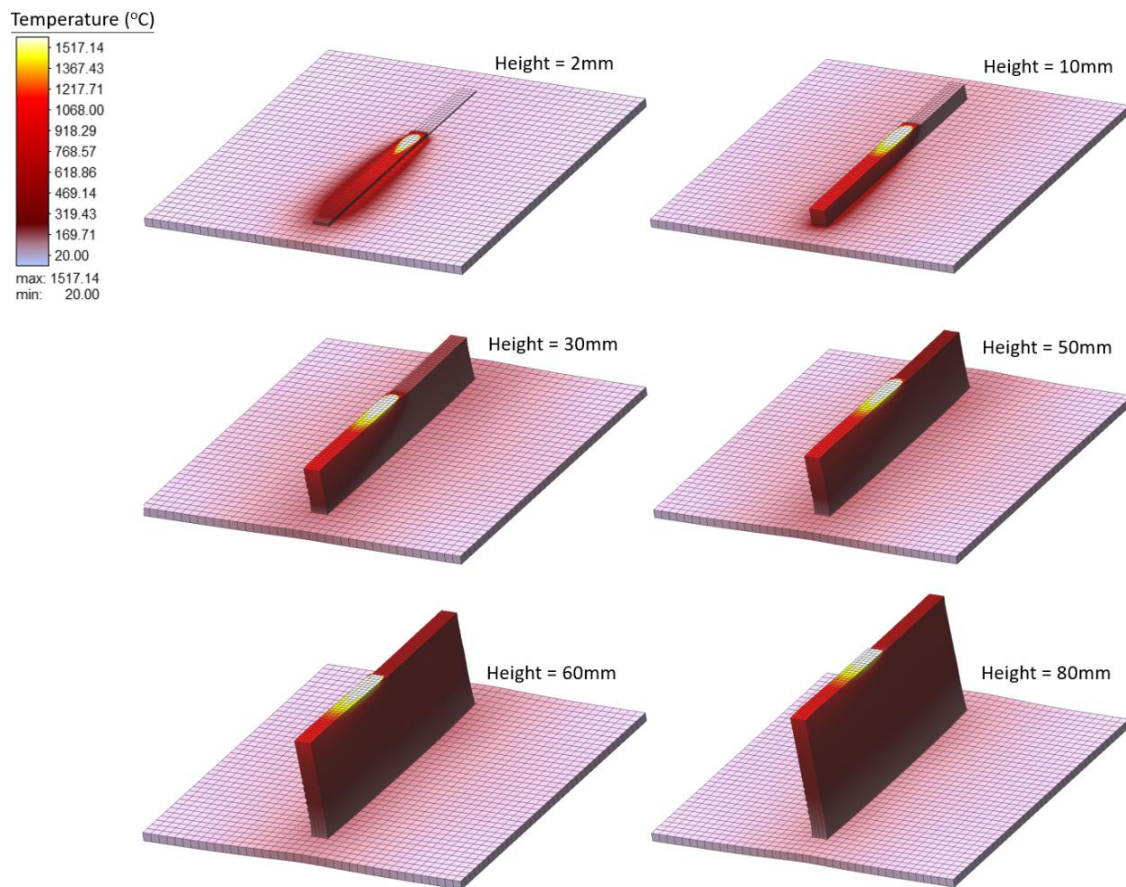
3.3 Διαδικασία προσομοίωσης

3.3.1 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

Αυτή η μελέτη ονομάζεται και επίσης Forward Modeling. Στόχος της προσομοίωσης είναι η χρήση δεδομένων και αποτελεσμάτων από την εκτέλεση του εικονικού πειράματος για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων για τη βελτιστοποίηση της τεχνικής WAAM καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα αντίστοιχα που λάβαμε από την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Η στρατηγική της εικονικής εκτύπωσης περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους, ρυθμίσεις ακριβώς όπως εξηγήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Η ανάλυση μεταφοράς θερμότητας διεξήχθη σε πρόγραμμα CAE προκειμένου να ληφθούν δεδομένα του ιστορικού θερμοκρασίας για περαιτέρω μελέτη των θερμοκρασιακών φαινομένων και την επίδραση αυτών στις ιδιότητες του υλικού. Η εικονική προσθετική κατασκευή που πραγματοποιήθηκε φαίνεται στην **Εικόνα 3.10**. Σε αυτή την εικόνα διακρίνεται η σταδιακή εναπόθεση υλικού που εκτελεί το ρομπότ με την γεωμετρία πλέγματος των στρωμάτων που έχουμε δημιουργήσει χτίζοντας έτσι σταδιακά το δείγμα. Ακόμα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα από την διαδικασία της συγκόλλησης σε όλο το σύστημα που έχουμε δημιουργήσει.

Η μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε υπολογίζει σε κάθε κόμβο του πλέγματος που δημιουργήσαμε το ρυθμό θέρμανσης και ψύξης που σχετίζεται άμεσα φυσικά και με της χημικές συστάσεις των υλικών που συμμετέχουν στην προσομοίωση. Βέβαια αυτός αποτελεί ένας αρκετά βαρύς και πολύπλοκος υπολογισμός. Μερικές από τις προκλήσεις που καλούνται να επιλυθούν τόσο από τους χρήστες όσο και από το ίδιο το μοντέλο αποτελούν αρχικά το μέγεθος ενός μοντέλου το οποίο είναι περιορισμένο καθώς ο υπολογιστής δεν έχει την δυνατότητα αποθήκευσης απείρου όγκου δεδομένων θερμοκρασίας. Έπειτα ο χρόνος που απαιτείται για την ανάγνωση, κατανόηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το μοντέλο δεν δυνατό να είναι τεράστιο καθώς η διαδικασία της εικονικής εκτύπωσης και μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων καταλήγει να είναι εξαιρετικά συνθέτη εξάγοντας έτσι αποτελέσματα τα οποία χάνουν την εγκυρότητά τους. Στην παρούσα προσομοίωση έγιναν όλες οι απαραίτητες παραδοχές έτσι ώστε να εξισορροπηθούν αυτές οι προκλήσεις και να

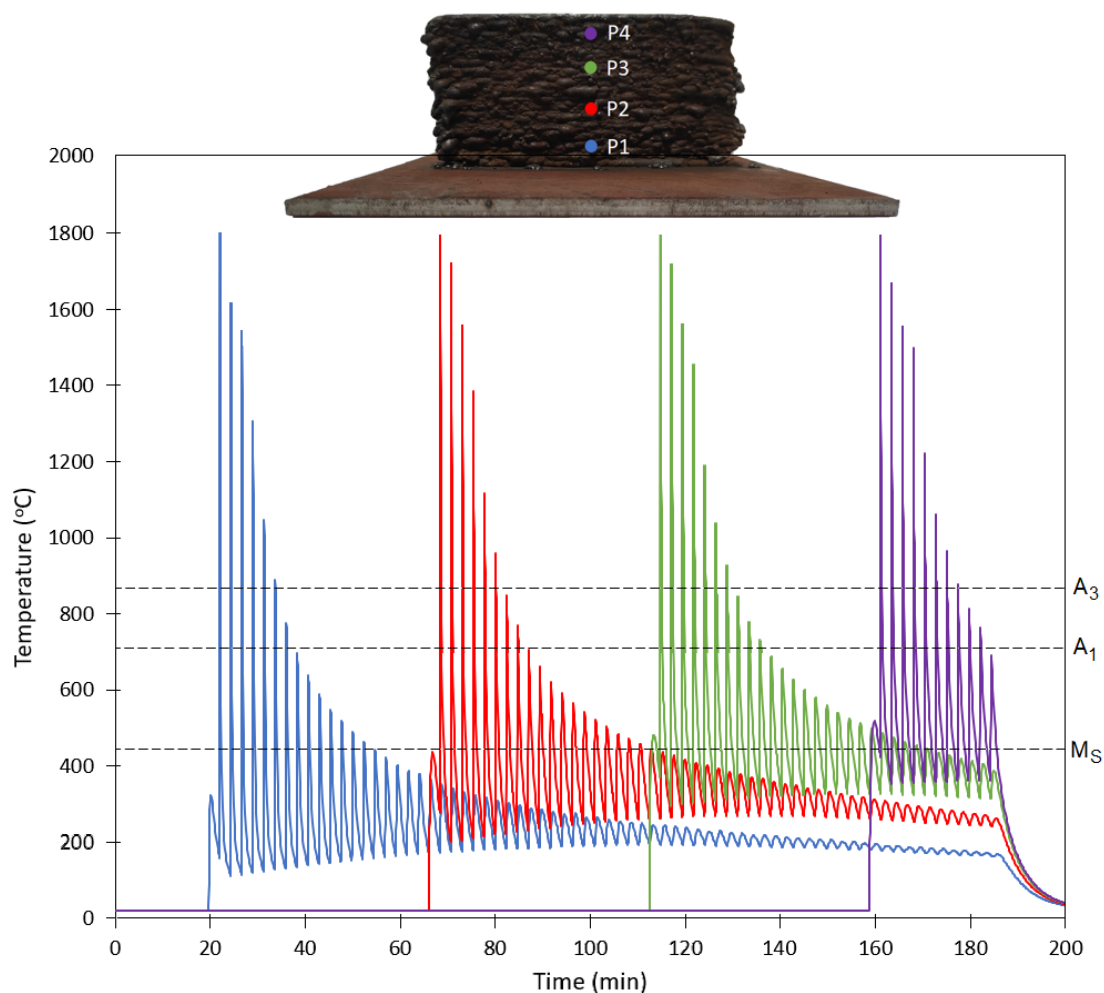
έχουμε έμπιστα αποτελέσματα τα οποία και παρουσιάζονται στην ακριβως επόμενη υποενότητα



Εικόνα 3.10 Σταδιακή δημιουργία δείγματος με την χρήση προσομοίωσης

3.3.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης

Η θερμική ανάλυση για τη διαδικασία WAAM περιλαμβάνει μοντέλο πηγής θερμότητας και μοντέλο μεταφοράς θερμότητας τα οποία είναι παρόμοια με την διαδικασία συγκόλλησης που πραγματοποιείται. Η μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας της προσθετικής κατασκευής περιγράφεται αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου. Αποτέλεσμα αυτή της προσομοίωσης αποτελεί η **Εικόνα 3.11** η οποία δείχνει ενδεικτικά την εξέλιξη της θερμοκρασίας συνάρτηση του χρόνου σε τέσσερα μεμονωμένα σημεία που απέχουν μεταξύ τους 20 mm και 10 mm από την άκρη του δείγματος και είναι στις αντίστοιχες θέσεις με τα σημεία που λάβαμε πληροφορίες για την μετάδοση της θερμότητας πειραματικά από την τοποθέτηση της θερμικής κάμερας.



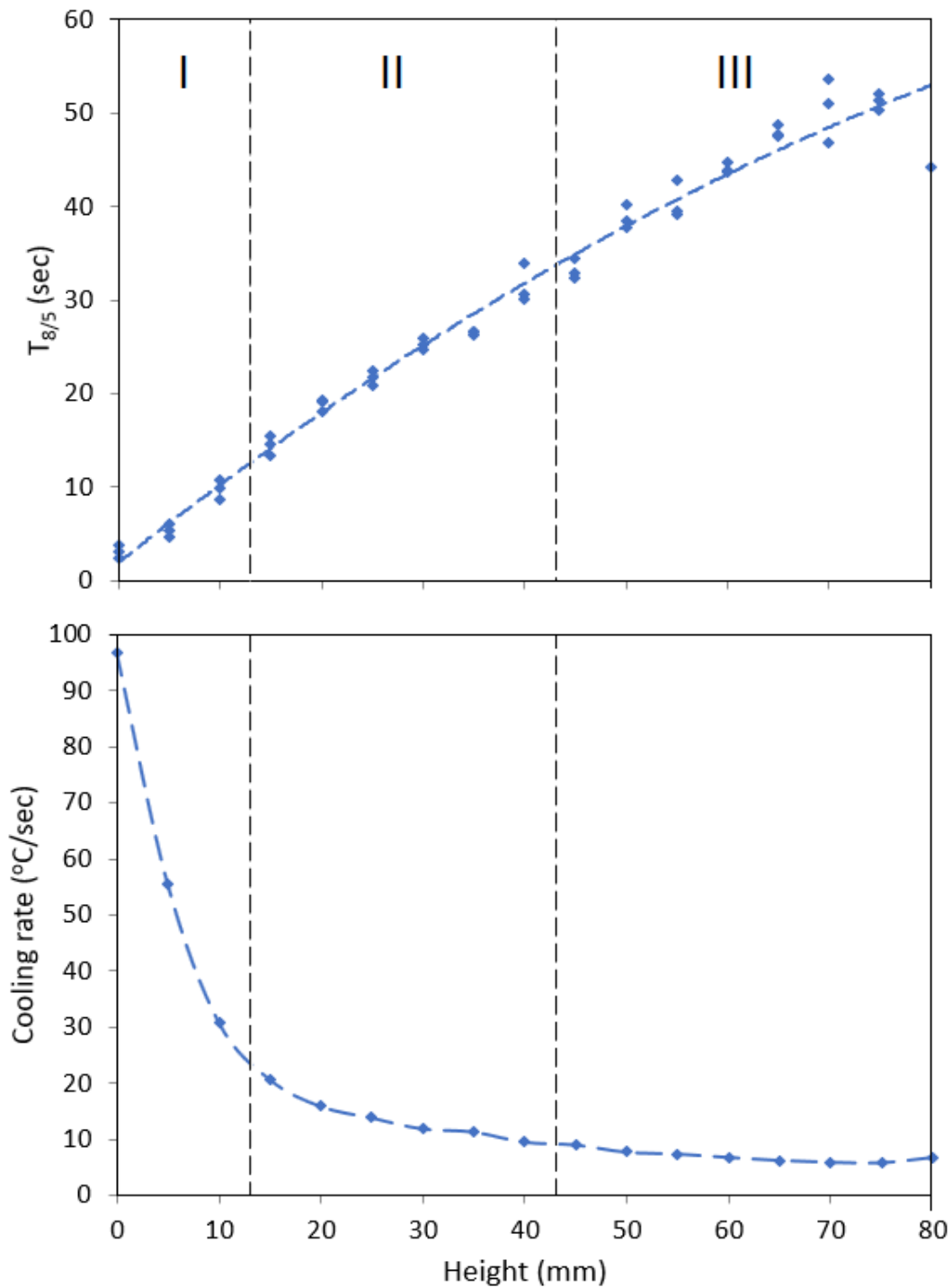
Εικόνα 3.11 Διάγραμμα χρόνου – θερμοκρασίας 4 σημείων κατά μήκος της κατεύθυνσης δημιουργίας

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες A3, A1 και Ms οι οποίες είναι χαρακτηριστικές και υποδηλώνουν:

- Θερμοκρασία A1: Πρόκειται για τη θερμοκρασία του ευτηκτοειδούς σημείου (723 °C).
- Θερμοκρασίες A3: Πρόκειται για τη θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης του χάλυβα (100% ωστενίτης).
- Θερμοκρασία Ms: Πρόκειται για τη θερμοκρασία ενεργής μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (410 °C)

Αυτές οι θερμοκρασίες αποτελούν σημείο αναφοράς για τους μετασχηματισμούς οι οποίοι συμβαίνουν στο εσωτερικό του δείγματος κατά την κατασκευή του. Από το συγκεκριμένο σχήμα παρατηρούμε πως κατά την εναπόθεση του υλικού στα μετρούμενα σημεία η θερμοκρασία φτάνει τους 1800°C θερμοκρασία στην οποία τήκεται το υλικό πλήρωσης και μετέπειτα έχουμε μετρήσεις της μεταφοράς θερμοκρασίας λόγω της εναπόθεση των επόμενων διαδοχικών στρωμάτων υλικού. Έπειτα για παράδειγμα το σημείο P4 έχει μεγαλύτερο χρόνο διατήρησης πάνω από την θερμοκρασία A1 και ένα κάπως πιο σύντομο χρόνο διατήρησης στο διάστημα θερμοκρασίας μεταξύ A1 και Ms (θερμοκρασία έναρξης μαρτενσίτη) που είναι βασικά η περιοχή θερμοκρασίας όπου σχηματίζεται ο φερρίτης και ο σεμεντίτης που οδηγούν σε μικροδομή που εμφανίζονται μαρτενσίτης, μπαινίτης, περλίτης η φερρίτης ανάλογα με το χρόνο ψύξης και διατήρησης (Müller, Hensel and Dilger, 2021). Ενώ στα σημεία που πλησιάζουν προς την βάση του δείγματος παρατηρείται η αντίθετη διατήρηση στις αντίστοιχες θερμοκρασίες από αυτή που περιγράψαμε για το σημείο P4. Με βάση αυτήν την κατανομή των θερμοκρασιών συνάρτηση του χρόνου αναμένουμε διαφορετική μικροδομή και ως εκ τούτου μηχανικές ιδιότητες κατά μήκος της κατευναστής κατασκευής του δείγματος από τα επάνω προς τα κάτω στρώματα.

Από το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου των τεσσάρων σημείων που τοποθετήθηκαν στο δείγμα αντλήθηκαν πληροφορίες για την μεταβολή της θερμοκρασίας από τους 800°C στους 500°C και χαράχτηκε το ανάλογο διάγραμμα $T_{8/5}$ συναρτήσεως του ύψους του κατασκευασμένου δείγματος από ακριβώς φαίνεται και στην **Εικόνα 3.12**. Λόγω της στρατηγικής εναπόθεσης κατά στρώματα της τεχνικής WAAM, τα εναποτιθέμενα

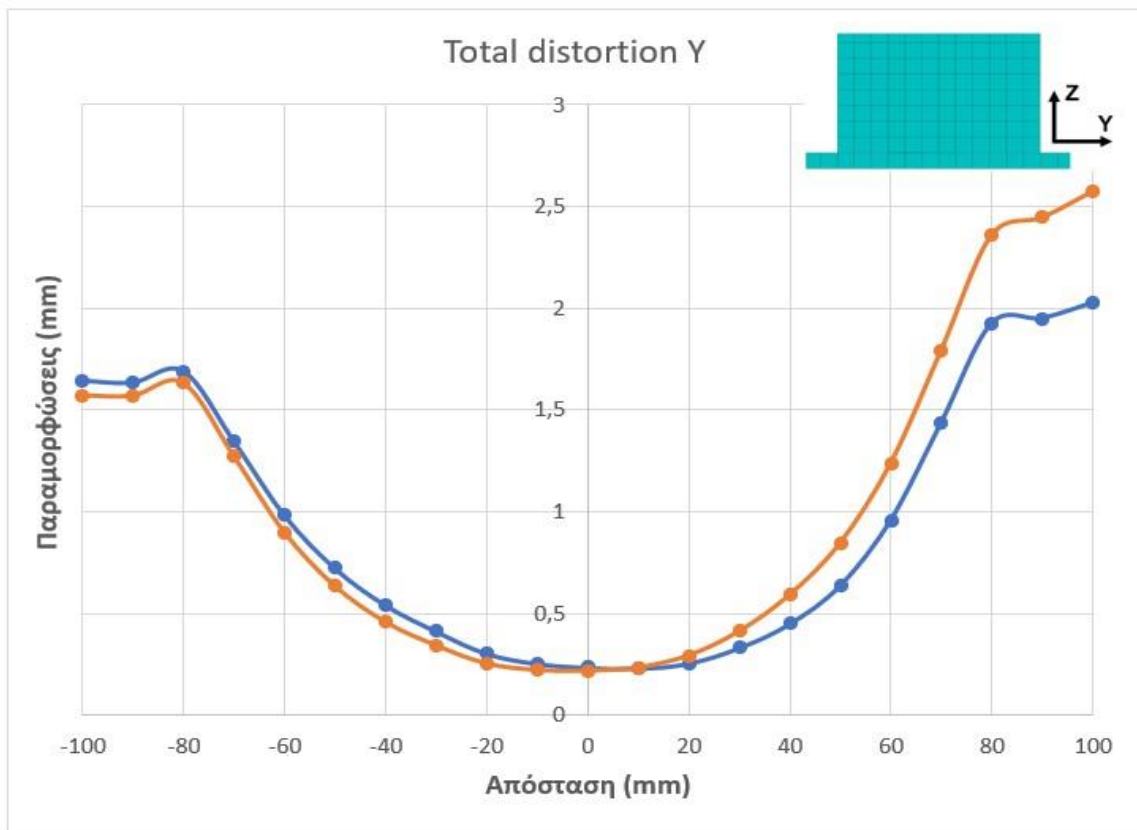


Εικόνα 3.12 Διαγράμματα μεταβολής θερμοκρασίας από του 800°C στους 500°C και ρυθμού ψύξης στρώματα επαναθερμαίνονται συχνά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από A1 ή A3 όπου γίνεται ωστενιτισμός. Άρα μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι όχι μόνο ο χρόνος $t_{8/5}$ για την πρώτη στερεοποίηση είναι ένα μέτρο για την προκύπτουσα μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες, αλλά και παράμετροι όπως οι μέγιστες θερμοκρασίες, αριθμός επαναθέρμανσης και ελάχιστες θερμοκρασίες όπως και αλληλεπίδραση μεταξύ τους

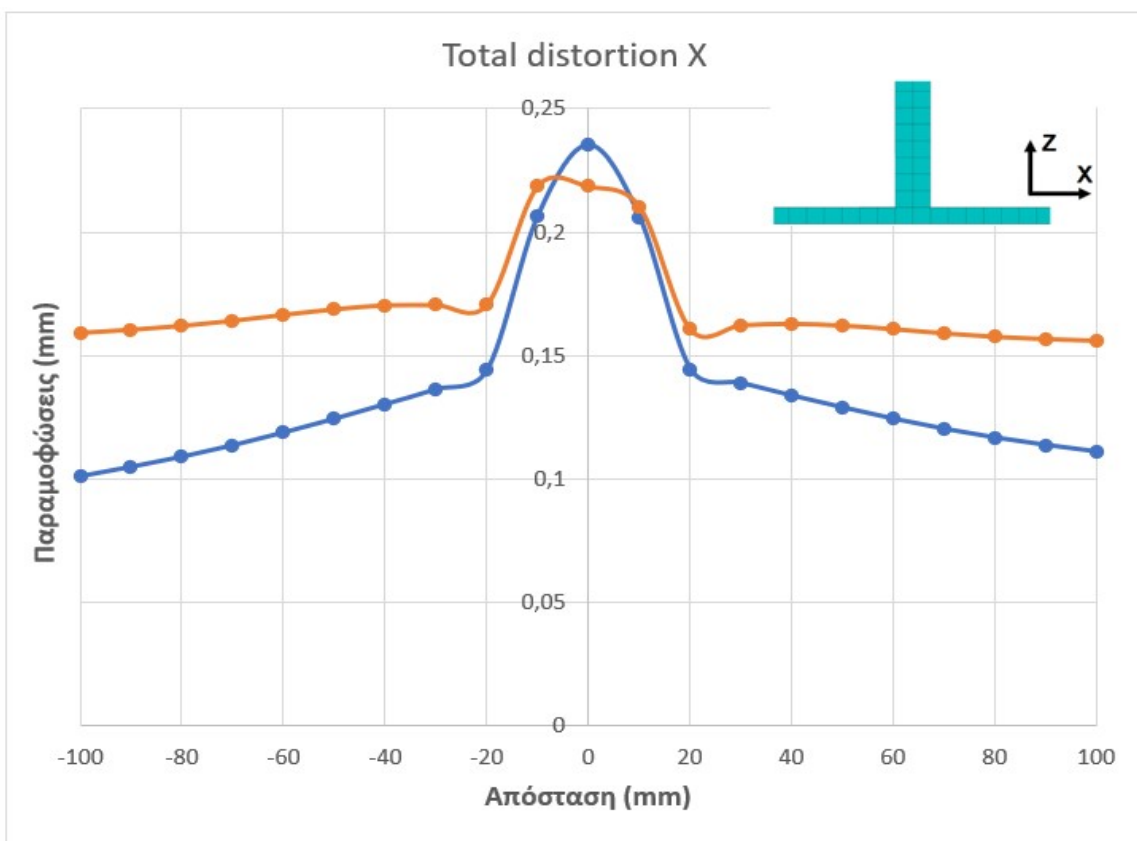
αποτελούν εξίσου σημαντικό παράγοντα για την δημιουργία της μικροδομής. Έπειτα αφού δημιουργήθηκε το διάγραμμα $T/5$ συναρτήσεως του ύψους και βασιζόμενοι σε αυτό εξήγαμε της κατάλληλες πληροφορίες και δημιουργήσαμε το διάγραμμα του ρυθμού ψύξης (cooling rate) συναρτήσεως τους ύψους κατασκευής ακριβώς φαίνεται καις την **Εικόνα 3.12**. Ο ρυθμός ψύξης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την δημιουργία μικροδομής και από το αντίστοιχο διάγραμμά παρατηρούμε τρεις διαφορετικές περιοχές στις οποίες έχουμε διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης. Ποιο συγκεκριμένα παρατηρούμε πως η περιοχή I η οποία βρίσκεται στην βάση του δείγματος ψύχεται αρκετά γρηγορά πράγμα που είναι αναμενόμενο καθώς έχουμε μετάδοση θερμότητάς προς το περιβάλλον αλλά και μέσα από την πλακά εναπόθεσης και συγκράτησης. Έπειτα για της περιοχές II και III που βρίσκονται αντίστοιχα στην μέση και στο πάνω μέρος του δείγματος στις οποίες η μετάδοση θερμότητας μεταδίδεται μέσω συναγωγής στο περιβάλλον και μέσω αγωγής στα προηγούμενα στρώματά που έχουν δημιουργηθεί παρατηρούμε αργούς αλλά διαφορετικούς ρυθμούς απόψυξης. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα από τους διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης στα διαφορετικά τμήματα του δείγματος κατά την διεύθυνση κατασκευής τους αναμένουμε και διαφορετική μικροδομή καθώς και ιδιότητες.

Έπειτα από το μοντέλο το οποίο στήσαμε μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα τόσο για τα θερμικά φαινόμενα που πραγματοποιούνται και εξηγήσαμε ποιο πάνω όσο και για τα μηχανικά φαινόμενα που δημιουργούνται κατά την εκτέλεση της εναπόθεσης και τα οποία είναι εξίσου σημαντικά αφού μην ξεχνάμε η τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης WAAM είναι βασισμένη σε μεθόδους συγκόλλησης, για αυτό και εμείς εξήγαμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα για της παραμορφώσεις στο δείγμα. Οι παραμορφώσεις που ανάπτονται σε μια συγκολλητή κατασκευή εάν δεν ελεγχθούν μπορεί να οδηγήσουν σε διαστασιακές μεταβολές οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις ανοχές που έχουν προδιαγραφεί. Επίσης οι παραμορφώσεις μπορεί να οδηγήσουν κάτω από τις κατάλληλες προϋποθέσεις ακόμα και σε αστοχία της συγκολλητής κατασκευής. Γενικά οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις είναι εφελκυστικές κοντά στη ραφή της συγκόλλησης και θλιπτικές μακριά από την ραφή οπότε έτσι δημιουργούνται και οι ανάλογες παραμορφώσεις και για λεπτά ελάσματα οι θλιπτικές παραμένουσες τάσεις μπορεί να οδηγήσουν στο φαινόμενο του λυγισμού (Παντελής, Παπάζογλου και Χαϊδεμενόπουλος, 2017). Όπως είναι αντιληπτό, από τα διαγράμματα της **Εικόνα 3.13** και **Εικόνα 3.14** παρατηρείται ότι το μοντέλο προσομοίωσης προβλέπει με ακρίβεια την

μορφή της κατανομής τόσο των εγκάρσιων όσο και των διαμηκών παραμορφώσεων. Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις κατά το τέλος της κατασκευής του δείγματος (μπλε καμπύλη) η οποία διαρκεί για χρόνο $t = 185,6$ sec και κατά την πλήρη ψύξη του συστήματος (πορτοκαλί καμπύλη) η οποία ολοκληρώνεται σε χρόνο $t = 216,66$ sec σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα της **Εικόνα 3.13** στην οποία παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις στο σύστημα z-y φαίνεται πως τόσο κατά το πέρα της δημιουργίας του δείγματος όσο και της ψύξης του συστήματος οι παραμορφώσεις είναι περισσότερο έντονες στα άκρα του συστήματος πάρα στο μέσο αυτού. Η μέγιστη τιμή των παραμορφώσεων φαίνεται πως βρίσκεται το δεξί τμήμα του συστήματος με 2,57 mm, σημείο στο οποίο γινόταν και η έναυση του τόξου συγκόλλησης, μετά και την ολοκληρωμένη ψύξη του ενώ κατά το πέρας κατασκευής του δείγματος η τιμή αυτή έφτανε μόλις τα 2 mm σημειώνοντας έτσι αύξηση της παραμόρφωσης κατά την ψύξη. Ενώ στο αριστερό τμήμα στο οποίο είχαμε και σβέση του τόξου η μέγιστη τιμή των παραμορφώσεων φτάνει στα 1,64 mm τιμή η οποία είναι μέγιστη κατά το τέλος της κατασκευής του δείγματος και έπειτα στην διάρκεια της πλήρους ψύξης του σημειώνει μείωση στα 1,57 mm. Έπειτα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα στην **Εικόνα 3.14** η οποία παρουσιάζει της παραμορφώσεις στο επίπεδο z-x οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις βρίσκονται περιμετρικά από το κέντρο του συστήματος. Παρατηρούμε πως κατά το τέλος κατασκευής του δείγματος στο κεντρικό σημείο η τιμή της παραμόρφωσης λαμβάνει την μέγιστη τιμή της η οποία είναι 0,235 mm ενώ έπειτα κατά την ολική ψύξη του συστήματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος σημειώνετε πτώση αυτής της τιμής στα 0,218 mm. Αυτό γενικά είναι και το μόνο σημείο στο οποίο έχουμε μείωση των παραμορφώσεων κατά την πλήρη ψύξη καθώς όπως γίνεται αντιληπτό και από το διάγραμμα η πορτοκαλή καμπύλη στα υπόλοιπα σημεία του συστήματος βρίσκεται πάνω από την αντίστοιχη μπλε καμπύλη σημειώνοντας έτσι αύξηση παραμορφώσεων σε όλο το σύστημα κατά την ψύξη. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές αυτές των παραμορφώσεων σε αυτό το επίπεδο είναι αρκετά μικρές καθώς λαμβάνουν τιμές από 0,1 έως 0,235 mm και δύσκολα μπορούν να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Αυτές οι παραμορφώσεις που αναλύσαμε έχουν απορροφήσει από την πλακά εναπόθεσης και είναι αποτέλεσμα των θερμικών κύκλων που υπέστη κατά την εναπόθεση υλικού για την δημιουργία των στρωμάτων του δείγματος.



Εικόνα 3.13 Διάγραμμα παραμορφώσεων συναρτήσει της απόστατης στην Y κατεύθυνση



Εικόνα 3.14 Διάγραμμα παραμορφώσεων συναρτήσει της απόστασης στην X κατεύθυνση

Κεφάλαιο 4

Πειραματικό μέρος

4.1 Εισαγωγή

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στο να διερευνηθεί και να επεκταθεί η ποικιλία των υλικών με την οποία υπάρχει η δυνατότητα για δημιουργία 3D printing αντικειμένων με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης WAAM. Συγκεκριμένα αναλύονται όλες οι παράμετροι καθώς και η διαδικασία που ακολουθήσαμε έτσι ώστε με την χρήση του υλικού πλήρωσης που χρησιμοποιείται για διαδικασίες αναγόμωσης με εμπορική ονομασία OA 4923 το οποίο βρίσκεται υπό την μορφή παραγεμιστού σύρματος να καταφέρουμε να κατασκευάσουμε δείγμα μέσω της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης WAAM. Το προς επιλογή υλικό το οποίο φέρει εξαιρετικές τριβολογικές ιδιότητες που αποτέλεσαν και το βασικό παράγοντα επιλογής του είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συμπερασματικά οι τυχόν μεταβολές της τριβολογικής συμπεριφοράς του δείγματος που δημιουργήσαμε από της δοθείσες του κατασκευαστή του υλικού εξετάζονται διεξοδικά στο κεφάλαιο 5.

4.2 Σχεδιασμός της μελέτης

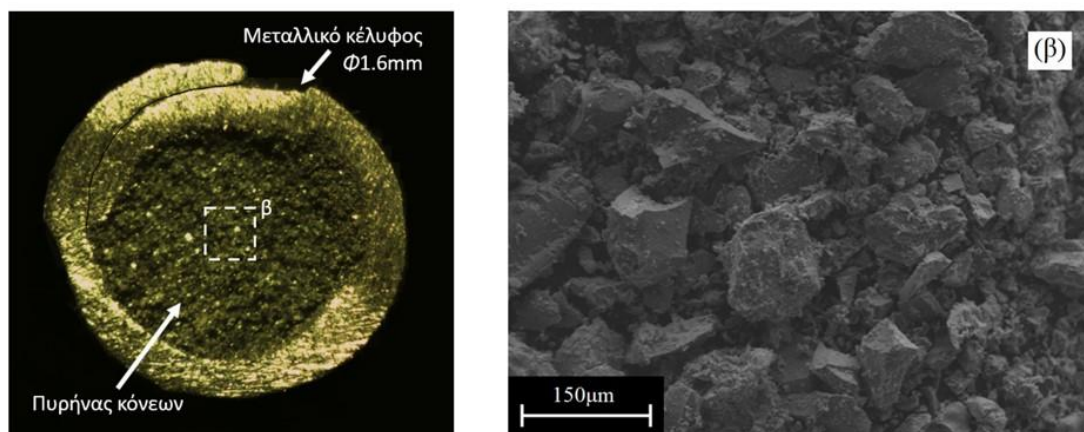
4.2.1 Υλικό και μέθοδος

Για την τρισδιάστατη κατασκευή του δείγματος μας χρησιμοποιήσαμε το παραγεμιστό συρμα με εμπορική ονομασία TeroMatec OA 4923 με διάμετρο 1,6 mm που αποτελείται από μια εξαιρετικά σκληρή μαρτενσιτική μήτρα που περιέχει μια διασπορά από καρβίδια του τιτανίου που διασφαλίζουν εξαιρετική αντοχή στην συνδυασμένη φθορά από τριβή, κρούση η και πίεση, η σύσταση του σύρματος εμφανίζεται αναλυτικά στον **Πίνακα 4.1**. Αυτό το σωληνωτό συρμα περιέχει στον πυρήνα του ένα είδος σκόνης (**Εικόνα 4.1**) η οποία αποτελείται ένα μίγμα χημικών ενώσεων που η θερμική

διάσπαση αυτών εκλύει αέρια με βάση το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Με την έναρξη του τόξου συγκόλλησης παράγεται θερμότητα η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας που επιφέρει την διάσπαση των χημικών ενώσεων πριν από την τήξη του σωληνωτού σύρματος. Τα προϊόντα της διάσπασης αποτελούνται από αδρανή αέρια τα οποία παρέχουν την προστασία του τόξου της συγκόλλησης από το περιβάλλον έτσι ώστε να αποφεύγεται η οξείδωση. Επιπρόσθετος παράγοντας τα απαιτούμενα αέρια τα οποία προστατεύουν το τηγμένο μέταλλο από τις ισχυρά διαβρωτικές ενώσεις του θείου που σχηματίζονται καθώς και δεν επιτρέπουν την απότομη ψύξης της ραφής. Τα παραγεμιστά σύρματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις εργασίες συγκόλλησης χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση προστατευτικού αερίου για τους λόγους που αναφέραμε. Ακολουθώντας όσα προαναφέραμε και εμείς στην δικιά μας περίπτωση κατά την δημιουργία των στρωμάτων η ραφών του δείγματος δεν χρησιμοποιήσαμε κάποιου είδους προστατευτικού αερίου.

Πίνακας 4.1 Ονομαστική χημική σύνθεση του μεταλλικού κελύφους (wt %)

Material	C	Cr	Mo	Ti
OA4923	1.9	6.5	1.5	5.5



Εικόνα 4.1 Μορφολογία α) του σύρματος β) της κόνεως

Για να καταφέρουμε να επιτύχουμε την δημιουργία του δείγματος χτίζοντας το στρώμα – στρώμα (layer by layer) είναι αναγκαία η χρήση κάποιας τεχνικής συγκόλλησης η οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων που συναντάμε στην βιβλιογραφία είναι βασισμένη στην τεχνική συγκόλλησης τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και

προστατευτικό αέριο (Gas Metal Arc Welding – GMAW). Για την εναπόθεση του υλικού στα στρώματα αντίστοιχα και στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιήσαμε την μηχανή συγκόλλησης τύπου GMAW (Εικόνα 4.2) του Εργαστήριου Συγκολλήσεων, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.



Εικόνα 4.2 Χρησιμοποιούμενη μηχανή συγκόλλησης

Έπειτα για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε την συγκεκριμένη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης η τσιμπίδα της μηχανής τύπου GMAW εφαρμόστηκε σε ένα κατάλληλα διαμορφωμένο ανοικτού τύπου όργανο το οποίο διατίθεται στο εργαστήριο συγκολλήσεων (Εικόνα 4.3). Μετα και την εφαρμογή της τσιμπίδας το όργανο έχει την δυνατότητα να την μετακινεί προς της τρεις διευθύνσεις με την χρήση ανοιχτού κώδικα. Η θέση του πυρσού συγκόλλησης προσδιορίζεται από εντολές CNC που προκύπτουν από μια μέθοδο σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) του

επιθυμητού εξαρτήματος. Το εξάρτημα μετατρέπεται χρησιμοποιώντας λογισμικό ανοικτού κώδικα που υπαγορεύει εντολές κίνησης στον μικροελεγκτή ενώ ταυτόχρονα ελέγχει και την έναυση η την διακοπή του βολταϊκού τόξου για την έναρξη και τη παύση της εναπόθεσης του υλικού. Οι ρυθμίσεις που έγιναν στην μηχανή συγκόλλησης τέθηκαν σύμφωνα με της πληροφορίες που μας δίνει ο κατασκευαστής του υλικού ενώ εκείνες που προσαρμόσαμε για την εκτέλεση της συγκόλλησης ή διαφορετικά της εναπόθεσης υλικού αφορούν εκείνες που ενδείκνυνται για την τεχνική συγκόλλησης GMAW. Οι ρυθμίσεις αυτές αποτυπώνονται αναλυτικά στον **Πίνακας 4.2**.



Εικόνα 4.3 Χρησιμοποιούμενο ρομπότ κίνησης υιοθετημένη από (Οικονομόπουλος, Παπαστολόπουλος και Πούλος, 2019).

Πίνακας 4.2 Πειραματικές παράμετροι της διαδικασίας WAAM

Sample	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/s)	Wire feeding speed (mm/min)	CTWC - Contact Tip to Work Distance (mm)
1	190	15	2	550	14

Εκτός από όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα που χρησιμοποιήσαμε για την πραγματοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης του δείγματος με την μέθοδο WAAM και αναφέραμε προηγούμενος κάναμε χρήση επίσης και μιας κάμερας θερμικής απεικόνισης για την λήψη τιμών θερμοκρασίας που αναπτύσσονται κατά την εναπόθεση του υλικού αλλά και την μελέτη μεταφοράς θερμότητας σε ολόκληρο το σύστημα. Η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε είναι η EQUUS 327k SM/M η οποία είναι μια ισχυρή θερμογραφική κάμερα με ενσωματωμένο υπέρυθρο θερμόμετρο και αυτόματη εστίαση για χρήση σε δυνητικά εκρηκτικές περιοχές. Παρέχει εξαιρετικές υπέρυθρες εικόνες (640x512p) σε εύρος θερμοκρασίας από -20°C έως 2000°C. Επιπλέον, η κάμερα θερμικής απεικόνισης διαθέτει εκτεταμένες λειτουργίες ανάλυσης (π.χ. θερμική ανάλυση με θερμά και κρύα σημεία). Η κάμερα αυτή όχι μόνο μπορεί να διακρίνει τα ζεστά από τα κρύα σημεία, αλλά μπορεί επίσης να μετρήσει ακριβώς τη θερμοκρασία και όλα αυτά σε διάστημα 8 χιλιοστών του δευτερολέπτου (εγγραφή σε πραγματικό χρόνο). Επίσης το εύρος της διακριτικής ικανότητας της συγκεκριμένης θερμικής κάμερας καλύπτει όλο το φάσμα των θερμοκρασιών του υλικού που έχουμε επιλέξει από την τήξη έως και την πήξη του. Η χρήση αυτών των αποτελεσμάτων θα μας βοηθήσουν αργότερα να επαληθεύσουμε της αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας που εξήγαμε από την προσομοίωση του μοντέλου που πραγματοποιήσαμε και να παρατηρήσουμε τυχών αποκλίσεις.

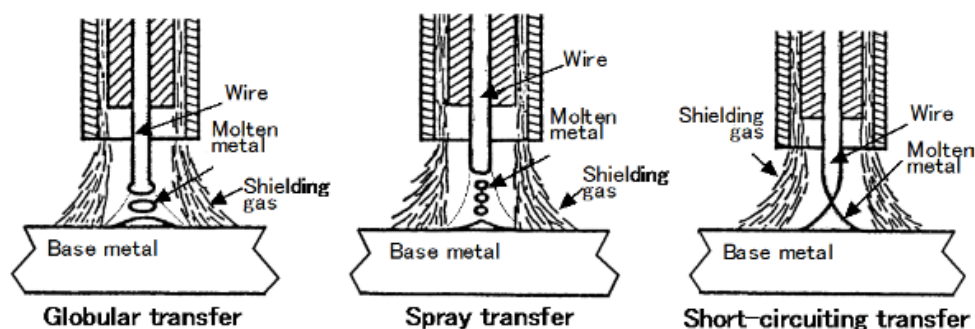


Εικόνα 4.4 IR κάμερα καταγραφής θερμοκρασίας

4.2.2 Τεχνική μεταφοράς υλικού

Η τεχνική Gas Metal Arc Welding (GMAW) αποτελεί ένα μακροχρόνιο εργαλείο συγκόλλησης το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για τη συνένωση μεγάλης γκάμας μεταλλικών υλικών σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές και πεδία. Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας συγκόλλησης με τη μέθοδο GMAW δημιουργείται ένα βολταϊκό τόξο μεταξύ του αναλώσιμου σύρματος (ηλεκτροδίο πλήρωσης) και του τεμαχίου εργασίας. Το τόξο αυτό αυξάνει την θερμοκρασία σε επίπεδα τέτοια ώστε να λιώσει το συρμα και να δημιουργούνται σταγονίδια τα οποία αποσπώνται και μεταφέρονται από το συρμα στο τεμάχιο εργασίας όπου και γίνεται η σύζευξη. Σε χαμηλότερες τιμές έντασης του ρεύματος I τα σχηματιζόμενα σταγονίδια έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από την διάμετρο του σύρματος, αυτή η τεχνική μεταφοράς καλείται ως σφαιρική μεταφορά (globular transfer) ενώ στις αρκετά υψηλές τιμές έντασης ρεύματος συγκόλλησης τα σταγονίδια έχουν μικρότερη διάμετρο από αυτή του σύρματος, στην περίπτωση αυτή η μέθοδος μεταφοράς ονομάζεται μεταφορά με την μορφή ψεκασμού (spray transfer) (Zhao and Chung, 2019). Αξίζει ακόμα να σημειωθεί πως στις τεχνικές μεταφοράς υλικού εκτός από της προαναφερθείσες χρησιμοποιείται στις εργασίες συγκολλήσεις και η μέθοδος μεταφοράς υλικού πλήρωσης με βραχυκύκλωση τόξου (short circuit transfer) κατά την οποία σταγόνες τηγμένου μετάλλου μεταφέρονται από την άκρη του ηλεκτροδίου στο λουτρό τήγματος όταν αυτό ακουμπά στην επιφάνεια του λουτρού. Αυτή η μέθοδος απαιτεί πολύ χαμηλής έντασης ρεύμα και μικρή διάμετρο σύρματος παράγοντας μικρο λουτρό τήγματος το οποίο στερεοποιείται γρήγορα. Αυτό είναι επιθυμητό για τη συγκόλληση λεπτών τμημάτων σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης, καθώς επίσης και υλικών μεγάλου πάχους σε κατακόρυφη και υπεράνω θέσεις. Κατά την δημιουργία του δείγματος χρησιμοποιήθηκε η τεχνική μεταφοράς με την μορφή σταγόνων (globular transfer) καθώς έχουμε μικρή ένταση του ρεύματος (190 A), η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική σε επίπεδη θέση την οποία και είχαμε σε αυτή την περίπτωση αλλά και οι σταγόνες μετάλλου κινούνται κατά μήκος του κενού χώρου, το οποίο γεφυρώνει το τόξο, κάτω από την επίδραση της βαρύτητας επιτυγχάνοντας έτσι

την καλύτερη δυνατή εναπόθεση υλικού για την δημιουργία των στρώσεων (layers) χωρίς να έχουμε την εμφάνιση ατελειών.



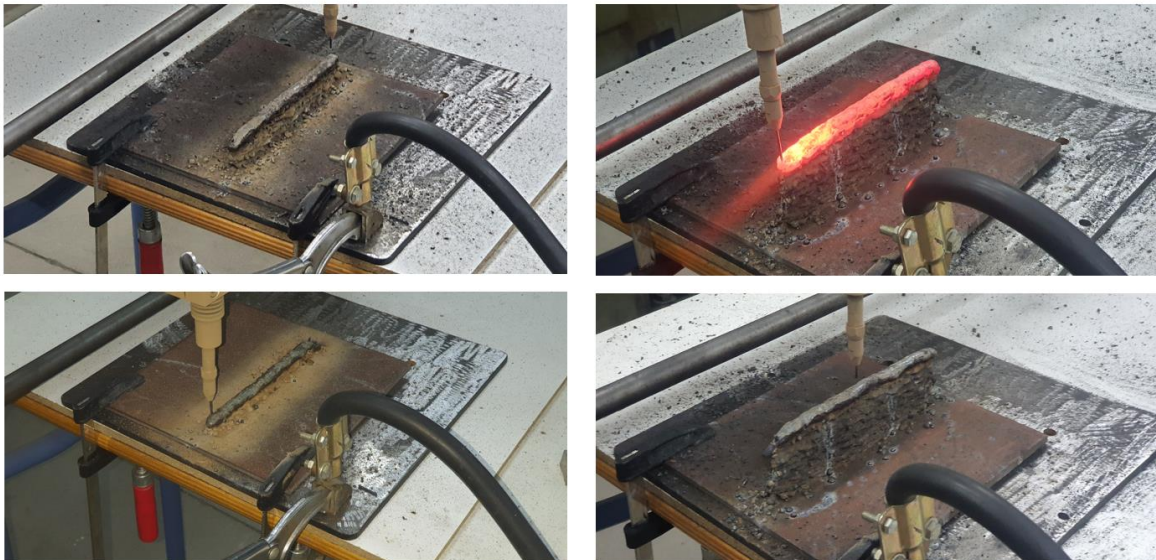
Εικόνα 4.5 Τρεις κύριες λειτουργίες μεταφοράς σταγονιδίων στο GMAW υιοθετημένη από (Kita and Ku, 2005).

4.3 Πειραματική διαδικασία

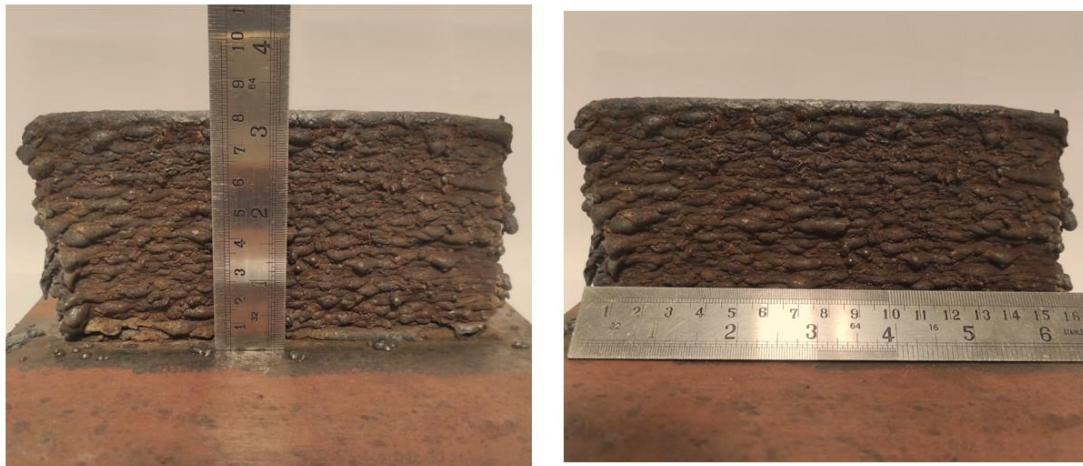
4.3.1 Κατασκευή δείγματος

Κατά την πειραματική διεργασία και για την προσθετική κατασκευή του δείγματος μας με την μέθοδο WAAM τοποθετήθηκε όπως αναφέραμε και προηγούμενος ο πυρσός συγκόλλησης της τεχνικής GMAW στο όργανο – ρομπότ κίνησης 3 αξόνων έτσι ώστε η κατεύθυνση κίνησης να είναι ο άξονας X, η κατεύθυνση κατασκευής να είναι στον άξονα Z και η κατεύθυνση πλάγιας κίνησης να βρίσκεται στον άξονα Y. Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε ώστε να γίνει η εναπόθεση του πρώτου στρώματος πάνω στο οποίο μετέπειτα θα τοποθετηθούν και τα υπόλοιπα στρωματά (layers) για την σταδιακή δημιουργία του δείγματος ήταν μια χαλύβδινη πλακά S235 200 × 200 × 6 mm η οποία προσδέθηκε σταθερά με μια μεγάλη πλάκα ίδιου υλικού (χάλυβας S235) διαστάσεων 350 × 350 × 6 mm με την βοήθεια καταλλήλων σφικτήρων. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως ο πυρσός συγκόλλησης τοποθετήθηκε με τρόπο τέτοιο στο ρομπότ κίνησης σε θέση κάθετη (90°) προς την χαλύβδινη πλάκα. Ακόμα κατά την δημιουργία των στρώσεων του δείγματος δεν αφαιρέσαμε την προστατευτική κρουστά που δημιουργούταν και κρατούσαμε σταθερό χρόνο παύσης ενός λεπτού αναμεσά στην εναπόθεση των στρώσεων. Η πλάκα αυτή γυαλίστηκε προτού ξεκινήσει η διαδικασία της εναπόθεσης των στρωμάτων γύρο από την συγκεκριμένη περιοχή χρησιμοποιώντας

τροχό λείανσης για να αφαιρεθούν τα επιφανειακά στρώματα ώστε να επιτύχουμε όσο το δυνατό καλύτερη πρώτη εναπόθεση χωρίς προσμίξεις για να μειώσουμε της παραμορφώσεις που θα υποστεί η χαλύβδινη πλάκα. Αφού βεβαιωθήκαμε πως όλα ήταν ακριβώς έτσι όπως τα είχαμε ορίσει τότε ξεκίνησε η διαδικασία κατασκευής του δείγματος κατά την οποία το ρομπότ κίνησης κατεύθυνε την τσιμπίδα συγκόλλησης της μηχανής προς την κατεύθυνση κίνησης εναποθέτοντας υλικό και σταδιακά δημιουργούσε στρώσεις (layers) υλικού διαδοχικά στην κατεύθυνση κατασκευής μέχρι να ολοκληρωθεί η δημιουργία του δείγματος ακριβώς από φαίνεται στις εικόνες. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως η στρατηγική δημιουργίας στρωμάτων υλικού που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του δείγματος αποτελούνταν από περάσματα προς μια διεύθυνση στα οποία η τσιμπίδα συγκόλλησης εναπόθετε το υλικό πλήρωσης στις προγραμματισμένες διαστάσεις και έπειτα ξεκινούσε ξανά από το ορισμένο μηδενικό σημείο για την κατασκευή και των επομένων στρωμάτων του δείγματος έως και την ολοκλήρωση του. Το δείγμα που παρήχθη είχε μέγεθος $160 \times 80 \times 14$ mm, αυτό το παραγόμενο δείγμα μετέπειτα κόπηκε σε κομμάτια για περαιτέρω μεταλλογραφική ανάλυση, σκληρομέτρηση αλλά και πραγματοποίηση δοκιμής εφελκυσμού και κρούσης αλλά και μελετη των τριβολογικών ιδιοτήτων του δείγματος της οποίες και μελετάμε στην παρούσα εργασία στο κεφάλαιο 5.



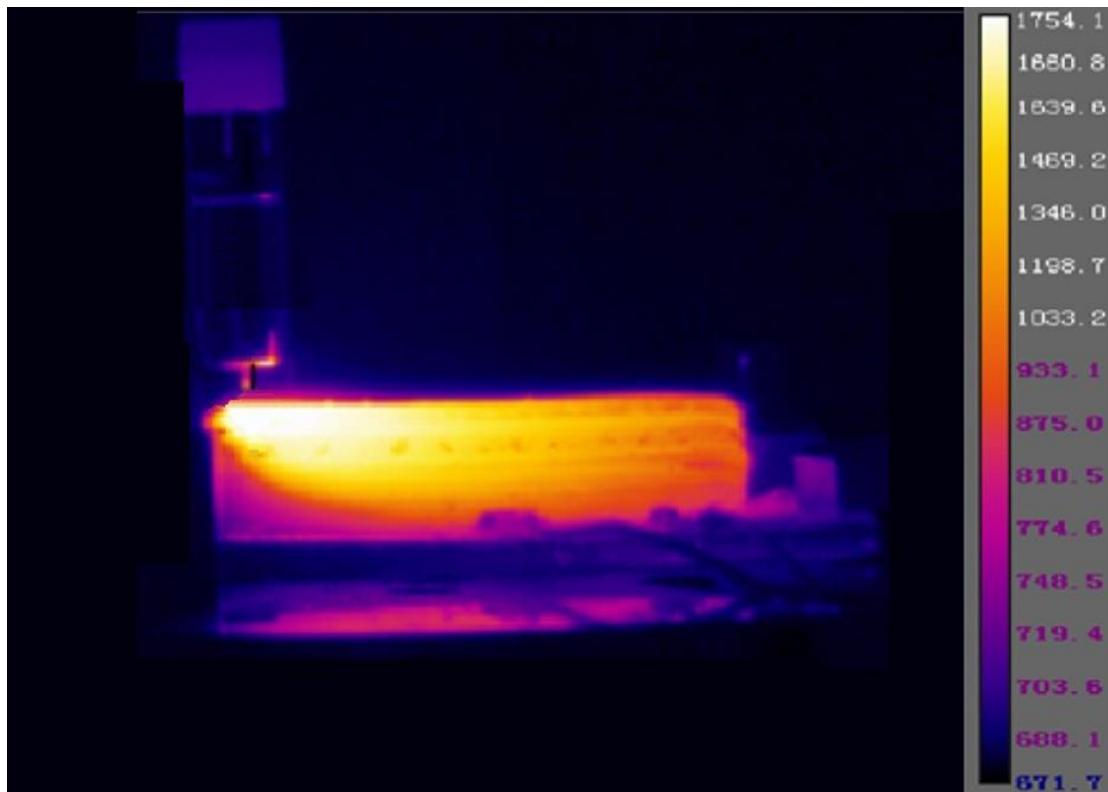
Εικόνα 4.6 Σταδιακή δημιουργία στρωμάτων του δείγματος με την μέθοδο WAAM



Εικόνα 4.7 Παρασκευασμένο δείγμα στην τελική του μορφή

4.3.2 Αποτελέσματα θερμικής κάμερας

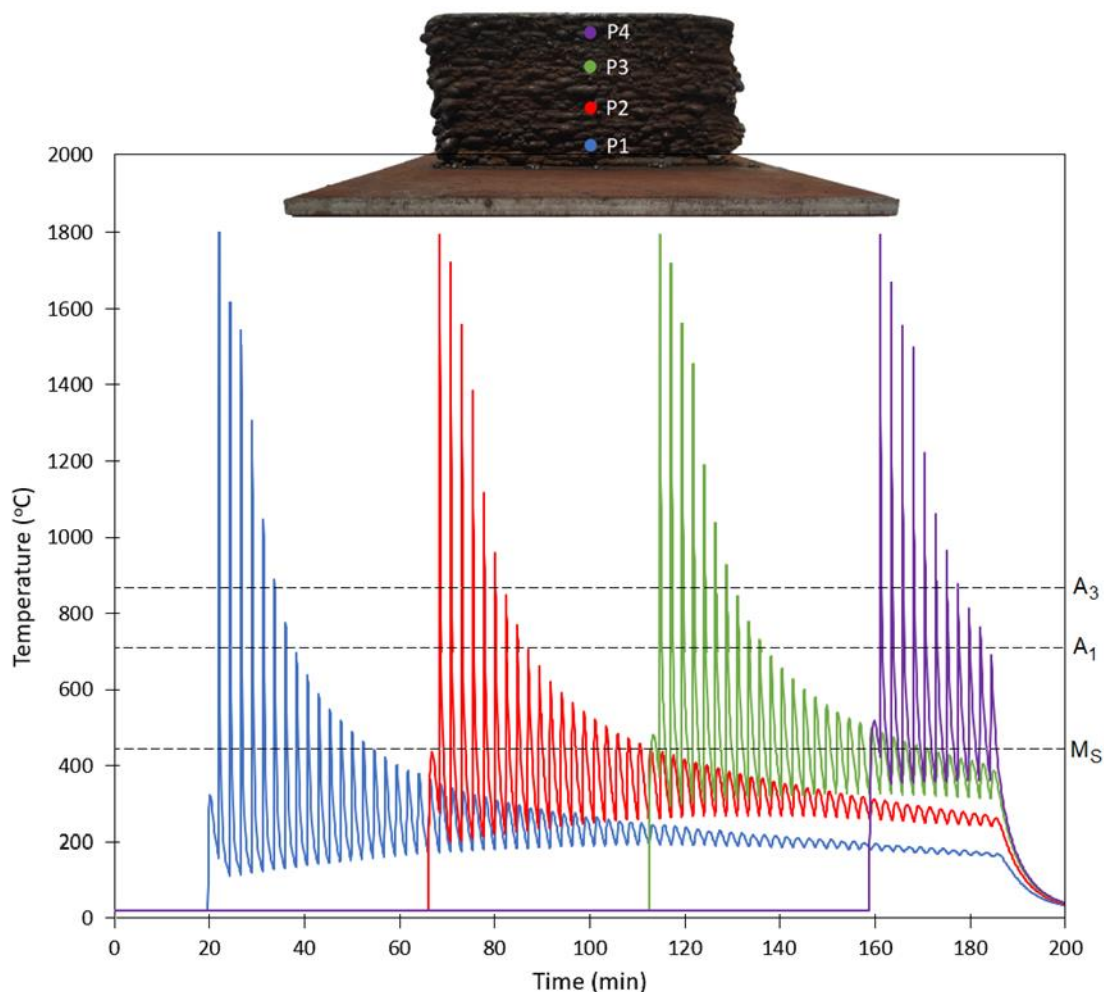
Η **Εικόνα 4.8** δείχνει την μετάδοση θερμότητας καθώς και της αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο σύστημα που παράγεται από το τόξο συγκόλλησης κατά την εναπόθεση υλικού για την δημιουργία των στρωμάτων του δείγματος. Η εικόνα παρουσιάζει μια ενδιάμεση στρώση εναπόθεσης με κίνηση του πυρσού συγκόλλησης από τα δεξιά προς τα αριστερά μέρος. Ένα φίλτρο στενής ζώνης τοποθετήθηκε στο φακό της κάμερας για να ακυρώνεται η φωτεινότητα του ηλεκτρικού τόξου με στόχο την καλύτερη οπτική αποτύπωση των φαινομένων. Η μέτρηση θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκε κάθε 5 δευτερόλεπτα κατά τη διάρκεια 800 δευτερολέπτων από την αρχή του πειράματος έως και το πέρας του συμπεριλαμβανομένων έτσι όλων των κύκλων θέρμανσης και ψύξης. Από την θερμική κάμερα παρατηρήσαμε πως η πρώτη στρώση υλικού που δημιουργήθηκε είχε αρκετά γρήγορη ψύξη καθώς εναποτέθηκε σε μια ψυχρή πλακά χάλυβα η οποία βρισκόταν σε θερμοκρασία 20 °C. Ο χρόνος παραμονής των 60 δευτερολέπτων δεν ήταν φυσικά αρκετός για να αφήσει το δείγμα να κρυώσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος παρόλα αυτά για τα επόμενα περίπου 10 στρωματά παρατηρήθηκαν γρήγοροι ρυθμοί απόψυξης. Ενώ από την άλλη κατά την δημιουργία του δείγματος και όσο απομακρυνόντουσαν τα στρώματα που δημιουργούσαμε από την βάση του δείγματος βλέπαμε όλο ένα και πιο αργούς ρυθμούς ψύξης.



Εικόνα 4.8 Λήψη από την θερμική κάμερα κατά την εναπόθεση ενός ενδιάμεσου στρώματος του δείγματος

Στην εγγραφή της κάμερας που υλοποιήθηκε μετρήθηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία P1, P2, P3, P4 τα οποία απείχαν 10, 30, 50, 70 mm από την πλακά εναπόθεσης ακριβώς όπως τα είχαμε ορίσει και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Οι θερμοκοί κύκλοι που υπέστησαν αυτά τα σημεία κατά την κατασκευή του δείγματος παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.9** . Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε πως κατά την εναπόθεση του υλικού στα μετρούμενα σημεία η θερμοκρασία φτάνει τους 1800°C θερμοκρασία στην οποία τήκεται το υλικό πλήρωσης και μετέπειτα έχουμε μετρήσεις της μεταφοράς θερμοκρασίας λόγω της εναπόθεσης των επόμενων διαδοχικών στρωμάτων υλικού. Έπειτα για παράδειγμα το σημείο P4 έχει μεγαλύτερο χρόνο διατήρησης πάνω από την θερμοκρασία A1 και ένα κάπως πιο σύντομο χρόνο διατήρησης στο διάστημα θερμοκρασίας μεταξύ A1 και Ms (θερμοκρασία έναρξης μαρτενσίτη) που είναι βασικά η περιοχή θερμοκρασίας όπου σχηματίζεται ο φερρίτης και ο σεμεντίτης που οδηγούν σε μικροδομή που εμφανίζονται μαρτενσίτης, μπαινίτης, περλίτης η φερρίτης ανάλογα με το χρόνο ψύξης και διατήρησης. Ενώ στα τα σημεία που πλησιάζουν προς την βάση του δείγματος παρατηρείται η αντίθετη διατήρηση στις αντίστοιχες θερμοκρασίες από αυτή που περιγράψαμε για το σημείο P4. Μετα και από

την ανάλυση των θερμικών φαινομένων μέσω της θερμικής κάμερας καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως τα αποτελέσματα που λάβαμε πειραματικά ταυτίζονται με τα ανάλογα του μοντέλου προσομοίωσης δύοντα μάλιστα μια σχετικά πολύ καλή ακρίβεια. Επιβιώνοντας έτσι την ύπαρξη διαφορετικών ρυθμών ψύξης σε ανάλογα τμήματα του δείγματος όπως άλλωστε και παρατηρήθηκε και από την καταγραφή της κάμερας με αποτέλεσμα να επαληθεύτε η ύπαρξη διαφορετικών δομών κατά μήκος του άξονα κατασκευής του δείγματος.



Εικόνα 4.9 Πειραματικό διάγραμμα χρόνου – θερμοκρασίας 4 σημείων κατά μήκος της κατεύθυνσης δημιουργίας

Κεφάλαιο 5

Μελετη τριβολογικής συμπεριφοράς

5.1 Μέτρηση τριβής – φθοράς

5.1.1 Γενικά

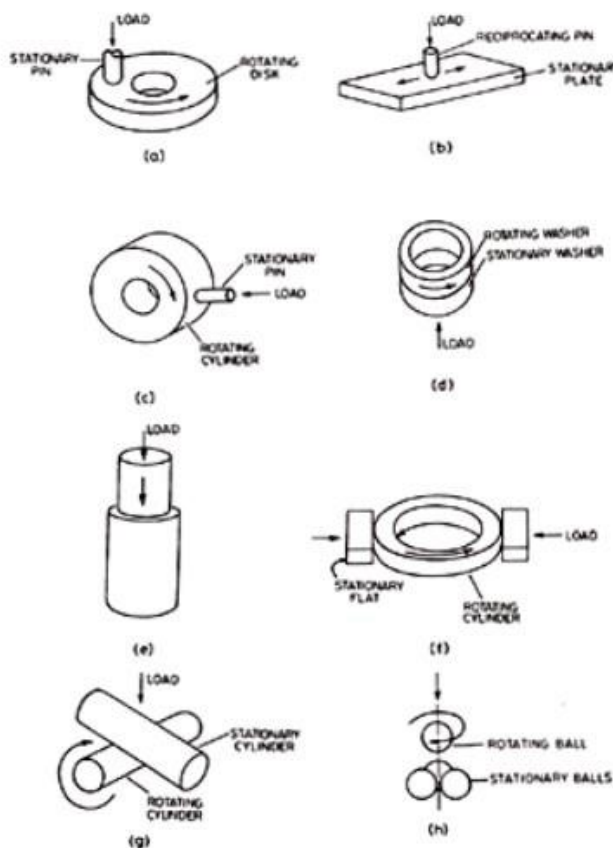
Με τις δοκιμές ταχείας τριβής – φθοράς αξιολογείται η αντίσταση των υλικών σε τριβή και φθορά, με σκοπό τη βελτιστοποίηση επιλογής υλικών ή και των κατεργασιών τους για εξειδικευμένες εφαρμογές. Τα υλικά αξιολογούνται και κατατάσσονται μέσω δοκιμών τριβής – φθοράς με αποτελέσματα τα περισσότερο υποσχόμενα να δοκιμάζονται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (function tests). Για τη μείωση της διάρκειας των δοκιμών πραγματικών συνθηκών, οι δοκιμές μπορεί να γίνουν για χρόνο μικρότερο της διάρκειας ζωής του υλικού. Αυτό μπορεί να γίνει συλλέγοντας τόσα στοιχεία και αποτελέσματα τριβής και φθοράς σε ενδιάμεσες καταστάσεις, ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής – λειτουργίας του υλικού η και με την επιβολή πιο έντονων συνθηκών τριβής να είναι δυνατή η πρόβλεψη του χρόνου ζωής του υλικού κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Οι δοκιμές ταχείας τριβής – φθοράς πρέπει να προσομοιάζουν με ακρίβεια τις συνθήκες πραγματικής λειτουργίας του εξεταζόμενου τριβοσυστήματος για να μπορεί να βρεθεί εμπειρικά μια σχέση μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πραγματικής λειτουργίας ώστε οι ακόλουθες δοκιμές πραγματικών συνθηκών να ελαχιστοποιηθούν, εξοικονομώντας αξιοσημείωτο χρόνο πειραμάτων. Βεβαίως, για μια τέτοια σειρά πειραμάτων είναι επιθυμητή η τυποποίηση, η επαναληψιμότητα, η μικρή διάρκεια δοκιμών και οι απλές μέθοδοι μέτρησης και αξιολόγησης (Bushan and Gupta, 1991).

5.1.2 Μέθοδοι μέτρησης τριβής

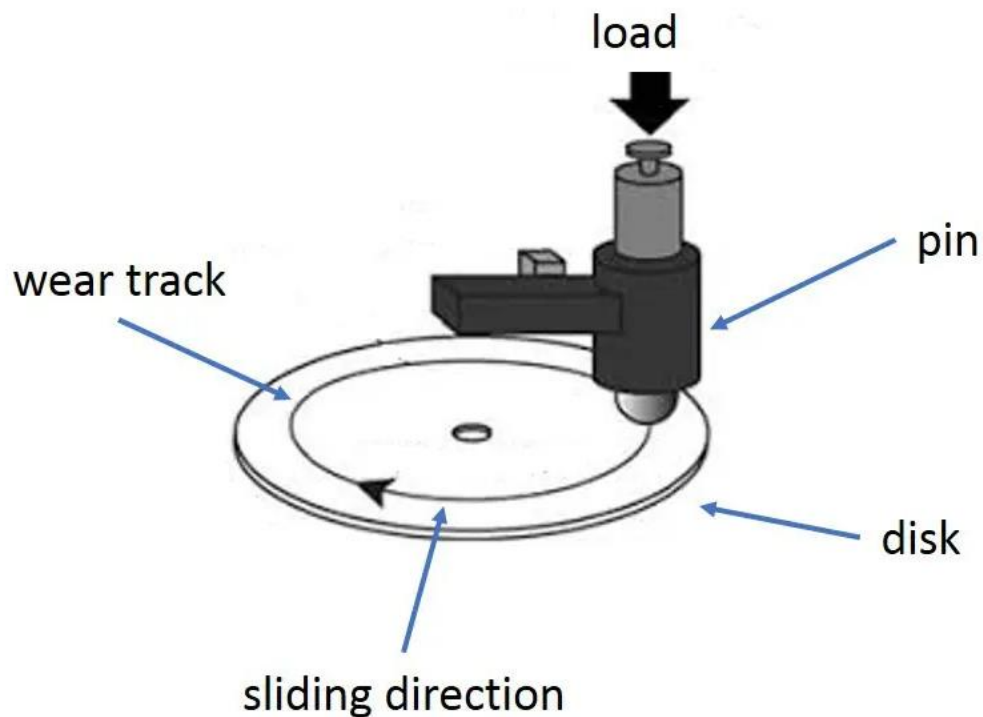
Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται ως γνωστόν από το λόγο της δύναμης τριβής προς το εφαρμοζόμενο κάθετο φορτίο ($\mu = F_t/N$). Συνήθως στις δοκιμές τριβής – φθοράς το ένα μέρος του τριβοσυστήματος παραμένει ακίνητο, σταθερά συνδεδεμένο σε εύκαμπτο στέλεχος της συσκευής μέτρησης. Η δύναμη τριβής (η δύναμη δηλαδή που απαιτείται για την συγκράτηση του ακίνητου μέρους), μετράται με χρήση ηλεκτροεπιμηκυνσιομέτρων (strain-gauge transducers) ή με αισθητήρες μετατόπισης (χωρητικοί ή οπτικοί αισθητήρες).

Η πιο συνηθισμένη συσκευή που χρησιμοποιείται για δοκιμές τριβής είναι το τριβόμετρο. Ο σχεδιασμός του τριβομέτρου και ο τρόπος λειτουργίας του εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου τριβοσυστήματος (γεωμετρία, υλικό, συνθήκες, λίπανσης κ.ά.)



Εικόνα 5.1 Τυπικές γεωμετρίες για δοκιμές τριβής – φθοράς υιοθετημένη από (Rocha, et al., 2004).

Πιο διαδεδομένη από όλες τις παραπάνω, είναι η μέθοδος τριβής στυλίσκου δίσκου (pin-on-disk) η οποία και χρησιμοποιήθηκε για της ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας. Στη συγκεκριμένη μέθοδο ο στυλίσκος είναι κατασκευασμένος από το ένα υλικό του τριβοσυστήματος και ο δίσκος από το άλλο. Ο στυλίσκος πιέζεται κάθετα πάνω στο περιστρεφόμενο δίσκο και ολισθαίνει στην επιφάνεια του προσομοιάζοντας έτσι την ολίσθηση κατά την λειτουργία του τριβοσυστήματος σε πραγματικές συνθήκες (**Εικόνα 5.2**). Μετά το τέλος της δοκιμής μετράται η φθορά του στυλίσκου και του δίσκου με διάφορες μεθόδους, ανάλογα με το σχεδιασμό της δοκιμής τριβής και διεξάγονται συμπεράσματα για την τριβική συμπεριφορά του τριβοσυστήματος.



Εικόνα 5.2 Μέθοδος δοκιμής τριβής στυλίσκου – δίσκου υιοθετημένη από (Kaushik, et al., 2022).

5.1.3 Μέθοδοι μέτρησης φθοράς

Συνήθεις μέθοδοι μέτρησης φθοράς είναι η μέτρηση της απώλειας βάρους (weight loss), της απώλειας όγκου (volume loss), του πλάτους ή του βάθους της αύλακας φθοράς ή άλλων γεωμετρικών μεγεθών. Εκτός από τις παραπάνω, που αποτελούν μεθόδους άμεσης μέτρησης τις φθοράς, εφαρμόζονται κι άλλες μέθοδοι έμμεσης μέτρησης φθοράς, όπως η μέτρηση του απαιτούμενου χρόνου για την φθοράς ενός υλικού ή του απαιτούμενου φορτιού που θα πρέπει να εφαρμοστεί για να προκαλέσει ορισμένη φθορά ή μεταβολή της ποιότητας της επιφάνειας. Η μέτρηση μικροσκοπικής φθοράς γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM). Άλλες λιγότερο συνηθισμένες τεχνικές είναι η ραδιογραφία (radioactive decay) και η μικροσκοπία σάρωσης σήραγγος τύπου STM (scanning tunneling microscopy). Η διακριτική ικανότητα της κάθε μεθόδου είναι αυτή που τις διαχωρίζει και που αποτελεί τελικά κριτήριο για την επιλογή τους ανάλογα με το είδος και τις απαιτήσεις της δοκιμής (Kaushik, et al., 2022).

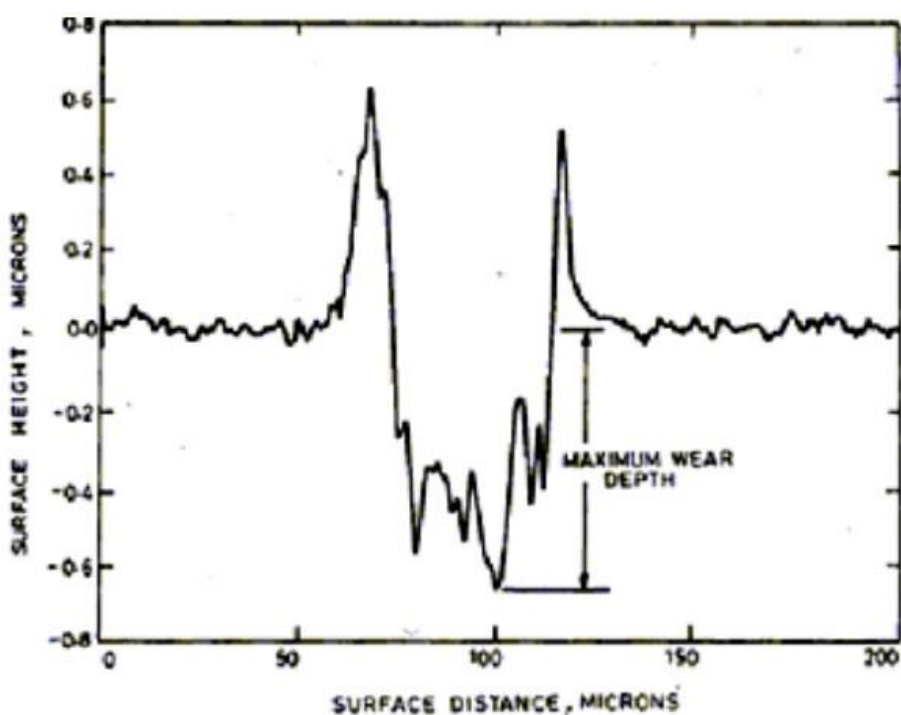
Πίνακας 5.1 Διακριτική ικανότητα διαφόρων μεθόδων μέτρησης φθοράς υιοθετημένος από (Neale, Polak and Priest, 2003).

Μέθοδος μέτρησης φθοράς	Διακριτική ικανότητα
Απώλεια μάζας	10 – 100 μg
Αντιενεργά ισότοπα	1 pg
Προφιλόμετρο τύπου στυλίσκου	25 – 50 nm
Οπτικό προφιλόμετρο	0,5 – 2 nm
Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM)	0,1 nm
Μικροσκοπία σάρωσης σήραγγος	0,02 – 0,05 nm

Η μέθοδος μέτρησης της απώλειας βάρους χρησιμοποιείται για μεγάλα μεγέθη φθοράς, με αποτέλεσμα να έχει δυο σημαντικούς περιορισμούς. Πρώτον η φθορά είναι πρωτίστως αποτέλεσμα του όγκου του υλικού που απομακρύνεται ή μετατοπίζεται. Άρα αυτή η μέθοδος μπορεί να δώσει λανθασμένα αποτελέσματα αν τα συγκρινόμενα υλικά έχουν διαφορετική πυκνότητα. Δεύτερον δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί φθορά από μετατόπιση του ίδιου του υλικού ή από πρόσφυση του ανταγωνιστικού υλικού στην περιοχή φθοράς. Για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή ενδείκνυται μόνο όταν η φύση του υλικού είναι τέτοια που δεν επιτρέπει μετατόπιση του υλικού (ή πρόσφυση του

ανταγωνιστικού υλικού) λόγω πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της φθοράς. Επίσης στην περίπτωση μέτρησης της φθοράς πολύ λεπτών δοκιμίων υλικού όπου η φθορά είναι πολύ μικρή, η παραπάνω μέθοδος δεν προσφέρει την απαιτούμενη ακρίβεια.

Στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η χρήση της μεθόδου μέτρησης απώλειας βάρους, χρησιμοποιείται η μέθοδος μέτρησης του όγκου φθοράς με κατατομομετρία της φθαρμένης επιφάνειας (**Εικόνα 5.3**). Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η μέτρηση όχι μόνο του όγκου του αποβαλλομένου υλικού αλλά και του μετατοπιζόμενου λόγω πλαστικής παραμόρφωσης στα όρια της φθαρμένης περιοχής. Επομένως με τη μέθοδο αυτή δεν ισχύουν οι περιορισμοί της μεθόδου μέτρησης αποβαλλομένου βάρους, με αποτέλεσμα να υπερισχύει αφού προσφέρει και μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης.



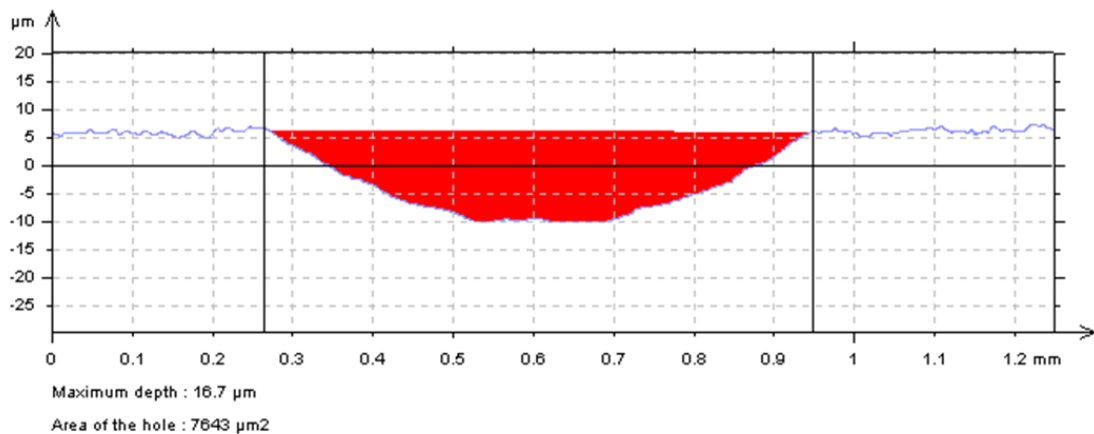
Εικόνα 5.3 Κατατομή αύλακας φθοράς με κατατομόμετρο (stylus profiler) υιοθετημένη από (Neale, Polak and Priest, 2003).

5.2 Επιλογή μεθόδων μέτρησης Τριβής – Φθοράς

5.2.1 Ανάλυση μεθόδου

Για την μελέτη της τριβολογικής συμπεριφοράς του δείγματος που κατασκευάσαμε επιλέχθηκε η μέθοδος δοκιμής τριβής στυλίσκου – δίσκου (pin-on-disk). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι δοκιμές τριβής – φθοράς προσομοιάζουν την πραγματική λειτουργία ενός τριβοσυστήματος. Για το λόγο αυτό το ένα υλικό του τριβοσυστήματος αποτελεί το στυλίσκο και το άλλο το δίσκο. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν μελετάται η τριβολογική συμπεριφορά ενός τριβοσυστήματος ώστε να μετρηθεί η φθορά και οι επιπτώσεις της ολίσθησης και στα δύο υλικά. Αφού λοιπόν μελετάται το ένα μόνο υλικό, απαιτείται κάποια αλλαγή στο σχεδιασμό της δοκιμής που σχετίζεται με την επιλογή (υλικό - γεωμετρία) του στυλίσκου. Οι δοκιμές τριβής – φθοράς θα πρέπει να σχεδιαστούν έτσι, ώστε το υλικό του στυλίσκου να αποτελεί υλικό αναφοράς ως προς το υλικό των δοκιμίων στις τρεις καταστάσεις του.

Για τη μέτρηση της φθοράς των δοκιμίων για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η μέθοδος μέτρησης του όγκου φθοράς με τη βοήθεια προφίλομέτρου. Η επιλογή της μεθόδου έγινε με βάση τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης σειράς πειραμάτων τριβής – φθοράς. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου ήταν το αναμενόμενο μικρό μέγεθος φθοράς εξαιτίας της γεωμετρίας της επαφής και της σκληρότητας του εξεταζόμενου υλικού. Επίσης οι τρεις διαφορετικοί ανταγωνιστές που χρησιμοποιήθηκαν δεν εγγυώνται ανάπτυξη του ίδιου μηχανισμού φθοράς κατά την ολίσθηση, με αποτέλεσμα την πιθανότητα φθοράς όχι μόνο με απομάκρυνση υλικού αλλά και μετατόπισης του γύρω από την φθαρμένη επιφάνεια λόγω πλαστικών παραμορφώσεων. Στη περίπτωση αυτή, δεν θα ήταν αποτελεσματική για παράδειγμα η μέτρηση της απώλειας βάρους γιατί δεν θα ήταν δυνατό να μετρηθεί το μετατοπισμένο υλικό το οποίο σαφώς αποτελεί φθορά (**Εικόνα 5.4**) (Bushan and Gupta, 1991).



Εικόνα 5.4 Εκτίμηση όγκου φθοράς με κατατομετρία αύλακας φθοράς

5.2.2 Κύριος πειραματικός εξοπλισμός

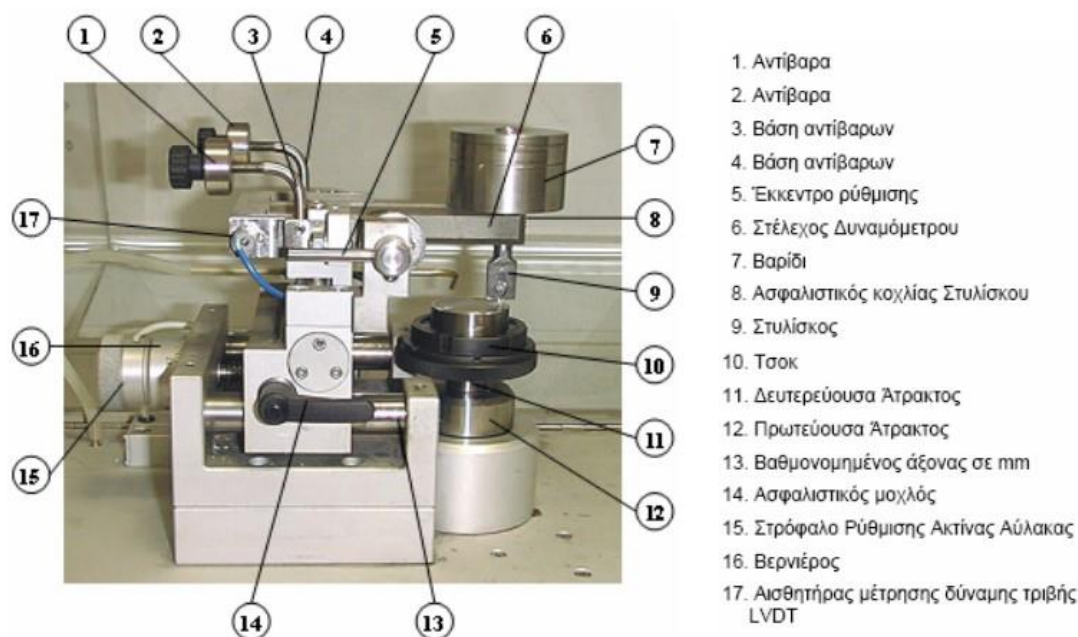
Ο κύριος πειραματικός εξοπλισμός αποτελείται από α) το τριβόμετρο με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές τριβής, β) το τραχύμετρο – προφιλόμετρο με το οποίο έγινε η εκτίμηση του όγκου φθοράς και γ) τον Η/Υ με τον οποίο συνδέεται και το τριβόμετρο και το τραχύμετρο (Εικόνα 5.5). Ο Η/Υ είναι εξοπλισμένος με το κατάλληλο λογισμό ώστε να έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μετρήσεις από τον υπόλοιπο εξοπλισμό και τις επεξεργάζεται σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε δοκιμής τριβής – φθοράς.



Εικόνα 5.5 Κυρίως πειραματικός εξοπλισμός

5.2.3 Τριβόμετρο

Οι δοκιμές τριβής – φθοράς έγιναν με τη βοήθεια του τριβομέτρου του εργαστηρίου Τριβολογίας του ΠΑ.Δ.Α. Το συγκεκριμένο είναι τριβόμετρο τύπου στυλίσκου – δίσκου (pin-on-disk) της εταιρείας CSM-Instruments (Εικόνα 5.6).

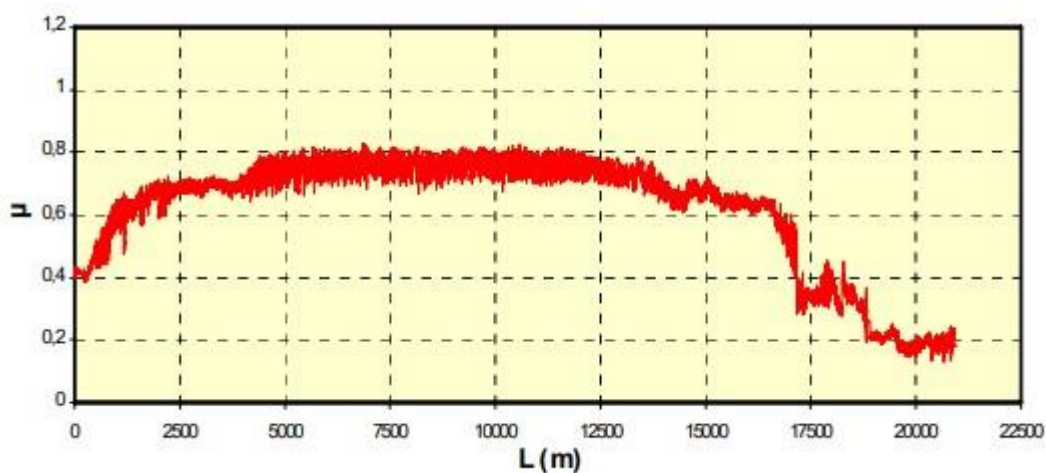


Εικόνα 5.6 Τριβόμετρο csm-instruments

Αρχή λειτουργίας τριβομέτρου

Ένας δίσκος ο οποίος αποτελεί το δοκίμιο, περιστρέφεται με γνωστή ταχύτητα περιστροφής. Στην επιφάνεια του δίσκου – δοκιμίου ολισθαίνει το ανταγωνιστικό υλικό – στυλίσκος υπό γνωστό κάθετο φορτίο. Ο στυλίσκος είναι άκαμπτος και σχεδιασμένος έτσι, ώστε να μην προκαλεί τριβή. Εφαρμόζει στο στέλεχος ενός δυναμόμετρου τύπου “Ω” δρώντας ουσιαστικά ως μετατροπέας της δύναμης τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνειας του δοκιμίου και της ακίδας του στυλίσκου. Η δύναμη τριβής μετράτε από τις μετακινήσεις του στελέχους του δυναμόμετρου μέσω ενός αισθητήρα LVDT (Low Voltage Distance Transducer).

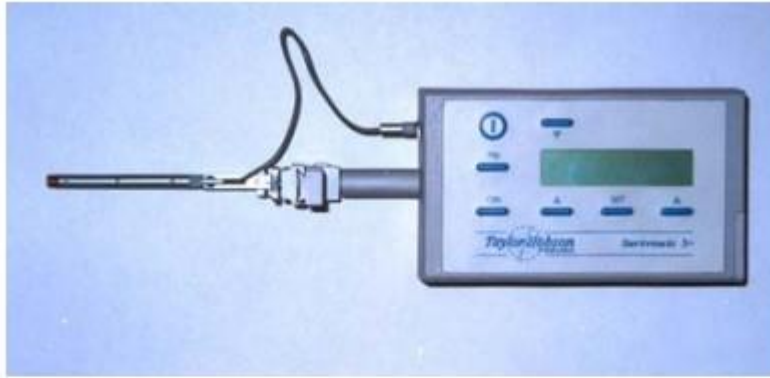
Το τριβόμετρο συνδέεται με Η/Υ ο οποίος είναι εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να λαμβάνει συνεχώς μετρήσεις της δύναμης τριβής και να σχεδιάζει σε πραγματικό χρόνο το διάγραμμα του συντελεστή τριβής μ ως προς το μήκος ολίσθησης το χρόνο και τον αριθμό περιστροφών του δοκιμίου (**Εικόνα 5.7**).



Εικόνα 5.7 Διάγραμμα συντελεστή τριβής συναρτήσει του μήκους ολίσθησης (τριβόμετρο csm-instruments)

5.2.4 Ταχύμετρο – Κατατομόμετρο

Για την εκτίμηση της φθοράς των δοκιμίων επιλέχθηκε όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μέθοδος μέτρησης του όγκου φθοράς. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών τριβής με το τριβόμετρο λόγω της περιστροφής του δοκιμίου δημιουργείται στην επιφάνεια μια κυκλική αύλακα φθοράς, με ακτίνα που ορίζεται στην αρχή της δοκιμής. Με την κατατομή της αύλακας είναι δυνατό να γίνει εκτίμηση του όγκου φθοράς. Η κατατομομετρία και η τραχυμέτρηση των δοκιμίων έγινε με τη βοήθεια του τραχυμέτρου – κατατομόμετρου του εργαστηρίου Τριβολογίας του ΠΑ.Δ.Α. Η συγκεκριμένη συσκευών είναι τύπου (stylus profiler) της εταιρείας Taylor-Hobson (**Εικόνα 5.8**).



(α)



(β)

Εικόνα 5.8 (α),(β) Τραχύμετρο-προφιλόμετρο taylor-hobson

Όπως και το τριβόμετρο, έτσι και το τραχύμετρο – προφιλόμετρο συνδέεται με τον Η/Υ και με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού επεξεργάζεται την κατατομή της επιφάνειας.

5.3 Επιλογή ανταγωνιστικού υλικού

Ο σχεδιασμός του εργαστηριακού τριβομέτρου με το οποίο έγιναν οι δοκιμές τριβής – φθοράς, προβλέπει τη χρήση ενός κυλίνδρου στελέχους (στυλίσκου) το οποίο εφαρμόζει στην άκρη ενός δυναμόμετρου τύπου «ωμέγα» (“Ω” type). Το στέλεχος αυτό φέρει στην άκρη του σφαίρα διαμέτρου $d = 6 \text{ mm}$, η οποία είναι αυτή που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου (**Εικόνα 5.9**). Η σφαίρα εφαρμόζει στο στέλεχος με τέτοιο τρόπο ώστε να μην κυλιέται πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου

κατά τη διάρκεια του πειράματος, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό τριβή ολίσθησης. Το υλικό της σφαίρας επιλέγεται ανάλογα με τη σκληρότητα και τη φύση του υλικού του δοκιμίου, ανάμεσα στις προτάσεις του κατασκευαστή (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες υλικών σφαίρας στυλίσκου (csm-instruments)

Properties	Unit	Sap- phire	Ruby	Alu- mina	Silicon Nitride HP	Silicon Nitride sintered	Silicon Carbide	Zirconia Y- TZP	Zirconia Mg-PSZ/ Y-PSZ	Tungsten Carbide	Stainless Steel
Crystallisation	-	Mono	Mono	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly
Composition (wt %)	-	Al ₂ O ₃	99% Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	SiC	ZrO ₂	ZrO ₂	WC(6T10)	
Purity	%	99.99	1% ~ Cr ₂ O ₃	99.80	90	90	(-)	90-95	90-95	WC94+Co 6	
Density	G/cm ³	3.99	3.99	3.1- 3.2	3.0-3.2	3.0-3.2	6.0	6.05	5.8	15	
Hardness HV	N/mm ²	23000	23000	19000	16000	15500	24000- 28000	11000- 15000	15000	15500	5000- 8000
Compression strength	N/mm ²	2100	2100	2800	3000	3000	1200- 2900	1800	2000	5300	1000
Tensile strength	N/mm ²	(-)	(-)	280	400	250	180	(-)	(-)	(-)	500-1500
Bending strength	N/mm ²	390	390	470	1000	600-800	300-600	700-1100	400-800	1600	450
Fracture toughness	Mpa.m ^{1/2}	1	1	4	6	6	4	10	8-10	(-)	30-80
Elasticity constant	Gpa	430	430	380	320	320	310	200	200	610	200
Thermal expansion	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	5.3	5.3	8.1	3.2	3.2	4.1	10.5	10.5	5.5	10-12
Thermal conductivity	W/m.K	36	36	29	40	40	85	2	2	50	50
Heat capacity	J/Kg.K	755	755	900	750	700	800	400	400	201	(-)
Max. use temp. in air	°C	1800- 2000	1800- 2000	1500- 1800	1200- 1500	1200- 1500	1600	1000	800-900	(-)	300-600
Chemical resistance	Acids bases	Excell ent Good	Excel. Good	Excel. Good	Excel. Good	Excellent Good	Good Good	Good Good	Good Good	Dissolves (-)	Bad Bad

Για τις ανάγκες των πειραματικών τριβής – φθοράς, ως υλικό της σφαίρας του στυλίσκου χρησιμοποιήθηκε η αλουμίνα ή αλλιώς οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃). Η επιλογή του έγινε με βάση τη σκληρότητα της επιφάνειας των δοκιμίων, αφού για τη πρόκληση φθοράς στο στρώμα του δείγματος απαιτείται χρήση πολύ σκληρότερου υλικού.



Εικόνα 5.9 Στυλίσκος τρίμετρου με σφαίρα αλουμίνας Al₂O₃

5.4 Πειράματα Τριβής – Φθοράς

5.4.1 Γενικά

Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός τριβοσυστήματος σε συνθήκες ξηράς τριβής είναι η γραμμική ταχύτητα ολίσθησης, το φορτίο, τα υλικά του τριβικού ζεύγους και η θερμοκρασία. Θεωρώντας την έτσι κι αλλιώς πολύ χαμηλή αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αμελητέα, και διατηρώντας την ίδια γραμμική ταχύτητα ολίσθησης σε όλες τις δοκιμές, το σύστημα από τετραπαραμετρικό μετατρέπεται σε διπαραμετρικό. Με τον τρόπο αυτό απλουστεύεται η μελέτη αφού εξετάζεται μόνο η επίδραση του φορτίου και η κατάσταση του υλικού, οι οποίες είναι και οι σημαντικότερες παράμετροι κατά τη λειτουργία ενός τριβοσυστήματος. Επίσης η παρούσα εργασία δεν έχει στόχο τη προσομοίωση με σκοπό τη βελτίωση της λειτουργίας ενός τριβοσυστήματος, αλλά την αξιολόγηση ενός υλικού ως προς την αντίστασή του σε τριβή και φθορά.

5.4.2 Μεθοδολογία μετρήσεων

Για την ακριβέστερη αξιολόγηση της αντιτριβικής συμπεριφοράς του υλικού δεν αρκούσε μόνο η καταγραφή του συντελεστή τριβής και του συνολικού όγκου φθοράς μετά από κάθε δοκιμή. Ουσιαστικά ο ρυθμός φθοράς είναι το πλέον χαρακτηριστικό μέγεθος που αφορά στην αντίσταση σε φθορά των υλικών. Το ποσο γρηγορότερα η αργότερα φθείρεται ένα υλικό από ένα άλλο υπό τις ίδιες συνθήκες δείχνει ποσο λιγότερη ή μεγαλύτερη αντίσταση σε φθορά έχει σε σχέση πάντα με το άλλο υλικό.

Για τη μέτρηση του ρυθμού φθοράς θα έπρεπε να λαμβάνονται ενδιάμεσες μετρήσεις του όγκου του αποβαλλόμενου υλικού κατά τη διάρκεια των δοκιμών τριβής. Αυτό απαιτούσε παύση των δοκιμών τριβής και μέτρηση του όγκου φθοράς τη δεδομένη στιγμή με χρήση του τραχύμετρου – κατατόμετρου, χωρίς τη μετακίνηση του δοκιμίου – δίσκου από το τριβόμετρο, και μάλιστα με διατήρηση της επαφής του στυλίσκου μέσα στην επιφάνεια του δοκιμίου έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ακριβής θέση της ακμής του στυλίσκου μέσα στην αύλακα και επομένως η ομαλή συνέχεια της δοκιμής τριβής. Ο τρόπος μέτρησης του όγκου φθοράς ενδιάμεσα των δοκιμών τριβής παρουσιάζεται στην εικόνα του **(Εικόνα 5.10)**.

Από τη κατατομή της αύλακας φθοράς υπολογίζεται το εμβαδό της τομής της αύλακας μέσω H/Y και του ηλεκτρονικού προγράμματος επεξεργασίας των δεδομένων του ταχυμέτρου – κατατομόμετρου. Η τιμή του όγκου φθοράς προκύπτει από το γινόμενο του εμβαδού της αύλακας επί της περιμέτρου της αύλακας η οποία υπολογίζεται εύκολα αφού είναι γνωστή η ακτίνα τη

$$V_w = E_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot R$$

Όπου : E_s , το εμβαδόν της κάθετης τομής της αύλακας ολίσθησης και

R , η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς ολίσθησης.

Μια δοκιμή τριβής – φθοράς έφτανε στο τέλος της όταν το βάθος της αύλακας φθοράς προσέγγιζε 220-250 μm .



Εικόνα 5.10 Τρόπος λήψης ενδιάμεσης μέτρησης του όγκου φθοράς

5.4.3 Στατιστικός έλεγχος μετρήσεων φθοράς

Λόγω της ιδιομορφίας και του τρόπου φθοράς του υλικού η γεωμετρία της αύλακας φθοράς δεν ήταν δυνατό να είναι ομοιόμορφη. Για το λόγο αυτό μια και μόνη μέτρηση του εμβαδού της κατατομής της αύλακας σε ένα τυχαίο σημείο της περιφέρειας της δεν θα μπορούσε να οδηγήσει σε αξιόπιστη μέτρηση του όγκου φθοράς. Επομένως το πλήθος των ενδιάμεσων μετρήσεων του εμβαδού της κατατομής της αύλακας ώστε να εκτιμηθεί ο ρυθμός φθοράς του εκάστοτε υλικού θα έπρεπε να ήταν τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και η ακρίβεια των μετρήσεων. Μετα από στατιστικό έλεγχο κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών δοκιμών, κρίθηκε πως έπρεπε να γίνονται τουλάχιστον 10 μετρήσεις του εμβαδού της κατατομής της αύλακας φθοράς σε δέκα τυχαία σημεία της περιφέρειας της, ώστε ο μέσος ορός των μετρήσεων αυτών να χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του όγκου φθοράς (Αλεξανδρόπουλος, et al., 1994).

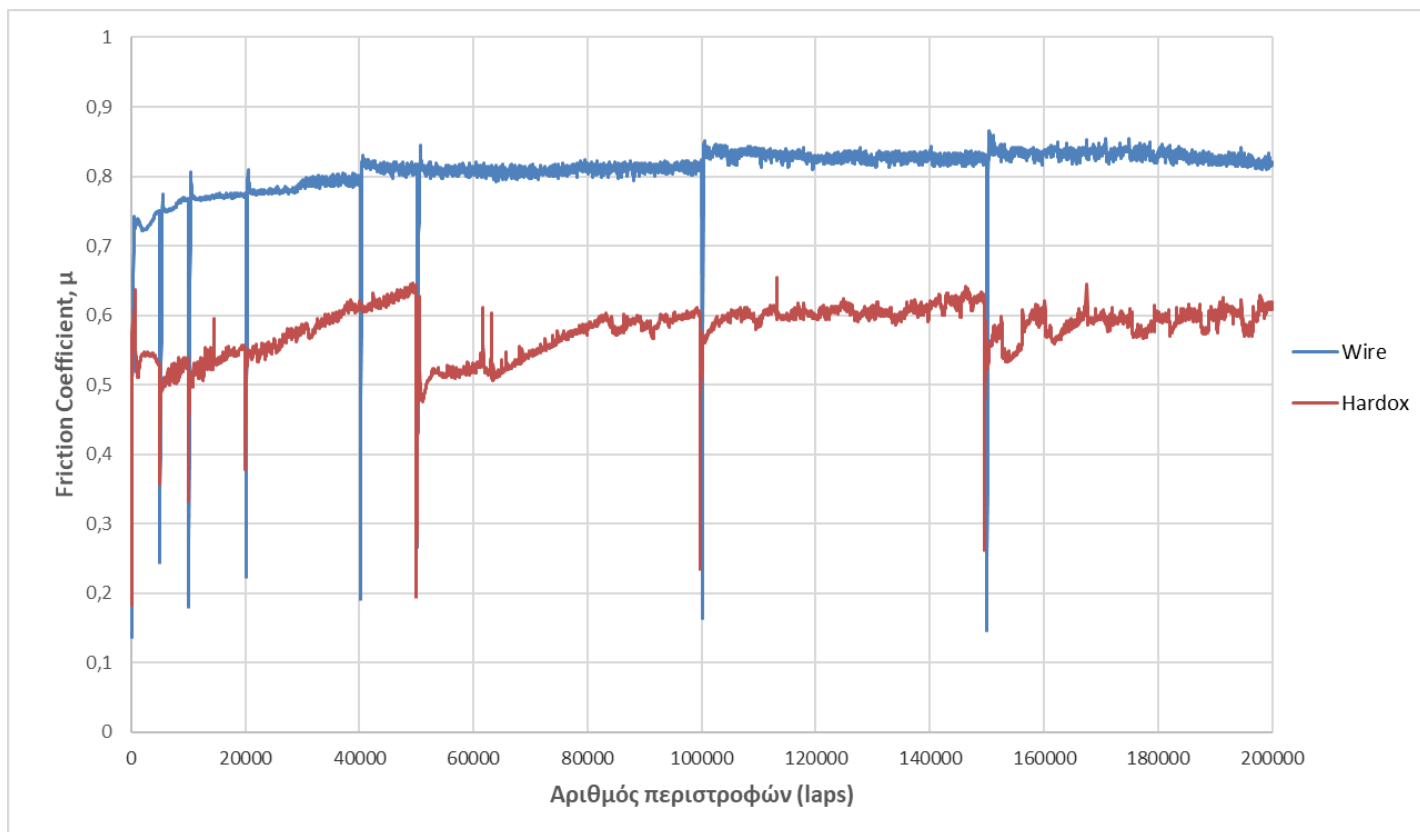
5.4.4 Δοκιμές Τριβής – Φθοράς

Μετα την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω διαδικασιών ακολουθήσαν οι κύριες δοκιμές τριβής – φθοράς σύμφωνα με τον πειραματικό σχεδιασμό. Τα μεγέθη που μετρήθηκαν εκτός από τον συντελεστή τριβής, ήταν το εμβαδό της αύλακας φθοράς καθώς και το μέγιστο βάθος της. Από τα μεγέθη αυτά προέκυψαν ο συνολικός κάθε φορά όγκος φθοράς και ο ρυθμός φθοράς του υλικού. Η συλλογή και σύγκριση των αποτελεσμάτων και των πειραματικών δεδομένων οδήγησε στην διεξαγωγή συμπερασμάτων και τον χαρακτηρισμό της τριβολογικής συμπεριφοράς του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη εκτύπωση του δείγματος.

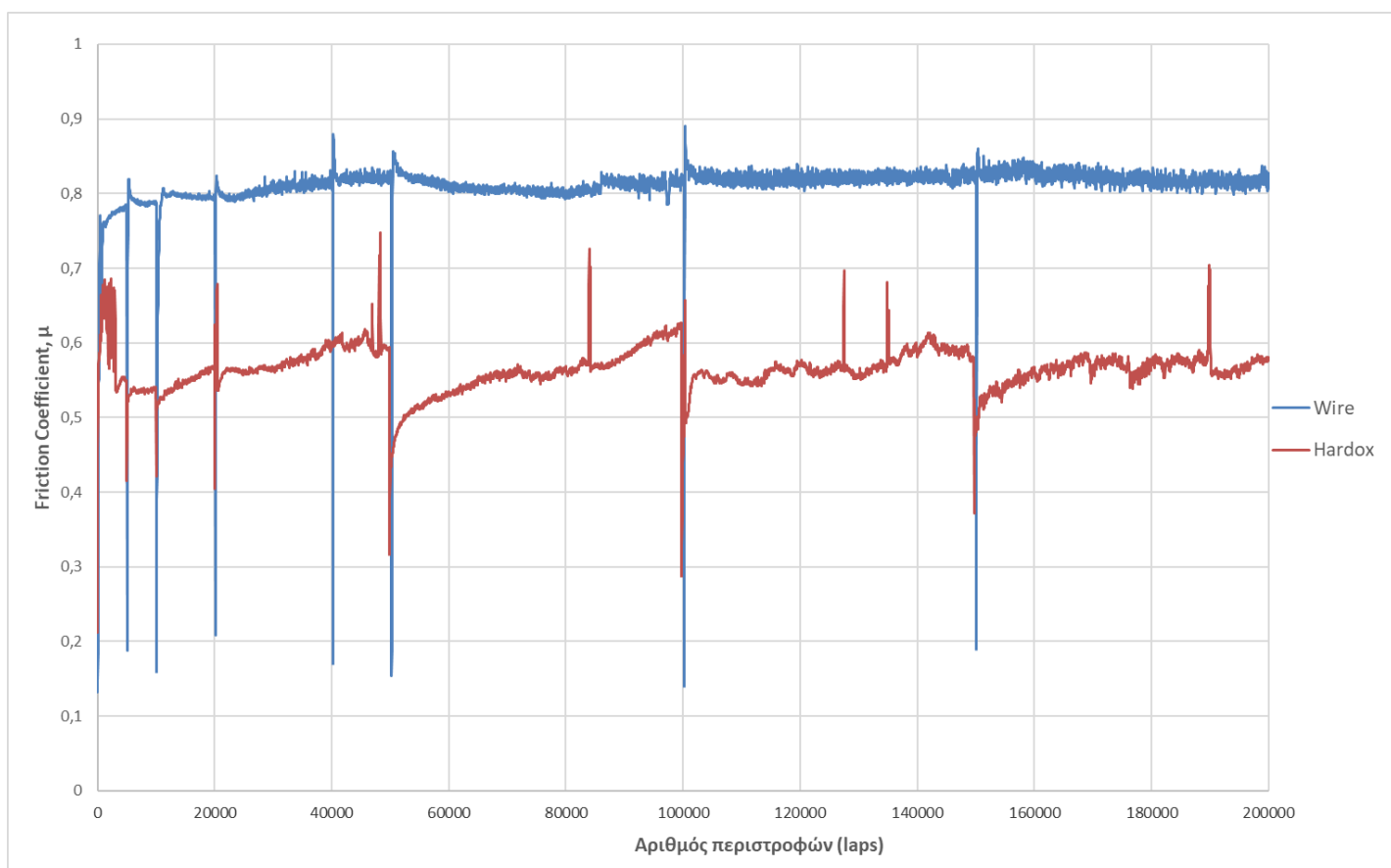
5.5 Τριβολογική συμπεριφορά δείγματος

Για την αξιολόγηση των τριβολογικών ιδιοτήτων του δείγματος το οποίο δημιουργήσαμε εκτελέστηκαν οι κατάλληλες δοκιμές με τον εξοπλισμό αλλά και την μέθοδο που αναφέραμε στις προηγούμενες υποενότητες για φορτίο 5 και 10 Newton τόσο για δοκίμια που αποτελούνται από το υλικό της κλιμακούμενης πειραματικής πλάκας που κατασκευάσαμε όσο και για δοκίμια που αποτελούνται από χάλυβα (Hardox). Τα αποτελέσματα αυτών των δοκίμων συγκρίνονται με σκοπό την μελέτη της τριβολογικής συμπεριφοράς του υλικού από το οποίο αποτελείται το δείγμα. Από τα διαγράμματα του συντελεστή της τριβής συναρτήσει του αριθμού περιστροφών (Εικόνα 5.12 και Εικόνα 5.13) παρατηρείται ότι ο συντελεστής τριβής κυμαίνεται από 0,48 έως 0,64 για τον χάλυβα ενώ για το υλικό του δείγματος κυμαίνεται από 0,72 έως 0,87. Η διακύμανση του συντελεστή τριβής είναι μικρή για το υλικό το δείγματος και οφείλεται στις μικρές διαφορές των εφαρμοσμένων φορτίων που προκαλούν μικρές διαφορές στις τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα φαινόμενα που προκαλούν τριβή. Η σταθερότητα του συντελεστή τριβής οφείλεται στην ομοιογένεια και στην σταθερότητα της σκληρότητας του υλικού με αποτέλεσμα να μην αλλάζει κατι ουσιαστικό στο τριβόσύστημα. Έπειτα παρατηρείται πως σε αντίθεση με τον συντελεστή τριβής του υλικού του δείγματος ο συντελεστής του χάλυβα παρουσιάζει και στα δυο διαγράμματα για φορτίο 5 και 10 Newton αντίστοιχα αυξομειώσεις οι

οποίες οφείλονται στην εμφάνιση ψηγμάτων φθαρμένου υλικού στην αύλακα φθοράς. Για αυτό το λόγο και κατά την παύση της δοκιμής για την διαδικασία λήψης μετρήσεων του όγκου φθοράς παρατηρείται μείωση του συντελεστή τριβής καθώς καθαρίζεται η αύλακα φθοράς από τα ψήγματα φθαρμένου υλικού και έπειτα κατά την επανεκκίνηση της δοκιμής σημειώνεται σταδιακή αύξηση του συντελεστή συναρτήσεως του αριθμού περιστροφών. Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων τριβής βλέπουμε ότι στην αρχή ο συντελεστής τριβής παρουσιάζει μια κλίση λόγω της αρχικής μεταβατικής περιόδου (running-in period) των επιφανειών και μετα παραμένει σχεδόν σταθερός κατά τη διάρκεια της δοκιμής με μικρές διακυμάνσεις. Η μικρή διακύμανση του συντελεστή τριβής οφείλεται στην αύξηση της επιφάνειας επαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων αλλά και τον επηρεασμό των τριβικών διαδικασιών που επηρεάζονται από την μορφή και το μέγεθος της επιφάνειας επαφής (π.χ. όγκος παραμορφωμένου υλικού). Ακόμη η διακύμανση του συντελεστή τριβής εξαρτάται και από άλλα φαινόμενα που μπορούν να συμβούν όπως συσσώρευση παραμορφωμένου υλικού στις παρειές της αύλακας φθοράς, συμμετοχή των σωματιδίων φθοράς στις διαδικασίες τριβής, μεγάλη τοπική αύξηση της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της επιφάνειας με αποτέλεσμα τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αλλά και την δημιουργία κάποιων μικροσυγκολλήσεων. Τα παραπάνω φαινόμενα ίσως να δίνουν μια πιθανή ερμηνεία της «πριονωτής» μορφής που έχουν τα διαγράμματα του συντελεστή τριβής. Ακόμη στην διακύμανση του συντελεστή τριβής κάποιο ρόλο παίζει και το γεγονός της παύσης της δοκιμής για τη λήψη των μετρήσεων του όγκου φθοράς επειδή απομακρύνονται από την επιφάνεια ψήγματα φθοράς, δίνεται χρόνος για να δημιουργηθούν οξείδια και να μειώνονται οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια για τους λόγους αυτούς στα σημεία αυτά παρατηρούνται και στα δυο διαγράμματα απότομες βυθίσεις. Αν συγκριθούν οι συντελεστές τριβής μεταξύ των δύο υλικών για ίδια φορτία παρατηρούμε ότι ο συντελεστής τριβής είναι μικρότερος για το υλικό του χάλυβα Hardox και για τα δυο φορτία. Αυτό οφείλεται στις ιδιότητες και στη δομή του υλικού, δηλαδή επειδή παρουσιάζει μικρή σκληρότητα από αυτή του δείγματος που δημιουργήσαμε.



Εικόνα 5.11 Συντελεστής τριβής μ υλικών συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 5 Newton

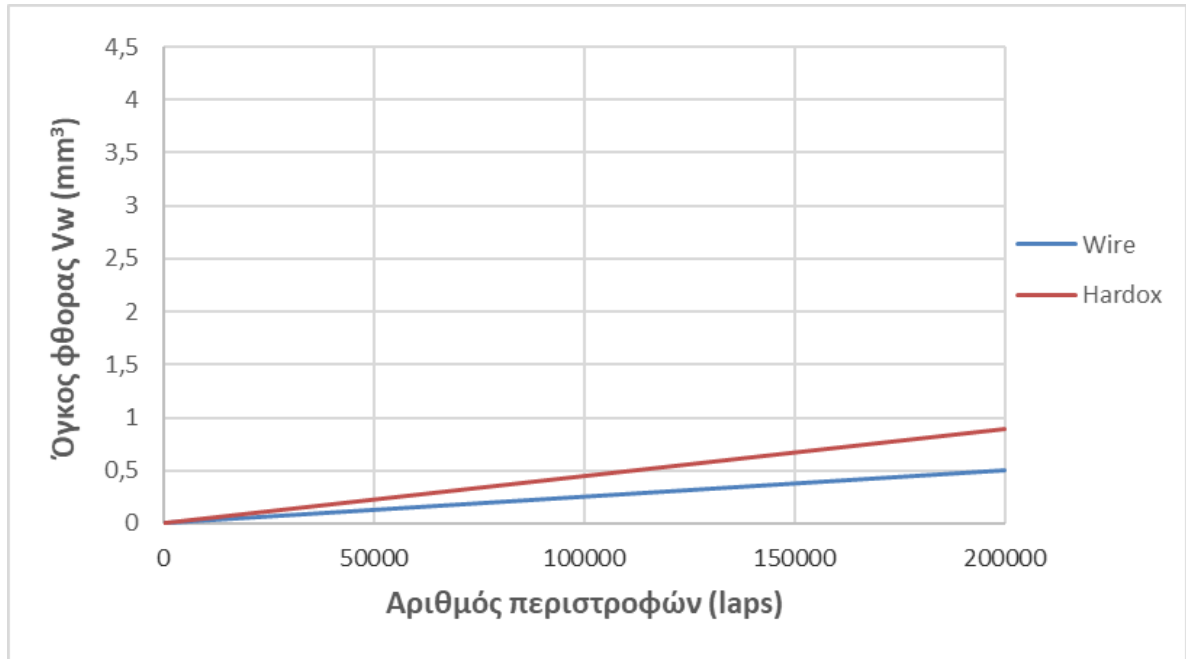


Εικόνα 5.12 Συντελεστής τριβής μ υλικών συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 10 Newton

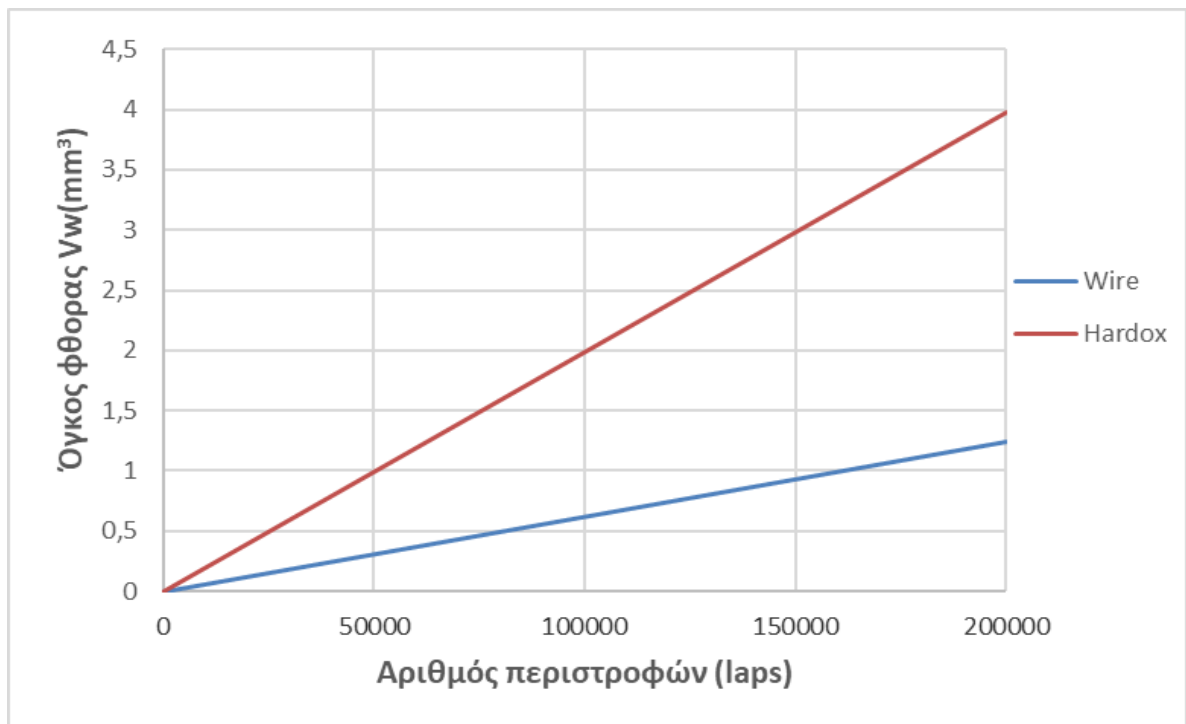
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου φθοράς συναρτήσει του αριθμού περιστροφών για τα δυο υλικά για 5 και 10 Newton αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα για τον όγκο φθοράς των δυο υλικών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 5.3**. Από το διάγραμμα του όγκου φθοράς (**Εικόνα 5.13** και **Εικόνα 5.14**) παρατηρείται η γραμμική μεταβολή του όγκου φθοράς ως προς τον αριθμό περιστροφών για το εύρος των φορτίων όπου δοκιμάστηκε το υλικό του δείγματος αλλά και ο χάλυβας Hardox. Αυτή γραμμική μεταβολή είναι αναμενόμενη για τον χάλυβα καθώς παρουσιάζει σταθερή δομή και σκληρότητα σε όλη την μάζα του. Από την άλλη όμως συμπεραίνουμε πως από την γραμμική μεταβολή του όγκου φθοράς συναρτήσει των αριθμών περιστροφών για το υλικό του δείγματος πως οι μεταβολές τόσο στην δομή όσο και στην σκληρότητα που επήλθαν από τους συνέχεις θερμικούς κύκλους δεν επηρεάζουν την συγκεκριμένη τριβολογική του ιδιότητα. Από τα διαγράμματα του όγκου φθοράς των δυο φορτίων παρατηρείται ότι με την αύξηση του φορτίου αυξάνεται και ο ρυθμός φθοράς κάθε υλικού επειδή με την αύξηση του φορτίου αυξάνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις και γίνεται πιο έντονη η καταπόνηση του υλικού με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Η φθορά του χάλυβα Hardox είναι πολύ υψηλότερη από την φθορά του υλικού από το οποίο αποτελείται το δείγμα, που σημαίνει ότι το υλικό του δείγματος παρουσιάζει υψηλότερη αντίσταση στη φθορά έναντι του χάλυβα.

Πίνακας 5.3 Όγκος φθοράς υλικών για φορτίο 5 και 10 Newton

Αριθμός περιστροφών (laps)	Wire		Hardox	
	Load: 5N Όγκος φθοράς (mm ³)	Load: 10N Όγκος φθοράς (mm ³)	Load: 5N Όγκος φθοράς (mm ³)	Load: 10N Όγκος φθοράς (mm ³)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
5000	0,023	0,048	0,178	0,235
10000	0,036	0,086	0,203	0,428
20000	0,063	0,125	0,252	0,598
50000	0,125	0,313	0,291	0,995
100000	0,250	0,625	0,452	1,990
150000	0,375	0,938	0,668	2,985
200000	0,500	1,247	0,890	3,980



Εικόνα 5.13 Όγκος φθοράς υλικών Vw συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 5 Newton



Εικόνα 5.14 Όγκος φθοράς υλικών Vw συναρτήσει αριθμού περιστροφών για φορτίο 10 Newton

Έπειτα από τα διαγράμματα του όγκου φθοράς εξήγαμε αποτελέσματα έτσι ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής φθοράς k των εξεταζόμενων υλικών από την **εξίσωση 5.1**

Εξίσωση 5.1
$$k = \frac{Vm}{F*SL}$$

όπου: Vm , μετρούμενος όγκος φθοράς σε mm^3

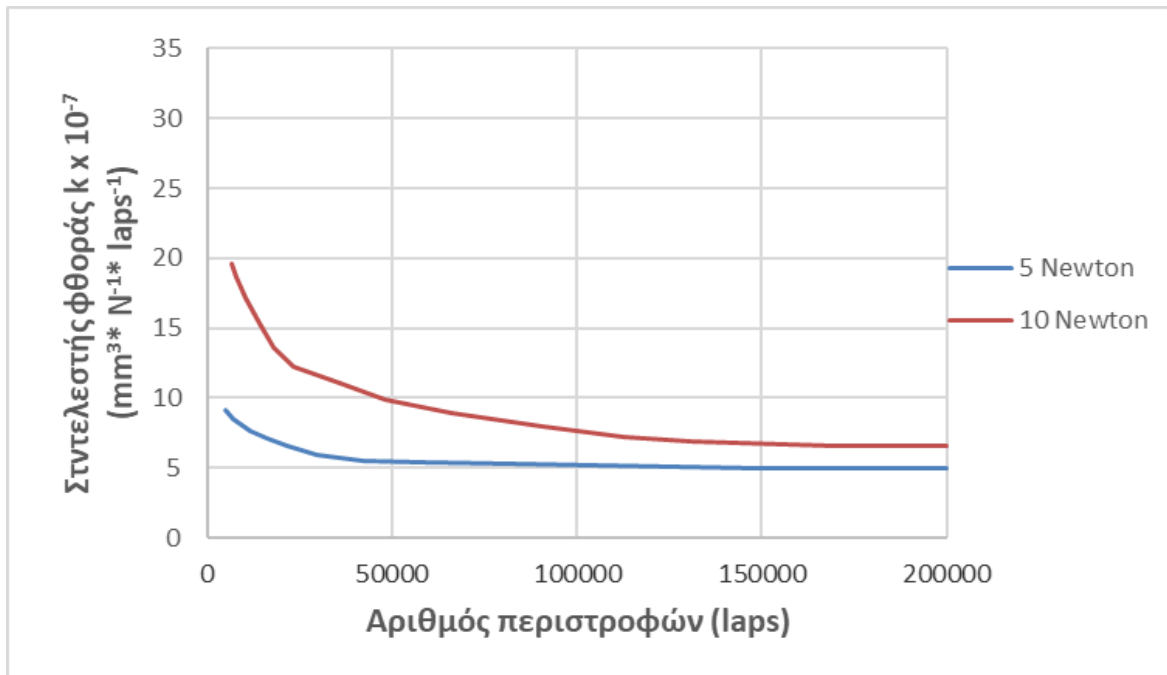
F , το επιβαλλόμενο φορτίο σε N

SL , ο προεπιλεγμένος αριθμός των κύκλων ολίσθησης

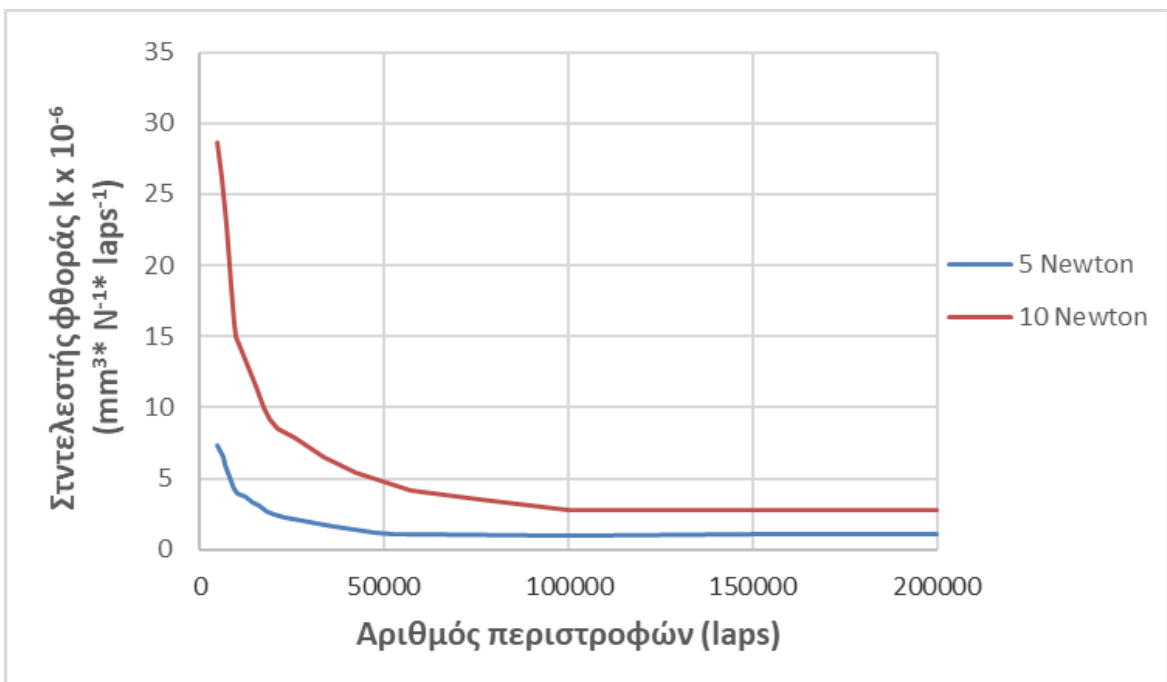
Οι τιμές που προέκυψαν από τον υπολογισμό του συντελεστή φθοράς για τα δυο υλικά σύμφωνα με την **εξίσωση 5.1** και χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των διαγραμμάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στον **Πίνακα 5.4** Στην **Εικόνα 5.15** και **Εικόνα 5.16** παρουσιάζετε η εξέλιξη του συντελεστή φθοράς k συναρτήσει των αριθμών περιστροφών για τα δυο επιβαλλόμενα φορτία για το υλικό του δείγματος που κατασκευάστηκε καθώς και του χάλυβα Hardox. Και στις δυο περιπτώσεις υλικών η αύξηση του επιβαλλόμενου φορτιού οδηγεί σε αύξηση των συντελεστών φθοράς. Ο συντελεστής φθοράς k αγγίζει την σταθερή κατάσταση μετά από 50.000 κύκλους ολίσθησης και για τα δυο υλικά τείνοντας στην τιμή $5,00*10^{-7}$ και $6,67*10^{-7} mm^3*N^{-1}*laps^{-1}$ για 5 και για 10 Newton αντίστοιχα για το υλικό του δείγματος ενώ για τον χάλυβα τείνει στην τιμή $1,04*10^{-6}$ και $2,83*10^{-6} mm^3*N^{-1}*laps^{-1}$ για 5 και για 10 Newton αντίστοιχα. Το υλικό του δείγματος εμφανίζει συμβατικά υψηλότερη αντοχή σε φθορά με μέσο συντελεστή φθοράς $5,78*10^{-7} mm^{-1}*N^{-1}*laps^{-1}$ για της δυο τιμές του κάθετου φορτιού συγκρινόμενα με την μέση τιμή του χάλυβα η οποία είναι ίση με $1,94*10^{-6} mm^{-1}*N^{-1}*laps^{-1}$ αντίστοιχα.

Πίνακας 5.4 Συντελεστής φθοράς υλικών για φορτίο 5 και 10 Newton

	Wire		Hardox	
	Load: 5N	Load: 10N	Load: 5N	Load: 10N
Αριθμός περιστροφών (laps)	Συντελεστής φθοράς $k \times 10^{-7}$ ($mm^3/(N*laps)$)	Συντελεστής φθοράς $k \times 10^{-7}$ ($mm^3/(N*laps)$)	Συντελεστής φθοράς $k \times 10^{-6}$ ($mm^3/(N*laps)$)	Συντελεστής φθοράς $k \times 10^{-6}$ ($mm^3/(N*laps)$)
5000	9,163	19,552	7,133	28,685
10000	7,136	17,164	3,911	14,999
20000	6,320	12,238	2,444	8,478
50000	5,349	9,850	1,113	4,943
100000	5,000	7,231	1,044	2,830
150000	5,000	6,567	1,044	2,830
200000	5,000	6,567	1,044	2,830



Εικόνα 5.15 Συντελεστής φθοράς k για το υλικό του δείγματος σε φορτία 5 και 10 Newton αντίστοιχα

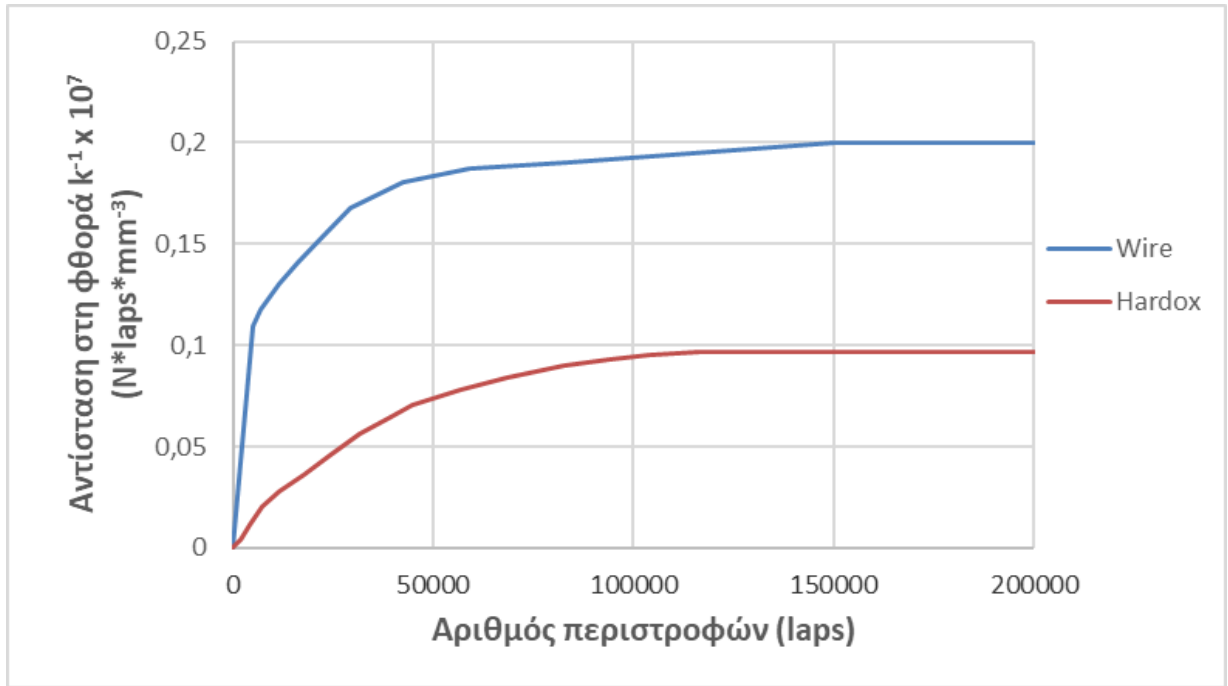


Εικόνα 5.16 Συντελεστής φθοράς k για τον χάλυβα Hardox σε φορτία 5 και 10 Newton αντίστοιχα

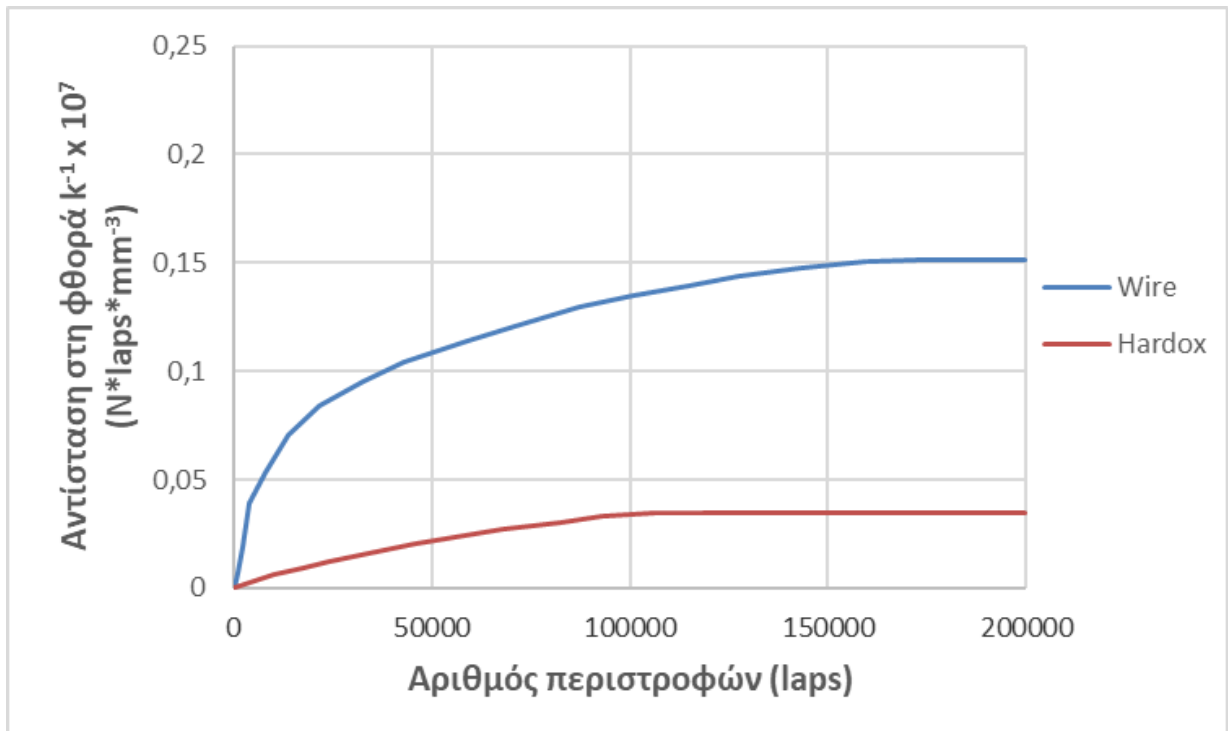
Στα διαγράμματα της **Εικόνας 5.18** και στις **Εικόνας 5.19** παρουσιάζετε ο συντελεστής αντίστασης στη φθορά των υλικών για 5 και για 10 Newton. Ο συντελεστής αντίστασης στην φθορά προκύπτει από τον συντελεστή φθοράς k καθώς είναι ο αντίστροφος του. Όλες οι τιμές της αντίστασης στην φθορά που υπολογίστηκαν για τα υλικά από της οποίες προέκυψαν και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.5**. Μέσα από το συντελεστή αντίστασης μπορούμε να συγκρίνουμε την αντίσταση στην φθορά των υλικών πράγμα και το οποίο πραγματοποιούμε παρακάτω για τα υλικά που εξετάζουμε έτσι ώστε να πληγή η τριβολογική ανάλυση του υλικού του δείγματος μας και συγκρίσιμη με την τριβολογική συμπεριφορά του χάλυβα Hardox. Ο συντελεστής αντίστασης σε φθοράς αγγίζει την σταθερή κατάσταση μετά από 50.000 κύκλους ολίσθησης και για τα δυο υλικά τείνοντας στην τιμή $0,20 \cdot 10^7$ και $0,15 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{laps} \cdot \text{mm}^{-3}$ για 5 και για 10 Newton αντίστοιχα για το υλικό του δείγματος ενώ για τον χάλυβα τείνει στην τιμή $0,097 \cdot 10^7$ και $0,035 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{laps} \cdot \text{mm}^{-3}$ για 5 και για 10 Newton αντίστοιχα. Από την **Εικόνα 5.18** παρατηρείται ότι στα 5 N η αντίσταση στη φθορά του υλικού του δείγματος που δημιουργήθηκε είναι περίπου 2 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση του χάλυβα, ενώ από την **Εικόνα 5.19** στα 10N η αντίσταση στη φθορά του υλικού του δείγματος είναι περίπου 3,5 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση του χάλυβα Hardox. Αυτή η μεγαλύτερη αντίσταση του υλικού του δείγματος οφείλεται στη μεγάλη σκληρότητά του εν συγκρίσει με αυτή του χάλυβα.

Πίνακας 5.5 Αντίσταση στη φθοράς υλικών για φορτίο 5 και 10 Newton

Αριθμός περιστροφών (laps)	Wire		Hardox	
	Load: 5N Αντίσταση στη φθορά $k^{-1} \times 10^7$ ($\text{N} \cdot \text{laps} \cdot \text{mm}^{-3}$)	Load: 10N Αντίσταση στη φθορά $k^{-1} \times 10^7$ ($\text{N} \cdot \text{laps} \cdot \text{mm}^{-3}$)	Load: 5N Αντίσταση στη φθορά $k^{-1} \times 10^7$ ($\text{N} \cdot \text{laps} \cdot \text{mm}^{-3}$)	Load: 10N Αντίσταση στη φθορά $k^{-1} \times 10^7$ ($\text{N} \cdot \text{laps} \cdot \text{mm}^{-3}$)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
5000	0,109	0,051	0,014	0,004
10000	0,140	0,064	0,026	0,007
20000	0,158	0,084	0,041	0,013
50000	0,187	0,114	0,089	0,020
100000	0,200	0,134	0,097	0,035
150000	0,200	0,150	0,097	0,035
200000	0,200	0,150	0,097	0,035



Εικόνα 5.17 Αντίσταση στην φθορά για τα υλικά σε 5 Newton



Εικόνα 5.18 Αντίσταση στην φθορά για τα υλικά σε 10 Newton

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε τόσο πειραματική όσο και υπολογιστική μελέτη τρισδιάστατης εκτύπωσης δείγματος με την χρήση παραγεμιστού σύρματος. Στην πειραματική διαδικασία, οι βασικοί άξονες μελέτης ήταν η κατασκευή του δείγματος και η ανάλυση των θερμικών κύκλων ενώ κατά την υπολογιστική μελέτη πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση λογισμικού που πραγματοποιεί ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε σύγκριση των πειραματικών και των αντίστοιχων υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Παρουσιάζετε έτσι μια πολυεπίπεδη μελέτη πάνω σε όλα τα θέματα που αφορούν την τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων μέσω της τεχνικής WAAM και ουσιαστικά, μέσα από τη διπλωματική αυτή εργασία αναδεικνύεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ πειράματος και μοντέλου προσομοίωσης. Αντίστοιχα, τα πειράματα πιθανότατα θα ήταν ανεπιτυχή αν βασιζόντουσαν μόνο στις βιβλιογραφικές αναφορές ή και στις βασικές αρχές τις φυσικής, των μαθηματικών, της θερμοδυναμικής κ.λπ. Το πείραμα και η παρατήρηση μέσω αυτού ήταν καθοριστικό τόσο για την εισαγωγή ρεαλιστικών παραδοχών και δεδομένων στο μοντέλο προσομοίωσης, όσο και για τη σωστή ερμηνεία και συσχέτιση της υπολογιστικής απεικόνισης με την πραγματική κατάσταση.

Συγκεκριμένα στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε κατά ποσο είναι εφικτή η κατασκευή κλιμακούμενης πειραματικής πλάκας με την χρήση της τεχνικής τρισδιάστατης εκτύπωσης WAAM από παραγεμιστό υλικό πλήρωσης με εμπορική ονομασία OA 4923 το οποίο προτείνεται από τον κατασκευαστή για εργασίες αναγόμωσης σε σκαπτικά μηχανήματα και είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Μετα και την κατασκευή του δείγματος αποσπάστηκε κατάλληλο κομμάτι στο οποίο εξετάστηκαν οι τριβολογίες ιδιότητες και παρουσιάστηκαν αναλυτικά με την μορφή διαγραμμάτων. Έπειτα υλοποιήθηκε και εκτελέστηκε προσομοίωση τρισδιάστατης εκτύπωσης, βάσει συγκεκριμένης διαδικασίας για το ίδιο υλικό πλήρωσης, από την οποία αντλήθηκαν αποτελέσματα υπό

την μορφή διαγραμμάτων τα οποία εν συνέχεια συγκριθήκαν και επιβεβαιωθήκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

Από τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των εξαγόμενων τιμών των πλήρως υπολογιστικών μοντέλων, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Από την πειραματική διαδικασία έγινε αντιληπτό πως το παραγεμιστό υλικό πλήρωσης με εμπορική ονομασία OA 4923 που ενδείκνυται για εφαρμογές αναγόμωσης από τον κατασκευαστή μπορεί να χρησιμοποιεί και στα πεδία της τρισδιάστατης εκτύπωσης εξαρτημάτων μέσω της τεχνικής WAAM.
- Γενικά, τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να προβλέπουν με σχετικά πολύ καλή ακρίβεια τα αναπτυσσόμενα θερμοκρασιακά πεδία, την μορφή της κατανομής όσο και τις τιμές των παραμορφώσεων.
- Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και του πλήρους θερμομηχανικού μοντέλου, πλέγμα μεγέθους 1mm (59428 nodes, 24432 elements), αποδίδει τα πιο πιστά αποτελέσματα ενώ ταυτοχρόνως αυτά λαμβάνονται σε εύλογο χρονικό διάστημα και μικρότερο της μίας ώρας.
- Παρατηρήθηκε ότι από την ανάπτυξη του θερμικού μοντέλου οι διαδοχικές εναποθέσεις υλικού πλήρωσης για την δημιουργία στρωμάτων του δείγματος δημιουργούν συνεχώς θερμικούς κύκλους οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα την μικροδομή. Αποτέλεσμα αυτών των θερμικών κύκλων αποτελεί η δημιουργία τριών διαφορετικών περιοχών στις οποίες αναμένουμε να παρουσιάζετε διαφορετική σύσταση μικροδομής στο ίδιο δείγμα.
- Κατά την πειραματική διαδικασία τριβής – φθοράς παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής τριβής δεν μεταβάλλεται πολύ συναρτήσει της εμβολής του φορτιού. Μετα και την διεξαγωγή της δοκιμής τριβής – φθοράς ο συντελεστής τριβής για το δείγμα που κατασκευαστικέ υπολογίστηκε και κυμαίνεται από 0,72 έως 0,87 ενώ για το χάλυβα Hardox από 0,48 έως 0,64.
- Από την τριβολογική ανάλυση που πραγματοποιήσαμε παρατηρείται ότι στα 5 N η αντίσταση στη φθορά του υλικού του δείγματος που δημιουργήθηκε είναι περίπου 2 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση του χάλυβα ενώ στα 10N η αντίσταση στη φθορά του υλικού του δείγματος είναι περίπου 3,5 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση του χάλυβα Hardox. Αυτή η μεγαλύτερη αντίσταση του υλικού του δείγματος οφείλεται στη μεγάλη σκληρότητά του εν συγκρίσει με αυτή του χάλυβα.

Σχετικά με την συνέχεια της παρούσας έρευνας, ο συγγραφέας προτείνει συμπληρωματικά των ανωτέρω α) την μελέτη της επίδρασης του μετασχηματισμού των φάσεων στα θερμοκρασιακά πεδία, στις παραμένουσες τάσεις και στις παραμορφώσεις, η οποία θα συμπληρωθεί και με μεταλλογραφικές αναλύσεις β) μελετη για την δυνατότητα αντοχής του δείγματος στην σπηλαιωση και σε διαβρωτικά στοιχεία γ) πειραματική μελέτη τριβής – φθοράς τριών σημείων.

Βιβλιογραφία

Amal, M. S., Panicker, C. J. and Senthilkumar, V., 2022. Simulation of wire arc additive manufacturing to find out the optimal path planning strategy. *Materials Today: Proceedings*, 66, pp. 2405-2410.

Ashwath, P., Xavior, M. A., Batako, A., Jeyapandiarajan, P. and Joel, J., 2022. Selective laser melting of Al–Si–10Mg alloy: microstructural studies and mechanical properties assessment. *Journal of materials research and technology*, 17, pp. 2249-2258.

Behm, J. E., Waite, B. R., Hsieh, S. T. and Helmus, M. R., 2018. Benefits and limitations of three-dimensional printing technology for ecological research. *BMC ecology*, 18, pp. 1-13.

Bushan, B., and Gupta, B. K., 1991. Handbook of tribology. *Screening methodology for materials, coatings and surface treatments*. United States of America, pp. 977-1052.

Carneiro, O. S., Silva, A. F. and Gomes, R., 2015. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, 83, pp. 768-776.

Ghafouri, M., Ahola, A., Ahn, J. and Björk, T., 2022. Numerical and experimental investigations on the welding residual stresses and distortions of the short fillet welds in high strength steel plates. *Engineering Structures*, 260, 114269, pp. 1-20.

Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B. and Khorasani, M. 2021. *Additive manufacturing technologies*. Vol. 17, pp. 160-186. Cham, Switzerland: Springer.

Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., 1984. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical transactions B*, 15, pp. 299-305.

Gülcan, O., Günaydın, K. and Tamer, A., 2021. The state of the art of material jetting—a critical review. *Polymers*, 13(16), 2829, pp. 1-19.

He, F., Yuan, L., Mu, H., Ros, M., Ding, D., Pan, Z. and Li, H., 2023. Research and application of artificial intelligence techniques for wire arc additive manufacturing: a state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 82, 102525, pp. 1-20.

- Kanishka, K. and Acherjee, B., 2023. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*, 89, pp. 220-283.
- Kaushik, J., Khan, H. A., Tiwari, A., Nafees, K., Varshney, S. and Singh, S. P., 2022. A review on application and optimization processes used for wear testing machine (pin on disc apparatus). *Materials Today: Proceedings*, 64, pp. 1440-1444.
- Kobe Steel, L.T.D., 2005. Essential factors in gas shielded metal arc welding. *KOBE STEEL, LTD [online]. Kita-Shinagawa, Shinagawa-Ku, Tokyo*, pp. 1-26.
- Ling, Y., Ni, J., Antonissen, J., Hamouda, H. B., Voorde, J. V. and Wahab, M. A., 2023. Numerical prediction of microstructure and hardness for low carbon steel wire Arc additive manufacturing components. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 122, 102664, pp. 2-14.
- Lupton, D. and Turner, B., 2016. 'Both fascinating and disturbing': Consumer responses to 3D food printing and implications for food activism. *Digital Food Activism, edited by Tanja Schneider, Karin Eli, Catherine Dolan and Stanley Ulijaszek, by Routledge, London, Forthcoming*, pp. 1-17.
- Müller, J., Hensel, J., and Dilger, K., 2021. Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures. *Welding in the World*, pp. 1-13.
- Neale, M.J., Polak, T.A. and Priest, M., 2003. *Handbook of surface treatments and coatings*. In Stachowiak, G. (Eds). *Wear. Materials, Mechanisms and Practice*. England: Professional engineering publishing.
- Oyama, K., Diplas, S., M'hamdi, M., Gunnæs, A. E. and Azar, A. S., 2019. Heat source management in wire-arc additive manufacturing process for Al-Mg and Al-Si alloys. *Additive Manufacturing*, 26, pp. 180-192.
- Park, K. M., Min, K. S., Lee, B. C. and Roh, Y. S., 2021. Proposal for enhancing the compressive strength of alkali-activated materials-based binder jetting 3D printed outputs. *Construction and Building Materials*, 303, 124377, pp. 1-10.
- Prajadhama, K. P., Manurung, Y. H., Minggu, Z., Pengadai, F. H., Graf, M., Haelsig, A., Adams, T. E. and Choo, H. L., 2019. Development of bead modelling for distortion analysis induced by wire arc additive manufacturing using FEM and experiment. In *MATEC Web of Conferences*, 269, 05003, pp. 2-8.

Qian, X., Anvari, A., Hoek, E. M. and McCutcheon, J. R., 2023. Advancements in conventional and 3D printed feed spacers in membrane modules. *Desalination*, 556, 116518, pp. 1-24.

Rocha, A. D. C., Rizzo, F., Zeng, C. and Paes, M. P., 2004. Duplex Al-based thermal spray coatings for corrosion protection in high temperature refinery applications. *Materials Research*, 7, pp. 189-194.

Suresh, G., Reddy, M. H. and Gurrum, N., 2019. Summarization of 3D-Printing Technology in Processing & Development of Medical Implants. *J. Mech. Contin. Math. Sci*, 14, pp. 176-191.

Treutler, K. and Wesling, V. 2021. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): a review. *Applied Sciences*, 11(18), 8619, pp. 1-54.

Ying, M., Guo, C., Li, Y., Kang, T. Y., Liu, W. M. and Wu, S. S., 2021. Microstructure and Performances for Wear-Resistant Steel through the WAAM Technology. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, pp. 1-11.

Zhao, Y. and Chung, H. 2018. Numerical simulation of the transition of metal transfer from globular to spray mode in gas metal arc welding using phase field method. *Journal of Materials Processing Technology*, 251, pp. 251-261.

Αλεξανδρόπουλος, Α., Κατωπόδης, Ε., Παλιατσός, Α. και Πρεζεράκος, Ν., 1994. *Στατιστική*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική

Δημογιώργη, Κ., 2020. *Τεχνολογικές Δυνατότητες και Χρήση της Προσθετικής Κατασκευής για την Υποστήριξη Νέων Παραγωγικών Μοντέλων που Βασίζονται στις Αρχές της Κυκλικής Οικονομίας*. Αθήνα: ΕΜΠ.

Οικονομόπουλος, Α., Παπαστολόπουλος, Α. και Πούλος, Κ., 2019. *Μελέτη, σχεδιασμός και κατασκευή CNC παντογράφου 3-αξονων για την κοπή και συγκόλληση μετάλλων*. Αθήνα: ΠΑ.Δ.Α.

Παντελής, Δ., Παπάζογλου, Β. και Χαϊδεμενόπουλος, Γ., 2017. *Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα

Παπαθανάσης, Η., 2005. Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. *Περισκόπιο Επιστήμης*, pp. 1-9.

Σκάρος, Θ., 2022. *Πειραματική και αριθμητική ανάλυση συγκόλλησης τόξου κατασκευαστικού χάλυβα*. Αθήνα: ΠΑ.Δ.Α.