



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ:
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ
ΑΠΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία
Χριστίνας Παπαδημητρίου

EMK ME 2023 11

Επιβλέπων: Χαράλαμπος Γαντές Καθηγητής
Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Παναγιωτόπουλος ΥΔ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Copyright © Χριστίνα Παπαδημητρίου, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Christina Papadimitriou, 2023
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this master thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this master thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Χριστίνα Παπαδημητρίου (2023)
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ
ΑΠΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2023 11
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Christina Papadimitriou (2023)
3D PRINTED STEEL: MECHANICAL PROPERTIES AND RESPONSE
OF SIMPLE STRUCTURAL COMPONENTS
Master Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2023 11
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

The research was supported by the Hellenic Foundation for Research and Innovation (H.F.R.I.) under the "2nd Call for H.F.R.I. Research Projects to support Faculty Members and Researchers," AMOSS project: "Additively Manufactured Optimized 3D Printed Steel Structures," (Project Number: 02779).

Ευχαριστίες

Με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο ΔΠΜΣ Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πριν από την ανάπτυξη του θέματος επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κο Χαράλαμπο Γαντέ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη έρευνα και φυσικά για την πολύτιμη καθοδήγησή του και το αμείωτο ενδιαφέρον του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον συνεπιβλέποντα υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Παναγιωτόπουλο, που με τις εξειδικευμένες γνώσεις του στο αντικείμενο και τη συνεχή του στήριξη συνέβαλε στην προσπάθεια αυτή.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον κο Νικόλαο Χατζηπαντελή, λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Επιθυμώ ακόμη να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της μεταπτυχιακής εργασίας, στους καθηγητές κο Νικόλαο Λαγαρό και κο Σάββα Τριανταφύλλου.

Όσον αφορά στις σπουδές μου στο ΔΠΜΣ, αναγνωρίζω τον σημαντικό ρόλο που συνετέλεσε προσφέροντάς μου μέσα σε αυτά τα δύο χρόνια πιο σφαιρική και ολοκληρωμένη γνώση ως στατικό μηχανικό. Ευχαριστώ λοιπόν όλους τους καθηγητές για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν με τόσο ενδιαφέρον μέσα από τα μαθήματά τους καθ' όλη τη διάρκεια.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που συμβάλλουν με τη συνεχή τους στήριξη στην εκπλήρωση των στόχων μου και αισθάνομαι τυχερή που τους έχω συνοδοιπόρους.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2023 11

**Τρισδιάστατα εκτυπωμένος χάλυβας:
Μηχανικές ιδιότητες και απόκριση απλών δομικών στοιχείων**

Χριστίνα Παπαδημητρίου

Επιβλέπων: Χαράλαμπος Γαντές Καθηγητής

Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Παναγιωτόπουλος ΥΔ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποκτάει γρήγορα αποδοχή και στον κατασκευαστικό τομέα, με το σκυρόδεμα να εφαρμόζεται ήδη σε μεγάλη κλίμακα και τις κατασκευές από χάλυβα να κάνουν την εμφάνισή τους. Αποτελεσματικότερη μέθοδος για την τρισδιάστατη εκτύπωση δομικών στοιχείων χάλυβα είναι η Προσθετική Κατασκευή με Σύρμα και Τόξο. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την κατασκευή δομικών στοιχείων προσφέροντας ευελιξία εφαρμογής πολύπλοκης γεωμετρίας, ακόμη και σε στοιχεία που προκύπτουν από βελτιστοποίηση, είτε για λόγους στατικής αποτελεσματικότητας, είτε για αρχιτεκτονικούς λόγους. Επιπρόσθετα, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται και για επιδιορθώσεις βλαβών σε δομικά στοιχεία. Σημαντική είναι η δυνατότητα που παρέχει και για την παραγωγή φορέων μεγάλης κλίμακας είτε αυτοί εκτυπώνονται απευθείας στο σύνολό τους είτε προέρχονται από μεμονωμένα εκτυπωμένα τμήματα. Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση της Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο οφείλεται στα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει έναντι του συμβατικού τρόπου παραγωγής μεταλλικών φορέων, αλλά και των άλλων τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης με πρώτη ύλη το μέταλλο. Μεταξύ άλλων παρέχει υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος κατασκευής, αποδοτικότητα εκτύπωσης και δυνατότητα χρήσης πλήθους κραμάτων από τα οποία μπορούν να προκύψουν στοιχεία με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Δεδομένου ότι οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά του εκτυπωμένου δομικού στοιχείου εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, κρίνεται σκόπιμη η περεταίρω διερεύνησή τους με σκοπό να καταστεί στο μέλλον εφικτή η πρόβλεψή τους στο στάδιο του σχεδιασμού της εκτύπωσης. Αντικείμενο της μελέτης αποτέλεσε η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της της απόκρισης απλών τρισδιάστατα εκτυπωμένων δομικών στοιχείων χάλυβα με τη χρήση της Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε υλικό ανοξειδωτού ωστενιτικού χάλυβα για στοιχεία δοκών υπό κάμψη και υποστυλωμάτων υπό θλίψη τα οποία συγκρίθηκαν με συμβατικό χάλυβα για αντίστοιχους φορείς. Με τις αναλύσεις των δοκών στόχος ήταν η μελέτη της απόκρισης των στοιχείων σε κάμψη θεωρώντας πλευρική εξασφάλιση και λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού. Για τα στοιχεία στύλων υπό θλίψη λήφθηκε υπόψη η μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε τέλειους φορείς και σε φορείς με ατέλεια, ενώ εξετάστηκε η

επιρροή διαφορετικών υψών. Βασικό αντικείμενο διερεύνησης αποτέλεσε και η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού στα δομικά στοιχεία για γωνίες εναπόθεσης με τον διαμήκη άξονα των στοιχείων ίσες με $\theta=0^\circ$, $\theta=45^\circ$ και $\theta=90^\circ$. Σύμφωνα με την αναλυτική διερεύνηση η επιρροή της ανισοτροπίας των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού είναι εμφανής στην απόκριση των στοιχείων, με αυτήν να προκύπτει καλύτερη για γωνία εναπόθεσης υλικού $\theta=45^\circ$, έπειτα για $\theta=0^\circ$ και τέλος για $\theta=90^\circ$. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο η μη γραμμικότητα του υλικού τα στοιχεία τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές για τα υλικά που επιλέχθηκαν, ενώ για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε φορείς με ατέλεια καλύτερη συμπεριφορά έχουν τα στοιχεία συμβατικού χάλυβα, χωρίς όμως η διαφορά να είναι μεγάλη.

Λέξεις κλειδιά: προσθετική κατασκευή με σύρμα και τόξο, τρισδιάστατη εκτύπωση, ανοξείδωτος χάλυβας, μηχανικές ιδιότητες, απόκριση, εφαρμογές πολιτικού μηχανικού



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES



MASTER THESIS
EMK ME 2023 11

3D printed steel: Mechanical properties and response of simple structural components

Christina Papadimitriou

Supervisor: Charalambos Gantes Professor
Co-supervisor: Vasilios Panagiotopoulos PhD(c)

ABSTRACT

3D printing is rapidly gaining acceptance from the construction sector, with concrete already being applied on a large scale and steel structures starting to appear. The most efficient method for 3D printing steel structural components is Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). This technology is used for the construction of structural components with the flexibility to apply complex geometry, even for components resulting from optimization procedure, either for reasons of static efficiency or for architectural reasons. In addition, this method is also applied for damage repair of structural components. The possibility that it provides to produce large-scale structures, whether they are directly printed entirely or printed as individual parts and then combined, is significant. The increasing use of Wire Arc Additive Manufacturing happens due to the significant advantages that this technology offers over the conventional way of producing metal components, but also compared to the other 3D printing techniques with metal used as feedstock. Among others, it provides high speed and low manufacturing costs, printing efficiency and the possibility of using a multitude of alloys from which components with improved mechanical properties can be obtained. Given that the mechanical properties and the behavior of the printed structural component depend on many factors, further investigation of them is considered appropriate to make their prediction at the printing design stage possible. The object of the study was to investigate the mechanical properties and the response of simple 3D printed structural components made of steel using WAAM. Specifically, stainless austenitic steel material was selected for beams under bending and columns under compression which were compared with conventional steel for same components. The aim of the beams' analyses was to study the response of the bending components when they are laterally restrained and material non-linearity is considered. For columns subjected to axial compression, material and geometry non-linearity, in perfect components and columns with imperfection, were considered in cases of different heights. The main objective was the investigation of the material deposition direction in the structural components for deposition angles with the longitudinal axis of the components equal to 0° , 45° and 90° . According to the analytical investigation, the influence of the anisotropy of the mechanical properties of the material is evident in the

response of the components. The components response is better for material deposition angle equal to 45° , then for 0° and then for 90° . In addition, in the case that only the non-linearity of the material is considered, the components of 3D printed steel show greater strength for the materials chosen, while for non-linearity of material and geometry in components with imperfection, conventional steel appears better response, but with the difference being small.

Keywords: wire arc additive manufacturing, 3D printing, stainless steel, mechanical properties, response, civil engineering applications