

**ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΡΟ-ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ  
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ULTRASONIC IMPACT TREATMENT.****Χρήστος Α. Ροδόπουλος<sup>1,2</sup> and Χάρης Α. Αποστολοπούλος<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Laboratory of Technology and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras, Patras, GR26500, Greece.<sup>2</sup>Materials and Engineering Research Institute, Sheffield Hallam University, Howard Street, S1 1WB, UK.**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι παράμετροι που καθορίζουν την μηχανική απόδοση των συγκολλητών συνδέσεων είναι: α) η επαναληψιμότητα και το εύρος της φόρτισης, β) ο τρόπος με τον οποίο δρουν οι παραμένουσες τάσεις (αλλαγή της κατανομής τους), γ) η δημιουργία ζωνών υλικού με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες λόγω κρυσταλλικών διαφοροποιήσεων και δ) η επίδραση όλων των παραπάνω στο δυναμικό διάβρωσης.

Η τεχνολογία Ultrasonic Impact Treatment (UIT) βασιζόμενη στην πλαστική παραμόρφωση από κρουστικά φορτία υψηλής συχνότητας (27-36KHz) μετατρέπει τις περιοχές των παραμενουσών εφελκυστικών τάσεων σε θλιπτικές προκαλώντας στην επιφάνεια του υλικού nano-crystallisation.

Στην παρούσα μελέτη παρατίθενται εργαστηριακά αποτελέσματα από την χρήση του UIT κατά τα πρότυπα της DNV και Lloyd's Register για διάφορους τύπους χαλύβδινων (SM490B) συγκολλητών συνδέσεων οι οποίες είχαν προ-διαβρωθεί σε αλατονέφωση και στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε κόπωση. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα ιδιαίτερος σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης του UIT στην δομική ακεραιότητα των συγκολλητών συνδέσεων σιδηρών γεφυρών.

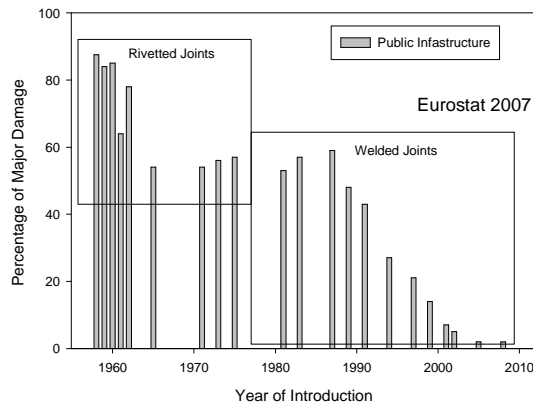
**1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Είναι γνωστό ότι οι μεταλλικές κατασκευές με σχεδιασμό την παραλαβή δυναμικών καταπονήσεων αποτελούν βασική υποδομή κάθε οικονομικά προηγμένου κράτους. Η διάβρωση των κατασκευών αυτών αποτελεί ίσως ένα από τα δυσμενέστερα και δαπανηρότερα προβλήματα αφού στις ΗΠΑ το ύψος της δαπάνης ανέρχεται στα 27,6 δισεκατομμύρια. δολάρια ετησίως που αντιστοιχεί στο 4.2% του ΑΕΠ (2007)[1] κενώ στην Γερμανία ανέρχεται στα 4,8 δισεκατομμύρια Ευρώ [2] αντίστοιχα δίχως στα παραπάνω ποσά να έχει υπολογιστεί το κόστος από την απώλεια κερδών. Η φωτογραφία 1 απεικονίζει μια τυπική καταστροφική βλάβη σε μεταλλική σιδηροδρομική γέφυρα κατασκευής 1958. Η Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία υπολογίζει ότι μέχρι το 2020 το ποσοστό των μεταλλικών κατασκευών Δημοσίου ενδιαφέροντος που ο βαθμός βλάβης θα έχει φθάσει σε σημείο για άμεση αντικατάστασή τους θα ξεπεράσει το 89% και οι συνέπειες θα είναι τόσο σοβαρές που θα επιφέρουν αύξηση του πληθωρισμού κατά 0.75%. Με βάση την χρονολογία κατασκευής [3] και τον τρόπο σύνδεσης των μεταλλικών κατασκευών στη φωτογραφία 1 δείχνεται ο βαθμός βλάβης και γίνεται σαφές ότι ο ρυθμός υποβάθμισης της δομικής ακεραιότητας επιταχύνεται με την εισαγωγή των

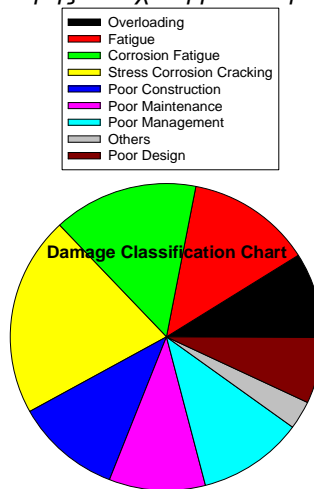
συγκολλητών συνδέσεων. Στο σχήμα 1 δείχνεται κατηγοριοποίηση των διαφόρων αιτιών βλάβης των μεταλλικών κατασκευών[3] .



Φωτ. 1. Θέσεις καταστροφικής διάβρωσης σε φορέα σιδηροδρομικής γέφυρας.



Σχ. 1. Βαθμός βλάβης σε σχέση με τον τρόπο σύνδεσης.



Σχ. 2. Κατηγοριοποίηση των βλαβών.

Από το σχήμα 2 γίνεται σαφές ότι η κόπωση σε συνδυασμό με την διάβρωση και την στατική φόρτιση αποτελούν δυσμενέστατους παράγοντες υποβάθμισης της δομικής ακεραιότητας των μεταλλικών κατασκευών αφού συνιστούν το 50% των αιτιών βλάβης.

Τόσο τα φαινόμενα κόπωσης όσο και η διαδικασία εκδήλωσης Stress Corrosion Cracking σε συγκολλητούς συνδέσμους επηρεάζονται απο διάφορους παράγοντες και κυρίως απο την γεωμετρία της συγκόλλησης, την μέθοδο συγκόλλησης και το υλικό[4]. Τα παραπάνω έχουν άμεσο αντίκτυπο στις ζώνες συγκόλλησης (ραφή και

θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη), την τελική γεωμετρία της ραφής (και κατ' επέκταση την συγκέντρωση τάσεων), στις παραμένουσες τάσεις και στις μεταλλογραφικές αλλαγές της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης [5]. Λόγοι σχετικοί με τα παραπάνω, ώθησαν το Διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (IWI) όσον και άλλες εταιρείες όπως είναι οι Lloyds Register, DNV και ABS στην απόφαση χρηματοδότησης ενός μεγάλου ερευνητικού προγράμματος στο οποίο συμμετείχαν 14 Πανεπιστήμια και Ερευνητικά κέντρα από όλο τον κόσμο. Σκοπός του προγράμματος ήταν η πιστοποίηση λύσεων τέτοιων που θα μπορούσαν να επιφέρουν σημαντική βελτίωση στην δομική ακεραιότητα χαλύβδινων συγκολλητών συνδέσεων.

Στο πλαίσιο αυτού του ερευνητικού προγράμματος το Ινστιτούτο Υλικών και Μηχανολογικών Ερευνών του Πανεπιστημίου Sheffield Hallam αποφάσισε την χρήση της τεχνικής UIT η οποία ως γνωστόν εφαρμόζεται ως επεξεργασία μετά την συγκόλληση σε ραφές υψηλής αντοχής σε πυρηνικά υποβρύχια, σε πλατφόρμες εξορύξης πετρελαίου, σε εναλλάκτες θερμότητας, σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, κ.α. Στην συνέχεια παρουσιάζεται μέρος αυτής της εργασίας με παράλληλη ανάλυση και αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το υλικό SM490B της πειραματικής διαδικασίας παρελήφθη υπό μορφή ελάσματος πάχους 16mm και διαμορφώθηκε σε δοκίμια σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Στον πίνακα 1 δείχνονται, η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού του υλικού. Για τις ανάγκες της πειραματικής έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τρεις ευρέως διαδεδομένοι τύποι συγκολλητών συνδέσεων όπως δείχνεται στο σχήμα 3 .

Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση GMAW και CO<sub>2</sub>-gas με παραμέτρους: 23V, 220A και ρυθμό 181 mm/min. Οι αρχικές παραμένουσες τάσεις στα δοκίμια μετρήθηκαν με την μέθοδο hole-drilling και η μέση τιμή τους δείχνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.

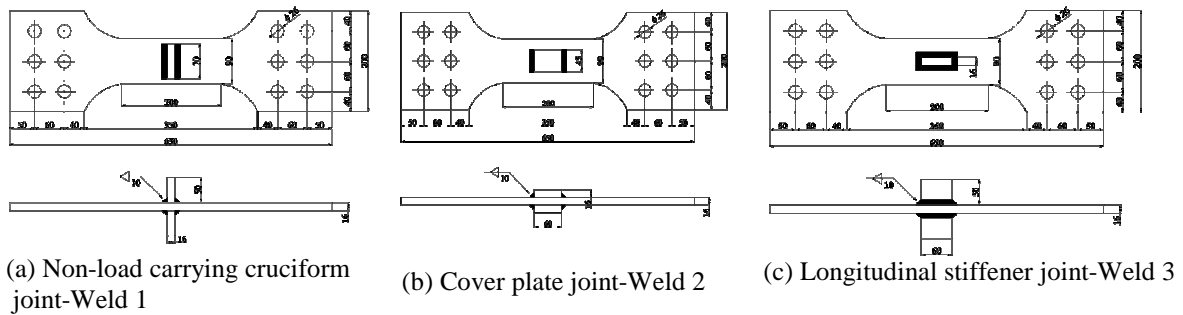
Επιλέγοντας δοκίμια κάθε γεωμετρίας με όμοια συμπεριφορά σε στατική φόρτιση (σχετικός είναι ο πίνακας 2), στην συνέχεια καταπονήθηκαν σε κόπωση με σταθερό εύρος φόρτισης R=0.1 και συχνότητα 20 Hz. Ο αριθμός των δοκιμών για κάθε σημείο του S/N διαγράμματος ήταν 8 και το σύνολο των δοκιμών ανήλθε σε 950 . Ομοιος αριθμός δοκιμών προδιαβρώθηκε σε περιβάλλον εργαστηριακής διάβρωσης fog spraying για 350 ώρες. Τα σχετικά αποτελέσματα δείχνονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.

Χημική σύσταση (περιεκτικότητα κατά βάρος %)							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.155	1.304	0.017	0.010	0.423	0.032	0.038	0.018
Μηχανικές ιδιότητες							
σF (MPa)		UTS (MPa)		Παραμόρφωση (%)			
352		514		29			

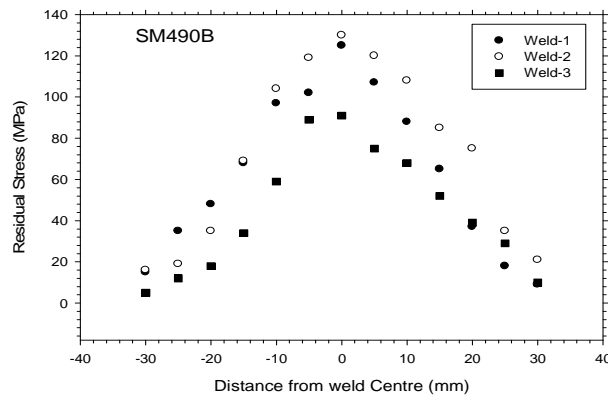
Πίν. 1. Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες του SM490B.

	Cruciform joint Weld 1	Cover plate joint Weld 2	stiffener joint Weld 3
$\sigma_F$ (MPa)	274	269	278
UTS (MPa)	419	409	427
Παραμόρφωση (%)	7.7	6.7	6.9

Πίν. 2. Μηχανικές ιδιότητες στην περιοχή της συγκολλητής σύνδεσης.



Σχ. 3. Οι τρεις διαφορετικοί τύποι δοκιμών (μονάδες σε mm).



Σχ. 4. Παραμένουσες τάσεις κατά μήκος της εγκάρσιας τομής των δοκιμών μετά την συγκόλληση.



Φωτ. 2. Προετοιμασία πειραματικής διάταξης κόπωσης.

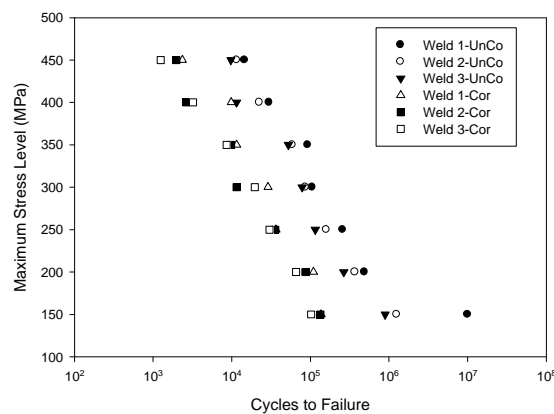
Κατά την διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας η τεχνολογία UIT εξελίχθηκε ώστε σήμερα να αποτελεί μία αξιόπιστη τεχνική αύξησης της αντοχής σε κόπωση

συγκολλητών συνδέσεων. Σύμφωνα με την μέθοδο UIT πραγματοποιείται παρέμβαση στο μέγεθος της παραμένουσας παραμόρφωσης (με συχνότητα 36,000 Hz) σε περιοχές όπου προηγουμένως έλαβε χώρα συγκόλληση. Με την εφαρμογή αυτή:

- εισάγονται θλιπτικές τάσεις στα εξωτερικά επιφανειακά στρώματα του υλικού εις τρόπον ώστε να μειωθούν ή να εξαλειφθούν ή ακόμη να αντιστραφούν οι ανεπιθύμητες (από την συγκόλληση) παραμένουσες παραμορφώσεις,
- μειώνονται ή εξαλείφονται περιοχές συγκέντρωσης τάσεων,
- βελτιώνεται το προφίλ της συγκόλλησης.

Ο εξοπλισμός UIT αποτελείται από ένα φορητό εργαλείο, ένα κιβώτιο ηλεκτρονικού ελέγχου και γενικά είναι εύκολο στην χρήση του και στην λειτουργία του, με ελάχιστο θόρυβο και δόνηση.

SM490B



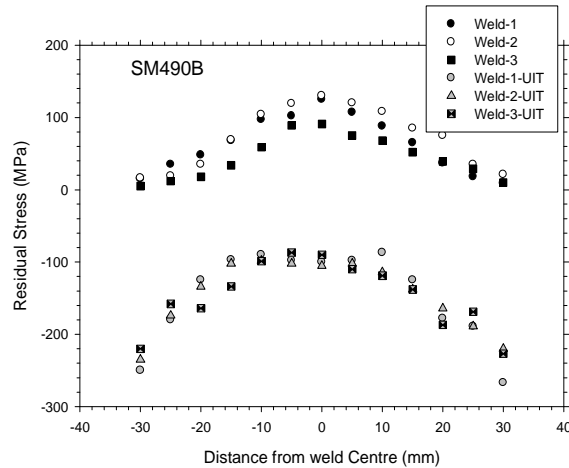
Σχ. 5. Καμπύλες S-N

Το UIT συγκρινόμενο με τις παραδοσιακές μεθόδους επεξεργασίας όπως το air hammer peening, το shot peening και το needle peening, είναι αποδοτικότερο στην μείωση των παραμενουσών παραμορφώσεων στην συγκόλληση, στην χαλάρωση των παραμενουσών τάσεων, στην μειωμένη συγκέντρωση τάσεων [5,6]. Διάφοροι ερευνητές [7-9] κατέδειξαν ότι η μηχανική απόδοση συγκολλητών συνδέσεων (έστω και μικρού μεγέθους) σε κόπωση βελτιώθηκε ουσιαστικά. Στην παρούσα ερευνητική μελέτη για την επεξεργασία των δοκιμών με UIT χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι που παρουσιάζονται στον πίνακα 3 και είναι σύμφωνες με τις ακολουθούμενες σε πυρηνικούς εναλλάκτες θερμότητας για χάλυβες παρόμοιου πάχους.

Παράμετροι UIT	Τιμές
Carrier frequency [KHz]	36
Pin dimension [mm]	∅ 5.0x 17, R25
Normalized impact	64 impulses
Amplitude under load [μm]	24
Pressure [kg]	12
Impact frequency [Hz]	260
Feed rate [mm/min]	400

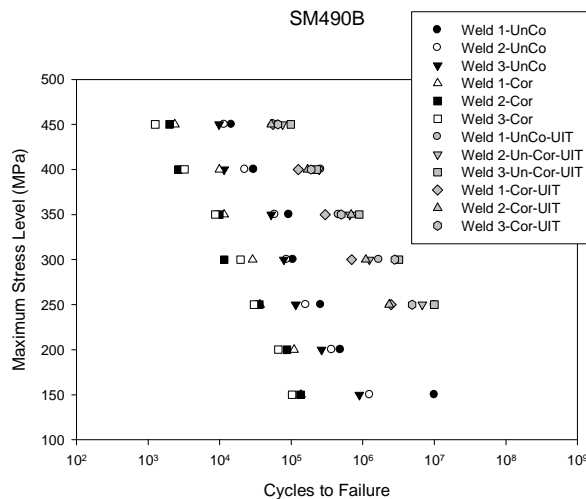
Πίν. 3. Παράμετροι της εφαρμογής του UIT στο SM490B [10].

Για το προσδιορισμό του οφέλους μετά την επεξεργασία με UIT, μετρήθηκαν οι παραμένουσες τάσεις και δείχνονται στο διάγραμμα του σχήματος 6.



Σχ. 6. Κατανομή παραμενουσών τάσεων πριν και μετά την εφαρμογή UIT.

Μετά την επεξεργασία των δοκιμών με UIT, εξετάστηκαν όμοια και προδιαβρωμένα δοκίμια με αποτελέσματα που δείχνονται στο διάγραμμα του σχήματος 7.



Σχ. 7. Σύγκριση καμπυλών S-N πριν και μετά UIT σε διαβρωμένα (Cor) και μη διαβρωμένα (UnCo) δοκίμια .

### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία UIT ως εφαρμογή στην συγκόλληση χαλύβδινων ελασμάτων χρησιμοποιείται ευρέως από την δεκαετία του 1970.

Τα φέροντα στοιχεία των χαλύβδινων γεφυρών υπόκεινται σε δυναμική φόρτιση ενώ παράλληλα οι σύνδεσμοί τους συχνά ευρίσκονται αντιμέτωποι με εξωτερικά επιθετικούς διαβρωτικούς παράγοντες. Στην παρούσα εργασία η εφαρμογή UIT προβάλλει ως μία βιομηχανική δυνατότητα ικανή να αναδιανέμει επικίνδυνες παραμένουσες τάσεις και να αποτρέπει συγκέντρωση τάσεων σε περιοχές συγκόλλησης. Στην παρούσα μελέτη αποτιμώνται οι σημαντικές δυνατότητες της τεχνολογίας UIT στη περιοχή επιφανειών συγκολλητών συνδέσεων σε χαλύβδινες γέφυρες αφού τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας UIT μπορεί να αυξήσει σημαντικά την δομική ακεραιότητα συγκολλητών συνδέσεων χαλύβδινων γεφυρών μέχρι 250%.

#### 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Department of Commerce, US, White Paper on Infrastructure, 2007.
- [2] Department of Commerce, Germany, Public Maintenance Work Programme, 2007.
- [3] Eurostat, [www.epp.eurostat.ec.europa.eu/](http://www.epp.eurostat.ec.europa.eu/)
- [4] P. J. HAAGENSEN AND S J. MADDOX (2006) IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures XIII-1815-00, *The International Institute of Welding*.
- [5] STATNIKOV E.S., TRUFYAKOV V.I., MIKHEEV P.P., and KUDRYAVTSEV YU. F., Specification for Weld Toe Improvement by UIT, IIW/IIS Doc. XIII- 1617-96, 1996.
- [6] STATNIKOV E.S., Applications of Operational UIT Technologies in Production of Welded Joints, IIW/IIS Doc. XII-1667-97, 1997.
- [7] STATNIKOV E.S., Comparison of Post-weld Deformation Methods for Increase in Fatigue Strength of Welded Joints, IIW/IIS Doc. XIII-1668-97, 1997.
- [8] HAAGENSEN P.J., STATNIKOV E.S., and LOPEZ-MARTINEZ L., Introductory Fatigue Tests on Welded Joints in High Strength Steel and in Aluminium improved by various methods including UIT, IIW Doc. XIII-1748-98, 1998.
- [9] WRIGHT W., Post-weld Treatment of a Welded Bridge Girder by Ultrasonic Hammer Peening, Internal Research Report, Federal Highway Administration, Turner Fairbank Highway Research Center, USA, 1996.
- [10] C. A. Rodopoulos (2007) Guidelines for the application of UIT for post-welding applications, Department of Trade and Industry, United Kingdom.

**EXAMINING THE EFFECT OF ULTRASONIC IMPACT TREATMENT ON THE FATIGUE STRENGTH OF STEEL WELDED JOINTS SUBJECTED TO CYCLIC LOADING AND CORROSION.****C. A. Rodopoulos<sup>1,2</sup> and C. A. Apostolopoulos<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Laboratory of Technology and Strength of Materials, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras, Patras, GR26500, Greece.<sup>2</sup>Materials and Engineering Research Institute, Sheffield Hallam University, Howard Street, S1 1WB, UK.**ABSTRACT**

Ultrasonic Impact Treatment (UIT) has been extensively used since the 70s in the post weld treatment of steel welds. The technology relies on the generation of ultrasonic oscillations which through a waveguide are transported to a tool pin or pins. The pin(s) under predetermined parameters of movement and load bring the tool and the surface to be treated under conditions of resonance and hence transmitting plastic strain of high frequency into the material. The impact energy generates the compressive residual stresses which can redistribute and relief residual stresses being locked during welding. UIT has been certified by a number of international organisations and its procedure is highly controllable. The current work evaluates the potential of UIT for the treatment of welded joints usually implemented in the construction of steel bridges. Bridge members are subjected to dynamic loading while joint sections appear to trap highly contaminated aqueous solutions. UIT in this work was used as an industrially available solution able to remove the hazardous tensile residual stresses while treat the weld toe to shapes reducing stress concentrations. The results indicate that the UIT can significantly increase the structural integrity of steel bridges to levels exceeding 250%.