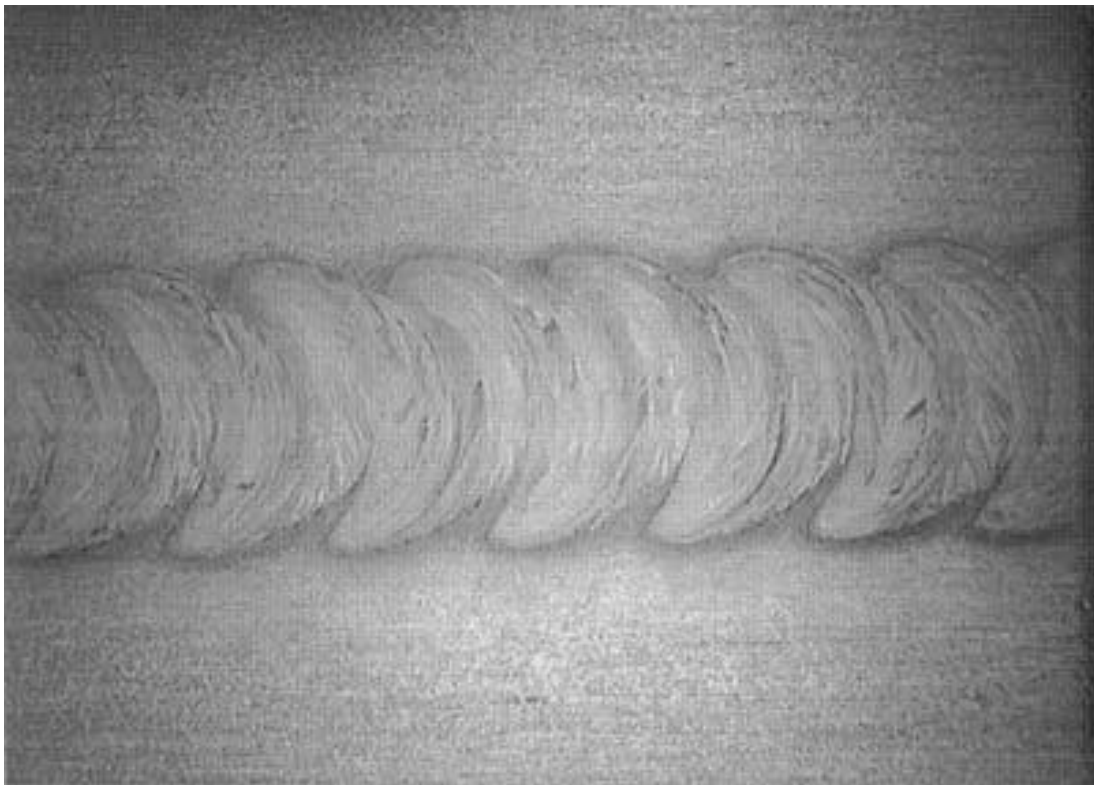




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλγόριθμος βελτιστοποίησης γεωμετρίας κωνικού
εργαλείου και παραμέτρων κατεργασίας στη μέθοδο
συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση



ΣΥΓΓΡΑΦΗ: ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ ΜΕΝΕΛΑΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
Abstract	3
Ορολογία	4
1. Εισαγωγή	5
1.1. Συγκόλληση τριβής με ανάδευση.....	5
1.2. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	7
1.3. Το εργαλείο.....	9
1.4. Δομή ραφής.....	12
1.5. Η συγκόλληση του αλουμινίου.....	15
1.6. Οι κατηγορίες των κραμάτων.....	16
2. Το μοντέλο στο οποίο στηριχθήκαμε	19
3. Σχολιασμός του μοντέλου	40
3.1. Μοντελοποίηση της διεργασίας	40
3.2. Θερμικό μοντέλο.....	40
3.3. Γεωμετρικό και κινηματικό μοντέλο.....	42
3.3.1. Κανόνας Όγκου.....	43
3.3.2. Κανόνας Επιφανείας.....	44
3.3.3. Κανόνας Ροής.....	45
4. Ο Αλγόριθμος	47
4.1. Αρχικοποίηση Παραμέτρων.....	48
4.2. Εκτίμηση της σχέσης σ - T	49
4.3. Θερμικό μοντέλο.....	51
4.4. Γεωμετρικό μοντέλο.....	51
5. Ο διαμεσολαβητής	54
6. Επιβεβαίωση των πειραμάτων	58
6.1. Εργαλείο πρώτο.....	59
6.2. Εργαλείο δεύτερο, τρίτο και τέταρτο.....	60
6.3. Εργαλείο πέμπτο και έκτο.....	61
6.4. Εργαλείο έβδομο.....	63
6.5. Εργαλείο όγδοο.....	64
6.6. Συγκόλληση.....	66

7. Σχολιασμοί.....	71
8. Βιβλιογραφία.....	72
9. Παράρτημα Α.....	74
10. Παράρτημα Β.....	78
11. Παράρτημα Γ.....	85

Abstract

Friction Stir Welding is a recently presented welding method which takes place in the solid state of the material being welded. It is a very promising technique, especially with the so called non-weldable group of metals e.g. the 2xxx series of Aluminum alloys. Many experimental and theoretical essays have helped the technique to enhance. In this study, we will try to set up a milling machine which will be used for this type of welding. The effort will be given to find the way to design the proper tool for each kind of process. The result was to construct an algorithm which gives for a given type and width of material, the geometry of a conical tool which is supposed to satisfy a thermal model and three kinetic rules as derives directly from the publication of F. Gratecap, G. Racineux and S. Marya (2008). The research will focus on AA 2017 T4 aluminum alloy.

Ορολογία

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, υιοθετούμε την ακόλουθη ορολογία:

Friction Stir Welding (FSW) : Συγκόλληση τριβής με ανάδευση

Shoulder : Πλάτη

Pin : Πίρος

Flash : Προέκταμα

Nugget : Ζώνη ανάδευσης

Burr : Απόξεσμα

Sticking friction : Κολλώδης τριβή

Sliding friction : Τριβή ολίσθησης

Process window : Παράθυρο διεργασίας

Advancing side : Πλευρά προώσεως

Retreating side : Πλευρά υποχώρησης

Leading side : Εμπρόσθια πλευρά

Trailing side : Οπίσθια πλευρά

Thermal effusivity: Θερμική εκχυτικότητα

Thermal diffusivity: Θερμική διαχυτικότητα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Οι Mishra και Ma [11] γράφουν χαρακτηριστικά:

«Η ροή του υλικού επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το σχεδιασμό του εργαλείου. Για το λόγο αυτό, οποιαδήποτε γενίκευση θα πρέπει να μελετηθεί προσεκτικά. Επίσης οι περισσότερες μελέτες δεν περιλαμβάνουν τις διαστάσεις του εργαλείου, ούτε όλες τις συνθήκες διεργασίας. Για το λόγο αυτό δε μπορούν εύκολα να ξεχωριστούν οι διαφορές μεταξύ πολλών μελετών.»

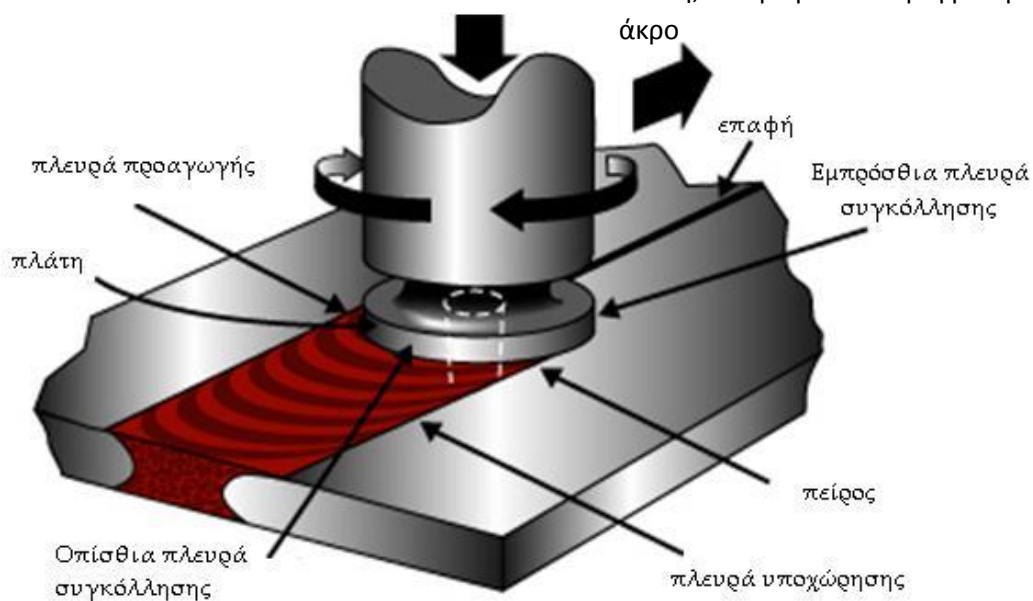
Αυτό το πρόβλημα ή υστέρημα που υπάρχει ως προς το εργαλείο στη συγκόλληση με τριβή και ανάδευση είναι που θα προσπαθήσουμε να αντιμετωπίσουμε στη μελέτη αυτή.

➤ Συγκόλληση τριβής με ανάδευση

Η μέθοδος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση είναι μία ιδιαίτερα νέα μέθοδος συγκόλλησης, η οποία εφευρέθηκε από τον Wayne Thomas και την ομάδα των συνεργατών του, στο Πανεπιστήμιο Συγκολλήσεων της Αγγλίας το Δεκέμβριο του 1991. Έκτοτε η μέθοδος ευδοκίμησε τόσο μεταξύ των Πανεπιστημίων, όσο και στη βιομηχανία και πλέον χρησιμοποιείται ευρύτατα στην παραγωγή, για τη συγκόλληση μεταξύ



Τυπικό κυλινδρικό εργαλείο με κοίλη πλάτη, σπείρωμα και στρογγυλεμένο άκρο

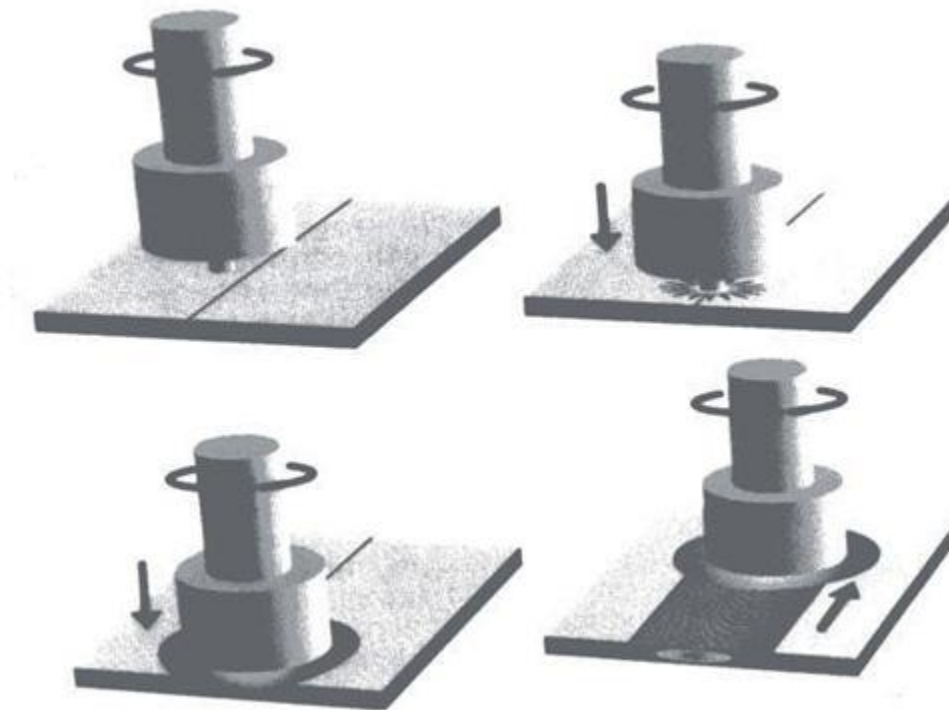


των άλλων και του αλουμινίου, ορείχαλκου, χαλκού, τιτανίου, χάλυβα, μαγνησίου και πλαστικού. Η λογική της τεχνικής είναι πολύ απλή. Ένα περιστρεφόμενο εργαλείο με ειδικά σχεδιασμένο πίσρο και πλάτη, εισάγεται στις δύο πλευρές των φύλλων ή πλακών, και στη συνέχεια, το εργαλείο προωθείται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης [1].

Έχει αποδειχθεί ότι η διαδικασία οδηγεί σε ισχυρές, αλλά και όλκιμες συζεύξεις, μερικές φορές και σε συστήματα που έχουν δημιουργήσει προβλήματα με τη χρήση συμβατικών τεχνικών συγκόλλησης. Η διαδικασία είναι πιο κατάλληλη για τα στοιχεία, τα οποία είναι επίπεδα και επιμήκη (πλάκες και φύλλα), αλλά μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα για σωλήνες, κοίλης διατομής και για σημειακή συγκόλληση. Οι συγκολλήσεις δημιουργούνται από τη συνδυασμένη δράση της θέρμανση λόγω τριβής και της παραμόρφωσης λόγω του περιστρεφόμενου εργαλείου.

Η μέγιστη θερμοκρασία που επιτεύχθηκε είναι της τάξης του 0,8 της θερμοκρασίας τήξης (Solidus). Η μέθοδος αποτελεί συνδυασμό των κατεργασιών σφυρηλάτησης και διέλασης. Επειδή δε έχει το χαρακτηριστικό να λαμβάνει χώρα στη στερεά κατάσταση, κάποιοι θεώρησαν ότι δεν αποτελεί συγκόλληση [2].

Το εργαλείο, όπως ειπώθηκε αποτελείται από ένα κυκλικό τμήμα, και έναν πρόβολο-πίρο, ο οποίος μπορεί λάβει ποικίλες γεωμετρίες. Το τμήμα που συνδέει το κυλινδρικό τμήμα του πίσρου με το εργαλείο, είναι γνωστό ως πλάτη. Ο πίσρος διαπερνά το τεμάχιο ενώ η πλάτη συμπιέζει την επιφάνειά του. Η θερμότητα που αναπτύσσεται, παράγεται κατά κύριο λόγο από την τριβή ανάμεσα στην πλάτη και στο τεμάχιο, ενώ ο πίσρος συμβάλει κυρίως στην ανάδευση του υλικού. Η θερμότητα που παράγει ο πίσρος υπολογίζεται γύρω στο 2% της συνολικής. Παρόλα αυτά η αναλογία υπολογίστηκε από κάποιους ερευνητές να φτάνει ορισμένες φορές ως το 20% [3].



Οι φάσεις της συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση

➤ Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Η συγκόλληση τριβής με ανάδευση, θεωρείται η σημαντικότερη ανάπτυξη στην ένωση μετάλλων εδώ και δεκαετίες. Επιπλέον είναι μία «πράσινη» τεχνολογία εξαιτίας της ενεργειακής της απόδοσης, φιλικότητας προς το περιβάλλον και την πολλαπλότητά της. Συγκρινόμενη με τις εναλλακτικές μεθόδους συγκόλλησης, η συγκόλληση τριβής με ανάδευση είναι σημαντικά πιο οικονομική, δεν έχει αναλώσιμα όπως προστατευτικό αέριο, ούτε παράγεται κάποια βλαβερή αναθυμίαση, με αποτέλεσμα να κατατάσσεται στις φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους. Επιπλέον, επειδή δεν εμπλέκει τη χρήση κανενός υλικού πλήρωσης, ούτε υπάρχει λιώσιμο του μετάλλου, μπορεί να συγκολληθεί κάθε είδους κράμα αλουμινίου, χωρίς να τίθεται θέμα συμβατότητας των συνθέσεων ή ρηγμάτωσης κατά τη στερεοποίηση, τα οποία απασχολούν όσον αφορά τις συγκολλήσεις τήξεως. Η συγκόλληση τριβής με ανάδευση, καθώς και όλες οι συγκολλήσεις τριβής, λαμβάνει χώρα στη στερεά κατάσταση. Για το λόγο αυτό, τα οφέλη περιλαμβάνουν και υλικά, τα οποία είναι δύσκολο να συγκολληθούν με τήξη, όπως είναι τα κράματα αλουμινίου σειρών 2xxx και 7xxx. Η μέθοδος μπορεί να εκτελεστεί με ειδικά κατασκευασμένη μηχανή ή με ήδη υπάρχουσα

κατάλληλα διαμορφωμένη, όπως στην περίπτωση μας. Επίσης η τεχνική μπορεί να αυτοματοποιηθεί, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από ρομπότ. Μία λίστα με πλεονεκτήματα όπως τα παρουσιάζει το Πανεπιστήμιο Συγκολλήσεων της Αγγλίας φαίνεται παρακάτω:

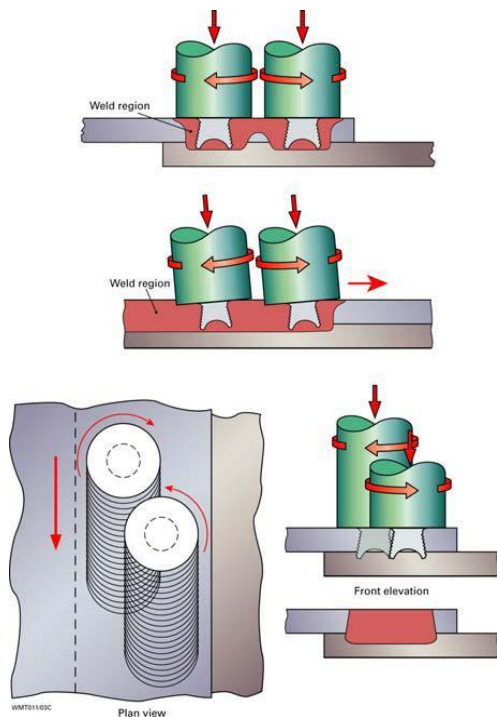
- Χαμηλή φθορά εργαλείου, ακόμα και για μεγάλου μήκους συγκολλήσεις.
- Άριστες μηχανικές ιδιότητες της ραφής
- Δεν υπάρχει τόξο
- Δεν υπάρχουν αναθυμιάσεις
- Δεν αναπτύσσονται πόροι
- Δεν εμφανίζονται πιτσιλι-σματα
- Έχουμε μικρή συρρίκνωση
- Μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλα τα επίπεδα
- Είναι πολύ πιο οικονομική
- Το εργαλείο δεν καταναλώνεται
- Δεν χρησιμοποιείται υλικό πλήρωσης
- Δε χρειάζεται προστατευτικό αέριο (τουλάχιστον για το αλουμίνιο)
- Δε χρειάζεται ειδική εκπαίδευση
- Δε χρειάζεται ιδιαίτερη προετοιμασία του τεμαχίου
- Μπορεί να συγκολλήσει αλουμίνιο ή χαλκό πάχους μεγαλύτερου από 50 mm με ένα πέρασμα



Οριζόντια συγκόλληση στο κάθετο επίπεδο

Μία τέτοια συγκόλληση ακούγεται ιδανική και όντως αναμένεται πως όπως η μέθοδος GTAW εκτόπισε τη συγκόλληση καταναλισκομένου ηλεκτροδίου, έτσι και η συγκόλληση τριβής και ανάδευσης θα εκτοπίσει την GTAW. Παρόλα αυτά και αυτή δεν είναι ελεύθερη από περιορισμούς, οι οποίοι μειώνονται με την εντατική έρευνα και ανάπτυξη. Οι βασικοί περιορισμοί της διεργασίας είναι:

- Τα τεμάχια πρέπει να είναι ισχυρά στερεωμένα
- Το εργαλείο κατά την έξοδό του αφήσει ένα κενό, τη λεγόμενη οπή εξόδου.
- Είναι λιγότερο ευέλικτη από την απλή συγκόλληση σε περιπτώσεις όπως τεμάχια με μεταβλητό πάχος, ή σε καμπύλες συγκολλήσεις



Καθένας από τους περιορισμούς έχει και μία μέθοδο που το αντιμετωπίζει. Για παράδειγμα η ισχυρή στερέωση του τεμαχίου αντιμετωπίστηκε με τη δίδυμη συγκόλληση τριβής με ανάδευση, ενώ τα τεμάχια μεταβλητού πάχους με την κατασκευή εργαλείου με κινούμενο πίσω, το οποίο ταυτόχρονα αντιμετώπισε και το πρόβλημα της οπής εξόδου.



➤ Το Εργαλείο

Στην πρώτη μελέτη για τη συγκόλληση τριβής στο πανεπιστήμιο της Αγγλίας, χρησιμοποιήθηκε ένας κυλινδρικός πίσος με σπείρωμα και μία κοίλη πλάτη από εργαλειοχάλυβα. Από τότε τα εργαλεία έχουν αναπτυχθεί σε πολύ πολύπλοκες, ασύμμετρες γεωμετρίες, από εξωτικά υλικά, που συγκολλούν με τριβή και ανάδευση υλικά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η πλάτη του εργαλείου σχεδιάζεται με σκοπό να παράγει θερμότητα στην επιφάνεια του τεμαχίου. Στα λεπτά πάχη η πλειονότητα της θερμότητας παράγεται από την πλάτη, ενώ στα μεγάλα πάχους, από τον πίσω. Η πλάτη όμως ασκεί και την αναγκαία δύναμη σφυρηλάτησης, ώστε να ενοποιηθούν τα τμήματα. Χωρίζεται σε κοίλη και κυρτή. Η πιο διαδεδομένη μορφή, η οποία θα μας απασχολήσει είναι η κοίλη, η οποία δεν είναι τίποτε άλλο πέρα από μία κοίλη διαμόρφωση στην εσωτερική της πλευρά. Αντίθετα ο πίσος παράγει θερμότητα λόγω παραμόρφωσης και τριβής στις δύο προς ένωση επιφάνειες και είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε να μπορεί να τις διανοίγει,



να διατμεί το υλικό και να το μετακινεί στην Οπίσθια πλευρά. Επίσης το βάθος διαμόρφωσης και η πρόωση εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον πίρο. Υπάρχουν πολλά είδη πύρων, όπως κύλινδρος με σπείρωμα και με σφαιρικό ή με επίπεδο άκρο, κόλουρος κώνος με ή χωρίς σπείρωμα, κόλουρο κώνο με βηματική σπείρα, αλλά και πιο ακραίες γεωμετρίες όπως πίροι τύπου Whorl, Mx Triflute, Trivex, Mx Trivex, Bobbin, Skew-Stir κ.α. [1]. Εμείς θα επικεντρωθούμε στην περίπτωση των κόλουρων κώνων με κοίλη πλάτη.

Τα εργαλεία με πίρο σχήματος κόλουρου κώνου, προέκυψαν από την ανάγκη για συγκόλληση τεμαχίων πάχους μεγαλύτερου από 12 mm, με μεγαλύτερη ταχύτητα. Το πλεονέκτημα του κώνου είναι ότι έχουν μειωμένη αντίσταση από το υλικό, σε σχέση με τον απλό κύλινδρο. Επίσης η μεγαλύτερη διατομή τους βρίσκεται τη βάση, όπου αναπτύσσεται και η μεγαλύτερη ροπή. Τα κωνικά εργαλεία μπορούν να σχεδιαστούν με ή χωρίς σπείρωμα και με ή χωρίς επίπεδες διαμορφώσεις. Μάλιστα έχει γίνει μελέτη που συγκρίνει τη συμπεριφορά των τριών ειδών κωνικών εργαλείων, δείχνοντας ότι τόσο το σπείρωμα όσο και οι διαμορφώσεις, βοηθούν στην εξαφάνιση των κενών ως ελαττώματα, ενώ επιπλέον οι διαμορφώσεις οδηγούν σε αυξημένη περιοχή βόλου. Υπάρχουν όμως άλλοι οι οποίοι υποστηρίζουν ότι ουσιαστικά η αντοχή δεν αλλάζει, αλλάζει όμως η αντίσταση που δέχεται το εργαλείο [4]. Ο ίδιος καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τελικά η επίτευξη μιας καλής συγκόλλησης, μπορεί να γίνει σε ένα εύρος παραμέτρων.

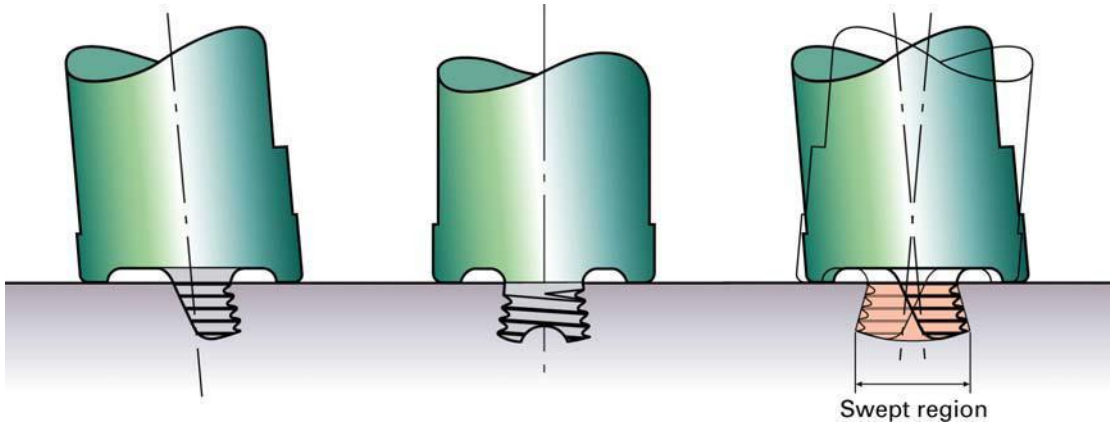
Κάθε τμήμα του εργαλείου, επιτελεί μία διαφορετική λειτουργία, για το λόγο αυτό η καλύτερη σχεδίαση υλικού θα ήταν η πλάτη και ο πίρος να αποτελούνται από διαφορετικά υλικά. Κατά τους Mishra and Ma [11] η σχεδίαση του εργαλείου παραμένει περίπλοκη παρόλο που πλέον έχουμε μία καλύτερη εικόνα για τη ροή του υλικού και της θερμότητας. Υπάρχουν πολλές τάσεις π.χ. εργαλεία με σπειρώματα, με επίπεδα τμήματα, με στρογγυλεμένο άκρο, με επίπεδο άκρο, με κοίλη ή με κυρτή πλάτη, με επίπεδη πλάτη η οποία φέρει διαμόρφωση σπειροειδή ή άλλη, εργαλεία όπου πλάτη και πίρος είναι ένα, κεκλιμένα εργαλεία, διπλά, αντικείμενα, με κινητό πίρο κ.α.π.



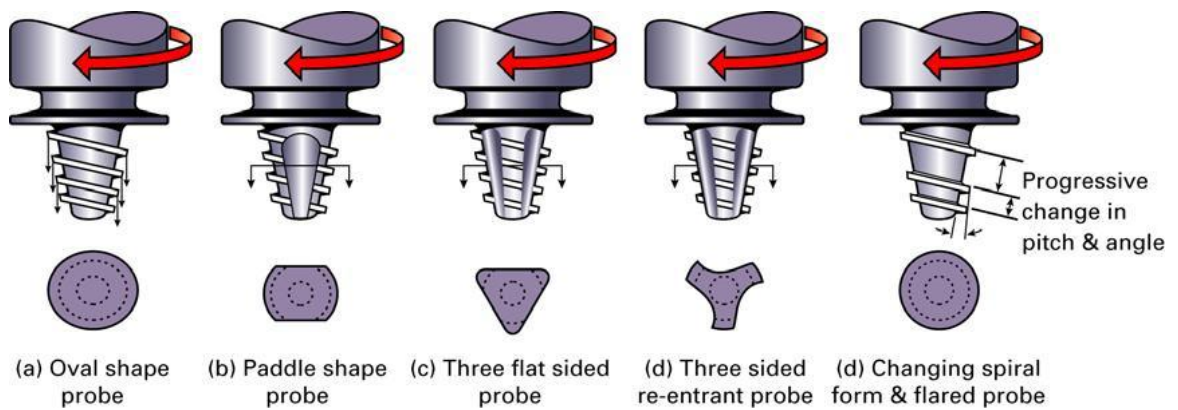
Κωνικό εργαλείο με κοίλη πλάτη και σπείρωμα



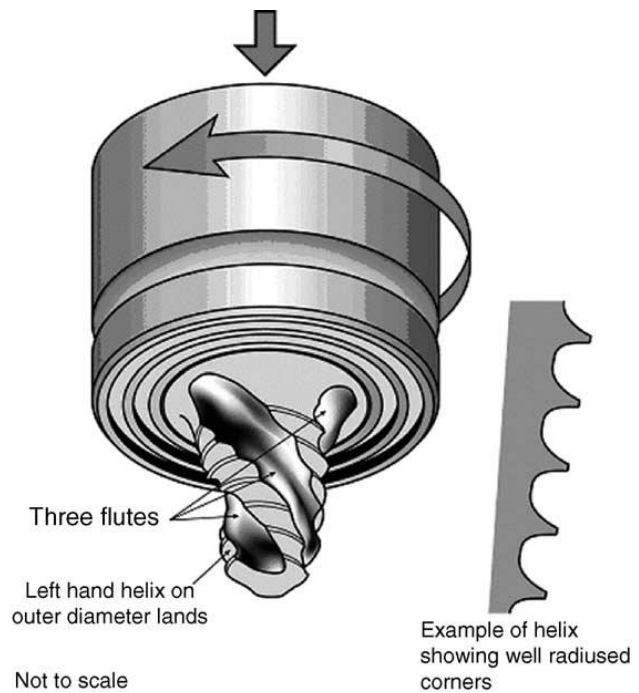
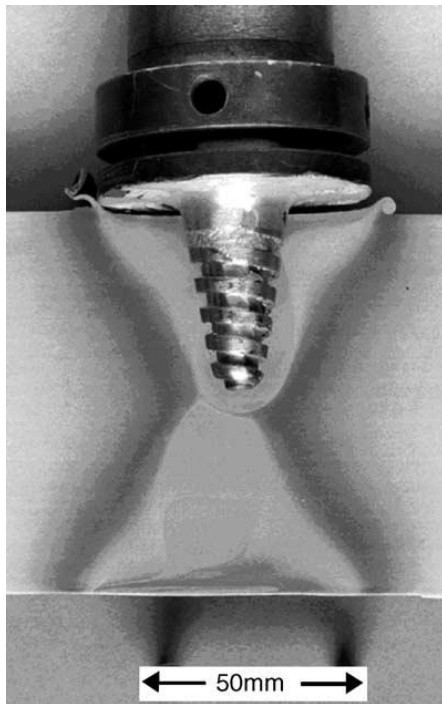
Εργαλείο με διαμόρφωση σπείρας στην πλάτη και τριπλά επίπεδα στον πίρο



Το κεκλιμένο εργαλείο A-Skew



Διάφορες διαμορφώσεις κωνικού εργαλείου



Δύο από τα πλέον σύνθετα εργαλεία, το Whorl (δεξιά) και το Mx-Triflute (αριστερα) φτιαγμένα για μεγάλα πάχη συγκολλήσεων.

➤ Δομή της ραφής

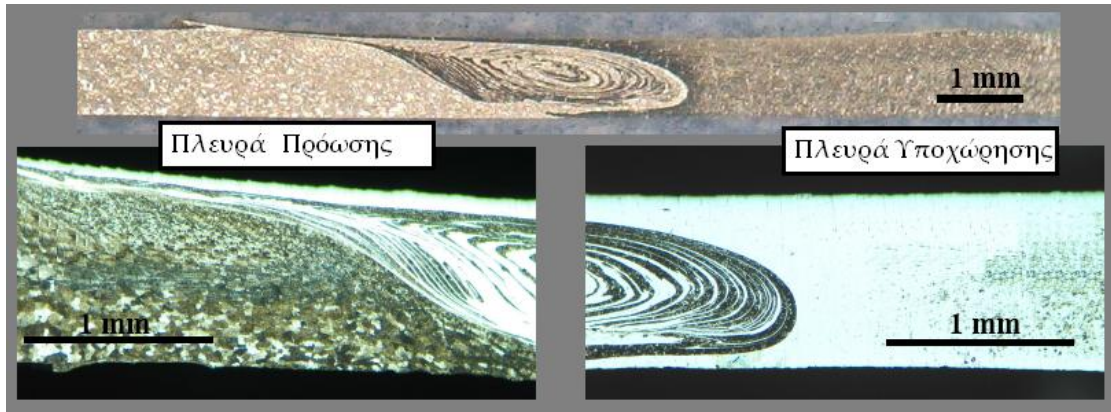
Αυτή διαμορφώνεται στο σημείο που ο πύρος διαπερνά την επαφή. Αποτελείται από ανακρυσταλλομένη μικροδομή του μητρικού υλικού, αποτέλεσμα της έντονης πλαστικής παραμόρφωσης σε υψηλή θερμοκρασία. Σε κάθετη τομή της ραφής, το ψήγμα έχει το σχήμα κομμένου κρεμμυδιού. Αυτό οφείλεται στο ότι κάθε περιστροφή του εργαλείου, προκαλεί διέλαση σε μία ημικυλινδρική στρώση υλικού. Οι στρώσεις αυτές όταν φαίνονται στην κάθετη διατομή, εμφανίζουν αυτή την χαρακτηριστική εικόνα κρεμμυδιού.

Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη

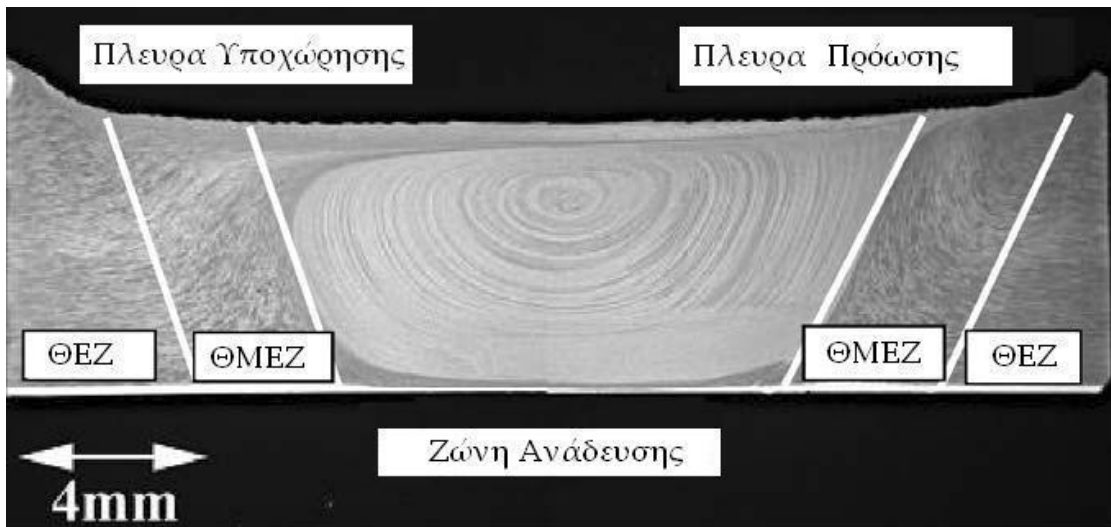
Η ζώνη αυτή βρίσκεται μεταξύ του βόλου και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και μπορεί να δείχνει σημάδια ανακρυστάλλωσης, ανάλογα με το υλικό που συγκολλάται. Στο οπτικό μικροσκόπιο, η ΘΜΕΖ χαρακτηρίζεται από έντονα παραμορφωμένη δομή, η οποία μπορεί να οφείλεται σε αναξιοποίητες τάσεις παραμόρφωσης, ή θερμοκρασία, ή αντίσταση του μετάλλου βάσης στην ανακρυστάλλωση. Η πλευρά προώσεως της ραφής, χαρακτηρίζεται από απότομη μετάβαση σε μικρόκοκκη δομή. Εδώ το υλικό, υπόκειται σε υψηλής θερμοκρασίας παραμόρφωση, η οποία οδηγεί σε διαμόρφωση των κόκκων προς το σύνορο μεταξύ του βόλου και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης. Αντίθετα στην πλευρά υποχώρησης, υπάρχει μία ασαφής μετάβαση, λόγω της ανάπτυξης μικρών κόκκων στα όρια των μεγάλων κόκκων του μετάλλου βάσης. Αυτή η περιοχή μπορεί να θεωρηθεί ως η φάση εκκίνησης της ανακρυστάλλωσης, η οποία εμφανίζεται σε μεγαλύτερη έκταση στο βόλο της συγκόλλησης. Οι διαφορετικές μικροδομές που παρατηρούνται στις δύο πλευρές του βόλου της συγκόλλησης, προκαλούνται από τα πεδία ταχυτήτων της περιστροφικής και της γραμμικής κίνησης του εργαλείου, τα οποία είναι αντίθετα στην πλευρά προώσεως, ενώ είναι ομόρροπα στην πλευρά υποχώρησης. Επιπλέον η παράλληλη παροχή θερμότητας, προκαλούν αλλαγές στη μικροδομή του υλικού. Γενικά αποτελεί ένα διακριτό σύνορο μεταξύ του ψήγματος και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

Θερμικά επηρεασμένη ζώνη

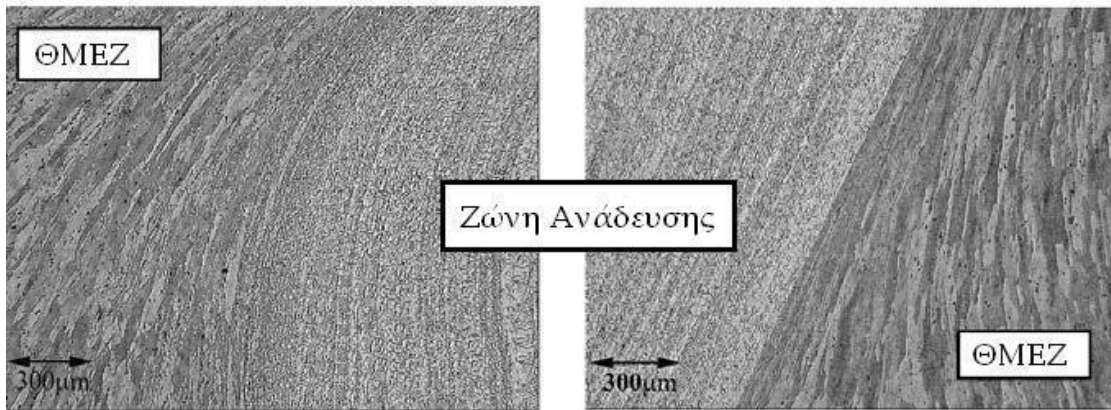
Τα κράματα αλουμινίου που επιδέχονται θερμική κατεργασία, αναπτύσσουν γύρω από το ψήγμα επιπλέον μία θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Θεωρητικά εκτείνεται μέχρι την διάμετρο της πλάτης του εργαλείου. Αυτή η ζώνη είναι παρόμοια με αυτήν που παρατηρείται στις συγκολλήσεις τήξεως, όπου το υλικό υπόκειται σε υποβάθμιση λόγω της θερμότητας της συγκόλλησης. Το υλικό έχει υποστεί θερμικό κύκλο, ο οποίος έχει μετατρέψει τη μικροδομή ή και τις μηχανικές ιδιότητές του [5].



Χαρακτηριστική δομή συγκόλλησης τριβής με ανάδευση



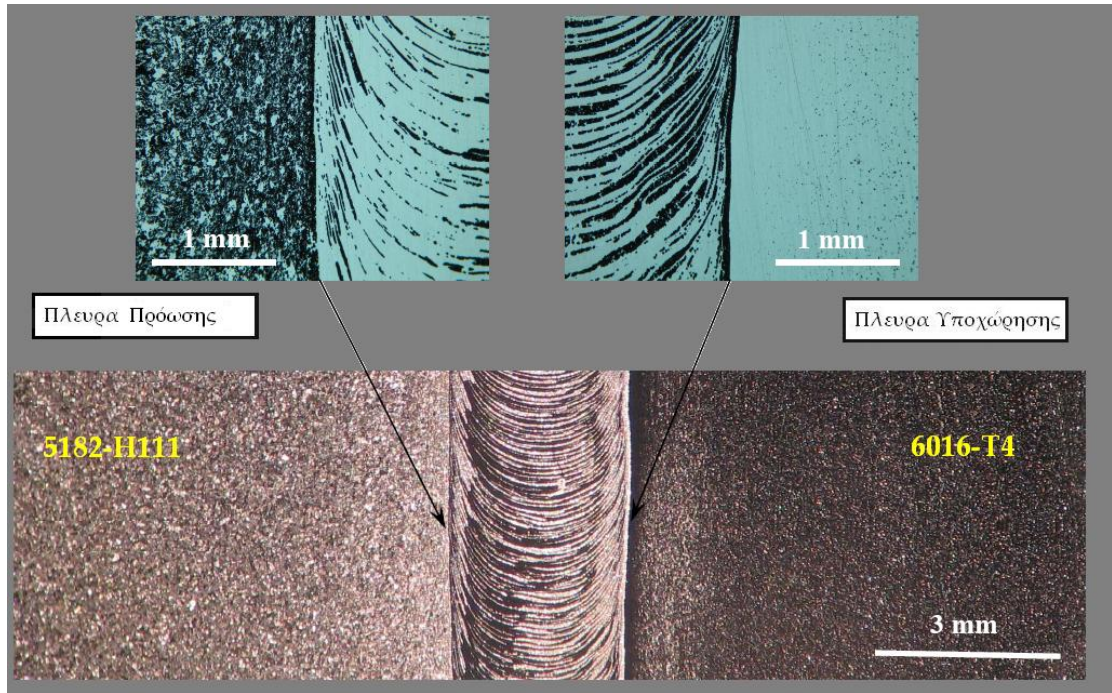
(a)



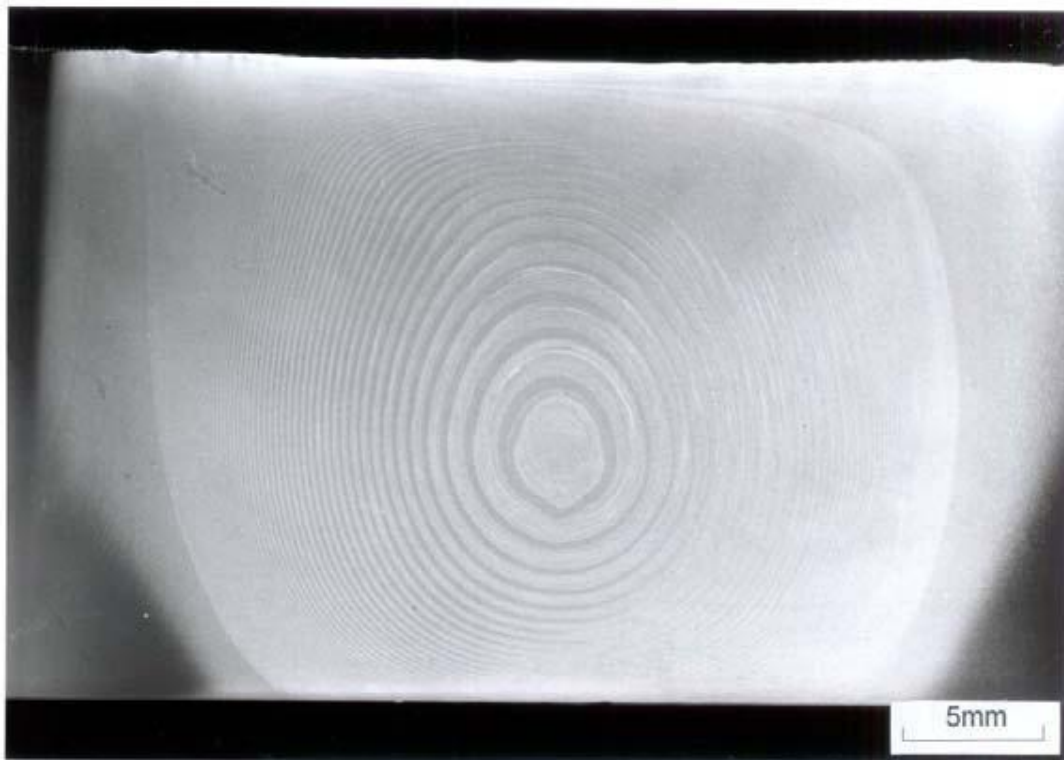
(b)

(c)

a) Τα μέρη της ραφής. b) Πλευρά Υποχώρησης – Ομαλή μετάβαση στη ζώνη ανακρυστάλλωσης λόγω των ομόρροπων πεδίων ταχυτήτων c) Πλευρά Πρόωσης – Απότομη μετάβαση στη ζώνη ανακρυστάλλωσης λόγω των αντίρροπων πεδίων ταχυτήτων



Συγκόλληση διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου



Σχηματισμός κομμένου κρεμμυδιού

➤ Η συγκόλληση του Αλουμινίου

Το αλουμίνιο είναι μέταλλο με μεγάλη πλαστικότητα, υψηλή ειδική ηλεκτρική (35MS/m) και θερμική (209kW/moC) αγωγιμότητα, μεγάλη θερμική διαστολή και σημαντική συστολή σε όγκο (7%). Η πυκνότητα του αλουμινίου είναι 2,7 g/cm³, ενώ η θερμοκρασία τήξης 658 οC.

Η συγκολλητότητα του αλουμινίου καθορίζεται από πολλές φυσικές και χημικές ιδιότητές του. Μεγάλη σημασία για τη διαδικασία συγκόλλησης έχουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

1. Ανάπτυξη στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια
2. Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
3. Υψηλός συντελεστής διαστολής
4. Χαμηλή θερμοκρασία τήξης
5. Η μη αλλαγή του χρώματος στις υψηλές θερμοκρασίες.

Το αλουμίνιο είναι δραστικό μέταλλο και αντιδρά με το οξυγόνο του αέρα παράγοντας ένα λεπτό σκληρό στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια. Το σημείο τήξης του οξειδίου του αλουμινίου είναι περίπου 1930 οC, το οποίο είναι σχεδόν τρεις φορές τη θερμοκρασία τήξης του καθαρού αλουμινίου, 660 οC. Άρα στη θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου (658οC), το Al₂O₃ παραμένει σε στερεή κατάσταση, αποκλείοντας τη δυνατότητα συγκόλλησης με τη φλόγα ασετυλίνης-οξυγόνου. Αυτό το στρώμα, δεν είναι αναγωγικό και δύσκολα διαλύεται και όσο γίνεται παχύτερο, απορροφά υγρασία από τον αέρα. Η υγρασία είναι πηγή υδρογόνου, το οποίο είναι η αιτία του πορώδους στις συγκολλήσεις αλουμινίου. Το υδρογόνο επίσης μπορεί να προκληθεί από λάδια, χρώματα, και ακαθαρσίες στην περιοχή της συγκόλλησης. Το υδρογόνο διαλύεται στο λιωμένο αλουμίνιο· κατά τη στερεοποίηση όμως το αλουμίνιο μπορεί να διαλύσει πολύ λιγότερο υδρογόνο και σε συνδυασμό με το υψηλό ρυθμό με τον οποίο κρύνει το αλουμίνιο, το ελεύθερο υδρογόνο παγιδεύεται στη συγκόλληση, προκαλώντας πορώδες.

Το στρώμα οξειδίου, πρέπει να αφαιρεθεί, πριν τη συγκόλληση. Εάν δεν αφαιρεθεί όλο, μικρά κομμάτια άτηκτου οξειδίου θα παγιδευτούν στη ραφή και θα προκαλέσουν μείωση στην ολκιμότητα και ελλιπή τήξη, ή ακόμα και ρηγματώσεις. Το οξείδιο του αλουμινίου μπορεί να αφαιρεθεί με μηχανικό, ή χημικό ή ηλεκτρικό τρόπο. Παρόλα αυτά το στρώμα οξειδίου, θα αρχίσει πάλι να σχηματίζεται. Ο ρυθμός με τον οποίο οξειδώνεται δεν είναι πολύ μεγάλος, αλλά οι συγκολλήσεις θα πρέπει να πραγματοποιούνται μέσα σε οκτώ ώρες μετά τον καθαρισμό, προκειμένου να έχουμε καλής ποιότητας συγκόλληση.

Το αλουμίνιο άγει την θερμότητα τρεις με πέντε φορές πιο γρήγορα από το χάλυβα, ανάλογα με το είδος του κράματος. Αυτό σημαίνει ότι

πρέπει να εισαχθεί περισσότερη θερμότητα στο αλουμίνιο, παρόλο που η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου είναι λιγότερο από τη μισή του χάλυβα. Εξαιτίας της υψηλής αγωγής της θερμότητας, όταν αφορά συγκολλήσεις μεγάλου πάχους, χρησιμοποιείται προθέρμανση του τεμαχίου. Η προθέρμανση του αλουμινίου, δεν πρέπει να ξεπερνάει τους 200 οC, και τα τεμάχια δεν πρέπει να παραμένουν στη θερμοκρασία αυτή για περισσότερο από όσο χρειάζεται.

Η μεγάλη ικανότητα του λιωμένου αλουμινίου για τη διάλυση του υδρογόνου πέφτει απότομα με την πτώση της θερμοκρασίας, που αποτελεί ουσιώδες πρόβλημα για τις μεθόδους συγκόλλησης με μεγάλη εστίαση της θερμότητας (η πηγή του υδρογόνου που δημιουργεί το πορώδες είναι: η υγρασία από την ατμόσφαιρα και τα συγκολλούμενα υλικά, οι λιπαρές ακαθαρσίες, τα εγλωβισμένα αέρια κατά τη διαδικασία παρασκευής του αλουμινίου κ.α.).

Η υψηλή αγωγιμότητα του αλουμινίου, βοηθάει ώστε η ραφή να στερεοποιείται ταχύτατα. Αυτό μας βοηθάει να έχουμε έλεγχο της ροής του μετάλλου και να βοηθάει τη συγκόλληση σε όλα τα επίπεδα.

Ο συντελεστής διαστολής του αλουμινίου, είναι διπλάσιος από αυτόν του χάλυβα. Επιπλέον οι συγκολλήσεις αλουμινίου, συρρικνώνονται κατά 6% κατά τη στερεοποίηση. Αυτή η μεταβολή στις διαστάσεις, ή η τάση για αλλαγή, μπορεί να προκαλέσει παραμορφώσεις και ρήγματα.

Το αλουμίνιο δεν αλλάζει χρώμα καθώς προσεγγίζει τη θερμοκρασία τήξης. Το αλουμίνιο αποκτά ένα αχνό κόκκινο χρώμα πάνω από το σημείο τήξης. Βέβαια με τις μεθόδους GTAW και GMAW το χρώμα δε μας αφορά, αφού η συγκόλληση πραγματοποιείται χωρίς να λιώσει και η γύρω περιοχή.[11]

➤ *Οι κατηγορίες των κραμάτων*

Το αλουμίνιο και τα κράματά του διαίρονται σε δύο κύριες κατηγορίες: Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για μηχανική πλαστική διαμόρφωση (παραγωγή προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ). Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου για χρήση σε χυτήρια (παραγωγή χυτών αντικειμένων). Εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με την πρώτη κατηγορία.Κράματα για μηχανική πλαστική διαμόρφωση.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του που προορίζονται για μηχανική πλαστική διαμόρφωση (έλαση, διέλαση, ολκή, σφυρηλασία κλπ) προσδιορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 573 και προσδιορίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει ενός διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το, σε μεγαλύτερη αναλογία

ευρισκόμενο, κραματοποιό στοιχείο. Τα κράματα για μηχανική επεξεργασία χωρίζονται σε: θερμοσκληρυνόμενα μη θερμοσκληρυνόμενα.

➤ *Κράματα θερμοσκληρυνόμενα*

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές μετά από θερμική επεξεργασία.

Σειρά 2000:κράματα αλουμινίου χαλκού Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις κατασκευών με απαίτηση υψηλές μηχανικές αντοχές. Κάτω από ειδικές συνθήκες παρουσιάζουν μια αυξημένη ευαισθησία στην ατμοσφαιρική διάβρωση, γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα προστασίας. Τα κράματα της σειράς αυτής μπορούν να συγκολληθούν με ειδικές τεχνικές, μόνον όπως η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική, βιομηχανία όπλων κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα 2017, 2024. Το κράμα 2017 T4 είναι αυτό το οποίο θα μελετήσουμε και πάνω στο οποίο θα κάνουμε τα πειράματά μας

Σειρά 6000:κράματα αλουμινίου - πυριτίου μαγνησίου Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή προφίλ. Η ομάδα αυτή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην κατηγορία των κραμάτων που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και πυρίτιο και που σε συνδυασμό με το μαγγάνιο, χρώμιο και ψευδάργυρο εξασφαλίζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Χαρακτηριστικά κράματα: 6005, 6061, 6082. Η άλλη κατηγορία αποτελείται από κράματα που περιέχουν μικρότερες ποσότητες μαγνησίου και πυριτίου και προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες διέλασης, αλλά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζουν καλή διακοσμητική συμπεριφορά και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως στις αρχιτεκτονικές και διακοσμητικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά κράματα: 6060,6063.

Σειρά 7000:κράματα αλουμινίου ψευδαργύρου Ο ψευδάργυρος με το μαγνήσιο είναι τα κύρια κραματοποιά στοιχεία. Τα κράματα αυτά επιτυγχάνουν τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική βιομηχανία.

➤ *Κράματα μη θερμοσκληρυνόμενα*

Τα κράματα αυτά αποκτούν τις μηχανικές αντοχές τους ανάλογα με το βαθμό της μηχανικής κατεργασίας που υφίστανται.

Σειρά 1000: Καθαρό αλουμίνιο με 99,00% ελάχιστη καθαρότητα. Το καθαρό αλουμίνιο υποδιαιρείται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλουμίνιο. Το καθαρό αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και την εύκολη μορφοποίηση. Οι μηχανικές αντοχές είναι σχετικά χαμηλές.

Σειρά 3000: κράματα αλουμινίου - μαγγανίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς αυτής είναι: η εύκολη μορφοποίηση, η καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση, η ευκολία συγκόλλησης με τις συνήθεις μεθόδους. Χαρακτηριστικά κράματα το 3003 και 3004.

Σειρά 4000: κράματα αλουμινίου - πυριτίου. Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Το γεγονός αυτό, καθιστά αυτά τα κράματα κατάλληλα για χρήση ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.

Σειρά 5000: κράματα αλουμινίου - μαγνησίου. Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι: πολύ καλή συγκολλητικότητα, πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (κρυογενικά συστήματα), πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον, μέσες μηχανικές αντοχές. Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα, κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα: 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182. [12]

Κεφάλαιο 2: Το μοντέλο στο οποίο στηριχθήκαμε

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθούμε εισήχθη από τους F. Gratecap, G. Racineux και S. Marya με τον τίτλο A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding [6]. Αυτό το οποίο εμείς προσπαθούμε να κάνουμε είναι πρώτον να αναπαράγουμε, βάσει των οδηγιών που μας δίνουν, τον αλγόριθμο ο οποίος θα δίνει τις παραμέτρους που ζητάμε, δεύτερον να γίνουν πειράματα τα οποία θα υποστηρίξουν τον αλγόριθμο και τρίτον την πραγματοποίηση συγκόλλησης με ένα εργαλείο το οποίο θα έχει προκύψει από τον αλγόριθμο αυτό.

Η δημοσίευση παρατίθεται ακολούθως μεταφρασμένη:

Μία απλή μεθοδολογία για την εύρεση της γεωμετρίας κωνικού εργαλείου, και τις παραμέτρους συγκόλλησης στη μέθοδο συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση

F. Gratecap · G. Racineux · S. Marya

Πρόλογος

Η συγκόλληση με τριβή και ανάδευση, είναι μία μέθοδος συγκόλλησης σε στερεά κατάσταση, η οποία έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στη βιομηχανία. Η ανάπτυξή της ενισχύθηκε τόσο από πειραματικές, όσο και από θεωρητικές μελέτες, σχετικές με το αποτέλεσμα της συγκόλλησης, τη ροή του υλικού και τη γεωμετρία του εργαλείου. Σε αυτή τη μελέτη, προτείνουμε μία νέα μεθοδολογία, προκειμένου να εξακριβώσουμε, για ένα δεδομένο υλικό, τη γεωμετρία κωνικού εργαλείου και τις παραμέτρους συγκόλλησης λεπτών πλακών. Βάση της λογικής μας είναι ότι η γεωμετρία του εργαλείου και οι παράμετροι της κατεργασίας πρέπει να ικανοποιούν τέσσερα ευρετικά κριτήρια: Ένα θερμικό κανόνα, και τρεις κανόνες σχετικούς με τον όγκο, την επιφάνεια και τη ροή του υλικού. Όλα αυτά, θα πρέπει να εξασφαλίζουν, ότι το υλικό θα φτάσει σε μία κατάλληλη για την

διεργασία θερμοκρασία, και ότι θα παραμείνει στην περιοχή του εργαλείου, χωρίς να έχουμε απώλειες στις συνοριακές περιοχές (προέκταμα). Προτείνουμε λοιπόν, έναν υπολογιστικό αλγόριθμο, ο οποίος συνδυάζει ένα βασικό θερμικό μοντέλο, τη γεωμετρία του εργαλείου και την κινηματική της διεργασίας. Η μεθοδολογία και οι λεπτομέρειες της σχεδίασης του εργαλείου αναλύονται στη συνέχεια, παράλληλα με τη δημιουργία ενός παράθυρου διεργασίας. Επιπλέον παρουσιάζονται πειραματικές έρευνες σε κράματα Al 2017-T4, με τη χρήση ενός κωνικού εργαλείου, με πλάτη, αλλά χωρίς σπείρωμα, με σκοπό την υποστήριξη του μοντέλου. Τέλος το αποτέλεσμα του μοντέλου και οι πειραματικές μελέτες τεκμηριώνονται με βάση τα ήδη δημοσιευμένα αποτελέσματα.

Εισαγωγή

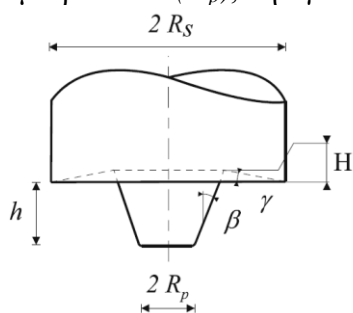
Παρά τη ευχρηστία του friction stir welding, οι μηχανισμοί που συμβάλλουν στην επιτυχημένη συγκόλληση, παραμένουν συγκεχυμένοι. Τόσο πειραματικές, όσο και θεωρητικές μέθοδοι, ερευνήθηκαν για την εξακρίβωση του βέλτιστου συνδυασμού των μεταβλητών της κατεργασίας οι οποίες περιλαμβάνουν το σχεδιασμό του εργαλείου, την

ταχύτητα της συγκόλλησης, την κλίση του εργαλείου, τις στροφές περιστροφής και την αλληλεπίδραση επιφάνειας εργαλείου-τεμαχίου. Οι Mishra & Ma [12] πρόσφατα ανέτρεξαν όλο το εκδομένο έργο και κατέληξαν ότι η σχεδίαση εργαλείου, παραμένει πολύπλοκη, ακόμα και αν μπορούμε πια να γνωρίζουμε περισσότερα για τη ροή του υλικού. Παρόλα αυτά οι μοντελοποιήσεις των [6], [18] και [15] δίνουν αξιοσημείωτα ποιοτικές πληροφορίες για την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας πάνω στα θερμικά πεδία και τις δυνάμεις που δρουν στο εργαλείο· κομμάτια σπουδαία, όσον αφορά τη σταθερότητα της διεργασίας. Σε κάθε περίπτωση, πιθανή ασυμφωνία που παρατηρείται μεταξύ πειραματικού και υπολογιστικού αποτελέσματος, αποδίδεται σε ανεπαρκή αναπαράσταση της δομικής συμπεριφοράς του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες και τάσεις. Η έλλειψη σχετικών στοιχείων προκαλεί τις παρατηρούμενες ασυμφωνίες, γαμίζοντας με ερωτηματικά το θέμα της πραγματικής φύσης της ίδιας της κατεργασίας. Για το λόγο αυτό μελετήθηκε με πειραματικές διαδικασίες, ο σχηματισμός των ελαττωμάτων. Ο Kim et al. [10] τονίζει πως ο κύριος και καθοριστικός παράγοντας για αυτά είναι η διείσδυση του εργαλείου και ότι ο πίνακας των λειτουργικών παραμέτρων θα μπορούσε να επεκταθεί αν αυξήσουμε τη δύναμη διείσδυσης. Ο Chen et al. [4] υποστήριξε τη σημαντικότητα της κλίσης του εργαλείου στο σχηματισμό ελαττώματος και πρότεινε για ανθεκτικές συγκολλήσεις, γωνίες κλίσεως μεταξύ 1,5 και 4,5°. Παρόλο που η εκδομένη βιβλιογραφία είναι άφθονη, τα πειραματικά αποτελέσματα, εξακολουθούν να παραμένουν ποιοτικά μιας και τα περισσότερα από αυτά επικεντρώνονται στο να περιγράψουν

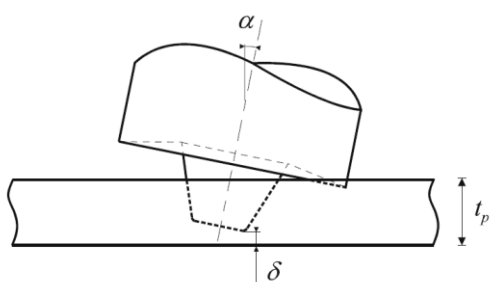
την επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στη μορφή και την ποιότητα των συγκολλήσεων. Από την οπτική γωνία του εργαλείου, η σχεδίαση έχει εξελιχθεί σημαντικά από τον απλό πείρο σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες όπως το whorl pin και το MX triflute. Ο Brown [2] έδειξε ότι εργαλεία τέτοιας γεωμετρίας, μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της πίεσης "σφυρηλάτησης", με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη παραγωγή θερμότητας, υπό χαμηλών συνθηκών φόρτισης. Για την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης και της απόδοσης του κόστους κατεργασίας, προτάθηκαν από τον [7], άλλα εργαλεία, όπως το A-skew. Οι μηχανισμοί δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί, όμως διαφορετικές προσεγγίσεις των μαθηματικών και της φυσικής, συνεχώς αποκαλύπτουν το τι πραγματικά συμβαίνει κατά την κατεργασία. Πρόσφατα, ο [3] με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, προσπάθησε να εξακριβώσει τις συνθήκες συγκόλλησης ενός κωνικού εργαλείου, με βάση την κωνική γωνία και την κλίση του εργαλείου. Ο Duborg et al. [7] χρησιμοποίησε γραμμική ανάλυση για το μέγεθος της πλάτης και του πείρου του εργαλείου, συναρτήσε του πάχους συγκόλλησης, αποδεικνύοντας στενή σχέση μεταξύ τους, όχι όμως και στην ανάλυση ως προς το πάχος. Τις περισσότερες φορές η σχεδίαση του εργαλείου, φαίνεται να είναι προϊόν μάλλον πειραματικών αποτελεσμάτων, παρά θεωρητικών ερευνών, κάτι το οποίο αναμένεται να παραμείνει ως έχει, κυρίως εξαιτίας της δυσκολίας πρόσβασης σε νόμους παραμόρφωσης του υλικού σε τάσεις διαφορετικής θερμοκρασίας. Δεδομένου λοιπόν ότι ο περιορισμός αυτός εφαρμόζεται σε κάθε μοντέλο, θα ήταν περισσότερο ενδιαφέρον να αναπτύξουμε απλούστερα μοντέλα που δίνουν παράθυρο διεργασίας με συνθήκες περισσότερο πιθανές για μία δεδομένη γεωμετρία. Στην

πραγματικότητα η γεωμετρία θα μπορούσε να μελετηθεί από διαφορετικές οπτικές. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να ορισθεί από την οπτική σταθερής φόρτισης κατά την ΣΤΑ, ώστε να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του εργαλείου. Η εκτίμηση της κατανομής της φόρτισης στο εργαλείο είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα που απαιτεί ακριβή συσχέτιση μεταξύ της γεωμετρίας, του υλικού και των συνθηκών κατεργασίας. Εναλλακτικά η γεωμετρία του εργαλείου θα μπορούσε να ορισθεί με γνώμονα το σχηματισμό ελαττωμάτων που θα μπορούσαν να εμφανιστούν.

Αυτή είναι και η κεντρική ιδέα της εργασίας αυτής, δηλαδή, πώς θα μπορούσε από μόνη της η γεωμετρία του εργαλείου, για δεδομένο σύστημα συνθηκών κατεργασίας να δώσει στοιχεία για το σχηματισμό ελαττωμάτων. Εστιάζει λοιπόν η μελέτη αυτή, στις εξής παραμέτρους: στροφές (N), πρόωση (V_f) και δεδομένη γεωμετρία κωνικού εργαλείου. Αυτή η τελευταία, ορίζεται από τη διάμετρο του shoulder (D_s), τη γωνία κυρτότητας (γ), τον πείρο βάσει της διαμέτρου του (D_p), την γωνία του



a.



b.

κόνου (β) και το μήκος που προεξέχει από το shoulder (h). Η θέση του

εργαλείου κατά τη συγκόλληση, καθορίζεται από τη γωνία κλίσης (α) και την απόσταση της διείδυσης του πείρου στο τεμάχιο από την ελεύθερή του επιφάνεια (δ), η οποία μας δίνει έμμεσα το αξονικό φορτίο για ένα δεδομένο υλικό.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του εργαλείου, βάσει των συνθηκών κατεργασίας. Αυτό βασίζεται σε ένα απλό θερμικό μοντέλο, ένα γεωμετρικό μοντέλο και κινηματικές θεωρήσεις, τα οποία θα οδηγήσουν σε μείωση, αν όχι εξάλειψη ελαττωμάτων που συναντώνται σε μη βελτιστοποιημένες καταστάσεις.

Επιπλέον η δημοσίευση αυτή περιγράφει τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης που απαιτήθηκε για να διερευνηθεί η εγκυρότητα του προτεινόμενου μοντέλου και την εξακρίβωση ότι παρέχει ένα "window process" με λογική συνάφεια.

Μοντελοποίηση

Σε αυτή τη μελέτη, προτείνεται μία μεθοδολογία επιλογής παραμέτρων συγκόλλησης, στηριγμένοι σε τέσσερις ευριστικές σχέσεις, οι οποίες είναι εξ' ορισμού προσεγγιστικές. Η πρώτη αφορά την θερμοκρασία συγκόλλησης η οποία γενικά επιλέγεται περί το 75% της solidus θερμοκρασίας T_f εκφρασμένη σε K [12], ενώ οι τρεις άλλες είναι η επιφάνεια, ο όγκος και οι κινηματικοί νόμοι. Στην επόμενη παράγραφο, προτείνουμε ένα θερμικό μοντέλο, για λεπτές πλάκες, σύμφωνα με το βαθμό προσέγγισης των απαιτούμενων ευρετικών σχέσεων. Επιλέξαμε λοιπόν το μοντέλο της κινούμενης σημειακής πηγής, που προτάθηκε από τον Rosenthal. Στο πειραματικό μέρος, δείχνουμε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή τη μοντελοποίηση είναι επαρκή

για να οριστούν γεωμετρικές και διεργασιακές παράμετροι που οδηγούν σε ανθεκτικές συγκολλήσεις.

Geometrical parameters		
R_s	shoulder radius	m
R_p	pin radius at base	m
β	cone angle	(.)°
γ	clearance angle	(.)°
h	pin height	m
Adjustment parameters		
α	tool tilt	(.)°
δ	tool distance from bottom	m
Welding parameters		
N	rotation speed	rpm
ω	rotation rate	rad.s ⁻¹
V_f	advance speed	m.s ⁻¹
F	forging axial force	N
Material parameters		
σ_Y	yield stress	MPa
λ	thermal conductivity	W.°C ⁻¹ .m ⁻¹
a	thermal diffusivity	m ² .s ⁻¹
E_f	thermal effusivity	J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2}
T_f	solidus temperature	°K

Θερμικό Μοντέλο

Αρχικά σε αυτή την ενότητα, περιγράφεται ένα θερμικό μοντέλο [8] το οποίο μπορεί να υπολογίσει μία τιμή της θερμοκρασίας κάτω από τον shoulder σε σχέση με τις μεταβλητές κατεργασίας όπως: (i) οι φυσικές ιδιότητες του υλικού (η θερμική αγωγιμότητα, η τάση διαρροής, ο δείκτης διάχυσης της θερμότητας

$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$), (ii) η γεωμετρία του

εργαλείου (διάμετροι shoulder και πείρου, προφίλ του πείρου) και (iii) οι συνθήκες συγκόλλησης (περιστροφή και πρόωση).

Μοντέλο

Κατά την FSW κατεργασία, η θερμότητα παράγεται τόσο από τη παραμόρφωση του υλικού, όσο και από τις διατμητικές που προκαλούνται από την κίνηση του εργαλείου (περιστροφική και μεταφορική). Στη μελέτη αυτή θεωρούμε μόνο την περίπτωση λεπτών πλακών, ώστε η πλειοψηφία της θερμότητας να παράγεται από την τριβή [17], [16]. Αυτές οι διατμητικές περιορίζονται σε μια μικρή περιοχή, κοντά στην

επιφάνεια επαφής του εργαλείου. Ανάλογα με την ένταση της πίεσης που ασκούμε, ο shoulder μπορεί να ολισθαίνει (slip) ή να κολλάει (stick) πάνω στις πλάκες. Αν η επαφή είναι sticking [16], μπορεί να μοντελοποιηθεί με οριακά στρώματα (μοντέλο Tresca). Σε αυτή την περίπτωση, δεν απαιτείται η εύρεση πειραματικού συντελεστή τριβής, οπότε εφαρμόζοντας το κριτήριο Von-Mises, η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται από τον shoulder Q_s και από τον πείρο Q_p μπορούν να εκφραστούν, κατόπιν ολοκλήρωσης στις επιφάνειες, ως εξής:

$$Q_s = \frac{2\pi}{3} (R_s^3 - R_p^3) \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \omega \quad (1)$$

$$Q_p = \frac{2\pi}{3} R_p^3 \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \omega + 2\pi R_p^2 h \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \omega \quad (2)$$

όπου R_s είναι η ακτίνα του shoulder, σ_Y η τάση διαρροής του υλικού, R_p η μέση ακτίνα του πείρου και h το ύψος του.

Στην περίπτωση λεπτών φύλλων, φαίνεται λογικό να παραλειφθεί κάθε διακύμανση κατά το πάχος της πλάκας. Το όριο ελαστικότητας που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, θεωρείται επίσης σταθερό κατά το πάχος της πλάκας. Για το λόγο αυτό οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιορίζονται μόνο στο επίπεδο του τεμαχίου. Επομένως η ολική συνεισφορά θερμότητας από τον shoulder και τον πείρο γράφεται ως εξής:

$$Q_t = Q_s + Q_p \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) υποθέτει ότι όλη η ενέργεια παραμόρφωσης ξοδεύεται ως θερμότητα, ενώ η ενέργεια που αποδίδεται για την εκτόπιση υλικού ή σημειακών ελαττωμάτων είναι μικρή. Στην πραγματικότητα το 5% με 10%

το ολικού έργου αποθηκεύεται με τη μορφή τροποποίησης της δομής [1]. Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την απώλεια θερμότητας λόγω αγωγής στο εργαλείο, ορίζεται ένας βαθμός απόδοσης (Q_{tool}), ο οποίος εξαρτάται από την θερμική εκχυτικότητα ($E = \sqrt{k\rho c_p}$) του εργαλείου $E_{f_εργαλείου}$ και του υλικού $E_{f_πλάκας}$ βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$Q_{εργαλείου} = \frac{E_{f_πλάκας}}{E_{f_πλάκας} + E_{f_εργαλείου}} \quad (4)$$

Τελικά εφαρμόζοντας την καλά τεκμηριωμένη εξίσωση του [14] για την περίπτωση κινητής σημειακής πηγής, μπορεί κανείς να εκτιμήσει αναλυτικά την τάξη μεγέθους του θερμοκρασιακού πεδίου σε ένα ημίπαιρο μέσο:

$$T - T_0 = Q_{εργαλείου} \frac{Q_t}{2\rho l} \exp\left(\frac{-V_f \xi}{2a}\right) \exp\left(\frac{-V_f \psi}{2a}\right) \frac{1}{\psi} \quad (5)$$

όπου T_0 είναι η αρχική θερμοκρασία της πλάκας, λ η θερμική αγωγιμότητα, α ο δείκτης διάχυσης της θερμότητας, V_f η πρόωση της συγκόλλησης, ψ η απόσταση από την πηγή ως το σημείο υπολογισμού και ξ οι συντεταγμένες της πηγής πάνω στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Οι θερμικές παράμετροι α και λ θεωρείται ότι είναι σταθερές και ίσες με $8.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ και $229 \text{ W}^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$ αντίστοιχα. Επιπλέον για να εκτιμήσουμε την μεταβολή του ορίου διαρροής λόγω θερμοκρασίας ($\sigma_y = \sigma_y(T)$), χρησιμοποιούμε στατιστική παρεμβολή, βάση των στοιχείων που δίνονται από τη βιβλιογραφία [15],[17].

Εφαρμογή

Λύνοντας με επαναληπτικές διαδικασίες το σύστημα των εξισώσεων (3,4 και 5) μπορούμε να εντοπίσουμε τις μεταβολές στη θερμοκρασία, βάσει των παραμέτρων συγκόλλησης. Έτσι σύμφωνα με τις ισοθερμικές καμπύλες, η πρόωση V_f είναι συνάρτηση των στροφών N και αν θέλουμε να αυξήσουμε την πρόωση, θα πρέπει να αυξήσουμε και τις στροφές.

Γεωμετρικό και Κινηματικό Μοντέλο

Επειδή η FSW είναι μία κατεργασία συγκόλλησης, χωρίς υλικό πλήρωσης, είναι επιτακτική ανάγκη να εξασφαλίσουμε μηδενική απώλεια υλικού, όπως για παράδειγμα το προέκταμα που κινείται πέρα του shoulder ή και ο σχηματισμός γρεζιού κατά μήκος της κατεργασίας. Επιπλέον, καθώς παράγεται θερμότητα από τις διατμητικές του υλικού κάτω από τον shoulder, είναι εξίσου σημαντικό, το διάκενο μεταξύ του shoulder και του τεμαχίου, να παραμένει πληρωμένο με υλικό. Κάθε φορά που το διάκενο αυτό, αδειάζει, είτε λόγω σχηματισμού προεκτάματος



Απώλεια υλικού στη συγκόλληση με τριβή και ανάδευση

ή απώλειας υλικού, είτε λόγω κακού σχεδιασμού του shoulder, η θερμότητα που παράγεται από την τριβή του shoulder θα μειωθεί και η κατεργασία θα γίνει ασταθής. Από τα προηγούμενα συμπεραίνουμε ότι οι παράμετροι συγκόλλησης πρέπει να συνάδουν με δύο γεωμετρικούς και έναν κινηματικό κανόνα που θα τους χαρακτηρίζουμε στο εφεξής ως: (i) κανόνας όγκου (ii) κανόνας επιφάνειας (iii) κανόνας ρυθμού ροής.

Αυτοί οι κανόνες θεσπίστηκαν με γνώμονα τη θέση του εργαλείου και όχι την αξονική ή δύναμη σφυρηλάτησης, αλλά αυτές οι δύο παράμετροι είναι αλληλένδετες. Με άλλα λόγια, η κατεργασία ελέγχεται βάσει θέσεως, που συνήθως είναι και πιο πρακτικό.

Κανόνας Όγκου

Στην αρχή της κατεργασίας, το εργαλείο σταδιακά διεισδύει στο τεμάχιο, μέχρι ο πείρος να φτάσει την προδιαγεγραμμένη θέση, ως προς το πάχος (δ). Το υλικό που μετακινείται από τον πείρο, θα πρέπει να φυλακιστεί από το shoulder. Πειραματικά προκύπτει, ότι κατά την αρχική εμπλοκή του εργαλείου, το υλικό πρώτα πληρώνει τον όγκο κάτω από τον shoulder προτού να ρεύσει προς τα έξω κατά την κίνηση του

εργαλείου. Έτσι λοιπόν, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη σωστή επιλογή της γεωμετρίας του shoulder και τη προσαρμογή των δύο παραμέτρων θέσης του εργαλείου (α, δ). Αν υπάρξει πρόβλημα με αυτές τις ρυθμίσεις, τότε ένα τμήμα του μετακινούμενου υλικού θα χαθεί, προκαλώντας πιθανά μικροκενά ή ελάττωση του πάχους στην περιοχή της συγκόλλησης. Αυτό όμως συνεπάγεται, ότι το διάκενο που προκύπτει από τη γεωμετρία του shoulder, δε θα πρέπει να είναι υπερβολικό, το οποίο θα προκαλέσει κενό χώρο μεταξύ του shoulder και του εγκλωβισμένου υλικού. Αυτό με τη σειρά του συνεπάγεται μειωμένη τριβή κάτω από τον shoulder και μειωμένη παραγωγή θερμότητας. Συνοψίζοντας, ο όγκος που μετακινεί ο πείρος, θα πρέπει να είναι ίσος με τον όγκο αποθήκευσης, κάτω από το shoulder. Αν V_1 ο όγκος του υλικού μεταξύ της πλάκας και του shoulder χωρίς την κυρτότητα που σχηματίζει, V_2 τον όγκο της κυρτότητας, V_3 ο όγκος του διεισδυμένου shoulder και V_4 ο όγκος του πείρου, τότε θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

$$\underbrace{(V_1 + V_2)}_{V_i} - \underbrace{(V_3 + V_4)}_{V_s} = 0 \quad (6)$$

Οι δε όγκοι υπολογίζονται όπως φαίνεται:

$-V_1$

$$V_1 = R_s^3 \cos \alpha \sin a \left[\cos \theta_1 (\pi + \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \theta_1) + \frac{2}{3} \sin^3 \theta_1 \right] \quad (7)$$

η οποία λήφθηκε από την έκφραση:

$$V_1 = \int_{\theta_1}^{\pi} dV_1 = \int_{\theta_1}^{\pi} 2R_s^3 \cos \alpha \sin a \sin^2 \theta (\cos \theta_1 - \cos \theta) d\theta \quad (8)$$

$-V_2$, ο όγκος της κυρτότητας είναι προσεγγιστικά ο όγκος ενός κόλουρου κώνου ύψους H με κυλινδρική οπή:

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi H [R_s^2 + (R_p + (h + H) \tan \beta)^2 + R_s (R_p + (h + H) \tan \beta)] - \pi (R_p + (h + H) \tan \beta)^2 H \quad (9)$$

όπου:

$$H = \frac{(R_s - R_p - h \tan \beta)}{\tan \beta + \frac{1}{\tan \alpha}} \quad (10)$$

- V_3 , ο βυθισμένος όγκος του shoulder υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο, όπως και ο V_1

$$V_3 = R_s^3 \cos \alpha \sin \alpha (\cos \theta_1 (\sin \theta_1 \cos \theta_1 - \theta_1) + \frac{2}{3} \sin^3 \theta_1) \quad (11)$$

η οποία προέκυψε από:

$$V_3 = \int_0^{\theta_1} dV_3 = \int_0^{\theta_1} -2R_s^3 \cos \alpha \sin \alpha \sin^2 \theta (\cos \theta_1 - \cos \theta) d\theta \quad (12)$$

- V_4 , ο όγκος του πείρου είναι κολουρος κώνος

$$V_4 = \frac{1}{3} \pi h [R_p^2 + R_p (R_p + h \tan \beta) + (R_p + h \tan \beta)^2] \quad (13)$$

Τα σύμβολα επεξηγούνται από το σχήμα.

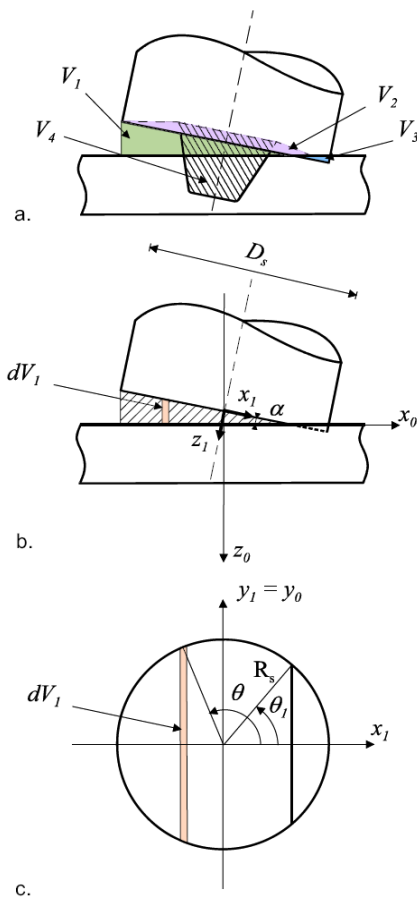


Fig. 3 (a) volume rule, (b and c) calculation of V_1

Κανόνες της επιφάνειας

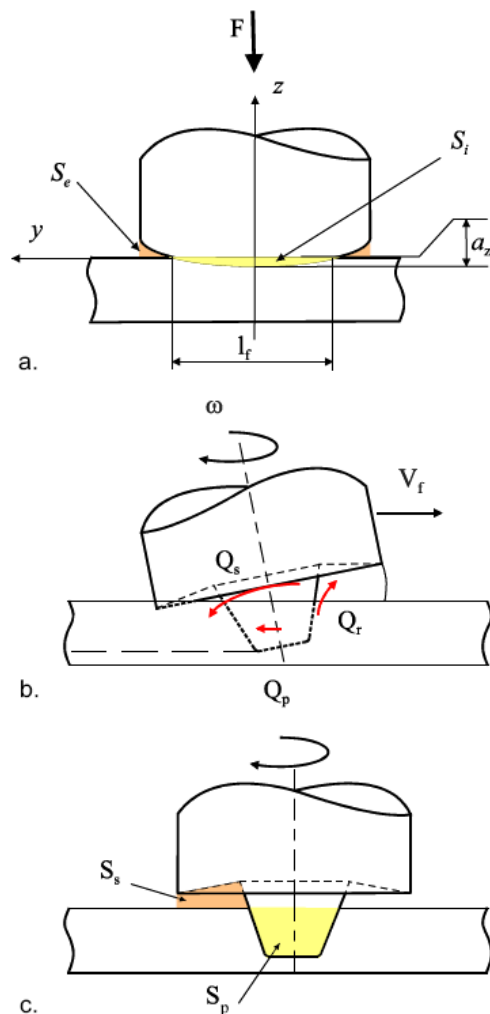
Ο χωρίς ελαττώματα βόλος της συγκόλλησης, απαιτεί την εφαρμογή μίας αξονικής δύναμη σφυρηλάτησης F , το οποίο σημαίνει πώς η πλάτη του εργαλείου έχει μερική επαφή με το τεμάχιο, εξαιτίας της κλίσης του εργαλείου που καθορίζεται από τη γωνία κλίσης και την κάθετη εμπλοκή (α_z). Μόνο ένα κομμάτι του shoulder, το οποίο ορίζεται από το μήκος (l_f), έχει επαφή, με σκοπό να περιοριστεί η μείωση του πάχους της πλάκας (α_z) στην ζώνη της συγκόλλησης, η οποία δημιουργείται χωρίς μεταβολές από τη διεύθυνση της πλάτης του εργαλείου στην επιφάνεια του τεμαχίου. Τέτοιου είδους εμπλοκή του εργαλείου προκαλεί μικρού μήκους προέκταμα στις δύο πλευρές του καρδιού της συγκόλλησης. Με άλλα λόγια, η απώλεια υλικού μέσω του σχηματισμού ενός τέτοιου προεκτάματος αντισταθμίζεται από το μετατοπισμένο υλικό, λόγω της

κατακόρυφης εμπλοκής (a_z) του ίδιου του εργαλείου. Αν δεν πραγματοποιηθεί αυτό, τότε το συσσωρευμένο υλικό μεταξύ της πλάκας και της πλάτης ($V_i = V_1 + V_2$) που αναφέρθηκε προτύτερα, μπορεί να ελαττωθεί. Αυτή η συνθήκη πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$S_i - S_e = 0 \quad (14)$$

όπου (S_i) ο εμπλεκόμενος τομέας και (S_e) ο τομέας του γρεζιού. Η σχέση αυτή μπορεί επιπρόσθετα να αναλυθεί ως:

$$\frac{1}{2} \pi R_s^2 \sin a - 2R_p (R_p \sin a + h \cos a + d + t_p) = 0 \quad (15)$$



Αν ($S_i > S_e$) τότε η πλάτη σταδιακά θα χάνει υλικό με αποτέλεσμα την πιθανότητα σχηματισμού ελαττωμάτων. Το μήκος της αποδεκτής συγκόλλησης μειώνεται. Αν ($S_i < S_e$), το υλικό εξωθείται πέρα από την πλάτη του εργαλείου, συντελώντας στο σχηματισμό προεκτάματος σημαντικού μεγέθους. Το πάχος του καρυδιού μειώνεται, οποίο είναι από μόνο του ελάττωμα, αφού συντελεί στη μείωση της αντοχής της συγκόλλησης.

Κανόνας ροής

Παρόλο που η ροή του υλικού στη ΣΤΑ συνδέεται στενά με τις συνθήκες της κατεργασίας και το ίδιο το υλικό, πρόσφατες μελέτες από τους [19], [5] και [11] προτείνουν δύο κύριους μεταδότες, τη μετάδοση ροής από την πλάτη και από τον πίσρο. Το υλικό που κινείται λόγω της πλάτης, ρέει από την πλευρά υποχώρησης εναντίον της πλεονεκτικής πλευράς, ενώ ταυτόχρονα το υλικό που κινείται λόγω του πίσρου, στροβιλίζεται μεταξύ των στρώσεων γύρω από τον πίσρο, με αποτέλεσμα οι στρώσεις να στοιβάζονται μέσα στη συγκόλληση. Ο Gratecap [9] από παρατηρήσεις σε πλαστελίνη, μέσω βιντεοσκόπηση με κάμερα υψηλών ταχυτήτων, κατέγραψε τη σύνδεση του σφυρηλατημένου υλικού από την πλάτη του εργαλείου, με το συνεχές σωρό των στρώσεων από τον πίσρο. Χωρίς την περιστροφή, η κίνηση του εργαλείου θα προκαλούσε δύο αναχώματα εκατέρωθεν της κύριας όψης του εργαλείου και ένα αυλάκι, λόγω της κοιλότητας που αφήνει πίσω του ο πίσρος. Η περιστροφή του εργαλείου είναι που αναδεύει το υλικό, ώστε να ξαναγεμίσει το αυλάκι. Κατά την φάση της συγκόλλησης, ο πίσρος που περιστρέφεται και προχωράει, καταπονεί διατμητικά το περιβάλλον υλικό, το οποίο αρχικά εκβάλλεται

στην μπροστινή πλευρά Q_f και κατόπιν, μεταφέρεται στην αυλάκωση. Αν η ροή προς την πίσω πλευρά Q_p θεωρηθεί αμελητέα ως προς την εμπρόσθια ροή Q_f , τότε η πλειοψηφία της ροής του υλικού ρέει κάτω από την πλάτη Q_s . Αυτό βέβαια, συνεπάγεται ότι το κενό διάστημα μεταξύ της πλάτης και της επιφάνειας του τεμαχίου S_s και η γωνιακή ταχύτητα του εργαλείου, επαρκούν για να εξασφαλίσουν την ισότητα μεταξύ του ρυθμού εκβολής υλικού που ωθείται από τον πίσω με πρόωση V_f και της ροής Q_s εξαιτίας της περιστρεφόμενης πλάτης του εργαλείου. Τελικά προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για τον κανόνα ροής:

$$Q_r - Q_s = 0 \quad (16)$$

Όταν η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται, το εκβαλλόμενο υλικό δεν θα γεμίζει το αυλάκι, αλλά θα δημιουργεί γρέζι.

Ρυθμός εκβολής λόγω του πίσου Q_f :

Ο ρυθμός της εκβολής λόγω του πίσου, μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο του τομέα εκβολής S_p και της πρόωσης V_f , σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_f = V_f \cdot S_p \quad (17)$$

Αν ορίσουμε ως h_p το ύψος του βυθισμένου τμήματος του πίσου:

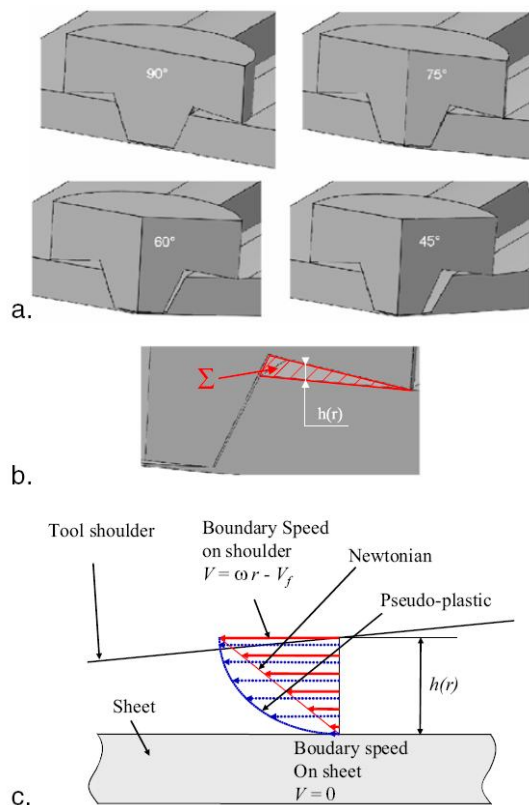
$$S_p = h_p \left(2R_p + \frac{\tan \beta}{\cos \alpha} h_p \right) \quad (18)$$

με:

$$h_p = t_p - (R_p \sin \alpha + \delta) \quad (19)$$

Ροή εξαιτίας της πλάτης του εργαλείου Q_r :

Η Ροή (Q_r) που παράγεται από την πλάτη μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η ταχύτητα του υλικού και η επιφάνεια (S_s) μέσα από την οποία αυτό διέρχεται. Το σχήμα 5 δείχνει τέσσερις διαφορετικούς τομείς ελεύθερης επαφής μεταξύ του κωνικού πίσου και της κατακόρυφης επιφάνειας της πλάκας. Καθώς το υλικό κατευθύνεται στο αυλάκι, θεωρούμε ότι η μικρότερη επιφάνεια (S_s) βρίσκεται στο επίπεδο (Σ) όπου η πλάτη εφάπτεται στην ελεύθερη επιφάνεια του τεμαχίου. Οι υπολογισμοί αυτοί μπορούν να απλοποιηθούν, αν για μικρή γωνία κλίσης, θεωρήσουμε ότι το επίπεδο αυτό είναι κάθετο στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Επιπλέον, θεωρώντας Νευτώνεια συμπεριφορά του υλικού και ότι το υλικό κολλάει στην πλάτη του υλικού, η ταχύτητα της ροής ενός στοιχείου στο επίπεδο (Σ), είναι κάθετη σε αυτό και μπορεί να γραφεί ως εξής:



$$V_s(r, z) = (\omega \cdot r + V_f) \frac{z}{h(r)} \quad (20)$$

όπου $h(r)$ είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του εργαλείου και της πλάκας.

Τελικά η ροή λόγω της πλάτης, μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας το πεδίο ροής στην ελεύθερη επιφάνεια (S_s):

$$Q_s = \int_{S_s} V_s dS \quad (21)$$

Κάποιες από τις προηγούμενες υποθέσεις για τον υπολογισμό με μορφή εξισώσεων, τείνουν να υποτιμήσουν τη ροή, ενώ άλλοι την υπερεκτιμούν, εν συγκρίσει με τις πραγματικές ροές. Δύο λόγοι Δείχνουν να υπερεκτιμούν: (i) η συμπεριφορά του υλικού είναι βισκοπλαστική κατά τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στην ΣΤΑ. Αυτό γενικά θα προκαλούσε μεγαλύτερη ροή από αυτήν που εκτιμάται από τη Νευτώνεια συμπεριφορά, εξαιτίας της περιστροφής του εργαλείου. Για το λόγο αυτό το μοντέλο αυτό υπερεκτιμά τη γωνία ελευθερίας στην πλάτη του εργαλείου. (ii) Επιπλέον, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, μπορεί να εμφανιστούν κάποιες ζώνες ολίσθησης με αποτέλεσμα να έχουμε υποτιμήσει το μέγεθος της ροής. Αυτό δίνει επίσης υπερεκτιμημένη γωνία ελευθερίας. Αντιθέτως αν υπάρξει ολίσθηση μεταξύ της πλάτης και του υλικού, η ροή που υπολογίσαμε πιο πάνω, θα είναι υπερεκτιμημένη. Το συνολικό αποτέλεσμα από όλα αυτά είναι υποτιμημένη γωνία ελευθερίας.

Αλγόριθμος

Η επιλογή των παραμέτρων της κατεργασίας και της γεωμετρίας του κωνικού εργαλείου, βασίζονται στον αλγόριθμο που φαίνεται. Ο

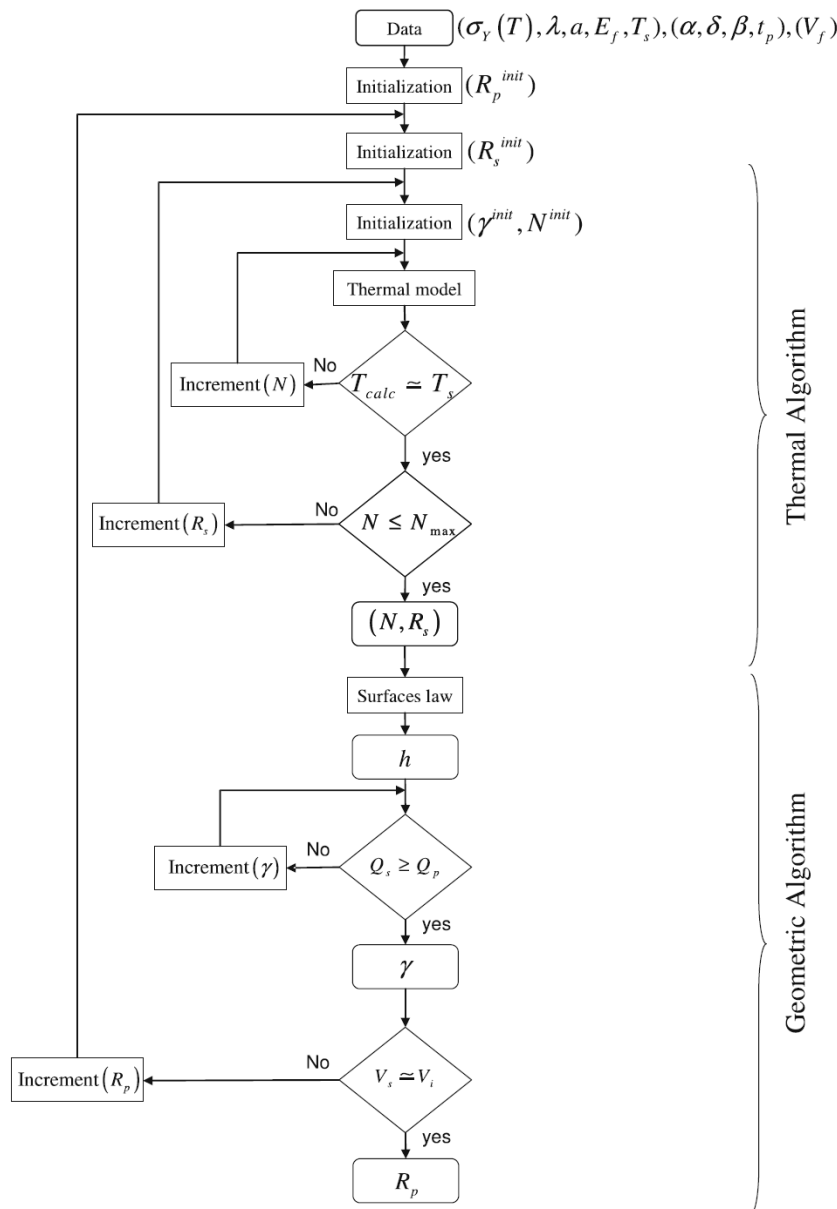
υπολογισμός βασίζεται σε μία μέθοδο δύο βημάτων, όπου πρώτα υπολογίζεται η ταχύτητα συγκόλλησης βάσει της επιλεγμένης θερμοκρασίας εργασίας και ύστερα η γεωμετρία του εργαλείου, βάσει των κανόνων του γεωμετρικού και κινηματικού μοντέλου της διεργασίας της ροής που περιγράφηκε πρωτότερα.

Τα θερμικά δεδομένα που εισάγουμε, αφορούν τη θερμοκρασία εργασίας (T_s), τη σχέση εξάρτησης του ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας $\sigma_y(T)$, τη θερμική αγωγιμότητα (λ), τη θερμική διαχυτικότητα (α) και τη θερμική εκχυτικότητα (E_f) των υλικών για συγκόλληση με χρήση τριβής και ανάδευσης. Η θερμοκρασία γενικά επιλέγεται στο 0.75 της θερμοκρασίας solidus T_f εκφρασμένη σε $^{\circ}\text{K}$ [12]. Έχοντας επιλέξει αρχικά τις ακτίνες της πλάτης και του πύρου (R_s^{init} , R_p^{init}), για δεδομένη πρόωση (V_f), το θερμικό μοντέλο εξάγει δεδομένα σχετικά με τις στροφές του εργαλείου (N) και βελτιστοποιεί την ακτίνα της πλάτης (R_s). Η επιλογή της πρόωσης βασίζεται στην ανταγωνιστικότητα κόστους ενώ οι μέγιστες στροφές του εργαλείου είναι περιορισμός της εργαλειομηχανής. Αν η αρχική τιμή της ακτίνας της πλάτης, δεν επιτρέπει να φτάσουμε τις θερμοκρασίες, ο αλγόριθμος προχωράει με πράξεις αύξησης της ακτίνας βηματικά, μέχρις ότου επιτευχθεί ο στόχος.

Στο δεύτερο στάδιο, η γεωμετρία του εργαλείου καθορίζεται με ιδιαίτερη αναφορά στη γωνία ελευθερίας της πλάτης του εργαλείου και το σχήμα του, για δεδομένη κλίση του εργαλείου (α), διείδυση του πύρου (δ), κωνική γωνία (β) και πάχος της πλάκας (t_p) καθώς και άλλες παραμέτρους που αναφέρθηκαν πρωτότερα για το θερμικό μοντέλο. Εφαρμόζοντας τον κανόνα της επιφάνειας, καθορίζουμε το ύψος του πύρου (h), και από τον κανόνα της

ροής, την γωνία ελευθερίας. Στο τελικό στάδιο, αν ο κανόνας του όγκου ικανοποιείται με το σύνολο των παραμέτρων που βρέθηκαν, τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται. Αλλιώς, η ακτίνα του πύρου (R_p) αλλάξει ξανά και η διαδικασία

υπολογισμού ξεκινάει από την αρχή. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν περιλαμβάνουν τις στροφές του εργαλείου (N), την ακτίνα της πλάτης (R_s), το ύψος του πύρου (h), τη γωνία ελευθερίας (γ) και την ακτίνα του πύρου (R_p).



Variables	T Ref	T S01	T S02	T S03	T S04	T S05	T S06	T S07	T S08	T S09	T S10	T S11	T S12	T S13	T S14	T S15	T S16	T S17	T S18
α (°)	3	3.5	2.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
β (°)	15	15	15	10	20	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
δ (mm)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0	0.2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
tp (mm)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
γ (°)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	0.2	2.2	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
h (mm)	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4	4.2	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10
Rs (mm)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5.5	6.5	6	6	6	6	6	6
Rp (mm)	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.88	1.08	0.98	0.98	0.98	0.98
Vf (mm/min)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	30	90	60	60
N (rpm)	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	750	950
Ts (°C)	385	385	385	382	387	385	385	385	385	385	385	367	402	384	387	387	384	376	395
% Tf	0.71	0.71	0.71	0.70	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.69	0.72	0.70	0.71	0.71	0.70	0.70	0.72
Ev (%)	0.00	-1	3	-25	33	54	-26	11	-8	47	-23	22	-15	-10	12	1	1	1	1
Eq (%)	-5.00	-5	-4	-32	19	-1	-8	83	-91	-6	-4	24	-40	-15	5	-110	30	8	-17
Es (%)	0.00	12	-16	0	0	41	-40	0	0	41	-40	-9	8	3	-2	0	0	0	0
Wl (mm)	inf	inf	71	inf	inf	inf	23	inf	inf	inf	24	131	inf	inf	624	inf	inf	inf	inf

Variables	T 01	T 02	T 03	T 04	T 05	T 06	T 07	T 08	T 09	T 10
α (°)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
β (°)	15	15	15	15	15	15	15	15	0	0
δ (mm)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.25
tp (mm)	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4
γ (°)	6.93	2.81	4.41	0.74	1.55	1.20	12.03	12.38	9.11	9.00
h (mm)	4.11	4.20	4.15	4.18	4.21	4.10	4.12	4.07	5.10	3.90
Rs (mm)	10	10	10	10	6	6	10	6	8.5	7.5
Rp (mm)	4.02	2.23	3.13	2.67	1.27	0.98	3.75	1.53	3.05	2.50
Vf (mm/min)	200	200	200	200	60	60	400	422	720	500
N (rpm)	450	450	450	450	850	850	460	950	1200	750
Tw (°C)	440	-	464	433	396	385	436	386	426	-
% Tf	0.76	-	0.79	0.76	0.72	0.71	0.76	0.71	0.75	-
Ev (%)	43	-37	1	0	0	0	0	0	0	-22
Eq (%)	0	0	0	78	-2	-5	0	0	0	0
Es (%)	0	0	0	0	-50	0	0	0	0	10
Wl (mm)	inf	inf	inf	inf	27	inf	inf	inf	inf	inf

Μελέτη Ευαισθησίας

Ο Αλγόριθμος εκτελέστηκε σε Matlab. Ο πίνακας 2 περιέχει τα αποτελέσματα της μελέτης ευαισθησίας, η οποία εκτιμάει τις επιπτώσεις της απόκλισης κάθε μίας από τις γεωμετρικές παραμέτρους του εργαλείου και τις διεργασιακές συνθήκες ως προς τις λειτουργικές προδιαγραφές που προκύπτουν από τους διάφορους

κανόνες που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία. Κάθε οριζόντια γραμμή αντιστοιχεί σε μία διεργασιακή παράμετρο. Οι τρεις γραμμές πάνω από την τελευταία γραμμή υποδεικνύουν την συμπεριφορά των κανόνων που σχετίζονται με τον όγκο (E_V), τη ροή (E_Q) και την επιφάνεια (E_S):

$$E_V \% = (V_i - V_s) / V_i \times 100,$$

$$E_Q \% = (Q_r - Q_s) / Q_s \times 100, \quad (22)$$

$$E_S \% = (S_i - S_e) / S_i \times 100.$$

Η τελευταία γραμμή του πίνακα 2 παρουσιάζει το θεωρητικά μέγιστο δυνατό μήκος συγκόλλησης (w_1), το οποίο αντιστοιχεί στην απόσταση που διανύθηκε μέχρι ο όγκος μεταξύ της πλάτης και της πλάκας (V_i) αδειάζει σύμφωνα με τον κανόνα της επιφανείας:

$$w_1 = V_i / (S_e - S_i) \quad (23)$$

Ουσιαστικά οι κανόνες βασίζονται στην ιδέα ότι όλοι οι συνδυασμοί διεργασιών συνθηκών, πρέπει να συνιστούν στη διατήρηση, εντός της ζώνης συγκόλλησης, του υλικού που εκτοπίζεται από το εργαλείο στην περιοχή μεταξύ εργαλείου και πλάκας. Αν αυτό δεν εξασφαλίζεται, τότε σταδιακά η απώλεια υλικού μπορεί να συντελέσει στην εμφάνιση κενών και στην κακής ποιότητας επιφάνεια. Αυτά συντελούν στην καθόλα μείωση του μήκους συγκόλλησης (w_1).

Το εργαλείο T_{ref} της πρώτης στήλης, είναι το εργαλείο αναφοράς, μιας και ουσιαστικά ικανοποιεί όλους τους κανόνες. Τα εργαλεία TS01 έως TS18, προέκυψαν με τη μεταβολή ενός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου. Κάθε απόκλιση από το ιδανικό εργαλείο, προκαλεί ένδειξη λάθους σε σχέση με τους θεσπισμένους κανόνες. Παρόλα αυτά, η έκταση του δείκτη λάθους (E_i), ποικίλει περισσότερο ή λιγότερο, ανάλογα με τις διεργασιακές παραμέτρους που εμπλέκονται. Για παράδειγμα:

Μία μεταβολή ενός δεκάτου του χιλιοστού στη θέση του εργαλείου (δ), ή το μήκος (h) του πύρου, προκαλεί 50% μεταβολή στο (E_V) και (E_S). Για

τις θετικές μεταβολές του (δ) ή του (h), το δυνατό μήκος συγκόλλησης θα ελαττωνόταν σημαντικά. Αυτό συνεπάγεται, ότι ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη θέση του εργαλείου κατά την ΣΤΑ, στην περίπτωση ελέγχου βάσει θέσης διεργασίας, ή για να εξασφαλιστεί σταθερή θέση του εργαλείου σε περίπτωση ελέγχου βάσει φορτίου.

Το σφάλμα (E_Q) είναι περισσότερο ευαίσθητο στη πρόωση (V_f) παρά στις στροφές του εργαλείου (N). Για παράδειγμα, ο δείκτης σφάλματος (E_Q) μεταβάλλεται αντίστοιχα κατά 80 και 50% για 50% μεταβολή, είτε στην πρόωση, είτε στις στροφές.

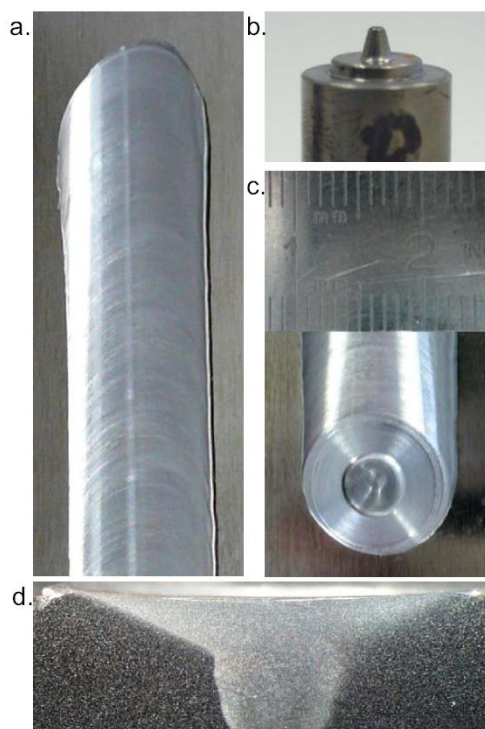
Μεταβολή ενός δέκατου του χιλιοστού στην (R_p) έχει μικρή ή μηδενική επίδραση στα (E_V), (E_S) και (E_Q) (λιγότερο από 10%). Από πρακτικής άποψης, αυτό σημαίνει ότι πιθανή φθορά του εργαλείου, δε θα επηρέαζε ιδιαίτερα τις συνθήκες της συγκόλλησης.

Πειραματικά

Διαδικασία

Η επιλογή προκύπτει χρησιμοποιώντας τα εργαλεία και τις συνθήκες κατεργασίας που φαίνονται στον πίνακα 3. Κάποιες από τις διεργασιακές παραμέτρους και από τα εργαλεία (για παράδειγμα τα T03 και T06) ικανοποιούν όλους τους θεωρητικά θεσπισμένους κανόνες, που θα μπορούσαν να δώσουν ικανοποιητικά βώλους σε πλάκες κράματος 2017. Οι διαστάσεις της πλάκας είναι 300mmx110mmx4mm. Η μηχανή ΣΤΑ είναι μία ψηφιακά καθοδηγούμενη φρέζα, η οποία προσαρμόστηκε σε ΣΤΑ με μέγιστη επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο 5 τόνων. Το εργαλείο είναι ελεγχόμενο βάσει θέσης από ΨΚΥ και η μέγιστη ταχύτητα ατράκτου είναι 1000rpm. Αυτό περιορίζει την σειρά των

διεργασιακών παραμέτρων που ελέγχθησαν στον Πίνακα 3. Τα υπόλοιπα εργαλεία (T01, T02, T04, T05) είναι σχεδιασμένα για να αθετούν εκ προθέσεως τα προτεινόμενους κανόνες. Η τελευταία γραμμή, δίνει το μέγιστο μήκος συγκόλλησης που μπορεί να επιτευχθεί με τη σειρά των διεργασιακών παραμέτρων και των εργαλείων. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τους δείκτες σφάλματος για διαφορετικούς κανόνες, δηλαδή όγκου (E_V), ροής (E_Q) και επιφανείας (E_S).



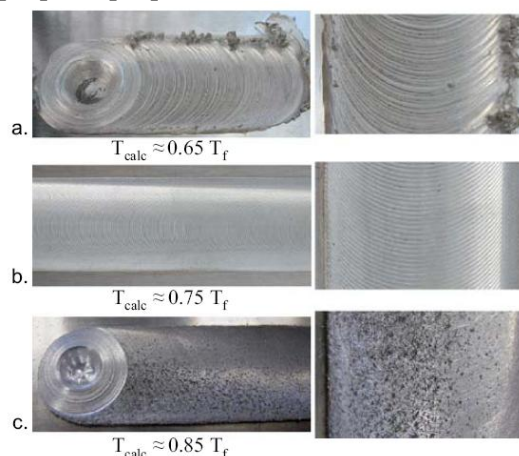
Αποτελέσματα

Βέλτιστος σχεδιασμός εργαλείου

Το εργαλείο T06 σχεδιάστηκε ώστε να ικανοποιεί όλους τους κανόνες. Προκειμένου δε να μειώσει το κάθετο φορτίο και το μέγεθος του βόλου, η διάμετρος της πλάτης του εργαλείου μειώθηκε στα 12mm. Ο βόλος της συγκόλλησης, τόσο στην εξωτερική του εμφάνιση, όσο και στη διατομή του, παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα, χωρίς την παρουσία εκτοπίσματος ή μικροκενών.

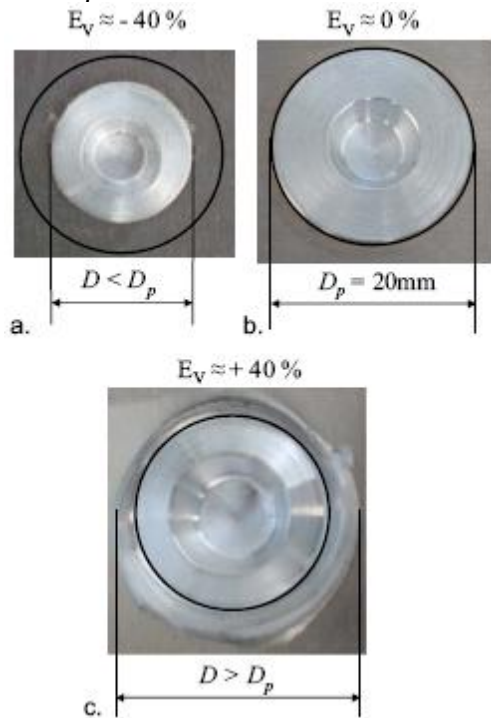
Θερμικό μοντέλο

Ο πιο σίγουρος τρόπος για να επιβεβαιώσουμε το θερμικό μοντέλο, φαίνεται να είναι οι μετρήσεις της θερμοκρασίας. Αυτό μεν δεν έγινε, όμως μία αξιόλογη προσέγγιση για την επικύρωση της ισχύος του μοντέλου, ήταν να παρατηρούμε την τάση της εξέλιξης της θερμοκρασίας ως προς τις υπόλοιπες διεργασιακές συνθήκες και παραμέτρους. Παρόλο που το θερμικό μοντέλο δεν είναι τέλειο, είναι δυνατό να προσεγγιστούν οι μεταβολές της θερμοκρασίας, βαθμονομώντας τα αποτελέσματα, βάσει των δημοσιευμένων αποτελεσμάτων των [13] και [10].



Η εικόνα 8 δείχνει τα αποτελέσματα της δοκιμής με το εργαλείο T03, το οποίο ικανοποιεί όλους τους γεωμετρικούς κανόνες για διαφορετικές στροφές συγκόλλησης και ατράκτου, αλλά σε θεωρητικά διαφορετικές αναμενόμενες θερμοκρασίες. Οι γεωμετρικές συνθήκες ικανοποιήθηκαν επιλέγοντας σταθερό λόγο πρόωσης προς περιστροφές V_f/N , ίσο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για το εργαλείο T03. Στη δοκιμή (α), η θερμοκρασία υπολογίζεται περί το $0.65T_f$. Ο βόλος της συγκόλλησης, εμφανίζει γρέζια και σπασμένα αποκόμματα, που είναι συμπτώματα της χαμηλής ολκιμότητας του υλικού. Στη δοκιμή (β), με υπολογισμένη θερμοκρασία $0.75T_f$, ο

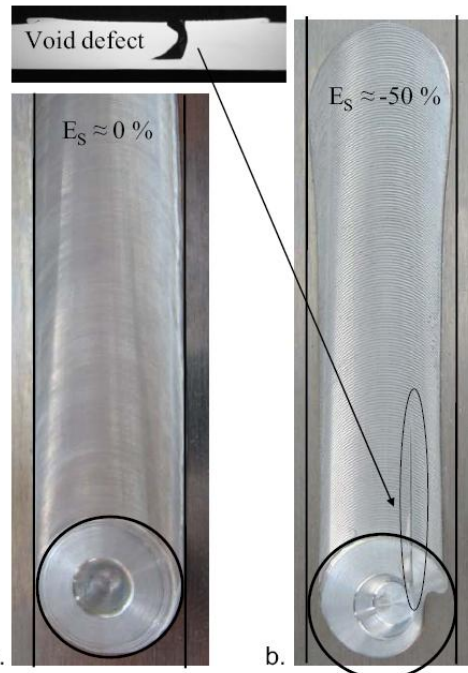
βώλος της συγκόλλησης είναι ικανοποιητικός. Στη δοκιμή (γ), για περίπτωση $0.85T_f$, ο βώλος της συγκόλλησης, γίνεται πάλι μη ικανοποιητικός, όπως φαίνεται από την παρουσία της ιδιοσύστασης της σκούρας επιφάνειας, στο πάνω μέρος του κορδονιού.



Επικύρωση του κανόνα του όγκου

Για την επικύρωση αυτού του κανόνα, δοκιμάστηκαν διαφορετικές γεωμετρίες εργαλείων. Τα εργαλεία T02, T03 και T01 σχεδιάστηκαν ώστε ο εκτοπισμένος από τον πύρο όγκος να είναι μικρότερος, ίσος και μεγαλύτερος αντίστοιχα από τον όγκο που η πλάτη μπορεί να δεχτεί κατά την αρχική φάση της διεξόδου του πύρου, ενώ το εργαλείο ακόμα δεν προχωράει. Το σχήμα 9 δείχνει με μαύρο κύκλο το μέγεθος του αποτυπώματος της πλάτης, καθώς και το μέγεθος του εκτοπισμένου υλικού, το οποίο είναι μικρότερο (T02), ίσο (T03) και μεγαλύτερο (T01) από τη διάμετρο της ίδιας της πλάτης. Το εργαλείο T01 έχει πλεόνασμα δυνατότητας αποθηκευτικού χώρου σε σχέση με το

εκτοπισμένο υλικό, ενώ στο T02 η σχεδιασμένη γεωμετρία της πλάτης είναι ανίκανη αν αποθηκεύσει όλο το εκτοπισμένο μέταλλο. Στο T02, το



υλικό χάνεται εντελώς από το σύνδεσμο της συγκόλλησης και σταδιακά το κορδόνι γίνεται μη ικανοποιητικό. Αντιθέτως με το εργαλείο T01, η ανεπαρκής πλήρωση της κοιλότητας της πλάτης, μειώνει τη διάτμηση με αποτέλεσμα να μειώνεται και η παραγόμενη θερμότητα στην περιοχή αυτή.

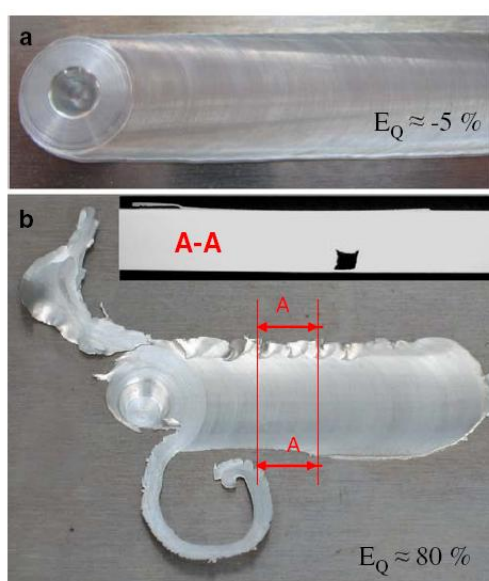
Επικύρωση του κανόνα της επιφάνειας

Το σχήμα 10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής των T05 και T06. Το εργαλείο T06 ικανοποιεί πλήρως τον κανόνα της επιφάνειας ενώ το T05 σχεδιάστηκε με δείκτη λάθους -50%. Με το εργαλείο αυτό (T05), το κορδόνι της συγκόλλησης, σταδιακά γίνεται όλο και στενότερο και ελαττώματα όπως μικροκενά ή ακόμα και γραμμικά κενά μπορούν να εντοπιστούν στο τελευταίο κομμάτι της συγκόλλησης. Τα ελαττώματα αυτά, εμφανίζονται ύστερα από 30mm μήκους συγκόλλησης, το οποίο προκύπτει και από τους υπολογισμούς.

Αυτό οφείλεται στο σχηματισμό γρεζιού και σπασμένων αποκομμάτων που χάνονται από το εργαλείο και το διαθέσιμο υλικό για την πλήρωση του αυλακιού της ουράς του κινούμενου εργαλείου, ελαττώνεται.

Επικύρωση του κανόνα της ροής

Ο κανόνας της ροής επικυρώνεται μέσω δύο εργαλείων. Το εργαλείο T06, το οποίο ικανοποιεί τον κανόνα, παρουσιάζει ικανοποιητικό βόλο συγκόλλησης, ενώ το εργαλείο T04 με δείκτη λάθους 80% παράγει μία αντικανονική μορφή συγκόλλησης, με γρέζι και μεγάλης έκτασης προέκταμα, εξαιτίας της μικρής ροής προς την ουρά, σε σχέση με τη μπροστινή ροή λόγω εκτόπισης του υλικού. Αυτή η διαφορά στη ροή συντελεί στην πλευρική κίνηση του υλικού που αποβάλλεται, η οποία οδηγεί στα παρατηρούμενα ελαττώματα. Επιπλέον με το εργαλείο T05, στην πλευρά υποχώρησης, εμφανίζεται γρέζι με μορφή κύματος. Στην κάθετη διατομή, αυτή η απώλεια υλικού, προκαλεί μικροκενά, εξαιτίας της ελλιπούς πλήρωσης του χαντακιού που αφήνει ο πύρος κατά την πρόωση του εργαλείου.



Σφάλματα θέσης

Αν το εργαλείο δεν είναι σωστά τοποθετημένο, ή εάν δεν χρησιμοποιείται σε διεργασιακές συνθήκες, για τις οποίες βελτιστοποιήθηκε, εμφανίζονται ελαττώματα. Για παράδειγμα, το εργαλείο T06 δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, όταν χρησιμοποιείται σε βέλτιστες συνθήκες. Όταν η πρόωση αυξάνεται, ή τοποθετείται (δ) διαφορετικά, ο βόλος της συγκόλλησης τείνει να εμφανίσει ελαττώματα. Με αυξημένη την πρόωση, παρατηρείται πλευρικό προέκταμα, λόγω του ότι το εργαλείο δεν προλαβαίνει να μεταφέρει το υλικό στο πίσω αυλάκι, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροκενών και προεκτάματος. Αν ο πύρος προσαρμόζεται διαφορετικά από τη βέλτιστη απόσταση, μετατοπισμένος προς τα πάνω σε σχέση με την πλάκα, παρατηρούνται οι αναμενόμενες αυλακώσεις.

Συζήτηση

Από τα προηγούμενα αποτελέσματα, των διεργασιακών συνθηκών και κανόνων για ικανοποιητικές συγκολλήσεις, φαίνεται ότι ένα εργαλείο για να παράγει καλές συγκολλήσεις, σχεδιάζεται για να εργάζεται σε θερμοκρασία κοντά στο 75% της T_f , για δεδομένες τιμές παραμέτρων συγκόλλησης (V_f, N) και τοποθέτησης (δ,α). Στην ακόλουθη ενότητα, θα υποτυπωθεί η όλη ευελιξία ή το παράθυρο των συνθηκών της κατεργασίας, που για δεδομένο εργαλείο, παράγουν συγκολλήσεις καλής ποιότητας. Με άλλα λόγια θα μελετηθεί, η δυνατότητα να έχουμε καλές συγκολλήσεις με διεργασιακές συνθήκες διαφορετικές από τις υπολογισμένες για ένα δεδομένο εργαλείο.

Παράθυρο παραμέτρων διεργασίας

Στους υπολογισμούς μας, η ιδανική θερμοκρασία εργασίας υποθέτουμε ότι είναι το 75% της T_f , όμως τα πειραματικά αποτελέσματα προτείνουν θερμοκρασία εργασίας από 70% έως 80% της T_f . Σύμφωνα με την εξέταση του μοντέλου που έγινε, οι κανόνες όγκου και επιφάνειας, δεν επηρεάζονται με κανένα τρόπο από την πρόωση ή τις στροφές. Αν η ροή λόγω της περιστροφής της πλάτης,

είναι μεγαλύτερη από τη ροή μέσω εκτόπισης, λόγω του κινούμενου πύρου, τότε μπορούμε να δεχτούμε και τις ακόλουθες συνθήκες ροής:

$$\Delta Q = (Q_r - Q_s) \leq 0 \quad (24)$$

όπου:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_r = V_f \left\{ 2(t_p - (R_p \sin a + \delta)) \left(2R_p + \frac{\tan \beta}{\cos a} (t_p - (R_p \sin a + \delta)) \right) \right\} \\ Q_s = V_f \left\{ \int_{s_s} \left(\frac{\omega}{V_f} r - 1 \right) \frac{z}{h(r)} ds \right\} \end{array} \right\} \quad (25)$$

και τελικά:

$$\Delta Q = V_f \left\{ C_r - C_s \left(\frac{V_f}{N} \right) \right\} \leq 0 \quad (26)$$

όπου το C_s εξαρτάται μόνο από το λόγο V_f/N και το C_r είναι ανεξάρτητο τόσο από το V_f όσο και από το N .

Το εργαλείο που διαστασιολογήθηκε από τον αλγόριθμο που αναπτύξαμε, θα έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα αν οι παράμετροι συγκόλλησης είναι ρυθμισμένες για να δίνουν $\Delta Q \leq 0$,



$(V_f^{\text{optimal}}, \delta^{\text{optimal}})$



$(V_f^{\text{optimal}}, \delta^{\text{optimal}} + 0.3\text{mm})$



$(3 \cdot V_f^{\text{optimal}}, \delta^{\text{optimal}})$

το οποίο συνεπάγεται ότι η ζώνη συγκόλλησης τίθεται πάνω από τη γραμμή της κλίσης V_f/N και μεταξύ των ισόθερμων καμπυλών $0.7 T_f$ και $0.8T_f$. Αυτά ορίζουν το παράθυρο των παραμέτρων κατεργασίας. Το σχήμα 13 δείχνει τις βέλτιστες διεργασιακές συνθήκες και τη ζώνη των συνθηκών κατεργασίας, που θα μπορούσαν να παράξουν καλές συγκολλήσεις για δεδομένη γεωμετρία εργαλείων T06, T07, T08 και T03 σε διάγραμμα (V_f, N) . Από τις παρατηρήσεις αυτές, αξίζει να πούμε ότι:

Δύο εργαλεία με ίδια πλάτη (T06 και T08) ή (T03 και T07), μπορεί να έχουν περιορισμένο ή ευρύ παράθυρο διεργασίας ανάλογα με τον αρχικό λόγο V_f/N για τον οποίο σχεδιάστηκε το εργαλείο. Για το λόγο αυτό, ένα δεδομένο εργαλείο μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ένα εύρος προώσεων και στροφών, εάν άλλες παράμετροι παραμείνουν σταθερές.

Για δεδομένη διάμετρο πλάτης, καθώς η αρχική είσοδος του λόγου που αφορά το V_f/N μεγαλώνει, αυξάνεται και το παράθυρο λειτουργικών παραμέτρων. Παρόλα αυτά, αυτό μπορεί να προκαλέσει αύξηση του αξονικού φορτίου, όπως πρότεινε ο [7].

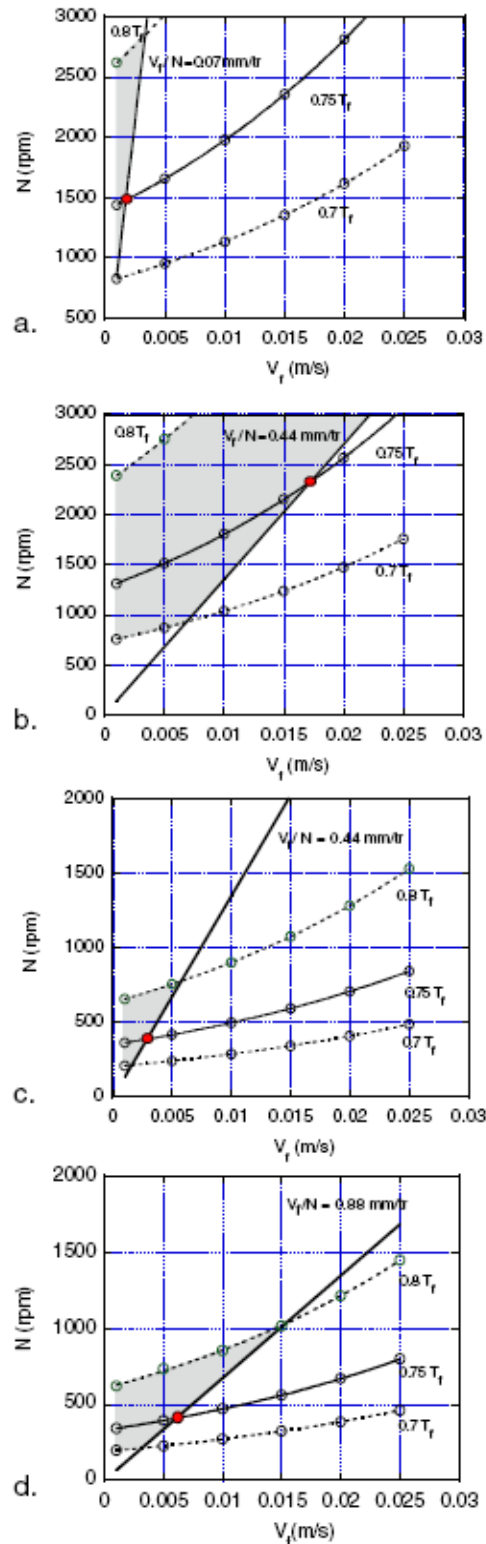
Η μείωση της διαμέτρου της πλάτης συνεπάγεται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.

Η αύξηση της διαμέτρου της πλάτης, βοηθάει στη μείωση της ταχύτητας περιστροφής, μπορεί όμως να αυξηθεί το κόστος.

Σύγκριση με τη δημοσιευμένη βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση της γεωμετρίας του εργαλείου, μπορούν να ελεγχθούν υπό το φως των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από

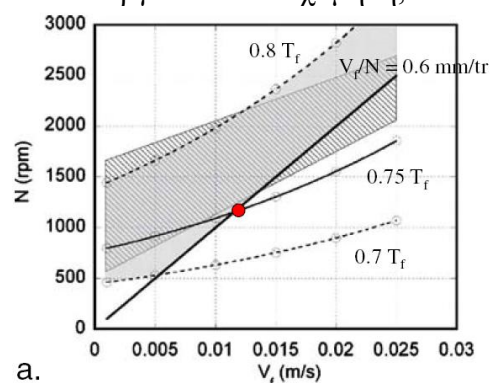
άλλους ερευνητές. Για παράδειγμα, ο [13] εξακρίβωσε πειραματικά το παράθυρο διεργασίας για Al των σειρών 5000 και 6000 και προσδιόρισε μία αποδεκτή ζώνη συγκόλλησης σε



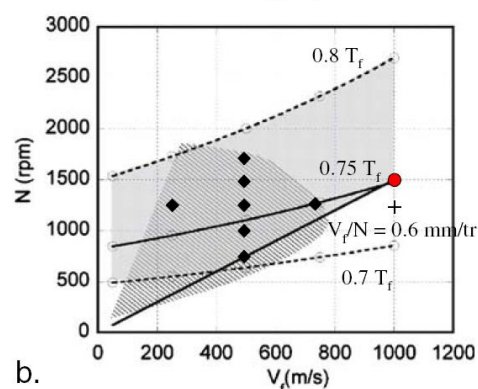
ένα διάγραμμα (V_f, N) όπως φαίνεται στο σχήμα 14. Για το εργαλείο T09, το

σχήμα 14 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα από τον Okamura στο Al σειράς 6000 (γραμμοσκιασμένη περιοχή) και το παράθυρο των λειτουργικών παραμέτρων (σκιασμένη περιοχή) καθώς προέκυψε από τον αλγόριθμο σχεδιασμού του εργαλείου. Ο Kim et al. [10] πρόσφατα εξακρίβωσε μία σειρά ζευγών παραμέτρων (V_f, N), για χυτό κράμα αλουμινίου, που δίνουν ανθεκτικές συγκολλήσεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 14 (γραμμοσκιασμένη περιοχή). Έξω από τη ζώνη γραμμοσκίασης, καταγράφονται ελαττώματα όπως 1) μεγάλο προέκταμα, 2) επίμηκες κούφωμα στο κέντρο και 3) σχηματισμός αυλακώσεως στο κέντρο, τα οποία είναι χαρακτηριστικά αντικανονικών θερμικών συνθηκών. Ο σχηματισμός τους οφείλεται κατά κύριο λόγο 1) σε υπερβολική θέρμανση που εκτοπίζει το υλικό πέρα από το εργαλείο, 2) αντικανονική θέρμανση και 3) αφύσικη μίξη που οδηγεί σε έντονες διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας κατά το πάχος της πλάκας. Στο σχήμα 14 τα αποτελέσματα του εργαλείου T10 (σκιασμένο), παρουσιάζονται μαζί με τα πειραματικά σημεία που εξήχθησαν από τα δεδομένα του Kim, μολονότι δεν έχει καθοριστεί μία συγκεκριμένη περιοχή. Εδώ πάλι, ο αλγόριθμος που μας καθόρισε το σχεδιασμό του εργαλείου και τις συνθήκες της κατεργασίας, φαίνεται να δίνει καλής ποιότητας αντιστοιχία. Η επίδραση του αξονικού φορτίου, έδειξε κατόπιν μελέτης από τον [10], ότι με την αύξησή του, το παράθυρο των λειτουργικών παραμέτρων στο επίπεδο (V_f, N), αυξάνει μέχρι να σταθεροποιηθεί πέρα από τα 12,9 kN. Παρόλο που οι πειραματικές συνθήκες δεν είναι πλήρως αναγνωρισμένες, σύμφωνα με το μοντέλο μας, μία πιθανή εξήγηση αυτών των αποτελεσμάτων μπορεί να βρίσκεται στην τοποθέτηση του εργαλείου με

αυξημένο φορτίο. Αν η πίεση που ασκεί το εργαλείο είναι χαμηλή, τότε ο



a.



b.

πίρος δεν θα τοποθετηθεί σωστά και η πλάτη του εργαλείου δεν θα διεισδύσει αρκετά ώστε να εγκλωβίσει το υλικό που εκτοπίστηκε από τον πύρο. Για την περίπτωση όμως που έχουμε χαμηλά φορτία, η ελλειπής αποθήκευση υλικού στην περιοχή της πλάτης μπορεί επίσης να προκαλέσει ελλειπείς θερμικές συνθήκες για την ΣΤΑ.

Συμπεράσματα και προοπτικές

Αυτή η μελέτη ξεκαθαρίζει τη στρατηγική και τη μεθοδολογία που βοηθάει στην ανεύρεση των παραμέτρων της κατεργασίας, καθώς και τη γεωμετρία ενός εργαλείου με κωνικό πύρο για τη συγκόλληση ενός υλικού με τριβή. Ακολουθώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο, παράγεται η γεωμετρία ενός εργαλείου το οποίο υπό συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης (V_f, N) και καθορισμένες παραμέτρους όπως (δ, α), θα δίνει συγκολλήσεις χωρίς ελαττώματα. Από δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα, προκύπτει ότι υπάρχει

ένα ευρύ πεδίο παραμέτρων κατεργασίας, όπως της προώσεως και των περιστροφών, έχοντας δεδομένη τη γεωμετρία και το στήσιμο της κατεργασίας. Η μελέτη της ευαισθησίας, που παραθέεται εδώ, δίνει ενδείξεις για τις συνέπειες που έχει στη συγκόλληση, η απόκλιση από τις ιδανικές παραμέτρους κατεργασίας, για τις οποίες είναι σχεδιασμένο το εργαλείο. Κάποιες από τις παραμέτρους φαίνεται να έχουν μικρή ή καθόλου επίδραση, κάτι το οποίο δίνει την αφορμή να καθορίσουμε μία ζώνη παραμέτρων συγκόλλησης που θα μπορούσαν να δώσουν αποδεκτές συγκολλήσεις. Εδώ ο όρος αποδεκτή ποιότητα, βασίζεται σε γεωμετρικές θεωρήσεις, όπως είναι η απουσία προεκταμάτων, κενών κ.τ.λ.

Παρόλα αυτά η μελέτη αυτού του μοντέλου, θα μπορούσε να επεκταθεί περισσότερο, καθώς η επίδραση της αξονικής πίεσης και η ανάδευση του υλικού δεν έχουν κατανοηθεί ως προς τη φύση τους για να νοηθεί η επίδρασή τους στην ποιότητα της συγκόλλησης. Αυτές οι οπτικές, είναι αναγκαίο να μελετηθούν, για μία καθόλα βελτιστοποίηση της συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση. Επί παραδείγματι, πρέπει να γίνει μοντελοποίηση της αξονικής πίεσης που θα καθορίζει τη διείσδυση του εργαλείου στην πλάκα και επίσης θα δίνει την ποιότητα της συγκόλλησης. Η γωνία κλίσης και η γωνία του κώνου, επίσης σχετίζονται με την αξονική πίεση, όπως προτάσσει ο [3]. Το παρόν απλό μοντέλο, βασισμένο σε θεωρήσεις που ελαχιστοποιούν την απώλεια του υλικού και χειρίζονται συντηρητικού τύπου μετατοπίσεις γύρω από τον πύρο και κάτω από την πλάτη του εργαλείου, δίνουν πολύ ενδιαφέροντα διεργασιακά χαρακτηριστικά της ΣΤΑ για ένα δεδομένο εργαλείο.

Η πειραματική μελέτη σε πλάκες αλουμινίου πάχους 4mm, που παρουσιάστηκε εδώ επικυρώνει τη

γεωμετρική και κινηματική προσέγγιση που εφαρμόστηκε για το σχεδιασμό των εργαλείων ΣΤΑ. Αν οι κανόνες –γεωμετρικοί και κινηματικοί– που αφορούν τον όγκο, την επιφάνεια και τη ροή του υλικού, δεν ληφθούν υπόψιν για το σχεδιασμό ενός εργαλείου και τις διεργασιακές συνθήκες, τότε αργά ή γρήγορα εμφανίζονται ελαττώματα που εξαρτώνται από την απόκλιση από τις ιδανικές συνθήκες. Το παράθυρο των (V_f, N) για το αλουμίνιο, που βρίσκεται μεταξύ δύο ισόθερμων, όπως οι $0.7 T_f$ και $0.8 T_f$ σε ιδανικές καταστάσεις, δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για όλες τις τιμές που βρίσκονται πάνω από το λόγο του ζεύγους (V_f, N) για το οποίο είναι σχεδιασμένο το εργαλείο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο που προτείνεται, συμφωνούν με άλλα δημοσιευμένα αποτελέσματα. Το μοντέλο και τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ, δεν λαμβάνουν υπόψιν τους το αξονικό φορτίο, το αξονικό φορτίο που είναι επίσης μία σημαντική παράμετρος. Παρόλα αυτά, το μοντέλο που αναπτύχθηκε, έμμεσα ολοκληρώνει τον παράγοντα αυτόν καθώς το εργαλείο είναι τοποθετημένο αναφορικά με το τεμάχιο.

References

1. Adda Y, Dupouy JM, Philibert J, Quéré Y (2000) *Eléments de métallurgie physique, tome 3: Alliages - défauts*. Commissariat à l'Énergie Atomique, France
2. Brown IH (2001) Friction welding at adelaide university. Challenges for innovation in the new millenium, WTIA 49th Annual Conference
3. Buffa G, Huaa J, Shivpuri R, Fratini L (2006) Design of the friction stir welding tool using the continuum based fem model. *Mater Sci Eng A* 419:381–388

4. Chen HB, Yan K, Lin T, Chena SC, Jiang CY, Zhaob Y (2006) The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Mater Sci Eng A* 433: 64–69
5. Chen ZW, Pasang T, Qi Y (2007) Shear flow and formation of nugget zone during friction stir welding of aluminium alloy 5083-o. *Mater Sci Eng A* 5083-o.
6. Colegrove PA, Shercliff HR (2005) 3-dimensional cfd modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. *J Mater Process Technol* 169:320–327
7. Dubourg L, Gagnon FO, St-Georges L, Jahazi M, Hamel FG (2006) Process window optimization for fsw of thin and thick sheet al alloys using statistical methods. 6th symposium of Friction stir welding, St Sauveur, QC, Canada
8. Gratecap F, Racineux G, Poitou A (2005) Influence of process parameters on friction stir welding conditions - application to 6061-t6 al alloy thin plates. ESAFORM 2005
9. Gratecap F (2007) Etudes du procédé de soudage par frottement et malaxage (FSW). Thèse de doctorat GeM Nantes.
10. Kim YG, Fujii H, Tsumura TT, Nakata K (2006) Three defect types in friction stir welding of aluminium die casting alloy. *Mater Sci Eng A* 415:250–254
11. Kumar K, Kailas SV (2007) The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Mater Sci Eng A*
12. Mishra RS, Ma ZY (2005) Friction stir welding and processing. *Mater Sci Eng R* 50:1–78
13. Okamura H (2000) Visualization of material flow in an autogenous friction stir weld. *J Japan Welding Soc* 69(7):565–571
14. Rosenthal D (1941) Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding J* 20(5):220–234
15. Schmidt H, Hattel J (2004) A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding. *Modelling Simulation Mater Sci Eng* 13:77–93
16. Schmidt H, Hattel J, Wert J (2003) An analytical model for heat generation in friction stir welding. *Modelling Simulation Mater Sci Eng* 12:143–157
17. Song M, Kovacevic R (2003) Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *Int J Machine Tools Manuf* 43:605–615
18. Ulysse P (2002) Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *Int J Machine Tools Manuf* 42: 1549–1557
19. Zettler R, dos Santos JF, Donath T, Beckmann F, Lohwasser D (2006) Material flow in friction stir butt welded aluminium alloys. 6th Symposium on friction stir welding, St Sauveur, QC, Canada

Κεφάλαιο 3: Σχολιασμός του μοντέλου

➤ Μοντελοποίηση της διεργασίας

Το κυριότερο τμήμα της συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση, είναι ο σχεδιασμός του εργαλείου. Υπάρχει πληθώρα γεωμετριών και υλικών που έχουν προταθεί, κάθε εφαρμογή όμως απαιτεί ειδικές συνθήκες κατεργασίας. Όμως και οι συνθήκες κατεργασίας υπαγορεύουν τη χρήση εργαλείου συγκεκριμένης μορφής. Προκειμένου λοιπόν να βρεθεί τρόπος όλες αυτές οι παράμετροι να υπαγορεύονται από την εκάστοτε επιθυμητή εφαρμογή, αλλά και σε συμφωνία με τους περιορισμούς που θέτει η μηχανή που έχουμε στη διάθεσή μας, στηριχθήκαμε στην αναλυτική μελέτη των F. Gratecap, G. Racineux και S. Marya [6] η οποία μας δίνει, όπως λέει και ο τίτλος της, μία απλή μεθοδολογία για την εξακρίβωση της γεωμετρίας κωνικού εργαλείου και των παραμέτρων της διαδικασίας.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα απλό θερμικό μοντέλο και τρεις γεωμετρικούς κανόνες που στηρίζονται στην κινηματική του εργαλείου βάσει των επιφανειών, των όγκων και των ροών που λαμβάνουν χώρα, κατά την κίνηση του εργαλείου.

➤ Θερμικό μοντέλο

Στηριζόμενοι στους Gratecap, G. Racineux και S. Marya [6] γνωρίζουμε ότι το παράθυρο διεργασίας των συγκολλήσεων ως προς τη θερμοκρασία, βρίσκεται πρώτον κάτω από τη θερμοκρασία τήξης αλλά και μεταξύ του 0,8 και 0,7 της Solidus όταν αυτή είναι εκφρασμένη σε βαθμούς Kelvin. Η αλήθεια είναι ότι οι Mishra και Ma [11], στους οποίους οι [6] στηρίζονται στο θέμα αυτό, είναι πιο ελεύθεροι ως προς τα όρια, τα οποία τα θέτουν μεταξύ 0.6 και 0.9 της Solidus και μάλιστα ως προς Κελσίου και όχι ως προς Kelvin. Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι παρόλα αυτά, οι [6] για παράθυρο από 0,8 έως το 0,9 της Solidus, η οποία θα είναι εκφρασμένη σε Kelvin, από τα αποτελέσματα που δίνονται, φαίνεται ότι μάλλον οι πράξεις έχουν γίνει σε °C και μάλιστα χωρίς μεγάλους περιορισμούς στην θερμοκρασία. Αυτό φαίνεται καθαρά από τους πίνακες με τα αποτελέσματα τα οποία δίνουν, όπου δίνεται και η θεωρητική θερμοκρασία της συγκόλλησης. Δεδομένου ότι το κράμα 2017 T4 έχει την Solidus στους 518 °C, η θερμοκρασία που μας δίνει (385 °C) βάσει της σχέσης $\frac{T+273}{T_{Solidus}} \cdot 100\%$ αναλογία 83,2% και όχι 71%

όπως εκδίδουν, το οποίο 71% θα ίσχυε αν η Solidus ήταν 654 °C. Αυτό το οποίο φαίνεται να δίνει περίπου αποτέλεσμα, είναι να περάσουμε σε °C. Τότε η αναγκαία Solidus θα είναι 543 °C, το οποίο πλησιάζει την

πραγματικότητα. Παρόλο όμως που φαίνεται, ότι τα πειράματα έχουν βγει από παράθυρο θερμοκρασιών εκφρασμένο σε Κελσίου, εμείς θα βγάλουμε αποτελέσματα σε Κέλβιν ακριβώς όπως μας περιγράφει.

Ένα άλλο σημείο που χρειάζεται επίσης προσοχή, είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του τεμαχίου, ο οποίος παρουσιάζεται στους [6] ως 229, ενώ στη βιβλιογραφία είναι 134.

Το θερμικό μοντέλο πάντως που πρόκειται να ακολουθήσουμε, έχει προταθεί από τον Rosenthal και εκφράζει τη συμπεριφορά σημειακής πηγής με σταθερή ταχύτητα που κινείται σε ημιάπειρο μέσο.

Το μοντέλο αυτό θα μας βοηθήσει να εξασφαλίσουμε, τουλάχιστον θεωρητικά ότι η θερμοκρασία που βρίσκεται κάτω από την πλάτη του εργαλείου, βρίσκεται εντός του παραθύρου διεργασίας. Η θερμοκρασία εκφράζεται μέσω των διάφορων παραμέτρων της διεργασίας, όπως τις φυσικές ιδιότητες των υλικών, τη γεωμετρία του εργαλείου και τις συνθήκες της συγκόλλησης.

Κατά τη συγκόλληση, παράγεται θερμότητα λόγω τριβής. Ανάλογα με την ένταση της συμπίεσης από την πλάτη, η τριβή μπορεί να είναι κολλώδης ή ολίσθησης. Από την μελέτη των H Schmidt και J Hattel [7] που έγινε με τη μέθοδο πεπερασμένων σημείων για αλουμίνιο 2024-T3, για την οποία οι Mishra και Ma [11] μιλούν με τα καλύτερα λόγια για τη σημασία της ως περιγραφικού θερμικού μοντέλου, βρέθηκε ότι στο εσωτερικό του εργαλείου η τριβή είναι κολλώδης, ενώ στον εξωτερικό όμως δακτύλιο της πλάτης, για κάποιο πλάτος, έχουμε ολίσθηση. Παρόλα αυτά για λόγους διευκόλυνσης, προκειμένου να μη χρειαστεί να υπολογίσουμε πειραματικό συντελεστή τριβής, θεωρούμε ότι η τριβή που αναπτύσσεται είναι κολλώδης. Τότε βάσει του κριτηρίου του Mises μπορούν να υπολογιστούν η θερμότητα που παράγει η πλάτη και ο πύρος. Αν συμβολίσουμε την ακτίνα της πλάτης ως R_s , την ακτίνα του πύρου ως R_p , το ύψος του πύρου από το χείλος της πλάτης ως h , τη γωνιακή ταχύτητα του εργαλείου ως ω και το όριο διαρροής του υλικού που θέλουμε να συγκολλήσουμε ως σ_Y , τότε προκύπτουν κατόπιν ολοκλήρωσης οι ακόλουθες σχέσεις:

$$Q_s = \frac{2\pi}{3} (R_s^3 - R_p^3) \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \omega \quad (1)$$

$$Q_p = \frac{2\pi}{3} R_p^3 \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \omega + 2\pi R_p^2 h \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \omega \quad (2)$$

Θεωρώντας την περίπτωση λεπτών πλακών, δεν έχουμε μεταβολή της θερμοκρασίας κατά το πάχος. Επίσης θεωρώντας ότι το όριο διαρροής εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία, θεωρούμε ότι ούτε αυτό μεταβάλλεται κατά το πάχος και άρα οποιαδήποτε μεταβολή στα μεγέθη αυτά θα πραγματοποιείται κατά το επίπεδο του τεμαχίου.

Τελικά η ολική θερμότητα που παράγεται θα είναι ίση με:

$$Q_t = Q_s + Q_p$$

Με τον τρόπο αυτό θεωρούμε ότι όλη η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα, ενώ η ενέργεια που καταναλώνεται για την παραμόρφωση του υλικού είναι μικρή. Στην πραγματικότητα το ποσοστό αυτό είναι μεταξύ 5% και 10% της ολικής ενέργειας.

Επιπλέον, προκειμένου να υπολογίσουμε τις απώλειες λόγω αγωγής της θερμότητας διαμέσου του ίδιου του εργαλείου, εισάγεται ο ακόλουθος βαθμός απόδοσης του εργαλείου:

$$Q_{\text{εργαλείου}} = \frac{E_{f_πλάκας}}{E_{f_πλάκας} + E_{f_εργαλείου}} \quad (4)$$

όπου E είναι η εκχυτικότητα των δύο υλικών, το οποίο αποτελεί την τετραγωνική ρίζα του γινομένου του συντελεστή αγωγής, της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας.

Τελικά το μέτρο της θερμοκρασίας βάσει του Rosenthal, καθώς και σε συμφωνία με τους [6],[7],[8] προκύπτει από τη σχέση:

$$T - T_0 = Q_{\text{εργαλείου}} \frac{Q_t}{2pl} \exp\left(\frac{-V_f \xi}{2a}\right) \exp\left(\frac{-V_f \psi}{2a}\right) \cdot \frac{1}{\psi} \quad (5)$$

T_0 είναι η αρχική θερμοκρασία, λ η θερμική αγωγιμότητα, a η θερμική διαχυτικότητα, V_f η πρόωση, ψ η απόσταση του σημείου από την πηγή και ξ η θέση της πηγής στη διεύθυνση της συγκόλλησης.

Η λογική που ακολουθήσαμε για την εξακρίβωση της συνάρτησης της τάσης διαρροής ως προς τη θερμοκρασία εξηγείται στο κομμάτι της υλοποίησης.

Οι εξισώσεις αυτές θα μας βοηθήσουν να καθορίσουμε τις στροφές με τις οποίες θα πρέπει να περιστρέφεται το εργαλείο, και πόση θα είναι η εξωτερική του διάμετρος.

➤ Γεωμετρικό και κινηματικό μοντέλο

Το επόμενο βήμα είναι να καθορίσουμε τους κανόνες, τους οποίους η γεωμετρία του πύρου θα πρέπει να ικανοποιεί, προκειμένου κατά την κίνησή του, η ροή του υλικού να πραγματοποιείται ομαλά χωρίς τη δημιουργία γραμμικών ατελειών ή προεκτάματος.

Η εξασφάλιση της ομαλής ροής του υλικού, χωρίς απώλειες, είναι θεμελιώδους σημασίας για τη συγκόλληση τριβής με ανάδευση, επειδή δεν υπάρχει υλικό πλήρωσης. Το εργαλείο διέρχεται δια μέσου του

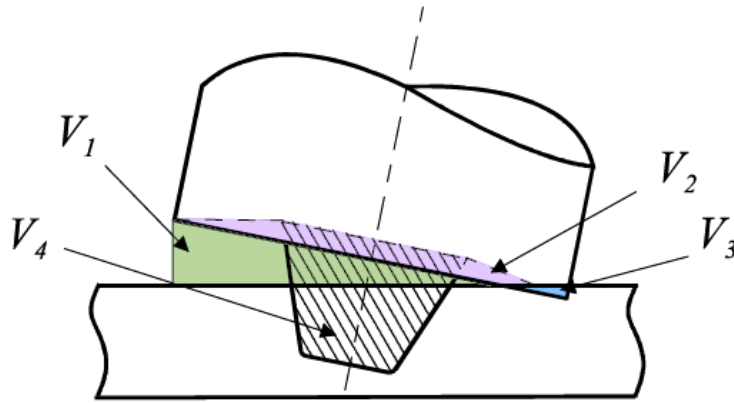
υλικού και ενώ μπροστά του υπάρχει η σχισμή της ραφής, πίσω του μένει η ραφή συγκολλημένη. Αν λοιπόν η γεωμετρία του εργαλείου είναι τέτοια, ώστε να δημιουργείται προέκταμα στις δύο πλευρές της ραφής, το μόνο σίγουρο είναι ότι το υλικό αυτό προήλθε από το εσωτερικό της ραφής. Ως εκ τούτου το υλικό που απομένει για να καλύψει το κενό, το οποίο αφήνει ο πίσος πίσω του, είναι λιγότερο από αυτό το οποίο του αντιστοιχεί. Αυτό στην καλύτερη περίπτωση, μπορεί να σημαίνει ότι το πάχος της ραφής θα είναι μικρότερο από το πάχος του υπόλοιπου τεμαχίου, συνήθως όμως αυτό που γίνεται είναι το υλικό να μην επαρκεί να καλύψει όλη την αυλάκωση που “σκάβει” ο πίσος και να δημιουργείται γραμμική ατέλεια κατά μήκος της πλευράς προώσεως. Έχοντας λοιπόν καθορίσει τις στροφές του εργαλείου και την εξωτερική του διάμετρο, θα χρησιμοποιήσουμε έναν κανόνα όγκων που παίρνουν μέρος στη διεργασία, από τον οποίο καθορίζουμε το πάχος του πίσου μέσω της ακτίνας του, έναν κανόνα επιφανειών από τον οποίο καθορίζουμε το ύψος του πίσου και ένα κανόνα ροής από τον οποίο καθορίζεται η γωνία της κοιλότητας της πλάτης, η οποία ονομάζεται γωνία ελευθερίας. Οι κανόνες αυτοί προκύπτουν ελέγχοντας τη θέση του εργαλείου και όχι βάσει των δυνάμεων, αν και οι παράμετροι αυτοί είναι αλληλένδετες.

➤ *Κανόνας του Όγκου*

Κατά την εκκίνηση της διεργασίας, το εργαλείο διεισδύει στο υλικό σε μία προκαθορισμένη θέση δ πάνω από την έδρα του τεμαχίου. Η διείσδυση αυτή, κατά τους [18], η διείσδυση στις μετωπικές συγκολλήσεις τυπικά λαμβάνεται 0,1 mm με 0,2 mm λιγότερα από το πάχος της συγκόλλησης, δίνοντας ένα παράθυρο διεργασίας της τάξης του 0,1 mm, πάντα όμως σε αναφορά με το πάχος του υλικού. Επίσης στην [20] χρησιμοποιείται επίσης διάκενο 0,2 mm

Το υλικό που εκτοπίζεται από τον πίσο, θα πρέπει να εγκλωβίζεται πλήρως από την πλάτη προτού να ρεύσει κατά την πρόωση. Σε αντίθετη περίπτωση, η απώλεια του υλικού εκτός της πλάτης, θα οδηγήσει σε μικρο-κενά, ρηγματώσεις ή ελάττωση του πάχους της συγκόλλησης. Αυτό όμως εξίσου σημαίνει ότι ο χώρος κάτω από την πλάτη, δεν θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλος, επειδή αυτό θα σημαίνει άδειο χώρο και άρα μείωση της τριβής, άρα και της παροχής της θερμότητας.

Με άλλα λόγια θα πρέπει οι όγκοι V1 και V2 να βρίσκονται σε ισορροπία με τους V3 και V4, όπως φαίνεται και από το σχήμα.



Κατόπιν ολοκλήρωσης προκύπτουν οι τύποι:

$$V_1 = R_s^3 \cos a \sin a [\cos \theta_1 (\pi + \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \theta_1) + \frac{2}{3} \sin^3 \theta_1]$$

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi H [R_s^2 + (R_p + (h + H) \tan \beta)^2 + R_s (R_p + (h + H) \tan \beta)] - \pi (R_p + (h + H) \tan \beta)^2 H$$

Όπου $H = \frac{(R_s - R_p - h \tan \beta)}{\tan \beta + \frac{1}{\tan a}}$

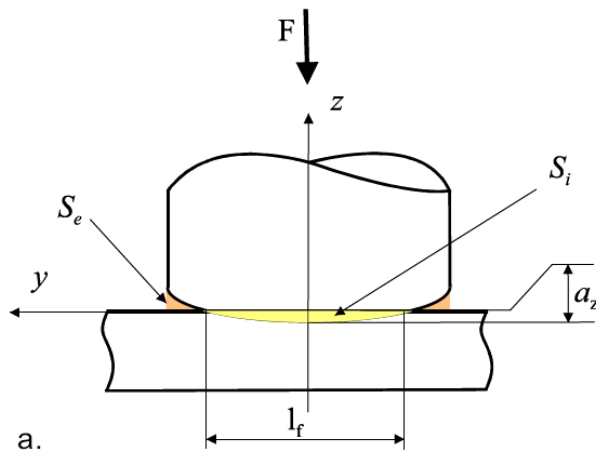
$$V_3 = R_s^3 \cos a \sin a (\cos \theta_1 (\sin \theta_1 \cos \theta_1 - \theta_1) + \frac{2}{3} \sin^3 \theta_1)$$

$$V_4 = \frac{1}{3} \pi h [R_p^2 + R_p (R_p + h \tan \beta) + (R_p + h \tan \beta)^2]$$

Από την ισορροπία των όγκων αυτών μπορούμε να ελέγξουμε το πάχος του πύρου, μέσω της ακτίνα του R_p

➤ Κανόνας της επιφάνειας

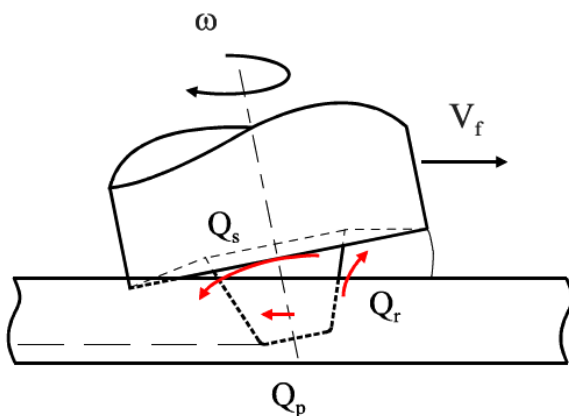
Όπως είπαμε η συγκόλληση αυτή είναι συνδυασμός διέλασης και σφυρηλάτησης. Η διέλαση προκαλείται από την κλίση του εργαλείου, η δε σφυρηλάτηση από την εμπλοκή az της πλάτης στο τεμάχιο. Τέτοιου είδους εμπλοκή, δημιουργεί προέκταμα στις δύο πλευρές της συγκόλλησης, του οποίου η διατομή είναι ίση με την επιφάνεια της πλάτης που εμπλέκεται.



Δεδομένης της απόστασης δ από τη βάση του τεμαχίου, ο κανόνας της επιφάνειας, επηρεάζεται κυρίως από το ύψος του πύρου, το οποίο όσο μεγαλώνει τόσο μειώνεται η εμπλοκή και αυξάνεται η επιφάνεια του προεκτάματος και αντίστροφα. Έτσι προκύπτει το βέλτιστο ύψος του εργαλείου.

➤ Κανόνας Ροής

Αναφέραμε στο κομμάτι της δομής της ραφής, ότι σε αντίθεση με την πλευρά υποχώρησης, στην πλευρά πρόωσης τα πεδία ταχυτήτων, περιστροφής και πρόωσης είναι αντίθετα. Με άλλα λόγια στην περιοχή αυτή το υλικό διατέμνεται και ένα κομμάτι προχωράει προς το πίσω μέρος του εργαλείου μαζί με το υπόλοιπο τεμάχιο, ένα άλλο όμως λόγω της διάτμησης, αποκολλάται, περνάει από το εμπρόσθιο μέρος του εργαλείου, μεταφέρεται στην πλευρά υποχώρησης και φτάνει πίσω από το εργαλείο, όπου καλείται να πληρώσει τον κενό χώρο τον οποίο άφησε πίσω του ο πύρος. Πέρα από αυτό ο πύρος διατέμνει και το υλικό που βρίσκεται μπροστά του, συμπεριφερόμενος ως άροτρο και ανεβάζοντάς το στην επιφάνεια.



Εκεί το υλικό έρχεται σε αλληλεπίδραση με την πλάτη, οπότε παρασέρνεται προς την πλευρά υποχώρησης, στην οποία διελάττεται προς την οπίσθια πλευρά του εργαλείου.

Στην περίπτωσή μας το υλικό που μεταφέρεται προς τα πίσω μόνο από τον πύρο, αμελείται ως πολύ μικρή ποσότητα. Αυτό όμως που έχει σημασία, είναι ότι όλο το υλικό, προκειμένου να προσπεράσει το εργαλείο, αναγκάζεται να διέλθει από την πλευρά υποχώρησης.

Οι δύο ροές, του πύρου δηλαδή, και της πλάτης υπολογίζονται βάσει των σχέσεων:

$$Q_r = V_f \cdot S_p$$

Αν ορίσουμε ως h_p το ύψος του βυθισμένου τμήματος του πύρου:

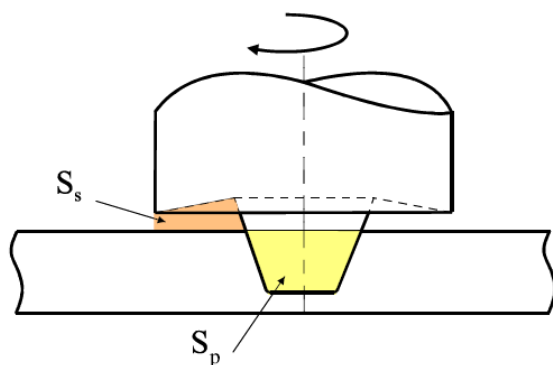
$$S_p = h_p \left(2R_p + \frac{\tan \beta}{\cos \alpha} h_p \right)$$

με:

$$h_p = t_p - (R_p \sin \alpha + \delta)$$

Το πεδίο ταχύτητας είναι:

$$V_s(r, z) = (\omega \cdot r + V_f) \frac{z}{h(r)}$$



όπου $h(r)$ είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του εργαλείου και της πλάκας. Η ροή λόγω της πλάτης, μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας το πεδίο ροής στην ελεύθερη επιφάνεια (S_s):

$$Q_s = \int_{S_s} V_s dS$$

Από την ισορροπία μεταξύ των ροών, μπορούμε να βρούμε ποια είναι η κατάλληλη γωνία ελευθερίας, η οποία να επιτρέπει με ομαλό τρόπο τη ροή από την εμπρόσθια στην οπίσθια πλευρά του εργαλείου.

Κεφάλαιο 4: Ο Αλγόριθμος

Το πρόγραμμα που γράφτηκε αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο και κύριο μέρος αφορά το μαθηματικό μοντέλο και την επίλυση των εξισώσεων, ενώ το δεύτερο αφορά έναν γραφικό διαμεσολαβητή με τον οποίο θα μπορεί ο χρήστης να αλληλεπιδρά και να βγάζει συμπεράσματα, χωρίς να πρέπει να επέμβει στη δομή του αλγορίθμου. Αυτό έγινε κυρίως για λόγους ευκολίας προς άλλους οι οποίοι πιθανόν να θελήσουν να χρησιμοποιήσουν τον αλγόριθμο, ώστε να μη χρειαστεί να μπουν στη λογική με την οποία αυτός γράφτηκε.

Ο αλγόριθμός μας, φτιάχτηκε στο πρόγραμμα Matlab στηρίζεται σε ένα κεντρικό αρχείο, το οποίο αρχικά καλεί το αρχείο στο οποίο βρίσκονται όλες οι αρχικές συνθήκες και οι παράμετροι, με τις οποίες θα ξεκινήσει. Ύστερα εκκινείται ένας βρόχος, στον οποίο καλούνται τέσσερις συναρτήσεις, σε αντιστοιχία με το θερμικό μοντέλο και τους τρεις κανόνες που εισαγάγαμε πρωτύτερα. Ισορροπώντας ο βρόχος σε ένα τελικό αποτέλεσμα, υπολογίζεται το πεδίο της θερμοκρασίας γύρω από το εργαλείο και εκτυπώνονται τα αποτελέσματα.

Τα δεδομένα τα οποία θα πρέπει να εισάγουμε στον αλγόριθμο είναι:

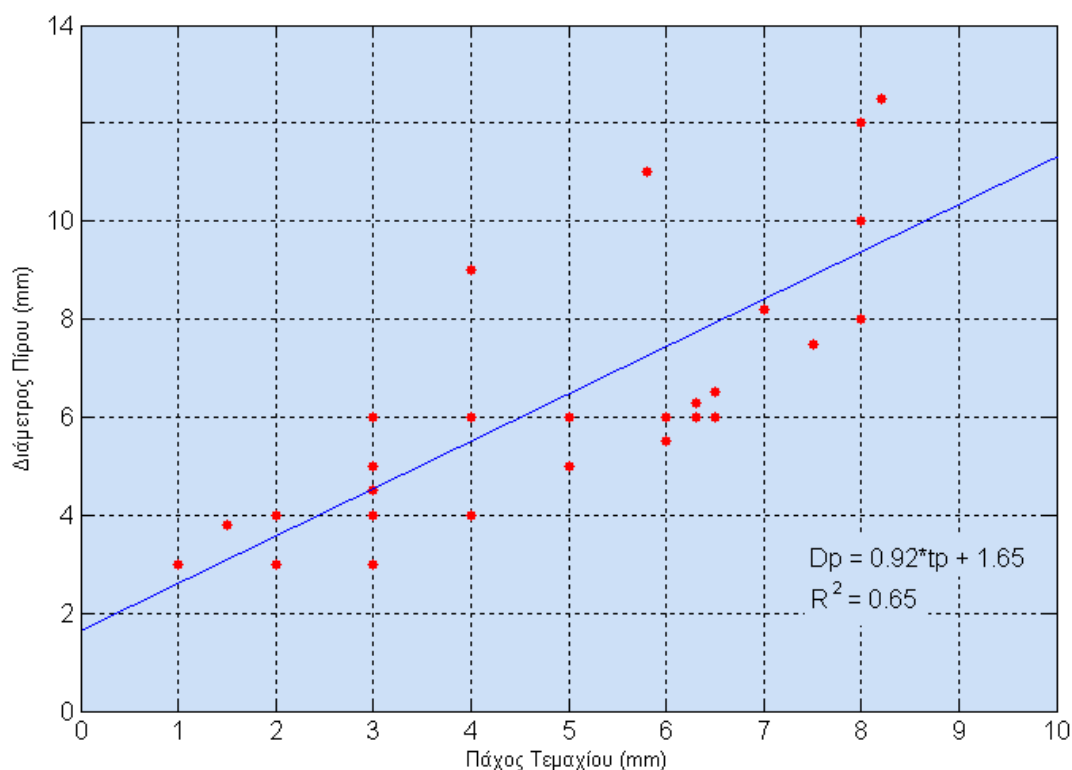
1. οι θερμικές ιδιότητες του υλικού μας και του υλικού από το οποίο σκοπεύουμε να φτιάξουμε το εργαλείο.
2. Η συνάρτηση του ορίου διαρροής με τη θερμοκρασία
3. Η επιθυμητή κλίση για το εργαλείο μας
4. Η επιθυμητή απόσταση του εργαλείου από την έδρα του τεμαχίου
5. Η επιθυμητή ημιγωνία του κώνου
6. Η επιθυμητή πρόωση

Τα στοιχεία αυτά δεν πρόκειται να αλλάξουν κατά τον αλγόριθμο. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά θα μεταβληθούν βάσει αυτών. Όσον αφορά την κλίση του εργαλείου, σύμφωνα με τους [6] προτείνεται να κυμαίνεται μεταξύ 2° και 4° ή $1,5^\circ$ και $4,5^\circ$ σύμφωνα με τους [1]. Αυτά βέβαια ισχύουν, όπως στην περίπτωση μας, για εργαλείο με κοίλη πλάτη. Επίσης όσον αφορά την ημιγωνία του κώνου, υπάρχει η μελέτη [19] που μελετάει τη συμπεριφορά των κωνικών εργαλείων για ημιγωνίες 0° , 30° και 60° καταλήγοντας ότι η δύναμη που χρειάζεται να ασκηθεί από τη μηχανή μειώνεται για τις 30° , αυξάνεται όμως απότομα όταν πηγαίνουμε στις 60° . Το ίδιο συμβαίνει και με την αντοχή των συγκολλήσεων. Αυτό σημαίνει ότι μεταξύ 0° και 30° έχουμε τις γωνίες για τις οποίες καταναλώνεται η λιγότερη ενέργεια, δίνοντας ταυτόχρονα και τις

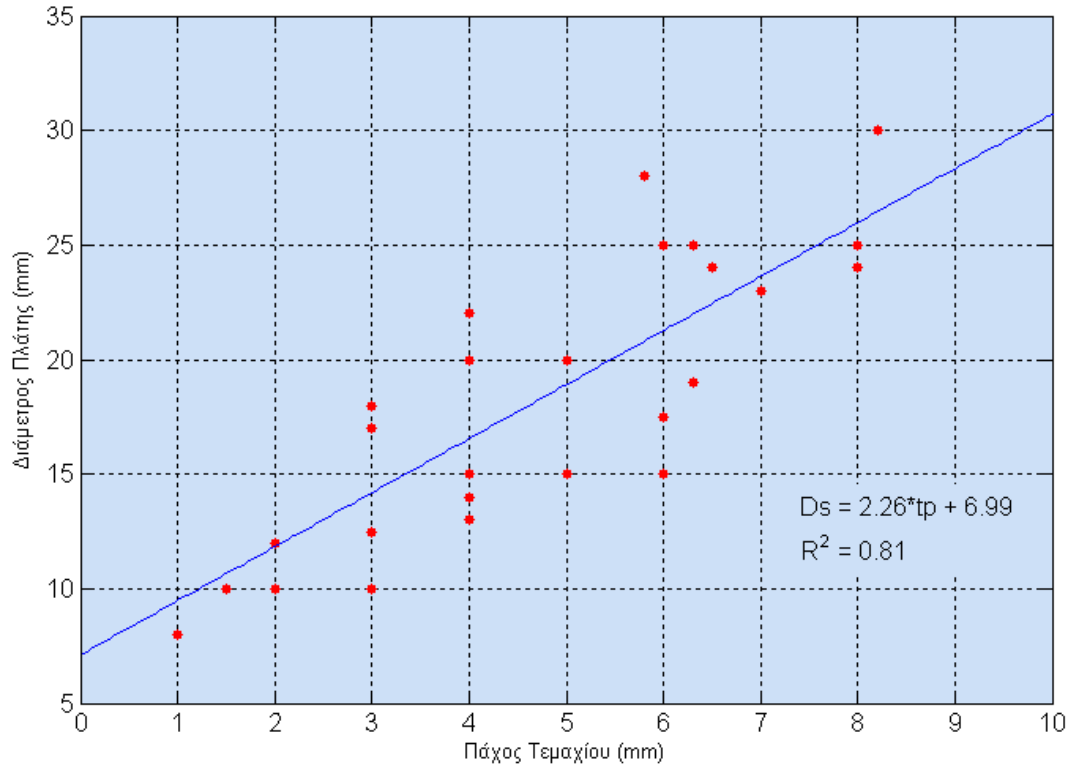
καλύτερες σε αντοχή συγκολλήσεις. Εμείς αυτό που κάναμε είναι να ακολουθήσουμε τους [6] υιοθετώντας τις 15°.

➤ Αρχικοποίηση παραμέτρων

Όσον αφορά την αρχικοποίηση των παραμέτρων που πρόκειται να υπολογίσουμε, δηλαδή τις ακτίνες της πλάτης και του πύρου, τις στροφές, τη γωνία και το ύψος του πύρου, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν περισσότερο από όλες το τελικό αποτέλεσμα είναι οι ακτίνες και κατά κύριο λόγο αυτή της πλάτης. Για το λόγο αυτό καλό είναι να στηριχθούμε σε υπάρχουσα βιβλιογραφία και ύστερα να αφήσουμε τον αλγόριθμο να καθορίσει καλύτερα τις παραμέτρους. Ανατρέχοντας στην [19] βρίσκουμε δύο διαγράμματα αντλημένα από τον Dubourg [21] που δίνουν τη διάμετρο της πλάτης και του πύρου, βάσει του πάχους του ελάσματος για κυλινδρικό εργαλείο.



Γενικά μας ενημερώνει ότι για πάχος ελάσματος 5mm η διάμετρος της πλάτης λαμβάνεται μεταξύ 15 mm και 20 mm, ενώ ο λόγος της διαμέτρου της πλάτης προς τη διάμετρο του πύρου, κινείται τις περισσότερες φορές μεταξύ 2,5 και 3. Επίσης το ύψος του πύρου λαμβάνεται ελαφρώς μικρότερο από το έλασμα, το ίδιο και η ακτίνα του, με τη διαφορά ότι η ακτίνα δεν μειώνεται ποτέ κάτω από τα 3 mm. Εντύπωση πάντως μας προκαλεί που καμμία από αυτές τις ενδεικτικές τιμές δεν ακολουθεί τα αποτελέσματα που δίνει η [6] την οποία και ακο-



λουθούμε. Εξάλλου εδώ έχουμε κωνικό εργαλείο, και η ακτίνα στην άκρη, την οποία υπολογίζουμε εμείς, είναι πολύ μικρότερη από την ακτίνα στη ρίζα του εργαλείου.

➤ Εκτίμηση της σχέσης σ - T

Για να εκτιμήσουμε το όριο διαρροής με βάση τη θερμοκρασία δεν μας δίνεται καμμία πληροφορία πέρα από τις πηγές από τις οποίες οι [6] έφτιαξαν το μαθηματικό τους μοντέλο. Ανατρέχοντας λοιπόν και εμείς στις πηγές [7], [13] ανακαλύψαμε στην [7] το περιγραφικό μοντέλο των Johnson-Cook το οποίο περιγράφει τη μεταβολή του ορίου διαρροής με βάση την ισοδύναμη παραμόρφωση, το ρυθμό της ισοδύναμης παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία. Η περιγραφή του μοντέλου δίνεται από τους [7], για περαιτέρω όμως περιγραφή ανατρέξαμε στη δημοσίευση των Riqiang Liang, Akhtar S. Khan [14], η οποία βελτιώνεται σε πολύ μεγαλύτερο βάθος από την [15]. Η εξίσωση των Johnson-Cook, όπως δίνεται από την [14] είναι:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m})$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

Όπου ε η ισοδύναμη παραμόρφωση $\dot{\varepsilon}$ ο ρυθμός της ισοδύναμης παραμόρφωσης, T_r η θερμοκρασία αναφοράς, κάτω από την οποία δεν πρόκειται να φτάσει η T και T_m η Solidus.

Το μόνο που χρειάζεται να υπολογιστεί είναι οι τέσσερις παράμετροι A , B , C , m οι οποίες μπορούν με σχετικά απλά πειράματα να προκύψουν. Οι [7] δίνουν τις παραμέτρους αυτές, αλλά για την περίπτωση του κράματος 2024 T4, το οποίο ανήκει μεν στην ίδια οικογένεια με το υλικό που μελετάμε, το 2017 T4 αλλά έχει μεγαλύτερο όριο διαρροής και μικρότερη θερμοκρασία τήξης. Προσπαθήσαμε να αναζητήσουμε τις πηγές των παραμέτρων αυτών, αλλά η προσπάθειά μας δεν ευοδώθηκε. Στην περίπτωσή μας πάντως, όπως αναφέραμε και πιο πάνω στους υπολογισμούς των θερμοτήτων, θεωρούμε το όριο διαρροής συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα η συνάρτηση να απλοποιείται σημαντικά στην ακόλουθη:

$$\sigma = A(1 - T^{*m})$$

Η παράμετρος A είναι το όριο διαρροής για $T=T_r$, αφού τότε $T^*=0$. Θεωρώντας λοιπόν $T=28$ οC θερμοκρασία δωματίου, η A θα είναι το γνωστό όριο διαρροής του υλικού που μελετάμε. Για τον υπολογισμό του m χρειαζόμαστε τουλάχιστον ένα ζεύγος (σ, T) , το οποίο όσο πιο κοντά θα είναι στη θερμοκρασία που ψάχνουμε, τόσο πιο ακριβή αποτελέσματα θα έχουμε.

Πέρα από το μοντέλο των Johnson-Cook βρήκαμε στη δεύτερη πηγή [13], κάποια πειραματικά ζεύγη (σ, T) για το αλουμίνιο 6061 T6. Τα πειραματικά αυτά στοιχεία τα χρησιμοποιήσαμε κάνοντας παρεμβολή spline. Όμως τις μετρήσεις αυτές δεν θα μπορούσαμε να τις χρησιμοποιήσουμε καθώς για το αλουμίνιο 2017 T4, μιας και δεν ανήκουν ούτε καν στην ίδια οικογένεια.

Υποθέσεις θα μπορούσαμε μόνο να κάνουμε για το πώς χρησιμοποίησαν οι [6] τις πηγές αυτές. Μία υπόθεση είναι ότι πήραν την καμπύλη του 2024 και την περιόρισαν με απλή αναλογία κατά τις σ με βάση το όριο διαρροής του 2017, ενώ αντίστοιχα την επέκτειναν ομοίως κατά τις T με βάση τη Solidus του 2017. Άλλη υπόθεση είναι ότι αυτό το έκαναν με την καμπύλη του 6061, ενώ μία τρίτη υπόθεση είναι ότι πήραν το μέσο όρο των δύο αυτών προσεγγίσεων.

Εμείς πέρα από αυτές τις πηγές, βρήκαμε στον [16] ένα διάγραμμα που έδινε την τάση διαρροής ως προς την θερμοκρασία, ενώ από την ιστοσελίδα suppliersonline [17] βρήκαμε την ίδια καμπύλη, παρόλο που

είχε σημαντική απόκλιση από την πρώτη. Ο κώδικας για τις καμπύλες ο οποίος γράφτηκε, δίνεται στο Παράρτημα Α.

Τελικά προκειμένου να βρούμε την καμπύλη που χρησιμοποιήσαν, εφαρμόσαμε την καμπύλη του 2024 T4 όπως αυτή δίνεται από το [16] και για τη θερμοκρασία στην οποία ισορρόπησε ο αλγόριθμός τους, η οποία είναι οι 385 °C, προέκυψε μία αντίστοιχη τάση και ακολούθως η παράμετρος m που αφορά το μοντέλο Johnson- Cook. Αυτήν την παράμετρο αρχίσαμε να μεταβάλλουμε, προκειμένου να δούμε σε ποια τιμή τα αποτελέσματα θα βρίσκονταν πλησιέστερα στα δικά τους αποτελέσματα.

➤ *Θερμικό μοντέλο*

Αυτά όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες. Στη συνέχεια το αρχείο μας υπολογίζει βάσει του θερμικού μοντέλου και της αριθμητικής μεθόδου συνεχών αντικαταστάσεων, παράλληλα με τη χρήση υποχαλάρωσης για την πιο σίγουρη σύγκλιση, τις στροφές για τις οποίες η θερμοκρασία κάτω από την πλάτη να είναι μεταξύ 0,7 και 0,8 της T_s εκφρασμένης σε βαθμούς K.

Στη συνέχεια ελέγχει αν οι στροφές αυτές είναι διαθέσιμες από τη μηχανή μας και κάνει τις αντίστοιχες διορθώσεις. Με τις νέες στροφές, μεταβάλλει την ακτίνα της πλάτης, η οποία είναι η μεγαλύτερη ακτίνα του εργαλείου και αντιπροσωπεύει τα σημεία με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, άρα και τις μεγαλύτερες τιμές σε παραγωγή θερμότητας, άρα και τις μεγαλύτερες τιμές στη θερμοκρασία.

Με βάση τη νέα ακτίνα, υπολογίζονται οι νέες στροφές και ο κύκλος συνεχίζει μέχρις ότου βρεθεί το ζεύγος ακτίνας και στροφών, το οποίο δίνει στη θερμοκρασία μόνο αποδεκτές λύσεις, οι οποίες καθορίζουν και το 'παράθυρο' της διεργασίας, το εύρος δηλαδή μέσα στο οποίο μπορούν να μεταβάλλονται οι παράμετροι του κύκλου θέρμανσης της διεργασίας μας έτσι ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποιότητα συγκόλλησης.

➤ *Γεωμετρικό και κινηματικό μοντέλο*

Έχοντας καθορίσει τις στροφές του εργαλείου και την εξωτερική του διάμετρο, συνεχίζουμε με τον καθορισμό των εσωτερικών του γεωμετριών.

Αρχικά θα εκτιμήσουμε το ύψος του πύρου σχηματίζοντας έτσι τη βασική μορφή του εργαλείου. Το ύψος του εργαλείου, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, καθορίζει, δεδομένης της διείδυσης, τη βύθιση της πλάτης μέσα στο υλικό. Θα πρέπει το ύψος να είναι τέτοιο ώστε όσο υλικό εκτοπίζει το άκρο της πλάτης, να βρίσκει διέξοδο εκατέρωθεν του

εργαλείου, δημιουργώντας ένα φυσιολογικό, αρκετά περιορισμένο προέκταμα.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τον κανόνα της ροής για να ρυθμίσει το μέγεθος της γωνίας ελευθερίας γ , η οποία, λειτουργώντας σαν βαλβίδα, καθορίζει τη ροή μεταξύ της εμπρόσθιας και οπίσθιας πλευράς του εργαλείου. Τέλος όλη αυτή η διαδικασία, ελέγχεται από τον κανόνα των όγκων, ο οποίος ζητάει οι επιμέρους όγκοι να βρίσκονται σε ισορροπία. Για να εξασφαλιστεί η ισορροπία, μεταβάλλεται κατάλληλα η ακτίνα του πύρου, και η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή.

Τελικά ο αλγόριθμος ισορροπεί σε κάποιο συνδυασμό τιμών. Όμως για να εξακριβώσουμε κατά πόσο οι τιμές αυτές συμβαδίζουν με τους κανόνες που θέσαμε, τίθενται επιπλέον τρία μεγέθη συμβατότητας:

$$E_V \% = (V_i - V_s) / V_i \times 100,$$

$$E_Q \% = (Q_r - Q_s) / Q_s \times 100,$$

$$E_S \% = (S_i - S_e) / S_i \times 100.$$

Έλεγχος των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης.

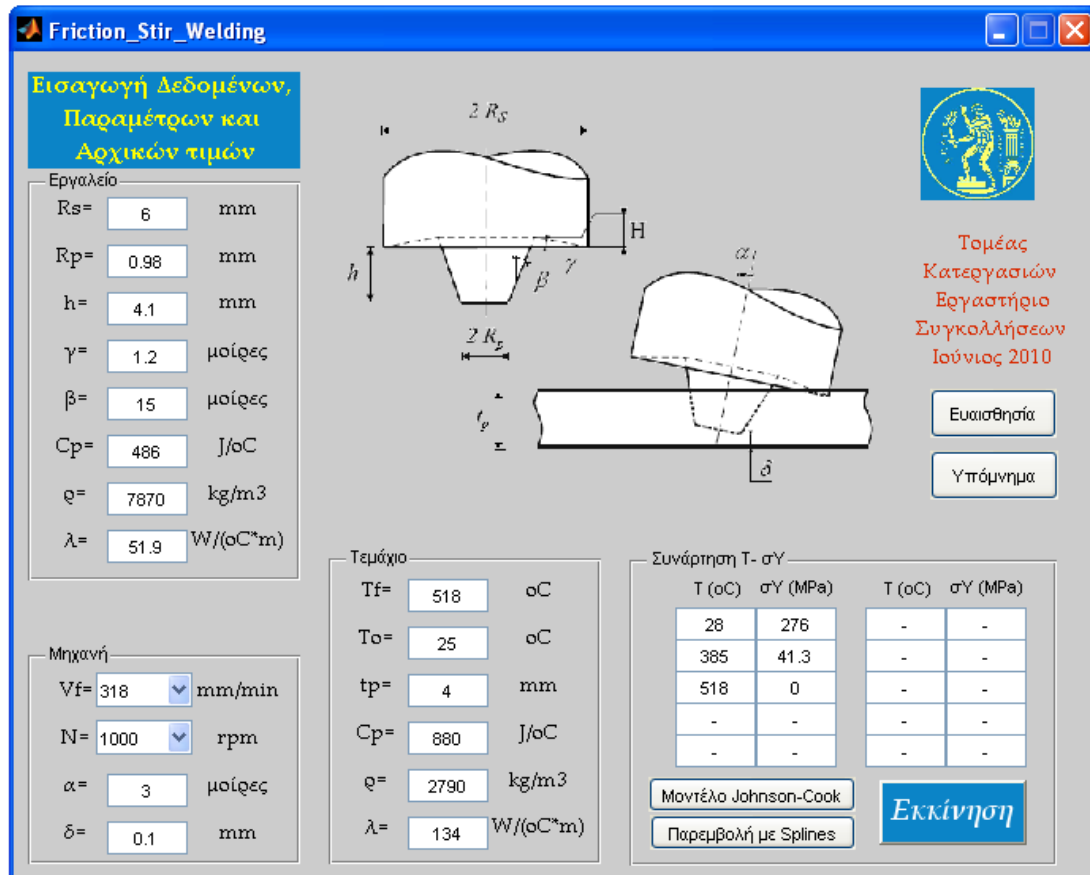
Tf=545 °C	To=25 °C	Qtool=0,66	m=0,4377	2017 johnson-Cook					
Πείραμα 1									
Τιμές	Rs	Rp	h	g	N	Tr	Ev	Eq	Es
Αρχικές	6	0,98	4,1	1,2	500	385	0	0	0
Αναφοράς	10	3,13	4,15	4,41	450	400	1	0	0
Τελικές	9,9	2,95	4,2	3,10	450	415	0,0	0,0	0,0
Απόκλιση	-0,8%	-5,9%	0,2%	-29,6%	0,0%	3,8%	0,0%	0,0%	0,0%
Μέση απόκλιση	-3,59%								
Τυπική απόκλιση	9,50%								
Πείραμα 2									
Τιμές	Rs	Rp	h	γ	N	Tr	Ev	Eq	Es
Αναφοράς	6	0,98	4,1	1,2	850	385	0	-5	0
Αρχικές	6	0,98	4,1	1,2	850	385	0	0	0
Τελικές	5,7	1,04	4,1	1,20	850	408	0,0	-5,0	0,0
Απόκλιση	-4,7%	6,4%	-0,3%	-0,3%	0,0%	6,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Μέση απόκλιση	0,78%								
Τυπική απόκλιση	3,24%								
Αλγόριθμος									
Μέση απόκλιση	-1,40%								
Τυπική απόκλιση	3%								

Ξεκινώντας τον αλγόριθμο επιλέξαμε για υλικό εργαλείου τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI-SAE 304 (ISO A2) και εφαρμόσαμε τις ιδιότητές του προκειμένου να βγάλουμε αποτέλεσμα. Επιπλέον η καμπύλη που ακολουθήσαμε ήταν του κράματος 2024 T4, όπως μας δινόταν από την ASM [16]. Τέλος υποθέταμε ότι το δοκίμιο που χρησιμοποιούσαν είχε αρχική θερμοκρασία 28 °C. Όμως με τον τρόπο αυτό οι τιμές μας είχαν απόκλιση περί το 20%. Από τα εργαλεία που κατασκευάστηκαν από την [6] μόνο 2 είναι φτιαγμένα για να δουλεύουν κανονικά. Με βάση λοιπόν αυτά τα δύο εργαλεία, προσαρμόσαμε τις μεταβλητές του εργαλείου και της καμπύλης του ορίου διαρροής φτάνοντας να έχουμε τυπική απόκλιση αλγορίθμου 3%.

Κεφάλαιο 5: Ο διαμεσολαβητής

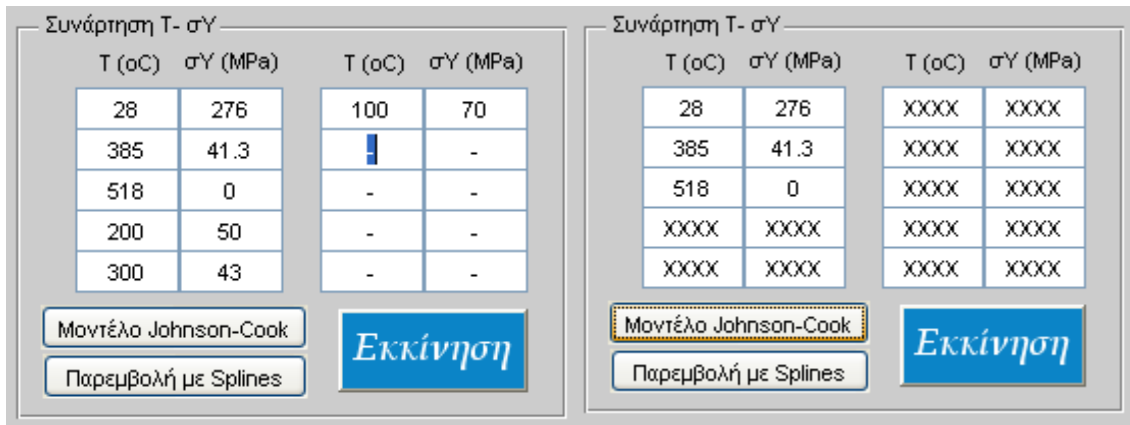
Η πρώτη ανάγκη που οδήγησε στη δημιουργία του διαμεσολαβητή ήταν η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων σε ένα παράθυρο, αλλά και γιατί όχι η συγκέντρωση και των αρχικών συνθηκών σε ένα άλλο παράθυρο.

Τα γραφικά έγιναν και αυτά σε Matlab με το πρόγραμμα Guide. Το αρχικό παράθυρο του προγράμματος φαίνεται παρακάτω:



Απαιτούνται τρεις ομάδες δεδομένων, μία για το εργαλείο, μία για τη μηχανή και μία για το τεμάχιο, ενώ πριν την εκκίνηση πρέπει να εισαχθεί η συνάρτηση θερμοκρασίας τάσης διαρροής, την οποία θα ακολουθήσει το μοντέλο, προκειμένου να δώσει τα αποτελέσματα.

Η συνάρτηση αυτή πρέπει να αποτελείται τουλάχιστον από τρία σημεία, τα οποία θα είναι π.χ. το όριο διαρροής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία τήξης του μετάλλου, όπου η τάση θα είναι μηδέν και ένα ενδιάμεσο ζεύγος. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, δεν έχει σημασία η αύξουσα ή φθίνουσα σειρά των δεδομένων.



Επιλέγοντας το πρώτο πλήκτρο, ενεργοποιείται το μοντέλο Johnson-Cook το οποίο περιγράφεται μόνο από τρία σημεία. Τα υπόλοιπα σημεία, αν και δεν χάθηκαν από την μνήμη του υπολογιστή, σημειώνονται με XXXX για ναδειχθεί ότι παραλείπονται. Τα τρία σημεία τα οποία αναγράφονται εξαρχής είναι αυτά τα οποία χρησιμοποιήσαμε για την επίλυση του αλγορίθμου και είναι αποθηκευμένα στην μνήμη του υπολογιστή. Αφού πατήσουμε το πλήκτρο, εμφανίζεται στη θέση της εικόνας του εργαλείου, το διάγραμμα με τη συνάρτηση που θα ακολουθηθεί.

Friction_Stir_Welding

Εισαγωγή Δεδομένων, Παραμέτρων και Αρχικών τιμών

Εργαλείο

Rs= 6 mm
Rp= 0.98 mm
h= 4.1 mm
γ= 1.2 μοίρες
β= 15 μοίρες
Cp= 486 J/oC
ρ= 7870 kg/m3
λ= 51.9 W/(oC*m)

Μηχανή

Vf= 318 mm/min
N= 1000 rpm
α= 3 μοίρες
δ= 0.1 mm

Τεμάχιο

Tf= 518 oC
To= 25 oC
tp= 4 mm
Cp= 880 J/oC
ρ= 2790 kg/m3
λ= 134 W/(oC*m)

Συνάρτηση T-σY

T (oC)	σY (MPa)	T (oC)	σY (MPa)
28	276	XXXX	XXXX
385	41.3	XXXX	XXXX
518	0	XXXX	XXXX
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
XXXX	XXXX	XXXX	XXXX

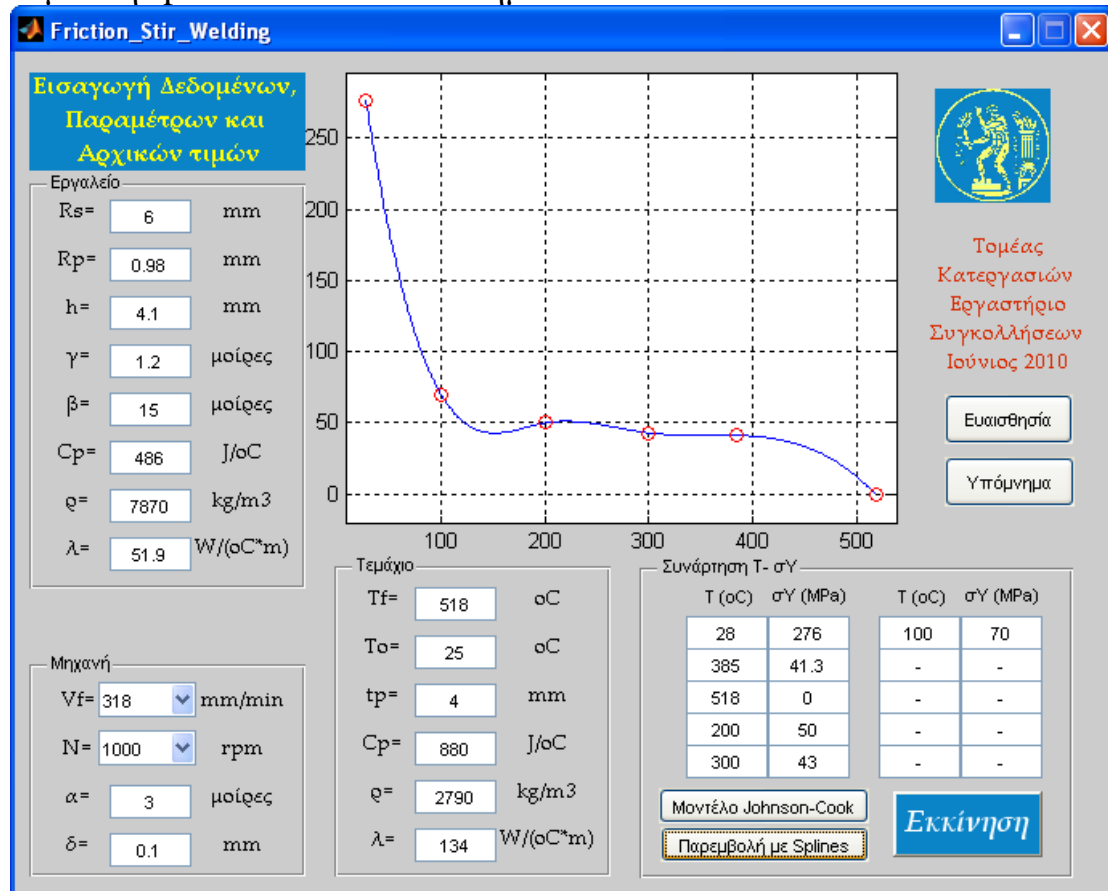
Μοντέλο Johnson-Cook
Παρεμβολή με Splines

Εκκίνηση

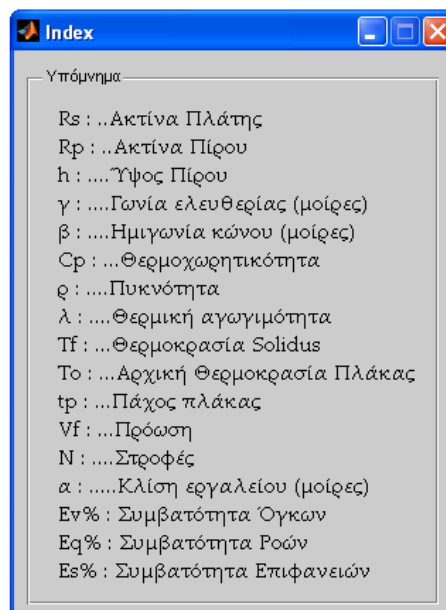
Τομέας Κατεργασιών Εργαστήριο Συγκολλήσεων Ιούnius 2010

Ευαισθησία
Υπόμνημα

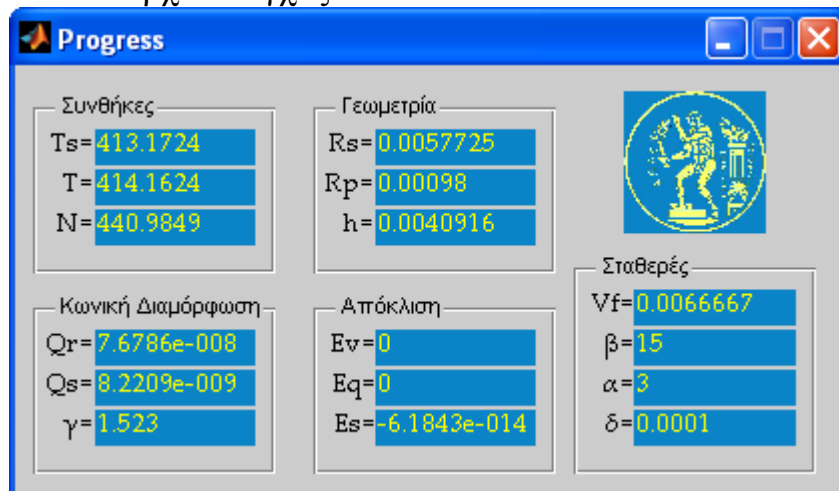
Αν τώρα πατήσουμε το δεύτερο πλήκτρο, τα σημεία τα οποία είχαμε εισάγει προτύτερα, θα επανεμφανιστούν και θα σχεδιαστεί η καμπύλη spline που ενώνει τα σημεία αυτά.



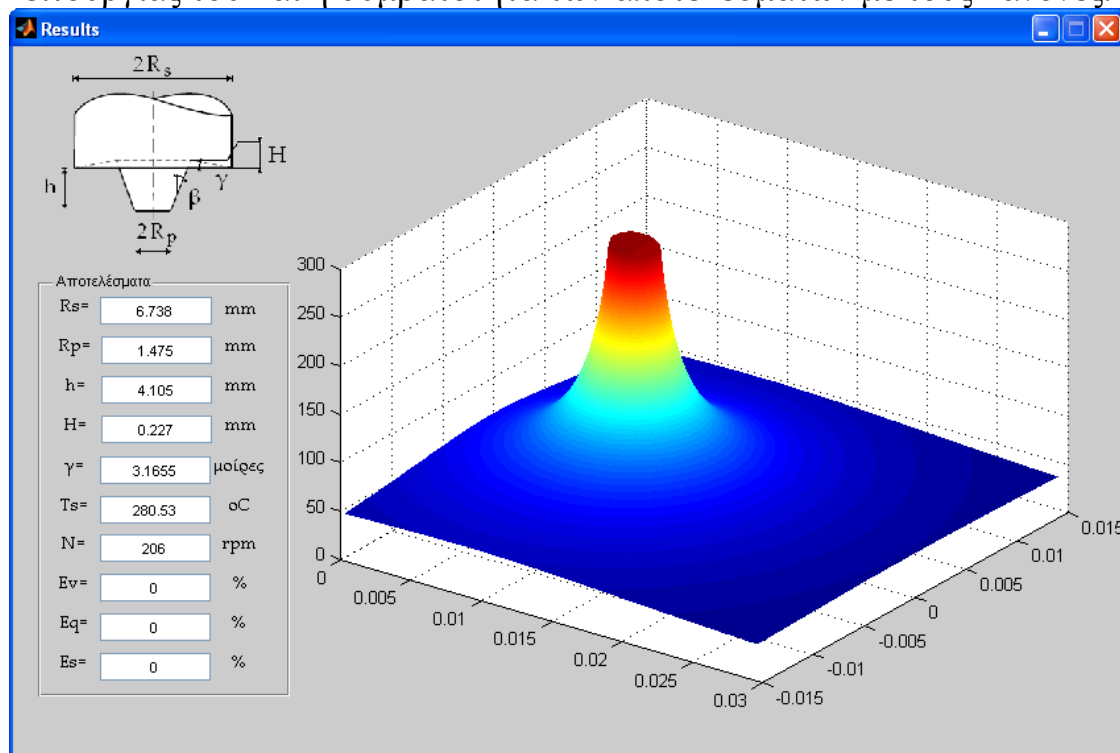
Το πλήκτρο υπόμνημα, τοποθετήθηκε, προκειμένου να μη δίνονται εξηγήσεις για τα σύμβολα στη βασική οθόνη. Αν κάποιος χειριστής δεν μπορεί να καταλάβει τι αναπαριστούν τα σύμβολα, μπορεί να ανατρέξει στο υπόμνημα.



Αφού η αρχικοποίηση του αλγορίθμου έχει γίνει, με το πλήκτρο της εκκίνησης, ο αλγόριθμος τίθεται σε λειτουργία, όπως περιγράφηκε στα μαθηματικό μοντέλο. Σε περίπτωση όμως που υπάρχουν καθυστερήσεις, τοποθετήσαμε ένα παράθυρο προόδου, στο οποίο ο χειριστής μπορεί ανά πάσα στιγμή να βλέπει τις τιμές των μεταβλητών, ενώ ο αλγόριθμος τρέχει. Έτσι σε περίπτωση που κολλήσει μεταξύ κάποιων τιμών, να επέμβει κατάλληλα και να τον σταματήσει. Υπάρχουν βέβαια ασφαλιστικές δικλίδες που δεν αφήνουν τον αλγόριθμο να κολλήσει, μπορεί όμως σε κάποια περίπτωση να συμβεί και αυτό, οπότε καλό είναι να υπάρχει έλεγχος.



Αν όλα πάνε καλά και ο αλγόριθμος δώσει αποτελέσματα, τότε θα εμφανιστεί το παρακάτω παράθυρο, όπου υπάρχουν όλες οι γεωμετρικές διαστάσεις του εργαλείου, οι στροφές περιστροφής του, η θερμοκρασία λειτουργίας του και η συμβατότητα των αποτελεσμάτων με τους κανόνες.



Κεφάλαιο Έκτο: Επιβεβαίωση των πειραμάτων

Αφού επιβεβαιώσαμε ότι ο αλγόριθμός μας μπορούσε να προσεγγίσει τα αποτελέσματα που έδινε και η δημοσίευση [6], προχωρήσαμε σε αναπαραγωγή των πειραμάτων τους με βάση τις δυνατότητες της δικής μας μηχανής. Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν οκτώ εργαλεία. Το υλικό που χρησιμοποιήσαμε ήταν χάλυβας CK45, τον οποίο βάψαμε επιφανειακά. Για τη συγκόλληση τριβής με ανάδευση, το εργαλείο το οποίο κατεξοχήν προτείνεται για τα κράματα αλουμινίου, είναι ο εργαλειοχάλυβας H13. Υπάρχουν πολλά οφέλη στη χρήση εργαλειοχαλύβων για εργαλείο συγκόλλησης τριβής με ανάδευση, όπως τη μεγάλη διαθεσιμότητα, εύκολη κατεργασιμότητα, χαμηλό κόστος και χαρακτηριστικά θεσπισμένα βάσει προτύπων.

Μειονέκτημα όμως του αλγορίθμου είναι ότι δεν προβλέπει την αντοχή του εργαλείου, με αποτέλεσμα οι στροφές που προκύπτουν, και η πρόωση που αποκτάει το εργαλείο, τυχαίνει να αφορούν σκληρότερο υλικό, με αποτέλεσμα τελικά να αστοχεί το εργαλείο.

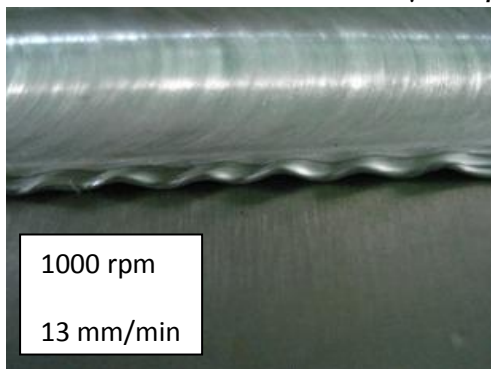
Οι δοκιμές έγιναν σε πλάκες αλουμινίου 2017 T4, όπως και στην [6], σε διαστάσεις 300mm x 100mm x 5mm. Δοκιμάστηκε η συμπεριφορά των διαφόρων γεωμετριών κατά τη συγκόλληση τριβής με ανάδευση, ενώ στο τέλος έγινε και κανονική συγκόλληση σε απόσταση 85 mm με το πρώτο από τα οκτώ εργαλεία, το οποίο είχε σχεδιαστεί για να λειτουργεί σωστά ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους κανόνες.

Η μηχανή ρυθμίστηκε ώστε το εργαλείο να έχει να έχει κλίση 3° , με αποτέλεσμα ο πύρος να στρέφεται προς τη διεύθυνση της συγκόλλησης. Τα εργαλεία πέρα από τις διαστάσεις που προέκυψαν, δόθηκε επιπλέον περιφερειακά 1 mm υπό κλίση 45° βάσει τον Schmidt [7], ώστε να εδράζεται καλύτερα. Αυτό όμως οδήγησε ουσιαστικά σε αύξηση της ακτίνας της πλάτης, με αποτέλεσμα να καλύπτονται πολλά από τα ελαττώματα τα οποία έπρεπε να βλέπαμε, κυρίως σε ό,τι αφορά τον κανόνα της ροής και τη ροή προεκτάματος εκτός της ραφής.

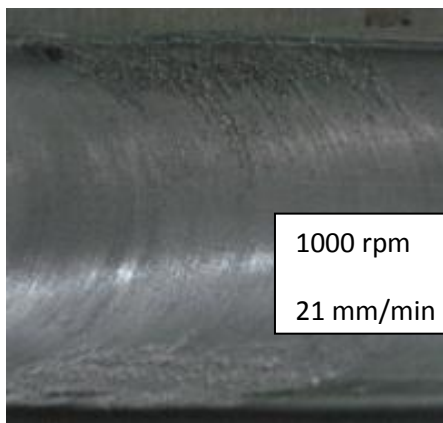
➤ Εργαλείο πρώτο



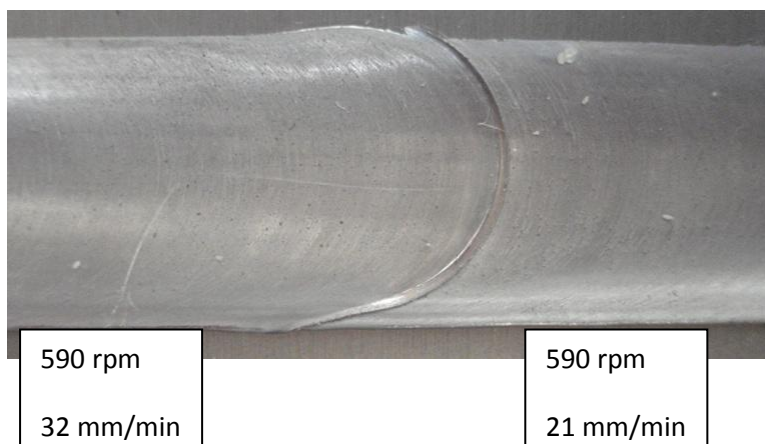
Είναι ένα εργαλείο το οποίο σχεδιάστηκε να είναι ικανό να εκτελεί σωστές συγκολλήσεις. Όμως έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί τόσο σε χαμηλότερες όσο σε υψηλότερες συνθήκες, ώστε να ελέγξουμε τι συμβαίνει όταν οι συνθήκες μας βγουν εκτός του παραθύρου μας. Η γεωμετρία του εργαλείου για τις υπόλοιπες συνθήκες πέραν των κανονικών, εξασφαλίστηκε κρατώντας το λόγο στροφών και πρόωσης περίπου σταθερό.



Το εργαλείο αυτό είναι σχετικά μικρών διαστάσεων, και δε μας επιτρέπει να το δουλέψουμε σε μεγάλες προώσεις και χαμηλές στροφές, γιατί υπάρχει ο κίνδυνος θραύσης. Όπως φαίνεται και από την εικόνα, σε συνθήκες θερμής συγκόλλησης, δηλαδή, υψηλών

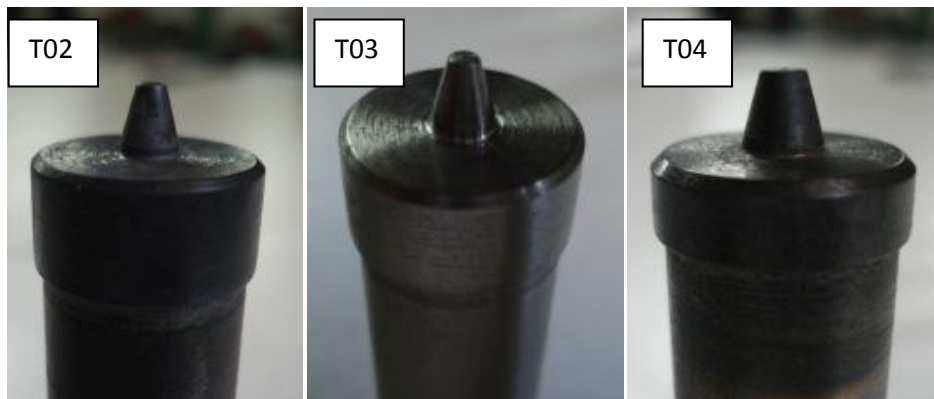


στροφών και χαμηλής πρόωσης, το εργαλείο δίνει κακής ποιότητας επιφάνεια, λόγω της υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας. Σε μέση κατάσταση συμπεριφέρεται πολύ ομαλά. Με το εργαλείο αυτό πραγματοποιήσαμε και συγκόλληση μερικών εκατοστών. Αντίθετα σε ψυχρές συνθήκες, δηλαδή σε χαμηλές στροφές δεν δοκιμάστηκε διότι υπήρχε φόβος να αστοχήσει. Για το λόγο

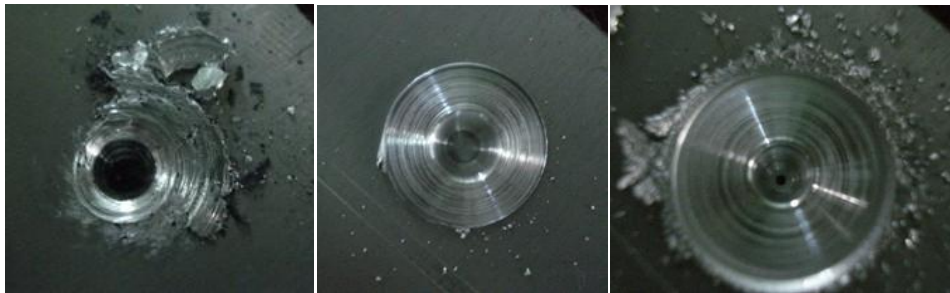


αυτό χρησιμοποιήσαμε άλλο εργαλείο.

➤ *Εργαλείο Δεύτερο, Τρίτο και Τέταρτο*

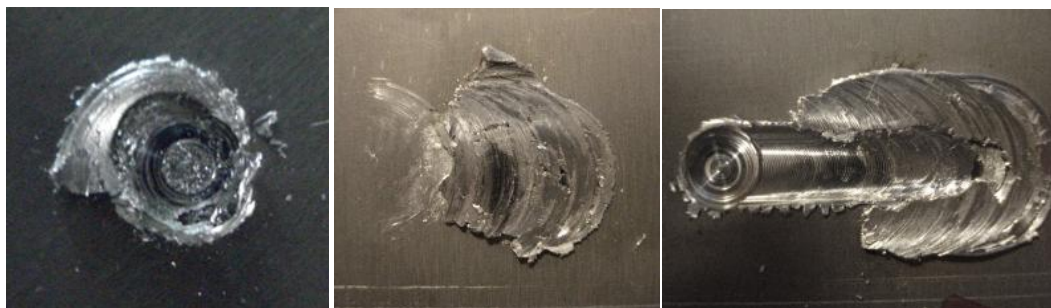


Τα τρία αυτά εργαλεία, σχεδιάστηκαν για να επιβεβαιώσουν τον κανόνα του όγκου, χρησιμοποιώντας τα μόνο και μόνο για τον έλεγχο του ίχνους που αφήνουν πάνω στο υλικό

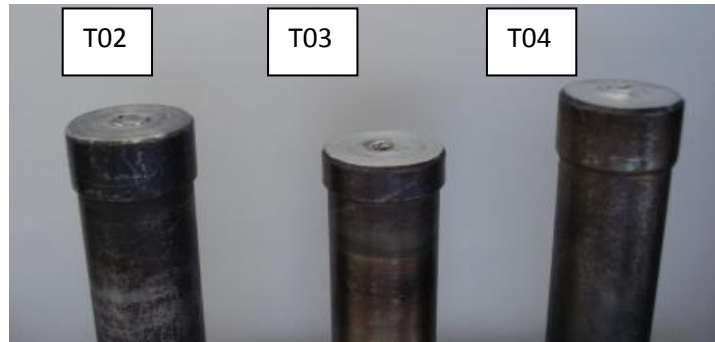


Τα ίχνη από τα εργαλεία στα οποία είχαμε το μέγεθος της συμβατότητας με τον κανόνα των όγκων αρνητικό, μηδέν και θετικό αντίστοιχα

Τα συγκεκριμένα εργαλεία που ήταν τρία από τα τέσσερα με μικρή διάμετρο, μόλις θελήσαμε ύστερα από την φωτογράφιση του ίχνους να ελέγξουμε τη μορφή της ραφής τους, όλα έσπασαν και το εργαλείο προχωρούσε χωρίς τον πύρο. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στο μικρό τους μέγεθος, αλλά και στο ότι τα συγκεκριμένα τρία εργαλεία βάφτηκαν περισσότερο και υπάρχει περίπτωση να είχαν σχηματίσει ρηγματώσεις.

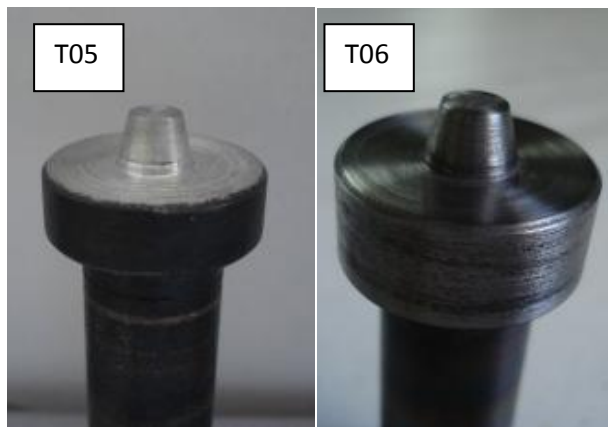


Τα εργαλεία φαίνονται παρακάτω:



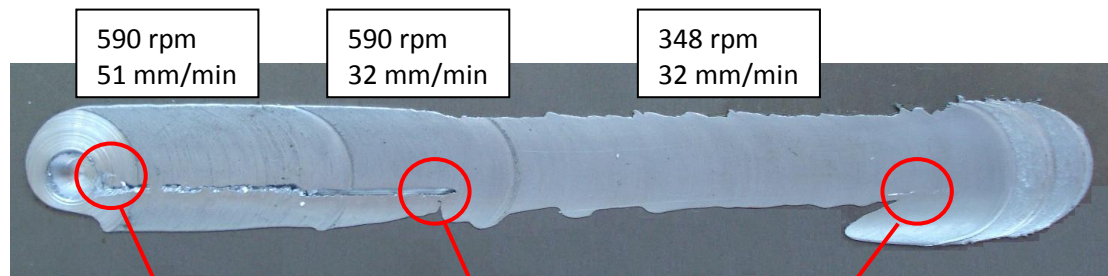
Το γεγονός αυτό συνέβη στα πρώτα πειράματα και μας έκανε πιο επιφυλακτικούς ως προς τις συνθήκες, προκειμένου να εξασφαλίσουμε την επιβίωση των εργαλείων μας. Όλες οι συγκολλήσεις έγιναν σε λίγο έως πολύ θερμότερες συνθήκες από ότι ο αλγόριθμος προέβλεπε, δηλαδή μεγαλύτερες στροφές και μικρότερη πρόωση.

➤ *Εργαλείο Πέμπτο και Έκτο*

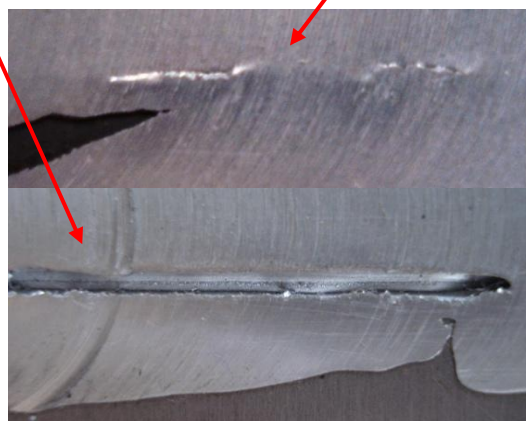


Τα εργαλεία αυτά είναι σχεδιασμένα για να παραβιάζουν τον κανόνα της επιφανείας και για το λόγο αυτό έχουμε υπέρδιαστασιολόγηση και υποδιαστασιολόγηση του ύψους του πύρου h . Αυτή είναι ουσιαστικά και η μόνη διαφορά τους όσον αφορά τις διαστάσεις τους. Το πέμπτο εργαλείο έχει μεγαλύτερο ύψος πύρου από το σύνηθες στα υπόλοιπα στελέχη, ενώ το έκτο έχει μικρότερο.

Το πέμπτο εργαλείο λόγω του μεγάλου πύρου, δεν αφήνει την πλάτη να έχει πλήρη επαφή με το τεμάχιο, με αποτέλεσμα την πολύ χαμηλή παροχή θερμότητας, και την περιορισμένη μεταφορά του υλικού γύρω από το εργαλείο. Η ραφή σχεδόν άμεσα μειώνει το πλάτος της, ενώ εμφανίζονται γραμμικές ατέλειες στην πλευρά πρόωσης. Αυξάνοντας τις στροφές του εργαλείου παρατηρούμε ότι το πλάτος της ραφής αυξάνεται λόγω προεκτάματος και εξαιτίας αυτής της απώλειας υλικού, η αυλάκωση αρχίζει να γίνεται εμφανής



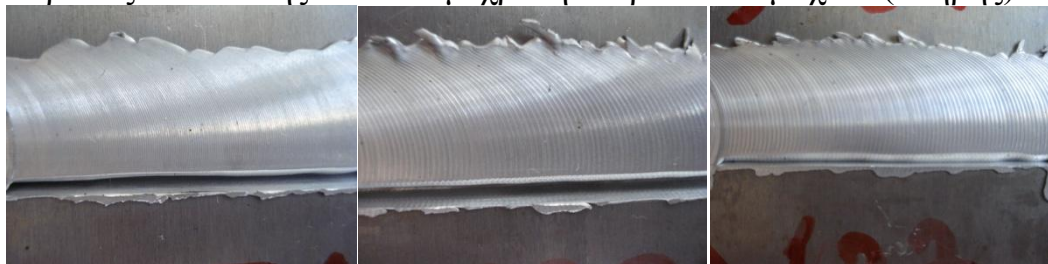
hηj



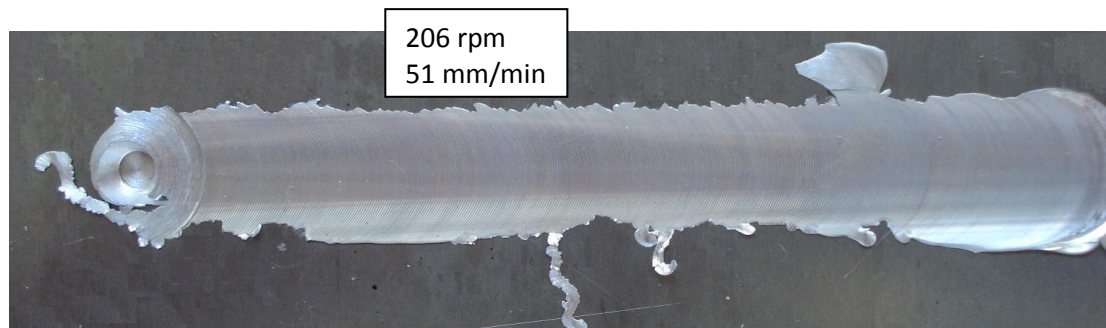
Η αυλάκωση που σχηματίζεται, δεν είναι τυχαίο που βρίσκεται

πάντοτε στην πλευρά προώσεως. Όπως αναφέραμε και νωρίτερα στη δομή της ραφής και στη μοντελοποίηση της ροής του υλικού, στην πλευρά προώσεως έχουμε διάτμηση του υλικού, το οποίο προκειμένου να περάσει στο πίσω μέρος του εργαλείου, αναγκάζεται να διέλθει από την πλευρά υποχώρησης και να γεμίσει την αυλάκωση μέχρι την πλευρά προώσεως. Αν όμως, όπως στην περίπτωσή μας, δεν υπάρχει ικανοποιητική παροχή θερμότητας, ή επαρκής επαφή του εργαλείου με το υλικό, ώστε να το μετακινεί, τότε αυτό θα στερεοποιηθεί, προτού πληρώσει όλη την αυλάκωση.

Στις εικόνες παρακάτω φαίνεται η ραφή του εργαλείου T07 σε ένα λάθος σχεδιασμό που είχε γίνει, ο οποίος έδωσε μεγαλύτερο ύψος πύρου. Το αποτέλεσμα ήταν να έχουμε μηδενική επαφή της πλάτης, με αποτέλεσμα πέρα από την πλευρά προώσεως, το υλικό να είναι ανέπαφο, όλο το υλικό συγκεντρώνεται λόγω περιστροφής στην πλευρά υποχώρησης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονου προεκτάματος, το οποίο γίνεται ακόμα πιο έντονο αν αυξήσουμε την πρόωση, και τέλος τη δημιουργία αυλάκωσης, η οποία περιορίζεται στο τέλος, όταν αυξήσαμε το βάθος διείδυσης να είναι μέχρι την έδρα του τεμαχίου (πλήρης).



Το έκτο υλικό, έχει μικρότερο πύρο και άρα λόγω του σταθερού βάθους, η πλάτη θα είναι βυθισμένη περισσότερο από το κανονικό. Εδώ έχουμε έντονη εμφάνιση προεκτάματος, με αποτέλεσμα τις απότομες αυξομειώσεις στο πλάτος της αυλάκωσης.



Αξιοσημείωτη είναι η ποιότητα της ραφής. Το εργαλείο αυτό είχε δοκιμαστεί πολύ κοντά στις συνθήκες για τις οποίες σχεδιάστηκε. Οι συνθήκες σχεδιασμού του είναι 206rpm και 83 mm/min. Αντίθετα το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 206rpm με 51 mm/min

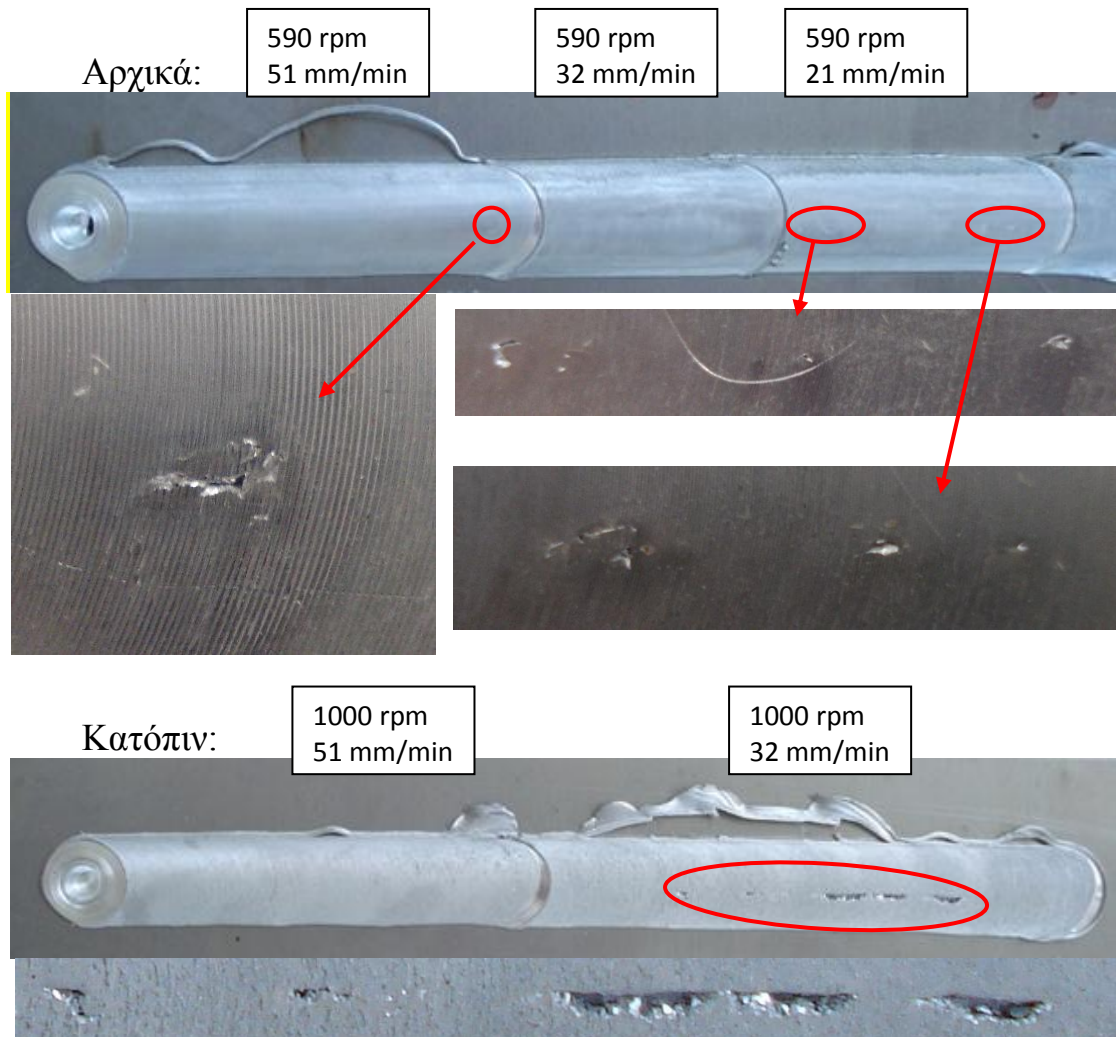
Να σημειώσουμε τέλος ότι η ρίζα της συγκόλλησης δεν έχει διαφορά μεταξύ των εργαλείων, αφού το βάθος συγκόλλησης είναι παντού ίδιο, ίσο με 0,1 mm.

➤ *Εργαλείο Έβδομο*

Το έβδομο εργαλείο φτιάχτηκε ώστε να μην ικανοποιεί τον κανόνα του όγκου. Η γωνία ελευθερίας του είναι μηδενική, το υλικό δεν έχει χώρο, ώστε να παραμείνει κάτω από την πλάτη, και εκτονώνεται με τη μορφή προεκτάματος, ενώ ταυτόχρονα η απώλεια υλικού οδηγεί σε αυλακώσεις.

Όπως αναφέραμε κατά το παράδειγμα του [7], δώσαμε στα εργαλεία μας επιπλέον ακτίνα 1mm υπό κλίση 45° ώστε η πλάτη να έχει καλύτερη έδραση. Αυτό όμως που τελικά συνέβαινε ήταν να συντελεί στην αύξηση της ενεργής διατομής της πλάτης, με αποτέλεσμα το προέκταμα που εμφανίζεται να είναι περιορισμένο και πιθανόν και η δημιουργία αυλάκωσης. Σε ένα δεύτερο στάδιο, αφαιρούμε ακτινικά αυτήν την προσθήκη και το αποτέλεσμα είναι πολύ πιο έντονο από πριν.

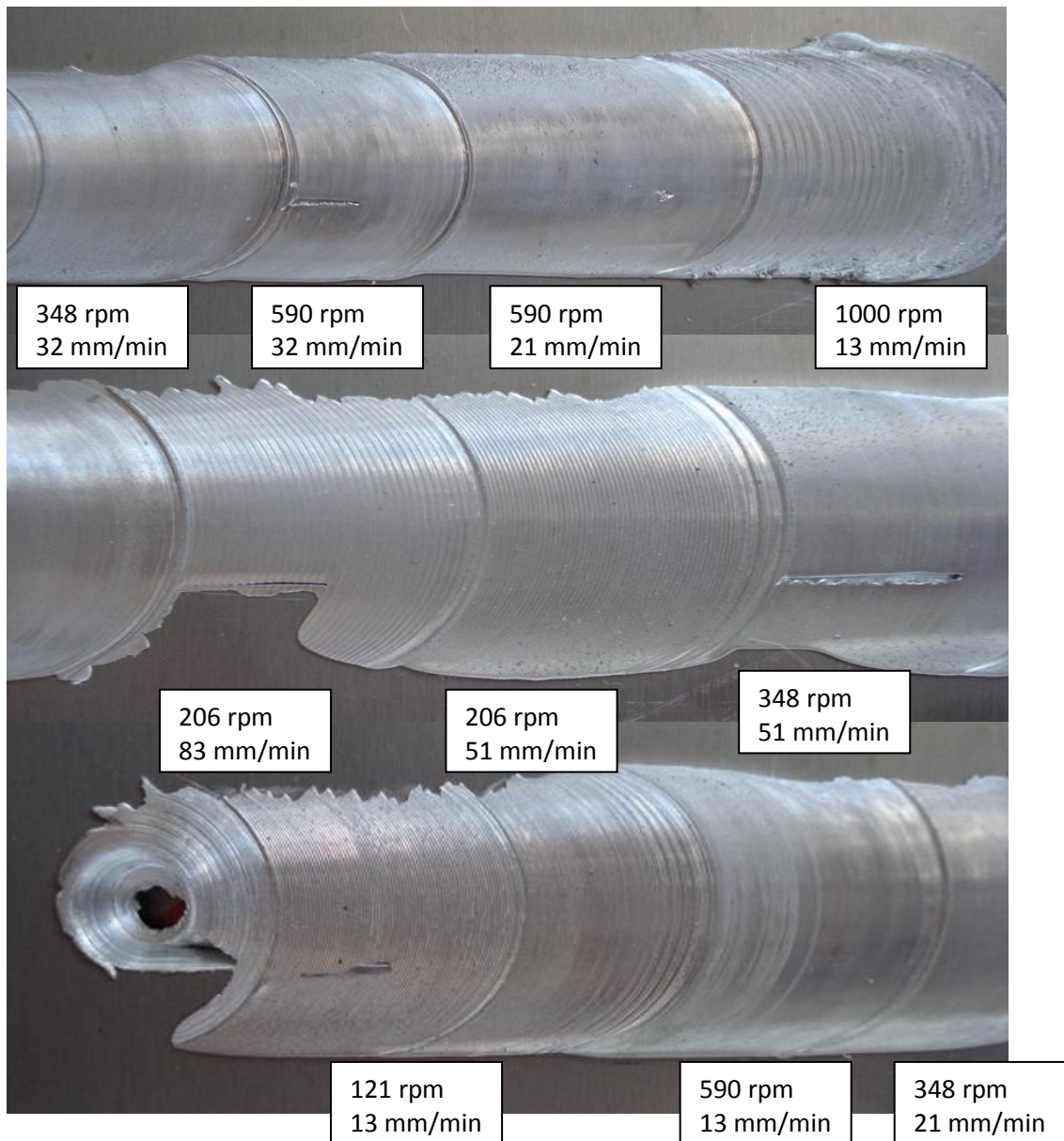




➤ *Εργαλείο Όγδοο*

Το όγδοο εργαλείο προκύπτει από το έβδομο με αύξηση της γωνίας ελευθερίας. Προσπαθήσαμε να φτιάξουμε το εργαλείο αυτό ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε κινηματικό επίπεδο σωστά για τρία επίπεδα συνθηκών, ένα θερμό ένα κανονικό και ένα ψυχρό, ώστε να ελεγχθεί κατά πόσο ισχύει το παράθυρο διεργασίας, στο οποίο υπακούει το θερμικό μοντέλο μας. Δυστυχώς δεν μπορούσαμε να πετύχουμε απόλυτη ταύτιση των διαστάσεων με αποτέλεσμα σε κανονικές λειτουργίες να μην ικανοποιείται πλήρως το κινηματικό μοντέλο. Έτσι στις συνθήκες προβλέπεται ικανοποιητική συγκόλληση, η ραφή είναι αποδεκτή αλλά οριακά.



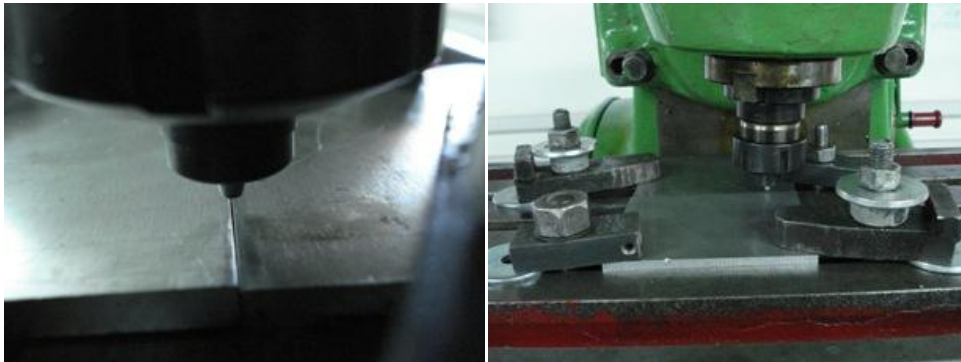


Το εργαλείο ξεκινάει από θερμές συνθήκες, όπου η ραφή αποκτάει πολύ αγριεμένη και σκουρόχρωμη επιφάνεια, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας. Ταυτόχρονα υπάρχει έντονος σχηματισμός προεκτάματος, ενώ σταδιακά μειώνοντας πότε τις στροφές και πότε την πρόωση, η ραφή γίνεται λεία και στιλπνή, ενώ προς το τέλος έχουμε ελλιπή ρευστότητα στο μέταλλο δίνοντας πάλι άγρια επιφάνεια λόγω της ψυχρής κατεργασίας του μετάλλου.

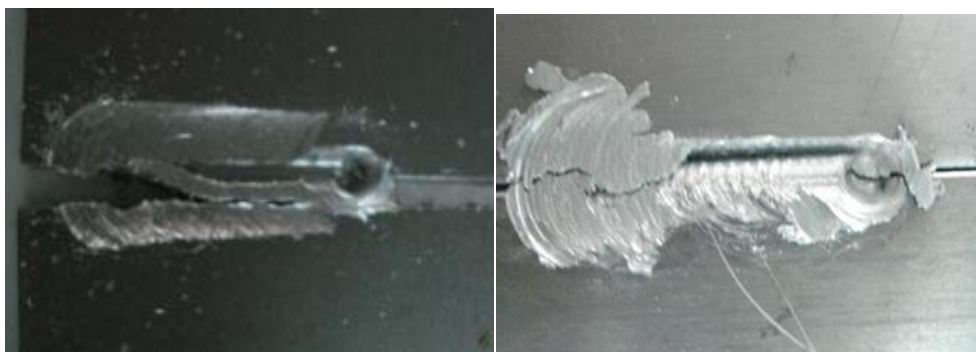
Οι συνθήκες στις οποίες το εργαλείο είχε σχεδιαστεί να εργάζεται είναι οι 206 rpm με 51 mm/min. Δεν μπορεί να πει κανείς ότι η συγκόλληση είναι άριστη μιας και τα χείλη που σχηματίζει στην πλευρά υποχώρησης είναι ακατάστατα, ενώ στην πλευρά πρόωσης έχει σχηματίσει αγριάδα, όμως σε γενικές γραμμές το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό, ιδιαίτερα στην εσωτερική περιοχή της ραφής.

➤ Συγκόλληση

Ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε βάσει της δημοσίευσης [6] φαίνεται ότι παράγει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, δεδομένου ότι τα εργαλεία που δίνει έχουν την αναμενόμενη συμπεριφορά η οποία είναι παρόμοια με αυτή των εργαλείων στη δημοσίευση. Για περαιτέρω όμως επιβεβαίωση, προχωρήσαμε στη πραγματοποίηση συγκόλλησης χρησιμοποιώντας το πρώτο εργαλείο, το οποίο εξαρχής έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε στις 590 rpm με πρόωση 32 mm/min, αν και το εργαλείο είναι σχεδιασμένο για χαμηλότερες στροφές, έγινε όμως αυτό για να εξασφαλίσουμε το ίδιο το εργαλείο. Γνωρίζαμε ότι ένα από τα μειονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση είναι και το ότι απαιτεί πολύ γερή στερέωση των τεμαχίων. Αυτό το διαπιστώσαμε έντονα, δεδομένου ότι χρειάστηκαν να γίνουν τέσσερις απόπειρες για να προκύψει ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

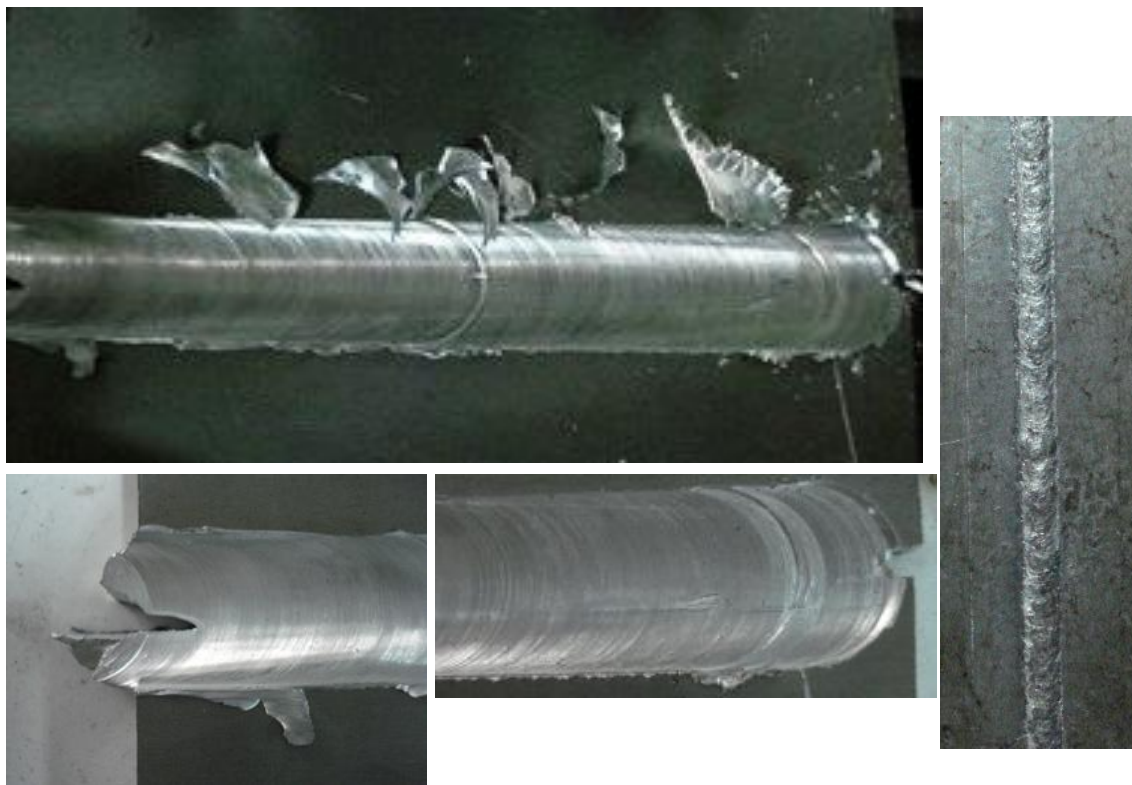


Πρώτη και δεύτερη δοκιμή



Οι πλάκες άνοιξαν στην προσπάθειά μας όμως να δούμε τι θα συνέβαινε εάν δίνουμε πρόωση στο εργαλείο, διαπιστώσαμε την ελλιπή επαφή πλάτης και τεμαχίου με όλα τα επακόλουθα που αυτή εμφανίζει για την ανάμειξη του υλικού των δύο πλακών.

Στη συνέχεια κάναμε μία νέα απόπειρα στην οποία παρότι οι πλάκες πάλι άνοιξαν. Δεν σταματήσαμε τη συγκόλληση μέχρι ότου το εργαλείο βγήκε μόνο του από τις δύο πλάκες.

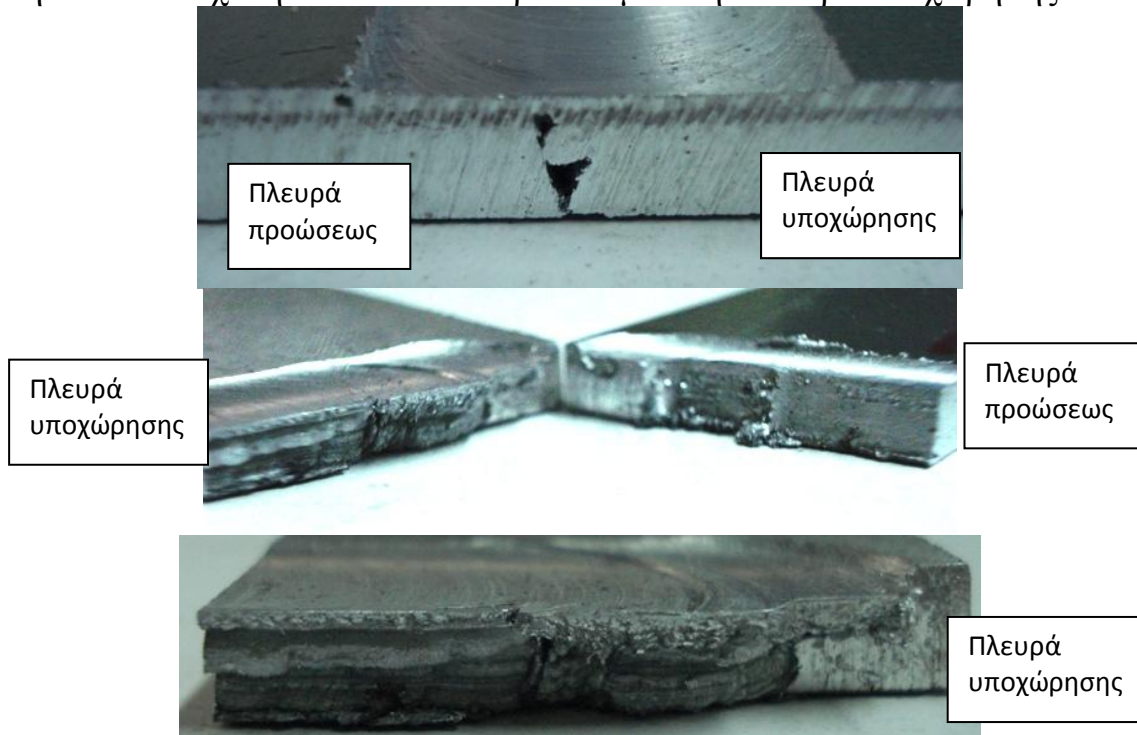


Το προέκταμα που εμφανίζεται, οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στο ότι η συγκόλληση ξεκίνησε με θερμές συνθήκες στις 1000rpm με πρόωση 32 mm/min και κατόπιν πέρασε στις 590 στροφές. Αντίθετα στην επόμενη συγκόλληση που κάναμε διείσδυση του εργαλείου και παραμονή στις 1000 rpm ενώ η πρόωση δόθηκε με 590 rpm, το αποτέλεσμα είναι μακράν πιο ικανοποιητικό.

Στη συνέχεια λοιπόν πραγματοποιούμε τομή της ραφής σε δύο σημεία, ένα για τις 1000rpm και ένα για τις 590rpm.

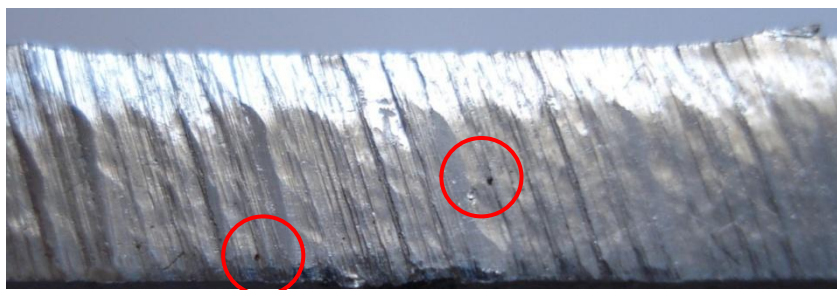


Οπότε εμφανίστηκε η ατέλεια λόγω της απομάκρυνσης των πλακών, η οποία ενισχύθηκε και από το προέκταμα στην πλευρά υποχώρησης.



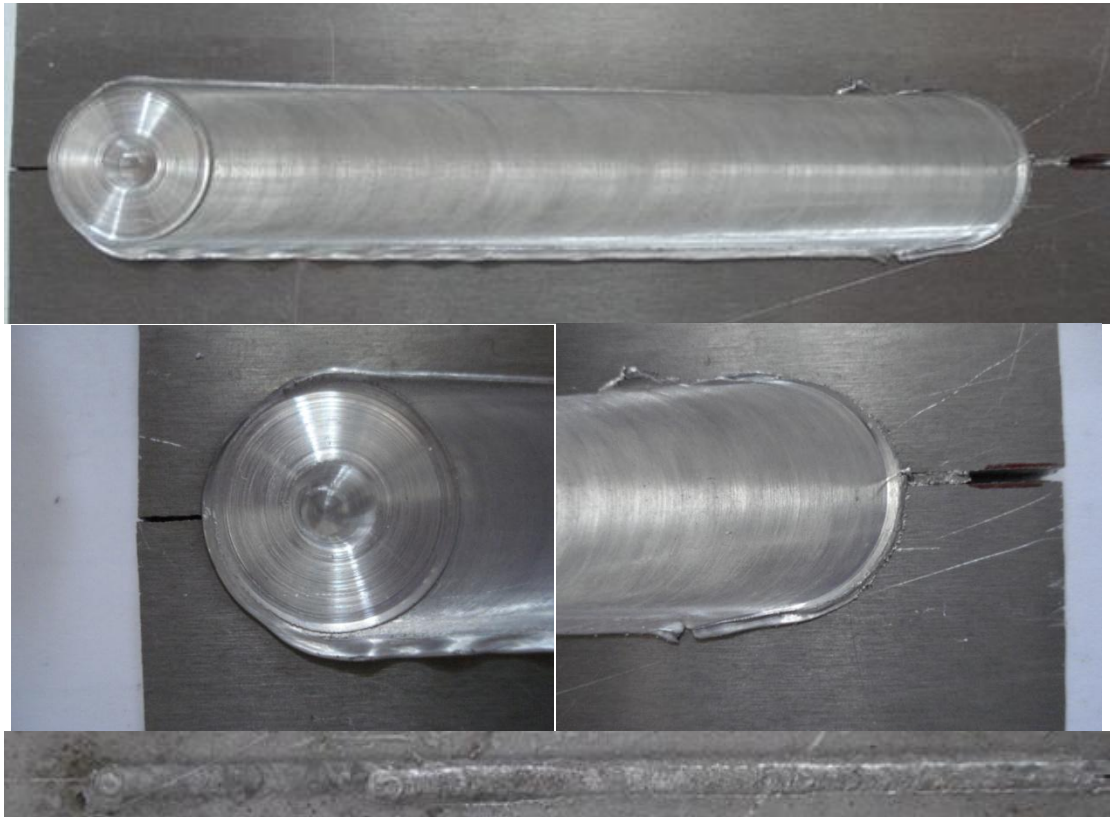
Το πρώτο τμήμα κόπηκε και στο μήκος. Φαίνεται έντονα στην πλευρά προώσεως το περίγραμμα του κώνου 15° , ο οποίος την διέτεμε. Αντίστοιχα στην πλευρά υποχώρησης φαίνεται η προσπάθεια και η αδυναμία του υλικού να καλύψει το κενό που προκλήθηκε από την απομάκρυνση των πλακών.

Στην άλλη τομή βρέθηκαν κάποιοι πόροι στην περιοχή της συγκόλλησης και μάλιστα ο ένας βρίσκεται πάνω στην πλευρά πρόωσης, όμως δε θα μπορούσαμε να πούμε ότι ευθύνεται για αυτό η συγκόλληση, δεδομένου ότι παρόμοιες ατέλειες βρέθηκαν και σε άλλα μέρη της τομής πέρα από τη ραφή, στα άκρα του ελάσματος.





Συνεχίζοντας, στην τελευταία συγκόλληση, ύστερα από πολύ προσεκτικό δέσιμο των πλακών μεταξύ τους, είχαμε ικανοποιητικά αποτελέσματα:



Η συγκόλληση είναι θερμή και γι' αυτό το τεμάχιο δεν έχει στιλπνή επιφάνεια, ως μάλλον όφειλε. Επίσης αφού το εργαλείο προχώρησε περίπου 40 mm, άρχισε στην πλευρά πρόωσης να αναπτύσσεται κυματοειδές προέκταμα, χαρακτηριστικό των πολύ θερμών συγκολλήσεων, όπως είδαμε και στην παράγραφο του πρώτου εργαλείου. Παρόλα αυτά η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα σε όλο το μήκος της.

Κεφάλαιο Έβδομο: Σχολιασμοί

➤ Σχόλια

Αυτό που προέκυψε από τα αποτελέσματα είναι ότι ο αλγόριθμος δίνει όντως ικανοποιητικά αποτελέσματα, τόσο ως προς τη γεωμετρία, όσο και ως προς τις συνθήκες. Τις συνθήκες προτιμήσαμε να μην τις ακολουθήσουμε, αλλά να τις υπερβούμε. Το αποφασίσαμε αυτό ύστερα από την αστοχία των τριών εργαλείων 2,3 και 4. Η αστοχία μπορεί να οφειλόταν σε ρηγματώσεις λόγω υπερβολικής βαφής, μας έδωσε όμως να καταλάβουμε ότι το υλικό από το οποίο κατασκευάσαμε τα εργαλεία δεν είναι κατάλληλο για να ανταπεξέλθει στις αναγκαίες συνθήκες. Επαναλαμβάνουμε αυτό που είπαμε και στην αρχή, ότι το υλικό το οποίο έχει δοκιμαστεί και γενικά ενδείκνυται για συγκολλήσεις τριβής με ανάδευση, κραμάτων αλουμινίου, είναι ο AISI H13 του οποίου πιο γνωστές είναι οι εκδόσεις Premium Quality H-13. Ο εργαλειοχάλυβας αυτός έχει όριο διαρροής 1650 MPa και αντοχή 1990 MPa[22]. Αντίθετα ο χάλυβας που εμείς χρησιμοποιήσαμε είχε υποτετραπλάσιες ιδιότητες, με όριο διαρροής 450 MPa και αντοχή 585 MPa [23].

➤ Πρότάσεις

Αυτό το οποίο βλέπουμε ότι θα μπορούσε να γίνει ακόμα προς την ίδια κατεύθυνση, θα ήταν να εξεταστούν οι ραφές από τα εργαλεία σε επίπεδο μικροδομής, για να βρεθούν τυχόν ατέλειες. Καλό θα ήταν να μπορούσαν να βρεθούν τα όρια τα οποία έχει ο αλγόριθμος αυτός, καθώς και τα αδύναμά του σημεία.

Επίσης μία καλύτερη προσέγγιση του θερμικού μοντέλου, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, ενώ το σημείο στο οποίο σίγουρα μειονεκτεί, είναι στη ροή του υλικού, η οποία απλοποιήθηκε σημαντικά. Δεν συμπεριλαμβάνεται μοντελοποίηση των δυνάμεων σφυρηλάτησης, ούτε και της διαδικασίας ανάδευσης.

Βιβλιογραφία

- [1] *Friction stir welding and processing* R.S. Mishra and Z.Y. Ma ASM 2007
- [2] *Simulation of the global response of a friction stir weld using local constitutive behavior* W. D. Lockwood and A. P. Reynolds Journal 2001
- [3] *Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation* M. Song, R. Kovacevic Journal 2002
- [4] *The effect of process parameters and tool geometry on mechanical properties of friction stir welded aluminum butt joints* G. D'Urso¹, E. Ceretti², C. Giardini¹, G. Maccarini¹ Journal 2009
- [5] *Effect of process parameters on friction stir welding of aluminum alloy 2219-T87* Kanwer S. Arora & Sunil Pandey & Michael Schaper & Rajneesh Kumar Journal 2009
- [6] *A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding* F. Gratecap · G. Racineux · S. Marya Journal 2008
- [7] *A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding* H Schmidt and J Hattel Journal 2004
- [8] *Changes of weld pool shape by variations in the distribution of heat source in arc welding.* N. S. Tsai & T. W. Eagar Journal 1984
- [9] *Συγκολλήσεις μετάλλων* Θ. Α. Διαμαντούδης 2000
- [10] *Modern Welding Technology* Howard B. Carry · Scott C. Helzer 2005
- [11] *Friction stir welding and processing* R.S. Mishra , Z.Y. Ma 2005
- [12] «*ALUMINIUM*» (Aluminium magazine) Απρίλιος 2000
- [13] *Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation* M. Song, R. Kovacevic 2002
- [14] *A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures* Riqiang Liang, Akhtar S. Khan 1999
- [15] *Optional Strain-Rate Forms for the Johnson. Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon_01* Len Schwer Schwer Engineering & Consulting Services
- [16] *Atlas of Stress- Strain Curves* ASM 1997
- [17] <http://www.suppliersonline.com/propertypages/2024.asp>

[18] Friction stir welding in the automotive industry Christopher B. Smith, Wade Crusan, Jonathan R. Hootman, John F. Hinrichs, Robert. J. Heideman, and Jeffrey S. Noruk

[19] *Pin Tool Geometry Effects in Friction Stir Welding* J.A. Querin, H.A. Rubisoff, A. Schneider Department of Mechanical Engineering Mississippi State University

[20] «Συγκόλληση δια τριβής με εμβάπτιση σωλήνων αλουμινίου μικρής διαμέτρου»
Διπλωματική Εργασία Αντώνης Μητσάκος ΕΜΠ 2009 επιβλέπων καθηγητής Δ.
Μανωλάκος

[21] *Design and Properties of FSW tools: A literature review* Dubourg L. Dachaux P. 2006

[22] http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7

[23] http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=193434cf42e343fab880e1dabdb143ba

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

```
%-----  
%----- Εξάρτηση της τάσης διαρροής-----  
%----- από τη θερμοκρασία -----  
%-----  
% Θα δημιουργήσουμε την κατανομή της τάσης διαρροής του υλικού σΥ ως  
% προς  
% την θερμοκρασία του T  
  
% Εισαγωγή των μονοδιάστατων πινάκων σ,T σε MPa και βαθμούς Κελσίου  
  
%----- Al 2024 T4 -----  
% Τιμές τις οποίες λάβαμε από το βιβλίο Atlas of Stress-Strain Curves,  
% ASM,1997, σελ 24  
% Οι θερμοκρασίες 502, 570 και 638 είναι το σημείο τήξης του μετάλλου,  
% η  
% μέση τιμή των Solidus(502) και Liquidus(638), και η Liquidus  
T_2024_exp=[-194 -91 -30 28 100 150 210 260 325 380 502 570 638];  
S_2024_exp=[388.5 331 323 323 306 285 238 175 95 52 0 0 0];  
% Παρεμβολή των σημείων μέσω Splines  
T1=0:650;  
s1=spline(T_2024_exp,S_2024_exp,T1);  
  
% Τιμές τις οποίες λάβαμε από την αμερικανική ιστοσελίδα προμήθειας  
% μετάλλων  
% http://www.suppliersonline.com/propertypages/2024.asp σε ksi και oF  
% και  
% τις οποίες μετατρέψαμε σε MPa και oC αντίστοιχα  
T_2024_sup=[-195.6 -80 -27.8 24 100 148.9 204.4 260 315.6 371.1 510  
570....  
  
638];  
S_2024_sup=[420.6 337.8 324 324 310.3 248 131 62 41 27.6 0 0 0];  
s2=spline(T_2024_sup,S_2024_sup,T1);  
  
% Προσέγγιση της σχέσης σ(T) του Al 2024 T4 με χρήση του μοντέλου  
% Johnson-Cook για μηδέν μόνιμη παραμόρφωση και μηδέν ρυθμό μόνιμης  
% παραμόρφωσης  
T_2024_Johnson=0:650;  
S_2024_Johnson=323.*(1-((T_2024_Johnson-28)/(502-28)).^1.7);  
  
%----- Al 6061 T6 -----  
% Τιμές τις οποίες λάβαμε από τη δημοσίευση Thermal modeling of  
% friction  
% stir welding in a moving coordinate system and its validation, M.  
% Song,  
% R. Kovacevic / International Journal of Machine Tools & Manufacture  
% 43  
% (2003) 605-615 στη σελίδα 610  
% Οι θερμοκρασίες 582, 617 και 652 είναι το σημείο τήξης του μετάλλου,  
% η  
% μέση τιμή των Solidus(582) και Liquidus(652), και η Liquidus  
T_6061_exp2=[38,66,93,121,149,177,204,260,316,371,582,617,652];  
S_6061_exp2=[241 238 232 223 189 138 92 34 19 12 0 0 0];  
% Παρεμβολή των σημείων μέσω Splines  
s3=spline(T_6061_exp2,S_6061_exp2,T1);
```

```

%Απόπειρα προσέγγισης της καμπύλης s3(T) του Al 6061 T6 μέσω της
καμπύλης 1
%πολλαπλασιάζοντας επί τους λόγους των Solidus και των ορίων διαρροής
T_6061_new=T1.*582./502;
S_6061_new=s1.*241./323;

%----- Al 2017 -----
-----
%Τέλος η ίδια απόπειρα προσέγγισης γίνεται και για την χαρακτηριστική
του
%Al 2017 που μας ενδιαφέρει, μιας και οι ερευνητές, με βάση αυτό είχα
%εργαστεί, και η επιτυχία ή όχι του μοντέλου στηρίζεται στα
αποτελέσματα
%που έχουμε από αυτούς. Για το λόγο αυτό, η προσέγγιση θα γίνει με
βάση τα
%δεδομένα για το Al 2024 που είναι της ίδιας οικογένειας,
πολλαπλασιάζοντας
%επί τους λόγους των Solidus και των ορίων διαρροής.

%Προσοχή εμείς για την τωρινή εφαρμογή μας, χρειαζόμαστε τα T_2017
και
%S_2017, τα οποία όμως εξάγουμε στα άλλα υποπρογράμματα ως s,T. Αυτό
έγινε
%ώστε τυχών αλλαγές που ίσως γίνουν εδώ να αφήνουν τα άλλα
υποπρογράμματα
%ανεπηρέαστα
T_2017=T1.*518./502;
S_2017=s1.*276./323;

T_2017_2=T1.*518./582;
S_2017_2=s3.*276./241;

T_2017_3=(T_2017_2+T_2017)./2;
S_2017_3=(S_2017_2+S_2017)./2;

%Προσέγγιση της σχέσης σ(T) του Al 2024 T4 με χρήση του μοντέλου
%Johnson-Cook για μηδέν μόνιμη παραμόρφωση και μηδέν ρυθμό μόνιμης
%παραμόρφωσης
T_2017_Johnson=0:650;
S_2017_Johnson=276.*(1-((T_2017_Johnson-28)./(518-28)).^0.41);

% Σχεδίαση των καμπυλών για σύγκριση
figure(1)
plot(T_2024_exp,S_2024_exp,'ro',...
      T1,s1,'b',...
      T_2024_sup,S_2024_sup,'.',...
      T1,s2,...
      T_2024_Johnson,S_2024_Johnson)...
;grid on...
;axis([20 510 0 350])...
;xlabel('Temperature [oC]')...
;ylabel('Yield Stess [MPa]')

%-----σY - T 2017 -----

figure1 = figure('Name','σY-T Κράμα 2017 T4');

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'FontSize',11,...
            'Color',[0.729411780834198 0.831372559070587 0.95686274766922]);

```

```

% Uncomment the following line to preserve the X-limits of the axes
% xlim(axes1,[28 550]);
% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim(axes1,[0 300]);
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
axis([26 520 0 300])
% Create plot
plot(T_2017_Johnson,S_2017_Johnson,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'Color',...
r',...
[0 0 1],'DisplayName','Johnson-Cook');

% Create plot
plot(T_2017_3,S_2017_3,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'Color',[1 0
0],...
'DisplayName','Μέσος Όρος');

% Create plot
plot(T_2017_2,S_2017_2,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle',':','..
..
'Color',[0.494117647409439 0.494117647409439
0.494117647409439],...
'DisplayName','Προσέγγιση 6061 T6');

% Create plot
plot(T_2017,S_2017,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'LineStyle',':','...
'DisplayName','Προσέγγιση 2024 T4',...
'Color',[0 0 0]);

% Create xlabel
xlabel('Temperature [oC'],'FontSize',12);

% Create ylabel
ylabel('Yield Stess [MPa]','FontSize',12);

% Create legend
legend1 = legend(axes1,'show');
set(legend1,'Color'...
,[0.905882358551025 0.905882358551025 0.905882358551025]);

%-----
%-----
%-----

% Create figure
figure2 = figure('Name','σY-T Κράμα 6061 T6');

% Create axes
axes2 = axes('Parent',figure2,...
'Color',[0.729411780834198 0.831372559070587 0.95686274766922]);
% Uncomment the following line to preserve the X-limits of the axes
% xlim(axes1,[20 590]);
% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim(axes1,[0 250]);
box(axes2,'on');
grid(axes2,'on');
hold(axes2,'all');
axis([20 590 0 250])

```

```

% Create plot
hLine =
plot(T_6061_exp2,S_6061_exp2,'*','Parent',axes2,'Marker','*'...
    , 'LineStyle','none','DisplayName','OXI');
set(get(get(hLine,'Annotation'),'LegendInformation'),...
    'IconDisplayStyle','off');
% Create plot
plot(T1,s3,'Parent',axes2,'Color',[0 0 1],'DisplayName'...
    , 'Μετρήσεις 6061 T6');

% Create plot
plot(T_6061_new,S_6061_new,'Parent',axes2,'LineWidth',2,'DisplayName'
    ...
    , 'Προσέγγιση 2024 T4');

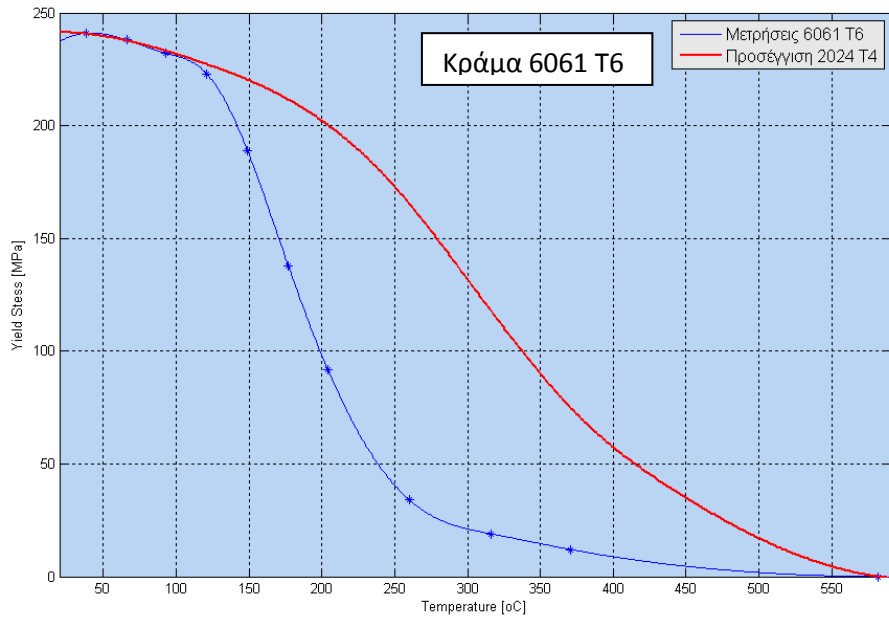
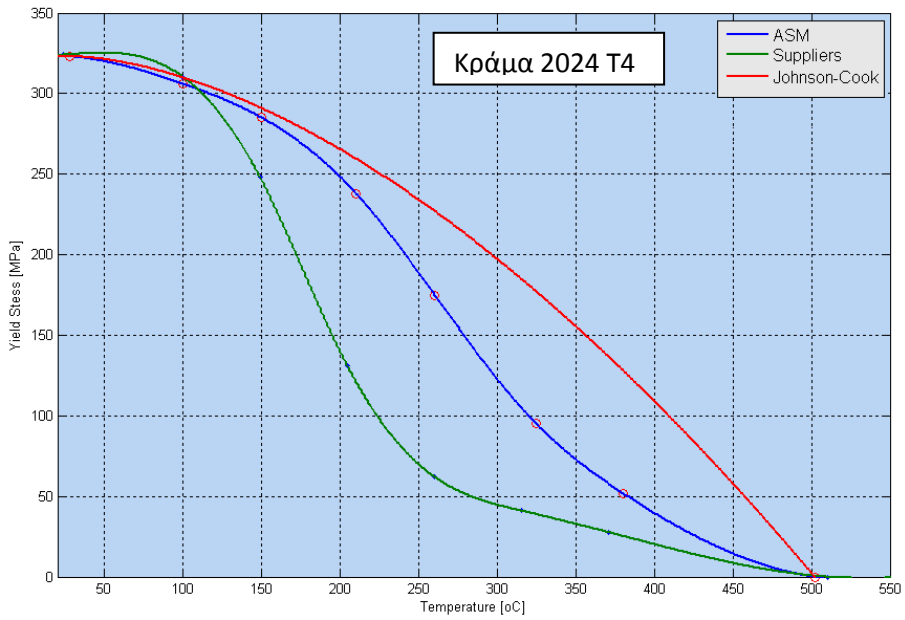
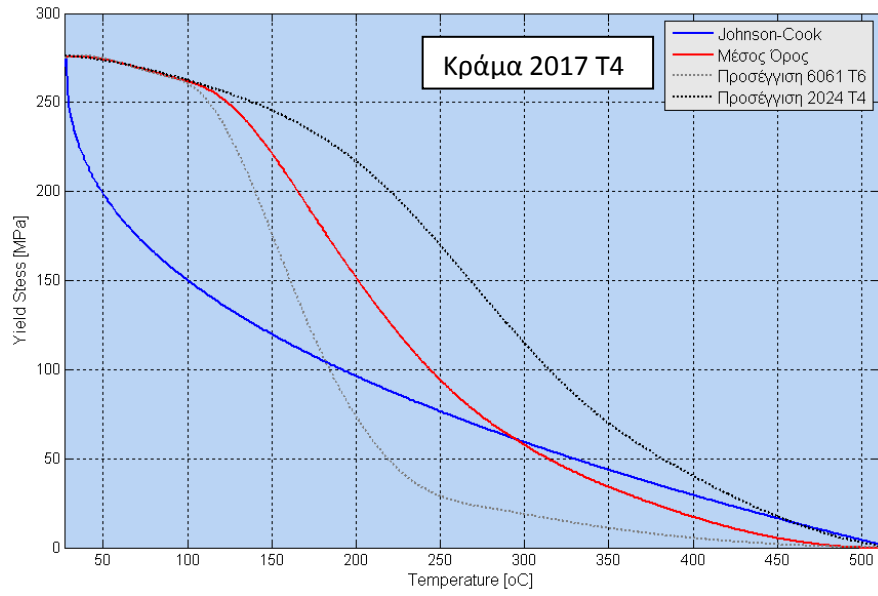
% Create xlabel
xlabel('Temperature [oC]');

% Create ylabel
ylabel('Yield Stess [MPa]');

% Create legend
legend2 = legend(axes2,'show');
set(legend2,'FontSize',12,...
    'Color',[0.905882358551025 0.905882358551025 0.905882358551025]);

%-----
-----
%-----
-----

```



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Τμήμα του Αλγορίθμου

```
%Έχουμε χωρίσει το πρόγραμμα σε τμήματα και κάθε ένα από αυτά
αποτελεί
%ξεχωριστό πρόγραμμα

%Αρχικά εισάγουμε τα χαρακτηριστικά της μηχανής μας

%Θα εισάγουμε τις δυνατές στροφές το δευτερόλεπτο και θα τις
μετατρέψουμε
%σε rpm
N_machine=[25, 42, 72, 121, 206, 348, 850, 1000];
%Θα εισάγουμε τις δυνατές προώσεις σε χιλιοστά το λεπτό και θα τις
%μετατρέψουμε σε μέτρα το δευτερόλεπτο
V_machine=[13, 21, 32, 51, 83, 127, 203, 318]./(1000.*60);
%-----
%-----

%Ξεκινάμε με την εισαγωγή των δεδομένων του πειράματος
[Qtool, Rs, Rp, h, g, b, Vf, N, a, d, k, L, tp, To, Tf, Tp, s, T]=data_input1;
%Υπολογισμός του αρχικού ορίου διαρροής για τη θερμοκρασία Tp, βάσει
της
%κατανομής (σ, T)
for m=1:length(T)
    if T(m)-Tp<=1
        sY=s(m)*1000000;
    end
end
r=1;
while r==1
    r=0;
    %Υστερα ακολουθεί το θερμικό μοντέλλο όπου πρώτον εξασφαλίζουμε
ότι η
    %θερμοκρασία γύρω από τον πύρο θα είναι μεταξύ 0.80 και 0.70 της
%solidus, δεύτερον εξασφαλίζουμε ότι οι στροφές θα έχουν πάρει
%ικανοποιητικές τιμές για τη μηχανή μας, κάτι το οποίο
επιτυγχάνεται με
    %την ρύθμιση της ακτίνας της πλάτης Rs

[Rs, N, Qtool, Qt, Tp]=Thermal_model(Rs, Rp, h, Qtool, s, T, N, To, k, N_machine, .
. .
    Tf, Ts, sY, Vf, L_plate);
    %Τώρα θα εφαρμόσουμε τον κανόνα της επιφάνειας, από όπου θα
βρούμε το
    %κατάλληλο ύψος h για τον πύρο.
[h, Si, Se]=Surface_rule(Rs, Rp, a, d, tp);
    %Με τον κανόνα της ροής υπολογίζουμε τη γωνία ελευθερίας της
πλάτης γ
[g, Qr, Qs]=Flow_rate_rule(Vf, b, g, Rp, Rs, a, d, tp, N);
    %Τελευταίος χρησιμοποιείται ο κανόνας του όγκου, ο οποίος
επιβεβαιώνει
    %τις τιμές που έχουν προκύψει. Σε περίπτωση όμως που δεν ισχύει ο
%κανόνας αυτός, θα πρέπει να μεταβάλλουμε το Rp και να
επαναλάβουμε την
    %διαδικασία από την αρχή
```



```

    %Κρατάμε την παλιά τιμή του Rp για να γράψουμε τη συνθήκη
    σύγκλισης
    [Rp, r, V1, V2, V3, V4]=Volume_rule(b, Rp, h, Rs, a, d, tp, r);
end
Ev=( (V1+V2) - (V3+V4) ) / (V1+V2) *100;
Eq=(Qr-Qs)/Qr*100;
Es=(Si-Se)/Si*100;
Q=Qtool.*Qt./(2.*pi.*k);
x=-10*Rp:Rp/20:10*Rp;
y=-10*Rp:Rp/20:10*Rp;
for k=0:100
    for i=1:401
        for j=1:401
            T_surf(i, j)=0;
            if sqrt((x(i)-Rp*k/5)^2+(y(j))^2)>=Rp
                T_surf(i, j)=To+Q*exp(-(Vf/2/L).*(x(i)-Rp*k/5)+...
                    sqrt((x(i)-Rp*k/5).^2+(y(j)).^2))...
                    ./sqrt((x(i)-Rp*k/5).^2+(y(j)).^2);
            else
                T_surf(i, j)=To+Q*exp(-(Vf/2/L).*(x(i)-
Rp*k/5)+Rp))./Rp;
            end
        end
    end
    T_surf(1, length(j))=To+Q./Rp;
    surf(x, y, T_surf'); shading interp; view(30, 40); drawnow...
    ; xlabel('X [mm]'); ylabel('Y [mm]'); title('Temperature [oC]')
end

```

```

function [Rs, Rp, h, g, b, Vf, N, a, d, Ef_tool, k, L, Ef_plate, tp, To, Tf, ...
s, T]=data_input2(V_machine)

% Εισαγωγή Δεδομένων

disp('TOOL GEOMETRY') % Γεωμετρία Εργαλείου

disp('')
% Εισαγωγή αρχικής ακτίνας της πλάτης του εργαλείου σε mm
disp('give the initial shoulder radius in mm')
Rs=input('Rs=');
disp('')
% Εισαγωγή αρχικής ακτίνας του πύρου του εργαλείου σε mm
disp('give the initial pin radius in mm')
Rp=input('Rp=');
disp('')
% Εισαγωγή αρχικού ύψους του πύρου του εργαλείου σε mm
disp('give the initial pin height in mm')
h=input('h=');
disp('')
% Εισαγωγή της γωνίας ελευθερίας γ σε μοίρες
disp('give the initial clearance angle of the shoulder in degrees')
g=input('g=');
disp('')
% Εισαγωγή της γωνίας του κώνου του εργαλείου β σε μοίρες
disp('give the angle of the cone of the tool b in degrees')
b=input('b=');

disp('')

```

```

disp('')

disp('PROCESS PARAMETERS') % Παράμετροι διεργασίας

disp('')
% Εισαγωγή της πρόωσης του εργαλείου και έλεγχος συμβατότητάς τους με
τις
% δυνατές τιμές της μηχανής μας
l=1;
disp('The advance speed can take one of the following values:')
disp('13, 21, 32, 51, 83, 127, 203, 318 in mm/min')
Vf=input('Vf=');
%Έλεγχος μήπως δόθηκε λάθος τιμή
while l==1
    for i=1:length(V_machine)
        if Vf==V_machine(i)
            l=0;
        end
    end
    if l==1
        disp('The advance speed can take one of the following
values:')
        disp('13, 21, 32, 51, 83, 127, 203, 318 in mm/min')
        Vf=input('Vf=');
    end
end
disp('')
% Εισαγωγή των στροφών N σε rpm
disp('The revolution speed can take one of the following values:')
disp('1500, 2520, 4320, 7260, 12360, 20880, 41400, 60000 in rpm')
N=input('N=');
l=1;
%Έλεγχος μήπως δόθηκε λάθος τιμή
while l==1
    for i=1:length(N_machine)
        if N==N_machine(i)
            l=0;
        end
    end
    if l==1
        disp('The revolution speed can take one of the following
values:')
        disp('1500, 2520, 4320, 7260, 12360, 20880, 41400, 60000 in
rpm')
        Vf=input('Vf=');
    end
end
disp('')
% Εισαγωγή της γωνία κλίσης του εργαλείου α σε μοίρες
disp('give the tilt angle a in degrees')
a=input('a=');
disp('')
% Εισαγωγή της απόστασης του εργαλείου από τη βάση του υλικού δ σε mm
disp('give the tool distance from the bottom d in mm')
d=input('d=');

disp('')
disp('')

disp('THERMAL TOOL PARAMETERS')

```

```

disp('')
% Εισαγωγή της θερμική εκχυτικότητα του εργαλείου (ρίζα πυκνότητας,
επί
% την θερμική χωρητικότητα, επί την θερμική αγωγιμότητα του υλικού)
disp('give the tool`s thermal effusivity Ef=root(d x cp x k)')
% d είναι η πυκνότητα
disp('d=density')
% cp είναι η θερμική χωρητικότητα [J/K]
disp('cp=heat capacity [J/K]')
% k είναι η θερμική αγωγιμότητα [W/(K x m)]
disp('k=thermal conductivity [W/(K x m)]')
Ef_tool=input('Ef=');

disp('')
disp('')

disp('PLATE PARAMETERS') %Παράμετροι πλάκας

disp('')
%Tf είναι η θερμοκρασία solidus του κράματος που θέλουμε να
συγκολλήσουμε
disp('give the solidus temperature of the plate')
Tf=input('Tf');
% k είναι η θερμική αγωγιμότητα της πλάκας σε W/(K x m)
disp('give the plate`s thermal conductivity k in W/(K x m)')
k=input('k=');
disp('')
% Εισαγωγή της θερμική εκχυτικότητα της πλάκας (ρίζα πυκνότητας, επί
την
% θερμική χωρητικότητα, επί την θερμική αγωγιμότητα του υλικού)
disp('give the plate`s thermal effusivity Ef=root(d x cp x k)')
% d είναι η πυκνότητα σε kg/m3
disp('d=density in kg/m3')
% cp είναι η θερμική χωρητικότητα [J/K]
disp('cp=heat capacity [J/K]')
% k είναι η θερμική αγωγιμότητα [W/(K x m)]
disp('k=thermal conductivity [W/(K x m)]')
Ef_plate=input('Ef=');
disp('')
% Εισαγωγή της θερμική διαχυτικότητας της πλάκας (θερμική
αγωγιμότητα, διά
% το γινόμενο πυκνότητας επί την θερμική χωρητικότητα του υλικού)
disp('give the plate`s thermal diffusivity L=(k)/(d x cp)')
L=input('L=');
disp('')
% Εισαγωγή της αρχικής θερμοκρασίας της πλάκας σε K
disp('give the plate`s initial temperature To in K')
To=input('To=');
disp('')
% Εισαγωγή του πάχους της πλάκας σε mm
disp('give the plate`s width tp in mm')
tp=input('tp=');

disp('')
disp('')

% Θα δημιουργήσουμε την κατανομή της τάσης διαρροής του υλικού σΎ ως
προς
% την θερμοκρασία του T

```

```

disp('The temperature dependence of yield stress')
% Η κατανομή πρέπει να αποτελείται από τουλάχιστον 3 σημεία
disp('You must enter at least three points')

disp('')
% Εισαγωγή πρώτου ζεύγους σ,T σε MPa και μοίρες
disp('give the first couple s,T in MPa and degrees')
s(1)=input('s=');
T(1)=input('T=');
disp('')
% Εισαγωγή δεύτερου ζεύγους σ,T σε MPa και μοίρες
disp('give the second couple s,T in MPa and degrees')
s(2)=input('s=');
T(2)=input('T=');
disp('')
% Εισαγωγή τρίτου ζεύγους σ,T σε MPa και μοίρες
disp('give the third couple s,T in MPa and degrees')
s(3)=input('s=');
T(3)=input('T=');
disp('')

meter=3; % δείκτης των πινάκων της τάσης και της θερμοκρασίας
test=0; % Μεταβλητή ελέγχου του βρόχου
while test~=n
    % Εισαγωγή του επομένου ζεύγους ή πληκτρολόγηση '-' για σταμάτημα
    disp('give the following points or press n')
    test=input('s=');
    if test~=n
        meter=meter+1;
        s(meter)=test; %#ok<*AGROW>
        T(meter)=input('T=');
        disp('')
    end
end

%-----
%-----
%-----

% Επειδή οι εξισώσεις είναι όλες φτιαγμένες στο SI, πρέπει να
αλλάξουμε τις
% τιμές των δεδομένων που εισήχθησαν

Rs=Rs/1000;
Rp=Rp/1000;
h=h/1000;
Vf=Vf/1000;
d=d/1000;
tp=tp/1000;

%-----Τέλος Υποπρογράμματος-----

function [h, Si, Se]=Surface_rule(Rs,Rp,a,d,tp)
%-----
%-----KANONAS ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-----

```

```

%-----
%Μετατροπή μοιρών σε rad για να τα δέχεται η Matlab
a=a.*pi./180;
h=(pi.*Rs.*sin(a)./4-Rp.*sin(a)-d+tp)./cos(a);
Si=0.5*pi.*Rs.^2.*sin(a);
Se=2*Rs*(Rp.*sin(a)+h*cos(a)+d-tp);

function [Rp,r,V1,V2,V3,V4]=Volume_rule(b,Rp,h,Rs,a,d,tp,r)
%-----
%----KANONAS TOY ΟΓΚΟΥ-----
%-----
%Μετατροπή μοιρών σε rad για να τα δέχεται η Matlab
A=a.*pi./180;
B=b.*pi./180;
% Ορισμός της γωνίας θ1
theta_1=acos((h.*cos(A)+d-tp)/(Rs.*cos(A)));

%Ογκος V1
V1=Rs^3*cos(A)*sin(A)*(cos(theta_1).*(pi+sin(theta_1).*cos(theta_1)..
.
.
.
-theta_1)+2./3.*(sin(theta_1)).^3);

%Ογκος V2
H=(Rs-Rp-h.*tan(B))./(tan(B)+1./tan(B));
V2=(pi./3)*H*(Rs.^2+(Rp+(h+H).*tan(B)).^2+Rs.*(Rp+(h+H).*tan(B)))-...
pi*(Rp+(h+H).*tan(B)).^2.*H;

%Ογκος V3
V3=Rs^3*cos(A)*sin(A)*(cos(theta_1).*...
(sin(theta_1).*cos(theta_1)-theta_1)+(2/3).*(sin(theta_1)).^3);

%Ογκος V4
V4=(pi./3)*h*(Rp.^2+Rp.*(Rp+h.*tan(B))+(Rp+h.*tan(B)).^2);

%Συνθήκη
if abs(((V1+V2)-(V3+V4))/(V1+V2)*100)>0.01
    r=1;
    if Rp<0.0001
        Rp=0.0005;
    else
        Rp=Rp+(((V1+V2)-V3-
(pi./3).*h.^3.*(tan(B)).^2)/(pi.*h.*Rp+pi.*h...
.^2.*tan(B))-Rp)*0.5;
    end
end
end
end

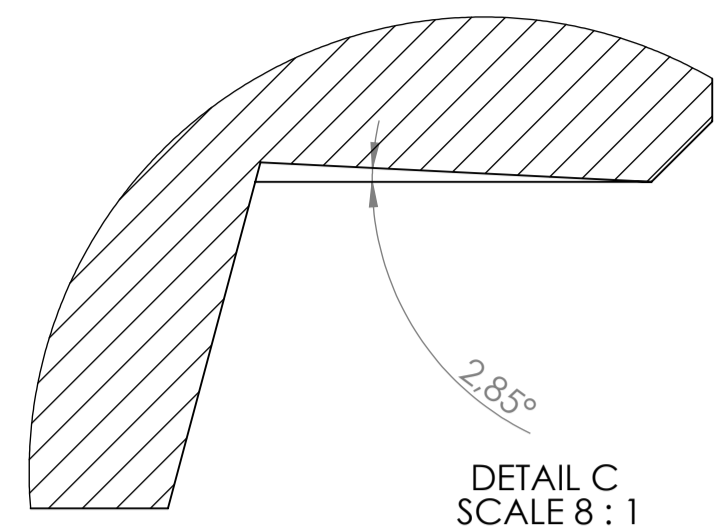
```

Ο κώδικας ο οποίος παρατίθεται εδώ είναι ένα τμήμα του από τα αρχικά του στάδια, προτού χρησιμοποιηθούν γραφικά. Για περισσότερες πληροφορίες πάνω στον κώδικα αυτόν επικοινωνήστε με τον καθηγητή Δ. Μανωλάκο στα τηλέφωνα 210-772-1882, 210-772-2572 ή ηλεκτρονικά στο manolako@central.ntua.gr.

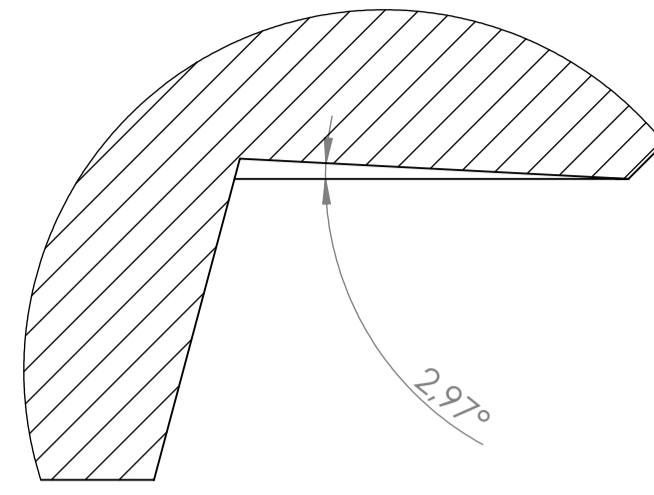
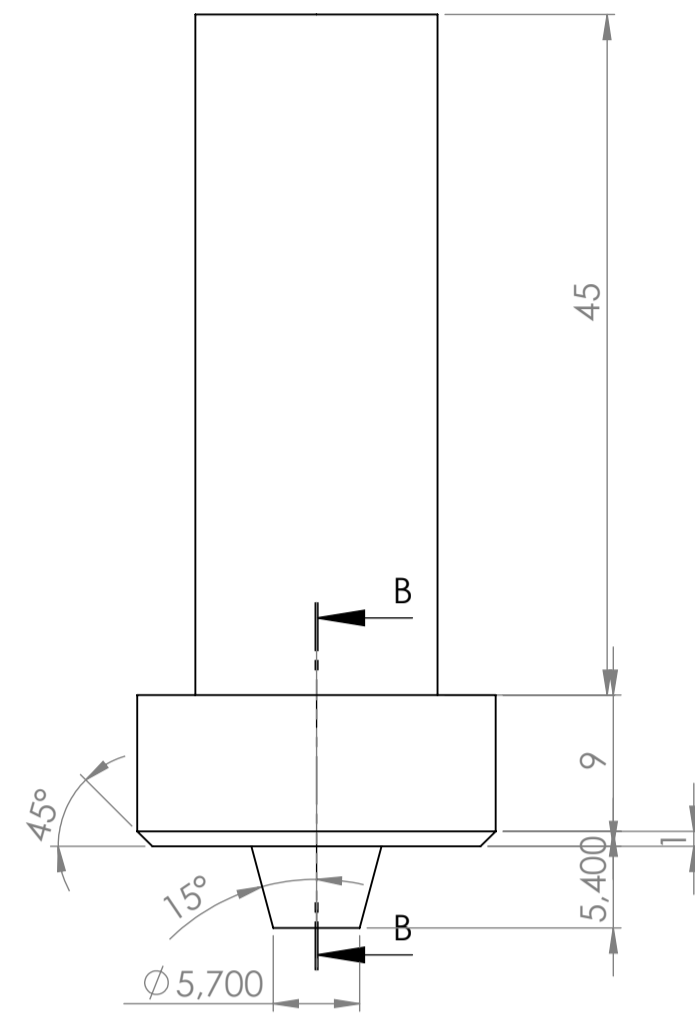
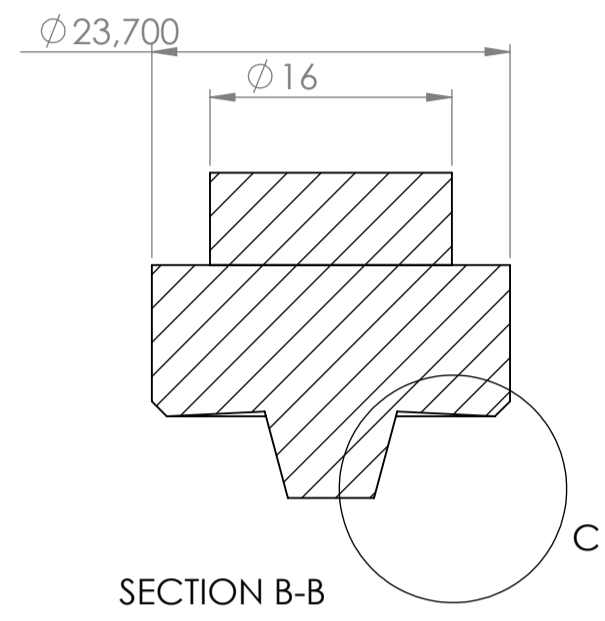
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν δίνονται με τις διαστάσεις τους στα μηχανολογικά σχέδια που ακολουθούν. Οι συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες σχεδιάστηκαν είναι οι ακόλουθες:

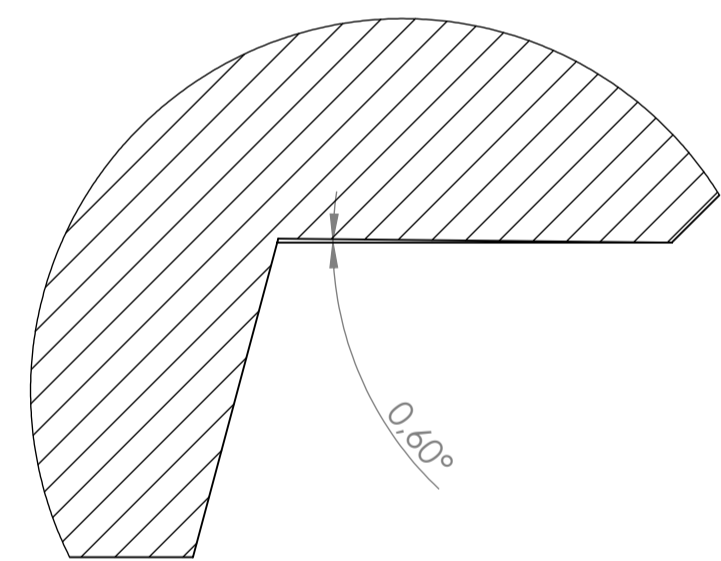
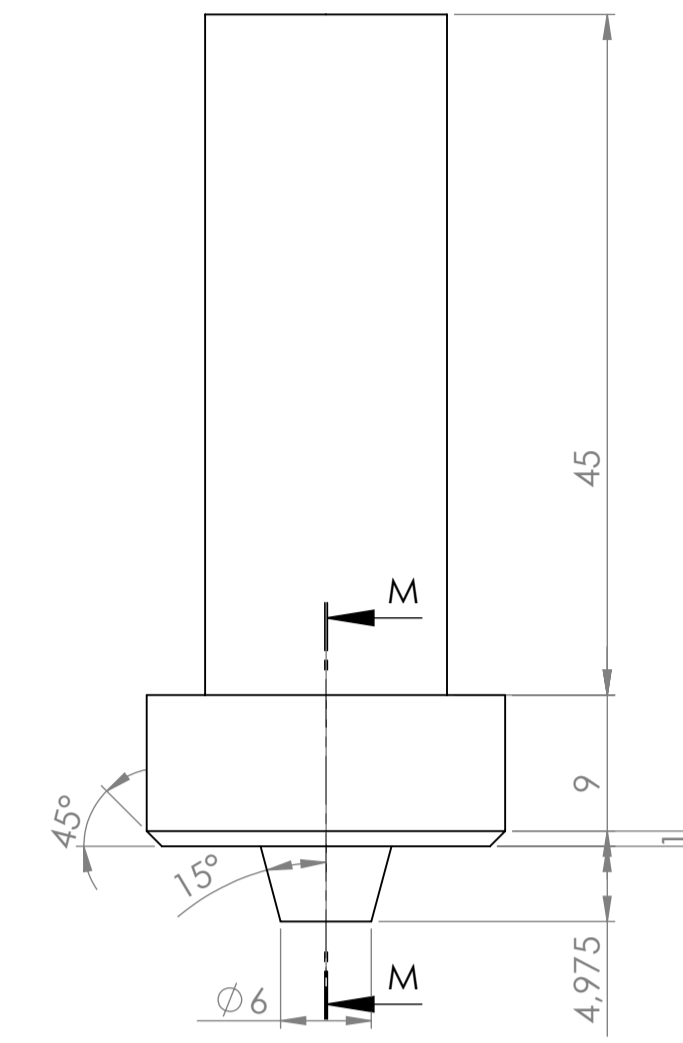
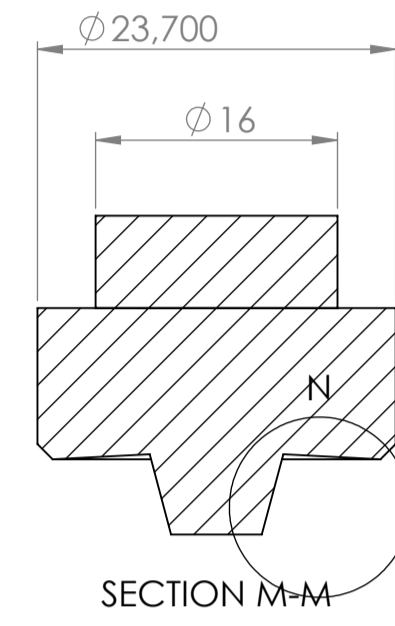
Εργαλείο	Πείραμα	Πρόωση	Στροφές
1	Θερμό	83	348
1	Κανονικό	51	206
1	Ψυχρό	32	121
2	-	51	121
3	-	51	206
4	-	51	206
5	-	51	121
6	-	51	121
7	-	51	121
8	Θερμό	83	206
8	Κανονικό	51	121
8	Ψυχρό	32	72



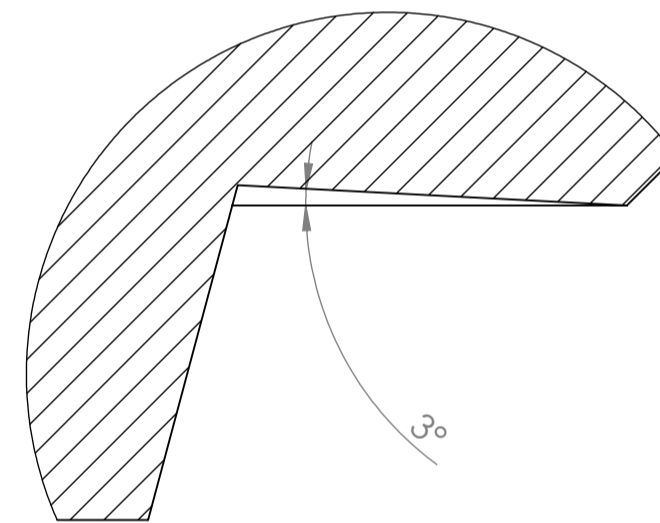
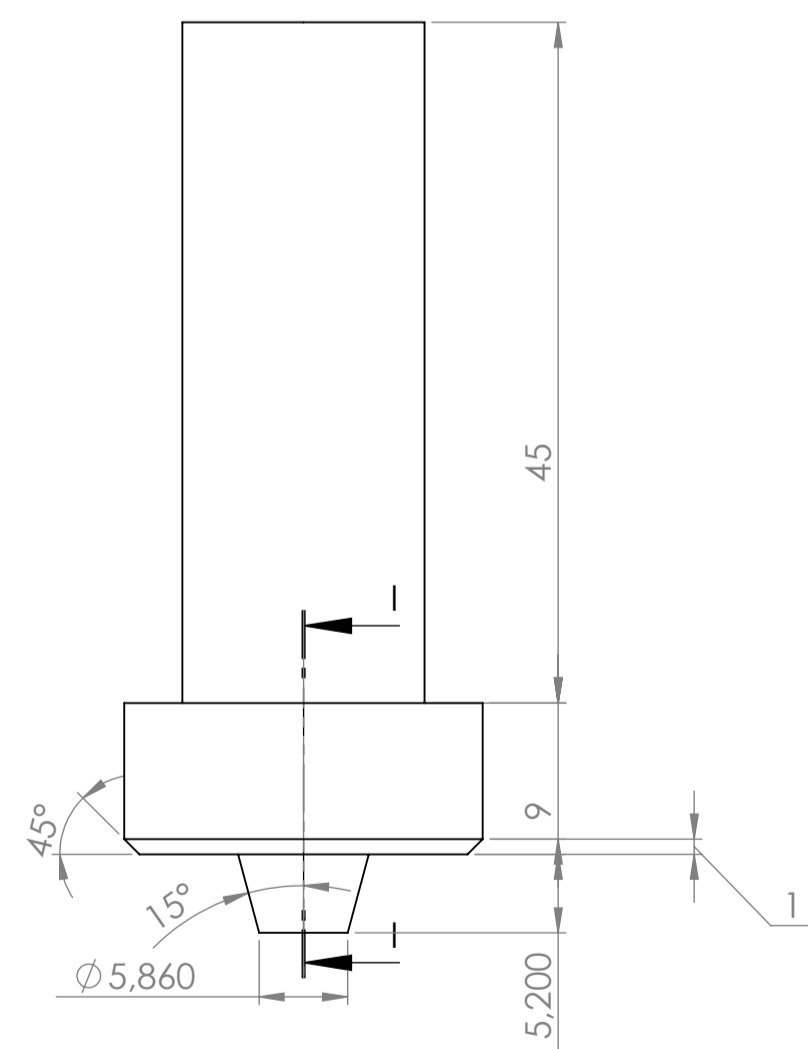
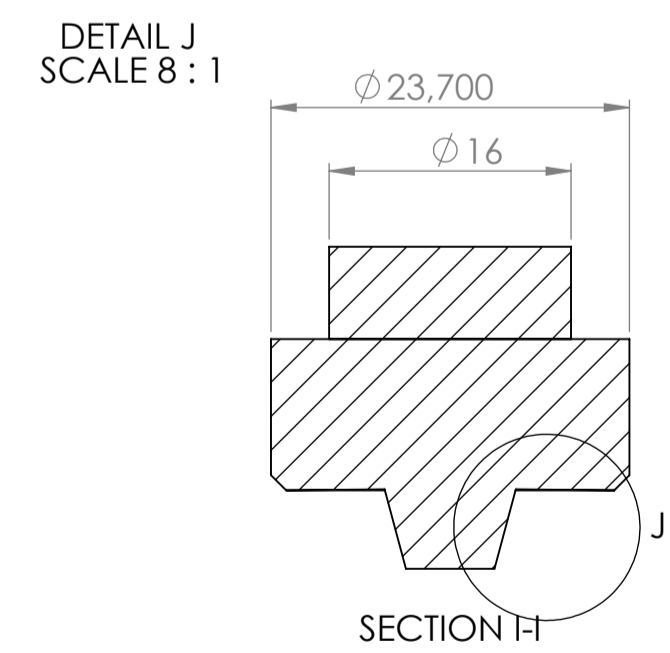
Εργαλείο T05



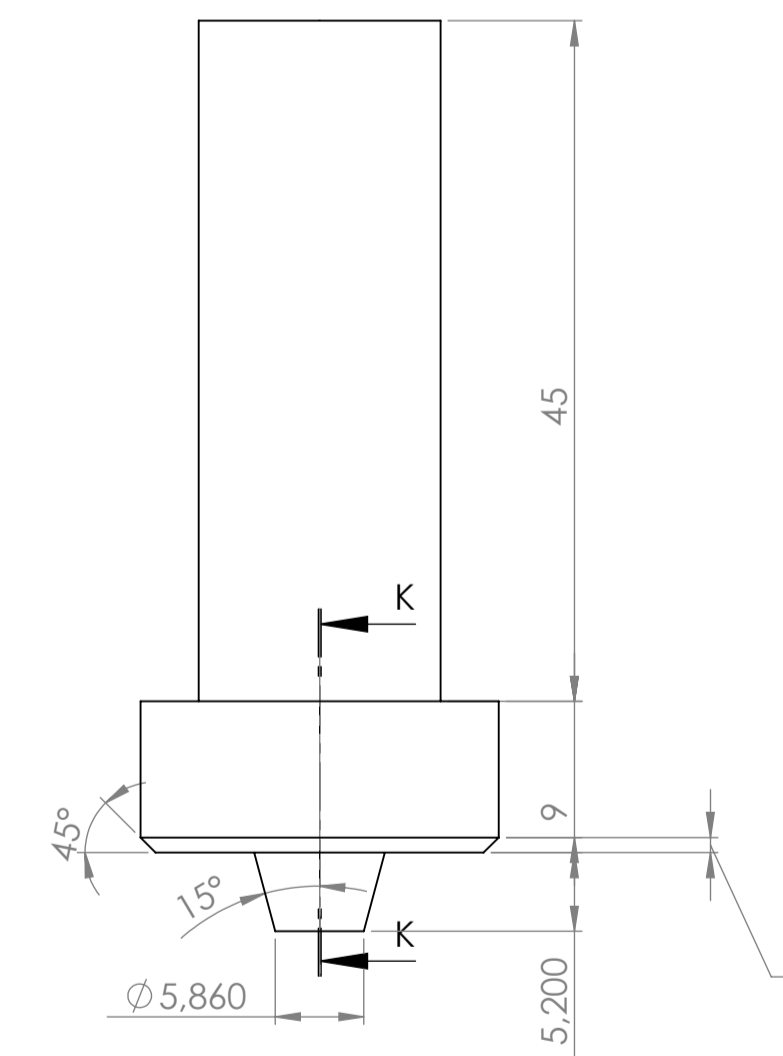
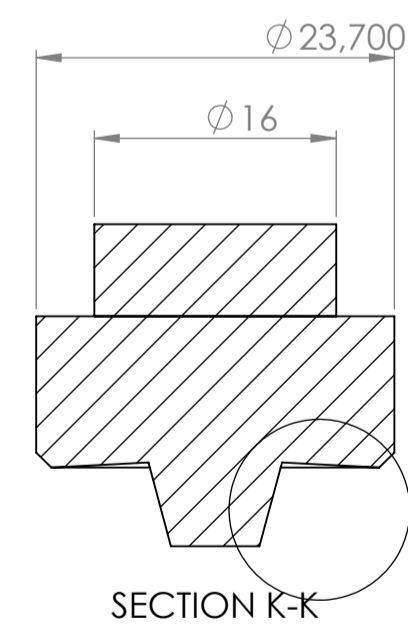
Εργαλείο T06



Εργαλείο T07



Εργαλείο T08



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:						
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A.				MATERIAL:	DWG NO.	Σχέδιο 2
				WEIGHT:	SCALE: 2:1	A1
				SHEET 1 OF 1		