ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Υπολογιστική μελέτη των ασκούμενων φορτίων κατά την Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση κραμάτων αλουμινίου.

Διπλωματική εργασία

Ράπτης Παναγιώτης

Επιβλέπων: Dr.-Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα,2021

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

Υπολογιστική μελέτη των ασκούμενων φορτίων κατά την Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση κραμάτων αλουμινίου.

Διπλωματική εργασία

Ράπτης Παναγιώτης

Επιβλέπων: Dr.-Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΗ/ΜΜ/ΕΕΕΕ

Σπυρίδων Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής…………………………………….(Υπογραφή)

Πέτρος Τσακιρίδης, Επίκ. Καθηγητής]…………………….…………….………..(Υπογραφή)

Άγγελος Μαρκόπουλος, Αναπλ. Καθηγητής]………………………………..…..(Υπογραφή)

Περίληψη

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί μια νέα τεχνική σύνδεσης μετάλλων σε στερεά κατάσταση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει αναπτυχθεί ένα αριθμητικό μοντέλο που βασίζεται σε επιστημονική γνώση και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και των θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων, που αναπτύσσονται στην FSW κραμάτων αλουμινίου Al 5083-H111 και Al 6082-T4. Το υπολογιστικό εργαλείο (λογισμικό πρόγραμμα) που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι το Abaqus/Explicit όπου εκτελέσθηκε μια δυναμική Explicit ανάλυση.

Δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο θερμομηχανικό μοντέλο της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση και μελετήθηκε η ανάπτυξη της θερμοκρασίας και στα 3 στάδια της συγκόλλησης (στάδιο βύθισης, στάδιο σταθεροποίησης, στάδιο συγκόλλησης). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η Coupled Eulerian-Lagrangian (με χρήση της μεθόδου Volume-Of-Fraction). Τα προς συγκόλληση δοκίμια μοντελοποιήθηκαν ως σώματα Eulerian ενώ το εργαλείο ως λαγκραντζιανό σώμα. Το μοντέλο επαφής που υιοθετήθηκε υπακούει στον νόμο του Coulomb ενώ η ταχύτητα συγκόλλησης καθορίστηκε από τις ταχύτητες εισροής και εκροής του υλικού.

Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επιρροή που έχουν διαφορετικές παράμετροι λειτουργίας όπως η γωνία κλίσης του εργαλείου (0^o,1^o,2^o) και η περιστροφική ταχύτητα (800 RPM, 1200 RPM) στη μέγιστη θερμοκρασία και την ανάπτυξη των ζωνών συγκόλλησης.

Γενικά βρέθηκε ότι η μέγιστη θερμοκρασία, που αναπτύσσεται κατά την συγκόλληση κυμαίνεται από 536^oC έως 542^oC ανάλογα με τις παραμέτρους, οι οποίες έχουν εισαχθεί κατά την μοντελοποίηση. Σημειώθηκε ακόμη ότι σε όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην προωθούμενη πλευρά παραμένει καθ’ όλη την διάρκεια της διαδικασίας μεγαλύτερη από αυτήν στην υποχωρούσα πλευρά λόγω της νόμων που αφορούν στην παραγωγή θερμότητας σε κάθε πλευρά. Επίσης, παρατηρείται ότι με την αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου σημειώνεται και αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας, τόσο κατά μήκος της ζώνης συγκόλλησης όσο και στην υπόλοιπη επιφάνεια του δοκιμίου.

Abstract

Friction Stir Welding is a new welding technique for joining and processing metals. In the current thesis work, a numerical model has developed based on scientific knowledge and provides a useful tool for predicting the temperature and the temperature fields that develop during the FSW of dissimilar aluminum alloys Al 5083-H111 and Al 6082-T4. The software used for this analysis is Abaqus/Explicit where a dynamic explicit analysis is carried out.

A three-dimensional (3D) thermomechanical problem of the FSW procedure developed and the behavior of the temperature was studied during the 3 phases (plunging, dwelling, welding). A coupled Eulerian-Lagrangian method was used for the simulation following the volume-of-fraction method. The workpiece is modeled using Eulerian formulation, while the tool is modeled using Lagrangian approach. Coulomb's frictional contact model is adopted to define the tool workpiece interaction while the welding speed is defined by material inflow and outflow velocities.

More specifically, the influence of different operating parameters such as the tool tilt angle (0^o,1^o,2^o) and the rotational speed of the tool (800 RPM, 1200 RPM) to the maximum temperature and the development of the process zones was studied.

In general, the maximum temperature during the FSW was found to vary from 536^oC to 542^oC, depending on the process parameters entered during the modelling. It was also noted that in all combinations of parameters, the temperature that develops on the advancing side remains higher throughout the whole process than that on the retreating side due to the laws concerning the heat production on each side. It is also observed that with the increase in the rotational speed of the tool there is an increase in the maximum temperature both along the welding zone and on the rest of the workpiece.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στον τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας των Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσοι συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην εκπόνηση της παρούσας μελέτης.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σπυρίδωνα Παπαευθυμίου ο οποίος μου ανέθεσε το θέμα της διπλωματικής εργασίας και με καθοδηγούσε συνεχώς ενθαρρύνοντάς με καθ’ όλη τη διάρκεια της έρευνας. Ακόμη, ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Άγγελο Μαρκόπουλο για τη στήριξή του και τη βοήθεια, που μου παρείχε σε όλες τις δυσκολίες, που αντιμετώπισα. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ τους υποψήφιους Διδάκτορες κ. Βασίλη Λουκαδάκη και κ. Μανώλη Παπάζογλου, από τα αντίστοιχα εργαστήρια, για την συνεχή και άμεση επικοινωνία σχετικά με την ορθή συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, τους γονείς μου Δημήτρη και Τόνια και την αδερφή μου Βένια, οι οποίοι καθ’ όλη την διάρκεια της προσπάθειας μου με στήριζαν και με ενθάρρυναν να συνεχίσω το έργο μου. Τους αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία, καθώς χωρίς αυτούς δεν θα ήταν πιθανό να φτάσω εδώ που έχω φτάσει έως σήμερα.

Πρόλογος

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding – FSW) για ανόμοια κράματα αλουμινίου και η μελέτη των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για την βελτιστοποίηση της προσομοίωσης, την απόφανση δηλαδή περί των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργείας της διαδικασίας με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό τον φορτίων σε δεύτερη φάση. Η προσομοίωση έγινε με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων κάνοντας χρήση του λογισμικού Abaqus/Explicit. Το εν λόγω πρόγραμμα ενδείκνυται λόγω της ευκολίας παραμετροποίησης των δεδομένων, που παρουσιάζει όταν πρόκειται για θερμομηχανικά συνδυασμένα προβλήματα όπως η FSW.

Προϋπόθεση είναι, αρχικά η εξοικείωση με λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων και η κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου του προβλήματος. Ακόμη, μέσω της ανάλυσης της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια εργασίας, της κατανομής της στον χώρο αλλά και μέσω του σχήματος και του μέγεθος των ζωνών συγκόλλησης μπορούν να γίνουν τα πρώτα βήματα για την απόφανση περί την ποιότητα του συγκολλημένου προϊόντος.

Αναλύθηκαν, επίσης, διαφορετικές παράμετροι της συγκόλλησης όπως η γωνία κλίσης και η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου και εξετάστηκε η επιρροή που ασκούν στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας.

Ορισμένα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με την σχετική βιβλιογραφία και βρέθηκε σημαντική ταύτιση.

Περιεχόμενα

Πίνακας Εικόνων

Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται βασικά στοιχεία για το αλουμίνιο και τα κράματα του. Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρεται η απαραίτητη θεωρία πίσω από την διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρουσιάζονται οι βασικοί τρόποι μοντελοποίησης με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και αναλύεται εκτενέστερα η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί, η CEL, και παρατίθενται οι βασικές εξισώσεις που διέπουν το εξεταζόμενο πρόβλημα. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η περιγραφή του προβλήματος, αναγράφονται οι ιδιότητες των υλικών, οι παράμετροι λειτουργίας, οι διαστάσεις και η γεωμετρία των τεμαχίων αλλά και η διακριτοποίηση του προβλήματος. Στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των επιλύσεων και γίνεται η συσχέτιση τους με την σχετική ερευνητική βιβλιογραφία. Έπειτα ακολουθούν τα συμπεράσματα και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική μελέτη και βελτιστοποίηση του προβλήματος.

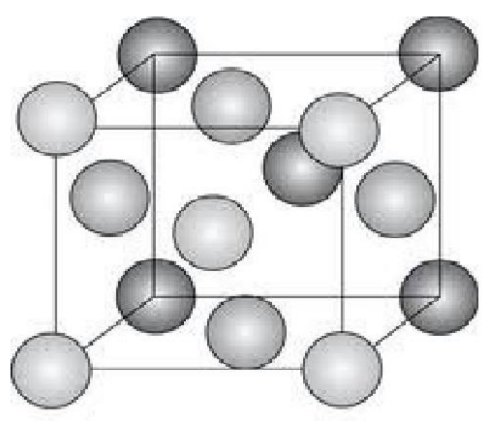
Θεωρητικό μέρος

1.Το Αλουμίνιο

1.1.Γενικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του

Το αλουμίνιο αποτελεί το τρίτο δημοφιλέστερο υλικό στον κόσμο από πλευράς αφθονίας στον φλοιό της γης. Έχει ατομικό αριθμό 13 και έτσι ανήκει στην 3^η ομάδα των στοιχείων του περιοδικού πίνακα. Το αλουμίνιο, ως υλικό, εμφανίζει εξαιρετικές ιδιότητες που το καθιστούν ιδανική επιλογή για συμβατικές αλλά και πιο απαιτητικές εφαρμογές όπως στον κλάδο της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Χρησιμοποιείται ακόμη για τις κατασκευές εργαλείων, κτηρίων αλλά και για συσκευασίες τροφίμων. Αναφορικά με τις ιδιότητες του, με πυκνότητα 2.7 g/cm^3 καθίσταται στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων. Ακόμη εμφανίζει υψηλή ειδική μηχανική αντοχή σε εφελκυσμό (από 70 έως 750 MPa), ανάλογα με το κράμα και την διαδικασία κατασκευής. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το χαμηλό σημείο τήξης (635-690°C), αποτελεί το σημαντικότερο μειονέκτημα του μετάλλου αυτού και τον κύριο περιοριστικό παράγοντα στην ευρεία εφαρμογή του (1).

Το αλουμίνιο κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (FCC) και η ατομική του ακτίνα είναι 2,856 A. Η σταθερά του πλέγματος είναι οι διαγώνιοι του κύβου, δηλαδή οι διευθύνσεις <110>. Στην Εικόνα 1 φαίνεται η δομή του αλουμινίου.



Εικόνα 1: Δομή του αλουμινίου (1).

Οι θερμικές ή και μηχανικές κατεργασίες που μπορεί να υποστεί διαμορφώνουν και τις τελικές του μηχανικές ιδιότητες. Ακόμη, το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από υψηλή διαμορφωσιμότητα, γεγονός που βοηθά αρκετά στην διαδικασία της διέλασης. Μια ακόμα ιδιότητα που καθιστά το αλουμίνιο εξαιρετική επιλογή για πολλές εφαρμογές είναι η αντοχή που εμφανίζει στην διάβρωση. Πιο συγκεκριμένα, από την φύση του σχηματίζει στην επιφάνεια του ένα λεπτό και συνεκτικό στρώμα οξειδίου του αργιλίου, την αλουμίνα (Al_2O_3) που βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα. Η επίστρωση αυτή, του προσδίδει αντοχή στην διάβρωση ακόμα και σε διαβρωτικά περιβάλλοντα (2).

Τα κράματα του αλουμινίου

Τα κράματα του αλουμινίου χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα κράματα διαμόρφωσης και τα κράματα χύτευσης. Επιπλέον, τα κράματα διαμόρφωσης δέχονται επί μέρους κατηγοριοποίηση σε αυτά που είναι δεκτικά σε σκλήρωση με θερμικές κατεργασίες (Σειρές 2XXX,6XXX,7XXX) και σε αυτά που δέχονται σκλήρυνση μέσω ενδοτράχυνσης (Σειρές 1XXX,3XXX,5XXX) (3).

Τόσο το καθαρό αλουμίνιο όσο και τα κράματα του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή αγωγιμότητα τόσο της θερμότητας όσο και του ηλεκτρισμού αλλά και υψηλή αντοχή στην διάβρωση. Τα κύρια κραματικά στοιχεία που προστίθενται στο αλουμίνιο είναι τα εξής (4):

- Χαλκός (Cu): Όταν προστίθεται σε επιθυμητά ποσοστά (που δεν υπερβαίνουν το 12%) μπορεί να βελτιώσει τις αντοχές του κράματος σε μηχανικές καταπονήσεις και την δυνατότητα του να υποστεί κατεργασίες.
- Σίδηρος (Fe): Αυξάνει την σκληρότητα του κράματος αλουμινίου και αν προστεθεί σε επιθυμητά ποσοστά μπορεί να αυξήσει την αντοχή σε καταπονήσεις ενώ ταυτόχρονα αποτρέπει τον σχηματισμό ρηγματώσεων κατά την διαδικασία της χύτευσης.
- Μαγγάνιο (Mn): Βελτιώνει την ολκιμότητα και σε συνδυασμό με τον σίδηρο, την ικανότητα του κράματος να χυτευθεί.
- Μαγνήσιο (Mg): Βελτιώνει την μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6% προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
- Πυρίτιο (Si): Βελτιώνει κατά μεγάλο ποσοστό την χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
- Ψευδάργυρος (Zn): Μειώνει την χυτευσιμότητα, αλλά σε συνδυασμό με άλλες κραματικές προσθήκες βελτιώνει την μηχανική αντοχή.
- Λίθιο (Li): Σε πολύ μικρές ποσότητες έως και 3%, στα κράματα διαμόρφωσης, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες. Αντιθέτως στα χυτά κράματα στα οποία προστίθενται, οι συνέπειες του είναι καταστροφικές για αυτό και συνιστάται η περιεκτικότητα του να μην υπερβαίνει το 0,003%.

1.2.Ονοματολογία Κραμάτων Αλουμινίου

Η ονοματολογία του κάθε κράματος αλουμινίου προσδίδεται αναλόγως από το εάν πρόκειται για κράμα χύτευσης ή διαμόρφωσης και ανάλογα με την θερμική ή μηχανική κατεργασία που μπορεί να έχει υποστεί (4).

1.3.Κράματα διαμόρφωσης

Τα βασικά στοιχεία για την ονοματολογία των κραμάτων διαμόρφωσης είναι τα εξής (4):

- Ο πρώτος αριθμός καθορίζεται με βάση το κύριο κραματικό στοιχείο.
- Ο δεύτερος αριθμός καθορίζεται ανάλογα με τις τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικοτήτων των ακαθαρσιών.
- Τα δύο τελευταία στοιχεία χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.
- Για την σειρά 1XXX, τα δύο τελευταία ψηφία δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά για περιεκτικότητες αλουμίνιου υψηλότερες από 99% κατά βάρος.

Πίνακας 1: Κύρια κραματικά στοιχεία κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών. (4)

Κωδικοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης	Κύριο Κραματικό Στοιχείο
1XXX	Αλουμίνιο με ελάχιστη καθαρότητα 99%
2XXX	Χαλκός
3XXX	Μαγγάνιο
4XXX	Πυρίτιο
5XXX	Μαγνήσιο
6XXX	Μαγνήσιο και Πυρίτιο
7XXX	Ψευδάργυρος
8XXX	Άλλα στοιχεία
9XXX	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

1.4.Κράματα χύτευσης

Τα βασικά στοιχεία για την ονοματολογία των κραμάτων χύτευσης είναι τα εξής:

- Το πρώτο στοιχείο υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης.
- Το δεύτερο και το τρίτο στοιχείο δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας.
- Το τέταρτο στοιχείο, το οποίο χωρίζεται με τελεία από τα τρία πρώτα, αφορά την μορφολογία του προϊόντος χύτευσης. Με -Ο- υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατευθείαν χύτευση, ενώ με -1- υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα.

Πίνακας 2: Κύρια στοιχεία κραμάτωσης κραμάτων χύτευσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών. (4)

Κωδικοποίηση Κραμάτων Χύτευσης	Κύριο Κραματικό Στοιχείο
1XX.X	Αλουμίνιο με ελάχιστη καθαρότητα 99%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Πυρίτιο και Χαλκός ή Μαγγάνιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Ψευδάργυρος
8XX.X	Κασσίτερος
9XX.X	Άλλα στοιχεία

Συχνά παρατηρείται ότι οι παραπάνω κωδικοποιήσεις τόσο των κραμάτων διαμόρφωσης όσο και χύτευσης συνοδεύονται από ένα ακόμη μέρος. Αυτό υποδηλώνει την θερμική η μηχανική κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα. Πιο συγκεκριμένα, η σημασία του κάθε συμβόλου είναι η εξής (4):

- F: Προϊόν που δεν έχει υποστεί κάποια μηχανική ή θερμική κατεργασία.
- O: Προϊόν που έχει υποστεί ανόπτηση.
- H: Προϊόν που έχει υποστεί ενδοτράχυνση (μόνο για κράματα διαμόρφωσης).
- T: Προϊόν που έχει υποστεί κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση.
- W: Προϊόν που έχει υποστεί κατεργασία ομογενοποίησης (αφορά μόνο τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση).

Μετά τα παραπάνω γράμματα ακολουθούν και αριθμοί οι οποίοι επεξηγούν καλύτερα και δίνουν περισσότερες λεπτομέρειες για την ακριβή κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα αλουμινίου (Πίνακας 3) (2).

Πίνακας 3: Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου ανάλογα με την κατεργασία που έχουν υποστεί (4).

ΚΩΔΙΚΟΣ	**ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ**
H1X	Αποκλειστικά ενδοτράχυνση(το X αναφέρεται στον βαθμό ενδοτράχυνσης).
H11	Κράμα ελάχιστης σκληρότητας.
H12	Κράμα που έχει υποστεί σκλήρωση κατά 25%.
H14	Κράμα που έχει υποστεί σκλήρωση κατά 50%.
H16	Κράμα που έχει υποστεί σκλήρωση κατά 75%.
H18	Κράμα που έχει υποστεί σκλήρωση κατά 100%.
H19	Υπέρσκληρο κράμα.

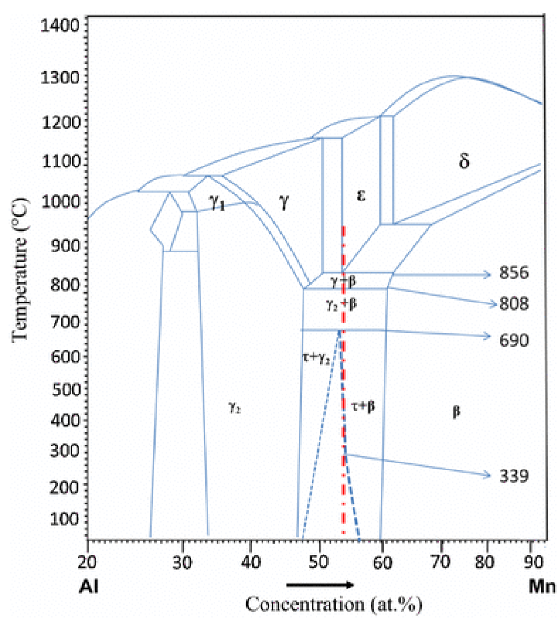
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης: Το Χ κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας τον βαθμό σκλήρωσης μετά την ανόπτηση.
H3X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρωση λόγω γήρανσης. Το Χ κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρωσης πριν από την σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία.
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση.
T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T3	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.
T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.
T5	Βαφή σε θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση σε θερμοκρασία υψηλότερης αυτής του περιβάλλοντος.
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.
T8	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
T9	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.
T10	Βαφή από την θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.

1.5.Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση με θερμική κατεργασία.

Όπως προαναφέρθηκε, τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου χωρίζονται σε 2 επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το αν επιδέχονται σκλήρωση μέσω θερμικής κατεργασίας (4) (5).

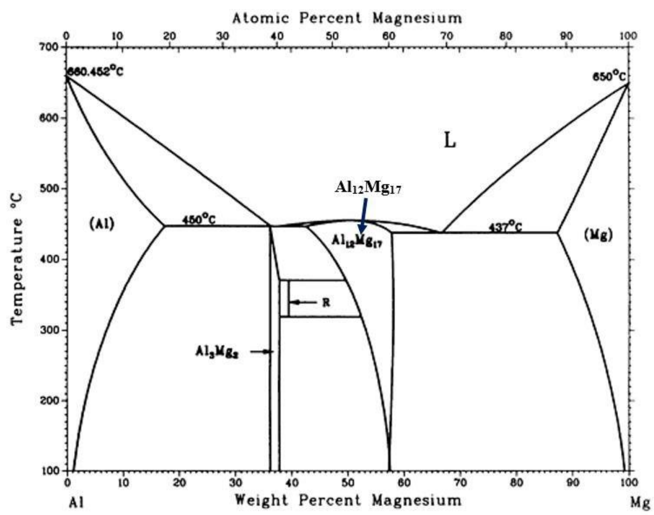
- **Σειρά 1XXX:** Πρόκειται για κράματα αλουμινίου καθαρότητας 99.00% (σε αλουμίνιο) και άνω. Η απόκλιση από την απόλυτη καθαρότητα οφείλεται σε ακαθαρσίες σιδήρου και πυριτίου που μπορεί να περιέχονται στο κράμα. Είναι γεγονός πως τα κράματα αυτής της σειράς εμφανίζουν χαμηλές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων ακόμα και όταν υπόκεινται σε ενδοτράχυνση. Χαρακτηρίζονται ωστόσο από καλή αντοχή σε διάβρωση τόσο σε υγρή όσο και σε θαλάσσια ατμόσφαιρα, από υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα καθώς και καλή συγκολλησιμότητα μέσω των πιο διαδεδομένων μεθόδων συγκόλλησης.

- **Σειρά 3XXX:** Πρόκειται για κράματα αλουμινίου που έχουν ως κύρια κραματική προσθήκη το μαγγάνιο, το οποίο προσδίδει μια ελαφρά αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Ακόμη, έχουν υψηλή επιδεκτικότητα διαμόρφωσης και συγκόλλησης, καθώς και υψηλή ολκιμότητα με παράλληλα αξιοσημείωτη αντίσταση στην διάβρωση σε κάθε περιβάλλον. Συχνά, αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1XXX σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητες βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τα εμπορικά κράματα της σειράς 3XXX, περιέχουν μαγγάνιο σε ποσοστό έως 1,2%. Ωστόσο, το μαγγάνιο χρησιμοποιείται κυρίως ως προσθήκη σε άλλες σειρές κραμάτων αλουμινίου με σκοπό την αύξηση της αντοχής τους.



Εικόνα 2: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος αλουμινίου – μαγγανίου (6).

❖ **Σειρά 5XXX:** Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια κραματική προσθήκη το μαγνήσιο σε ποσοστά που δεν ξεπερνούν το 5%. Τα κράματα της σειράς 5XXX παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή που μπορεί όμως να βελτιωθεί με ενδοτράχυνση. Όταν βρίσκονται σε κατάσταση ανόπτησης, μπορούν να διαμορφωθούν τόσο εν ψυχρό όσο και εν θερμώ. Η συγκόλληση τους κρίνεται ιδιαίτερα εύκολη και εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον. Μετά από διεργασίες λείανσης και ανοδίωσης, η επιφάνεια τους είναι σε αρκετά καλή κατάσταση. Ωστόσο πρωτού πραγματοποιηθούν τέτοιες διεργασίες θα πρέπει να επιβεβαιώνεται ότι τα ποσοστά σιδήρου και πυριτίου βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα. Η ιδιότητα τους να αντιστέκονται στην διάβρωση σε υγρά περιβάλλοντα τα καθιστά καλή επιλογή σε ναυπηγικές εφαρμογές, μόνο όμως όταν το ποσοστό μαγνησίου βρίσκεται κάτω του 3%.



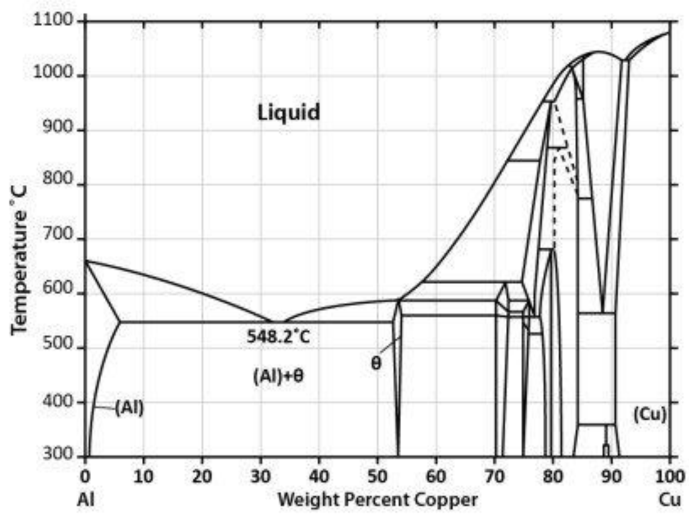
Εικόνα 3: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος αλουμινίου μαγνησίου (7).

1.6.Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου που υφίστανται σκλήρυνση με θερμική κατεργασία.

❖ **Σειρά 2XXX:** Πρόκειται για κράματα αλουμινίου χαλκού (σε ποσοστό 2.6-6.3%) και για κράματα αλουμινίου-χαλκού-μαγνησίου όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 1.5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων $CuAl_2$ και $CuMgAl_2$ που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, η προσθήκη πυριτίου και μαγγανίου σε ποσοστά μικρότερα από 0,8% ευνοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση των ιδιοτήτων της μεταλλικής μήτρας.

Η παρουσία σιδήρου συχνά αποδεικνύεται βλαβερή εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης $CuFeAl_7$, η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα ένα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας έτσι την δυνατότητας σκλήρωσης της δομής. Ωστόσο, εάν ταυτόχρονα προστεθεί και νικέλιο, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi, η οποία προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή μέχρι τους 230°C.

Αναφορικά με τις ιδιότητες των κραμάτων της σειράς 2XXX πρέπει να αναφερθεί ότι μετά από βαφή και γήρανση, έχουν λιγότερη αντοχή στη διάβρωση (συγκριτικά με το καθαρό αλουμίνιο και τα κράματα που υπόκεινται σε σκλήρωση δομής με θερμική κατεργασία) και δεν συγκολλώνται εύκολα. Τέλος, στην σειρά 2XXX, συμπεριλαμβάνονται και τα κράματα που περιέχουν λίθιο σε ποσοστό από 1% έως 3%. Αυτά τα κράματα λόγω της μικρής πυκνότητας και της υψηλής μηχανικής αντοχής βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυπηγική και στην αεροδιαστημική.

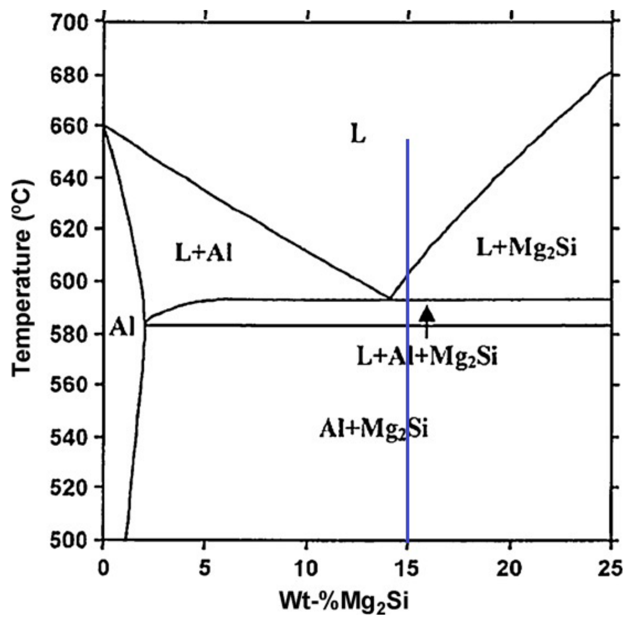


Εικόνα 4: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος αλουμινίου - χαλκού.

- **Σειρά 6XXX:** Πρόκειται για κράματα με κύρια κραματικά στοιχεία το μαγνήσιο και το πυρίτιο. Η αύξηση της σκληρότητας αυτών των κραμάτων επιτυγχάνεται μέσω κατεργασιών σκλήρωσης με κατακρήμνιση και γήρανση. Η περίσσεια πυριτίου βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες, εις βάρος όμως της αντοχής του κράματος σε διάβρωση.

Επιπρόσθετα, ορισμένα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν μαγγάνιο σε ποσοστό μικρότερο του 0.8% και χρώμιο σε ποσοστό κάτω από 0.3%. Η προσθήκη αυτών των κραματικών στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα την εκλέπτυνση των κόκκων, βελτιώνοντας έτσι την μηχανική αντοχή και αυξάνοντας την δυσθραυστότητα. Συχνά παρατηρείται και προσθήκη χαλκού σε ποσοστό έως 0.5%, καθώς ενώ αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων, μπορεί να προκαλέσει ταυτόχρονη μείωση της αντοχής σε διάβρωση.

Τα κράματα της σειράς 6XXX μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα. Παρουσιάζουν επίσης ιδιαίτερα καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως τους 150°C). Τέλος, έχουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.



Εικόνα 5: Διάγραμμα φάσεων Al-Mg_2Si.

- **Σειρά 7XXX:** Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου και για κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου-χαλκού. Τα κράματα αυτά μετά από συγκεκριμένες θερμικές κατεργασίες παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Ο ψευδάργυρος βρίσκεται σε ποσοστό 4%-8% και το μαγνήσιο σε ποσοστό 1%-3%. Η σκλήρυνση της δομής του οφείλεται στην κατακρήμνιση της ένωσης $MgZn_2$. Επίσης, η προσθήκη χαλκού σε ποσοστό μικρότερο του 2% συμβάλλει στην σκλήρυνση της δομής λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρημνισμάτων. Αυτά όμως μπορεί να αποβούν καταστροφικά για το κράμα καθώς μειώνουν την εμβαπτότητα, την δυσθραυστότητα και την επιδεκτικότητα συγκόλλησης του. Αντίθετα, η προσθήκη ψευδαργύρου ενισχύει την επιδεκτικότητα συγκόλλησης των κραμάτων αυτών, ενώ η παρουσία χρωμίου σε ποσοστό μικρότερο του 0,3% βελτιώνει την αντοχή τους σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.

Τα κράματα της σειράς 7XXX υποβάλλονται εύκολα σε θερμικές κατεργασίες, λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής ομογενοποίησης τους, της καλής τους εμβαπτότητας και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών γήρανσης. Λόγω του συνόλου των ιδιοτήτων αυτών, τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτής της σειράς δεν αλλοιώνονται κατά την συγκόλληση τους, η οποία παρόλα αυτά παραμένει σε μέτριο επίπεδο.

Κυριότερο μειονέκτημα τους αποτελεί η μειωμένη αντοχή που εμφανίζουν σε κατεργασίες εν θερμώ. Έτσι η θερμοκρασία χρήσης τους είναι κάτω από τους 120^{o}C. Ωστόσο βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στον τομέα της αερομηχανικής και συγκεκριμένα σε εξαρτήματα δομικών στοιχείων των αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση.

1.7. Κράμα Al5083-H111

Το κράμα αλουμινίου 5083-H111 είναι γνωστό για τις εξαιρετικές επιδόσεις που εμφανίζει σε ακραία περιβάλλοντα. Είναι ανθεκτικό όταν έρχεται σε επαφή με θαλασσινό νερό και βιομηχανικά χημικά περιβάλλοντα. Μία ακόμη ιδιότητα που το χαρακτηρίζει είναι η εξαιρετική αντοχή που εμφανίζει μετά την συγκόλληση. Έχει την υψηλότερη αντοχή από τα μη θερμικά επεξεργάσιμα κράματα αλλά δεν συνιστάται για χρήση σε θερμοκρασίες άνω των 65^{o}C. Βρίσκει εφαρμογή στην ναυπηγική βιομηχανία, στην κατασκευή σασί αυτοκινήτων και στους σιδηροδρόμους. Οι ιδιότητες του θα αναφερθούν παρακάτω (Ιδιότητες των υλικών) (8).

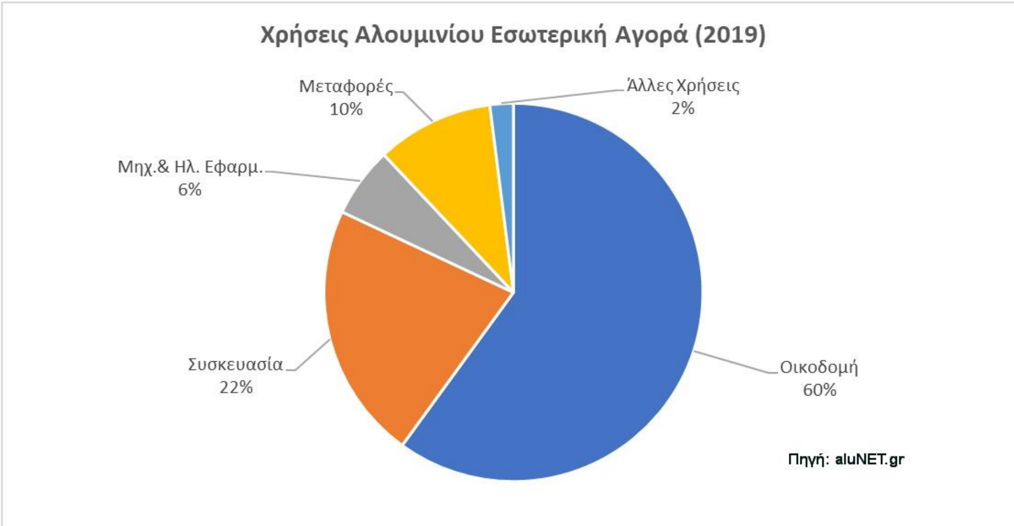
1.8. Κράμα Al6082-T4

Το κράμα αλουμινίου 6082-T4 είναι ένα κράμα μέσης αντοχής που εμφανίζει εξαιρετική αντίσταση στην διάβρωση. Έχει την υψηλότερη αντοχή από τα κράματα της σειράς 6000. Το κράμα 6082-T4 είναι γνωστό ως δομικό κράμα, όπου η κυριότερη χρήση του είναι οι κατεργασίες. Ως σχετικά νέο κράμα και λόγω της υψηλής αντοχής που εμφανίζει έχει αντικαταστήσει το κράμα αλουμινίου 6061 σε πολλές εφαρμογές. Η υψηλή αντοχή του οφείλεται στην υψηλή του περιεκτικότητα σε μαγγάνιο η οποία ελέγχει την δομή των κόκκων. Βρίσκει εφαρμογή σε γέφυρες, γερανούς, οχήματα μεταφοράς, βαρέλια μπύρας και γερανούς. Οι ιδιότητες του θα αναφερθούν παρακάτω (Ιδιότητες των υλικών) (9).

1.9. Χρήσεις αλουμινίου

Οι βασικές αγορές του αλουμινίου στην Ελλάδα είναι η οικοδομή και η συσκευασία. Η αγορά της οικοδομής είναι η σημαντικότερη για τον κλάδο της πρώτης μεταποίησης αλουμινίου και απορροφά το 60% περίπου των συνολικών εγχώριων πωλήσεων ημιτελών προϊόντων. Ακόμη, το αλουμίνιο χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές πορτών και παραθύρων, όπου ξεπερνάει το 75% της αγοράς και υπερτερούν με διαφορά από τα υπόλοιπα υλικά. Έπειτα ακολουθεί ο οικιακός εξοπλισμός, οι μηχανολογικές αλλά και οι ηλεκτρολογικές εφαρμογές που παρουσιάζονται με μικρό μερίδιο στην αγορά λόγω της μικρής απαίτησης αλουμινίου για την κατασκευή τους. Τέλος, οι μεταφορές αποτελούν την μικρότερη επί τοις εκατό ποσόστωση των συνολικών χρήσεων κυρίως λόγω της έλλειψης ελληνικών βιομηχανιών για την παραγωγή τους.

Ωστόσο, οι Ελληνικές βιομηχανίες παράγουν προϊόντα αλουμινίου ειδικών απαιτήσεων για την αυτοκινητοβιομηχανία που εξάγονται σε χώρες του εξωτερικού. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται οι πωλήσεις του κλάδου της πρώτης μεταποίησης ανά τελική εγχώρια χρήση στην Ελληνική αγορά το 2019, σύμφωνα με στοιχεία της Ελληνικής Ένωσης Αλουμινίου (10).



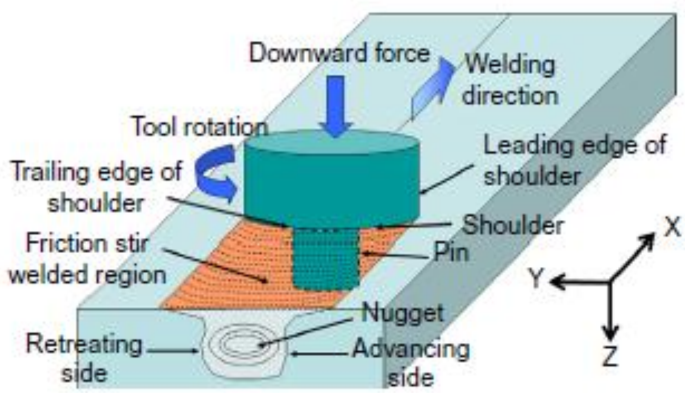
Εικόνα 6: Χρήσεις αλουμινίου στην Ελληνική αγορά (10).

2. Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

2.1. Περιγραφή της διαδικασίας

Ανάμεσα σε όλες τις υπόλοιπες τεχνικές, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί μια σχετικά καινούργια τεχνική η οποία εφευρέθηκε το 1991 από το Διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute) στο Ηνωμένο Βασίλειο (11). Αρχικά η μέθοδος αυτή χρησιμοποιούνταν κυρίως για συγκολλήσεις μη σιδηρούχων μετάλλων και αργότερα βρήκε πιο ευρεία εφαρμογή και για την συγκόλληση ανόμοιων και σύνθετων υλικών. Στην σημερινή εποχή χρησιμοποιείται κυρίως για την συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου υψηλής αντοχής.

Αποτελεί μια σχετικά απλή διαδικασία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7. Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι καθώς πρόκειται για μια αυτοματοποιημένη μέθοδο, το κόστος αγοράς του εξοπλισμού είναι σημαντικά μεγαλύτερο σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης με τόξο (12).



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση. (11)

Για την επιτυχή πραγματοποίηση της συγκόλλησης θα πρέπει τα τεμάχια να είναι καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας πακτωμένα σε σταθερή θέση καθώς διαφορετικά θα απωθούνταν. Βασικό ρόλο στην FSW διαδραματίζει το μη καταναλισκόμενο εργαλείο συγκόλλησης. Αυτό αποτελείται από ένα περιαυχένιο (shoulder) και καταλήγει σε ένα κατάλληλα διαμορφωμένο πείρο (pin).

Κατά την έναρξη της συγκόλλησης το εργαλείο αρχίζει να περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και εισέρχεται υπό την παρουσία μιας κάθετης αξονικής δύναμης μέσα στο υλικό που πρόκειται να συγκολληθεί. Όταν το περιαυχένιο έρθει σε επαφή με το προς συγκόλληση υλικό, παράγεται σημαντική ποσότητα θερμότητας στην διεπιφάνεια περιαυχενίου-υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση την ταπείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, μέρος του οποίου υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται δεν ξεπερνά ποτέ την θερμοκρασία τήξης του υλικού αλλά παραμένει στο 90-95% αυτής (13).

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με την κάθετη αξονική δύναμη που ασκείται από το εργαλείο έχουν ως αποτέλεσμα την ανάδευση του υλικού. Το υλικό έπειτα κινείται με σταθερή ταχύτητα στην προκαθορισμένη πορεία κατά μήκος της τομής των δύο δοκιμίων, επιτυγχάνοντας έτσι την συγκόλληση τους.

Σε κάθε περίπτωση συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση παρατηρούνται δύο διαφορετικές πλευρές οι οποίες καθορίζονται από την κατεύθυνση της συγκόλλησης.

- **Προωθούμενη πλευρά (Advancing side - AS):** Σε αυτήν την πλευρά η ταχύτητα περιστροφής έχει την ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης.
- **Υποχωρούσα πλευρά (Retreating side - RS):** Σε αυτήν την πλευρά η ταχύτητα περιστροφής έχει αντίθετη κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης.

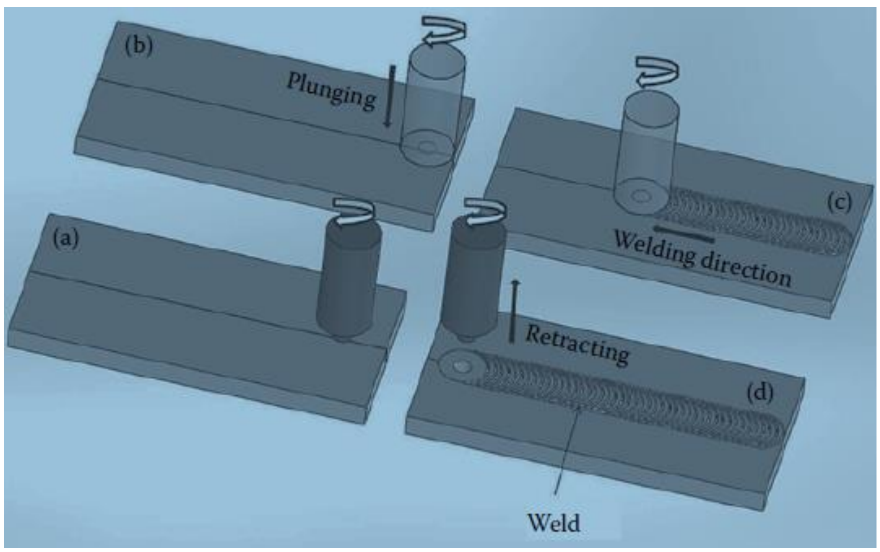
2.1.1. Τα στάδια της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με ανάδευση

Όπως είναι αντιληπτό και από τα παραπάνω η όλη διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση αποτελείται από 4 στάδια (Εικόνα 2) (14):

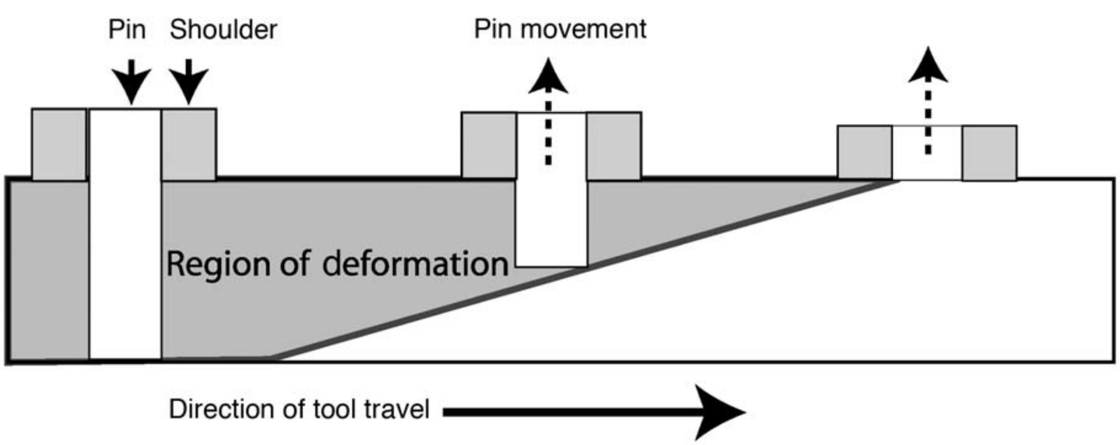
- **Στάδιο βύθισης (Plunging Phase):** Για την έναρξη της διαδικασίας της συγκόλλησης, τα δοκίμια θα πρέπει να έχουν τοποθετηθεί πάνω σε μια σταθερή επιφάνεια. Το εργαλείο αρχικά ευθυγραμμίζεται με την γραμμή της συγκόλλησης που πρόκειται να ακολουθήσει και τότε βυθίζεται με σχετικά αργή αλλά σταθερή ταχύτητα. Αυτή η κίνηση ενισχύεται από μια κάθετη αξονική δύναμη η οποία σταματά όταν το περιαυχένιο αγγίξει την επιφάνεια των δοκιμίων. Σε αυτό το στάδιο ξεκινάει η διαδικασία της παραμόρφωσης.
- **Στάδιο σταθεροποίησης (Dwelling Phase):** Σε αυτό το στάδιο, και αφότου έχει γίνει η εισχώρηση του περιαυχενίου στα προς συγκόλληση τεμάχια, το εργαλείο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα για μερικά δευτερόλεπτα (ο χρόνος εξαρτάται από το υλικό και το πάχος του). Λόγω αυτής της κίνησης παράγεται θερμότητα, η επίδραση της οποίας έχει ως αποτέλεσμα την πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Το πλαστικοποιημένο υλικό που βρίσκεται πάντα πιο μπροστά από το εργαλείο εξασφαλίζει την ομαλή μετατόπιση του εργαλείου για την επιτυχή πορεία της συγκόλλησης.
- **Στάδιο συγκόλλησης (Welding Phase):** Το εργαλείο κινείται με σταθερή οριζόντια και γωνιακή ταχύτητα κατά μήκος της επιθυμητής γραμμής συγκόλλησης. Η παραγωγή θερμότητας είναι συνεχής λόγω της τριβής εργαλείου-δοκιμίων και της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Ένα ακόμη φαινόμενο που παρατηρείται λόγω της θερμότητας, είναι η ροή του υλικού (material flow) γύρω από το περιαυχένιο. Πιο συγκεκριμένα, το περιαυχένιο με κάθε περιστροφή μετακινεί το πλαστικοποιημένο

υλικό από το advancing side στο retreating side και αναμιγνύει το ρέον υλικό πίσω από τον πείρο για να ολοκληρώσει την συγκόλληση.

- **Στάδιο απόσυρσης του εργαλείου (Retracting Phase):** Όταν πια το εργαλείο φτάσει στο άκρο της γραμμής συγκόλλησης, αποσύρεται με μια ανοδική κίνηση αφήνοντας πίσω μια οπή εξόδου (keyhole), όπως φαίνεται στην Εικόνα 8(d). Για να εξαλειφθεί αυτή η ατέλεια διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί με την πιο αποτελεσματική να είναι η χρήση ενός αναιρούμενου πείρου (retractable tool pin),ο οποίος επιτρέπει την προσαρμογή του μήκους του κατά την πορεία της συγκόλλησης (15).



Εικόνα 8: Τα τέσσερα στάδια της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με ανάδευση. (a)Στάδιο βύθισης, (b)Στάδιο σταθεροποίησης, (c)Στάδιο συγκόλλησης, (d)Στάδιο ψύξης (11).

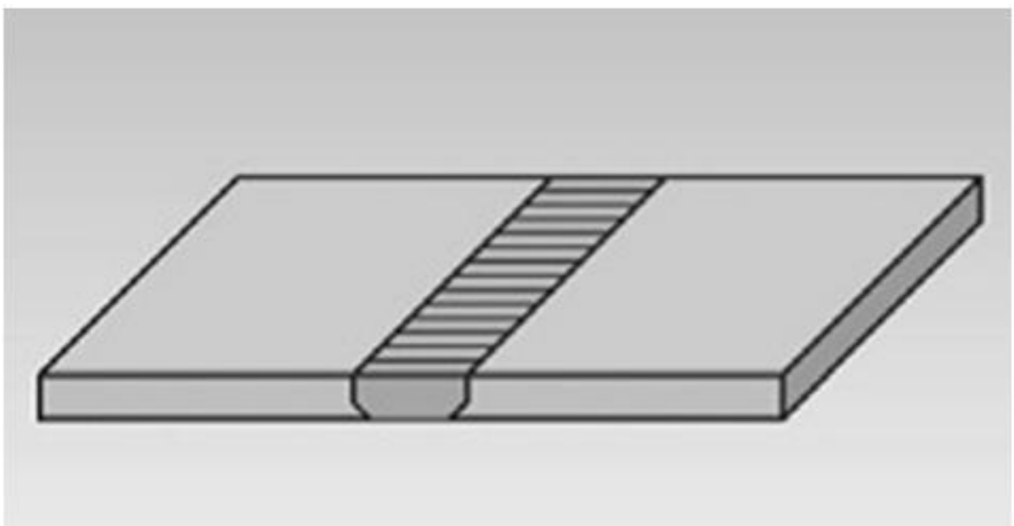


Εικόνα 9: Παράδειγμα ενός αναιρούμενου πείρου ο οποίος εξέρχεται πλήρως από τα δοκίμια πριν το πέρας της συγκόλλησης, εξαλείφοντας έτσι το φαινόμενο της οπής εξόδου (keyhole defect) (15).

2.1.2. Βασικότερες διατάξεις των προς συγκόλληση τεμαχίων

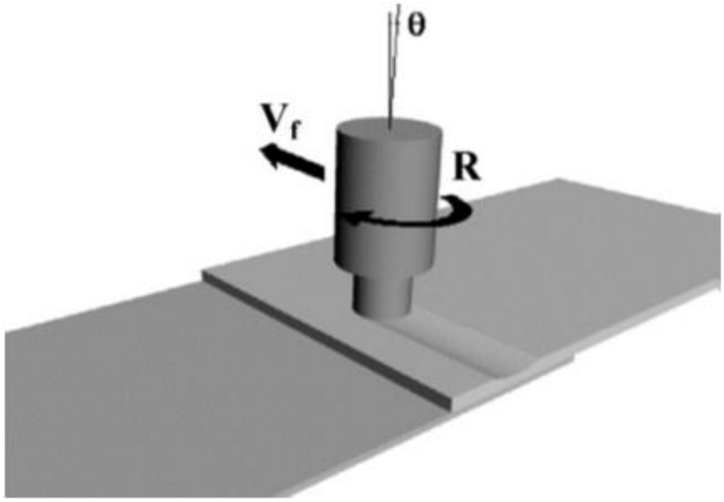
Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές διαδικασίες συγκόλλησης τριβής που είναι περιορισμένες σε μικρά συμμετρικά ως προς έναν άξονα δοκίμια, η συγκόλληση τριβής με ανάδευση μπορεί να εφαρμοστεί στα περισσότερα γεωμετρικά σχήματα και διατάξεις όπως butt joints, T-butt joints, fillet joints, lap joints, edge butt joints κ.ά. (Εικόνα 3) (16).

- **Butt Joint:** Αποτελεί την πιο συνηθισμένη διάταξη συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση λόγω της κατανομής των τάσεων που ασκούνται αλλά και της ευκολίας της κατασκευής του. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, δύο δοκίμια υπό την μορφή πλακών ή φύλλων που πρόκειται να συγκολληθούν, τοποθετούνται πακτωμένα σε μια πλάκα στήριξης και στερεώνονται σταθερά σε ένα ειδικά σχεδιασμένο εξάρτημα το οποίο εξασφαλίζει ανά πάσα στιγμή ότι οι πλάκες δεν θα αποσυνδεθούν. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι οι πλάκες μπορούν εύκολα να συγκολληθούν χωρίς μεγάλη ανησυχία για την εμφάνιση ελαττωμάτων στην κατάσταση των πλακών.



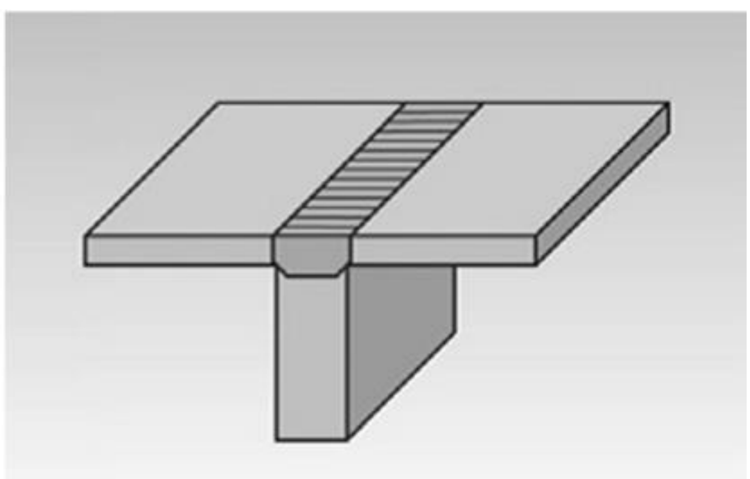
Εικόνα 10: Διάταξη Butt Joint κατά την συγκόλληση τριβής με ανάδευση (16).

- **Lap Joint:** Σε μια διάταξη Lap Joint, κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, οι δυο πλάκες ή τα φύλλα που πρόκειται να συγκολληθούν, τοποθετούνται σταθερά στερεωμένα σε μια πλάκα στήριξης. Έπειτα όπως και σε κάθε διαδικασία τέτοιας συγκόλλησης, ένα ειδικά σχεδιασμένο περιστρεφόμενο εργαλείο βυθίζεται υπό γωνία κατακόρυφα και με δεδομένη οριζόντια και περιστροφική ταχύτητα κινείται πάνω στην γραμμή της συγκόλλησης.

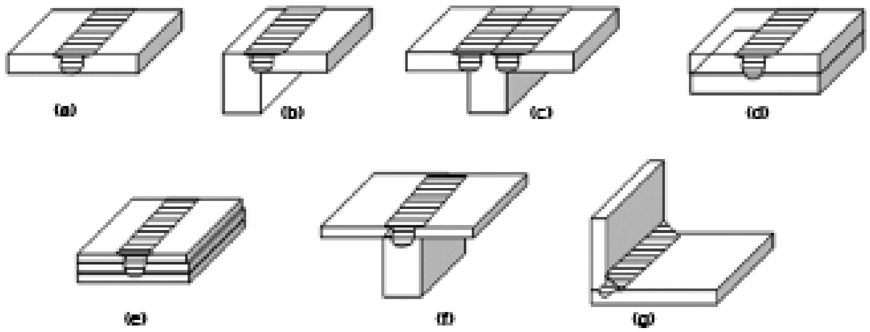


Εικόνα 11: Διάταξη Lap Joint κατά την συγκόλληση τριβής με ανάδευση (16).

- **T-Joint:** Καθώς οι περισσότερες έρευνες αναφορικά με τις διατάξεις των δοκιμίων κατά της συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχουν πραγματοποιηθεί για τις δυο προαναφερθείσες διατάξεις, επικρατεί μια σχετική έλλειψη πληροφοριών για την διάταξη T-Joint και συγκεκριμένα για τις παραμέτρους υπό τις οποίες πρέπει να εκτελείται η διαδικασία. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας της εν λόγω διάταξης και των ειδικών συνθηκών που αυτή απαιτεί. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές που απαιτούν την συγκόλληση σε διαμόρφωση T-Joint όπως για παράδειγμα υποστήριξη κουφωμάτων, κατασκευές γεφυρών, κτιρίων κ.λπ. Σε σχετική έρευνα όπου μελετήθηκε η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση δοκιμίων κράματος αλουμινίου AA6013-T4 σε διάταξη T-Joint βρέθηκε ότι υπάρχει μεγάλη ευαισθησία στις παραμέτρους της συγκόλλησης και συγκεκριμένα στην γεωμετρία του εργαλείου ειδικά όταν πρόκειται για στρογγυλεμένη ακτίνα φιλέτου (rounded fillet radius) (17).



Εικόνα 12: Διάταξη T-Joint κατά την συγκόλληση τριβής με ανάδευση (18).



Εικόνα 13: Διατάξεις συγκόλλησης για συγκόλληση τριβής με ανάδευση. (a)Square butt, (b) Edge Butt, (c)T-butt joint, (d)Lap Joint, (e)Multiple lap joint, (f)T-lap joint, (g) Fillet Joint (15).

2.2. Παράμετροι της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

2.2.1. Ιδιότητες του εργαλείου

Η επιλογή των κατάλληλων ιδιοτήτων του εργαλείου συγκόλλησης επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της συγκόλλησης και καθορίζεται από το υλικό του προς συγκόλληση δοκιμίου, την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του αλλά και την εμπειρία του εκάστοτε τεχνικού που επιμελείται της διαδικασίας. Εκτός από τις φυσικές ιδιότητες ενός υλικού, επιπλέον παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κάθε φορά που να υπαγορεύουν την επιλογή του υλικού του εργαλείου είναι οι εξής (15):

- **Αντοχές του εργαλείου τόσο σε θερμοκρασίες τόσο υψηλές όσο και περιβάλλοντος**: Το εκάστοτε υλικό πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει τα φορτία συμπίεσης και να εμφανίζει ιδιαίτερη αντοχή σε θλιπτικές και διατμητικές δυνάμεις τόσο σε χαμηλά όσο και σε ψηλά θερμοκρασιακά εύρη έτσι ώστε να αποφευχθεί η παραμόρφωση του υλικού.
- **Σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες**: Το εργαλείο οφείλει να παρέχει σταθερότητα καθ' όλη την διάρκεια της συγκόλλησης και ειδικότερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Εάν χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτές που έχει σχεδιαστεί, θα παρουσιάσει μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Ακόμη, κατά την ανάδευση, οι αλλαγές στην μικροδομή μπορούν να ενισχύσουν αυτό το φαινόμενο που μπορεί κατ' επέκταση είτε να αλλοιώσει το σχήμα του εργαλείου ή ακόμα και να δημιουργήσει ρηγματώσεις σε αυτό.
- **Αντοχή στην φθορά λόγω χρήσης:** Οι κύκλοι συγκόλλησης που ένα εργαλείο εκτελεί παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχήμα του και κατ' επέκταση στις μηχανικές του ιδιότητες επηρεάζοντας έτσι την ποιότητα της συγκόλλησης. Ο ακριβής μηχανισμός της φθοράς εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των δοκιμίων και του εργαλείου αλλά και των παραμέτρων στις οποίες το εργαλείο ρυθμίζεται.

- **Αντιδραστικότητα του υλικού του εργαλείου:** Το υλικό του εργαλείου θα πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπ’ όψιν ότι δεν θα πρέπει να αντιδρά χημικά με τα προς συγκόλληση τεμάχια αλλά και με το περιβάλλον καθώς κάτι τέτοιο μπορεί να επηρεάσει τις επιφανειακές ιδιότητες του εργαλείου. Σε μερικές περιπτώσεις μάλιστα, η χρήση προστατευτικού αερίου κρίνεται αναγκαία για να αποφευχθεί η οξείδωση των τεμαχίων.
- **Συντελεστής θερμικής διαστολής (Για διμεταλλικά εργαλεία):** Μεγάλες διαφορές ανάμεσα στους συντελεστές θερμικής διαστολής ανάμεσα στο περιαυχένιο και τον πείρο ενός εργαλείου μπορούν να οδηγήσουν είτε στην διαστολή του περιαυχενίου σε σχέση με τον πείρο είτε στο ακριβώς αντίθετο φαινόμενο.
- **Κατεργασιμότητα:** Πολλά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση πρέπει να μπορούν να υποστούν μηχανικές και ηλεκτρομηχανικές κατεργασίες αλλά και να γειώνονται. Υλικά τα οποία δεν πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπ’ όψιν για την εκπόνηση τέτοιων διαδικασιών.
- **Ομοιομορφία στην μικροδομή και την πυκνότητα:** Σε υλικά που δεν εμφανίζουν ομοιομορφία στην μικροδομή και την πυκνότητα δεν κρίνεται κατάλληλη η εφαρμογή της μεθόδου καθώς παράγεται μια ασθενής περιοχή εντός του εργαλείου όπου αποτελούν σημεία εκκίνησης ρηγματώσεων. Για παράδειγμα, τα προϊόντα κονιομεταλλουργίας κατασκευάζονται με διαφορετικές πυκνότητες.
- **Διαθεσιμότητα των υλικών:** Ένα υλικό δεν κρίνεται χρηστικό όταν δεν υπάρχει σε στοιχειώδη και σταθερή διαθεσιμότητα στην παγκόσμια αγορά.

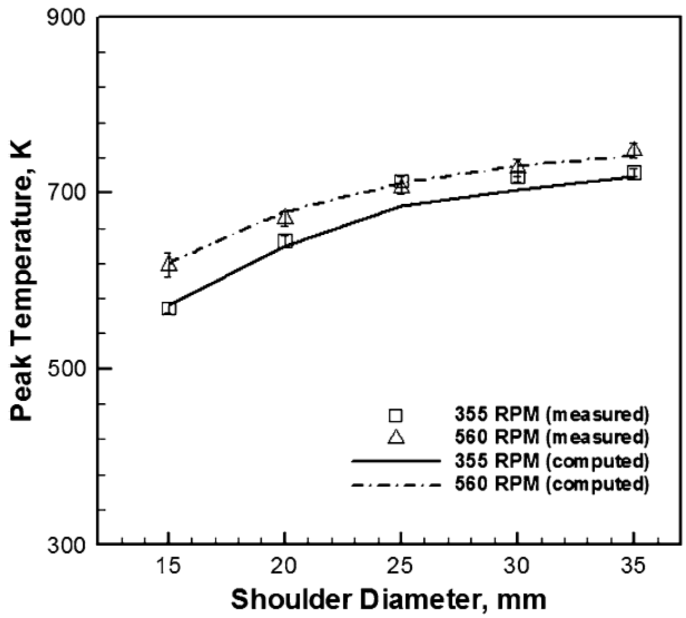
2.2.2. Γεωμετρία του εργαλείου

Η γεωμετρία του εργαλείου αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για την επίτευξη μιας συγκόλλησης άριστης ποιότητας καθώς επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου καθώς και την ροή του υλικού. Οι κύριες λειτουργίες του εργαλείου είναι η τοπική πρόσδοση θερμότητας και η ταυτόχρονη, μηχανική, ανάδευση του υλικού. Το εργαλείο όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από ένα περιαυχένιο και ένα πείρο.

Η σημαντικότητα αυτού του παράγοντα έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα και επομένως διεξάγονται όλο και περισσότερες μελέτες που αποσκοπούν στην βελτίωση τόσο του υλικού όσο και του σχεδιασμού του περιαυχενίου και του πείρου. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες γεωμετρίες που επικεντρώνονται στον τρόπο με τον οποίο ο πείρος εισχωρεί στις πλάκες, στον τρόπο με τον οποίο το περιαυχένιο προωθείται επί των πλακών και τέλος στον τρόπο με τον οποίο τα υλικά αναμιγνύονται. Καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της τεχνογνωσίας και συγκεκριμένα στην ανάπτυξη τόσο του πείρου όσο και του περιαυχενίου έχει το Ινστιτούτο TWI (15).

2.2.2.1.Γεωμετρία του περιαυχενίου

Ο κύριος ρόλος των περιαυχενίων είναι να παράγουν θερμότητα μέσω τριβής και πλαστικής παραμόρφωση στην επιφάνεια των δοκιμίων. Έτσι, μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την σχεδίαση του είναι η διάμετρος του καθώς καθορίζει αρκετά το ποσοστό της θερμότητας που παράγεται (19).



Εικόνα 14: Η επίδραση της διαμέτρου του περιαυχενίου στην μέγιστη θερμοκρασία κατά την συγκόλληση. (20)

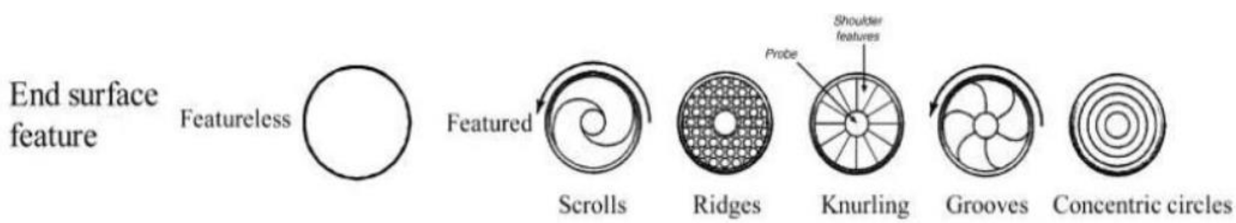
Οι κύριες κατηγορίες περιαυχενίων είναι οι εξής (15):

- **Κυρτό περιαυχένιο (Concave shoulder):** Αποτελεί το πρώτο σχεδιαστικά περιαυχένιο το οποίο είναι και πλέον το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο καθώς μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί και επίσης παράγει συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας. Η κλίση μεταξύ πείρου και περιαυχενίου είναι μεταξύ 6 και 10 μοιρών. Κατά την διάρκεια της διείσδυσης το υλικό που εκτοπίζεται από τον πείρο τροφοδοτείται εντός της μάζας του περιαυχενίου. Κατά την εμπρόσθια κίνηση του εργαλείου, το υλικό που βρίσκεται εντός της κοιλότητας προωθεί το υπολειπόμενο υλικό εντός της κεφαλής. Τέλος, για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα συγκόλλησης θα πρέπει το εργαλείο να τοποθετηθεί υπό κλίση 0 έως 4 μοιρών αναφορικά με την διεύθυνση μετακίνησης του. Αυτό κρίνεται απαραίτητο ώστε να επιτρέπεται στο πίσω μέρος του περιαυχενίου να παράγει μια συμπιεστική δύναμη σφυρηλάτησης στην συγκόλληση.
- **Κοίλο περιαυχένιο (Convex shoulder):** Αυτός ο τύπος περιαυχενίου χρησιμοποιήθηκε ανεπιτυχώς για πρώτη φορά από το ινστιτούτο TWI, καθώς η γεωμετρία αυτή απομάκρυνε το υλικό στην ζώνη της συγκόλλησης από το εργαλείο αντί να το προωθεί σε αυτό. Ωστόσο οι έρευνες δεν σταμάτησαν εκεί, και μετέπειτα χρησιμοποιήθηκαν

ειδικοί προωθητές (scrolls), οι οποίοι μετακινούν υλικό από το εξωτερικό του περιαυχενίου προς τον πείρο, για να ξεπεράσουν το εν λόγω πρόβλημα. Έτσι λοιπόν, προκύπτει μεγάλη ευελιξία τόσο στην επαφή που θα πρέπει να έχει το περιαυχένιο με το προς συγκόλληση τεμάχιο όσο και στις περιπτώσεις συγκόλλησης δοκιμίων διαφορετικού πάχους.

- **Επίπεδο περιαυχένιο (flat shoulder):** Αποτελεί τον πιο απλό σχεδιασμό περιαυχενίου, ο οποίος όμως δεν χρησιμοποιείται καθώς παρουσιάζει ένα πολύ βασικό μειονέκτημα. Συγκεκριμένα, η επίπεδή επιφάνεια του το καθιστά αναποτελεσματικό ως προς την προώθηση του υλικού προς τον πείρο και κατ' επέκταση την υπερβολική ροή του υλικού σε κατεύθυνση αντίθετη της ζώνης συγκόλλησης.

  Γενικά, όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του κοίλου περιαυχενίου, διάφορα επιπλέον εργαλεία μπορούν να προστεθούν στις παραπάνω γεωμετρίες του περιαυχενίου προκειμένου να αυξήσουν το ποσοστό της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, που οδηγεί σε αυξημένη ανάδευση του και επομένως σε καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15, τα πιο συνηθισμένα εργαλεία είναι οι προωθητές (scrolls), τα σπειρώματα (ridges), οι αυλακώσεις (grooves, knurling) και οι ομόκεντροι κύκλοι (21).



Εικόνα 15: Τύποι Περιαυχενίων (21).

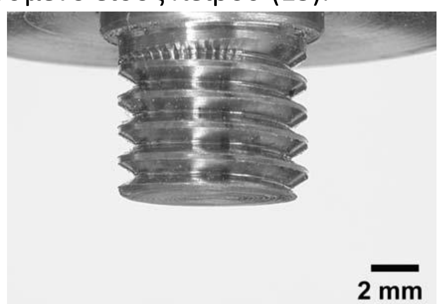
2.2.2.2.Γεωμετρία του πείρου

Ο κύριος ρόλος των πείρων είναι να παράγουν θερμότητα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης και τριβής στις προς συγκόλληση επιφάνειες. Ο πείρος είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να αποφεύγεται η φθορά των δοκιμίων και να προωθεί το υλικό στο πίσω μέρος του εργαλείου διαβεβαιώνοντας όμως ότι αυτό δεν θα ξεφύγει από την ζώνη της συγκόλλησης (22). Ακόμη, επηρεάζει το πάχος της παραμόρφωσης και την ταχύτητα συγκόλλησης του εργαλείου. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι πείρων είναι οι εξής:

- **Κυλινδρικός πείρος με στρογγυλή άκρη (Round bottom cylindrical pin):** Η στρογγυλή άκρη στον πείρο μειώνει την φθορά του κατά την διάρκεια της φάσης της βύθισης και ταυτόχρονα βελτιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης στα σημεία επαφής με αυτόν. Η πιο αποτελεσματική διάμετρος στην άκρη του πείρου έχει υπολογιστεί ότι είναι το 75% της διαμέτρου στο άνω άκρο του (19).

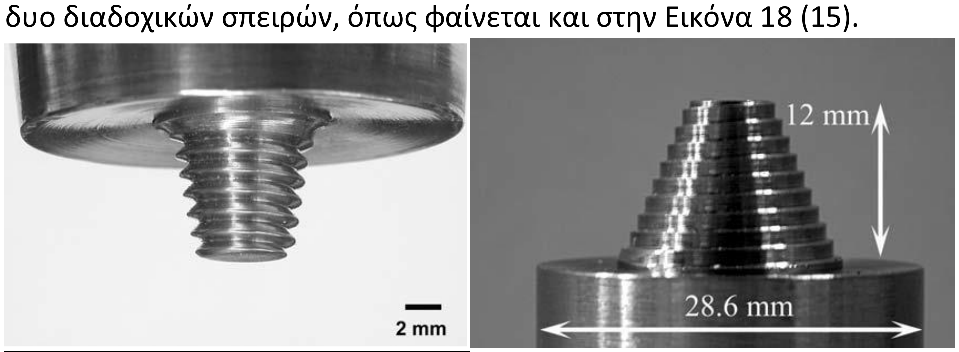
Εικόνα 16: Κυλινδρικός πείρος με στρογγυλή άκρη. (15)

- **Κυλινδρικός πείρος με επίπεδη άκρη (Flat bottom cylindrical pin):** Η επίπεδη άκρη του προσφέρει μεγαλύτερη επιφανειακή ταχύτητα και έτσι έχει την μεγαλύτερη επίδραση στην μεταφορά του υλικού. Έτσι, λόγω και της απλότητας της κατασκευής του αποτελεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος πείρου (15).



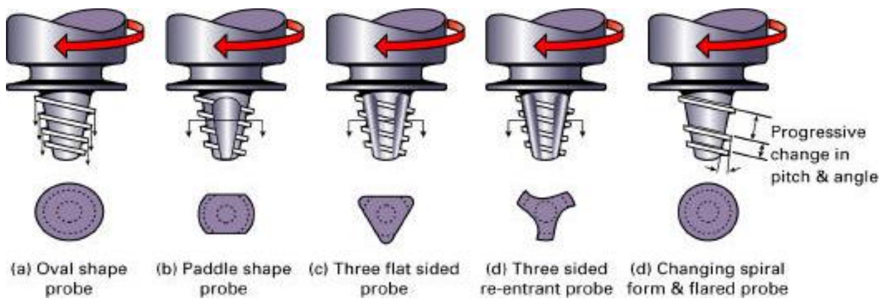
Εικόνα 17: Κυλινδρικός πείρος με επίπεδη άκρη (15).

- **Κωνικός πείρος μικρού μήκους (Truncated cone pin):** Αυτός ο τύπος πείρου χρησιμοποιείται για την συγκόλληση φύλλων αλουμινίου πάχους μικρότερου από 12mm. Αποτελεί μια απλουστευμένη σύνθεση του κυλινδρικού πείρου, που εμφανίζει μικρότερα εγκάρσια φορτία και μεγαλύτερες ροπές στο κάτω μέρος του πείρου. Μία παραλλαγή του κωνικού πείρου μικρού μήκους αποτελεί ο πείρος κλιμακωτής σπείρας (stepped spiral pin), ο οποίος σχεδιάστηκε για συγκολλήσεις τριβής με ανάδευση για υλικά υψηλών θερμοκρασιών. Έχει τετραγωνισμένη άκρη και δεν σχηματίζει ποτέ εσοχή μεταξύ δυο διαδοχικών σπειρών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18 (15).



Εικόνα 18: (Αριστερά) Κωνικός πείρος μικρού μήκους, (Δεξιά) Πείρος κλιμακωτής σπείρας (15).

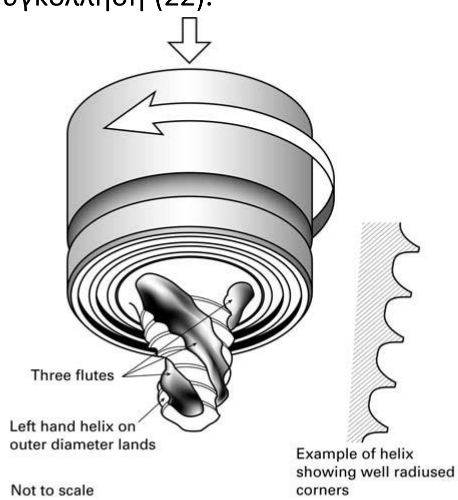
❖ **Κεφαλή με σπείρωμα τύπου Whorl™:** Αποτελεί μια καινοτομία του Ινστιτούτου TWI, η οποία μειώνει κατά 60% τον όγκο του υλικού που εκτοπίζεται, συγκριτικά με τους παραπάνω τύπους πείρων. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μείωση των εγκάρσιων ροπών που επιτρέπει την αύξηση της ταχύτητας της εμπρόσθιας κίνησης του εργαλείου. Η βασική διαφορά μεταξύ του σπειρώματος Whorl™ και του κωνικού πείρου μικρού μήκους έγκειται στο στον ελικοειδή σχηματισμό της επιφάνειας του πείρου. Στην περίπτωση του σπειρώματος τύπου Whorl™, ο ελικοειδής σχηματισμός του πείρου δεν αποτελεί απλά ένα σπείρωμα αλλά λειτουργεί ως τρυπάνι δημιουργώντας μια κατακόρυφη κίνηση προς τα κάτω (23).



Εικόνα 19: Παραλλαγές του πείρου τύπου Whorl™ (23).

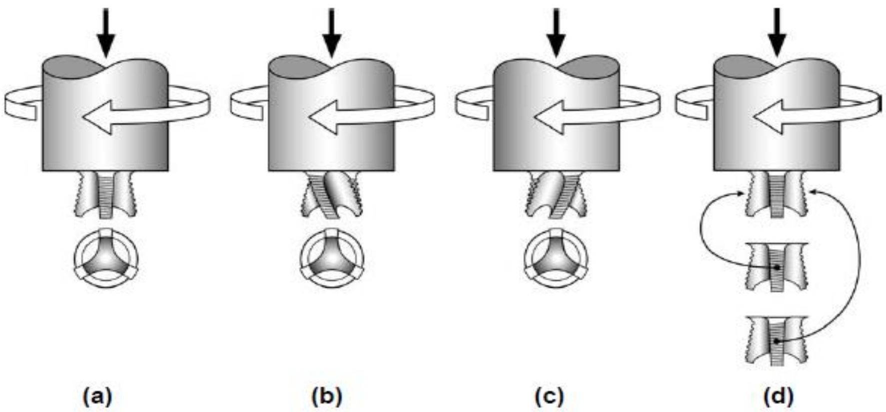
Πέρα από τις προαναφερθείσες γεωμετρίες πείρων, η ανάπτυξη νέων εργαλείων συνέχιζε και δημιουργήθηκαν σχετικά ασυνήθιστες γεωμετρίες όπως οι παρακάτω:

❖ **Πείρος τύπου MX Triflute:** Σε αυτόν τον τύπο δεν υπάρχει συνεχές σπείρωμα αλλά 3 ραβδώσεις κατά μήκος του πείρου, και έτσι προκύπτει μείωση του εκτοπισμένου όγκου κατά 70% αλλά και ενίσχυση της παραμόρφωσης στην ζώνη της συγκόλλησης. Χρησιμοποιείται με ιδιαίτερη επιτυχία για συγκολλήσεις λεπτών φύλλων κραμάτων αλουμινίου καθώς όπως έχει βρεθεί δεν εμφανίζει το φαινόμενο Onion Ring αλλά εκτελεί πιο ομοιόμορφη συγκόλληση (22).



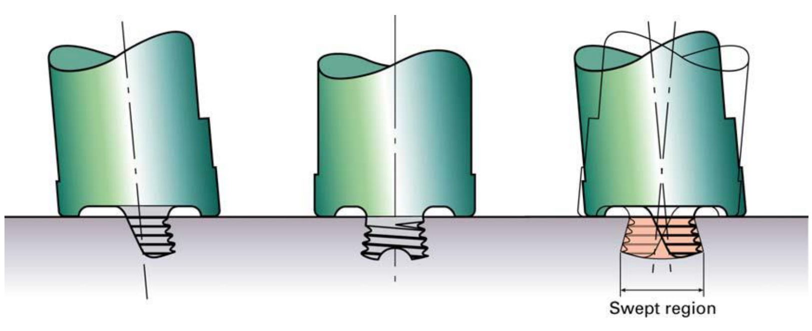
Εικόνα 20: Τυπικός σχεδιασμός πίρου MX Triflute (22).

❖ **Πείρος τύπου Flared-Triflute™:** Αυτός ο τύπος πείρου αναπτύχθηκε για την συγκόλληση σε διάταξη overlap, όταν δηλαδή το ένα δοκίμιο βρίσκεται πάνω στο άλλο. Έτσι το εργαλείο στο στάδιο βύθισης εισέρχεται μέσα και στα δύο δοκίμια. Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική συγκόλληση, είναι επιθυμητό να αυξηθεί το μήκος της ζώνης συγκόλλησης, κάτι το οποίο επιτεύχθηκε τελικά με τη σχεδίαση του πείρου τύπου Flared-Triflute™. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 21, οι σπειρώσεις του πείρου μπορεί να είναι ουδέτερες, να είναι στραμμένες προς τα δεξιά ή τα αριστερά ή ακόμα και να εμφανίζουν συνδυασμό και των τριών (22).



Εικόνα 21: Παραλλαγές πείρου τύπου Flared-Triflute™. (a)ουδέτερες σπειρώσεις, (b) σπειρώσεις προς τα δεξιά, (c) σπειρώσεις προς τα αριστερά, (d) συνδυασμός και των τριών ειδών (23).

❖ **Πείρος τύπου Skew-Stir™:** Ο πείρος τύπου Skew-Stir™ (TWI) έχει την δυνατότητα να αυξάνει τον όγκο του υλικού που μαζεύεται πίσω από το εργαλείου. Η γεωμετρία και τα αποτελέσματα που παρουσιάζει είναι παρόμοια με αυτά του πείρου τύπου MX-Triflute. Συγκεκριμένα, συμβάλλει στην αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, στην βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής της συγκόλλησης, την μείωση της αξονικής δύναμης και στην διεύρυνση της περιοχής συγκόλλησης που κατ’ επέκταση οδηγεί στην μείωση των ασσυμετριών στην γραμμή της συγκόλλησης (19).



Εικόνα 22: Βασικός σχεδιασμός του πείρου τύπου Skew-Stir™ (22).

Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται μια σύνοψη των πείρων που αναλύθηκαν παραπάνω. Αναγράφεται η αναλογία του probe, η αναλογία της στρέψης, η δυνατότητα αντιστροφής της στρέψης του πείρου και τέλος η προτεινόμενη διάταξη των προς συγκόλληση δοκιμίων για κάθε τύπο πείρου.

Tool	Cylindrical	Worl	MX Triflute	Flared-Triflute	A-skew	Re-stir
Schematics						
Tool probe shapes	Cylindrical with threads	Tapered with threads	Tapered with threads and flutes	Triflute, flared out	Inclined cylindrical with threads	Tapered with threads
Ratio of probe*	1	0·4	0·3	0·3	1	0·4
Swept rate	1·1	1·8	2·6	2·6	Up to probe angle	1·8
Rotary reversal	No	No	No	No	No	Yes
Joint type	Butt	Butt	Butt	Lap	Lap	Butt

Εικόνα 23: Σύνοψη και χαρακτηριστικά των κυριότερων τύπων πείρων (21).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψιν την σημαντική επίδραση της γεωμετρίας του εργαλείου στην ροή του μετάλλου, η συσχέτιση μεταξύ της ροής του υλικού και της μικροδομής των συγκολλημένων δοκιμίων ποικίλλει ανάλογα με το εκάστοτε εργαλείο. Έτσι λοιπόν κρίνεται αναγκαίο να αναπτυχθούν καινοτόμες ιδέες για τον σχεδιασμό των εργαλείων. Χρήση ανάλυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων ή μέσω τεχνικών έξυπνης σχεδίασης (smart design engineering) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη και την σχεδίαση νέων εργαλείων που θα ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες του κάθε πειράματος.

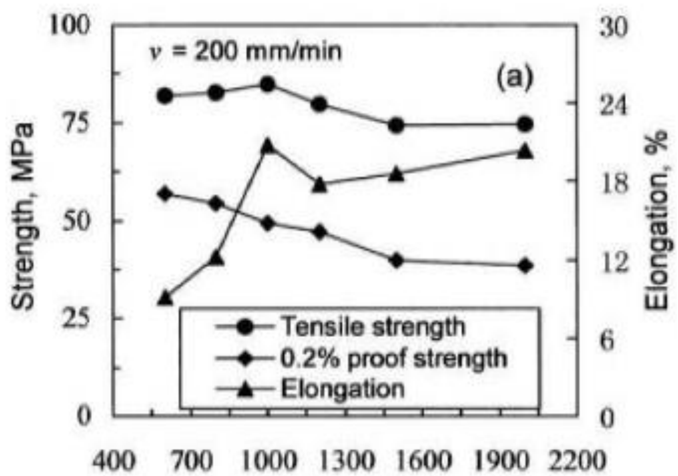
2.2.3.Περιστροφική ταχύτητα, ταχύτητα πρόωσης, λόγος των ταχυτήτων

2.2.3.1.Περιστροφική ταχύτητα

Η περιστροφή του εργαλείου συμβάλει στην μετακίνηση του υλικού γύρω από αυτό και έτσι επιτυγχάνεται η ανάμειξη του υλικού για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της συγκόλλησης. Η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου αυξάνει το ποσοστό της θερμότητας λόγω τριβής και κατ' επέκταση αυξάνεται η θερμοκρασία στην ζώνη συγκόλλησης. Η σχέση μεταξύ της θερμότητας λόγω τριβής και της περιστροφικής ταχύτητας είναι μη γραμμική αφού ο συντελεστής τριβής αλλάζει με την αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας και της θερμοκρασίας (14).

Η αρκετά μεγάλη περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας και βραδύ ρυθμό απόψυξης στον πυρήνα μετά την συγκόλληση. Επίσης για υπερβολικά μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, μπορεί να προκληθεί υπερβολική ανάδευση των υλικών στην ανώτερη επιφάνεια, η οποία κατά συνέπεια δημιουργεί κενά στον πυρήνα συγκόλλησης. Επιπρόσθετα, πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση πολύ υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων του εργαλείου, που αναπτύσσονται μεγάλα ποσοστά θερμότητας, το ποσοστό των απωλειών αυξάνεται αναλόγως. Αντίθετα, στην περίπτωση που το εργαλείο περιστρέφεται με μικρή ταχύτητα, παρατηρείται το φαινόμενο της έλλειψης ανάδευσης. Η έκταση του πυρήνα μειώνεται με την μείωση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου επηρεάζοντας την κατανομή της θερμότητας στην περιοχή (24).

Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων δοκιμίων, έχει βρεθεί ότι για μικρές περιστροφικές ταχύτητες και δεδομένη ταχύτητα συγκόλλησης το όριο διαρροής είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με δοκίμια που έχουν συγκολληθεί με μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, για την περίπτωση κράματος αλουμινίου 1050 – H24, όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής μέχρι τα 1000 rpm, τόσο η εφελκυστική αντοχή όσο και η επιμήκυνση βελτιώνονται, φθάνοντας στο μέγιστο, πριν πέσουν ξανά λόγω των ιδιαίτερα υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων του εργαλείου (25).



Εικόνα 24: Επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας στην εφελκυστική αντοχή, στην 0.2% αντοχή και στην επιμήκυνση κράματος αλουμινίου 1050 - H24 (25).

2.2.3.2.Ταχύτητα συγκόλλησης

Πέρα από την περιστροφική ταχύτητα, και η ταχύτητα συγκόλλησης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την παραγωγή της θερμότητας καθορίζοντας την ποιότητα της συγκόλλησης και της μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων τεμαχίων. Συγκεκριμένα (26):

- ❖ <u>Εάν η ταχύτητα συγκόλλησης είναι σχετικά χαμηλή:</u> Η παροχή θερμότητας στον πυρήνα της συγκόλλησης είναι ιδιαίτερα υψηλή. Η θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής ανά μονάδα μήκους είναι ιδιαίτερα υψηλή ενώ επίσης παρατηρείται η δημιουργία ευμεγεθών κόκκων.
- ❖ <u>Εάν η ταχύτητα συγκόλλησης είναι σχετικά υψηλή:</u> Η παροχή θερμότητας κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δεν είναι επαρκής με αποτέλεσμα να μην ρέει επαρκής

ποσότητα πλαστικοποιημένου υλικού στον πυρήνα της συγκόλλησης. Ακόμη, παρατηρείται μείωση του μεγέθους των κόκκων. Επίσης, το πλαστικοποιημένο υλικό βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία και έτσι είναι δύσκολη η ανάδευση του, προκαλώντας ατέλειες στην συγκόλληση.

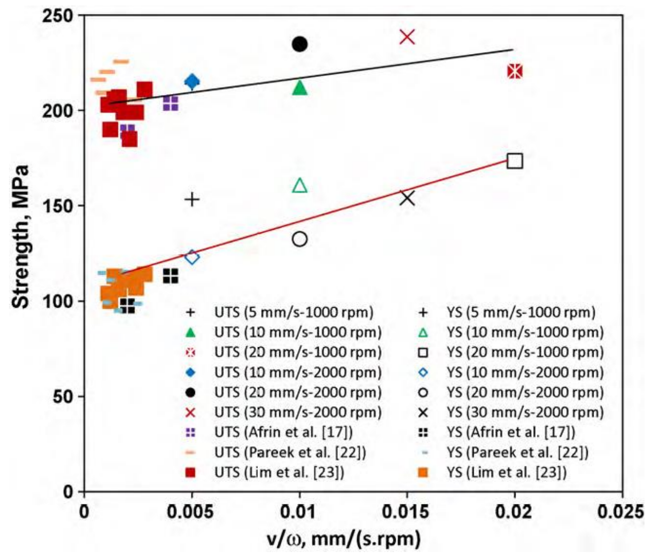
- Εάν η ταχύτητα συγκόλλησης πλησιάζει την βέλτιστη: Η παραγόμενη θερμότητα ανά μονάδα μήκους μειώνεται και ταυτόχρονα υπάρχει επαρκής ροή πλαστικοποιημένου υλικού στον πυρήνα της συγκόλλησης. Τέλος, η παραγόμενη μικροδομή των δοκιμίων αποτελείται από εκλεπτυσμένους κόκκους.

2.2.3.3.Λόγος ταχύτητας συγκόλλησης προς περιστροφικής ταχύτητας εργαλείου (weld pitch)

Ο λόγος ή βήμα των ταχυτήτων συγκόλλησης (weld pitch) ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας της συγκόλλησης προς την ταχύτητα της περιστροφής του εργαλείου (v/ω). Πρόκειται για μια πολύ σημαντική παράμετρο που συνδυάζει τις επιδράσεις και των δύο ταχυτήτων κατά την συγκόλληση σε ένα λόγο. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι ο λόγος συγκόλλησης εξαρτάται και επηρεάζει άμεσα την ενέργεια της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα η ενέργεια που παράγεται ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης μειώνεται με την αύξηση του βήματος συγκόλλησης (27).

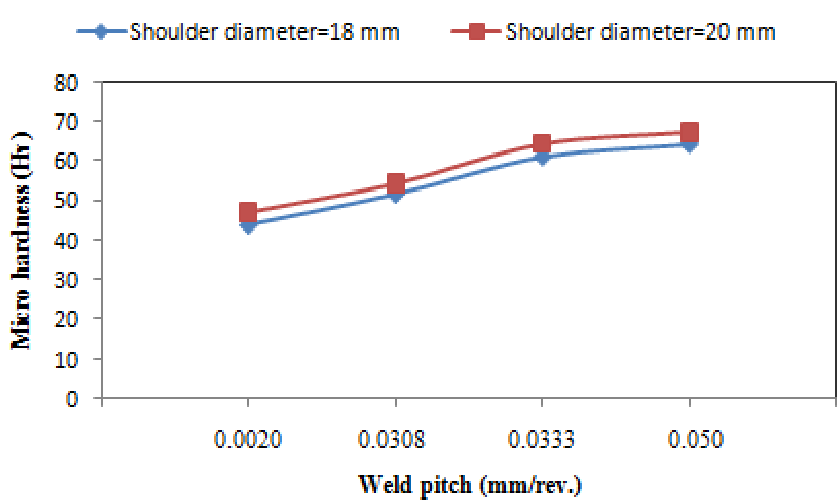
Όταν ο λόγος των ταχυτήτων συγκόλλησης είναι υψηλός, η ποσότητα της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού μειώνεται στην υποχωρούσα πλευρά. Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι η αποτελεσματικότητα της ανάδευσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με το βήμα της συγκόλλησης (28). Αντίθετα, για χαμηλές τιμές του λόγου συγκόλλησης, η ανεπαρκής πλαστική παραμόρφωση ενισχύει τον σχηματισμό στρώματος οξειδίου στην υποχωρούσα πλευρά (retreating side) κατά την διάρκεια της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (29).

Επίσης, ο λόγος των ταχυτήτων συγκόλλησης επηρεάζει και τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων υλικών. Συγκεκριμένα, έπειτα από πείραμα που διεξήχθη για κράματα μαγνησίου, βρέθηκε ότι τόσο το όριο διαρροής όσο και η εφελκυστική αντοχή των προϊόντων παρουσιάζουν γραμμική αύξηση με την αύξηση του λόγου των ταχυτήτων. Ακόμη, με την αύξηση του βήματος των ταχυτήτων παρατηρείται και μείωση της ενέργειας της συγκόλλησης όπως προαναφέρθηκε. Ως αποτέλεσμα, σχηματίζονται κόκκοι μικρού μεγέθους που συμβάλλουν στην αύξηση της αντοχής των παραγόμενων συγκολλήσεων (27).



Εικόνα 25: Μια σύγκριση του ορίου διαρροής και της εφελκυστικής αντοχής κραμάτων AZ31B-H24 συγκολλημένων με FSW, ως συνάρτηση του λόγου της ταχύτητας συγκόλλησης προς την περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου (weld pitch) (27).

Τέλος, το βήμα της συγκόλλησης έχει επίδραση και στην μικρο-σκληρότητα των συγκολλημένων δοκιμίων. Σε πείραμα που διεξήχθη για κράματα μαγνησίου βρέθηκε ότι η σκληρότητα αυξάνει ανάλογα με την αύξηση του λόγου των ταχυτήτων της συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει καθώς για αύξηση του βήματος της ταχύτητας, δημιουργούνται μικροί και εκλεπτυσμένοι κόκκοι οι οποίοι προσδίδουν αυξημένη σκληρότητα. Τα όρια των κόκκων αποτελούν το κύριο εμπόδιο στην ολίσθηση των διαταραχών και το υλικό με το μικρότερο μέγεθος κόκκων εμφανίζει υψηλότερη πυκνότητα HAGB (30).

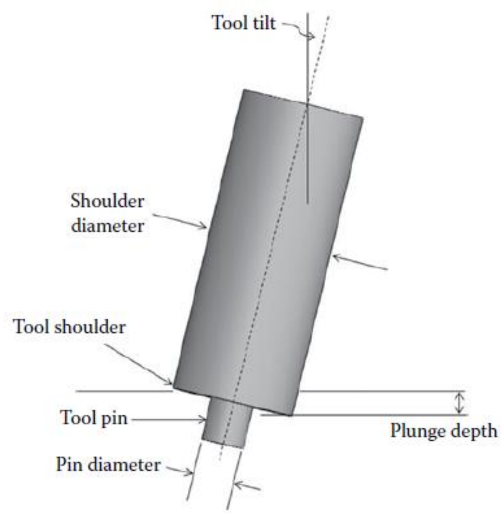


Εικόνα 26: Σχέση μεταξύ του λόγου των ταχυτήτων και της μικρο-σκληρότητας (30).

2.2.4.Γωνία κλίσης και βάθος εισχώρησης

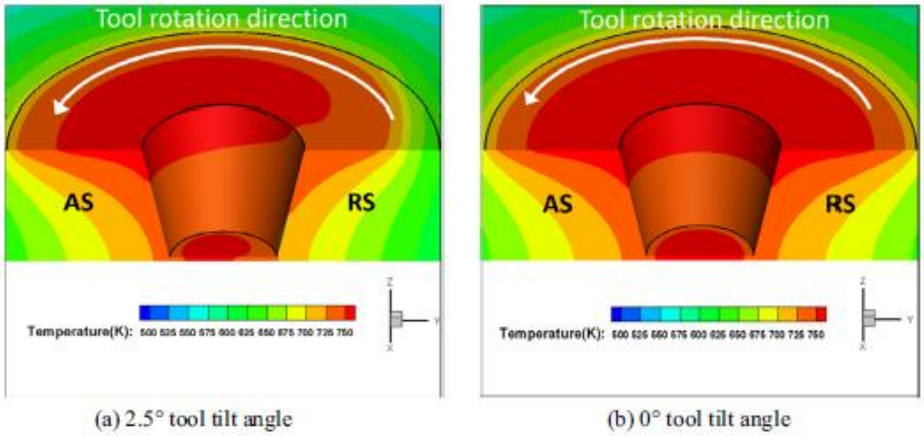
1. *Γωνία κλίσης*

Ως γωνία κλίσης (tool tilt angle) ορίζεται η απόκλιση του άξονα του εργαλείου από τον κάθετο άξονα. Ο κύριος ρόλος χρήσης της είναι η ικανότητα της να εμποδίζει το υλικό να απομακρύνεται από την ζώνη της συγκόλλησης. Η κλίση του εργαλείου κυμαίνεται από τις 0^o έως 4^o διαβεβαιώνοντας έτσι ότι το μπροστινό μέρος του εργαλείου θα στέκεται ψηλότερα από το πίσω. Επίσης επηρεάζει το σχήμα της ζώνης συγκόλλησης, η οποία επιδρά στην κατακόρυφη και οριζόντια κίνηση του υλικού (14).



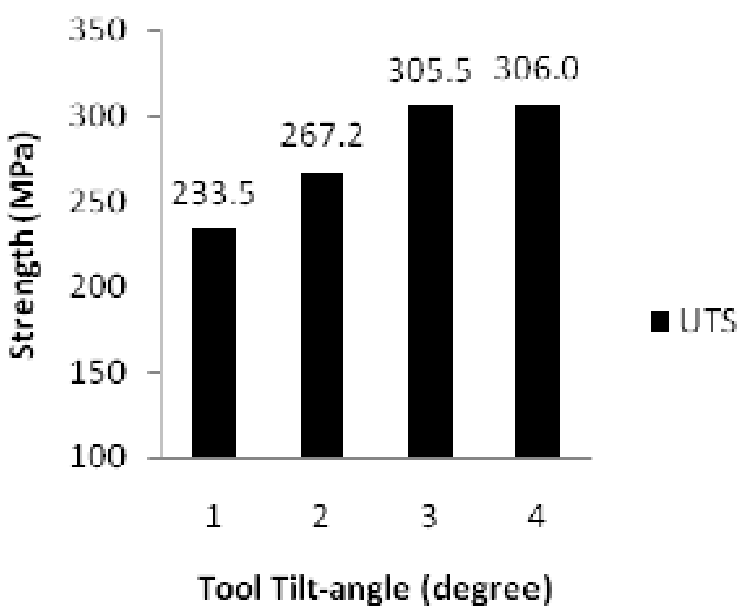
Εικόνα 27: Γωνία κλίσης του εργαλείου κατά την συγκόλληση τριβής με ανάδευση (14).

Ακόμη, η γωνία κλίσης επηρεάζει σημαντικά τον ρυθμό παραγωγής της θερμότητας και την κατανομή της θερμοκρασίας γύρω από το περιαυχένιο. Σε πείραμα που διεξήχθη σε υπολογιστικό πρόγραμμα, παρατηρήθηκε η διαφορά στην κατανομή της θερμοκρασίας για εργαλείο με γωνίας κλίσης $2{,}5^o$ και 0^o. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 28, στην περίπτωση του εργαλείο με γωνίας κλίσης 0^o, το θερμοκρασιακό πεδίο φαίνεται να είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα του εργαλείου και επίσης δεν παρατηρείται θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην υποχωρούσα (retreating side) και την προωθούμενη πλευρά (advancing side). Ωστόσο, στην περίπτωση της γωνίας κλίσης $2{,}5^o$, φαίνεται ότι δημιουργείται ένα μη συμμετρικό θερμοκρασιακό πεδίο γύρω από το περιαυχένιο και η μέγιστη θερμοκρασία στην προωθούμενη πλευρά είναι μεγαλύτερη από αυτήν στην υποχωρούσα πλευρά (31).



Εικόνα 28: Αναμενόμενο θερμοκρασιακό πεδίο για γωνίας κλίσης του εργαλείου (a)2,5^o και (b)0^o (31).

Επιπροσθέτως, η γωνία κλίσης του εργαλείου επιδρά και στις μηχανικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Αυτό επιβεβαιώνεται από πείραμα που διεξήχθη για κράμα αλουμινίου 5083-H116, για 4 διαφορετικές γωνίες κλίσης και σταθερό βάθος διείσδυσης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 29, η εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου αυξάνεται όσο αυξάνεται και η γωνία κλίσης από την 1^o στις 4^o. Η μέγιστη τιμή (306MPa) εμφανίζεται στις 4^o, που όμως είναι οριακά ίση με αυτή στην περίπτωση των 3^o, ενώ η ελάχιστη εφελκυστική αντοχή εμφανίζεται στην 1^o (233,5 MPa) (32).

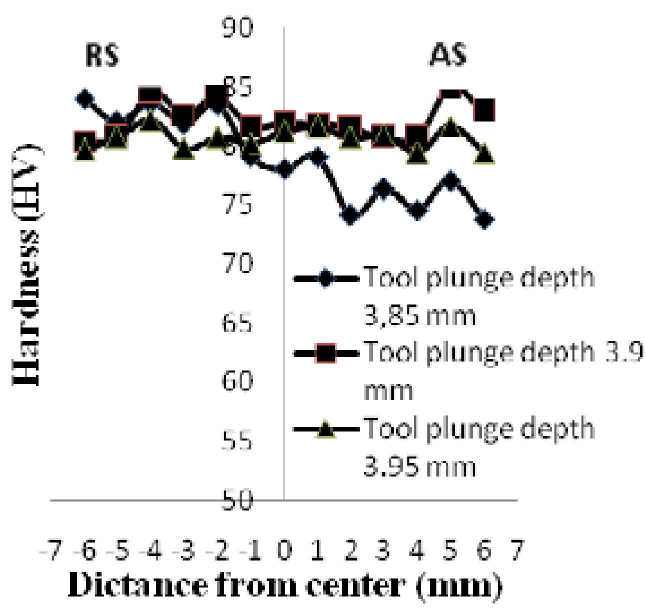


Εικόνα 29: Σχέση εφελκυστικής αντοχής και γωνίας κλήσης του εργαλείου κατά την συγκόλληση FSW (32).

2.Βάθος εισχώρησης

Ως βάθος εισχώρησης ορίζεται η απόσταση του χαμηλότερου σημείου του πείρου από την άνω επιφάνεια των υπό συγκόλληση τεμαχίων (Εικόνα 27). Αποτελεί μια εξίσου σημαντική παράμετρο με τις παραπάνω και συμβάλλει στην παραγωγή συγκολλήσεων χωρίς ατέλειες καθώς επηρεάζει άμεσα την παραγωγή θερμότητας και την ροή του υλικού κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Σε περίπτωση που το βάθος εισχώρησης είναι μεγάλο, αυξάνεται η κάθετη αξονική δύναμη λόγω της πίεσης προς την επιφάνεια εργασίας και ως αποτέλεσμα αυξάνονται και τα παραγόμενα ποσά θερμότητας στην διεπιφάνεια εργαλείου-δοκιμίων. Επιπλέον, τα αυξανόμενα ποσοστά θερμότητας οδηγούν σε αύξηση του μεγέθους των κόκκων και στον σχηματισμό ενδομεταλλικών ενώσεων που επηρεάζουν άμεσα την αντοχή και την ολκιμότητα του παραγόμενου προϊόντος. Από την άλλη πλευρά, εάν το βάθος εισχώρησης είναι μικρό, η παραγόμενη θερμότητα είναι αναλόγως μικρή και έτσι προκαλείται ανεπαρκής πλαστικοποίηση του υλικού και περιορισμός του υλικού στην ζώνη ανάδευσης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία συγκολλήσεων με ατέλειες όπως εσωτερικά η επιφανειακά κενά (14).

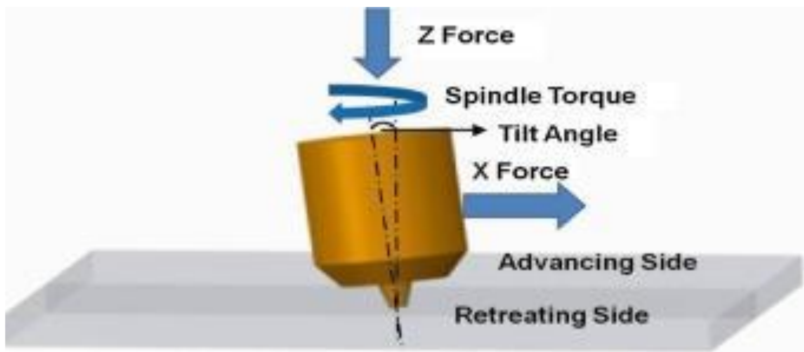
Σε σχετικό πείραμα που διεξήχθη αποδείχθηκε ότι το βάθος εισχώρησης του εργαλείου κατά την διάρκεια συγκόλλησης τριβής με ανάδευση προκαλεί και μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου τεμαχίου. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 30, αυξάνοντας το βάθος εισχώρησης παρατηρείται σταθεροποίηση της σκληρότητας ανάμεσα στην υποχωρούσα (RS) και την προωθούμενη πλευρά (AS). Αυτό πιθανότητα οφείλεται στην διαφορά των θερμοκρασιών συγκόλλησης για τα εκάστοτε βάθη εισχώρησης του εργαλείου (32).



Εικόνα 30: Η μεταβολή της σκληρότητας συγκολλημένων τεμαχίων για σταθερό βάθος εισχώρησης 3.90mm για γωνίες κλίσης 1°,2°,3° και 4° (RS, Retreating side and AS, Advancing side). (32)

2.2.5.Δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο εργαλείο

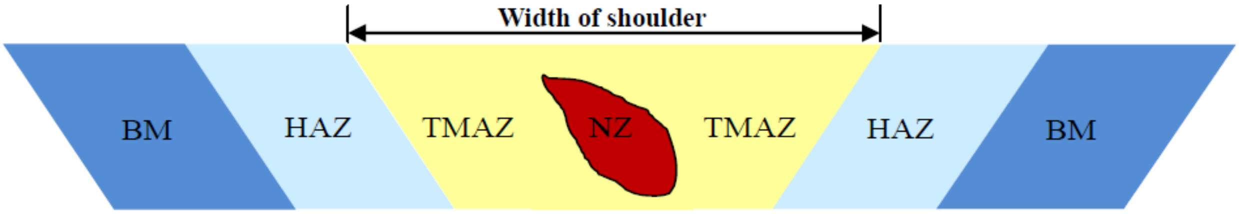
Κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 31 ασκούνται δύο διαφορετικές δυνάμεις στην διεπιφάνεια εργαλείου-προς συγκόλληση τεμαχίων. Το εργαλείο συγκόλλησης υφίσταται μια κάθετη αξονική δύναμη καθώς εισέρχεται στο τεμάχιο εργασίας και μια οριζόντια δύναμη, γνωστή και ως δύναμη συγκόλλησης, καθώς μετατοπίζεται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Η επαρκής κατακόρυφη δύναμη αποτελεί μια σημαντική παράμετρο κατά την διάρκεια της συγκόλλησης καθώς προάγει την παραγωγή θερμότητας και εξασφαλίζει την ροή του υλικού στο πίσω μέρος του εργαλείου (33)**.**



Εικόνα 31: Σχηματική αναπαράσταση της ροπής και των δυνάμεων που ακούνται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (33).

2.3. Ζώνες Συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

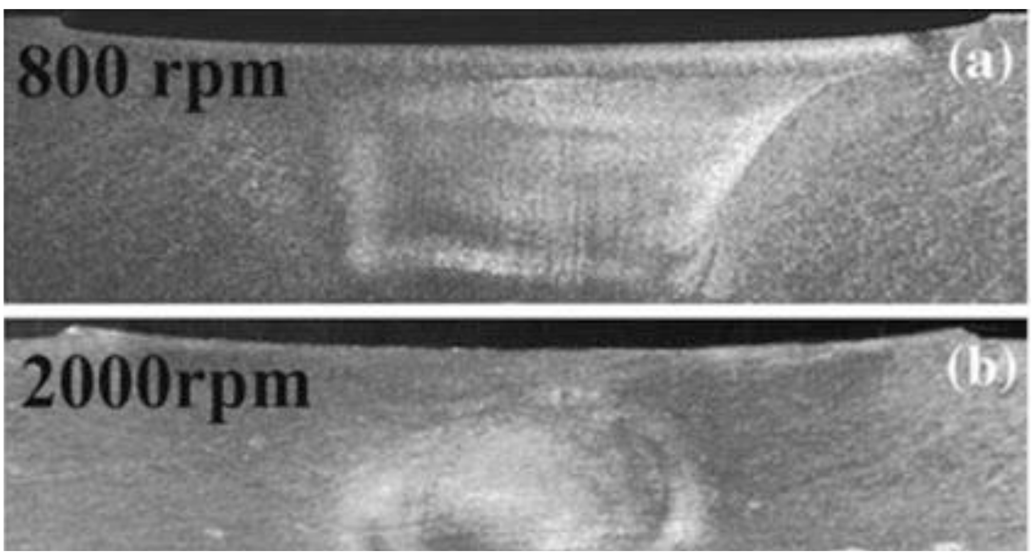
Κατά την διάρκεια της συγκόλλησης τριβής με ανάδευσης παρατηρούνται όπως αναφέρθηκε, φαινόμενα πλαστικής παραμόρφωσης και έντονης αύξησης της θερμοκρασίας. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την ανακρυστάλλωση και την ανάπτυξη νέων δομών εντός της ζώνης ανάδευσης αλλά και την δημιουργία λεπτών κατακρημνισμάτων τόσο εντός όσο και γύρω από την ζώνη συγκόλλησης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 32, ανάλογα με τον χαρακτηρισμό της μικροδομής και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα παρατηρούνται 4 διαφορετικές ζώνες συγκόλλησης, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω (34).



Εικόνα 32: Ζώνες συγκόλλησης κατά την συγκόλληση τριβής με ανάδευση (34).

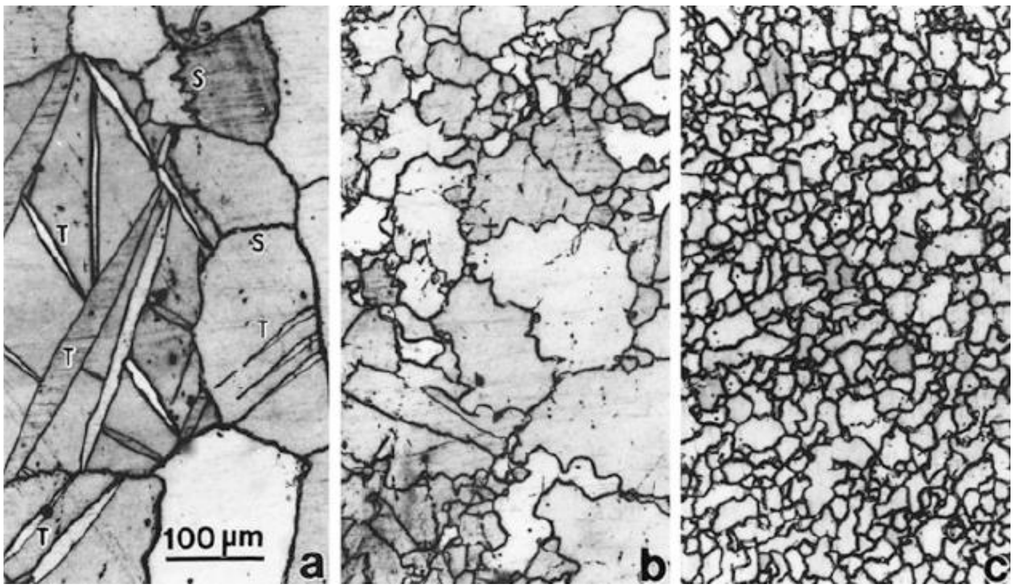
2.3.1.Πυρήνας συγκόλλησης / Ζώνη ανάδευσης (Weld Nugget / Stir Zone)

Πρόκειται για την περιοχή, στην οποία εισέρχεται ο πείρος και αναδεύει το υλικό. Η μορφολογία και το μέγεθος του πυρήνα συγκόλλησης εξαρτούνται άμεσα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιείται καθώς και από τις υπόλοιπες παραμέτρους της συγκόλλησης (Εικόνα 33). Για παράδειγμα, ο λόγος των ταχυτήτων της συγκόλλησης επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των κόκκων εντός της ζώνης ανάδευσης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο λόγος αποκτά υψηλές τιμές η ζώνη ανάδευσης αποτελείται από χονδρούς κόκκους ενώ όταν παίρνει χαμηλές τιμές παρατηρείται μια πιο λεπτόκοκκη μικροδομή (35).



Εικόνα 33: Επίδραση της αλλαγής της περιστροφικής ταχύτητας στο σχήμα της ζώνης συγκόλλησης ενός κράματος μαγνησίου AZ31 (35).

Επιπλέον, στην περιοχή αυτή παρατηρούνται φαινόμενα ανακρυστάλλωσης των κόκκων λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης και της συνολικής θερμότητας που παράγεται. Αποτελεί δηλαδή πρακτικά μια θερμομηχανικά επηρεασμένη και δυναμικά ανακρυσταλλωμένη ζώνη η οποία αποτελείται από ισοαξονικούς και εκλεπτυσμένους κόκκους μικρού μεγέθους. Οι κόκκοι αυτοί είναι κατά κανόνα μικρότεροι από αυτούς που παρατηρούνται στο μητρικό υλικό, λόγω της σφυρηλάτησης. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι το μέγεθος των κόκκων τείνει να μειώνεται κοντά στην κορυφή της ζώνης της συγκόλλησης και αυξάνεται σε κάθε σημείο που απομακρύνεται από το κέντρο του πυρήνα συγκόλλησης ανάλογα με τις μεταβολές στο θερμοκρασιακό πεδίο. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 34, σε πείραμα που διεξήχθη για κράμα AZ-31, οι κόκκοι στην ζώνη συγκόλλησης (34c) εμφάνισαν σημαντική μείωση του μεγέθους από τα 175μm στα 25μm (35).



Εικόνα 34: Οπτική μικροσκοπία (a)Μητρικό μέταλλο βάσης, (b)Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, (c) Ζώνη ανάδευσης (35).

2.3.2.Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ / TMAZ)

Η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη συνορεύει με την ζώνη ανάδευσης. Η ονομασία της οφείλεται στην παρουσία έντονων θερμικών και μηχανικών μεταβολών. Βασικό χαρακτηριστικό της ζώνης αυτής αποτελούν οι έντονες μηχανικές παραμορφώσεις που ασκούνται και οι οποίες είναι κατά κόρον πλαστικές. Ωστόσο, αυτές δεν αρκούν για να προκαλέσουν ανακρυστάλλωση σε αυτήν την ζώνη. Ακόμη, η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες προκαλεί την διάλυση ορισμένων κατακρημνισμάτων.

Η μικροδομή του υλικού στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη αποτελείται από κόκκους οι οποίοι έχουν επιμηκυνθεί γύρω από την ζώνη ανάδευσης. Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 34b, επικρατεί ετερογενής δομή κόκκων μέσα στην ΘΜΕΖ με έναν συνδυασμό λεπτών και χονδροειδών κόκκων καθώς και τα όρια διδυμίας (twin boundaries) (35).

2.3.3.Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ / HAZ)

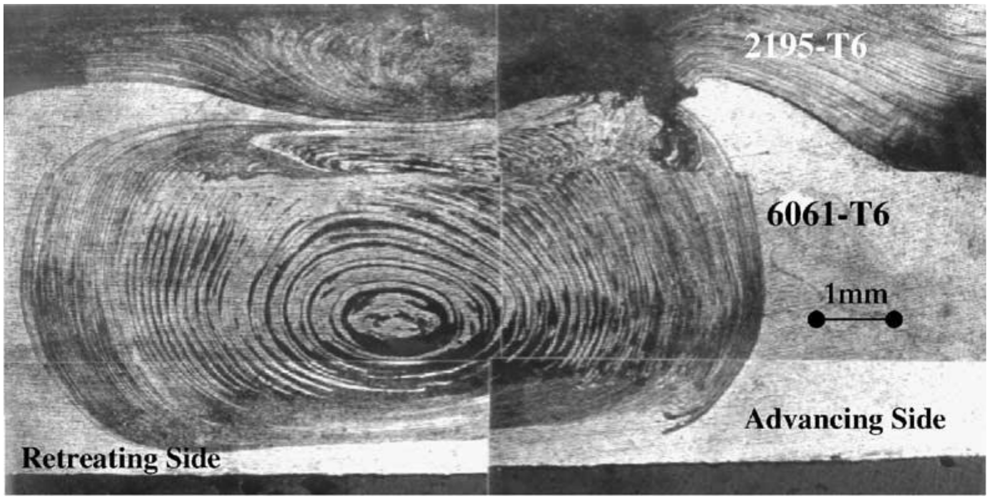
Δίπλα από την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ) βρίσκεται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη σε ένα θερμικά κατεργάσιμο κράμα αλουμινίου ορίζεται ως η ζώνη που υφίσταται αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από 250^{o}C. Υπόκειται στην επιρροή του θερμικού κύκλου αλλά δεν υφίσταται καμία πλαστική παραμόρφωση. Παρατηρείται ωστόσο μια ελαφριά εξομάλυνση των ορίων των κόκκων και μια διαλυτοποίηση των δευτερευόντων φάσεων ενίσχυσης στα θερμοσκληρυνόμενα κράματα.

2.3.4.Ζώνη μητρικού υλικού (Base Metal)

Σε αυτήν την ζώνη βρίσκεται το μητρικό μέταλλό το οποίο δεν έχει επηρεαστεί από τις θερμικές και μηχανικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα κατά την συγκόλληση.

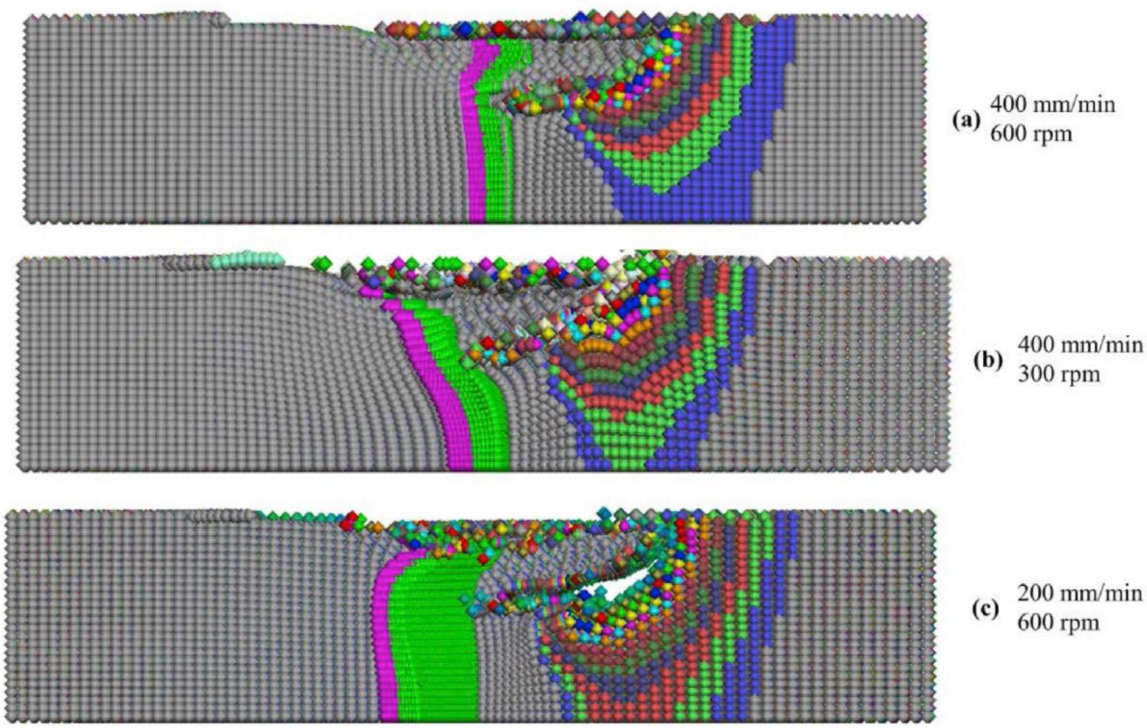
2.3.5.Onion Rings

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, η περιστροφική κίνηση του εργαλείου έχει ως αποτέλεσμα την ανάδευση και μεταφορά του υλικού από την υποχωρούσα στην προωθημένη πλευρά. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας το υλικό διατηρεί την μορφολογία των στρωμάτων του υλικού χωρίς μεταβολές. Ωστόσο, καθώς η αλληλεπίδραση του υλικού με το περιαυχένιο αυξάνει, οι ροές που οφείλονται στον πείρο και στο περιαυχένιο συγχωνεύονται και τα στρώματα ενώνονται μεταξύ τους. Έτσι δημιουργείται το φαινόμενο των ‘’δακτυλίων κρεμμυδιού’’ (Onion rings). Στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο στο εγκάρσιο και πλευρικό τμήμα της ακμής σύνδεσης (Εικόνα 35). Συγκεκριμένα, οφείλεται στην ρυθμική διακύμανση του μεγέθους των κόκκων του μετάλλου, στην κατανομή των δευτερευόντων φάσεων αλλά και στον προσανατολισμό των κόκκων. Τα μοτίβα επαναλαμβάνονται ανά διαστήματα ίσα με την γραμμική απόσταση που διανύθηκε από το εργαλείο κατά την διάρκεια κάθε περιστροφής (36).



Εικόνα 35: Σχηματισμός Onion Rings σε συγκόλληση τριβής με ανάδευση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου (37).

Επιπρόσθετα, σε πείραμα που διεξήχθη με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων παρατηρήθηκε ότι τόσο η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου όσο και η ταχύτητα της συγκόλλησης επηρεάζουν δραστικά τον σχηματισμό των onion rings. Παρατηρώντας την Εικόνα 36, γίνεται αντιληπτό ότι το σχήμα τους καθώς και η ζώνη που επηρεάζουν εξαρτάται άμεσα από τις τιμές και των δυο ταχυτήτων της συγκόλλησης (36).



Εικόνα 36: Σχηματισμός Onion Ring στην ζώνη συγκόλλησης για 3 διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης (36).

2.4. Φαινόμενα δυναμικής επαναφοράς (Annealing Phenomena)

Τα φαινόμενα επαναφοράς διακρίνονται σε (38):

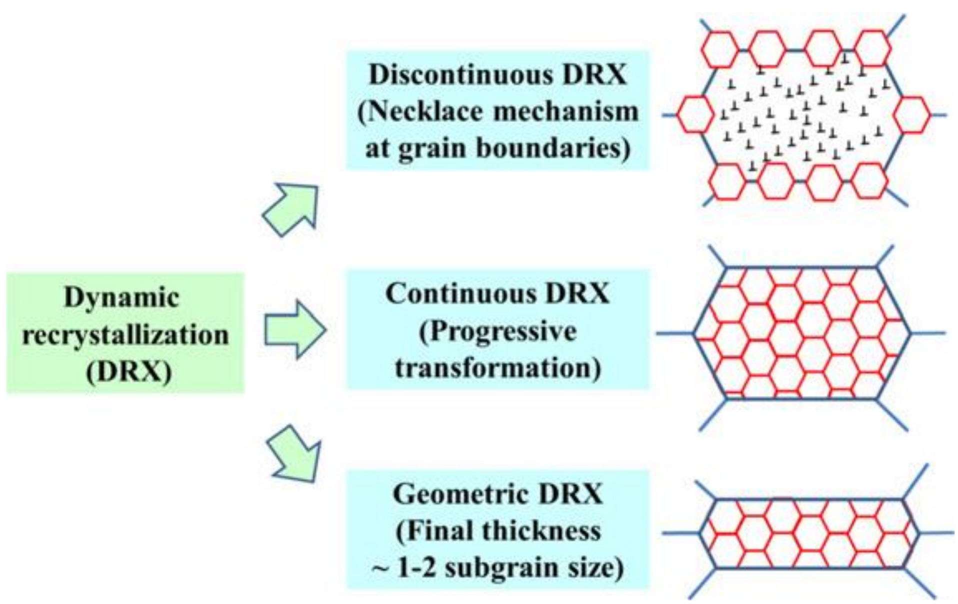
- Δυναμικά φαινόμενα αποκατάστασης (Dynamic Restoration).
- Δυναμικά φαινόμενα θερμικής κατεργασίας (Dynamic Recrystallization).

Οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της έντονης παραμόρφωσης των μεταλλικών υλικών π.χ. αλουμίνιο. Η ονοματολογία που τους έχει προσδοθεί παραπάνω τα διαχωρίζει από τις διεργασίες ανόπτησης που συμβαίνουν κατά την διάρκεια θερμικών κατεργασιών των μετάλλων μετά τις διαδικασίες παραμόρφωσης τους όπως η θερμή έλαση, η διέλαση αλλά και η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση.

Τα φαινόμενα αυτά παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον και χρήζουν μελέτης καθώς επηρεάζουν τις ροϊκές τάσεις του υλικού με αποτέλεσμα αυτό να παραμορφώνεται ευκολότερα, να επηρεάζεται η υφή και το μέγεθος των κόκκων του, φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

Τα φαινόμενα της δυναμικής ανακρυστάλλωσης διακρίνονται περαιτέρω σε (38):

- Ασυνεχή δυναμική θερμική ανακρυστάλλωση (DDRX).
- Συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση (CDRX):
    1. Συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση με προοδευτική περιστροφή πλέγματος.
    2. Γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (GDRX).

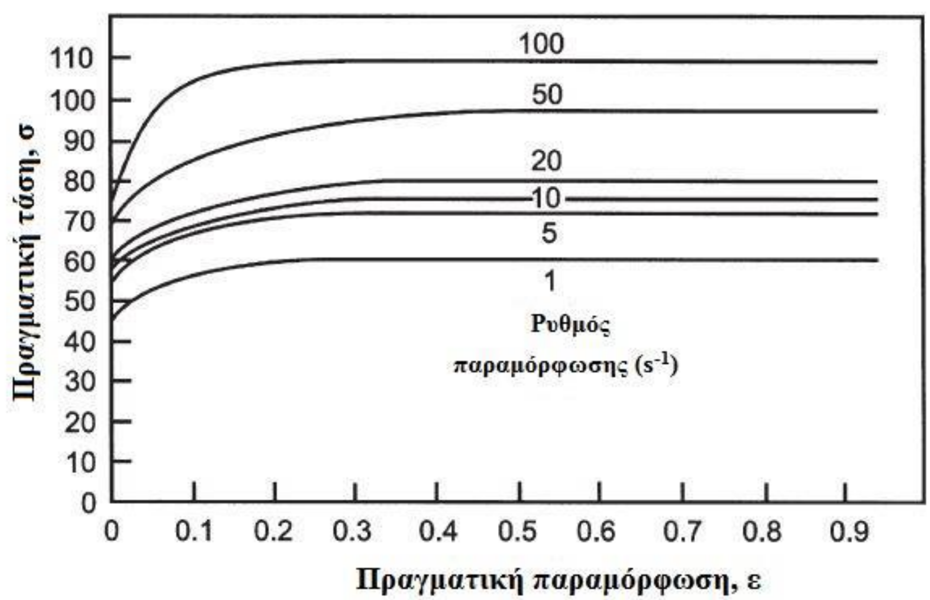


Εικόνα 37: Σχηματική απεικόνιση των κατηγοριών της δυναμικής ανακρυστάλλωσης. (38)

2.4.1.Δυναμική αποκατάσταση

Το φαινόμενο της δυναμικής αποκατάστασης απαρτίζεται από την ανακατανομή των διαταραχών και την δημιουργία υποκόκκων στο εσωτερικό των κόκκων. Όπως έχει παρατηρηθεί, λαμβάνει χώρα επί το πλείστων στην ΘΕΖ ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις συμβαίνει στην ΘΜΕΖ αλλά και στην ζώνη ανάδευσης πριν την έναρξη της δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Η δυναμική αποκατάσταση συμβαίνει σε μέταλλα με υψηλή ενέργεια επιστοίβασης (SFE), όπως το αλουμίνιο και οι φερριτικοί χάλυβες όταν αυτά εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η δυναμική αποκατάσταση είναι γρήγορη και εκτενής και είναι συνήθως το μόνο φαινόμενο επαναφοράς που συμβαίνει (38).

Στα πρώτα στάδια της δυναμικής αποκατάστασης παρατηρείται αύξηση των ροϊκών τάσεων του υλικού καθώς οι διαταραχές αλληλοεπιδρούν και πολλαπλασιάζονται. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα των διαταραχών, τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός του φαινομένου της δυναμικής αποκατάστασης. Έτσι δημιουργούνται υποκόκκοι (subgrains) και όρια κόκκων με μικρή γωνία προσανατολισμού (misorientation angle). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 33, σε μια συγκεκριμένη τιμή παραμόρφωσης, οι ρυθμοί ενδοτράχυνσης και αποκατάστασης αγγίζουν ένα δυναμικό ισοδύναμο και η πυκνότητα των διαταραχών παραμένει σταθερή δημιουργώντας μια ροϊκή τάση.



Εικόνα 38: Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για κράμα αλουμινίου – μαγνησίου (1% περιεκτικότητα) στους 400^oC (39).

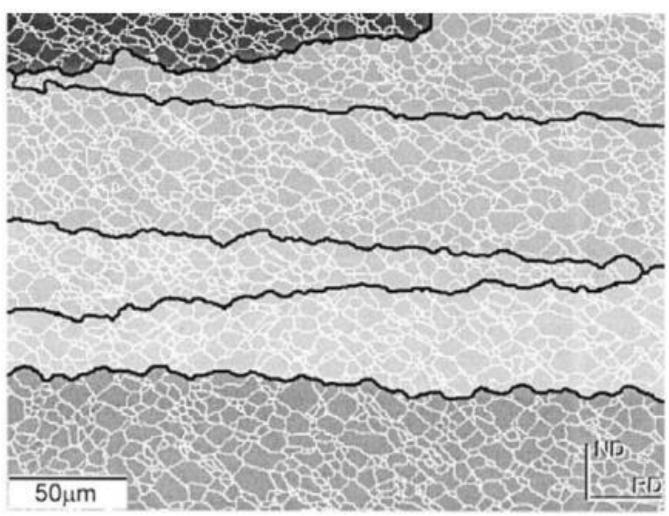
Βασικοί μηχανισμοί της δυναμικής αποκατάστασης είναι η αναρρίχηση και η ολίσθηση των διαταραχών. Η ασκούμενη τάση η οποία παρέχει μια επιπλέον ωθούσα πίεση έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση των ορίων των υποκόκκων με μικρή γωνία αποπροσανατολισμού και παίζει ρόλο στην τελική παραμόρφωση του υλικού καθώς εξαλείφει μερικώς τις αλληλεπιδράσεις και τις διαταραχές των απέναντι ορίων βοηθώντας έτσι τους υποκόκκους να παραμένουν ισοαξονικοί. Αυτή η μετακίνηση συνεπάγει την μερική απαλοιφή των διαταραχών και εξασφαλίζει την διατήρηση της ισοαξονικότητας των υποκόκκων.

Η παράμετρος Zener – Hollomon (Z) χρησιμοποιείται για να συσχετίζει αλλαγές στην θερμοκρασία ή τον ρυθμό τάσης με την συμπεριφορά τάσης – καταπόνησης ενός υλικού. Δίνεται από τον τύπο (38):

$$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \qquad [1]$$

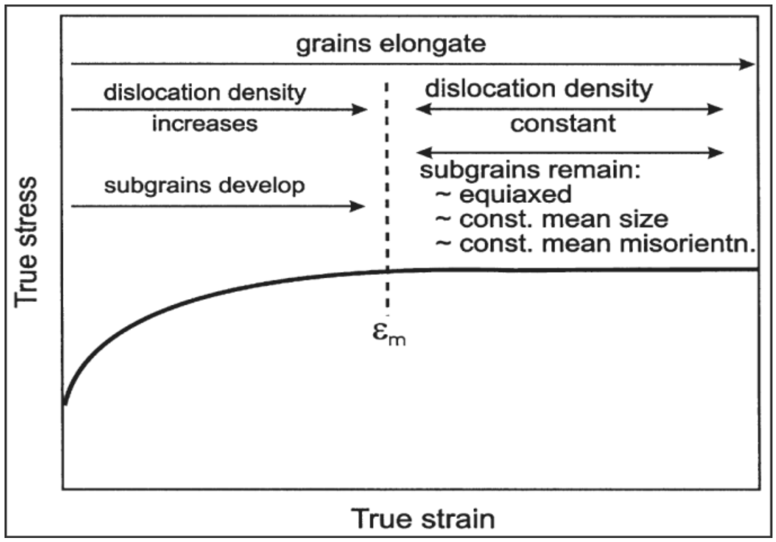
Όπου ε ο ρυθμός παραμόρφωσης (σε s^{-1}), Q η ενέργεια ενεργοποίησης (σε kJ/mol), R η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8.314 J/(mol*k)) και T η θερμοκρασία παραμόρφωσης.

Τα κράματα αλουμινίου εμφανίζουν τιμές Z που κυμαίνονται από 15 έως 60. Χαμηλές τιμές της παραμέτρου Zener – Hollomon, δηλαδή υψηλή θερμοκρασία παραμόρφωσης και χαμηλό ρυθμό παραμόρφωσης, υποδεικνύουν ότι τα όρια των υποκόκκων μεταναστεύουν τοπικά λόγω της τάσης των ορίων και της ανομοιομορφίας στην πυκνότητα των διαταραχών. Αναπτύσσουν ακόμα οδοντώσεις με μήκος κύματος παρόμοιο με το μέγεθος των υποκόκκων. Οι οδοντώσεις αναπτύσσονται στα όρια των υποκόκκων σε περιπτώσεις παραμόρφωσης με μικρή τιμή του αριθμού Z. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 39 οι κόκκοι με διαφορετικό προσανατολισμό διακρίνονται λόγω της αντίθεσης πεδίου που διακρίνεται μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Τα όρια των υποκόκκων έχουν άσπρο χρώμα ενώ οι οδοντώσεις φαίνονται με μαύρο χρώμα.



Εικόνα 39: Χάρτης από EBSD όπου φαίνονται οι οδοντώσεις (39).

Όταν υφίσταται τα φαινόμενα της εργοσκλήρυνσης, σε υψηλές θερμοκρασίες, και της αποκατάστασης, σε χαμηλές θερμοκρασίες, παρατηρείται το φαινόμενο του συνεχή σχηματισμού και της διάλυσης των ορίων μικρής γωνίας διαφοράς προσανατολισμού (LABs). Έπειτα από ρυθμό παραμόρφωσης άνω του 0.5 έως 1, η δομή των υποκόκκων τείνει να προσεγγίζει μια σταθερή κατάσταση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 40 (39).



Εικόνα 40: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης όπου φαίνονται οι αλλαγές στην μικροδομή και η σταθερότητα που επέρχεται για παραμορφώσεις άνω του 0.5 (39).

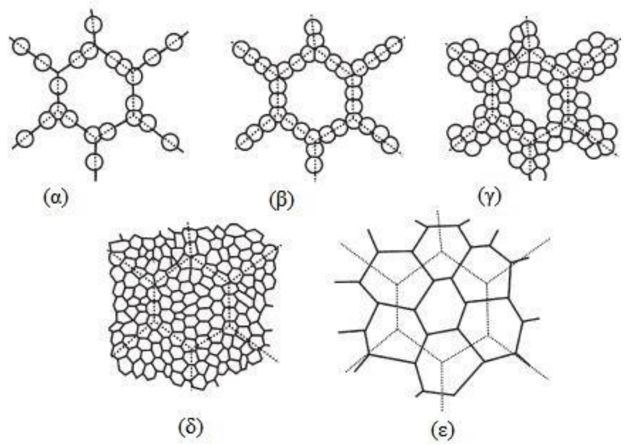
2.4.2.Ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (Discontinuous dynamic recrystallization- DDRX)

Η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση περιλαμβάνει τον σχηματισμό πυρήνων ανακρυσταλλωμένων κόκκων και την ανάπτυξη που ακολουθεί. Λαμβάνει χώρα όταν το υλικό αγγίξει μια κρίσιμη τιμή παραμόρφωσης και παρατηρείται σε μέταλλα όπου οι διαδικασίες επαναφοράς είναι αργές (χαλκός, νικέλιο, ωστενιτικοί χάλυβες κ.ά.) (39).

Μια απλουστευμένη περιγραφή της διαδικασίας είναι η εξής: Δημιουργούνται νέοι κόκκοι στα ήδη υπάρχοντα όρια κόκκων και καθώς το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται, η πυκνότητα των διαταραχών στους νέους κόκκους αυξάνεται. Έτσι, μειώνεται η ωθούσα δύναμη και οι ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι σταματούν την ανάπτυξη τους. Ένας ακόμη παράγοντας που μπορεί να περιορίσει την ανάπτυξη νέων κόκκων είναι η πυρήνωση περαιτέρω κόκκων στα όρια μετανάστευσης (migrating boundaries) (39).

Ο συγκεκριμένος τύπος δυναμικής ανακρυστάλλωσης χαρακτηρίζεται ως ασυνεχής λόγω της διακριτής πυρήνωσης και των διακριτών σταδίων σχηματισμού των κόκκων.

Αναφορικά με τον μηχανισμό της πυρήνωσης, πρέπει να αναφερθεί ότι η δυναμική ανακρυστάλλωση ξεκινάει σε όρια κόκκων μικρής γωνίας διαφοράς προσανατολισμού (Εικόνα 41). Αυτά τα όρια κόκκων μπορεί να είναι ή τα αρχικά όρια κόκκων ή τα όρια των ανακρυσταλλωμένων κόκκων ή και όρια κόκκων που έχουν δημιουργηθεί λόγω παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, η δυναμική ανακρυστάλλωση ξεκινά αρχικά στα όρια κόκκων του αρχικού υλικού. Έπειτα, οι νέοι κόκκοι αρχίζουν να πυρηνοποιούνται μεταξύ των μεγεθυνόμενων κόκκων με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας πυκνής ζώνης ανακρυσταλλωμένων κόκκων. Αν η διαφορά μεγέθους μεταξύ των αρχικών και των ανακρυσταλλωμένων κόκκων είναι μεγάλη, τότε μπορεί να σχηματιστεί μια δομή σαν αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 41 (β,γ). Τέλος, το υλικό ανακρυσταλλώνεται πλήρως (Εικόνα 41) (39).



Εικόνα 41: Η εξέλιξη της μικροδομής κατά την δυναμική ανακρυστάλλωση. (α)-(δ)Μεγάλο αρχικό μέγεθος κόκκων, (ε)Μικρο αρχικό μέγεθος κόκκων (39).

Σε μερικές περιπτώσεις, η εξέλιξη της μικροδομής μπορεί να γίνεται αρκετά πιο πολύπλοκη από ότι περιεγράφηκε παραπάνω καθώς ο τρόπος της δυναμικής ανακρυστάλλωσης μπορεί να επιφέρει διαφορές στον μηχανισμό της παραμόρφωσης. Για παράδειγμα, αν το αποτέλεσμα της δυναμικής ανακρυστάλλωσης είναι εξαιρετικά λεπτομερής κόκκοι, τότε η παραμόρφωση πιθανότατα θα συμβεί μέσω του μηχανισμού της ολίσθησης των ορίων των κόκκων (grain boundary sliding) (39).

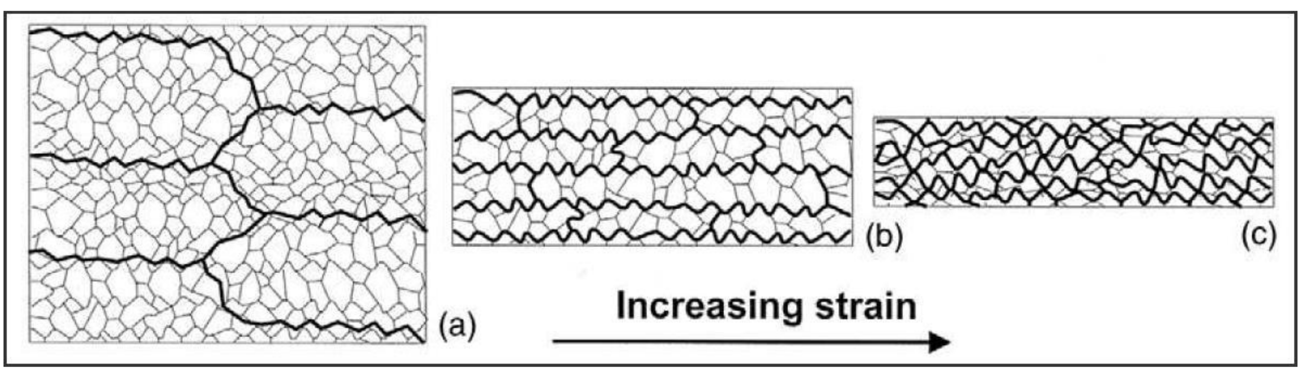
2.4.3.Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (Continuous Dynamic Recrystallization – CDRX)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση συμβαίνει σε περιπτώσεις μετάλλων χαμηλής ενέργειας σφαλμάτων επιστοίβασης. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ότι υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, και συγκεκριμένα όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες παραμόρφωσης μπορεί να αναπτυχθεί μια μικροδομή με όρια κόκκων μεγάλης διαφοράς γωνίας κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού. Η μικροδομή δεν προκύπτει από πυρηνοποίηση και ανάπτυξη κόκκων στα προ υπάρχοντα όρια τους, αλλά κάτω από την πραγματοποίηση άλλων μηχανισμών.

Δύο είναι τα κυριότερα είδη διαδικασιών συνεχούς δυναμικής ανακρυστάλλωσης: Η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση και η δυναμική ανακρυστάλλωση με προοδευτική περιστροφή πλέγματος (39).

1.Γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (Geometric Continuous Recrystallization – GDRX)

Έπειτα από διαδικασίες παραμόρφωσης υπό υψηλή τάση και θερμοκρασία (θερμή έλαση ή θερμή συμπίεση) μπορεί να προκύψει μικροδομή η οποία αποτελείται κυρίως από όρια κόκκων μεγάλης γωνίας κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού. Αυτό το φαινόμενο δυναμικής ανακρυστάλλωσης ονομάζεται γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση. Σε αυτήν την περίπτωση οι κόκκοι παίρνουν μια πεπλατυσμένη μορφή όπως φαίνεται και στην Εικόνα 42. Ακόμη, παρατηρείται ότι με την με την αύξηση της παραμόρφωσης, τα όρια κόκκων μεγάλης γωνίας αποπροσανατολισμού πλησιάζουν μεταξύ τους ενώ το μέγεθος των υποκόκκων παραμένει σταθερό. Γενικά, σε ψυχρές διεργασίες μεταλλοτεχνικού χαρακτήρα, το μέγεθος των υποκόκκων είναι ανεξάρτητο της παραμόρφωσης, οπότε και το ποσοστό των ορίων μεγάλης γωνίας προσανατολισμού αυξάνει με την παραμόρφωση και τελικά των μέγεθος των ορίων (μαύρες γραμμές-HAGBs) γίνεται συγκρίσιμο με το πάχος των υποκόκκων. Τελικά πραγματοποιείται αλληλοδιείσδυση των οδοντωτών ορίων, δημιουργώντας έτσι μια μικροδομή αποτελούμενη από μικρούς ισοαξονικούς κόκκους (39).



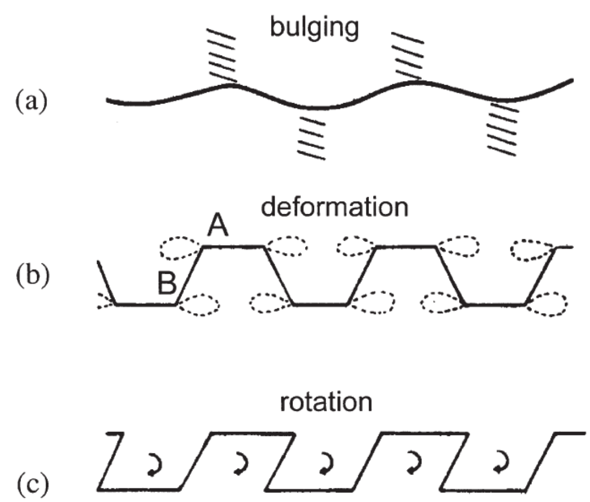
Εικόνα 42: Η αλλαγή της γεωμετρίας των κόκκων. (39)

Η πραγματοποίηση ή όχι της γεωμετρικής δυναμικής ανακρυστάλλωσης εξαρτάται από το αρχικό μέγεθος των κόκκων του υλικού και από τις συνθήκες παραμόρφωσης του. Όταν το υλικό παραμορφώνεται υπό την επιβολή υψηλών τάσεων, η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση δεν συμβαίνει μέχρι την επίτευξη υψηλών παραμορφώσεων καθώς το μέγεθος των υποκόκκων είναι μικρό. Αντιθέτως, στην περίπτωση επιβολής χαμηλών τάσεων, η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση πραγματοποιείται σε χαμηλές παραμορφώσεις. (40)

Αναφορικά με την συσχέτιση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευσης και της γεωμετρικής δυναμικής ανακρυστάλλωσης πρέπει να αναφερθεί ότι η δεύτερη λαμβάνει χώρα στην ζώνη ανάδευσης αλλά υπό συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο και στην Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη, στην οποία επικρατεί το φαινόμενο της δυναμικής αποκατάστασης. Για να διακριθεί ξεκάθαρα το είδος της δυναμικής ανακρυστάλλωσης που μπορεί να επικρατεί σε κάθε ζώνη πρέπει να παρατηρηθούν όλες οι ζώνες συνολικά (41).

2.Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση με προοδευτική περιστροφή πλέγματος (Dynamic recrystallization by progressive lattice rotation)

Το φαινόμενο της συνεχούς δυναμικής ανακρυστάλλωσης με προοδευτική περιστροφή πλέγματος αποτελεί έναν μηχανισμό στον οποίο, υπό την επίδραση παραμόρφωσης και λόγω της περιστροφής των υποκόκκων, μπορούν να δημιουργηθούν νέοι κόκκοι με όρια υψηλής γωνίας κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού (HABs). Έτσι στο εσωτερικό του κόκκου, παρουσιάζεται μια διαβάθμιση της γωνίας κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού των υποκόκκων από το κέντρο του κόκκου προς τα όρια του. Στο κέντρο των παλιών κόκκων, οι υποκόκκοι μπορεί να μην σχηματίζονται καλά ή μπορεί να έχουν πολύ κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς μικρής γωνίας. Κοντά στα όρια των κόκκων, οι προσανατολισμοί αυξάνουν και σε υψηλότερους ρυθμούς παραμόρφωσης σχηματίζονται κόκκοι υψηλής ενέργειας κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται μια μερικώς ανακρυσταλλωμένη μικροδομή όπως αυτή της Εικόνας 43.



Εικόνα 43: (a) Ανάπτυξη οδοντώσεων στα όρια των υποκόκκων με μεγάλη γωνίας κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού, (b) παραμόρφωση και (c)περιστροφή των ορίων των υποκόκκων (39).

Οι μηχανισμοί της δυναμικής ανακρυστάλλωσης με προοδευτική περιστροφή του πλέγματος δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως και σύμφωνα με την παγκόσμια βιβλιογραφία πραγματοποιούνται σε υλικά που η κίνηση των διαταραχών αναστέλλεται είτε από έλλειψη επιπέδων ολίσθησης (lack of slip systems) όπως συμβαίνει στα κράματα μαγνησίου είτε από την επίδραση των διαλυμένων ατόμων (solute drag) όπως συμβαίνει στα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου. Επιπρόσθετα, είναι πιθανό η συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση να σχετίζεται με την ανομοιογενή πλαστικότητα και την επιταχυνόμενη δυναμική αποκατάσταση στα όρια των κόκκων.

2.5.Παραγωγή και μεταφορά θερμότητας

Η παραγωγή θερμότητας κατά την διάρκεια της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση διέπεται από δύο κύριους μηχανισμούς. Ο πρώτος είναι λόγω της τριβής του εργαλείου πάνω στα προς συγκόλληση δοκίμια ,όπως έχει αναλυθεί και παραπάνω, και ο δεύτερος μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης όπου η θερμότητα μεταφέρεται στην επιφάνεια εργασίας σύμφωνα με τον κανόνα της αγωγής θερμότητας του Fourier (Fourier's law of heat conduction). Σε περίπτωση επίλυσης προβλήματος με μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης, το θερμοκρασιακό πεδίο T, το οποίο αποτελεί συνάρτηση του χρόνου t και των χωρικών συντεταγμένων (x,y,z), υπολογίζεται από την τρισδιάστατη μη γραμμική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας στην οποία το μετακινούμενο καρτεσιανό σύστημα προς την θετική y κατεύθυνση γράφεται ως εξής (Εξίσωση 2) (42):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)+ \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho\, Cp\, \left(\frac{\partial T}{\partial t}-V_T \frac{\partial T}{\partial y}\right) \qquad [2]$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα, Cp η ειδική θερμότητα, k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού προς συγκόλληση, Q ο ρυθμός της παραγωγής θερμότητας και VT η οριζόντια ταχύτητα της συγκόλλησης.

Οι συνοριακές συνθήκες για το θερμικό μοντέλο της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση ορίζονται ως οι επιφανειακές αλληλεπιδράσεις του τομέα λύσης (solution domain). Η αρχική συνθήκη για τον υπολογισμό ορίζεται ως εξής (Εξίσωση 3):

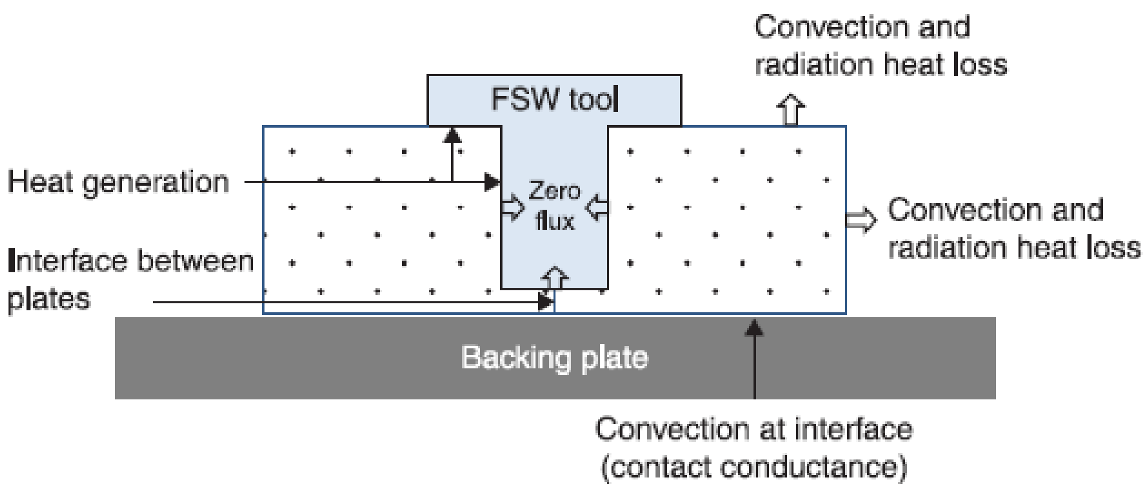
$$T(x,y,z,0)=Ti \qquad [3]$$

Όπου Ti η θερμοκρασία περιβάλλοντος για t=0. Η σχηματική απεικόνιση της εξίσωσης φαίνεται και στην Εικόνα 44.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 44, κατά την διάρκεια της FSW, υπάρχει απώλεια θερμότητας μέσω συναγωγής (convection) και μέσω ακτινοβολίας από την επάνω και την πλευρική επιφάνεια ενώ στην κάτω επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων παρατηρείται απώλεια θερμότητας μόνο μέσω συναγωγής. Η διεπιφάνεια εργαλείου-τεμαχίου εργασίας λειτουργεί ως πηγή θερμότητας τόσο εξαιτίας της τριβής όσο και της πλαστικής παραμόρφωσης. Ωστόσο, η μεταφορά θερμότητας προς το εργαλείο συνήθως θεωρείται αμελητέα. Από μαθηματική σκοπιά, αυτή η θεώρηση μεταφράζεται ως εξής:

$$k\,\frac{\partial T}{\partial n} = h\,(T - T_0) + \varepsilon\,\sigma\,(T_0^4 - T^4) - q_s \qquad [4]$$

Όπου n το κανονικό διάνυσμα της κατεύθυνσης τις συνοριακής συνθήκης, h ο συντελεστής convection, q_s το τόξο θερμότητας μεταξύ εργαλείου και επιφάνειας εργασίας, ε emissivity και σ η σταθερά Stefan-Boltzmann.



Εικόνα 44: Σχηματική απεικόνιση των συνοριακών συνθηκών κατά την διάρκεια συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (42).

Πρέπει ακόμη να αναφερθεί ότι υπάρχει απευθείας επαφή μεταξύ της πλάκας στήριξης και της κάτω επιφάνειας των προς συγκόλληση τεμαχίων. Για αυτήν την σχέση θεωρείται ότι η απώλεια θερμότητας είναι ομοιόμορφη σε όλη την πλάκα στήριξης και είναι ισοδύναμη με αυτήν στο κάτω μέρος της επιφάνειας εργασίας. Έτσι μειώνεται η πολυπλοκότητα της μοντελοποίησης του προβλήματος και κατ' επέκταση ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του (42).

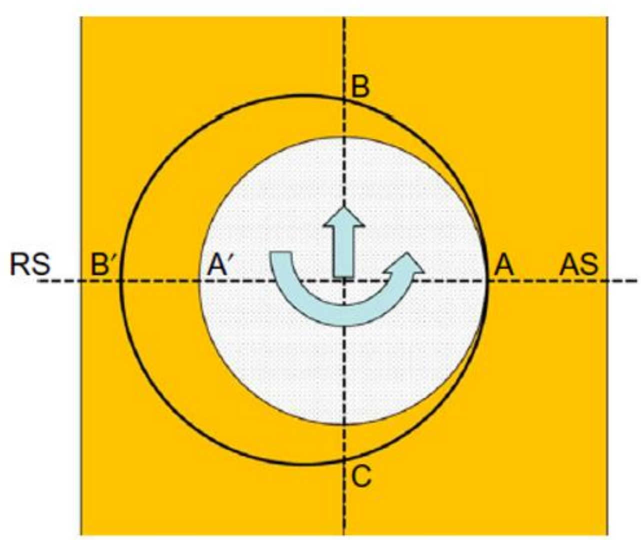
2.6. Ροή υλικού

Όπως προαναφέρθηκε, η ροή του υλικού κατά την διάρκεια μιας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έχει τεράστια επιρροή στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Επομένως, η μελέτη και η κατανόηση της οδηγεί στην αποτροπή ατελειών που ενδέχεται να προκύψουν.

Η ροή του υλικού στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση οφείλεται:

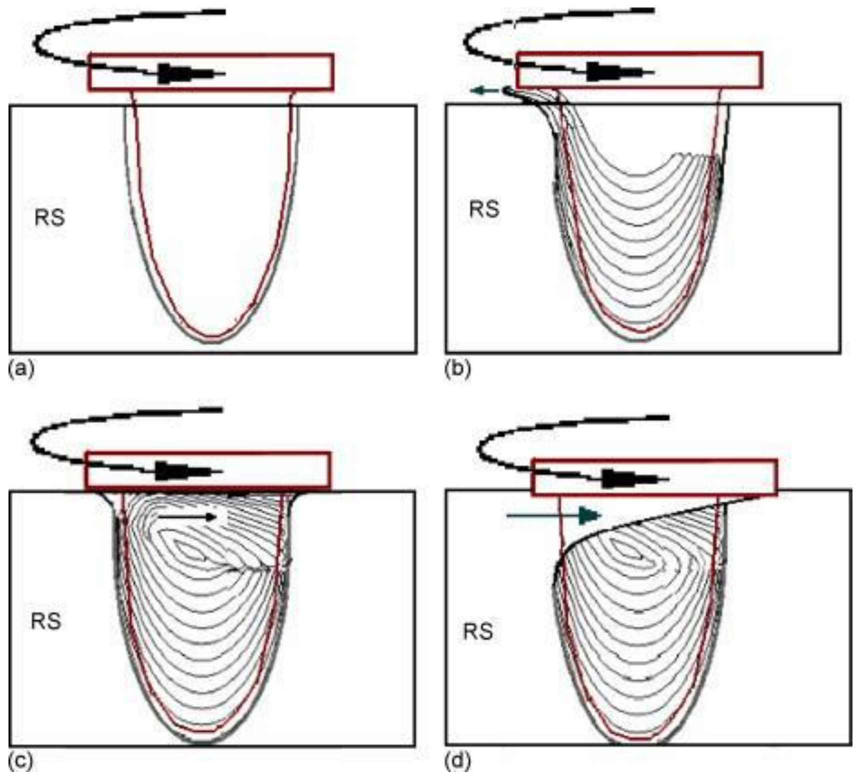
1) Στο περιαυχένιο όπου η μεταφορά του υλικού γίνεται κατ' όγκο.
2) Στον πείρο όπου η μεταφορά του υλικού γίνεται κατά στρώματα.
3) Στην σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου συγκόλλησης και του δοκιμίου.

Η ροή υλικού που οφείλεται στον πείρο λαμβάνει χώρα κατά την αλληλεπίδραση του μετάλλου βάσης με τον πείρο του εργαλείου στη περιοχή της συγκόλλησης. Καθώς ο πείρος βυθίζεται στο μέταλλο βάσης, δημιουργείται μία κοιλότητα. Το σχήμα της κοιλότητας παίρνει τη μορφή του εξωτερικού προφίλ του πείρου. Με την κίνηση του εργαλείου, το υλικό στην πρόσθια ακμή ρέει μέσω της υποχωρούσας πλευράς (RS) προς την πίσω ακμή. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης, το πλαστικοποιημένο υλικό ρέει μεταξύ του εργαλείου και του σχετικά ψυχρότερου μετάλλου βάσης. Αν η αντίσταση στη ροή υλικού μεταξύ του εργαλείου και του σχετικά πιο ψυχρού μετάλλου βάσης είναι υψηλή, το υλικό θα προσπαθήσει να διαφύγει έξω από την κοιλότητα συγκόλλησης αντί να φθάσει στην προωθούμενη πλευρά. Η αντίσταση στην ροή του υλικού στην πλευρά που υποχωρεί εξαρτάται από το πλάτος του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από τον πείρο και από τον όγκο του υλικού που μεταφέρεται ανά περιστροφή (43).



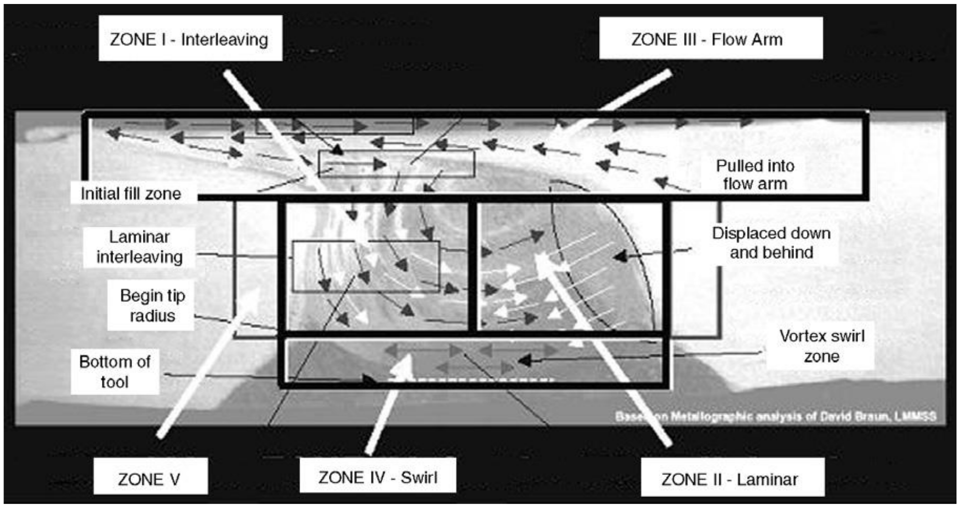
Εικόνα 45: Οπτική απεικόνιση της ροής του υλικού κατά την διάρκεια της FSW για όμοια υλικά.

Η ροή υλικού που προκαλείται από το περιαυχένιο αφορά στην κίνηση του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης, στην περιοχή κοντά στο εργαλείο. Η κίνηση αυτή προκαλείται από την περιστροφή του εργαλείου και από την τριβή μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 46, κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, το υλικό μεταφέρεται από την υποχωρούσα στην προωθημένη πλευρά μέσω της επιφάνειας του περιαυχενίου (3).



Εικόνα 46: Σχηματική απεικόνιση: (a), (b) Ροή προκαλούμενη από τον πείρο, σε στρώσεις και (c), (d) Ροή προκαλούμενη από το περιαυχένιο σε όλο τον όγκο του υλικού (3).

Η περιστροφική κίνηση του υλικού που προκαλεί την ανάδευση και την ροή του υλικού δημιουργεί 5 ζώνες κατά την συγκόλληση (Εικόνα 47). Οι ζώνες Ι και ΙΙ αντιπροσωπεύουν τις ζώνες εξώθησης στην υποχωρούσα (RS) και την προωθημένη (AS) πλευρά αντίστοιχα και η ζώνη ΙΙΙ βρίσκεται στην άνω επιφάνεια της ζώνης εξώθησης και αποτελείται από υλικό το οποίο προωθείται λόγω του περιαυχενίου από την υποχωρούσα στην προωθημένη πλευρά. Η ζώνη IV είναι η ζώνη που λαμβάνει χώρα ο στροβιλισμός του υλικού στην περιοχή γύρω και κάτω από την κορυφή του πείρου. Τέλος, ζώνη V ονομάζεται η ζώνη ανακυκλοφορίας του υλικού (recirculation zone) και μπορεί να σχηματιστεί όταν αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όπου ο όγκος του υλικού που κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω είναι μεγαλύτερος από τον διαθέσιμο πίσω από τον πείρο καθώς προωθείται κατά το μήκος της συγκόλλησης (35).



Εικόνα 47: Οι ζώνες της ροής του υλικού κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (15).

Η πρώτη μέθοδος για την μελέτη της ροής του υλικού και την πρόβλεψη και αποφυγή των ατελειών ήταν η χρήση δεικτών όπου παρατηρούνταν η μεταβολή ενός σημείου πριν και μετά το πέρας της συγκόλλησης (marker insert technique). Ωστόσο, η προσομοίωση με αυτήν την μέθοδο γινόταν υποθετικά γιατί οι δείκτες δεν είχαν την δυνατότητα να δώσουν πληροφορίες για την θέση τους καθ’ όλη την διάρκεια της διαδικασίας.

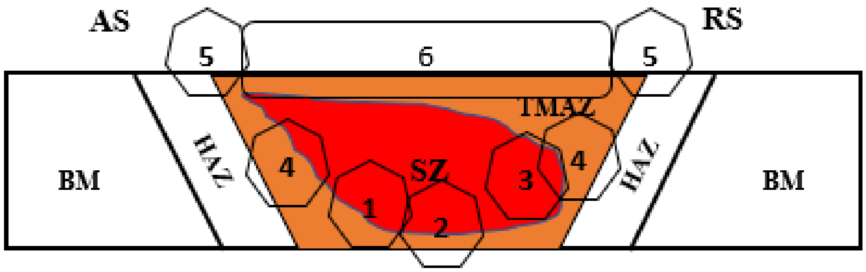
Τα τελευταία χρόνια όμως, με την άνθηση των υπολογιστικών μεθόδων, έχει επιτευχθεί η αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων που επιτρέπει την εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων της συγκόλλησης ανάλογα με τα δεδομένα που εισάγονται. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η προσομοίωση αποτελεί μια ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία καθώς περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση μεταξύ θερμικών και μηχανικών φαινομένων (44).

2.7. Defects

Κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, όπως και σε κάθε είδος συγκόλλησης, εμφανίζονται ατέλειες που συνήθως οφείλονται στον τρόπο ροής του υλικού, τις παραμέτρους διεξαγωγής της διαδικασίας (περιστροφική ταχύτητα εργαλείου, οριζόντια ταχύτητα συγκόλλησης, γεωμετρία του εργαλείου, γωνία κλίσης του εργαλείου κ.ά.) αλλά και την γεωμετρία της συγκόλλησης (45).

Επίσης, τα παραγόμενα ποσά θερμότητας επηρεάζουν άμεσα τον σχηματισμό ατελειών. Συγκεκριμένα, όταν η θερμότητα που παράγεται είναι αρκετά υψηλότερη από την ιδανική, είναι αρκετά πιθανό να σχηματιστούν ενδομεταλλικές ενώσεις οι οποίες είναι σκληρές και ψαθυρές και έχουν ως αποτέλεσμα να την μείωση της ολκιμότητας και της αντοχής του συγκολλημένου υλικού. Αντίθετα, για χαμηλές τιμές εισροής θερμότητας, εμφανίζεται ανεπαρκές μαλάκωμα του υλικού και αυξάνεται η τάση ροής (flow stress) η οποία οδηγεί σε ανεπαρκή ανάμειξη των υλικών (14).

Οι ατέλειες μπορεί να είναι τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές και μπορούν να επηρεάσουν άμεσα ή έμμεσα την αντοχή του μετάλλου. Ακόμη, μερικά ελαττώματα μπορούν να εντοπιστούν με γυμνό μάτι ενώ άλλα απαιτούν την χρήση μικροσκοπίου. Τα πιο συνήθη ελαττώματα τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω παρουσιάζονται και στην Εικόνα 48 (46).

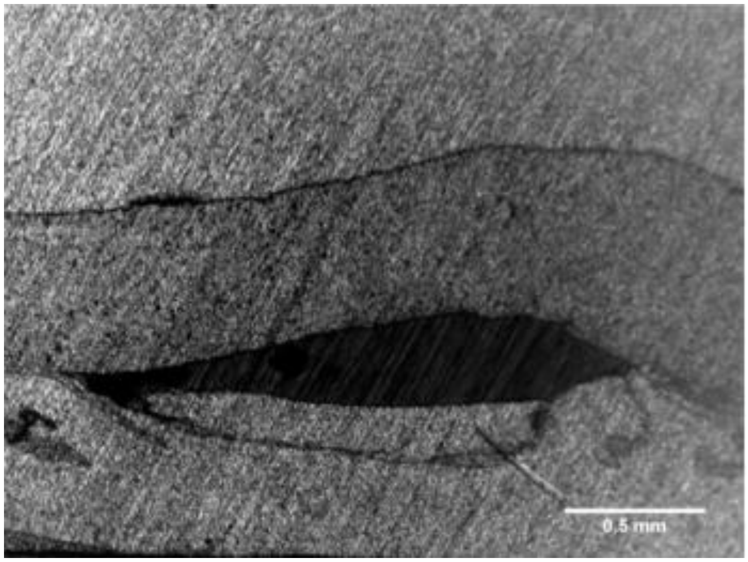


Εικόνα 48: Σχηματική απεικόνιση των ζωνών συγκόλλησης και των κυριότερων ατελειών που μπορούν να εμφανιστούν στην συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (1)Πόροι, Κενά, Τούνελ, (2) Περιορισμένη διείσδυση,(3)Kissing bond, (4)Hooking, (5)Flash, (6)Επιφανειακά ελαττώματα όπως ρηγματώσεις και σαγρέ επιφάνεια. (47).

Τα πιο διαδεδομένα ελαττώματα της συγκόλλησης θα τριβής με ανάδευση είναι τα εξής (47):

2.7.1.Ατέλειες τύπου τούνελ - Tunnel defect

Οι ατέλειες τύπου τούνελ αποτελούν ένα πολύ συνηθισμένο ελάττωμα στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση και μπορούν να υποβαθμίσουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων τεμαχίων. Συγκεκριμένα πρόκειται για σχηματισμούς που θυμίζουν τούνελ και στο εσωτερικό τους έχουν παγιδευμένο αέρα (Εικόνα 49). Εμφανίζονται αποκλειστικά στην προωθούμενη πλευρά και κοντά στο κάτω μέρος της ραφής της συγκόλλησης. Όπως και οι περισσότερες ατέλειες, έτσι και αυτή τύπου τούνελ δημιουργείται κυρίως από λανθασμένη επιλογή των παραμέτρων της συγκόλλησης αλλά και λόγω δυσανάλογων ποσών παραγόμενης θερμότητας που με την σειρά τους επηρεάζουν και την ροή του υλικού. Επίσης, οι ατέλειες τύπου τούνελ είναι συνεχείς σε όλο το μήκος της συγκόλλησης και ενδέχεται να φτάσουν μέχρι την επιφάνεια της (47).

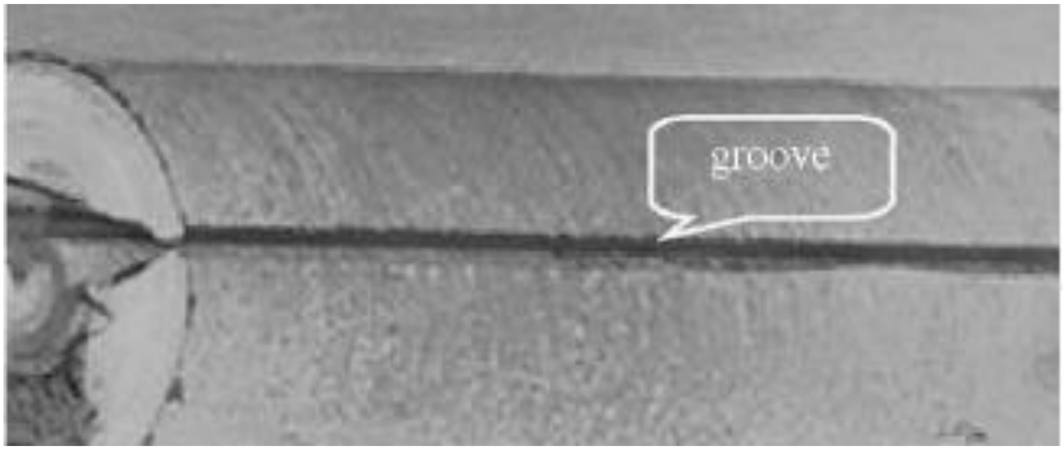


Εικόνα 49: Tunnel Defect. (48)

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται μια μικρογραφία ενός κράματος αλουμινίου – πυριτίου το οποίο έχει συγκολληθεί υπό έλλειμα εισροής θερμότητας και ως αποτέλεσμα δημιουργήθηκε η ατέλεια τύπου τούνελ. Ένα τέτοιο ελάττωμα καθιστά, κατά κανόνα, το τελικό προϊόν μη αποδεκτό, το οποίο όμως θα μπορούσε να εντοπιστεί με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις και συγκεκριμένα όταν πρόκειται για την κατασκευή εναλλακτών θερμότητας, τέτοια φαινόμενα είναι άκρως επιθυμητά. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται friction stir channeling (45).

2.7.2. Ατέλεια σε σχήμα αυλακώσεων/ραβδώσεων (Groove / Channel like defect)

Γενικά, οι ραβδώσεις είναι μακριές και οριζόντιες αυλακώσεις που δημιουργούνται στην προωθούμενη πλευρά (AS). Η ατέλεια τύπου groove, όπως και η προηγούμενη ατέλεια, προκαλείται κυρίως από ανεπαρκή ποσά εισροής θερμότητας κατά την συγκόλληση. Κατ΄ επέκταση μπορεί να οφείλεται σε επιλογή λανθασμένων παραμέτρων συγκόλλησης με μεγαλύτερο ρόλο να παίζει η γεωμετρία του εργαλείου. Όπως λοιπόν είναι αντιληπτό υποβαθμίζονται σε σημαντικό βαθμό τόσο η εμφάνιση όσο και οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, οι οποίες όμως μπορούν μετέπειτα να επιδιορθωθούν με την μέθοδο friction stir repair welding (49) (50).

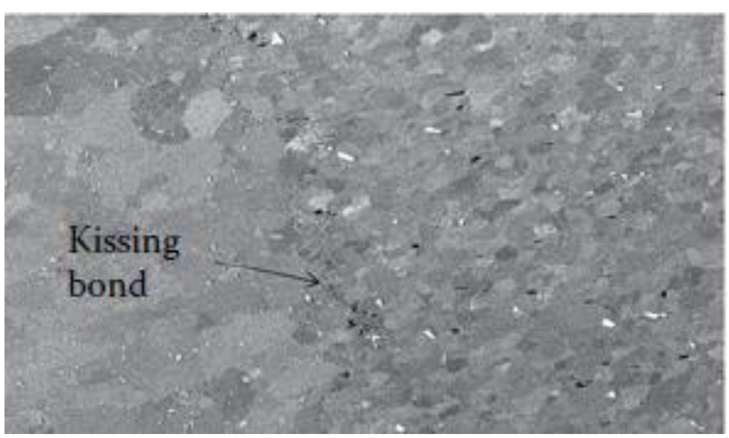


Εικόνα 50: Ατέλεια τύπου Groove like defect (51).

2.7.3. «Kissing bond/lazy s»

Η ατέλεια τύπου «kissing bond» αποτελεί μια ατέλεια στερεής κατάστασης, που δημιουργείται λόγω ανεπαρκούς πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού λόγω της περιορισμένης ανάδευσης του. Η έλλειψη πλαστικής παραμόρφωσης οφείλεται κυρίως σε λανθασμένες επιλογές των ταχυτήτων συγκόλλησης, όπως αναλύθηκε και παραπάνω. Έτσι, ειδικά για τα κράματα αλουμινίου, το στρώμα του οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) σπάει μερικώς και μειώνει τον ρυθμό διάχυσης του πλαστικοποιημένου υλικού (49).

Το kissing bond εμφανίζεται στον πυρήνα της συγκόλλησης όπου τα υλικά βρίσκονται σε στενή επαφή αλλά δεν συνδέονται μηχανικά. Η ευρεία επέκταση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση περιορίζεται λόγω της αδυναμίας εντοπισμού τέτοιου είδους ελαττωμάτων με τις υπάρχουσες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Ο τομέας της αεροδιαστημικής συγκεκριμένα αντιμετωπίζει προβλήματα λόγω αυτού του φαινομένου καθώς μειώνεται η αντοχή σε κόπωση των υλικών και η γενικότερη απόδοση τους (52).



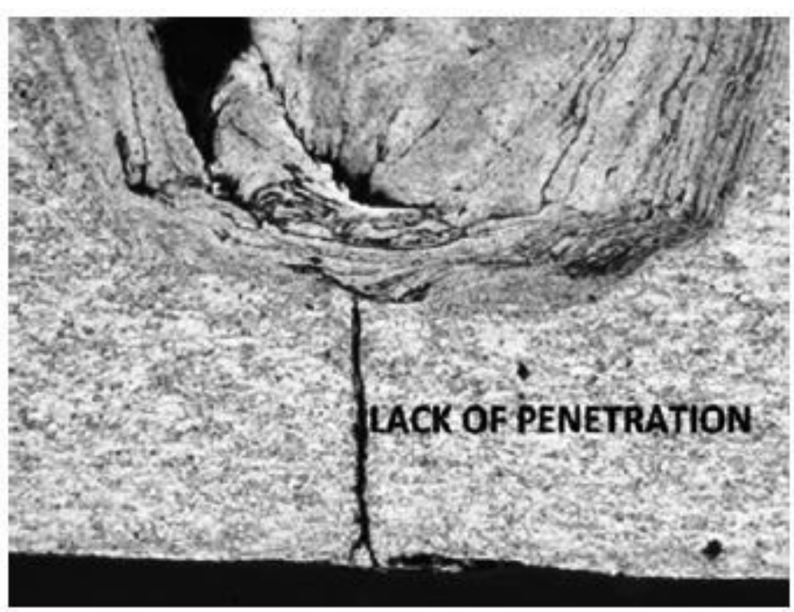
Εικόνα 51: Ατέλεια τύπου kissing bond (14).

2.7.4.Ατέλειες λόγω μη κανονικής ανάδευσης / Lack of penetration

Όταν κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση η διεπιφάνεια μεταξύ των δοκιμίων δεν είναι πλήρως συγκολλημένη μέχρι και τον πυρήνα, παρατηρείται το φαινόμενο της ανεπαρκούς διείσδυσης του υλικού που κατ΄επέκταση οδηγεί σε μη κανονική ανάδευση του υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός προϊόντος με ιδιαίτερα χαμηλές μηχανικές ιδιότητες.

Αυτού του είδους η ατέλεια μπορεί να οφείλεται στο πολύ μικρό μήκος του πείρου, στην λανθασμένη γεωμετρία του εργαλείου, στην επιλογή δοκιμίων διαφορετικού πάχους καθώς και στην ανεπαρκή εισροή θερμότητας κατά την συγκόλληση. Επομένως, η έλλειψη πρόληψης της ανεπαρκούς διείσδυσης εξαρτάται από την ορθή επιλογή των παραμέτρων της συγκόλλησης. Επίσης κρίνεται αναγκαία η ειδική προετοιμασία ολόκληρης της διάταξης της συγκόλλησης. Για παράδειγμα, η επιλογή υλικού για την βάση στήριξης με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα κρίνεται απαραίτητη έτσι ώστε να μην απορροφώνται μεγάλα ποσά θερμότητας από αυτήν και να αποφευχθούν ανομοιόμορφα φράγματα σκέδασης (scattering fragments) στην ζώνη ανάδευσης (49).

Ωστόσο, οι ασυνέχειες λόγω ανεπαρκούς διείσδυσης του πείρου στα προς συγκόλληση τεμάχια μπορούν εύκολα να εντοπιστούν με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Συγκεκριμένα, μπορεί να γίνει χρήση υπερηχητικών κυμάτων, διεισδυτικών υγρών αλλά και χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (conventional/pulsed eddy current) (53).



Εικόνα 52: Ατέλεια λόγω μη επαρκούς διείσδυσης (49).

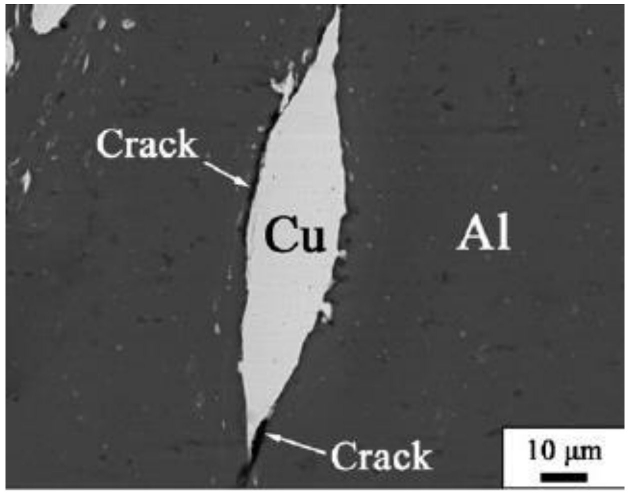
2.7.5.Keyhole / Exit hole defect

Στην διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση και αφότου έχει ολοκληρωθεί η γραμμή της συγκόλλησης, ο πείρος αφαιρείται από την τελική του θέση προκαλώντας έναν τύπο ελαττώματος γνωστό και ως τρύπα εξόδου (exit hole defect) λόγω της σημαντικού μεγέθους τρύπας που αφήνει. Προφανώς η εν λόγω ατέλεια είναι ανεπιθύμητη στην FSW λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων και της ταπείνωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλημένου προϊόντος. Ωστόσο, το συγκεκριμένο ελάττωμα είναι αναπόφευκτο αλλά μπορεί να παρακαμφθεί, με την περαιτέρω συνέχιση της διαδικασίας σε ειδικά διαμορφωμένες πλάκες ώστε ο πείρος να μην εξέλθει από ωφέλιμο μήκος. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει χρήση πείρου τύπου semi-consumable stir pin (Filling Friction Stir Welding) (54).

Εικόνα 53: Keyhole defect (55).

2.7.6.Ρηγματώσεις (Cracks)

Η εμφάνιση ρηγματώσεων συμβαίνει κυρίως στην συγκόλληση FSW ανόμοιων υλικών λόγω των διαφορετικών σημείων τήξης τους και της ακατάλληλης ροής του υλικού στην ζώνη ανάδευσης. Οι ρηγματώσεις μπορούν να βρεθούν κυρίως κάτω από το περιαυχένιο του εργαλείου. Κατά την FSW ανόμοιων μετάλλων, σχηματίζεται μία ζώνη ευαίσθητη στον σχηματισμό ενδομεταλλικών ενώσεων. Αυτό το στρώμα έχει ιδιαίτερα ψαθυρή συμπεριφορά και είναι ευάλωτο σε ρηγματώσεις και άλλου τύπου ατέλειες. Η εισροή μεγάλων ποσών θερμότητας λόγω χαμηλής περιστροφικής ταχύτητας ή μικρής ταχύτητας συγκόλλησης του εργαλείου συμβάλλει στον σχηματισμό λεπτότερων στρωμάτων ενδομεταλλικών ενώσεων (47).



Εικόνα 54: Εικόνα από SEM όπου απεικονίζεται ρηγμάτωση έπειτα από συγκόλληση FSW ανόμοιων μετάλλων αλουμινίου – χαλκού (56).

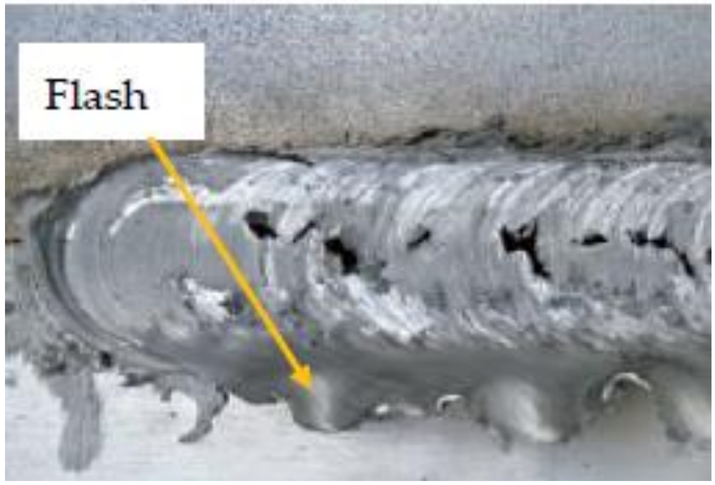
Σε πείραμα που διεξήχθη προκειμένου να μελετηθούν οι ατέλειες κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου χαλκού, παρατηρήθηκε η δημιουργία ρηγματώσεων γύρω από τα στρώματα του χαλκού (Εικόνα 54). Αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου που μικροσκοπικά οδήγησε στην δυσκολία αντίδρασης και ανάμειξης των κομματιών του χαλκού με την μήτρα του αλουμινίου (56).

Ακόμη, έχει βρεθεί ότι για την περίπτωση συγκόλλησης αλουμινίου και χαλκού, η απόκλιση του εργαλείου από το κέντρο της ζώνης συγκόλλησης (tool-pin offset) επηρεάζει την εμφάνιση ρηγματώσεων. Ειδικότερα, βρέθηκε ότι ο πείρος θα πρέπει να είναι ελαφρά πιο κοντά στο δοκίμιο του αλουμινίου έτσι ώστε να αποφευχθεί η απώλεια θερμότητας του αλουμινίου από τον χαλκό λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή θερμικής διαστολής του. Έτσι λοιπόν, όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση ατέλειας, θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά οι ιδανικές παράμετροι για την εκπόνηση της κάθε συγκόλλησης (57).

2.7.7.Ατέλεια τύπου «Flash» (γρέζι, απορριπτόμενο εξωθούμενο υλικό)

Κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, τα υψηλά ποσοστά εισροής θερμότητας οδηγούν στην υπέρ-πλαστικοποίηση των φύλλων του αλουμινίου. Μερικές φορές λόγω ύπαρξης μεγαλύτερης κάθετης αξονικής δύναμης από την προβλεπόμενη, το πλαστικοποιημένο υλικό τείνει να εξωθείται στην άνω επιφάνεια της συγκόλλησης δημιουργώντας γρέζι, την λεγόμενη ατέλεια τύπου «flash» (58).

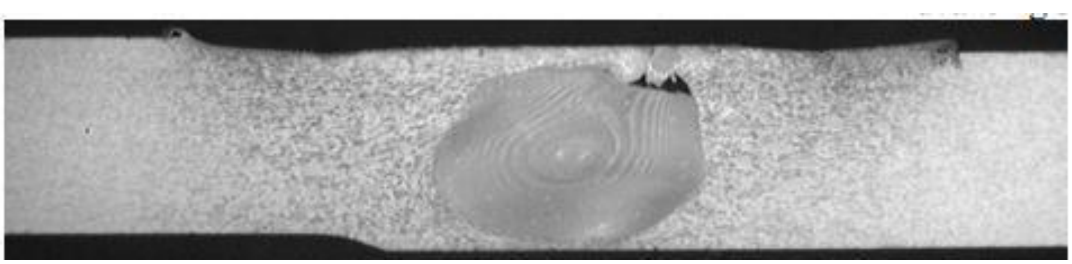
Ακόμη, η χρήση επίπεδου περιαυχενίου τείνει να προκαλεί ελάττωμα τύπου «flash» στην συγκολλημένη επιφάνεια, καθώς δεν έχει την δυνατότητα να παγιδεύει το ρέον υλικό στο κάτω του μέρος. Επομένως, προκειμένου να αποφευχθεί αυτή η ατέλεια, θα πρέπει να ασκείται η ιδανική κάθετη αξονική δύναμη, να χρησιμοποιείται ειδικά σχεδιασμένο εργαλείο με ιδανική κλίση και τέλος να εκτελείται η συγκόλληση με το εργαλείο να ακολουθεί ακριβώς την διαδρομή της γραμμής της συγκόλλησης (0 tool-pin offset) (47).



Εικόνα 55: Ατέλεια τύπου flash (58).

2.7.8.Σχηματισμός διακενώσεων (Voids)

Η παρουσία κενών κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί ένα κοινό ελάττωμα. Η δυναμική του ρευστού που σχετίζεται με την ροή του πλαστικοποιημένου υλικού στον πυρήνα της συγκόλλησης παίζει καθοριστικό ρόλο στον σχηματισμό τέτοιων κενών. Αν και οι υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης προάγουν πιο οικονομικές συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση και με μεγαλύτερη παραγωγικότητα, οι υπερβολικά υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης οδηγούν στον σχηματισμό κενών κάτω από την επιφάνεια της συγκόλλησης ή στο άκρο της προωθούμενης πλευράς (AS). Επίσης, σε περίπτωση περαιτέρω αύξησης της ταχύτητας συγκόλλησης, μπορούν να δημιουργηθούν ακόμα μεγαλύτερα κενά (wormhole defect) που υποβαθμίζουν ακόμα περισσότερο την ποιότητα του συγκολλημένου προϊόντος (59).



Εικόνα 56: Σχηματισμός κενού κατά την διάρκεια συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (59).

2.8.Πρόληψη ατελειών (Defects prevention)

Όπως είναι αντιληπτό από την παρατήρηση των παραπάνω ατελειών και τις επιπτώσεις που έχουν στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, κρίνεται άκρως σημαντική η πρόληψη τους. Είναι γεγονός ότι όλες οι ατέλειες σχετίζονται με τις παραμέτρους λειτουργίας της διαδικασίας της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, τόσο ο πείρος όσο και το περιαυχένιο που απαρτίζουν το εργαλείο, πρέπει να έχουν την κατάλληλη γεωμετρία και διαστάσεις. Επομένως, οι εναλλαγές σε αυτές τις μεταβλητές επηρεάζουν άμεσα παραγόμενη θερμότητα, την ροή του πλαστικοποιημένου υλικού αλλά και τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Άρα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επιλέγονται όλες οι παράμετροι σε συνάρτηση με το σχεδιαστικό προφίλ του εργαλείου έτσι ώστε να δημιουργούνται οι ιδανικές συνθήκες συγκόλλησης και να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες για την εμφάνιση ελαττωμάτων (47).

2.8. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που εμφανίζει η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι τα εξής (14) (16) (60):

- Αποτελεί μια διαδικασία στερεής κατάστασης και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα κράματα αλουμινίου αποφεύγοντας τα προβλήματα της θερμής ρηγμάτωσης και των ακαθαρσιών που εμφανίζονται σε όλες τις υπόλοιπές συγκολλήσεις τήξης των αλουμινίων.
- Το παραγόμενο συγκολλημένο προϊόν εμφανίζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από το μητρικό υλικό και λεπτομερής ανακρυσταλλωμένη μικροδομή.
- Αποτελεί μια ασφαλή παραγωγική διαδικασία καθώς δεν εμπλέκονται τοξικά αέρια.
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη εξειδίκευση του χειριστή της διαδικασίας καθώς αποτελεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία.
- Δεν απαιτείται αέριο προστασίας ή ηλεκτρόδιο πλήρωσης για τα κράματα του αλουμινίου.
- Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς την διάταξη των τεμαχίων, δηλαδή η διαδικασία μπορεί να διεξαχθεί σε όλες τις θέσεις λόγω της απουσίας λουτρού τήγματος (weld pool).
- Η ζώνη επηρεασμένη από την θερμότητα είναι μικρή και έτσι βελτιώνεται η ποιότητα των συγκολλημένων τεμαχίων για θερμικά επεξεργάσιμα κράματα.
- Παράγεται ομοιόμορφη λωρίδα συγκόλλησης (weld bead) με καλή εμφάνιση, άρα δεν απαιτούνται ιδιαίτερες μηχανικές κατεργασίες μετά το πέρας της συγκόλλησης.
- Δεν απαιτείται εκτενής προετοιμασία των δειγμάτων πριν την έναρξη της συγκόλλησης.
- Έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο καθώς δεν απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας για την διεξαγωγή της διαδικασίας.

- Υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και ρυθμοί ολοκλήρωσης των συγκολλήσεων. Σε συγκολλήσεις λεπτών τεμαχίων, η FSW ανταγωνίζεται τις ταχύτητες συγκόλλησης των συγκολλήσεων τήξης ενώ για παχύτερα υλικά η FSW μπορεί να ολοκληρώσει επιτυχώς την συγκόλληση με ένα μόνο πέρασμα όταν οι υπόλοιπες μέθοδοι απαιτούν περισσότερα. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην δημιουργία συγκολλήσεων σε σχετικά μικρότερο χρόνο, παρόλο που οι ταχύτητες συγκόλλησης της FSW μπορεί να είναι χαμηλότερες.

Ωστόσο πέρα από τις ατέλειες λόγω των λανθασμένων παραμέτρων κατά συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, η διαδικασία παρουσιάζει και τα εξής μειονεκτήματα:

- Ο εξοπλισμός είναι ιδιαίτερα ακριβός σε σχέση με τον εξοπλισμό άλλων μεθόδων συγκόλλησης.
- Πιο περιορισμένες οι δυνατότητες συγκόλλησης συγκριτικά με συγκολλήσεις τόξου λόγω της αυτοματοποιημένης φύσης της διαδικασίας.
- Πιο αργή παραγωγή συγκολλήσεων σε σχέση με τεχνικές fusion welding.
- Απαιτείται συχνή αλλαγή των εργαλείων ανάλογα με το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων.
- Τα προς συγκόλληση ελάσματα πρέπει να πακτώνονται από εργαλεία συγκράτησης τα οποία, πρέπει να αντισταθμίζουν τις εφαρμοζόμενες από την μηχανή δυνάμεις και να αποτρέψουν την μετακίνηση των τεμαχίων.

2.9 Εφαρμογές της μεθόδου

Η χρήση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε μια ποικιλία βιομηχανιών έχει παρουσιάσει εντυπωσιακά αποτελέσματα όσον αφορά την αποδοτικότητα και την μείωση του κόστους. Η FSW βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ βιομηχανικό φάσμα όπως η αεροδιαστημική, η ναυπηγική, η ρομποτική, οι σιδηρόδρομοι και η αυτοκινητοβιομηχανία. Η συγκόλληση ανόμοιων υλικών γίνεται όλο και πιο αποδοτική καθώς παράγει προϊόντα που καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες της βιομηχανίας για μειωμένο βάρος, μεγάλες αντοχές και άριστη λειτουργικότητα (14).

Η FSW έχει υιοθετηθεί εκτενώς για συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, κραμάτων αλουμινίου με χαλκού αλλά και κραμάτων αλουμινίου με χάλυβα. Οι συγκολλήσεις αυτές είναι μεγάλης σημασίας καθώς διατηρούν τις ωφέλιμες ιδιότητες και των δύο υλικών και τις συνδυάζουν για βέλτιστα αποτελέσματα (14).

2.9.1.Εφαρμογές της FSW στην ναυπηγική

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή θαλάσσιων σκαφών. Η συγκεκριμένη μέθοδος συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε αρχικά για κράματα αλουμινίου σειράς 5XXX και 6XXX για πάνελ καταψυκτών ψαριών, πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων και για δομές αμαξώματος πλοίων. Το μεγαλύτερο επιβατηγό-οχηματαγωγό πλοίο που κατασκευάστηκε εξ ’ολοκλήρου με την μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι το Super Liner Ogasawara, το οποίο ναυπηγήθηκε το 2004 από την ναυπηγική βιομηχανία της Ιαπωνίας σε συνεργασία με την εταιρία Mitsui Engineering. Ακόμη, η FSW έχει χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση αλουμινένιων πάνελ του Sea Fighter, ενός πολεμικού πλοίου των ΗΠΑ κατασκευασμένο από τους Nichols Brothers (61).

Εικόνα 57: Super Liner Ogasawara (61).

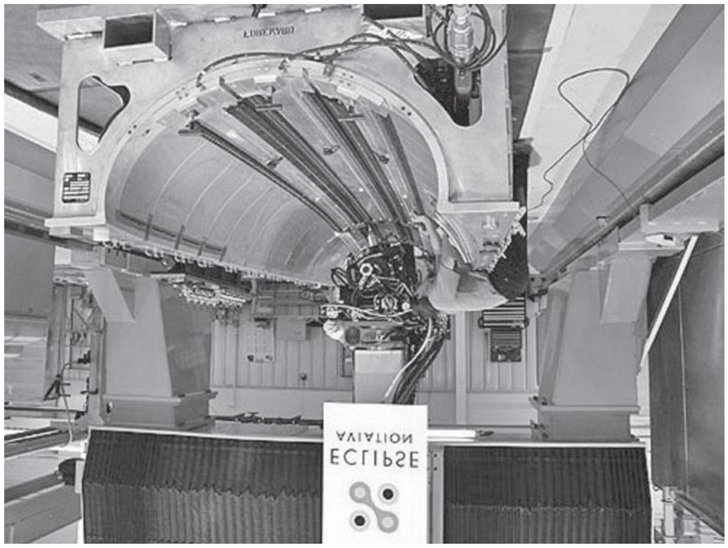
Εικόνα 58: Η πλώρη του Sea Fighter (61).

2.9.2.Εφαρμογές της FSW στην αεροδιαστημική

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία των ΗΠΑ, η μέθοδος δια τριβής με συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο παρελθόν για την κατασκευή μεγάλων δεξαμενών καυσίμων από κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής για τα συστήματα εκτόξευσης των δορυφόρων. Ο πρώτος πύραυλος που στην κατασκευή του είχε συμβάλλει η FSW εκτοξεύθηκε το 1999 και ονομαζόταν Delta II. Συγκεκριμένα παράχθηκαν 2100 μέτρα συγκολλημένου προϊόντος χωρίς ατέλειες, πετυχαίνοντας ταυτοχρόνως εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Ακόμη, οι πιο σύγχρονοι πύραυλοι της SpaceX, Falcon 1 και Falcon 9 χρησιμοποιούν την FSW για την συγκόλληση των δεξαμενών υγρού οξυγόνου και των προωθητικών πυραύλων.

Εικόνα 59: Περιφερειακές και διαμήκης συγκολλήσεις FSW στην δεξαμενή του Falcon 9 πυραύλου της SpaceX. (61)

Ακόμη, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για την αντικατάσταση των παραδοσιακών μηχανικών συνδέσμων στις δομές των αεροπλάνων. Το πρώτο πολιτικό αεροσκάφος στο οποίο έγινε εκτενής χρήση της FSW ήταν το Eclipse 500 business jet που κατασκευάστηκε από την Eclipse Aviation Corporation και στο οποίο έλαβαν χώρα 259 συγκολλήσεις FSW (61).



Εικόνα 60: Διαδικασία συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση για την συγκόλληση stringer και spar στα αλουμινένια πάνελ της καμπίνας (61).

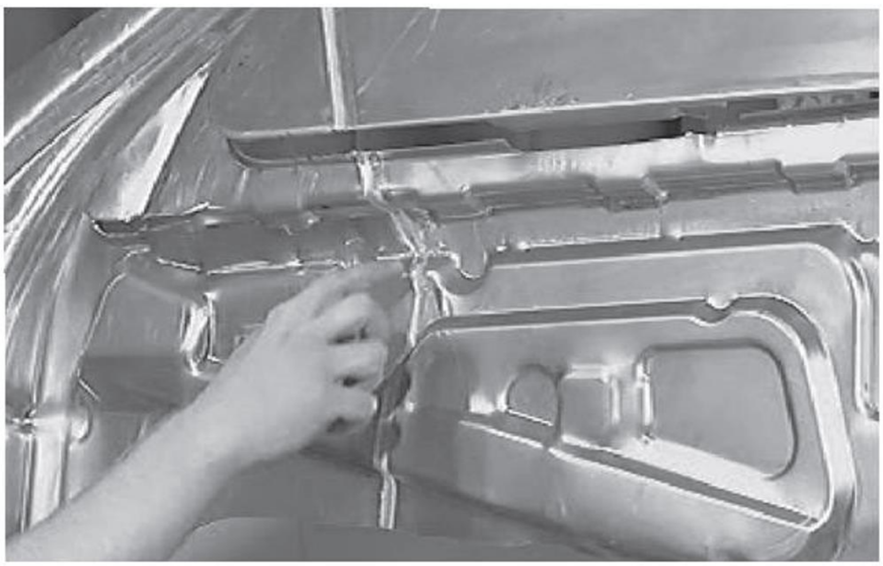
2.9.3.Εφαρμογές της FSW στους σιδηροδρόμους

Τα πάνελ αλουμινίου διέλασης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τρένων στην Ιαπωνία. Η σύνδεση των πάνελ αυτών επιτυγχάνεται με την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση καθώς παράγουν άριστα προϊόντα χωρίς ατέλειες με σχετικά χαμηλά κόστη παραγωγής. Η FSW βρίσκει χρήση στην σιδηροδρομική βιομηχανία από τις αρχές της $20^{ου}$ αιώνα. Συγκεκριμένα, από το 2001 χρησιμοποιείται για την συγκόλληση των πλαϊνών τοίχων των αμαξοστοιχιών ενώ από το 2002 η μέθοδος χρησιμοποιείται για την συγκόλληση σχετικά μεγάλου πάχους φύλλων αλουμινίου (έως 26mm) που απαρτίζουν το βασικό σώμα του τρένου (14).

Εικόνα 61:Το τρένο Channel Tunnel Rail Link από την Hitachi, για την κατασκευή του οποίου χρησιμοποιούνταν η FSW (61).

2.9.4.Εφαρμογές της FSW στην αυτοκινητοβιομηχανία

Τα αυτοκίνητα λόγω της φύσης της κατασκευής τους χρειάζονται συγκολλήσεις μικρού μήκους, επομένως και η FSW περιορίστηκε αρχικά στα εξαρτήματα των αναρτήσεων, στους τροχούς, στα παρελκόμενα των καθισμάτων κ.ά. Μερικές από τις αυτοκινητοβιομηχανίες που την υιοθέτησαν αρχικά για την κατασκευή των οχημάτων τους ήταν οι BMW, Chrysler, Ford, General Motors, Rover και Volvo. Οι ανάγκες της αυτοκινητοβιομηχανίας επέβαλαν την πλήρη αυτοματοποίηση της μεθόδου ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις πολύπλοκής γεωμετρίας διατηρώντας τα κόστη της διαδικασίας όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Η επιτυχημένη λειτουργεία της FSW, οδήγησε αργότερα την ανάπτυξη μιας νέας τεχνικής, της friction stir spot welding, παραλλαγή της FSW, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για μηχανικά μέρη αλουμινίου από αρκετούς κατασκευαστές αυτοκινήτων παγκοσμίως.



Εικόνα 62: Συγκόλληση FSW από το TWI για την BMW και την Land Rover (61).

Ακόμη, η Ford χρησιμοποίησε την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση για το κεντρικό τούνελ του Ford GT το 2005. Η χρησιμότητα του κεντρικού τούνελ είναι να παρέχει ακαμψία στο σασί του αυτοκινήτου και λειτουργεί επίσης ως δεξαμενή καυσίμου με ατμό (vapor tight fuel tank) (Εικόνα 63). Τέλος, και η Mazda χρησιμοποίησε την παραλλαγή της FSW, την FSSW για την κατασκευή της πίσω πόρτας και του καπό του RX-8 (Εικόνα 64).

Εικόνα 63: Το κεντρικό τούνελ του Ford GT συγκολλημένο με FSW όπου βρίσκεται η δεξαμενή καυσίμου.

Εικόνα 64: Το εξωτερικό πάνελ της πίσω πόρτας του Mazda RX-8.

2.9.5.Εφαρμογές της FSW στην πυρηνική βιομηχανία

Η σουηδική εταιρία Svensk Kärnbränslehantering (SKB) επέκτεινε την χρήση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση και στην πυρηνική βιομηχανία. Πιο συγκεκριμένα, με χρήση της FSW ενθυλακώνει και σφραγίζει τις κάψουλες (KBS-3) που περιέχουν ραδιενεργά πυρηνικά καύσιμα και τα οποία πρόκειται να εναποθετούν σε βάθος 500 μέτρων. Οι χάλκινες κάψουλες έχουν πάχος 50mm, διάμετρο άνω του ενός μέτρου και μήκος που αγγίζει τα 5 μέτρα. Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας επιτεύχθηκε με την συνεργασία της SKB με το Διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) ειδικά για συγκόλληση χαλκού πάχους 50mm, και επί του παρόντος, η διαδικασία εφαρμόζεται υπό συνθήκες παραγωγής για μη ραδιενεργά καύσιμα (61).

Εικόνα 65: Η χάλκινη κάψουλα εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων από την SKB, το καπάκι του οποίο συγκολλείται με FSW.

Εφαρμογές της FSW στην ηλεκτρική βιομηχανία

Η FSW βρίσκει εφαρμογή σε απλές και καθημερινές οικιακές ηλεκτρικές συσκευές. Για παράδειγμα, η Apple, η οποία καινοτόμησε στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών, χρησιμοποίησε την τεχνική προκειμένου να πλαισιώσει τις επιφάνειες του αλουμινίου των iMac. Η συγκεκριμένη μέθοδος επέτρεψε στους μηχανικούς της να κατασκευάσουν ένα προϊόν που εκτός από άριστη λειτουργικότητα παρέχει και καλαισθησία στον καταναλωτή, αφού δεν παρουσιάζει οπτικές ατέλειες καθώς δεν φαίνονται σημάδια συγκόλλησης στην περίμετρο της οθόνης (62).

Εικόνα 66: Χρήση της FSW στην οθόνη του iMac.

3.Αριθμητική προσομοίωση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.

Η ευρεία έρευνα που έχει διεξαχθεί παγκοσμίως αναφορικά με την μελέτη της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση δείχνει την πιθανή εφαρμογή της μεθόδου για την παραγωγή αποτελεσματικότερων και ποιοτικότερων συγκολλήσεων σε σχέση με συγκολλήσεις τήξης. Ωστόσο, η διεξαγωγή φυσικών πειραμάτων έχει συνήθως αυξημένα κόστη που προκύπτουν τόσο από την αγορά των υλικών όσο και από την χρήση του εξοπλισμού. Οι διαδικασίες αριθμητικής προσομοίωσης έρχονται όχι μόνο για να μειώσουν σημαντικά τα λειτουργικά αυτά κόστη αλλά πολλές φορές έχουν την δυνατότητα να υπολογίζουν παραμέτρους της διαδικασίας οι οποίες μερικές φορές δεν μπορούν να υπολογιστούν σε φυσικό πείραμα (63).

Γενικά, οι διαδικασίες αριθμητικής προσομοίωσης είναι μέθοδοι που δεν απαιτούν μεγάλα κόστη λειτουργίας και αποσκοπούν στην διερεύνηση και πρόβλεψη διαφορετικών φυσικών φαινομένων κατά την διάρκεια της FSW. Από την σκοπιά της μοντελοποίησης, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε αριθμητική προσομοίωση να ανταποκρίνονται και να πλησιάζουν όσο περισσότερο γίνεται σε πραγματικά δεδομένα. Αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση διαφορετικών παραμέτρων της διαδικασίας όπως η γεωμετρία των εργαλείων, η κατανομή της θερμοκρασίας, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας συγκόλλησης κ.ά. (44).

Πιο συγκεκριμένα, οι προβλέψεις του κάθε μοντέλου, πρέπει να μελετώνται σε βάθος για να κατανοηθεί η εξέλιξη της παραμόρφωσης και της μικροδομής του υλικού. Τα μοτίβα παραμόρφωσης και ροής του υλικού είναι σημαντικά για την αποφυγή δημιουργίας κενών και ελαττωμάτων κατά την συγκόλληση. Ακόμη, η παρακολούθηση των αλλαγών στην μικροδομή είναι απαραίτητη για την βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων διάβρωσης των παραγόμενων συγκολλήσεων. Επομένως, η ακριβής μοντελοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση θα επιτρέψει την ταχεία ανάπτυξη της διαδικασίας, ιδίως όσον αφορά τον σχεδιασμό και την γεωμετρία των εργαλείων (64).

Η αριθμητική προσομοίωση αποτελεί μια δύσκολη και περίπλοκη διαδικασία καθώς συνδυάζει τόσο θερμικά όσο και μηχανικά φαινόμενα. Τα μοντέλα της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πολυπλοκότητας, από απλά μοντέλα μεταφοράς θερμότητας, σε μοντέλα ροής μετάλλων και τέλος στα πλήρως συνδεδεμένα μοντέλα (fully coupled models), όπου η ροή (viscoplastic flow) και η μεταφορά θερμότητας μοντελλοποιούνται παράλληλα για να προβλέψουν την κατανομή της θερμοκρασίας και των τάσεων (44).

3.1.Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, γνωστή και ως ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, εκφράζει τις διαφορικές εξισώσεις σε ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων διαχωρίζοντας ένα μεγάλο πρόβλημα σε μικρότερα μέρη, τα πεπερασμένα στοιχεία. Οι λύσεις που λαμβάνονται από την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων στην συνέχεια εντάσσονται σε ένα μεγαλύτερο σύνολο εξισώσεων το οποίο μοντελοποιεί ολόκληρο το πρόβλημα. Για τον υπολογισμό της λύσεις χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, σκοπός των οποίων είναι να ελαχιστοποιήσουν το υπολογιζόμενο σφάλμα. Ο τομέας των μαθηματικών που προέρχονται αυτές οι τεχνικές λύσεις ονομάζεται ‘Λογισμός των μεταβολών (Calculus of variations)’ (65).

Τα βήματα για την επίλυση ενός γενικού συνεχούς προβλήματος με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

1.Διακριτοποίηση του μοντέλου

↓

2.Επιλογή κατάλληλου μοντέλου παρεμβολής η μετατόπισης

↓

3.Καθορισμός των συντελεστών φόρτωσης και των ιδιοτήτων των υλικών του μοντέλου.

↓

4.Συγκέντρωση των εξισώσεων των στοιχείων.

↓

5.Λύση για τις άγνωστες μετατοπίσεις στα κομβικά σημεία.

↓

6.Υπολογισμός των δυνάμεων και των τάσεων των στοιχείων.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για πολλές εφαρμογές , τόσο δομικού όσο και μη δομικού χαρακτήρα. Η μέθοδος αυτή λοιπόν εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα τα οποία και την έχουν καταστήσει τόσο διαδεδομένη. Αυτά είναι (66):

1. Μοντελοποίηση ακανόνιστων σχημάτων χωρίς δυσκολία.
2. Μοντελοποίηση συστημάτων που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά.
3. Διαχείριση οριακών συνθηκών ασχέτως πλήθους και είδους.

4. Δυνατότητα μεταβολής του μεγέθους των στοιχείων και χρήση πολύ μικρού πλέγματος όπου απαιτείται.
5. Εύκολη αλλαγή των παραμέτρων του προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων.
6. Συμπεριλαμβάνει την δυνατότητα προσομοίωσης δυναμικών φαινομένων.
7. Ικανότητα διαχείρισης μη γραμμικής συμπεριφοράς που προκύπτει από μεγάλες παραμορφώσεις και μη γραμμικά υλικά.

3.2.Εξελίξεις στην αριθμητική μοντελοποίηση της FSW.

Οι δημοσιεύσεις σχετικά με την μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση υστερούν σε αριθμό σε σχέση με λοιπά θέματα αυτής της μεθόδου. Ωστόσο, πολλοί ερευνητές έχουν εξετάσει διάφορους τύπους αριθμητικών μοντέλων με διαφορετικές προσεγγίσεις, στόχους και τεχνικές μοντελοποίησης. Οι υπάρχουσες τεχνικές που θα αναφερθούν και παρακάτω εξετάστηκαν με βάση την ικανότητα τους να προσομοιώσουν με ακρίβεια το κάθε πρόβλημα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις εφαρμοσμένες μηχανικές συνθέσεις, στους περιορισμούς μοντελοποίησης και στα δεδομένα των υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες δημοσιεύσεις. Επίκεντρο της παρακάτω βιβλιογραφικής ανασκόπησης αποτελεί η έρευνα που βασίζεται σε τρισδιάστατα θερμομηχανικά μοντέλα, η οποία, όπως φαίνεται, αποτελεί την καλύτερη και πιο ακριβή μέθοδο για την προσομοίωση συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.

3.3.Θερμική μοντελοποίηση (Thermal modeling)

Τα θερμικά μοντέλα που χρησιμοποιούσαν μια εικονική πηγή θερμότητας αποτέλεσαν τα πρώτα βήματα για την προσομοίωση της FSW. Αυτές οι θερμικές προσομοιώσεις μπορούν να υπολογίσουν την κατανομή της θερμοκρασίας στα συγκολλημένα τεμάχια και, επομένως, να προβλέψουν και να αξιολογήσουν την δημιουργία των ζωνών συγκόλλησης (ΘΜΕΖ,ΘΕΖ). Σχετική έρευνα έδειξε ότι ανάλογα με τα εισαγόμενα ποσά θερμότητας καθορίζεται επίσης και η ανταπόκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα (67).

Οι προσομοιώσεις θερμικής μοντελοποίησης ήταν ιδιαίτερα επωφελείς στα αρχικά στάδια των αριθμητικών προσομοιώσεων αφού εξέταζαν τις απαιτούμενες γνώσεις θερμικών διεργασιών, την ενσωμάτωση πειραματικών ορίων στο αριθμητικό μοντέλο και επομένως την βασική μοντελοποίηση της FSW. Ωστόσο, μια εμβάθυνση στην μοντελοποίηση αποκαλύπτει ότι πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα της ένωσης της συγκόλλησης, τις δυνάμεις και τις τάσεις που ασκούνται καθώς και άλλες σημαντικές παραμέτρους δεν καλύπτονται από την θερμική μοντελοποίηση. Επιπρόσθετα, οι υπολογισμοί των προφίλ της θερμοκρασίας δεν ανταποκρίνονται με ακρίβεια στην πραγματικότητα λόγω της εικονικής εισόδου θερμότητας. Παρόλα αυτά, οι θερμικές προσομοιώσεις εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται για ειδικές εφαρμογές ή για την μεμονωμένη εξέταση των εξαρτώμενων από την θερμοκρασία φαινομένων (68).

3.4.Ρευστοδυναμική μοντελοποίηση (Fluid modeling)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχει ρευστομηχανική φύση και η επιτυχία της εξαρτάται άμεσα από την ροή του υλικού. Έτσι, επιδιώκοντας η μοντελοποίηση να ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα, οι επιστήμονες οδηγήθηκαν στην εφαρμογή της αριθμητικής ανάλυσης της διαδικασίας θεωρώντας τις επιφάνειες ως ρευστά μοντέλα (69).

Στις πρώτες προσπάθειες τρισδιάστατης μοντελοποίησης με την μέθοδο υπολογιστικής δυναμικής ρευστού (Computational Fluid Dynamics – CFD), το ιξώδες το υλικού θεωρήθηκε ως συνάρτηση του ρυθμού καταπόνησης και της θερμοκρασίας. Το υλικό θεωρήθηκε ότι προσκολλάται στην επιφάνεια του εργαλείου ενώ η θερμότητα παράχθηκε εξ' ολοκλήρου μέσω διάχυσης (viscous dissipation). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, υπολογίστηκαν τόσο η θερμοκρασία της συγκόλλησης όσο και το μοτίβο της ροής του υλικού. Ωστόσο, βρέθηκε ότι υπήρξε υπερεκτίμηση του μεγέθους της ζώνης παραμόρφωσης αλλά και της θερμοκρασίας που επικρατούσε σε αυτό (70).

Γενικά, η μοντελοποίηση με την μέθοδο CFD ενώ μελετά σε βάθος την ροή του υλικού, αδυνατεί να ξεχωρίσει τα προς συγκόλληση τεμάχια με το εργαλείο λόγω των εισαγόμενων οριακών συνθηκών. Αυτό κατ΄ επέκταση δεν επιτρέπει την εμφάνιση τυχόν κενών αλλά και άλλων ατελειών που μπορεί να δημιουργηθούν κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση. Επίσης, χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η αδυναμία να διαχειριστεί ρεαλιστικές οριακές συνθήκες όπως το φαινόμενο της ολίσθησης στην επιφάνεια εργασίας (71).

Ένα ακόμη μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου είναι ότι το εργαλείο θεωρείται βυθισμένο από την αρχή της διαδικασίας οπότε η μελέτη του σταδίου βύθισης δεν μπορεί να απεικονιστεί. Ως αποτέλεσμα, όλη η προσοχή της μελέτης με την μέθοδο CFD στρέφεται μόνο στο στάδιο συγκόλλησης. Τέλος, λόγω της φύσης της διαδικασίας δεν μπορεί να μελετηθεί η συγκόλληση ανόμοιων πλακών καθώς τα δείγματα θεωρούνται ιξώδη ρευστά σώματα (viscous fluid bodies) (72).

3.5.Θερμομηχανικά συνδυασμένη μοντελοποίηση

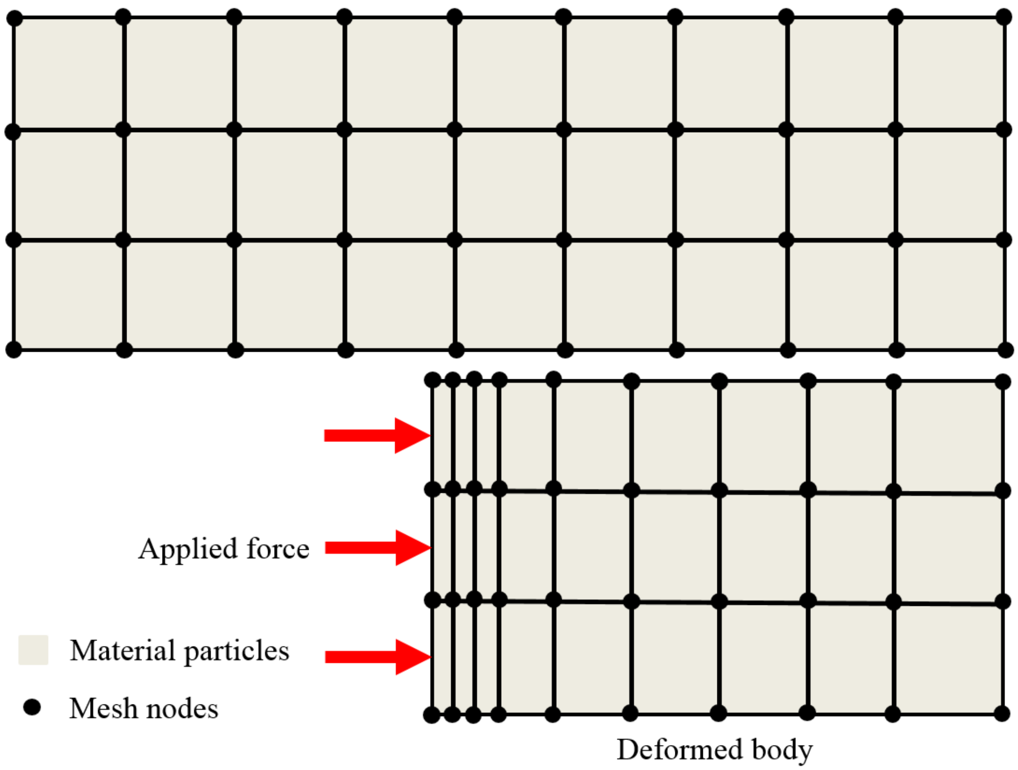
Η θερμομηχανικά συνδυασμένη μοντελοποίηση αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη λύση για την προσομοίωση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση αφού είναι ικανή να αναλύσει πλήρως όλα τα στάδια της, σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες μεθόδους. Συγκεκριμένα, έχει την δυνατότητα να εξετάζει όλη την διαδικασία, από το στάδιο βύθισης έως και το στάδιο απόσυρσης του εργαλείου. Χωρίς την εξέταση όλων των σταδίων, η προσομοίωση χάνει το λογικό της αποτέλεσμα καθώς μπορούν να επηρεαστούν τα υπόλοιπα στάδια και να μην είναι δυνατόν να εμφανιστούν οι ατέλειες που προκύπτουν, όπως για παράδειγμα ο σχηματισμός κενών.

Ενώ μερικές παράμετροι και πιθανά αποτελέσματα τις διαδικασίας δεν μπορούν να υπολογισθούν έως και σήμερα, αρκετοί ερευνητές απλοποιούν τα μοντέλα, προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος και ο χρόνος σχεδιασμού, σε σημαντικό βαθμό και έτσι, τα αποτελέσματα απαιτούν πιο προσεκτική αξιολόγηση και αποτελούν οδηγό και όχι απόδειξη.

Υπό πειραματικό πρίσμα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε προσομοιώσεις μηχανικής συνεχούς μέσου είναι η ανάλυση με την μέθοδο Lagrangian, η ανάλυση με την μέθοδο Eulerian καθώς και ο συνδυασμός τους (ALE, CEL), ο οποίος αποσκοπεί στην εξάλειψη των μειονεκτημάτων και στον συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των δύο μεθόδων. Οι δύο μέθοδοι διαφέρουν ως προς την κίνηση των κόμβων και των υλικών σημείων (73).

3.6.Προσέγγιση με ανάλυση Lagrangian

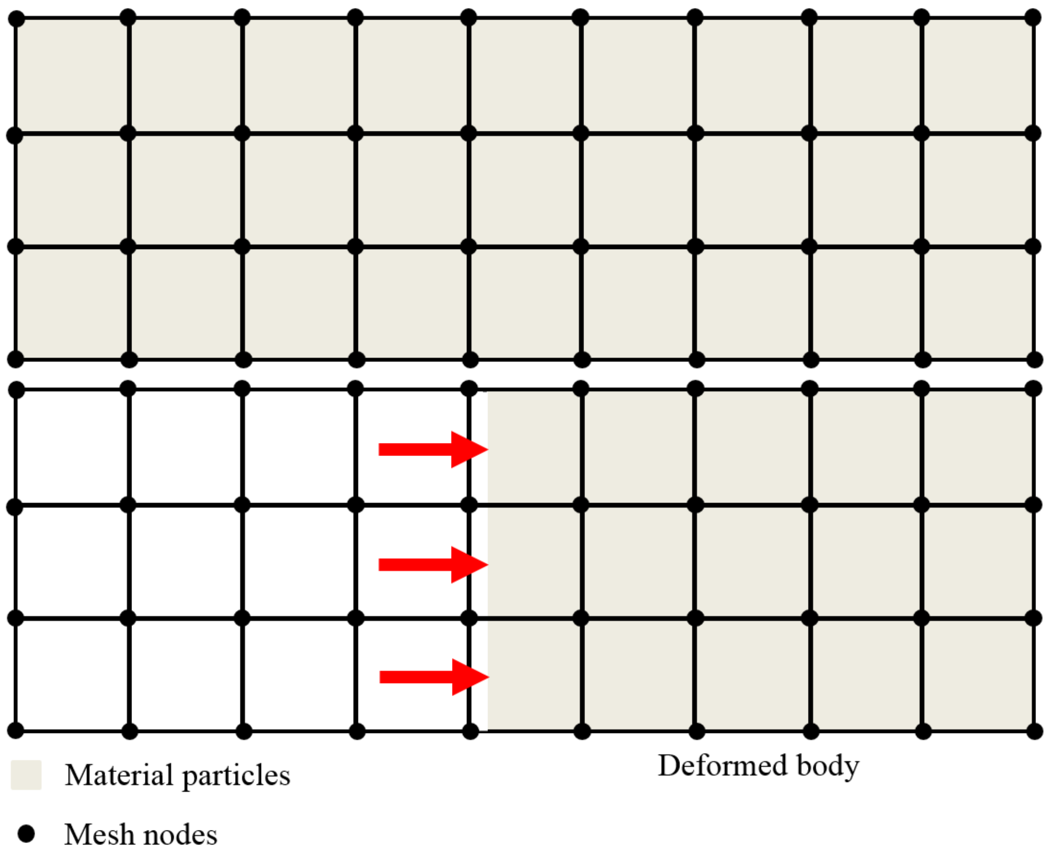
Σε αυτήν την μέθοδο, οι κόμβοι (nodes) και τα συσχετιζόμενα υλικά σημεία (associated materials points) εκτοπίζονται κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης της επιφάνειας εργασίας. Καθ’ όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, οι κόμβοι στις οριακές επιφάνειες παραμένουν κατά μήκος της ακμής του εκάστοτε στοιχείου (element). Αυτό καθιστά ευκολότερο τον ορισμό των οριακών συνθηκών και των συνθηκών επαφής. Επομένως, στην ανάλυση Lagrangian το υλικό δεν ρέει μέσα από τα στοιχεία και έτσι η μέθοδος ενδείκνυται για αναλύσεις όπου η διανομή του πλέγματος (mesh distribution) δεν είναι μεγάλη. Αυτό καθιστά την μέθοδο ιδανική για προσομοιώσεις στερεής μηχανικής ή γενικότερα διαδικασιών με μικρές παραμορφώσεις υλικών. Ωστόσο, σύμφωνα με την ανάλυση Lagrangian, τα στοιχεία παραμορφώνονται λόγω της μεγάλης μετατόπισης στους κόμβους. Δεδομένου ότι η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση περιλαμβάνει μεγάλες παραμορφώσεις, μια καθαρή προσέγγιση με ανάλυση Lagrangian δεν είναι κατάλληλη για μια τέτοια αριθμητική προσομοίωση (74).



Εικόνα 67: Παραμόρφωση και ροή του υλικού σύμφωνα με την προσέγγιση με ανάλυση Lagrangian.

3.7.Προσέγγιση με ανάλυση Eulerian

Σε αντίθεση με την ανάλυση Lagrangian, στην ανάλυση Eulerian οι κόμβοι του πλέγματος είναι σταθεροί στον χώρο και επιτρέπουν στο υλικό να ρέει μέσα στα στοιχεία χωρίς την διαστρέβλωση οποιουδήποτε στοιχείου. Δεδομένου ότι το πλέγμα (mesh) είναι σταθερό στον χώρο, εξαλείφεται το πρόβλημα που σχετίζεται με την παραμόρφωση του. Ως εκ τούτου, η ανάλυση Eulerian είναι η βάση για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής ρευστών (CFD). Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η δυσκολία μοντελοποίησης της ελεύθερης οριακής επιφάνειας καθώς οι οριακοί κόμβοι ενδέχεται να μην συμπίπτουν με τους κόμβους των στοιχείων. Επομένως, η μέθοδος Eulerian μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν είναι γνωστά τα όρια της επιφάνειας που έχει παραμορφωθεί. Έτσι λοιπόν γίνεται κατανοητό ότι το στάδιο βύθισης του εργαλείου κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με την εν λόγω μέθοδο (73).

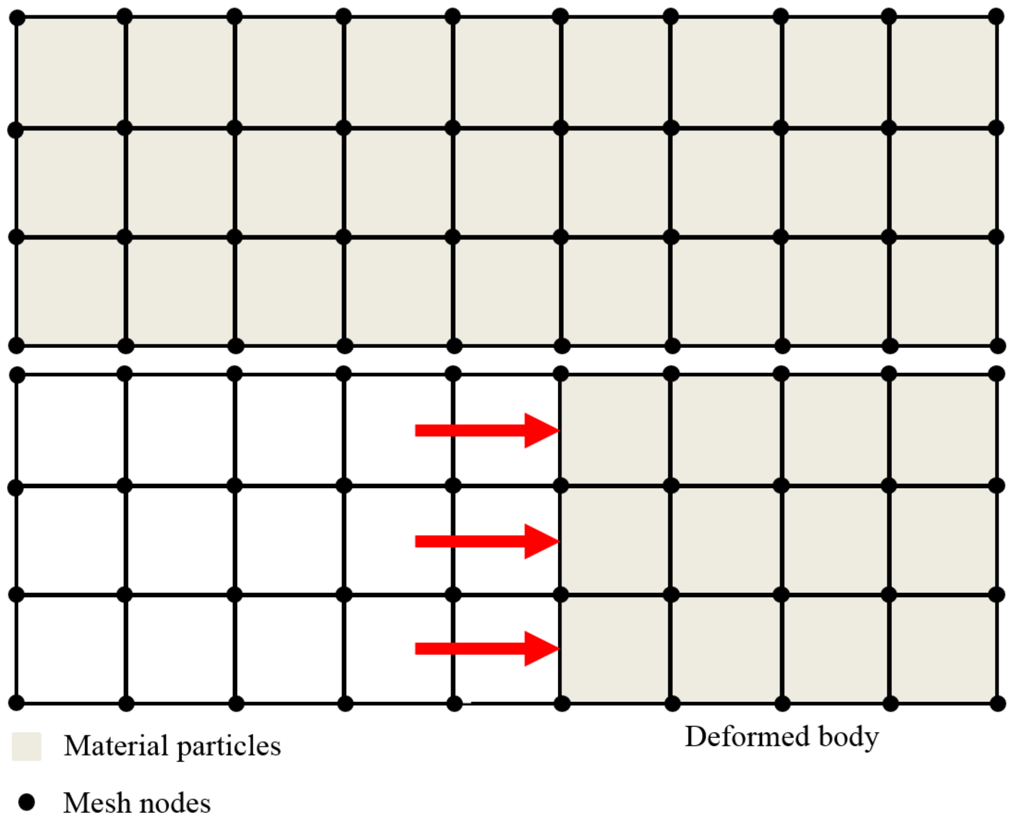


Εικόνα 68: Παραμόρφωση και ροή του υλικού σύμφωνα με την προσέγγιση με ανάλυση Eulerian.

3.8.Συνδυασμένη μοντελοποίηση Eulerian-Lagrangian (Coupled Eulerian-Lagrangian analysis)

Η συνδυασμένη μοντελοποίηση Eulerian-Lagrangian αποτελεί μια ακόμη προσέγγιση η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μεθόδων Eulerian και Lagrangian. Σε αυτήν την μέθοδο, ένα πλαίσιο Lagrangian ορίζεται για την διακριτοποίηση της κινούμενης μάζας ή της στερεής δομής και το πλαίσιο Eulerian ορίζεται για την διακριτοποίηση της ρευστής μάζας. Για την αναπαράσταση διαφορετικών τομέων, το όριο του τομέα Lagrangian λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς. Σε αυτήν την περίπτωση, η ταχύτητα του άκρου κάθε στοιχείου υπολογίζεται με την βοήθεια της ταχύτητας του ορίου Lagrangian καθ' ίδιο τρόπο με την ταχύτητα του ορίου Eulerian στην ίδια κατεύθυνση. Αυτό βοηθά στην μοντελοποίηση προβλημάτων με μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς όμως να γίνεται παραμόρφωση του πλέγματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 69.

Η μεθοδολογία επαφής καθιστά την CEL, ιδανική επιλογή για την επίλυση δυναμικών και μη γραμμικών προβλημάτων με πολύ μεγάλες παραμορφώσεις. Σε αντίθεση με την κλασική ανάλυση Eulerian, η CEL επιτρέπει τον σχηματισμό και την παρακολούθηση των ελεύθερων επιφανειών (75) (73).



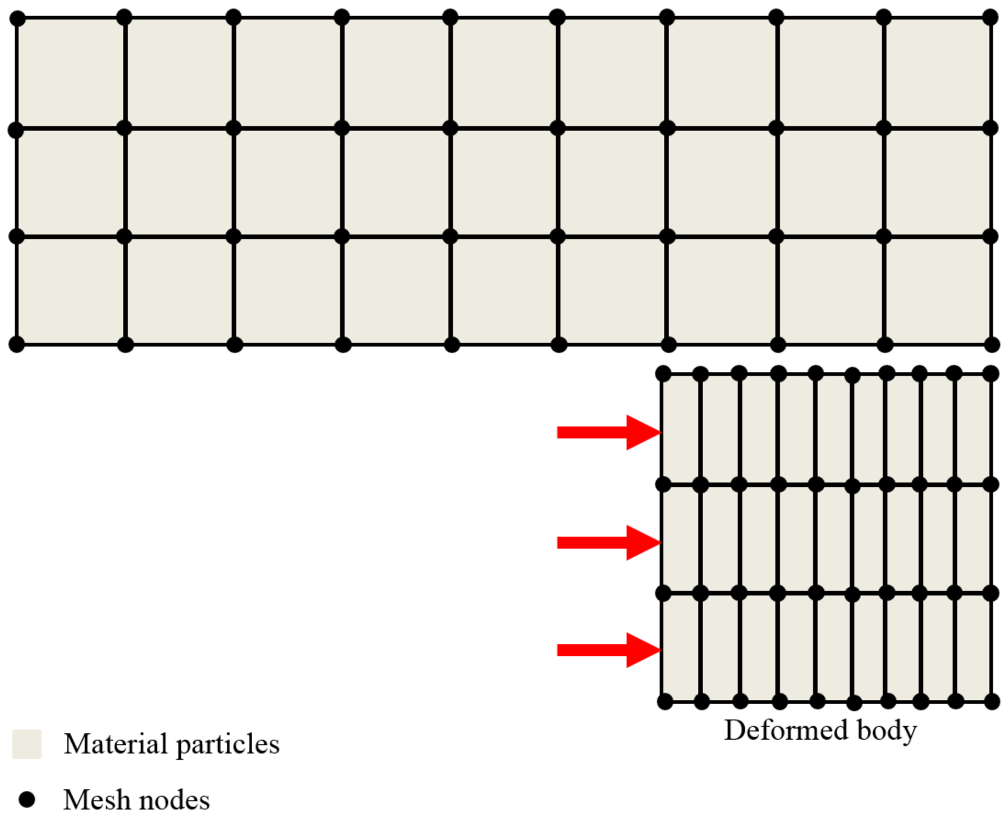
Εικόνα 69: Παραμόρφωση και ροή του υλικού σύμφωνα με την προσέγγιση CEL.

Διατύπωση του νόμου επαφής σωμάτων Eulerian-Lagrangian

Η διατύπωση του νόμου επαφής σωμάτων Eulerian-Lagrangian βασίζεται σε μια μέθοδο επιβολής οριακών συνθηκών. Σε αυτήν την μέθοδο, το σώμα Lagrangian καταλαμβάνει κενές περιοχές μέσα στο πλέγμα Eulerian. Ο αλγόριθμος επαφής εντοπίζει και υπολογίζει αυτόματα την διεπιφάνεια μεταξύ των δύο σωμάτων. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν είναι ανάγκη να εφαρμοστεί ένα πολύπλοκο πλέγμα, καθώς μια απλή μορφή πλέγματος στοιχείων Eulerian συχνά προσδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα.

3.9. Μοντελοποίηση Lagrangian-Eulerian με αυθαίρετη κίνηση των κόμβων (Arbitrary Lagrangian and Eulerian analysis - ALE)

Οι αναλύσεις με τις μεθόδους Eulerian και Lagrangian εμφανίζουν ορισμένα μειονεκτήματα αλλά και πλεονεκτήματα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, η προσέγγιση ALE κρίνεται κατάλληλη για την μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε τοπικό επίπεδο, καθώς οι κόμβοι μπορούν να κινούνται αυθαίρετα έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί το σχήμα των στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή την μέθοδο, το πλέγμα στα όρια και τις διεπιφάνειες των τομέων (domains boundaries and interfaces) έχει την ικανότητα να μετακινείται μαζί με τα υλικά με σκοπό να είναι συνεχώς σε επαφή με τα όρια και τις διεπιφάνειες ενός συστήματος πολλαπλών υλικών. Ακόμη, η μέθοδος ALE έχει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας σε σύγκριση με τις αναλύσεις Eulerian και Lagrangian. Αυτός ο επιπλέον βαθμός ελευθερίας ελαχιστοποιεί τα προβλήματα που εμφανίζονται στα κλασικά κινηματικά προβλήματα και έτσι αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα των δύο επιμέρους μεθόδων (Eulerian και Lagrangian) με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Η πρόσδοση ελευθερίας στο κινούμενο πλέγμα επιτρέπει ελαφρώς μεγαλύτερες παραμορφώσεις των συνεχών υλικών. Ωστόσο, οι κινήσεις του πλέγματος έχουν ορισμένους περιορισμούς και έτσι η μέθοδος ALE δεν μπορεί να διαχειριστεί αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις (74).



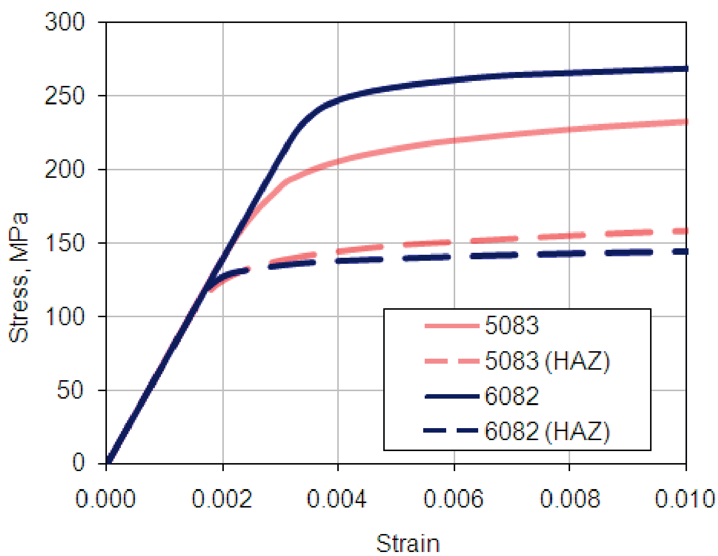
Εικόνα 70: Παραμόρφωση και ροή του υλικού σύμφωνα με την προσέγγιση ALE.

3.10.Βασικές εξισώσεις που διέπουν την FSW

3.10.1.Θεωρία πλαστικότητας

Στην κλασική θεωρία πλαστικότητας, εάν η τάση που δέχεται το υλικό είναι μικρότερη από το όριο διαρροής, τότε το υλικό θα επιστρέψει στο αρχικό του σχήμα όταν σταματήσει να ασκείται το φορτίο. Το υλικό αυτό ονομάζεται ελαστικό και η παραμόρφωση που τέθηκε ονομάζεται ελαστική παραμόρφωση. Η ελαστική συμπεριφορά μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Αντίθετα, εάν η τάση ξεπερνά το όριο διαρροής, το υλικό υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, ακόμη και όταν η τάση σταματήσει να ασκείται, το υλικό δεν θα επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση και θα έχει παραμορφωθεί μόνιμα (76).

Η θεωρία της πλαστικότητας αναπτύχθηκε για να περιγράψει αυτήν την ανελαστική συμπεριφορά. Διαφορετικά υλικά παρουσιάζουν διαφορετική ανελαστική συμπεριφορά υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης. Σε πειραματικό επίπεδο, οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης λαμβάνονται σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις για κάθε υλικό.



Εικόνα 71: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για κράματα αλουμινίου 5083-H116 και 6082-T6 στο μητρικό μέταλλο και στην ΘΕΖ (76).

3.10.2.Κριτήρια διαρροής (Yield criteria)

Η πλαστική διαρροή (yield) ενός όλκιμου υλικού είναι ανεξάρτητη από την αντίστοιχη τάση πίεσης (pressure stress). Έτσι, το κριτήριο πλαστικής διαρροής (yield criterion) εξαρτάται μόνο από τον τανυστή απόκλισης τάσης S.

$$S = \sigma + p\, I \quad [5]$$

$$\text{και}\ p = -\frac{1}{3} trace\,(\sigma) \qquad [6]$$

όπου S, deviatoric stress και p, η υδροστατική πίεση. Αν το μέταλλο είναι ισότροπο, το υλικό εμφανίζει τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις και η διαρροή σχετίζεται με το μέγεθος των κύριων τάσεων, δηλαδή εξαρτάται αποκλειστικά από τις σταθερές (invariants) του deviatoric stress tensor, J_1,J_2,J_3.

$$J_1 = 0 \qquad [7]$$

$$J_2 = -(S_1 S_2 + S_2 S_3 + S_3 S_1) \qquad [8]$$

$$J_3 = S_1 S_2 S_3 \qquad [9]$$

Επομένως, η επιφάνεια διαρροής εξαρτάται μόνο από τις μεταβλητές J_2 και J_3. Επίσης, πέρα από το φαινόμενο της ισοτροπίας και την ανεξαρτησία από την πίεση, τα μέταλλα έχουν παρόμοια πλαστική απόκριση στην αρχική τάση ή στις δυνάμεις συμπίεσης (compression loading). Έχοντας αυτό ως δεδομένο, προκύπτει ότι η συνάρτηση $f(J_2)$ είναι σταθερή. Αν η σταθερά J_2 εκφραστεί υπό το πρίσμα της τάσης, προκύπτει η γνωστή συνάρτηση von Mises:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = σταθερό \; [10]$$

Η σταθερά στην παραπάνω εξίσωση αποδίδεται ως η ισοδύναμη τάση $\bar{\sigma}$. Όταν η φόρτωση στο υλικό φτάσει το όριο διαρροής, η ισοδύναμη τάση γίνεται ίση με την τάση ΄σγ΄. Έτσι, από την αναδιάταξη της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}}\left(\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}\right) \; [11]$$

3.10.3.Ρυθμός παραμόρφωσης (Rate dependance)

Η σωστή επιλογή των υλικών αποτελεί μια διαδικασία υψηλής σημασίας για μια ακριβή λύση στην διαδικασία προσομοίωσης. Πολλά μέταλλα επιδεικνύουν αύξηση της αντοχής τους με την αύξηση των δυνάμεων παραμόρφωσης που υποβάλλονται. Αυτό καθίσταται σημαντικό για ορισμένα μέταλλα όταν ο ρυθμός παραμόρφωσης τους είναι μεταξύ 0.1 και 1 ανά δευτερόλεπτο ενώ σε διαδικασίες υψηλότερης ενέργειας ο αριθμός αυτός κυμαίνεται από 10 έως και 100 ανά δευτερόλεπτο. Το όριο ελαστικότητας ενός υλικού $\bar{\sigma}$ συνήθως εξαρτάται από τις διαδικασίες σκλήρωσης που έχει υποστεί. Στα μέταλλα που σκληραίνονται ισότροπα, το όριο ελαστικότητας παρουσιάζεται ως συνάρτηση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης $\bar{\varepsilon}^{pl}$, του ανελαστικού ρυθμού τάσης $\dot{\varepsilon}\, pl$, της θερμοκρασίας Τ και οποιωνδήποτε άλλων μεταβλητών f_i (77) (78).

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\varepsilon}^{pl}, T) \qquad [12]$$

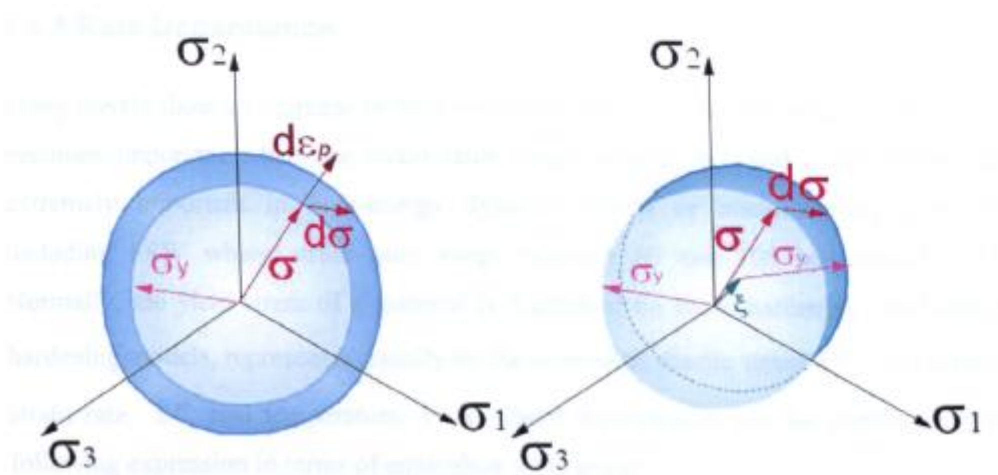
3.10.4.Ενδοτράχυνση (Strain Hardening)

Οι νόμοι σκλήρωσης λόγω καταπόνησης περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η επιφάνεια ενός υλικού σε συνάρτηση με την τάση όταν εφαρμόζονται δυνάμεις καταπόνησης. Ειδικότερα, σε μια κατάσταση ιδανικής πλαστικότητας, η πλαστική παραμόρφωση δεν έχει καμία επίδραση στο όριο ελαστικότητας και οποιαδήποτε τάση μεγαλύτερη αυτού δεν θα συνεχιστεί. Επομένως, η ροή του πλαστικοποιημένου υλικού συμβαίνει όταν επιτυγχάνεται το σημείο του ορίου ελαστικότητας του υλικού.

Υπάρχουν δύο είδη ενδοτράχυνσης (σκλήρωσης), η ισοτροπική σκλήρωση και η κινηματική σκλήρωση.

Στην ισοτροπική σκλήρωση, το σχήμα της επιφάνειας διαρροής (yield surface) παραμένει το ίδιο και το μέγεθος του αλλάζει ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό υποδηλώνει ότι η βασική μορφή της συνάρτησης του ορίου διαρροής παραμένει ίδια όταν ασκείται πλαστική τάση παραμόρφωσης. Μία εννοιολογική απεικόνιση της ισότροπης σκλήρωσης φαίνεται στην Εικόνα 72.

Στην κινηματική σκλήρωση, η επιφάνεια διαρροής (yield surface) μετακινείται χωρίς καμία αλλαγή στο σχήμα και στο μέγεθος της. Η μεταβολή της πλαστικής παραμόρφωσης (Plastic strain history) και το κέντρο της επιφάνειας απόδοσης φαίνονται με την βοήθεια ενός τανυστή (tensor). Η κινηματική σκλήρωση χρησιμοποιείται κυρίως για την μοντελοποίηση της κυκλικής φόρτωσης μετάλλων.



Εικόνα 72: Απεικόνιση της ισότροπης σκλήρωσης.

3.10.5.Νόμος πλαστικής διαρροής (Flow rule)

Σύμφωνα με το κριτήριο του Von Mises, η επιφάνεια διαρροής (yield surface) συνδέεται με την συμπεριφορά που καθορίζει τις προσαυξήσεις των πλαστικών τάσεων. Τα μέρη του πλαστικού τανυστή τάσης (plastic strain tensor), που ορίζονται ως $\underline{\varepsilon}^{pl}$ δίνονται από τον τύπο (79):

$$\underline{\varepsilon}^{\mathrm{pl}} = \dot{\lambda}\ \mathrm{F}\underline{\sigma} \qquad [13]$$

$$\mathrm{F}\underline{\sigma} = \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \qquad [14]$$

Όπου '$\dot{\lambda}$ ' είναι μια σταθερά αναλογικότητας που δεν έχει ακόμη προσδιοριστεί. Είναι γνωστή ως παράμετρος πλαστικής συνέπειας. Όταν η πλαστική παραμόρφωση είναι συνεχής, ισχύει ότι $\dot{F}$=0 και $\dot{\lambda} > 0$, ενώ στην περίπτωση της ελαστικής παραμόρφωσης ισχύει ότι $\dot{\lambda} = 0$ και $\dot{F}$≠0.

Οι παραπάνω σχέσεις οδηγούν σε μια βασική συνθήκη περιορισμών, στην μορφή Kuhn-Tucker.

$$\dot{\lambda}\, F = 0 \qquad [11]$$

3.10.6.Μηχανική επαφή (Mechanical Contact)

Αναφορικά με την ταχύτητα των προβλημάτων επαφής, είναι γνωστό ότι μια συνάρτηση g(x,t)=0, όπου x ο χώρος και t ο χρόνος μπορεί να οριστεί για να αντιπροσωπεύσει την επιφάνεια του εργαλείου ή της επιφάνειας εργασίας που βρίσκονται σε επαφή με άλλα σώματα.

Για οποιοδήποτε σημείο μέσα στο κύριο σώμα επαφής ισχύει ότι g(x,t) < 0.

Το διάνυσμα κατεύθυνσης της εξωτερικής προς την κύρια επιφάνεια ορίζεται από τον τύπο:

$$n = \frac{1}{\left|\frac{\partial g}{\partial x}\right|}\frac{\partial g}{\partial x} \qquad [15]$$

Σε δεδομένο συντονισμό χρόνου και χώρου, οι ταχύτητες των υλικών είναι u_{master} και u_{slave} για τα σημεία του υλικού στην επιφάνεια ‘μάστερ’ και την επιφάνεια ‘slave’ αντίστοιχα. Επομένως η συνθήκη επαφής μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$(u_{master}-u_{slave})\ n = \Delta u\ n = 0 \qquad [16]$$

«Σκληρή επαφή» (Hard contact)

Η πίεση επαφής σε ένα σημείο μεταξύ δύο επιφανειών σχετίζεται με την πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους, την $d_{contact}$. Στην ΄σκληρή΄ επαφή, η σχέση των επιφανειών εκφράζεται ως εξής (80):

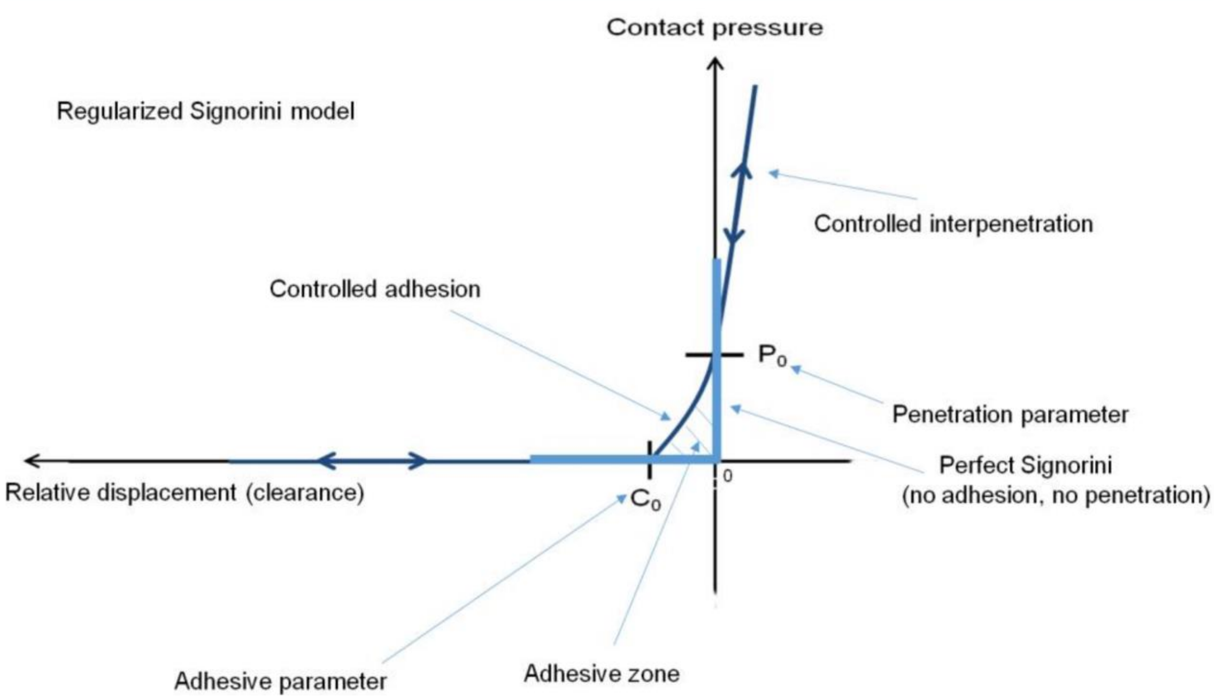
$p_{contact}=0$ για $d_{contact}<0$ (σε ανοιχτό σύστημα)

$d_{contact}=0$ για $p_{contact}>0$ (σε κλειστό σύστημα)

Θεωρείται ότι προκειμένου να υπάρξει πίεση επαφής, πρέπει η κύρια (master surface) και η δευτερεύουσα επιφάνεια (slave surface) να βρίσκονται σε επαφή.Καθώς η διείσδυση δεν μεταφράζεται από την πίεση επαφής, δεν υπάρχει όριο στο μέγεθος της πίεσης επαφής που μπορεί να μεταδοθεί.

«Μαλακή επαφή» (Softened contact)

Σε μια «σχέση μαλακής επαφής», η πίεση επαφής είναι μια συνάρτηση του διαστήματος μεταξύ των δύο επιφανειών (κύρια – δευτερεύουσα). Σε μία εκθετική σχέση συνάρτησης, οι επιφάνειες αρχίζουν να μεταδίδουν την πίεση επαφής μόλις η απόσταση τους μειωθεί στην κρίσιμη απόσταση c_0. Καθώς η απόσταση μειώνεται περαιτέρω, η πίεση επαφής αυξάνεται εκθετικά (Εικόνα 73).



Εικόνα 73: Εκθετική καμπύλη πίεσης-απόστασης (overclosure) (81).

3.10.7.Τριβή

Γενικά, η διατμητική τάση τριβής δίνεται από τον τύπο:

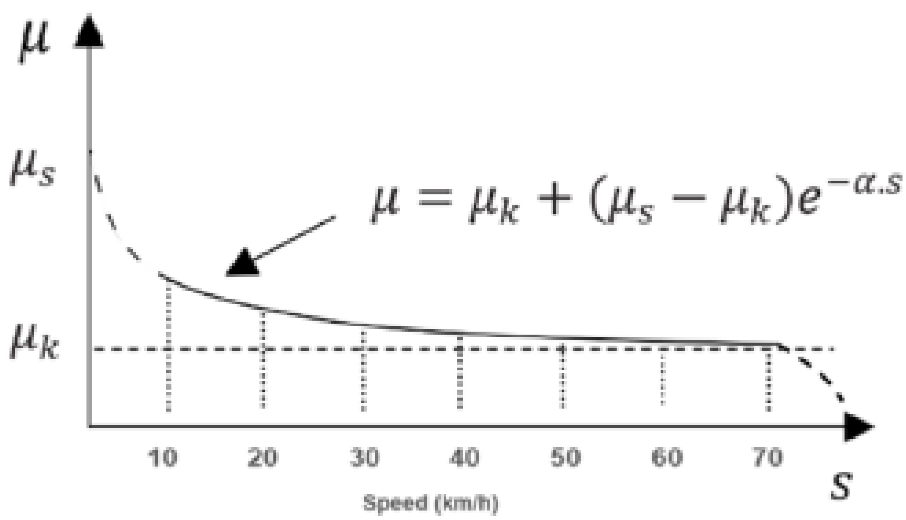
$$\tau = -f(\Delta\upsilon, \sigma n)\,\frac{\Delta\upsilon}{|\Delta\upsilon|} \quad [17]$$

Όπου Δυ είναι η εφαπτομενική διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο επιφανειών και f είναι μια συνάρτηση της εφαπτομενικής διαφοράς ταχύτητας Δυ και της τάσης σ_n.

Το μοντέλο τριβής Coulomb δηλώνει ότι δεν υπάρχει σχετική κίνηση εάν η διατμητική τάση τριβής είναι μικρότερη από την κρίσιμη τάση (critical stress), $\tau_{crit}=\mu_s\, p_{contact}$,όπου μ_s είναι ο συντελεστής στατικής τριβής ο οποίος εξαρτάται άμεσα από την πίεση επαφής, τον ρυθμό ολίσθησης και την επιφανειακή θερμοκρασία στο σημείο επαφής. Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι η τιμή της τάσης τριβής δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή της αντοχής του υλικού σε διάτμηση.

Επομένως, προκύπτει ότι η μέγιστη διατμητική τάση μπορεί να είναι $\frac{\overline{\sigma}}{2}$ για ένα υλικό που υπακούει στο κριτήριο του Tresca και $\frac{\overline{\sigma}}{\sqrt{3}}$ για ένα υλικό που υπακούει στο κριτήριο του von Mises (82).

Ο συντελεστής τριβής κατά την έναρξη της ολίσθησης από μια κατάσταση ‘’κολλήματος’’, που ονομάζεται ‘στατικός συντελεστής τριβής’ διαφέρει από τον ‘κινητικό συντελεστή τριβής’ σε μια καθορισμένη κατάσταση ολίσθησης. Μια ομαλή ζώνη μετάβασης μεταξύ ενός στατικού συντελεστή τριβής και ενός κινητικού συντελεστή τριβής μπορεί να προσεγγιστεί με μια εκθετική καμπύλη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 74.



Εικόνα 74: Μοντέλο εκθετικής καμπύλης του στατικού και του κινητικού συντελεστή τριβής (82).

4.Θερμομηχανικό μοντέλο της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Ακολουθεί η περιγραφή του θερμομηχανικού μοντέλου της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκόλληση είναι κράμα αλουμινίου 5083-H111 και 6082-T6. Οι ιδιότητες των υλικών, η γεωμετρία του μοντέλου, οι συνοριακές συνθήκες αλλά και οι λειτουργικές παράμετροι της συγκόλλησης θα αναλυθούν παρακάτω. Για την μοντελοποίηση του εν λόγω πειράματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian). Όλα τα στάδια της διαδικασίας (στάδιο βύθισης, στάδιο σταθεροποίησης και στάδιο συγκόλλησης) μοντελοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με όμοια πειραματικά.

4.1.Περιγραφή του προβλήματος

Μια τρισδιάστατή απεικόνιση του προβλήματος αναπτύχθηκε εξολοκλήρου και λύθηκε με την βοήθεια του προγράμματος Abaqus/Explicit 2017. Η προσέγγιση με την μέθοδο CEL εφαρμόστηκε για την πρόβλεψη της κατανομής της θερμοκρασίας σε όλο το μήκος και πλάτος της επιφάνειας εργασίας, της ροής του υλικού και των δυνάμεων που ασκούνται στο εργαλείο. Δεδομένου ότι το εργαλείο έχει αμελητέα παραμόρφωση σε σχέση με τα προς συγκόλληση τεμάχια, τα τεμάχια εργασίας διαμορφώθηκαν ως σώματα Eulerian ενώ το εργαλείο ως σώμα Lagrangian. Το σώμα Eulerian αποτελείται από δύο ‘περιοχές’, την ‘κενή’ (void) και την ‘γεμάτη’ (full). Στην κενή περιοχή δεν καταχωρούνται οι ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου ενώ αντίθετα στην εσωτερική περιοχή που είναι ‘γεμάτη’ καταχωρούνται κανονικά οι ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου 5083-H11 και 6082-T6. Στο εργαλείο μπήκε πλέγμα που αποτελείται από 16293 θερμικά συζευγμένα (thermally coupled) στοιχεία C3D8RT 8 κόμβων ενώ στα προς συγκόλληση τεμάχια εισχωρήθηκε πλέγμα αποτελούμενο από 16293 θερμικά συζευγμένα στοιχεία EC3D8R 8 κόμβων.

4.2.Ιδιότητες των υλικών

Οι ιδιότητες των υλικών διαμορφώθηκαν ώστε να υπακούν στο μοντέλο του Johnson Cook, το οποίο αντιπροσωπεύει τις τάσεις με αναλυτικές μορφές του νόμου σκλήρυνσης και του ρυθμού παραμόρφωσης. Ο ολοκληρωμένος τύπος που περιγράφει το μοντέλου του Johnson-Cook είναι ο εξής:

$$\sigma = [A + B\ (\bar{\varepsilon}^{pl})^{n}]\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T-T_{ref}}{T_{melt}-T_{ref}}\right)^{m}\right] \quad [15]$$

Όπου $\bar{\varepsilon}^{pl}$ είναι η αποτελεσματική πλαστική τάση (effective plastic strain), $\dot{\bar{\varepsilon}}_{pl}$ είναι ο ρυθμός της αποτελεσματικής πλαστικής τάσης (effective plastic strain rate), $\dot{\varepsilon}_0$ είναι η κανονικοποίηση του ρυθμού τάσης (normalizing strain rate), το n και το m είναι σταθερές του υλικού, το C αντιπροσωπεύει την ευαισθησία του ρυθμού τάσης (strain rate sensitivity), T_{ref} είναι η θερμοκρασία στην οποία απευθύνονται οι παράμετροι A, B, n και T_{melt} είναι η θερμοκρασία τήξης του υλικού.

4.2.1.Κράμα Αλουμινίου 5083-H111

Πίνακας 4:Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 5083-H111. (8)

Χημικό στοιχείο	Mn	Fe	Cu	Mg	Si	Zn	Cr	Ti	Al
% Περιεκτικότητα	1	0.4	0.1	4.9	0.4	0.1	0.25	0.25	92.6

Οι περαιτέρω ιδιότητες του εν λόγω κράματος όπως το μέτρο ελαστικότητας, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα κ.ά. φαίνονται στον Πίνακα 5. Η πυκνότητα του υλικού διατηρείται σταθερή καθώς οι μεταβολές στην θερμοκρασία έχουν αμελητέα επίδραση στην πυκνότητα. Στον Πίνακα 6 αποτυπώνονται οι σταθερές που απαρτίζουν τον νόμο Johnson-Cook για το κράμα αλουμινίου 5083-H111.

Πίνακας 5:Ιδιότητες κράματος αλουμινίου 5083-H111.

Inelastic heat fraction	Θερμική αγωγιμότητα (W/(m.K))	Ειδική θερμότητα (J/(kg.K))	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Poisson's Ratio
0.9	121	900.000.000	50.000	0.33

Πίνακας 6:Σταθερές μοντέλου Johnson-Cook κράματος αλουμινίου 5083-H111 (83).

A	B	C	n	m	Melting Temperature (^oC)	Transition Temperature (^oC)
167	596	0.0028	0.551	1	570	25

4.2.2.Κράμα Αλουμινίου 6082-T4

Πίνακας 7: Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 6082-T4 (9).

Χημικό στοιχείο	Mn	Fe	Cu	Mg	Si	Zn	Cr	Ti	Al
% Περιεκτικότητα	1	0.5	0.1	1.2	1.3	0.2	0.25	0.1	95.45

Οι περαιτέρω ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 6082-T4 όπως ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα φαίνονται στον Πίνακα 6. Η πυκνότητα του υλικού διατηρείται σταθερή καθώς οι μεταβολές στην θερμοκρασία έχουν αμελητέα επίδραση στην πυκνότητα.

Πίνακας 8: Ιδιότητες κράματος αλουμινίου 6082-T4.

Inelastic Heat Fraction	Θερμική αγωγιμότητα (W/(m.K))	Ειδική θερμότητα (J/(kg.K))	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) (στους 540^{o}C)	Poisson's Ratio
0.9	170	890.000.000	50.000	0.33

Πίνακας 9: Σταθερές μοντέλου Johnson-Cook κράματος αλουμινίου 6082—T4 (84).

A	B	C	n	m	Melting Temperature (^{o}C)	Transition Temperature (^{o}C)
285	94	0.007	0.41	1.34	588	25

Όπως είναι αντιληπτό, θα ήταν πιο επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν ιδιότητες των υλικών που εξαρτώνται από την θερμοκρασία καθώς ερμηνεύουν ακριβέστερα την συμπεριφορά του υλικού. Ωστόσο, δεν βρέθηκαν ικανοποιητικά στοιχεία για τις ιδιότητες για τα συγκεκριμένα κράματα. Οι απαραίτητες τιμές λήφθηκαν από βάσεις δεδομένων του λογισμικού, που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση (83) (84).

4.2.3.Tool Steel H13

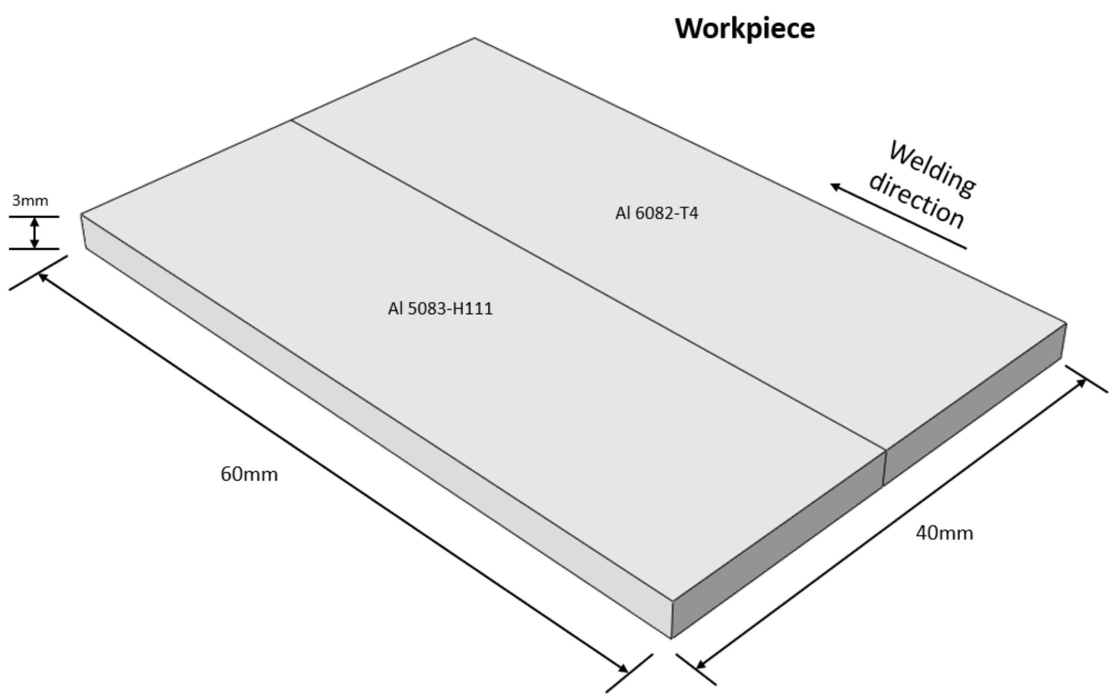
Για λόγους ευκολίας και υπολογιστικής ισχύος, το εργαλείο θεωρήθηκε άκαμπτο υλικό (rigid). Παρόλα αυτά εισάχθηκαν στο πρόγραμμα οι βασικές ιδιότητες του.

Θερμική αγωγιμότητα (W/(m.K))	Πυκνότητα (kg/m^3)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa) (στους 540^{o}C)	Poisson's ratio	Ειδική θερμότητα (J/(kg.K))
28.6	7.750	215000	0.27	460.000.000

4.3.Διαστάσεις και γεωμετρία του μοντέλου

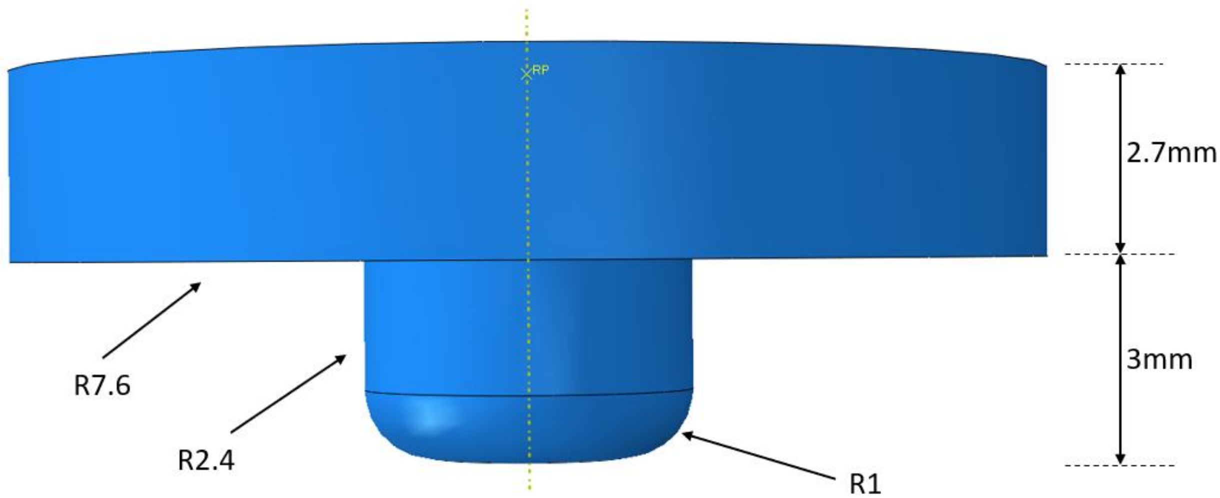
Οι διαστάσεις τόσο των δοκιμίων όσο και του εργαλείου αποφασίστηκαν έπειτα από έρευνα στην σχετική βιβλιογραφία (85), (86) σε συνδυασμό με πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει στο εργαστήριο Κατεργασιών των Μηχανολόγων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Στην εικόνα 75 φαίνονται οι διαστάσεις των προς συγκόλληση δοκιμίων. Στην αριστερή πλευρά (retreating side) έχει τοποθετηθεί το κράμα αλουμινίου 5083-H111 με διαστάσεις 60x20x3 mm και στην δεξιά πλευρά (advancing side) έχει τοποθετηθεί το κράμα αλουμινίου 6082-T4 με ίδιες διαστάσεις. Συνολικά λοιπόν η επιφάνεια εργασίας έχει διαστάσεις 60x40x3 mm. Η τοποθέτηση των δοκιμίων κατά αυτόν τον τρόπο δεν έγινε τυχαία. Σε συνδυασμό με το αρνητικό πρόσημο της περιστροφικής ταχύτητας (counterclockwise direction), και μελετώντας την σχετική βιβλιογραφία, προτείνεται να τοποθετείται το σκληρότερο υλικό στην προωθούμενη πλευρά και το πιο μαλακό στην υποχωρούσα.



Εικόνα 75: Διαστάσεις των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Στην εικόνα 76 φαίνεται η γεωμετρία και οι διαστάσεις του εργαλείου με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση. Για λόγους ευκολίας ως προς τον υπολογιστικό χρόνο, έχουν αγνοηθεί οποιεσδήποτε περίπλοκες γεωμετρίες με ραβδώσεις και η γεωμετρία του εργαλείου έχει απλοποιηθεί πλήρως. Ωστόσο, λόγω αυτής της απλοποίησης, τα αποτελέσματα από την σκοπιά κυρίως της ροής του υλικού αλλά και της ανάπτυξης της θερμοκρασίας θα αποκλίνουν από τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα λόγω της μη ιδανικής ανάδευσης και ροής του υλικού.



Εικόνα 76: Διαστάσεις του εργαλείου.

4.4.Παράμετροι εκτέλεσης της διαδικασίας συγκόλλησης

i. Ταχύτητα

Ομοίως με τις διαστάσεις του μοντέλου, οι παράμετροι (εκτός της ταχύτητας πρόωσης) κάτω από τις οποίες εκτελέστηκε το πείραμα αποφασίστηκαν τόσο από την σχετική βιβλιογραφία όσο και από τα πραγματικά πειράματα που λαμβάνουν χώρα στο εργαστήριο των Μηχανολόγων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Η ταχύτητα βύθισης του εργαλείου προς την επιφάνεια εργασίας, η ταχύτητα πρόωσης και η περιστροφική ταχύτητα ρυθμίστηκαν να μένουν σταθερές και στα 3 στάδια της διαδικασίας συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα βύθισης ορίστηκε στα 3 mm/s (κατεύθυνση προς τα προς συγκόλληση τεμάχια) και η περιστροφική ταχύτητα στα -800 rpm (φορά αντίθετη από αυτήν των δεικτών του ρολογιού). Για λόγους υπολογιστικού χρόνου, στην ταχύτητα πρόωσης προσδόθηκε μεγάλη τιμή (60mm/s) που είναι εξαιρετικά μεγάλη συγκριτικά με τα πραγματικά πειράματα με σκοπό την συγκόλληση ολόκληρου του τεμαχίου εργασίας σε μόλις 1 δευτερόλεπτο, όπως φαίνεται και παρακάτω.

ii. Χρόνος του κάθε βήματος (Step time)

Προκειμένου η προσομοίωση να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματικότητα, συνίσταται η χρήση των πραγματικών χρόνων του κάθε σταδίου συγκόλλησης. Ωστόσο, κάτι τέτοιο έχει τεράστιες απαιτήσεις ως προς την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος. Έτσι, για να γίνει βιώσιμη η επίλυση της προκείμενης αριθμητικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν μικρότερα βήματα. Συγκεκριμένα οι χρόνοι του κάθε βήματος φαίνονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 10: Χρόνοι εκτέλεσης του κάθε βήματος στο Abaqus.

Στάδιο Συγκόλλησης	Χρόνος (s)
Plunging	0.02
Dwelling	0.1
Welding	1

iii. Σχέσεις αλληλεπίδρασης και συνοριακές συνθήκες (Interaction and boundary conditions)

Η επαφή μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων και του εργαλείου αποτελεί μια ‘γενική επαφή’ (general contact), στην οποία η εφαπτομενική συμπεριφορά μεταξύ των δύο περιγράφεται από τον νόμο της τριβής. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται ο τύπος τριβής penalty που εμφανίζει ισοτροπική κατευθυντικότητα (isotropic directionality). Ο συντελεστής τριβής, έπειτα από μελέτη στην βιβλιογραφία για τα συγκεκριμένα κράματα αλουμινίου ορίστηκε στο 0.3 (87).

Η ‘κανονική συμπεριφορά’ (normal behavior) περιγράφεται από τον κανόνα της ΄σκληρής επαφής’ (hard contact), παράμετρος που επιτρέπει στα σώματα να διαχωριστούν μετά την επαφή.

Όσον αφορά την παραγωγή θερμότητας, το ποσοστό της ενέργειας που παράγεται από την τριβή και μετατρέπεται σε θερμότητα ορίστηκε στο 100% ενώ το ποσοστό της παραχθείσας θερμότητας που μεταδόθηκε στην ‘δευτερεύουσα επιφάνεια’ (slave surface) ορίστηκε στο 50%. Επιπρόσθετα, το ‘κλάσμα ανελαστικής θερμότητας’ (inelastic heat fraction) ορίστηκε στο 0.9, υποδηλώνοντας ότι το 90% της ενέργειας που παράγεται από την πλαστική παραμόρφωση μετατρέπεται σε θερμότητα.

iv. Μοντελοποίηση του εργαλείου και των προς συγκόλληση δοκιμίων

Το υλικό του εργαλείου της συγκόλλησης είναι ο χάλυβας AISI H13 FSW, ο οποίος διαμορφώθηκε ως άκαμπτο ισοθερμικό λαγκραντζιανό σώμα. Περιορίζεται σε ένα σημείο αναφοράς στο κέντρο της πάνω επιφάνειας του προκειμένου να εκχωρηθούν τόσο οι φυσικές ιδιότητες (μάζα, αγωγιμότητα) του και όσο και οι παράμετροι της διαδικασίας συγκόλλησης (περιστροφική ταχύτητα και ταχύτητα βύθισης).

Τα προς συγκόλληση τεμάχια μοντελοποιήθηκαν ως Eulerian domains τα οποία περιέχουν δύο περιοχές. Την γεμάτη (full) και την άδεια (void). Στην γεμάτη περιοχή έχουν ‘ανατεθεί’ τα υλικά της επιφάνειας εργασίας (Al 5083-H111 και Al 6082-T4) ενώ στην άδεια περιοχή δεν έχει εισχωρηθεί κανένα υλικό.

v. Μεταφορά θερμότητας από και προς το περιβάλλον

Για λόγους ευκολίας μοντελοποίησης του προβλήματος και περιορισμό ως προς τον υπολογιστικό χρόνο, επιλέχθηκε ο νόμος μεταφοράς θερμότητας από και προς το περιβάλλον να περιγράφεται από αδιαβατική μεταβολή

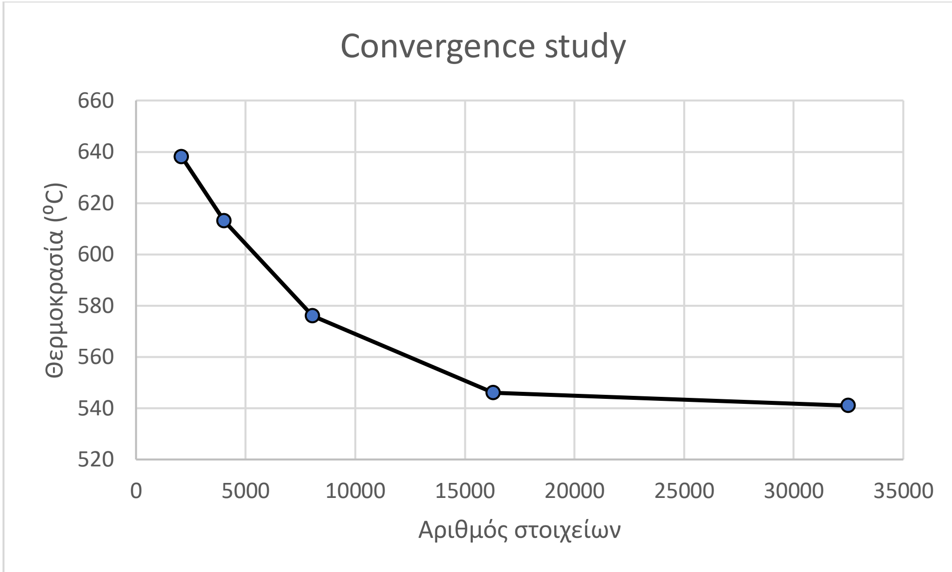
.

4.5.Διακριτοποίηση στοιχείων και εγκατάσταση του πλέγματος (Meshing)

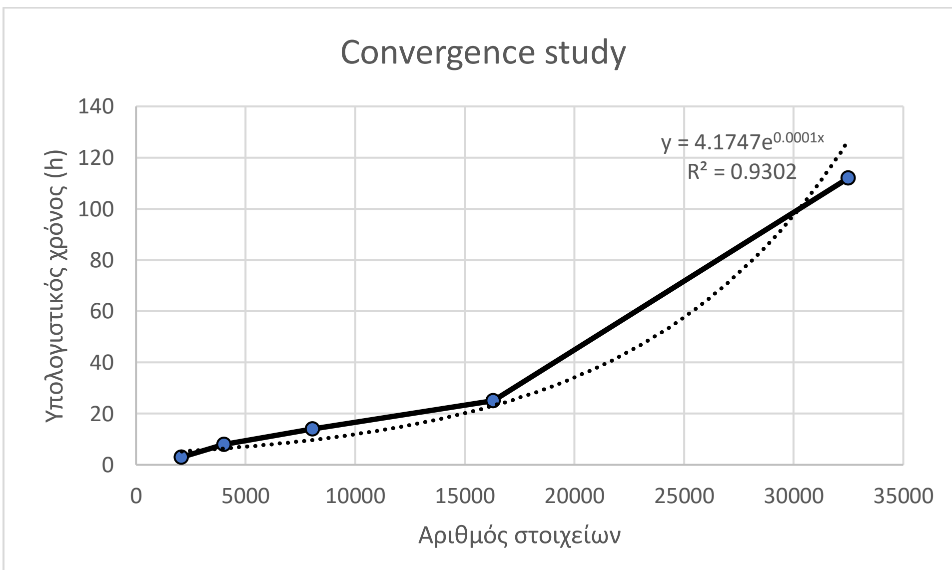
Η χρήση σωστού πλέγματος παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στα προβλήματα πεπερασμένων στοιχείων καθώς μπορεί να επηρεάσει άμεσα τα αποτελέσματα που μπορεί να προκύψουν. Συγκεκριμένα, ένα λεπτομερές πλέγμα μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα ενώ η χρήση πιο αραιού πλέγματος μπορεί να δώσει ανακριβή αποτελέσματα. Ωστόσο, υπάρχει αναλογική σχέση μεταξύ της πυκνότητας του πλέγματος και του υπολογιστικού χρόνου. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, όσα περισσότερα δηλαδή είναι τα στοιχεία που το αποτελούν, τόσο μεγαλύτερη είναι η απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ και κατ΄επέκταση υπολογιστικό χρόνο. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη αναλογία αποτελέσματος και υπολογιστικού χρόνου πραγματοποιείται μια δοκιμή σύγκλισης των αποτελεσμάτων (convergence test).

Πίνακας 11: Σχέση μεταξύ στοιχείων-θερμοκρασίας και συνολικού υπολογιστικού χρόνου.

Αριθμός δοκιμής	Αριθμός στοιχείων	Μέγιστη θερμοκρασία (^oC)	Υπολογιστικός χρόνος (h)
1	2084	638	3
2	4018	613	8
3	8046	576	14
4	16293	546	25
5	32492	541	112



Εικόνα 77: Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Αριθμού Στοιχείων για την μοντελοποίηση.



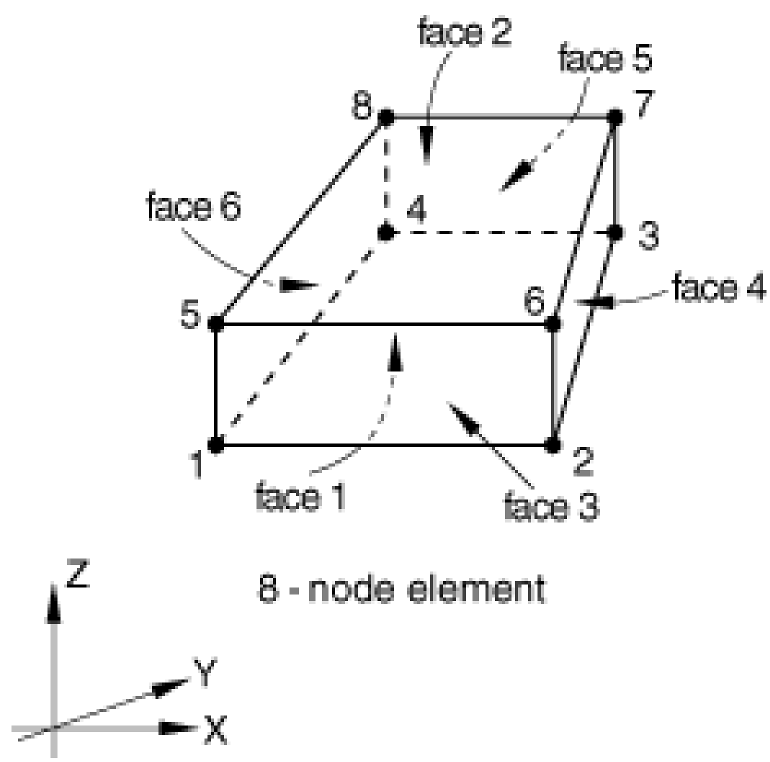
Εικόνα 78: Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Αριθμού Στοιχείων για την μοντελοποίηση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, η ιδανικότερη συσχέτιση μεταξύ των επιθυμητών αποτελεσμάτων και του υπολογιστικού χρόνου δίνεται από το $4^{ο}$ πείραμα. Επομένως, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε ο αριθμός των στοιχείων να είναι 16293.

4.5.1.Τύπος στοιχείων

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διακριτοποίηση της προσομοίωσης είναι το EC3D8RT και το C3D8RT. Το πρώτο χρησιμοποιήθηκε για την διακριτοποίηση των δοκιμίων και το δεύτερο για την διακριτοποίηση του εργαλείου συγκόλλησης.

Το EC3D8RT αποτελεί ένα στοιχείο 8 κόμβων θερμικά συζευγμένο που έχει μεταβλητές θερμοκρασίας και μετατόπισης σε όλους τους κόμβους. Η υποκείμενη διατύπωση μηχανικής απόκρισης αυτών των στοιχείων βασίζεται στο λαγκραντζιανό στοιχείο C3D8R αλλά με επεκτάσεις προκειμένου να επιτρέψει πολλαπλά υλικά. Ακόμη, εμφανίζει μειωμένη ολοκλήρωση (reduced integration). Η γεωμετρία του στοιχείου EC3D8RT φαίνεται στην Εικόνα 79 μαζί με την θέση των κόμβων και των σημείων ολοκλήρωσης (integration point locations).

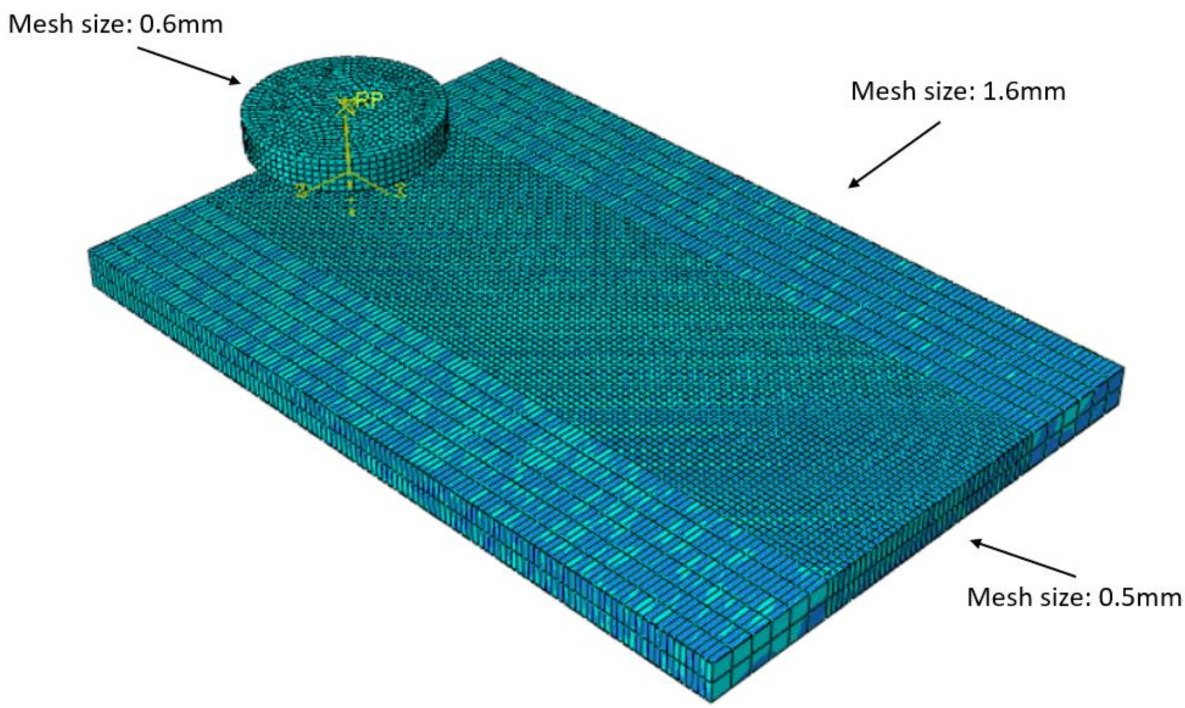


Εικόνα 79: Στοιχείο EC3D8RT (88).

Το στοιχείο C3D8RT, ομοίως με το στοιχείο EC3D8RT, είναι ένα θερμικά συνδυασμένο στοιχείο 8 κόμβων. Επιπλέον περιλαμβάνει μια γραμμική μέθοδο θερμοκρασίας και μετατόπισης του υλικού (trilinear displacement and temperature method). Ο συγκεκριμένος τύπος στοιχείο επιλέχθηκε για την διακριτοποίηση του εργαλείου καθώς αυτό έχει μοντελοποιηθεί ως λαγκραντζιανό σώμα. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, για λόγους ανεπαρκούς υπολογιστικής ισχύος, το εργαλείο έχει θεωρηθεί στερεό υλικό και όλες οι επιφάνειες του έχουν περιοριστεί ισοθερμικά.

4.5.2.Μέγεθος των στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο αριθμός των στοιχείων της διακριτοποίησης και κατ΄επέκταση το μέγεθος τους αποφασίστηκε από την δοκιμή σύγκλισης. Για την επιφάνεια εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 12480 στοιχεία EC3D8RT μεγέθους 1.6mm και στοιχεία μεγέθους 0.5mm κοντά στην ζώνη συγκόλλησης (Εικόνα 77). Για το εργαλείο χρησιμοποιήθηκαν 3813 στοιχεία C3D8RT μεγέθους 0.6mm.



Εικόνα 80: Μέγεθος των στοιχείων της επιφάνειας εργασίας και του εργαλείου..

4.5.3.Ροή του υλικού με την μέθοδο volume-of-fluid (VOF)

Η μοντελοποίηση ενός προβλήματος με την προσέγγιση Eulerian στο Abaqus/Explicit βασίζεται στην μέθοδο volume-of-fluid. Σε αυτήν την μέθοδο το υλικό ‘παρακολουθείται’ καθώς ρέει μέσα στο πλέγμα υπολογίζοντας το κλάσμα του όγκου του μέσα σε κάθε στοιχείο. Εξ’ ορισμού, εάν ένα υλικό γεμίζει πλήρως ένα στοιχείο, το κλάσμα όγκου του είναι 1 ενώ εάν δεν υπάρχει υλικό μέσα στο στοιχείο, το κλάσμα όγκου του στοιχείου αυτού είναι 0.

Επίσης, τα Eulerian στοιχεία έχουν την δυνατότητα να περιέχουν παραπάνω από ένα υλικά. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν το άθροισμα όγκου όλων των υλικών είναι μικρότερο από 1, τότε ο υπόλοιπος όγκος του στοιχείου γεμίζει αναγκαστικά με κενό (89).

4.5.4.Επιλογές ανάλυσης του προβλήματος στο Abaqus

i. Hourglass control

Το πρόβλημα της κλεψύδρας η αλλιώς το φαινόμενο hourglass mode μπορεί να εμφανιστεί σε στοιχεία που έχουν ένα μόνο σημείο ολοκλήρωσης (Integration point). Το σημείο ολοκλήρωσης είναι ένα σημείο μέσα σε ένα στοιχείο στο οποίο επιλύνονται οι εξισώσεις που απαιτεί κάθε πρόβλημα. Αυτά τα σημεία επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την προσομοίωση να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβή. Σε στοιχεία λοιπόν όπως αυτά που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα προσομοίωση (EC3D8RT και C3D8RT), τα οποία έχουν ένα σημείο ολοκλήρωσης έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος μείωσης των σημείων ολοκλήρωσης. Αυτή η τεχνική ενώ ελαχιστοποιεί τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο, μπορεί να εμφανίσει το πρόβλημα της μηδενικής ενέργειας (zero energy mode), το οποίο είναι επίσης γνωστό ως κατάσταση κλεψύδρας (hourglass mode). Αυτή η κατάσταση έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει ακαμψία στο υλικό. Η χρήση ενός μόνο σημείου ολοκλήρωσης επιτρέπει στα στοιχεία να παραμορφώνονται έτσι ώστε οι καταπονήσεις που υπολογίζονται σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης να είναι μηδέν. Το πρόβλημα της κλεψύδρας οδηγεί σε μια ανεξέλεγκτη κατάσταση παραμόρφωσης του πλέγματος κατά την ανάλυση λόγω των μηδενικών καταπονήσεων που αντιστέκονται σε αυτές τις παραμορφώσεις.

Ο έλεγχος της κλεψύδρας (hourglass control) εφαρμόζεται σε μοντέλα που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα έτσι ώστε να αποφευχθεί η παραμόρφωση χωρίς πρόσθετους περιορισμούς στην φυσική απόκριση του στοιχείου. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας ακαμψία στο στοιχείο που εμφανίζει το πρόβλημα της κλεψύδρας. Κατ΄αυτόν τον τρόπο το στοιχείο αντιστέκεται στην παραμόρφωση του. Στο Abaqus/Explicit υπάρχουν 3 τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταστολή του προβλήματος της κλεψύδρας.

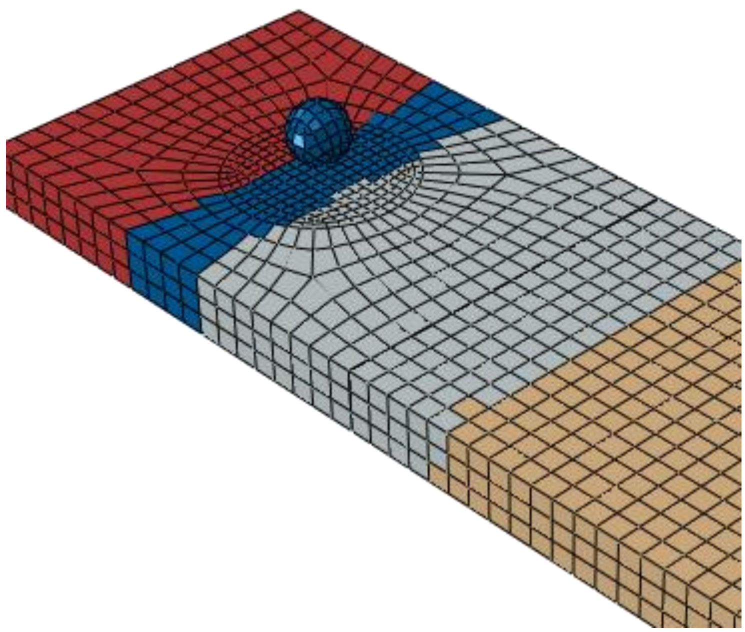
1. Integral viscoelastic approach
2. Kelvin viscoelastic approach
3. Enhanced hourglass control approach

ii. Parallelization method

Η μέθοδος παράλληλης χρήσης χρησιμοποιείται για την μείωση του υπολογιστικού χρόνου σε αναλύσεις με μεγάλο αριθμό προσαυξήσεων (increments). Στο Abaqus/Explicit υπάρχουν δυο τρόποι παραλληλισμού.

1. Domain level decomposition
2. Loop level decomposition

Στην πρώτη μέθοδο, το μοντέλο χωρίζεται σε έναν αριθμό τοπολογικών τομέων (topological domains). Οι τομείς αυτοί κατανέμονται ομοιόμορφα μεταξύ των διαθέσιμων πυρήνων του επεξεργαστή. Θα πρέπει πάντα ο αριθμός των τομέων να είναι πολλαπλάσιος των πυρήνων το επεξεργαστή. Εν συνεχεία, η ανάλυση πραγματοποιείται ανεξάρτητα σε κάθε τομέα. Ωστόσο, οι πληροφορίες πρέπει να διαβιβάζονται μεταξύ των τομέων σε κάθε προσαύξηση επειδή οι τομείς μοιράζονται κοινές συνοριακές συνθήκες. Κατά την αρχικοποίηση της διαδικασίας με την χρήση αυτής της μεθόδου, οι τομείς διαιρούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνουν περίπου το ίδιο 'βάρος' υπολογιστικού κόστους. Το ισοζύγιο φορτίου ορίζεται ως ο λόγος της υπολογιστικής δαπάνης όλων των τομέων στην πιο 'ακριβή' υπολογιστικά διαδικασία προς εκείνη όλων των τομέων με την 'φθηνότερη' υπολογιστικά διαδικασία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις μεγάλου μεγέθους (90).



Εικόνα 81: Παράδειγμα της μεθόδου domain level decomposition. (90)

Η 'μέθοδος επίπεδου βρόχου' (loop-level method) παραλληλίζει βρόχους χαμηλού επιπέδου που ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος του υπολογιστικού κόστους. Έτσι αυξάνεται η υπολογιστική απόδοση της ανάλυσης. Όλοι οι επεξεργαστές υπολογίζουν συνεχώς κάθε προσαύξηση για έναν μόνο τομέα. Πρέπει να αναφερθεί ακόμη ότι η εν λόγω μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές που χρησιμοποιούν Windows.

Συγκριτικά, η μέθοδος domain level decomposition είναι πιο αποτελεσματική στην μείωση του υπολογιστική χρόνο για ένα δεδομένο πείραμα. Επομένως, για την ανάλυση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε αυτήν την διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος. Το μοντέλο χωρίστηκε σε 6 τομείς και έγινε χρήση 6 πυρήνων επεξεργαστή Inter Core i7-10750H (up to 5GHz) με 8GB RAM.

iii. Precision level

Στο Abaqus/Explicit υπάρχουν δύο επιλογές σχετικά με το επίπεδο ακρίβειας που μπορεί να εφαρμοστεί. Αυτές είναι: η προσομοίωση μονής ακρίβειας (single-precision) και η προσομοίωση διπλής ακρίβειας (double-precision). Η προσομοίωση μονής ακρίβειας χρησιμοποιείται για μοντέλα που έχουν διακριτοποιηθεί με σχετικά λίγες προσαυξήσεις (συνήθως κάτω από 300.000). Ακόμη, μπορούν να περιορίσουν τον υπολογιστικό χρόνο κατά 20-30% σε σχέση με την προσομοίωση διπλής ακρίβειας. Η προσομοίωση διπλής ακρίβειας χρησιμοποιείται για πιο σύνθετες αναλύσεις και προσεγγίζει τα αποτελέσματα με περισσότερα ψηφία. Για την ανάλυση αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ανάλυση διπλής ακρίβειας.

iv. Computational efficiency

Σε αναλύσεις δυναμικού χαρακτήρα προκειμένου να μοντελοποιηθεί το πείραμα υπό πραγματικές συνθήκες είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται οι αληθινοί χρόνοι σε κάθε βήμα. Ωστόσο, αυτό έχει μεγάλη επίπτωση στο υπολογιστικό κόστος και έτσι μπορούν να εφαρμοστούν μέθοδοι που να μειώνουν τον υπολογιστικό χρόνο έτσι ώστε να ανταποκρίνεται σε ένα πιο ρεαλιστικό χρονοδιάγραμμα ολοκλήρωσης της ανάλυσης. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις υπάρχουν στο Abaqus/Explicit. Η τεχνική mass scaling και η τεχνική time scaling.

Mass scaling

Το mass scaling αποτελεί μια προσέγγιση με σκοπό την επιτάχυνση της ανάλυσης μιας προσομοίωσης αυξάνοντας τον σταθερό μέγεθος αύξησης του χρόνου (stable time increment) σε κάθε βήμα. Η πυκνότητα του υλικού αυξάνεται τεχνητά κατά ένα συντελεστή ‘f^2’και έτσι αυξάνει το σταθερό μέγεθος αύξησης του χρόνου κατά συντελεστή ‘f’.

Βασικό μειονέκτημα της τεχνικής mass scaling αποτελεί η ανικανότητα του να εφαρμόζεται σε προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν ανάλυση με την προσέγγιση Eulerian γιατί η αλλαγή της μάζας των στοιχείων θα πρόσθετε και θα αφαιρούσε υλικό από τα στοιχεία. Αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καθώς, όπως έχει προαναφερθεί, σε έναν τομέα Eulerian το υλικό ρέει μέσα στο πλέγμα αντί να κινείται με το καθορισμένο σύνολο των κόμβων του κάθε στοιχείου (91).

Time scaling

Στην τεχνική time scaling οι δυνάμεις που ασκούνται κατά την διαδικασία της προσομοίωσης αυξάνονται τεχνητά για να επιταχυνθεί η διαδικασία. Στον ίδιο χρόνο, όλες οι παράμετροι της διαδικασίας όπως η ταχύτητα βύθισης του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης αυξάνονται κατά έναν σταθερό συντελεστή ενώ η χρονική περίοδος κάθε βήματος μειώνεται με τον ίδιο συντελεστή. Ωστόσο, λόγω της φύσης του υλικού να αλλάζουν οι ιδιότητες του ανάλογα με την θερμοκρασία, παρατηρείται συχνά ότι δεν επιτυγχάνονται ακριβή αποτελέσματα.

5.Αποτελέσματα και συζήτηση

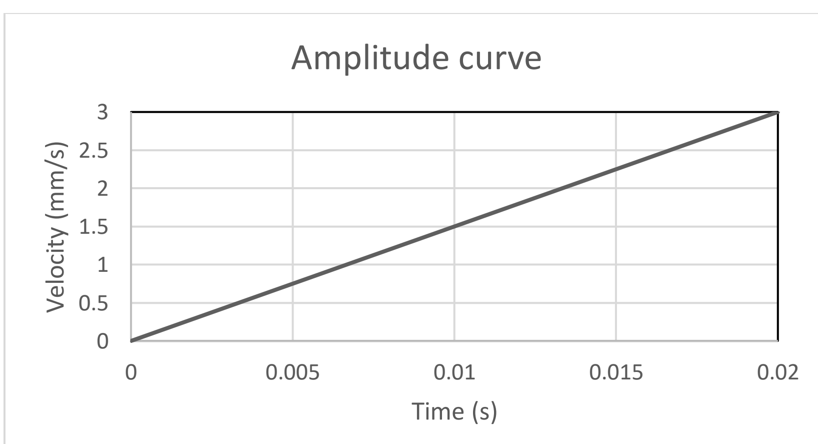
Έπειτα από πληθώρα δοκιμαστικών αριθμητικών πειραμάτων και παραμετροποίηση του προβλήματος, 4 συνολικά πειράματα θα αναλυθούν παρακάτω. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε α) η κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε στάδιο συγκόλλησης ξεχωριστά, β) η διαμόρφωση των ζωνών συγκόλλησης, γ) η επίδραση που ασκούν διαφορετικές γωνίες κλήσης του εργαλείου και δ) η επιρροή της περιστροφικής ταχύτητας στην μέγιστη θερμοκρασία. Προκειμένου να συγκριθούν καταλλήλως τα παραπάνω πειράματα, οι υπόλοιπες ιδιότητες όπως η τριβή, οι ιδιότητες των υλικών, τα time steps και οριακές συνθήκες παρέμειναν ίδιες σε όλα τα πειράματα.

Πίνακας 12: Παράμετροι εκτέλεσης των πειραμάτων.

Πείραμα	1	2	3	4
Περιστροφική ταχύτητα	800 RPM	800 RPM	800 RPM	1200 RPM
Γωνία κλίσης του εργαλείου	0^o	1^o	2^o	2^o

5.1.Μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας και της γεωμετρίας των ζωνών συγκόλλησης.

Στο παραπάνω αριθμητικό πείραμα, πέρα από όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους, χρησιμοποιήθηκε γωνίας κλίσης του εργαλείου 2^o. Ακόμη, προκειμένου να αποφευχθεί πολύ μεγάλη αρχική επιτάχυνση του εργαλείου στην αρχή του σταδίου βύθισης, μια καμπύλη πλάτους (amplitude curve) ορίστηκε στο Abaqus Explicit για να καθορίσει τις χρονικές διακυμάνσεις της κάθετης πορείας του εργαλείου έως ότου αυτό φτάσει την τελική ταχύτητα των 3 mm/s. Η καμπύλη φαίνεται στην Εικόνα 82.



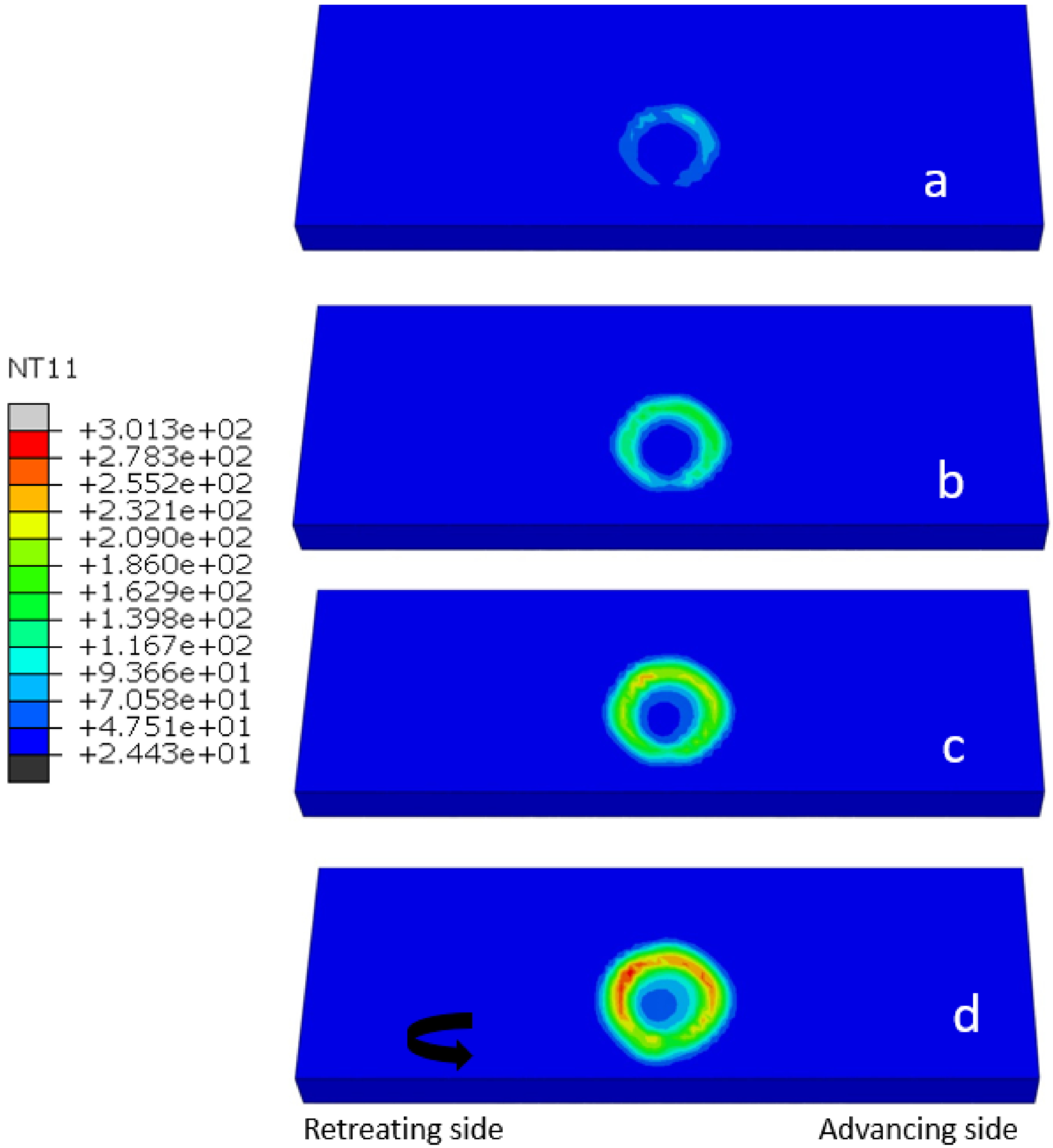
Εικόνα 82: Καμπύλη πλάτους κάθετης ταχύτητας εργαλείου- χρόνου κατά το στάδιο βύθισης.

Στάδιο βύθισης (Plunging Phase)

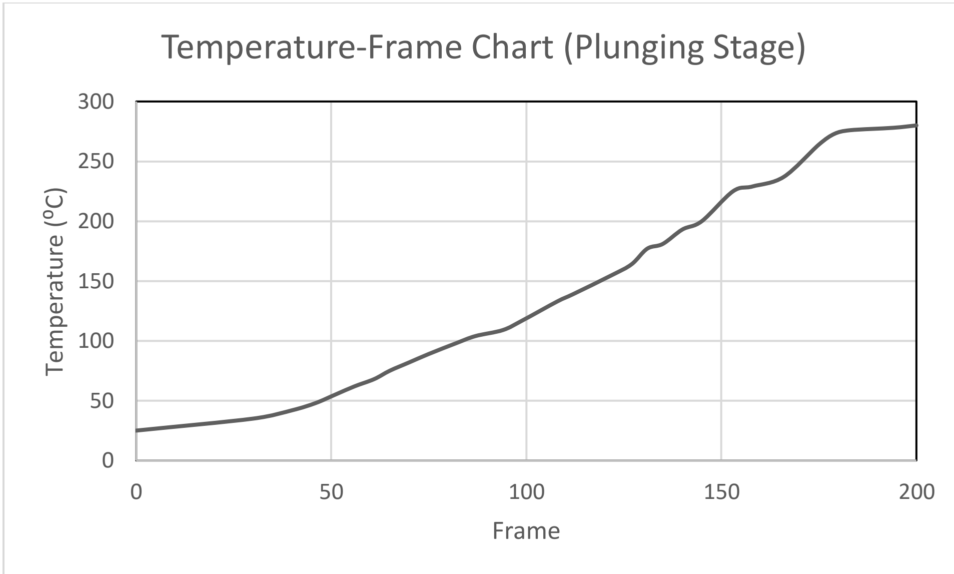
Στην Εικόνα 83 απεικονίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του σταδίου βύθισης της συγκόλλησης. Η χρονική περίοδος του σταδίου βύθισης χωρίστηκε σε 200 frames (για τα 0.02s). Η πρώτη εικόνα αναλογεί στα 80 frames, η δεύτερη στα 120 frames, η τρίτη στα 160 frames και η τέταρτη στα 200 frames, όταν πια το εργαλείο έχει βυθιστεί πλήρως μέσα στα προς συγκόλληση τεμάχια. Όπως φαίνεται, η θερμοκρασία αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την πάροδο του χρόνου έως ότου φτάσει στην μέγιστη τιμή της στο τέλος του σταδίου, στους 278^{o}C κατά μήκος της Ζώνης Ανάδευσης. Η θερμοκρασία αυτή αντιστοιχεί περίπου στο 50% της θερμοκρασίας τήξης των κραμάτων αλουμινίου του πειράματος. Στην θερμομηχανικά επηρεασμένη (TMAZ) και την θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ), το θερμοκρασιακό εύρος είναι 93-230^{o}C. Το διάγραμμα θερμοκρασίας-frame παρουσιάζει αναλυτικά την εν λόγω γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στους δύο παράγοντες που έχουν αναλυθεί και παραπάνω. Την τριβή, η οποία προκαλεί παραγωγή θερμότητας, και την πλαστική παραμόρφωση του υλικού.

Η χαμηλή τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας οφείλεται στο γεγονός ότι μέχρι την τελευταία χρονική στιγμή κατά το στάδιο βύθισης, μόνο ο πείρος βρίσκεται σε επαφή με τα δοκίμια. Στην πραγματικότητα το περιαυχένιο είναι αυτό που προκαλεί την μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της μεγάλης επιφάνειας του που έρχεται σε επαφή με τα δοκίμια και προκαλείται τριβή.

Παρατηρείται ακόμη, ότι στην προωθούμενη πλευρά σε κάθε δεδομένο frame, η θερμοκρασία είναι υψηλότερη συγκριτικά με αυτήν στην υποχωρούσα πλευρά. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο ότι στην προωθούμενη πλευρά επικρατεί ένα θετικός συνδυασμός της ταχύτητας πρόωσης και της περιστροφικής ταχύτητας, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η παρατήρηση έρχεται σε συμφωνία με αντίστοιχα πειράματα από ερευνητές παγκοσμίως (32).



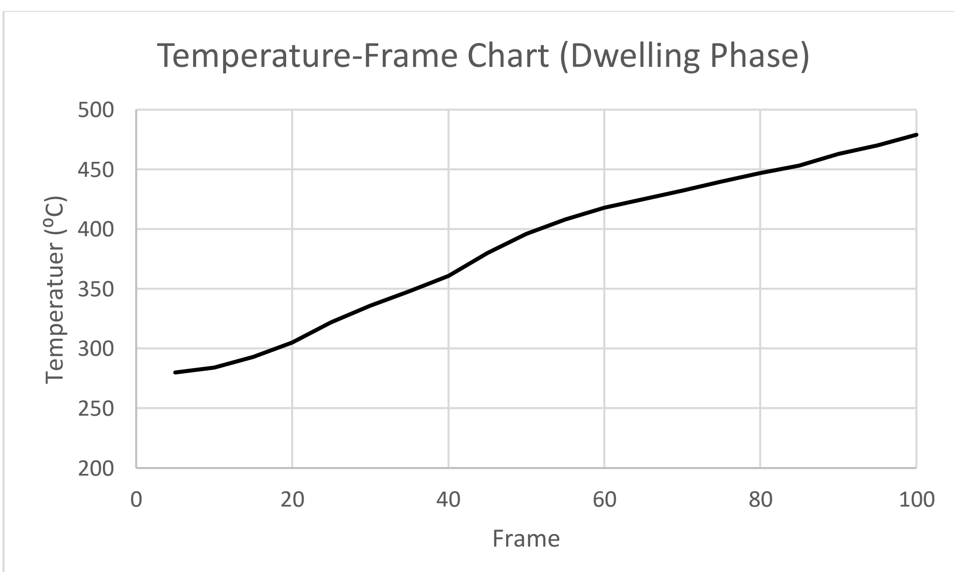
Εικόνα 83: Απεικόνιση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του σταδίου βύθισης στα (a) 80 frames, (b) 120 frames, (c) 160 frames, (d) 200 frames.



Εικόνα 84: Διάγραμμα θερμοκρασίας-frame κατά την διάρκεια του σταδίου βύθισης του εργαλείου.

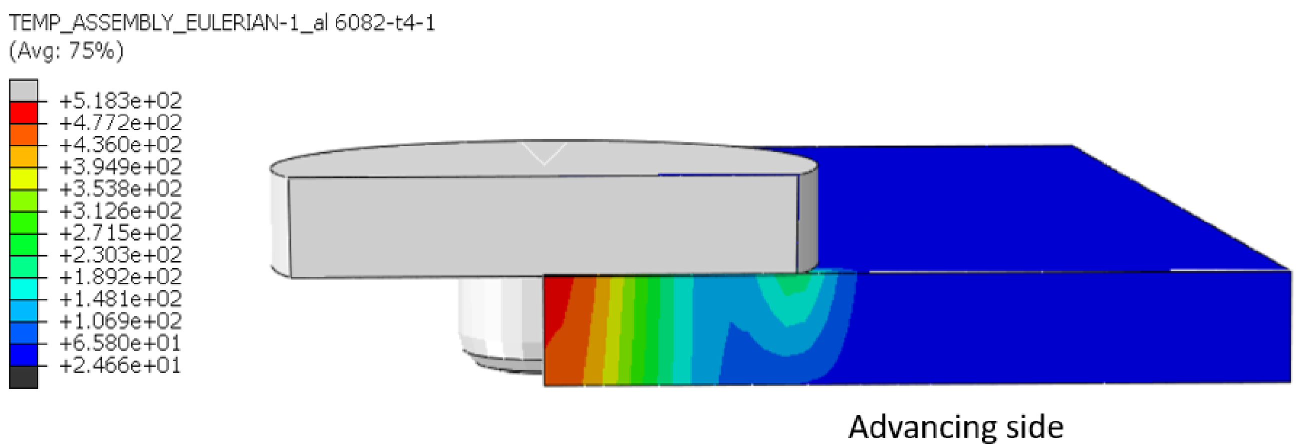
<u>Στάδιο σταθεροποίησης (Dwelling phase)</u>

Στο στάδιο σταθεροποίησης, η θερμοκρασία πλέον αναπτύσσεται ραγδαία και οδεύει προς την επίτευξη της τελικής θερμοκρασίας η οποία θα επέλθει στις πρώτες χρονικές στιγμές του σταδίου συγκόλλησης. Η χρονική περίοδος του σταδίου σταθεροποίησης χωρίστηκε σε 100 frames (για το 0.1s). Όπως αποκαλύπτει και το διάγραμμα της Εικόνας 82, κατά το στάδιο σταθεροποίησης λαμβάνει χώρα μια σχεδόν γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας από τους 280^oC στους 477^oC.

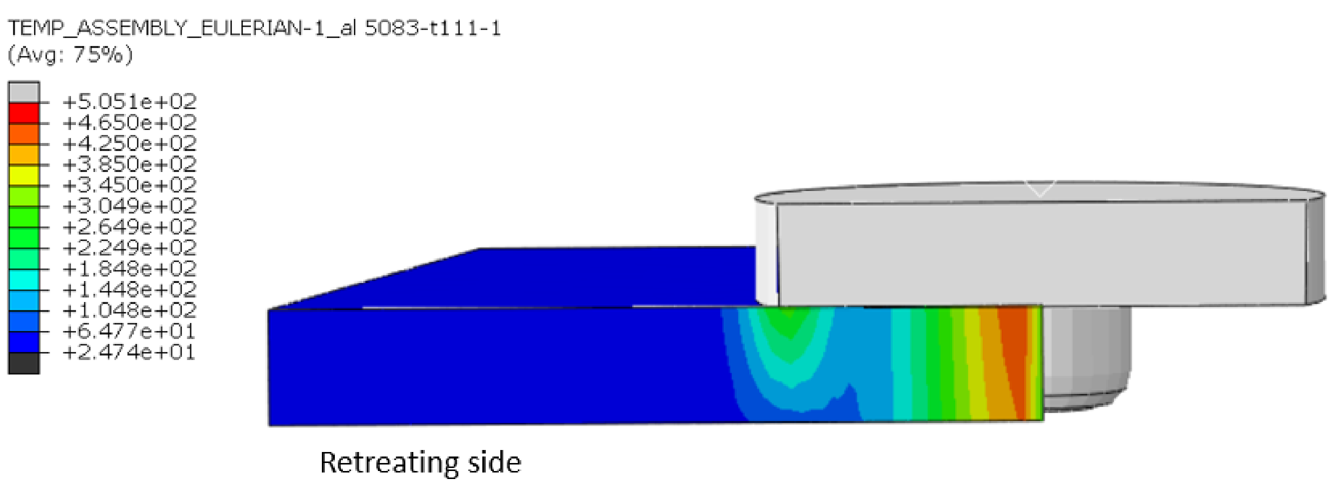


Εικόνα 85: Διάγραμμα θερμοκρασίας-frame κατά την διάρκεια του σταδίου σταθεροποίησης του εργαλείου.

Οι εικόνες 83 και 84 παρουσιάζουν την κατανομή των θερμοκρασιακών πεδίων γύρω από το εργαλείο. Όπως μπορεί κανείς να δει, στην προωθούμενη πλευρά, η μέγιστη θερμοκρασία είναι κατά 12^{o}C μεγαλύτερη από αυτήν στην υποχωρούσα πλευρά. Ακόμη, στην προωθούμενη πλευρά, οι περιοχές που η θερμοκρασία αγγίζει το μέγιστο είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος. Έτσι διαμορφώνονται ελαφρώς διαφορετικά οι ζώνες συγκόλλησης από την μία στην άλλη πλευρά. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό συμβαίνει λόγω του ότι το υλικό δίπλα στην επιφάνεια του εργαλείου κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα και υψηλότερο ρυθμό διάτμησης μέσα στην προωθούμενη πλευρά συγκριτικά με την υποχωρούσα πλευρά. Έτσι τα ποσά της παραγόμενης θερμότητας είναι μεγαλύτερα.



Εικόνα 86: Εγκάρσια και διαμήκης τομή της προωθούμενης πλευράς κατά την διάρκεια του σταδίου σταθεροποίησης (στα 80 frames).

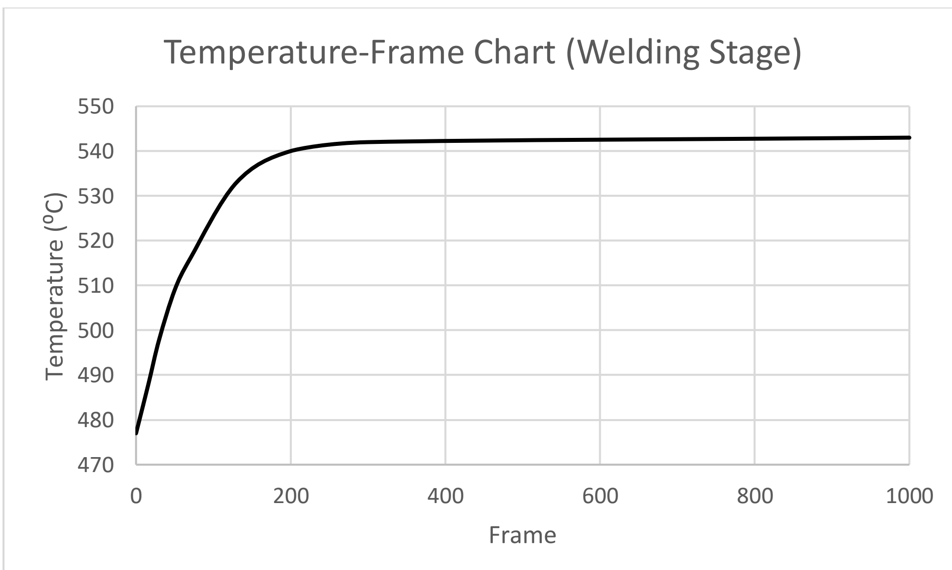


Εικόνα 87: Εγκάρσια και διαμήκης τομή της υποχωρούσας πλευράς κατά την διάρκεια του σταδίου σταθεροποίησης (στα 80 frames).

Από τις δύο παραπάνω εικόνες μπορεί να παρατηρηθεί ακόμη ότι η κατανομή της θερμοκρασίας σχηματίζει πεδία σχήματος V, ειδικότερα κοντά στην περιοχή που κινείται ο πείρος. Η θερμοκρασία είναι υψηλότερη στο άνω άκρο του κράματος αλουμινίου λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας παραγόμενης τριβής που δημιουργείται τόσο από το περιαυχένιο όσο και από τον πείρο. Κατά μήκος του αλουμινίου και όσο η επίδραση της θερμότητας που παράγεται από το περιαυχένιο μειώνεται, παρατηρείται σταδιακή μείωση της τιμής της θερμοκρασίας όσο πλησιάζει προς το κάτω μέρος του δοκιμίου. Ένας ακόμη λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό είναι η ελαφρώς μικρότερη διατομή του πείρου στο κάτω του μέρος καθώς προκειμένου να μην διαθέτει αιχμές, εφαρμόστηκε η τεχνική fillet για να δημιουργηθεί μια ομαλή επιφάνεια.

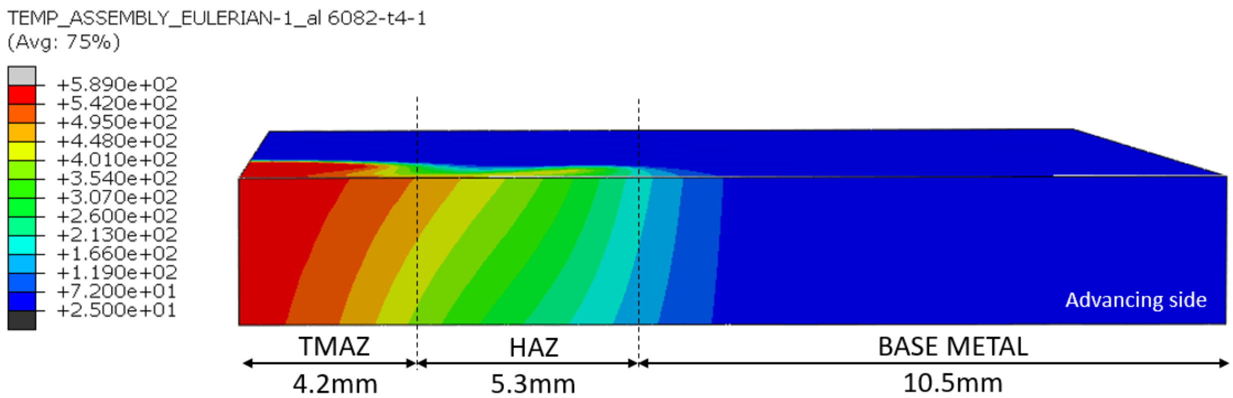
Στάδιο συγκόλλησης (Welding Phase)

Ο χρόνος μοντελοποίησης του σταδίου της συγκόλλησης (1s) χωρίστηκε σε 1000 frames. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 85, από την αρχή του σταδίου συγκόλλησης σημειώνεται σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας από τους 477^{o}C. Η αύξηση αυτή σταθεροποιείται περίπου στο 20% της συνολικής χρονικής περιόδου του σταδίου συγκόλλησης στους 543^{o}C όπου και μένει μέχρι το τέλος της διαδικασίας.

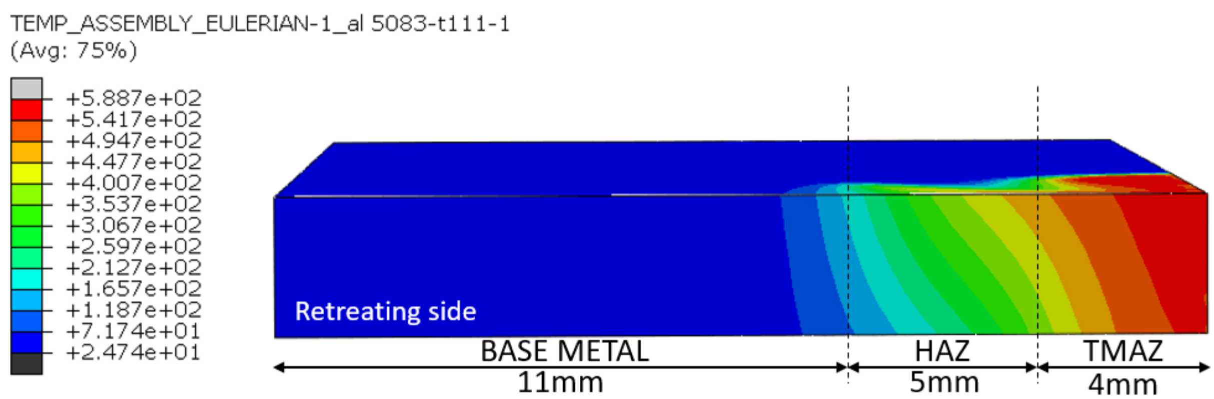


Εικόνα 88: Διάγραμμα θερμοκρασίας-frame κατά την διάρκεια του σταδίου συγκόλλησης.

Από τις Εικόνες 86 και 87 μπορούν να προκύψουν 2 συμπεράσματα σχετικά με την θερμοκρασία στο στάδιο της συγκόλλησης. Αρχικά, παρατηρείται ότι μέγιστη η θερμοκρασία στην υποχωρούσα πλευρά (541^{o}C) είναι μηδαμινά μικρότερη από αυτή στην προωθούμενη πλευρά (542^{o}C). Παρόλη την πολύ μικρή διαφορά στην τιμή, η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία και με τις παραπάνω παρατηρήσεις για τους λόγους που έχουν αναλυθεί και αφορούν τον τρόπο παραγωγής της θερμότητας (32).



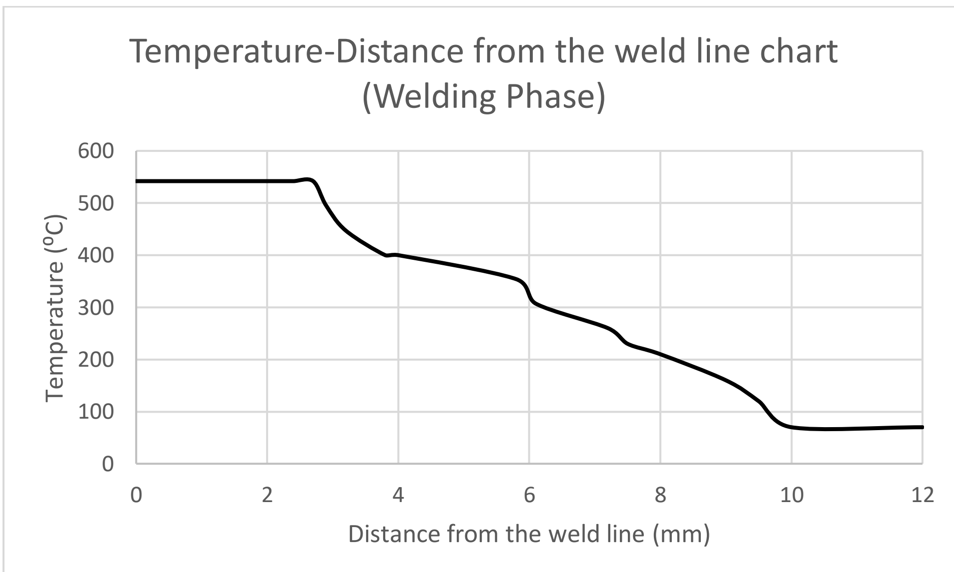
Εικόνα 89: Απεικόνιση της θερμοκρασίας και του μεγέθους των ζωνών συγκόλλησης στην προωθούμενη πλευρά κατά το στάδιο της συγκόλλησης (500 frames).



Εικόνα 90: : Απεικόνιση της θερμοκρασίας και του μεγέθους των ζωνών συγκόλλησης στην υποχωρούσα πλευρά κατά το στάδιο της συγκόλλησης (500 frames).

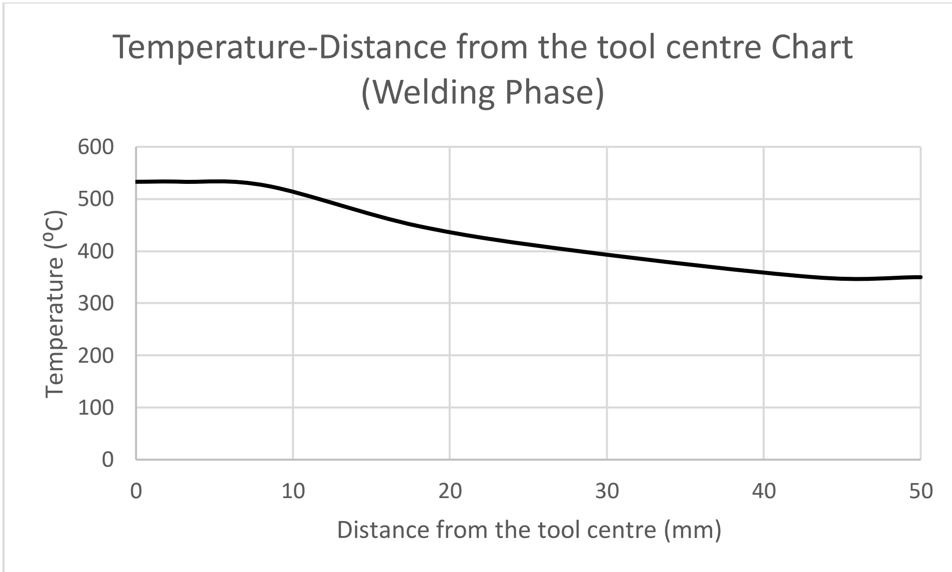
Το δεύτερο συμπέρασμα που μπορεί να αντληθεί και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ο σχηματισμός των ζωνών συγκόλλησης. Όπως φαίνεται, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στην προωθούμενη πλευρά συγκριτικά με αυτήν στην υποχωρούσα πλευρά (4.2mm έναντι 4mm). Το γεγονός αυτό έγκειται κυρίως στην διαφορά στην μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε κάθε πλευρά. Ομοίως, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη ακολουθεί το ίδιο μοτίβο λόγω της μετάδοσης της θερμοκρασίας από το κέντρο της ζώνης συγκόλλησης κατά μήκος του προς συγκόλληση τεμαχίου. Επιπρόσθετα, και στο στάδιο συγκόλλησης παρατηρείται η καθ΄ ύψος διάδοση της θερμοκρασίας σχήματος V, φαινόμενο που οφείλεται σε λόγους που έχουν προαναφερθεί στο στάδιο σταθεροποίησης. Ο υπολογισμός των διαστάσεων των ζωνών συγκόλλησης δεν ήταν εφικτό να προσδιοριστεί με ακρίβεια μέσω του λογισμικού Abaqus/Explicit. Έτσι, ο υπολογισμός έγινε με την βοήθεια του πλέγματος που είχε δημιουργηθεί κατά το στάδιο της διακριτοποίησης όπου υπολογίσθηκε μακροσκοπικά το μήκος των ζωνών. Συνεπώς είναι λογικό να υπάρχει μια απόκλιση από τις πραγματικές διαστάσεις των ζωνών.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας έρχονται σε συμφωνία και με την θεωρητική ποσοστιαία θερμοκρασία του σημείου τήξης των υλικών που ανέρχεται στο 90-95% κατά την συγκόλληση. Συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες τήξης των υλικών του πειράματος είναι 570^{o}C για το Al 5083-H11 και 588^{o}C για το Al 6082-T4 την στιγμή που η μέγιστη θερμοκρασία του πειράματος έφτασε τους 543^{o}C.



Εικόνα 91: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόστασης από την γραμμή συγκόλλησης κατά την διάρκεια του σταδίου συγκόλλησης (500 frames).

Σε συνέχεια με τις παραπάνω παρατηρήσεις, στο διάγραμμα της Εικόνας 91 μπορεί να φανεί λεπτομερώς η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της τομής του δοκιμίου στον άξονα x. Οι έντονες διακυμάνσεις της καμπύλης μαρτυρούν και την τοποθεσία των ζωνών συγκόλλησης. Συγκεκριμένα από τους 543^{o}C έως και τους 400^{o}C περίπου ορίζεται η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ), από τους 400^{o}C έως τους 212^{o}C ορίζεται η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (HAZ) και από τους 212^{o}C η θερμοκρασία μειώνεται έως ότου σταθεροποιηθεί λίγο κάτω από τους 100^{o}C για το υπολειπόμενο μέρος του κράματος αλουμινίου (Μητρικό υλικό).



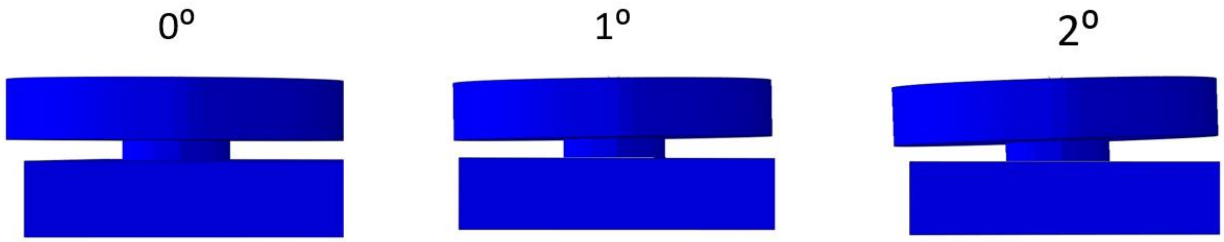
Εικόνα 92: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόστασης από το κέντρο του εργαλείου κατά την διάρκεια του σταδίου συγκόλλησης σημείου που απέχει 6mm από το άκρο των δοκιμίων.

Επιπλέον, παρουσιάζει ενδιαφέρον το διάγραμμα της Εικόνας 92. Μελετήθηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας για ένα δεδομένο σημείο πάνω στην ζώνη συγκόλλησης. Το σημείο βρίσκεται σε απόσταση 5mm από το άκρο που ξεκινάει η πορεία του εργαλείου. Όπως φαίνεται, την στιγμή που το εργαλείο περνάει από το σημείο, η θερμοκρασία είναι η μέγιστη και αγγίζει τους 543^{o}C. Όσο το εργαλείο απομακρύνεται από αυτό, η θερμοκρασία πέφτει σταδιακά και σταθεροποιείται περίπου στους 350^{o}C. Η τιμή αυτή κρίνεται υψηλή συγκριτικά με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο, στο εν λόγω αριθμητικό πείραμα έχει θεωρηθεί αδιαβατική μεταβολή θερμότητας και έτσι η απόψυξη δεν πραγματοποιείται ομαλά.

5.2.Επίδραση της γωνίας κλίσης του εργαλείου στην θερμοκρασία

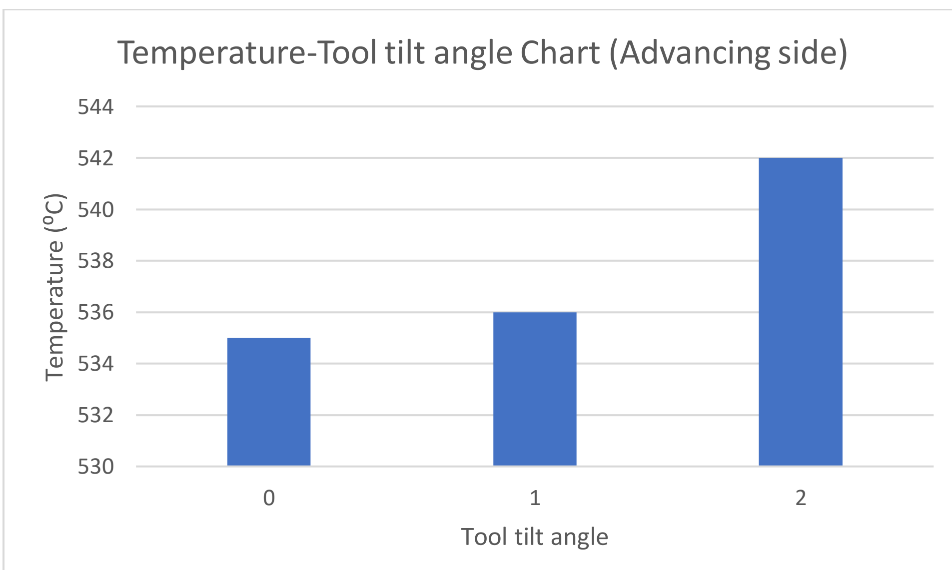
Στην συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, κατά κόρον το εργαλείο βρίσκεται υπό κλίση στον άξονα y σε τιμές από 0^{o} (όπου το εργαλείο είναι κάθετο στην επιφάνεια εργασίας) έως 3^{o}. Η γωνία κλίσης επηρεάζει την ροή του υλικού και την παραγωγή θερμότητας. Από την μία πλευρά, η μη μηδενική γωνία κλίσης εξασφαλίζει την πλήρη επαφή του υλικού με το εργαλείο αλλά από την άλλη, η γωνία κλίσης δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποια όρια καθώς μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες ζημιές στα προς συγκόλληση τεμάχια. Ιδανική γωνία κλίσης είναι αυτή που εξασφαλίζει τιμές θερμοκρασίας στα επιθυμητά όρια -ανάλογα το υλικό- και ανάδευση και μεταφορά του υλικού από το μπροστινό στο πίσω τμήμα του εργαλείου.

Προκειμένου λοιπόν να βγουν συμπεράσματα για την επίδραση που έχει η γωνία κλίσης του υλικού στην θερμοκρασία κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση διεξήχθησαν 3 πειράματα με 3 διαφορετικές γωνίες κλίσης, 0^{o},1^{o} και 2^{o} (Εικόνα 93). Και στις 3 περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες συνθήκες παραμετροποίησης του υπολογιστικού προβλήματος.



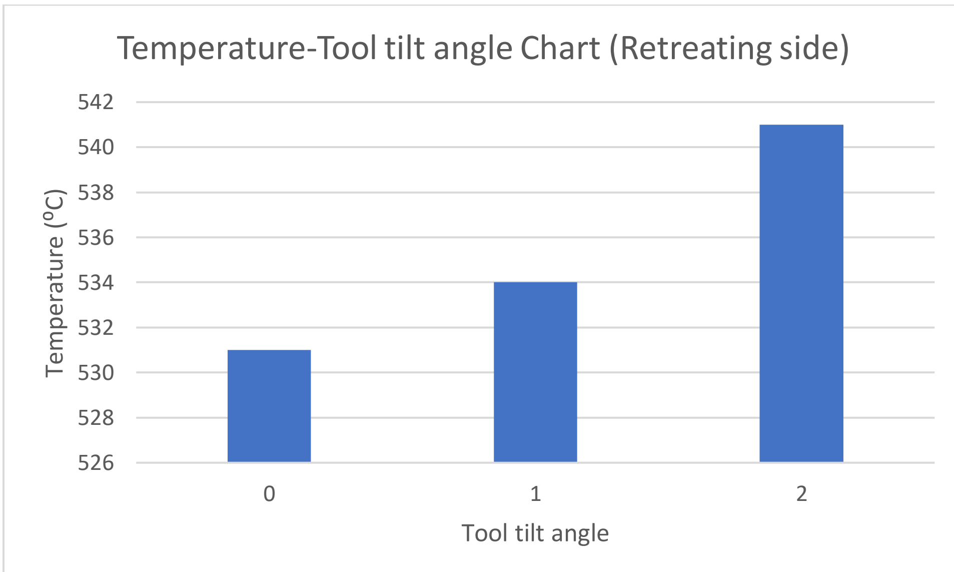
Εικόνα 93: Απεικόνιση των 3 διαφορετικών γωνιών κλίσης του εργαλείου,

Τα αποτελέσματα από τα 3 πειράματα που διεξήχθησαν έδειξαν ότι με την αύξηση της γωνίας κλίσης του εργαλείου αυξάνεται και η μέγιστη θερμοκρασία τόσο στην ζώνη ανάδευσης όσο και στο υπόλοιπο δοκίμιο. Στο διάγραμμα της Εικόνας 94 μπορεί κανείς να παρατηρήσει την γραμμική αυτή αύξηση της θερμοκρασίας στην προωθούμενη πλευρά. Οι τιμές των μέγιστων θερμοκρασιών που παρατηρήθηκαν είναι 535°C για την περίπτωση των 0°, 536°C για την 1° και 542°C για τις 2° κλίσης του εργαλείου. Τα αποτελέσματα αυτά συμπίπτουν με την διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των τιμών είναι μικρότερη συγκριτικά με αποτελέσματα άλλων ερευνητών, όπου έχει παρατηρηθεί αύξηση κατά περίπου 15°C ανά μοίρα (32).



Εικόνα 94: Διάγραμμα θερμοκρασίας-γωνίας κλίσης του εργαλείου για την προωθούμενη πλευρά.

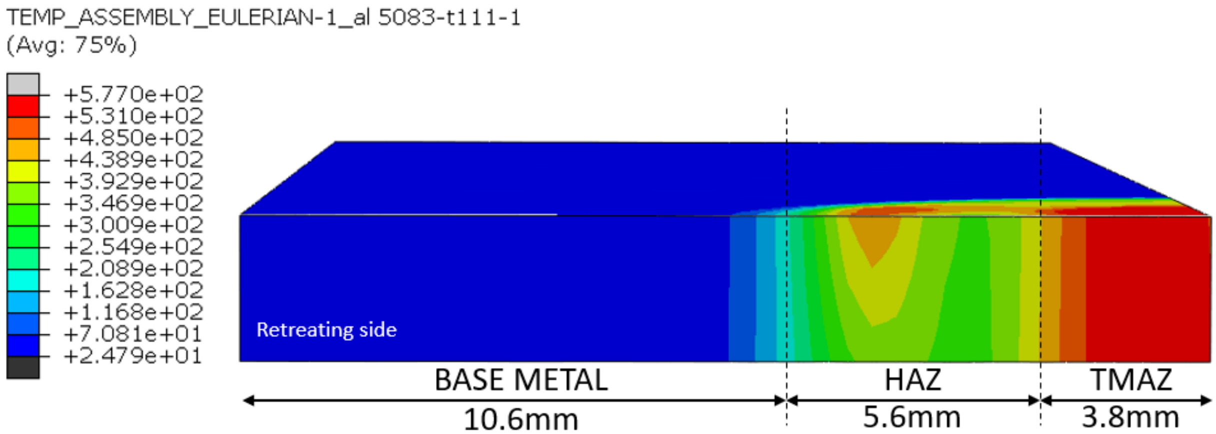
Η φύση και η αναλογία των αποτελεσμάτων για την προωθούμενη πλευρά έρχεται σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα για την περίπτωση της υποχωρούσας πλευράς, όπως μπορεί να φανεί και στην Εικόνα 95. Παρατηρείται επίσης σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας με την αύξηση της γωνίας κλήσης του εργαλείου. Συγκεκριμένα, οι μέγιστες θερμοκρασιακές τιμές που παρατηρήθηκαν είναι 531°C για τις 0°, 534°C για την 1° και 541°C για τις 2°. Ομοίως με την προωθούμενη πλευρά, και στην υποχωρούσα πλευρά η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις γωνίες κλήσης είναι μικρότερη από την αναμενόμενη. Η απόκλιση αυτή με το συγκρινόμενο αριθμητικό πείραμα (32) μπορεί να οφείλεται είτε στην χρήση διαφορετικών υλικών είτε στην χρήση διαφορετικών παραμέτρων συγκόλλησης.



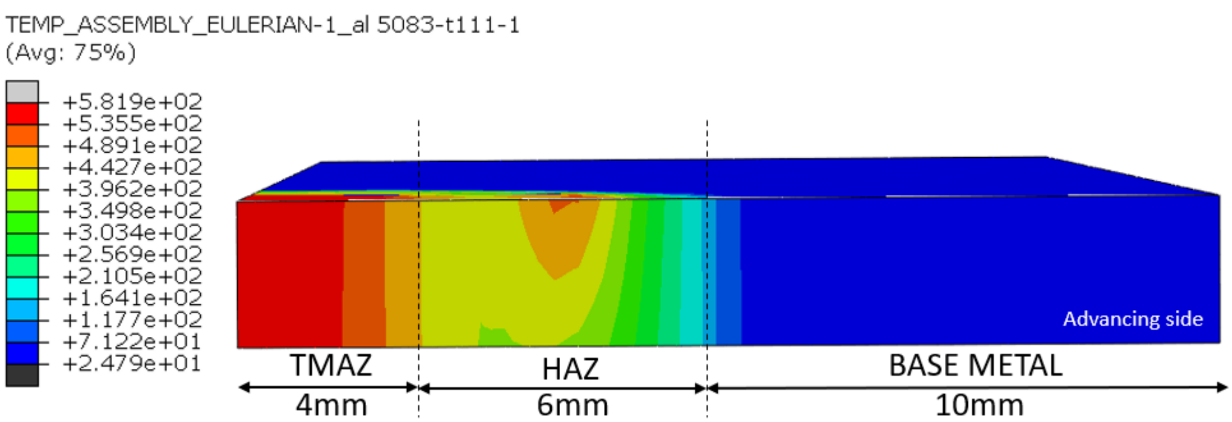
Εικόνα 95: : Διάγραμμα θερμοκρασίας-γωνίας κλίσης του εργαλείου για την υποχωρούσα πλευρά.

Όπως είναι αντιληπτό, και έχει αναφερθεί και παραπάνω, οι διαφορετικές τιμές της μέγιστης θερμοκρασίας επηρεάζουν άμεσα τον σχηματισμό των ζωνών συγκόλλησης, τόσο όσο αφορά το σχήμα τους όσο και το μέγεθος τους. Αναλυτικότερα, στις Εικόνες 92-93, οι οποίες απεικονίζουν τα αποτελέσματα για γωνίας κλίσης 0°, φαίνεται ότι το μήκος των ζωνών (TMAZ/HAZ/Base Metal) είναι μικρότερο στην υποχωρούσα πλευρά από ότι στην προωθούμενη πλευρά (RS:3.8mm/5.6mm/10.6mm, AS:4mm,6mm,10mm). Στην περίπτωση της γωνίας κλίσης 1° του εργαλείου (RS:3.4mm/5.6mm/11mm, AS:3.5mm,5.5mm,11mm) παρατηρούμε ότι ισχύει το ίδιο για την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) αλλά όχι για την θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) όπου είναι κατά 0.1mm μεγαλύτερη στην υποχωρούσα πλευρά. Η διαφοροποίηση αυτή κρίνεται ελάχιστη και μπορεί να μην είναι απόλυτη καθώς οι μετρήσεις δεν γίνονται με πλήρη ακρίβεια. Για την περίπτωση των 2° η ανάλυση του μήκους των ζωνών έχει γίνει παραπάνω (Στάδιο Συγκόλλησης).

Συγκρίνοντας τα 3 πειράματα παρατηρούμε ότι το μήκος των ζωνών για γωνίας κλίσης του εργαλείου 2° είναι εμφανώς μεγαλύτερο από αυτά της 1°. Ωστόσο στην περίπτωση που το υλικό δεν τοποθετείται υπό κλήση, το μήκος των ζωνών βρίσκεται ανάμεσα στα υπόλοιπα 2 πειράματα. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στην διαφορετική γεωμετρία του προβλήματος και κατ΄επέκταση το διαφορετικό εμβαδόν του εργαλείου που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια εργασίας.

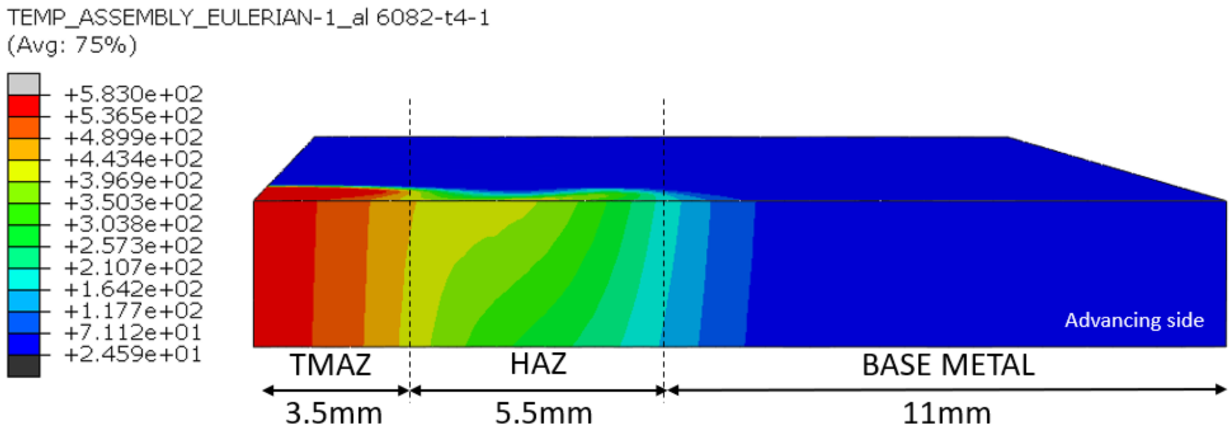


Εικόνα 96: Απεικόνιση της θερμοκρασίας και του μεγέθους των ζωνών συγκόλλησης στην υποχωρούσα πλευρά κατά το στάδιο της συγκόλλησης (500 frames) για γωνία κλίσης του εργαλείου 0^o.

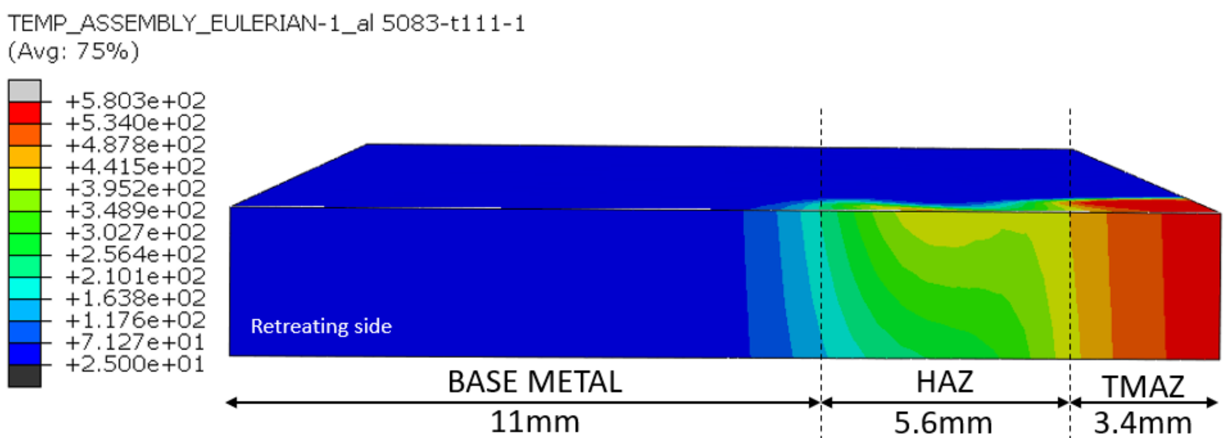


Εικόνα 97: Απεικόνιση της θερμοκρασίας και του μεγέθους των ζωνών συγκόλλησης στην προωθούμενη πλευρά κατά το στάδιο της συγκόλλησης (500 frames) για γωνία κλίσης του εργαλείου 0^o.

Αναφορικά και με το σχήμα των ζωνών συγκόλλησης μπορεί να παρατηρηθεί ακόμη, ότι στην περίπτωση των 0^o, τα θερμοκρασιακά πεδία δεν έχουν διατομή σχήματος V αλλά φαίνονται κάθετα (Εικόνες 96-97). Για γωνία κλίσης του εργαλείου 1^o (Εικόνες 98-99), αρχίζει να εμφανίζεται μια ελαφριά κλίση η οποία και γίνεται πιο έντονη στις 2^o (Εικόνες 89-90).

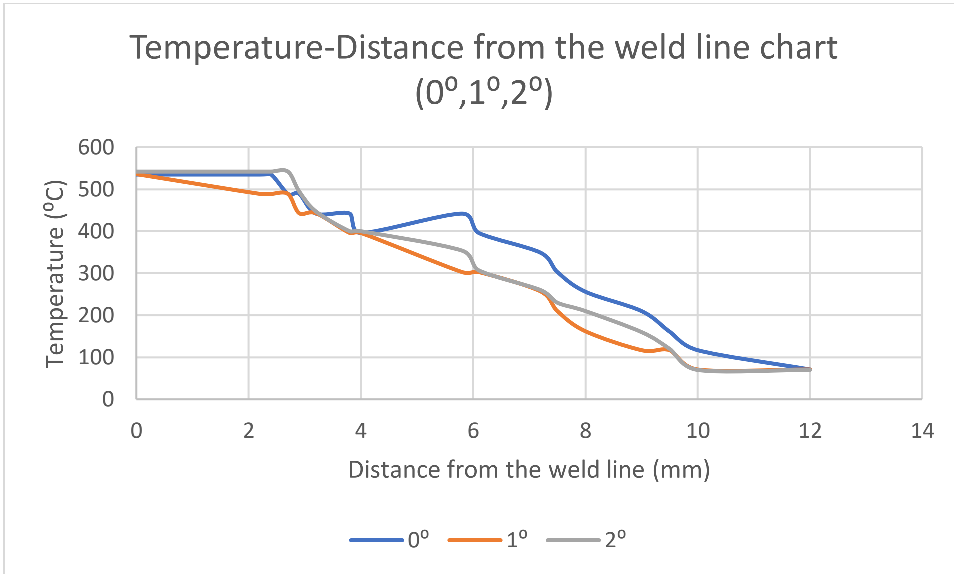


Εικόνα 98: Απεικόνιση της θερμοκρασίας και του μεγέθους των ζωνών συγκόλλησης στην προωθούμενη πλευρά κατά το στάδιο της συγκόλλησης (500 frames) για γωνία κλίσης του εργαλείου 1^o.



Εικόνα 99: Απεικόνιση της θερμοκρασίας και του μεγέθους των ζωνών συγκόλλησης στην υποχωρούσα πλευρά κατά το στάδιο της συγκόλλησης (500 frames) για γωνία κλίσης του εργαλείου 1^o.

Επιπρόσθετα, από το διάγραμμα της Εικόνας 100 μπορεί να παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση των 0^o διατηρείται υψηλότερη θερμοκρασία κατά μήκος του δοκιμίου σε σχέση με τις άλλες 2 τιμές των γωνιών κλίσης. Ενδιάμεσες τιμές εμφανίζει το αριθμητικό πείραμα των 2^o ενώ χαμηλότερη θερμοκρασία κατά μήκος του δοκιμίου παρουσιάζει το αριθμητικό πείραμα με γωνία κλίσης εργαλείου 1^o. Αυτός ο ισχυρισμός συμπίπτει και με άλλα πειραματικά δεδομένα που έχουν συγκριθεί (31).

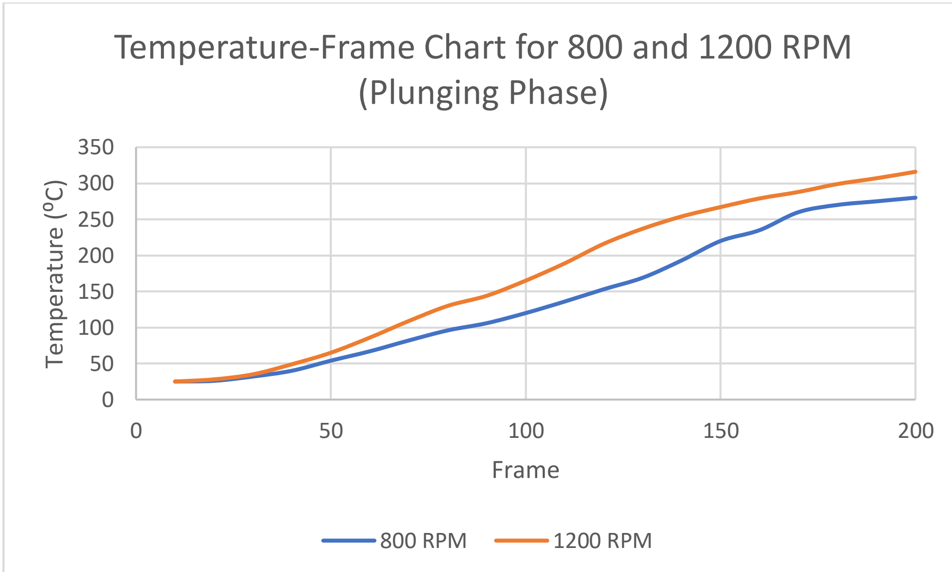


Εικόνα 100: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόστασης από την γραμμή συγκόλλησης για γωνίες κλίσης 0°,1°,2° (500 frames).

5.3.Επίδραση της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου στην θερμοκρασία

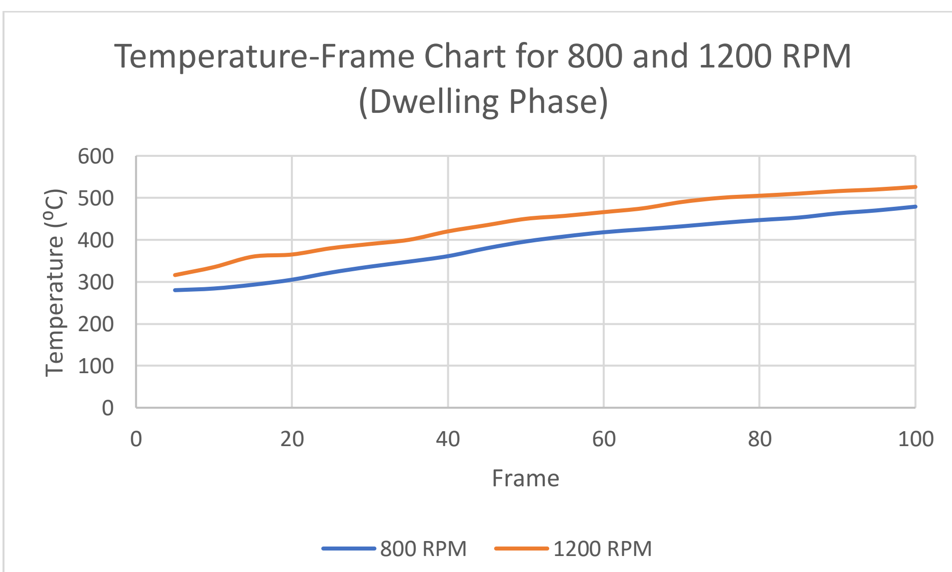
Η παρακάτω σύγκριση αποσκοπεί στην κατανόηση της επιρροής της περιστροφικής ταχύτητας στην θερμοκρασία υπό την οποία εκτελείται η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση. Προκειμένου να γίνει η σύγκριση, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι που έχουν αναφερθεί και στα προηγούμενα πειράματα παραπάνω, με μόνη αλλαγή την τιμής της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου. Συγκεκριμένα, θα εξεταστούν δύο τιμές, των 800 rpm και των 1200 rpm.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 101, από τις πρώτες χρονικές στιγμές της συγκόλλησης παρατηρείται ότι στην περίπτωση των 1200 rpm η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη καθ’ όλη την διάρκεια του σταδίου βύθισης συγκριτικά με το αριθμητικό πείραμα περιστροφικής ταχύτητας 800 rpm. Πιο αναλυτικά, διατηρείται μια σχεδόν σταθερή διαφορά που κυμαίνεται από 35°C έως 50°C. Στο τέλος του σταδίου βύθισης για περιστροφική ταχύτητα 1200 rpm η θερμοκρασία είναι 316°C ενώ για u=800 rpm η θερμοκρασία είναι 280°C. Ο λόγος που παρατηρείται αυτή η αύξηση είναι ότι λόγω των περισσότερων στροφών ανά λεπτό που εκτελεί το εργαλείο, παράγονται μεγαλύτερα ποσά θερμότητας εξαιτίας της τριβής. Ακόμη πρέπει να αναφερθεί ότι το ποσοστό αύξησης της θερμοκρασίας μειώνεται όσο αυξάνεται η περιστροφική ταχύτητα καθώς το υλικό γίνεται πιο αδύναμο και οι τιμές των ιδιοτήτων του μειώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, μια συνεχόμενη αύξηση στην περιστροφική ταχύτητα δεν συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας χωρίς όριο, και επομένως η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί κατά την διάρκεια της συγκόλλησης θα τριβής με ανάδευση περιορίζεται στο 90-95% της θερμοκρασίας τήξης των υλικών, όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία (92).



Εικόνα 101: Διάγραμμα θερμοκρασίας-frame κατά την διάρκεια του σταδίου βύθισης για περιστροφική ταχύτητα εργαλείου 800 και 1200 rpm.

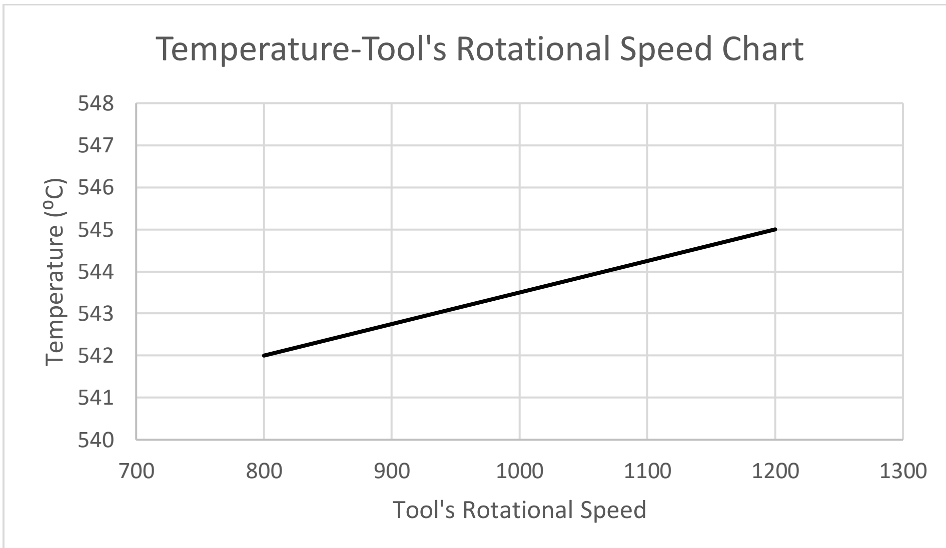
Μπορεί ακόμη να παρατηρηθεί ότι ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης θερμοκρασίας για τις δυο διαφορετικές τιμές της περιστροφικής ταχύτητας είναι σχεδόν ίδιος, αλλά οι μέγιστες τιμές αυξάνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου.



Εικόνα 102: Διάγραμμα θερμοκρασίας-frame κατά την διάρκεια του σταδίου σταθεροποίησης για περιστροφική ταχύτητα εργαλείου 800 και 1200 rpm.

Ομοίως και με την σχεδόν γραμμική αύξηση αλλά και την σταθερή διαφορά που παρατηρείται στο διάγραμμα για το στάδιο της βύθισης, και στο στάδιο της σταθεροποίησης διατηρείται μια διαφορά της τάξης των 35^oC-60^oC.

Θεωρητικά, η διαφορά που παρουσιάζεται κατά την διάρκεια του σταδίου βύθισης και του σταδίου σταθεροποίησης πρέπει να παραμένει καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 103, η τελική διαφορά είναι μόλις 3^oC καθώς η τελική θερμοκρασία για περιστροφική ταχύτητα 800 rpm είναι 542^oC και για περιστροφική ταχύτητα 1200 rpm είναι 545^oC.



Εικόνα 103: Διάγραμμα θερμοκρασίας- Περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου.

Παρόμοιο πείραμα αριθμητικής ανάλυσης που διεξήχθη για περιπτώσεις ταχύτητας περιστροφής 300 rpm και 400 rpm για κράμα αλουμινίου 2024 έδειξε ότι η διαφορά της μέγιστης θερμοκρασίας ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις είναι 22^oC (93). Σύμφωνα με αυτήν την θεώρηση λοιπόν, θα περιμέναμε στο αριθμητικό πείραμα της παρούσας διπλωματικής η τελική διαφορά των δύο πειραμάτων να είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι υπολογίστηκε. Η πολύ μικρή διαφορά θερμοκρασίας πιθανόν να επηρεάζεται τόσο από την εξαιρετικά μεγάλη ταχύτητα πρόωσης που έχει προσδοθεί στο εργαλείο όσο και από την απαγωγή θερμότητας . Συνεπώς, με χρήση time steps που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και κατ' επέκταση ρεαλιστικής ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου θα είναι πιο αποδοτική η παρατήρηση της ανάπτυξης της θερμοκρασίας κατά το στάδιο της συγκόλλησης.

5.4.Συμπεράσματα

Ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να μελετηθεί η διαμόρφωση της μέγιστης θερμοκρασίας και των θερμοκρασιακών πεδίων κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση καθώς και η επιρροή που ασκούν παράμετροι όπως η περιστροφική ταχύτητα και η γωνία κλίσης του εργαλείου.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που μπορούν να αντληθούν από τα πειράματα που εκτελέστηκαν είναι τα εξής:

1. Κατά το στάδιο της βύθισης, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται αγγίζει το 50% της μέγιστης θερμοκρασίας λόγω του ότι μόνο ο πείρος προκαλεί την παραγωγή θερμότητας.

2. Η μέγιστη θερμοκρασία ανά πάσα στιγμή εντοπίζεται δίπλα στην ζώνη ανάδευσης. Οι θερμοκρασιακές τιμές ήταν πιο υψηλές στην προωθούμενη πλευρά συγκριτικά με την υποχωρούσα πλευρά σε όλα τα διεξαχθείσα πειράματα, εύρημα που συμφωνεί με την σχετική βιβλιογραφία.

3. Η αύξηση της γωνίας κλίσης του εργαλείου προκαλεί και αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας τόσο στην ζώνη ανάδευσης όσο και στο υπόλοιπο δοκίμιο. Παρατηρήθηκε επίσης ότι το μήκος των ζωνών συγκόλλησης είναι μικρότερο στην υποχωρούσα πλευρά από ότι στην προωθούμενη πλευρά λόγω της διαφοράς στην θερμοκρασία και της κατανομής του θερμοκρασιακού πεδίου. Ακόμη, με αλλαγή στην γωνία κλίσης του εργαλείου, μεταβάλλεται και ο σχηματισμός των ζωνών συγκόλλησης.

4. Η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου προκαλεί την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά την διάρκεια και των 3 σταδίων της συγκόλλησης. Επίσης, ο χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί η μέγιστη θερμοκρασία σε κάθε περίπτωση είναι παραπλήσιος.

5.5.Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης μιας διάταξης συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, η οποία αποσκοπεί στην μελέτη της θερμοκρασίας του δοκιμίου κάτω από διαφορετικές παραμέτρους (γωνία κλίσης του εργαλείου και περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου) με χρήση του προγράμματος Abaqus/Explicit. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η Coupled Eulerian-Lagrangian. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ικανοποιητικά και συμφωνούν κατά κόρον με την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Ωστόσο, λόγω τόσο της πολυπλοκότητας της μεθόδου και των πολλών παραμετροποιήσεων που μπορεί να δειχτεί όσο και του μεγάλου πλήθους επιλογών που προσφέρονται από το Abaqus/Explicit, μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του μοντέλου. Παρακάτω θα παρατεθούν μερικές προτάσεις με προοπτικές έρευνας για περαιτέρω αριθμητική και πειραματική μελέτη.

1. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, με σκοπό το μοντέλο να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στα πραγματικά πειράματα, προτείνεται η εφαρμογή ρεαλιστικών time step, των οποίων η χρήση θα παρουσιάσει πιο ακριβή αποτελέσματα. Εντούτοις, ο υπολογιστικό χρόνος αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, οπότε και είναι επιθυμητή η χρήση υπερυπολογιστή με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου.

2. Μια ακόμη ενέργεια που μπορεί να προσδώσει πιο ακριβή αποτελέσματα είναι η χρήση περισσότερων στοιχείων τόσο στην επιφάνεια εργασίας όσο και στο εργαλείο και κυρίως στα σημεία που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

3. Προκειμένου να προσομοιωθούν οι πραγματικές συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος είναι επιθυμητή η εισαγωγή της μεταφοράς θερμότητας για το υλικό και τα κράματα αλουμινίου από και προς το περιβάλλον. Έτσι, θα ληφθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα και χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας.

4. Η χρήση ιδιοτήτων που εξαρτώνται από την θερμοκρασία όπως το μέτρο ελαστικότητας, ο συντελεστής τριβής και ο συντελεστής θερμικής διαστολής μπορούν να οδηγήσουν σε πιο ρεαλιστικές προβλέψεις.

5. Η άκαμπτη φύση του εργαλείου που έχει θεωρηθεί στο παρών αριθμητικό πείραμα μπορεί να αντικατασταθεί από ένα παραμορφώσιμο στερεό σώμα και έτσι με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες μπορούν να επιτευχθούν πραγματικές απεικονίσεις της κατανομής θερμοκρασίας τόσο για το εργαλείο όσο και για τα προς συγκόλληση τεμάχια.

6. Όπως το αλουμίνιο και τα κράματα χαμηλής θερμοκρασίας τήξης, θα πρέπει να γίνουν αριθμητικές εξελίξεις στην μοντελοποίηση σύνθετων γεωμετριών του εργαλείου για περαιτέρω βελτίωση της ανάδευσης του υλικού στην ζώνη συγκόλλησης.

7. Πέρα από την μελέτη της θερμοκρασίας των κραμάτων αλουμινίου, η θερμοκρασιακή μελέτη του εργαλείου μπορεί να δώσει στοιχεία που θα βελτιστοποιήσουν την μοντελοποίηση του προβλήματος και θα φέρουν λύσεις σχετικά με την γεωμετρία του.

8. Καθώς ο σκοπός της διεξαγωγής των μοντελοποιήσεων είναι η απόφανση για την ποιότητα της συγκόλλησης, πρέπει να αναλυθούν και εξεταστούν και άλλοι παράμετροι όπως η ροή του υλικού στην ζώνη ανάδευσης, οι τάσεις που ασκούνται, η εμφάνιση ελαττωμάτων (defects) με σκοπό να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός όλων και να παραχθούν συγκολλήσεις άριστης ποιότητας.

9. Προτείνεται να εφαρμοστεί η τεχνική debugging, η έρευση δηλαδή και η επίλυση τυχόν σφαλμάτων και ασυνεχειών στο μοντέλο με σκοπό την βελτιστοποίηση του και κατ΄επέκταση την μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

Βιβλιογραφία

1. Totten, George E. και ScottMacKenzie, D. *Handbook of Aluminum Physical Metallurgy and Processes.* s.l. : CRC Press, 2003.

2. Δημήτρης Ι. Παντελής, Γρηγόρης Δ. Χρυσουλάκης. *Επιστήμη και Τεχνολογία των μεταλλικών υλικών.* Αθήνα : Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008.

3. Δημήτρης Ι. Παντελής, Βασίλης Ι. Παπάζογλου, Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος. *Επιστήμη και Τεχνολόγια των Συγκολλήσεων.* Αθήνα : Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.

4. Kaufman, J. Gilbert. *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers.* s.l. : ASM International, 2000.

5. William D. Callister JR, David G. Rethwisch. *Fundamentals of Materials Science and Engineering.* s.l. : Wiley, 2015.

6. *HIgh-temperature transformation pathways for metastable ferromegnatic binary Heusler (Al-55 at.%Mn) alloy.* Dhanalakshmi Palanisamy, Chandan Srivastava, Giridhar Madras, Kamario Chattopadhyay. 2017, J Mater Sci, σσ. 4109-4119.

7. M. Emany, Amin Bahrami, M.I. Pech-Canul. *The effects of extra Si and heat treatment on the microstructure and tensile properties of Al-15% Mg2Si in-situ composite.* 2012.

8. 5083 - '0' - H111 Sheet and Plate. *aalco.* [Ηλεκτρονικό] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5083-0-H111-Sheet-and-Plate_149.ashx.

9. 6082 - T4 Extrusions. *aalco.* [Ηλεκτρονικό] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T4-Extrusions_147.ashx.

10. aluNET.gr. *aluNET.gr.* [Ηλεκτρονικό] 29 12 2014. https://www.alunet.gr/2014/12/1053v.

11. Nilesh Kumar, Wei Yuan, Rajiv S. Mishra. *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials.* s.l. : Elsevier, 2015.

12. L.V. Kamble, S.N. Soman, P.K Brahmankar. Understanding the Fixture Design for friction stir welding research experiments. s.l. : Elsevier, 2017, σσ. 1277-1284.

13. *Heat Transfer in Friction Stir Welding-Experimental and Numerical Studies.* Yuh J. Chao, X. Qi, W. Tang.

14. Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee, Zahid Akhtar Khan. *Friction Stir Welding: Dissimilar Aluminum Alloys.* s.l. : CRC Press, 2017.

15. Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney. *Friction Stir Welding and Processing.* s.l. : ASM International, 2007.

16. *Friction Stir Welding of different Joint Configurations: A review .* Asif Iqbal, Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee. 2015, Journal of Material Science and Mechanical Engineering, σσ. 19-24.

17. ***Friction Stir Welding of T-Joints.*** **K. Erbsloh, C. Dalle Donne, D. Lohwasser. 2003, Materials Science Forum , σσ. 2965-2970.**

18. ***Friction Stir Welding: Process, automation and control.*** **B.T. Gibson, D.H. Lammlein, T.J. Prater, W.R. Longhurst, C.D. Cox, M.C. Ballun, K.J. Dharmaraj, G.E. Cook, A.M. Strauss. 2013, Journal of Manufacturing Processes, σσ. 56-73.**

19. ***The importance of friction stir welding tool.*** **Akos Meilinger, Imre Torok. 2013, Production Processes and Systems vol.6, σσ. 25-34.**

20. ***Tool Geometry for Friction Stir Welding - Optimum Shoulder Diameter.*** **M. Mehta, A.Adora, A. De, T. Debroy. 2011, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International .**

21. ***Review of tools for friction stir welding and processing.*** **Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara. 2012, Advacnes in High Temperature Joining of Materials, σσ. 250-261.**

22. C.E.D Rowe, Wayne Thomas. ***Advances in tooling materials for friction stir welding.*** **s.l. : TWI and Cedar Metals Ltd.**

23. ***Friction Stir Welding- Tools and develoments.*** **W.M. Thomas, D.G. Staines, I.M. Norris, R. de Frias. Porto : s.n., 2002. FSW Seminar.**

24. ***Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy.*** **K. Elangovan, V. Balasubramanian. 2007, Materials Science and Engineering, σσ. 7-18.**

25. ***Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050 - H24 aluminium alloy.*** **H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi. 2003, Science and Technology of Welding and Joining vol.6, σσ. 450-454.**

26. ***Prediction of optimum welding parameters for FSW of aluminum alloys AA6063 and A319 using RSM and ANN.*** **M. Muthu Krishnan, J. Maniraj R. Deepak, K. Anganan. Ongole, India : Elsevier Ltd., 2016. Processing of Materials, Minerals and Energy . σσ. 716-723.**

27. ***Tensile Properties of a frction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch.*** **S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X.Cao. 2010, Materials Science and Engineering A, σσ. 6064-6075.**

28. ***Visualization of the Material Flow in AA2195 Friction-Stir Welds Using a Marker Insert Technique.*** **T.U. Seidel, A.P. Reynolds. 2001, Metallurgical and Materials Transactions A, σσ. 2879-2884.**

29. ***Microstructure and tensile properties of friction sitr welded AZ31B magnesium alloy.*** **N. Afrin, D.L.Chen, X.Cao, M. Jahazi. 2008, Materials Science and Engineering A, σσ. 179-186.**

30. ***An experimental approach to study the effect of welding parameters on similar friction stir welded joints of AZ31B-O Mg alloy.*** **Inderjeet Singh, Gurmeet Singh Cheema, Amardeep Singh Kang. 2014, Procedia Engineering, σσ. 837-846.**

31. ***Effects of tool tilt angle on the in-process heat transfer and mass transfer during friction stir welding.*** **Shuai Zhang, Qingyu Shi, Qu Liu, Ruishan Xie, Gong Zhang, Gaoqiang Chen. 2018, International Journal of Heat and Mass Transfer, σσ. 32-42.**

32. ***Effect of Tool Tilt Angle and Tool Plunge Depth on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA 5083 Joints.*** **Nurul Muhayat, Achmad Zubaydi, Sulistijono, M. Zaed Yuliadi. 2014, Applied Mechanics and Materials Vol. 493, σσ. 709-714.**

33. ***An experimental investigation of torque and force generation for varying tool tilt angles and their effects on microstructure and mechanical properties: Friction stir welding of AA 6061-T6.*** **Abhijit Banik, Barnik Saha Roy, John Deb Barma, Subhash C. Saha. 2017, Journal of Manufacturing Processes, σσ. 395-404.**

34. ***Microstructural Characterizations and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Technique of Dissimilar (Al-Cu) Sheets.*** **H.I. Dawood, Kahtan S. Mohammed, Azmi Rahmat, M.B. Uday. s.l. : Jou, 2014, Journal of Appled Science and Agricalture, σσ. 149-158.**

35. Rajiv Sharan Mishra, Partha Sarathi De Nilesh Kumar. ***Friction Stir Welding and Processing.*** **s.l. : Springer , 2014.**

36. ***Defect formation and material flow in Friction Stir Welding.*** **Narges Dialami, Miguel Cervera, Michele Chiumenti. 2020, European Journal of Mechanics / A Solids.**

37. ***Flow Patterns during Friction Stir Welding.*** **M. Guerra, C. Schmidt, J.C McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes. 2003, Materials Characterization, σσ. 95-101.**

38. ***A review od dynamic recrrystallization phenomena in metallic materials .*** **K. Huang, R.E. Loge. 2016, Materials and Design, σσ. 548-574.**

39. F.J. Humphreys, M. Katherly. ***Recrystallization and Related Annealing Phenomena Second Edition.*** **s.l. : Elsevier , 2004.**

40. ***Dependency of Recrystallization Mechanism to the Initial Grain Size.*** **A. Dehgan-Manshadi, P.D. Hodgson. 2008, The Minerals, Metals and Materials Society and ASM International, σσ. 2830-2840.**

41. ***A model of continuous dynamic recrystallization.*** **S. Gourdet, F. Montheillet. 2001, Acta Materialia 51, σσ. 2685-2699.**

42. S. Bag, D. Yaduwanshi, S. Pal. Heat Transfer and material flow in friction stir welding. [συγγρ. βιβλίου] Parviz Asadi Mohammad Kazem Besharati Givi. ***Advances in Friction Stir Welding and Processing.*** **s.l. : Elsevier, 2014, σσ. 21-63.**

43. ***The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation.*** **K. Kumar, Satish V. Kailas. 2008, Materials Science and Engineering, σσ. 367-374.**

44. ***A review of numerical analysis of friction stir welding.*** **Xiaocong He, Fengshou Gu, Andrew Ball. 2014, Progress in Materials Science, σσ. 1-66.**

45. ***Welding Defects at Friction Stir Welding.*** **P. Podrzaj, B. Jerman, D. Klobcar. 2015, Metallurija 54, σσ. 387-389.**

46. ***Defects in Friction Stir Welding.*** **M. Al-Moussawi, A.J. Smith. 2018, Metallography, Microstructure, and Analysis, σσ. 194-202.**

47. ***Review The Common Defects In Friction Stir Welding .*** **Albannai, Abdulaziz I. 2020, International Journal of Scientific and Tehcnology Research Volume 9, Issue 11, σσ. 318-329.**

48. ***Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints dor dissimilar aluminum alloys.*** **Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee, Zahid A. Khan, Suha K. Shihab. 2015, Journal of Alloys and Compounds 648, σσ. 360-367.**

49. ***Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review.*** **Neetesh Soni, Chandrashekhara Sangam. 2017, International Journal of Engineering and Management Research, σσ. 121-125.**

50. ***Repair welding process of friction stir welding groove effect.*** **Liu Hui-Jie, Zhang Hui-Jie. 2009, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, σσ. 563-567.**

51. ***The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds.*** **Hua-Bin Chen, Keng Yan, Tao Lin, Shan-Ben Chen, Cheng-Yu Jiang, Yong Zhao. 2006, Materials Science and Engineering A 433, σσ. 64-69.**

52. ***Friction Stir Welded structures: Kissing bond defects.*** **Roman Ruzek, Martin Kadlec. 2014, International Journal of Terraspace Science and Engineering 6, σσ. 77-83.**

53. **C. Mnadache, D. Levesque, L. Dubourg, P. Gougeon.** ***Non-destructive detention of lack of penetration defects in friction stir welds.*** **s.l. : Maney, 2012.**

54. ***Exit-hole repairing in friction stir welding of AA5456 pipe using consumable pin.*** **A.H. Ghavimi, M.R. Aboutalebi, S.H. Seyedein. 2020, Materials and Manufacturing Process.**

55. ***AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding.*** **Bing Han, Yongxian Huang, Shixiong Lv, Long Wan, Jicai Feng, Guansheng Fu. 2013, Materials and Design, σσ. 25-33.**

56. ***Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints.*** **P. Xue, D.R. Ni, D. Wang. B.I. Xiao, Z.Y. Ma. 2011, Materials Science and Engineering A, σσ. 4683-4689.**

57. ***A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties and Variants.*** **K.P. Mehta, V.J. Badheka. 2015, Materials and Manufacturing Processes, σσ. 233-254.**

58. **Mian Wasif Safeen, Pasquale Russo Spena. Main Issues in Quality of Friction Stir Welding Joints of Aluminum Alloy and Steel Sheets.** ***metals.*** **25 May 2019.**

59. ***Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminum alloys.*** **Paul Kah, Richard Rajan, Jukka Martikainen, Raimo Suoranta. 2015, International Journal of Mechanical and Materials Engineering.**

60. **Mukuna Patrick Mubiayi, Esther Titilayo Akinlabi, Mamookho Elizabeth Makhatha.** ***Current Trends in Friction Stir Welding (FSW) and Friction Stir Spot Welding.*** **s.l. : Springer International Publishing, 2019.**

61. **Kallee, S.W. Industrial Applications of friction stir welding. [συγγρ. βιβλίου] Zhan Chen Daniela Lohwasser.** ***Friction Stir Welding From Basics to Applications.*** **s.l. : Woodhead Publishing, 2010, σσ. 118-163.**

62. Kallee, Stephan. alustir.com. *Alu Stir.* [Ηλεκτρονικό] https://www.alustir.com/english/fsw-apple-imac-computer/.

63. *Advanced numerical modelling of ofriction stir welded low alloy steel.* Bilal Ahmad, Alexander Galloway, Athanasios Toumpis. 2018, Journal of Manufacturing Processes.

64. *Numerical Analysis of Friction Stir Welding Process.* R.K.Uyyuru, Satish V. Kailas. 2005, Journal of Materials Engineering and Performance, σσ. 505-517.

65. Rao, Singiresu S. Overview of Finite Element Method. *The Finite Element Method in Engineering.* s.l. : Elsevier Science & Technology Books, 2004, σσ. 3-49.

66. Logan, Daryl L. *A First Course in the Finite Element Method.* s.l. : Chris Carson, 2007.

67. *A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys.* C. Hamilton, S.Dymek, A.Sommers. 2008, International Journal of Machine Tools & Manufacture, σσ. 1120-1131.

68. A. Simar, Y. Brechet, B. de Meester, A. Denquin, C. Gallais, T. Pardoen. *Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties.* s.l. : HAL, 2018.

69. *Computational Fluid Dynamics studies on heat generation during fraction stir welding of aluminum alloy.* Gao-qiang Chen, Qing-yu Shi, Yu-jia Li, Yan-jun Sun, Qi-lei Dai, Jin-yao Jia, Yu-can Zhu, Jian-jun Wu. 2013, Computational Materials Science , σσ. 540-546.

70. *3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile.* Paul A. Colegrove, Hugh R. Shercliff. 2005, Journal of Materials Processing Technology 169 , σσ. 320-327.

71. *Numerical simulation of friction stir butt welding process for AA5083-H18 sheets.* Dongun Kim, Harsha Badarinarayan, Ji Hoon Kim, Chongmin Kim, Kazutaka Okamoto, R.H. Wagoner, Kwansoo Chung. 2010, European Journal of Mechanics A/Solids, σσ. 204-215.

72. *Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review.* Diogo Mariano Neto, Pedro Neto. 2013, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 65, σσ. 115-126 .

73. Rahul Jain, Surjya K. Pal, Shiv B. Singh. Numerical modeling methodologies for friction stir welding process. [συγγρ. βιβλίου] J. Paulo Davim. *Computational Methods and Production Engineering.* s.l. : Woodhead publishing, Elsiever, 2017, σσ. 125-170.

74. Bahman Meyghani, Mokhtar B. Awang, Seyed Sattar Emamiam, Mohd Khalid B. Mohd Nor, Srinivasa Rap Pedapati. A Comparison of Different Finite Element Methods in the Thermal Analysis of Friction Stir Welding. *MDPI metals.* 2017, σσ. 1-23.

75. Kevin H. Brown, Shwn P. Burns, Mark A. Christon. *Coupled Eulerian-Lagrangian Methods for Earth Penetrating Weapon Applications.* s.l. : Sandia National Laboratories, 2002.

76. *Ultimate strength characteristics of aluminuim plates for high-speed vessels.* Simon Benson, Jon Downes. 2011, Ships and Offshore Structures.

77. *Numerical Simulation of Material Flow and Analysis of Welding Characteristics in Friction Stir Welding Process.* Haitao Luo, Tingke Wu, Peng Wang, Fengqun Zhao, Haoman Wang, YuxinLi. 2019, MDPI metals.

78. Rate-Dependent Yield. *Abaqus 6.14 Analysis User's Guide Volume III: Materials.* 2014, σσ. 263-266.

79. Parallel Rheological Framework. *Abaqus 6.14 Analysis User's Guide Volume III:Materials.* 2014, σσ. 205-214.

80. Contact Interaction Analysis: Overview. *Abaqus Analysis User's Guide Volume 5: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions.* 2014, σσ. 397-406.

81. *Finite Element Modeling of an Aircraft Tire Rolling on a Steel Drum: Experimental Investigations and Numerical Simulations.* Julian Rosu, Helene L. Elias-Birembaux, Frederic Lebon. 2018, MDPI applied sciences.

82. Yi Peng, Joshua Qiang Lim You Zhan, Kelvin C.P. Wang, Guangwei Yang. Finite Element Method-Based Skid Resistance Simulation Using In-Situ 3D Pavement Surface Texture and Friction Data. *MDPI materials.* 2019.

83. *Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers.* A. Rashed, M. Yazdani, AA Babaluo, P. Hajizadeh Parvin. s.l. : Sagepub, 2015.

84. *Predictive Model for Thermal Response During Dry Machining of Al 6082-T6 using Fem.* Adekanmi Miracle Adeyinka, Mesach O. Olaleke. 06, s.l. : www.ijert.org, 2020, Τόμ. 9.

85. *Coupled Eulerian-Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes.* Fadi Al-Badour, Nesar Merah, Abdelrahman Shuaib, Abdelaziz Bazoune. 2012, Journal of Materials Processing Technology.

86. *Numerical Simulation of the Friction Stir Welding Process Using Coupled Eulerian Lagrangian Method.* M. Iordache, C. Badulescu, D. Iacomi, E. Nitu, C. Ciuca. s.l. : IOP Publishing, 2016. Materials Science and Engineering.

87. *The Effect of Friction Coefficient in Thermal Analysis of Friction Stir Welding.* Bahman Meygjani, Mokhtar Awang, Zakaria Hamdi. s.l. : IOP Publishing, 2019.

88. Eulerian Elements. *Abaqus documents.* [Ηλεκτρονικό] https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-eulerianelem.htm.

89. Nikolaos, Katopodes. Computational Methods. *Free Surface flow: environmental fluid mechanics.* s.l. : Elsevier, 2019, σσ. 766-802.

90. Parallel execution in Abaqus/Explicit. *Abaqus documents.* [Ηλεκτρονικό] https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEEXCRefMap/simaexc-c-parallelexecution.htm.

91. Methods of speeding up the analysis. *Abaqus docs.* [Ηλεκτρονικό] https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-qsimetspeedanal.htm.

92. *Numerical Simulation of Temperature Distribution and Material Flow During Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys.* R. Padmanaban, V. Ratna Kishore, V. Balusamy. s.l. : Elsevier, 2014. 12th GLOBAL CONFERENCE OF MANUFACTURING AND MANAGEMENT. σσ. 854-863.

93. *Numerical Analysis of Joint Temperature Evolution During Friction Stir Welding Based on Sticking Contact.* Wenya Li, Zhihan Zhang, Jinglong Li, Y.J.Chao. 21, s.l. : ASM International, 2011.

94. aalco. *aalco.* [Ηλεκτρονικό] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T4-Extrusions_147.ashx.

95. aalco. *aalco.* [Ηλεκτρονικό] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5083-0-H111-Sheet-and-Plate_149.ashx.

96. *Coupled Eulerian–Lagrangian prediction of thermal and residual stress environments in dissimilar friction stir welding of aluminum alloys.* Kareem N.Sallomi, Sanna Al-Sumaidae. s.l. : Elsevier, 2021.