



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Αριθμητική και πειραματική μελέτη
της κατεργασίας βηματικής διαμόρφωσης ελάσματος ενός σημείου
για κατασκευή πτερυγίου υδροστροβίλου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΑΒΡΙΗΛ ΠΙΠΙΝΗΣ

Επιβλέπων: Καθηγ. Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος

Αθήνα, Ιούνιος 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω των κύριο Βοσνιάκο, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε , καθώς και για την συνεχεί υποστήριξη και παρακίνηση, τις πολύτιμες υποδείξεις του, και το συνολικό ενδιαφέρον του. Ευχαριστώ επίσης τον Γιώργο Παπαζέτη για την γενικότερη υποστήριξη της διπλωματικής και τον Προτεσίλαο Κωστάζο για την υποστήριξη σε θέματα που αφορούν τα πεπερασμένα στοιχεία . Τέλος θα ήθελα να ευχαριστίσω την οικογένειά μου

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση κατεργασίας βηματική διαμόρφωση μονού σημείου (Spif) που θα παρήγαγε ένα τεμαχίο (πτερύγιο υδροστρόβιλου Francis) . Συνεπώς, η προσομοίωση δεν θα αφορούσε μια απλή γεωμετρία. Αρχικά, έγινε μελέτη της βιβλιογραφίας για την κατανόηση της μεθόδου spif και την επιλογή παραμέτρων. Η γεωμετρία του πτερυγίου ήταν δεδομένη και οδήγησε στην δημιουργία μιας κοιλότητας σε αρχείο CAD. Για να γίνει η προσομοίωση της κατεργασίας πραγματοποιήθηκε πλήθος μικρότερων προσομοιώσεων σε απλές γεωμετρίες, έτσι ώστε να οδηγηθούμε σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με ευστάθεια, ικανοποιητική ακρίβεια, το οποίο θα οδηγούσε σε αποτελέσματά σε αποδεκτό χρόνο .Για την δημιουργία του μοντέλου ελήφθη υπόψη η βιβλιογραφία της κατεργασίας ISPF. Τελικά, αποφασίστηκε η δημιουργία ενός μοντέλου που θα στηρίζεται σε shell elements και θα υπάρχει έντονα time scalilling. Ιδιαίτερα σημαντικές ήταν και οι παράμετροι που ορίστηκαν στην επαφή. Στην συνέχεια, έγιναν δυο προσομοιώσεις που προέβλεπαν την τελική γεωμετρία, τις παραμορφώσεις, καθώς και άλλα μεγέθη, όπως οι τάσεις και οι δυνάμεις κατά την κατεργασία και το τελικό πάχος του ελάσματος . Στην συνέχεια ακολούθησε η κατεργασία των ελασμάτων, σύμφωνα με τις παραμέτρους τις προσομοίωσης. Έγινε μέτρηση - αποτύπωση των επιφανείων των κατεργασμένων ελασμάτων. Έγιναν τρία ακόμα πειράματα- κατεργασίες (για τις οποίες δεν έγιναν προσομοιώσεις), με σκοπό να αντιμετωπιστούν κάποια από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες κατεργασίες. Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πραγματικά τεμάχια και των ιδεατών-επιθυμητών γεωμετριών με τα πραγματικά τεμάχια. Οι συγκρίσεις αυτές οδήγησαν σε κάποιες υποθέσεις και συμπεράσματα .Τα πιο σημαντικά είναι ότι η προσομοίωση μπορεί να προβλέπει ένα μέρος των αποκλίσεων, αλλά είναι επίσης πιθανό να εισάγει και σφάλματα που οφείλονται αποκλειστικά σε αυτήν. Επίσης, η διαστατική ακρίβεια των τεμαχίων μειώνεται με την αύξηση της στιβαρότητας και της κράτυνσης του υλικού.

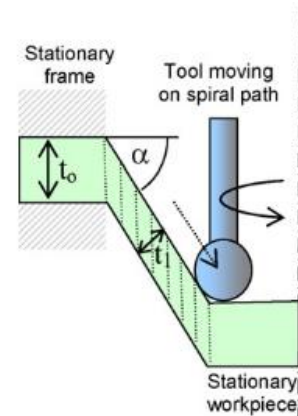
1 Εισαγωγή-Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

1.1 Η κατεργασία ελάσματος με βηματική διαμόρφωση ενός σημείου

Η κατεργασία βηματικής διαμόρφωσης μονού σημείου (Spif) είναι μια μέθοδος κατασκευής εξαρτημάτων από ελάσματα. Το πλεονέκτημα της κατεργασίας σε σχέση με άλλες μεθόδους κατεργασίας ελασμάτων είναι ότι δεν απαιτεί την ύπαρξη προσαρμοσμένων εργαλείων (π.χ. καλούπια). Για αυτόν τον λόγο είναι κατάλληλη για την παραγωγή προτύπων ή την παραγωγή μικρών ποσοτήτων. Η κατεργασία αυτή ανήκει στην κατηγορία των βηματικών διαμορφώσεων(Isf). Στην ίδια κατηγορία ανήκει και η κατεργασία spinning, η οποία όμως απαιτεί την ύπαρξη του αρσενικού τμήματος του καλουπιού και μπορεί να παράγει τεμάχια με αξονική συμμετρία. Στην ίδια κατηγορία ανήκει, επίσης, και η κατεργασία two-point incremental forming, η οποία απαιτεί επίσης την ύπαρξη της μιας πλευράς του καλουπιού ή την κατεργασία με δυο βραχίονες. Η κατεργασία Spif, συνεπώς, απαιτεί το λιγότερο δυνατό εξοπλισμό, ο οποίος συνήθως περιορίζεται σε μια εργαλειομηχανή, μια βάση έδρασης ελάσματος και την κατασκευή ενός εξειδικευμένου εργαλείου. [1]

1.2 Ο μηχανισμός διαμόρφωσης κατά την κατεργασία Spif

Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι οι απόψεις δίστανται σχετικά με την σημασία κάποιων μηχανισμών στην κατεργασία isrf. Σύμφωνα με την απλούστερη θεώρηση, η παραμόρφωση προκύπτει από εφελκυστικές δυνάμεις κοντά στην περιοχή του εργαλείου. Αυτή η θεώρηση, η οποία παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τις θεωρίες κύλανσης έχει υιοθετηθεί πολλές φορές λόγω της απλότητάς της από πολλούς ερευνητές. Στο ότι ο εφελκυσμός είναι ο μονός σημαντικός μηχανισμός παραμόρφωσης συνάδει και με την εκτεταμένη χρήση της λέπτυνσης ως κριτήριο αστοχίας(κεφάλαιο 1-3-7). [2][3][4]. Έχει επισημανθεί, επίσης, η συμβολή της μεταβολής της υδροστατικής πίεσης κατά το πάχος του ελάσματος στην περιοχή της επαφής [5]. Παρόλα αυτά, πλήθος ερευνητών έχουν επισημάνει την σημασία της κάμψης, καθώς και της διάτμησης κάθετα στο επίπεδο του ελάσματος στην παραμόρφωση του ελάσματος. Ιδιαίτερα έντονα είναι αυτές οι παραμορφώσεις στην ακτινική ως προς την κοιλότητα κατεύθυνση (εικόνα 1-1)[6], χωρίς να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν διατμητικές παραμορφώσεις κάθετα στην ακτινική διεύθυνση, οι οποίες προέρχονται κυρίως από την φορά του εργαλείου[7][8]. Τα ευρήματα αυτά έχουν προέλθει μέσω πειραμάτων και προσομοιώσεων.



Εικόνα 1-1 Διατμηση στο ελάσμα

1.3 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία

1.3.1 Επιλογή μεθόδου επίλυσης

Για την επίλυση των μη στατικών προβλημάτων με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων υπάρχουν δυο μέθοδοι:

Στην έμμεση μέθοδο, η λύση κάθε χρονικής στιγμής απαιτεί διαδοχικές επαναλήψεις, έτσι ώστε να περιορισθεί το σφάλμα κάτω από μια αποδεκτή τιμή. Στην έμμεση μέθοδο, αγνοούνται δυναμικά φαινόμενα.

Στην άμεση μέθοδο, η επιτάχυνση κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται βάσει των παραμορφώσεων και των τάσεων. Στην συνέχεια, υπολογίζεται η ταχύτητα και η θέση κάθε κόμβου την επόμενη χρονική στιγμή. Βάση των νέων θέσεων των κόμβων, υπολογίζονται οι παραμορφώσεις [9]. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την επόμενη χρονική στιγμή. Σε αντίθεση με την έμμεση μέθοδο, υπάρχει περιορισμός στο μέγιστο χρονικό βήμα (Courant time step) το οποίο πρέπει να είναι επαρκώς μικρό έτσι ώστε το σύστημα προς επίλυση να παραμένει ευσταθές. Αναγκαία συνθήκη για την επίτευξη ευστάθειας είναι τα τασικά κύματα στο διάστημα μιας χρονικής περιόδου να μην διανύουν ένα ολόκληρο πεπερασμένο στοιχείο [10]. Ο χρόνος Courant για επίπεδη εντατική κατάσταση δίνεται από την εξίσωση:

$$T_{\text{courant}} = L \sqrt{\frac{\rho}{E(1-\nu^2)}} \quad [11],$$

Οπού T_{courant} ο χρόνος Courant, L η μέγιστη ακμή πεπερασμένου στοιχείου στην διεύθυνση διάδοσης κυμάτων, ρ η πυκνότητα, ν ο λόγος Poisson, και E το Young modulus του υλικού.

Στις περισσότερες προσομοιώσεις της κατεργασίας isf φαίνεται να προτιμάται η άμεση μέθοδος [12]; [13]; [14]; [7]; [15], καθώς είναι ταχύτερη, αν και η έμμεση μέθοδος προσφέρει πολλές φορές ακριβέστερα αποτελέσματα [16]. Αυτή η επιλογή συμφωνεί και με την καλύτερη αποτελεσματικότητα της άμεσης μεθόδου σε έντονα μη γραμμικά προβλήματα [9], καθώς δεν απαιτείται αντιστροφή του πίνακα στιβαρότητας, ο οποίος σε μη γραμμικά προβλήματα συνεχώς αλλάζει. Η προσομοίωση της κατεργασίας isf είναι έντονα μη γραμμική, καθώς υπάρχει αλλαγή της γεωμετρίας και της θέσης επαφής του εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Επιπλέον, η σχέση παραμορφώσεων τάσεων είναι μη γραμμική.

Παρ' όλα αυτά, λόγω του μικρού χρόνου Courant, απαιτούνται πολλά χρονικά βήματα, που οδηγούν σε μεγάλους συνολικούς χρόνους προσομοίωσης. Για να περιορισθεί ο συνολικός χρόνος, προτείνονται οι παρακάτω μέθοδοι:

- Time scaling: Με αυτήν την μέθοδο, αυξάνεται η ταχύτητα του εργαλείου της κατεργασίας. Συνεπώς, η ολοκλήρωση της προσομοίωσης της κατεργασίας χρειάζεται λιγότερα χρονικά βήματα.
- Mass scaling: Με αυτήν την μέθοδο, αυξάνεται η πυκνότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου, αρά και ο χρόνος Courant. Συνεπώς, τα χρονικά βήματα θα είναι μεγαλύτερα σε διάρκεια, και αρά λιγότερα.

Και στις δυο περιπτώσεις, μειώνοντας τα χρονικά βήματα, μειώνεται ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος της προσομοίωσης. Όμως, ο υπολογισμός της κινητικής ενεργείας είναι σαφώς μεγαλύτερος από την

πραγματική κινητική ενέργεια, γεγονός που επηρεάζει τα αποτελέσματα συνολικά [17]. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τους Amborgio et al. (2005) , σε προσομοίωση όπου η ταχύτητα του εργαλείου αυξήθηκε σε 40m/s, η κινητική ενέργεια παρέμεινε κάτω του 10% της συνολικής ενεργείας [13]. Σε ανάλογα συμπεράσματα οδηγήθηκαν οι Robert et al. (2008), όπου έγινε αύξηση της ταχύτητας σε 25m/s [18] , οι Skjoedt et al. (2008), όπου έγινε αύξηση της ταχύτητας κατά 1000 φορές [19] και οι Mosser et al. (2016) που χρησιμοποίησαν συνδυασμό time και mass scaling [20]. Σύμφωνα με τους Kim et al. [21], η αύξηση της πυκνότητας κατά 100 φορές ήταν ο βέλτιστος συμβιβασμός ακριβείας και χρόνου επεξεργασίας στην προσομοίωση τους. Περαιτέρω προτάσεις για τον έλεγχο και περιορισμό του σφάλματος που προκύπτει από αυτές τις τεχνικές ,μέσω τροποποίησης της κίνησης του εργαλείου, έγιναν από τους M. Bambach and G. Hirt [22].

1.3.2 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων

Στα προγράμματα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία, υπάρχουν δύο είδη στοιχείων για την προσομοίωση ελασμάτων, τα solid elements και τα shell elements. Η διαφορά τους είναι ότι τα solid elements θεωρούν τρισδιάστατη εντατική κατάσταση, ενώ τα shell elements επίπεδη εντατική κατάσταση.

Αν και τα solid elements θα μπορούσαμε να πούμε ότι δίνουν μια πιο λεπτομερή προσομοίωση της πραγματικότητας, τα συνήθη elements (όπως το 3d 20 node brick) παρουσιάζουν φαινόμενα, όπως shear locking σε φορτίσεις, όπου είναι έντονη η κάμψη και hourglass modes, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται λανθασμένα αποτελέσματα. Επιπλέον, δεν μπορούν να προσομοιώσουν την μη γραμμική διαρροή σε κάμψη. Για να περιοριστούν αυτά τα προβλήματα, πρέπει να χρησιμοποιούνται πολλά στοιχεία κατά την διεύθυνση του πάχους, πράγμα που δεν συνίσταται καθώς αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος και οδηγούν σε προβληματική διακριτοποίηση (negative / poor Jacobean ratio) ή ειδικά στοιχεία (solid shells) που αντιμετωπίζουν το παραπάνω πρόβλημα [23]; [24]; [25]; [26].

Τα shell elements επιλύουν το πρόβλημα ως επίπεδης εντατικής κατάστασης. Παρόλα αυτά, τα συνήθη elements μπορούν να εισάγουν στο πρόβλημα κάθετη πίεση επιφανείας, και να προσμοιάσουν μη γραμμική κατανομή των ορθών τάσεων της διατομής (διατομή σε διαρροή), αν έχουν επιπλέον κόμβους ολοκλήρωσης, καθώς και να λαμβάνεται υπ' όψη η μεταβολή του πάχους της διατομής [27]; [23]; [28]; [29].

Μπορούμε λοιπόν να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι τα solid-shell elements λαμβάνουν υπ' όψη την τρισδιάστατη μορφή του προβλήματος, αν και απαιτείται πάλι επαρκής αριθμός στοιχείων κατά την διεύθυνση του πάχους του ελάσματος, με αποτέλεσμα και πολύ μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους [30], [24]. Επιπλέον, οι συνήθεις τύποι solid shells δεν περνούν το patch test αν παραμορφωθεί κατά την διεύθυνση του πάχους [24], αν και έχουν προτιμηθεί σε προσομοιώσεις που απαιτήθηκε μεγάλη ακρίβεια και έχουν προταθεί σε περιπτώσεις όπου οι διατμητικές τάσεις είναι έντονες [7].Επιπλέον, η προσαρμοστική επαναδιακριτοποίηση των solid shell δεν έχει αναπτυχθεί επαρκώς. Τα shell elements χρειάζονται σαφώς πολύ μικρότερο χρόνο επίλυσης και προσφέρουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και φαίνεται να προτιμώνται στις περισσότερες περιπτώσεις, με χρήση 5 έως 9 κόμβων ολοκλήρωσης κατά την διεύθυνση του πάχους [18]; [31]; [32]; [33]; [34]; [15]; [14] και με 5 ή 6 και 10 ή 12 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, για την άμεση και έμμεση μέθοδο επίλυσης, αντίστοιχα [35]. Μπορούμε να πούμε ότι η χρήση αυτών των στοιχείων είναι σύμφωνη και με τις συστάσεις της Ansys [23]. Σύμφωνα με δημοσίευση του Bambach (2005), συγκρίθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης με διαφορετικά element types. Η καλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση

κατασκευής κόλουρου κώνου επιτεύχθηκε από τετρακομβικό shell element χωρίς κόμβους ολοκλήρωσης, ενώ, παράλληλα, η χρήση του παραπάνω τύπου στοιχείου οδήγησε στον μικρότερο υπολογιστικό χρόνο [30].

Προσαρμοστική επαναδιακριτοποίηση

Για την επίτευξη καλύτερου συμβιβασμού ανάμεσα στην ακρίβεια και τον υπολογιστικό χρόνο προσομοίωσης, καλή πρακτική αποτελεί η προσαρμοστική επαναδιακριτοποίηση των στοιχείων (adaptive remeshing) σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη σημασία στην προσομοίωση. Η επιλογή αυτών των περιοχών γίνεται με κριτήρια την αλλαγή της γωνίας ή του πάχους των στοιχείων, την κλίση των τάσεων ή ισοδύναμων τάσεων. Στην περίπτωση αυτή, οδηγούμαστε συνήθως σε διαίρεση των ήδη υπάρχοντων στοιχείων. Επιπλέον, επαναδιακριτοποίηση είθισται να γίνεται όταν έντονες παραμορφώσεις οδηγούν σε φτωχή ποιότητα πλέγματος, όπου έχουμε τοπικό επανακαθορισμό του πλέγματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα της επαναδιακριτοποίησης εξαρτάται από την επιλογή του τύπου του στοιχείου. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην περίπτωση της προσομοίωσης της μεθόδου isf, η περιοχή με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ακρίβεια στην προσομοίωση είναι η περιοχή κοντά στο εργαλείο. Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, προτάθηκε η απευθείας διαίρεση των στοιχείων, με βάση την απόσταση των στοιχείων από το εργαλείο. Μετά την απομάκρυνση του εργαλείου από την περιοχή, το πλέγμα θα επανέρχεται στην αρχική του μορφή εκτός αν έχει προκληθεί μόνιμα μεγάλη παραμόρφωση. Παρ' όλα αυτά, αυτή η μέθοδος διακριτοποίησης δεν φαίνεται να παρέχεται εκτεταμένα από τα συνήθη εμπορικά προγράμματα FEA [31].

Πάντως, η χρήση της προσαρμοστικής επαναδιακριτοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση της κατεργασίας. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ήταν εφάμιλλη της ακριβείας που είχε η προσομοίωση όταν όλα τα στοιχεία είχαν μέγεθος ίσο με αυτό των τοπικά επαναδιακριτοποιημένων στοιχείων [14].

1.3.3 Επιλογή οριακών συνθηκών

Η συνήθης επιλογή οριακών συνθηκών για το έλασμα είναι η πάκτωση των κόμβων στα άκρα του, εκεί δηλαδή που γίνεται η πρόσδεση του (clamping). Παρόλα αυτά, οι Bouffieux et al παρατήρησαν ότι η προσομοίωση ήταν πολύ ευαίσθητη σε τυχόν ελαστικότητα της πρόσδεσης κατά την διεύθυνση κάθετα στην πρόσδεση στο επίπεδο του αρχικού ελάσματος. Ιδιαίτερα μεγάλη μεταβολή παρουσίαζε η δύναμη που ασκούσαν στο εργαλείο. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώθηκε και από την μεταβολή της δύναμης στο εργαλείο συναρτήσει της ροπής στους κοχλίες πρόσδεσης. Παρόλα αυτά δεν φαίνεται να υπάρχει τρόπος πρόβλεψης βέλτιστων οριακών συνθηκών, πέρα από την συσχέτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά.

1.3.4 Χαρακτηριστικά υλικού

Τα χαρακτηριστικά του υλικού επηρεάζουν έντονα τα αποτελέσματα της κατεργασίας και αρά είναι αναγκαία η όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση της συμπεριφοράς τους στις προσομοιώσεις. Πρέπει να τονίσουμε ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση εξαρτώνται από τα υλικά που γίνεται η κατεργασία. Η επιλογή υλικού για την κατεργασία εξαρτάται πέρα από τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος και από τη διαμορφωσιμότητα που απαιτείται. Συνήθη υλικά που κατεργάζονται με ISF αποτελούν οι κοινοί ανοξείδωτοι χάλυβες, χάλυβες βαθείας κοίλανσης, κράματα αλουμινίου (ενδεικτικά αναφέρουμε 3003,6061, 1050), τιτάνιο και κάποια από τα κράματα του.

1.3.5 Υπολογισμός ισοδύναμης τάσης διαρροής

Η προκαθορισμένη και πιο συνήθης επιλογή για τον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης διαρροής στα περισσότερα πακέτα προσομοιώσεις είναι το κριτήριο Von Mises, το οποίο ανταποκρίνεται επαρκώς στα περισσότερα όλκιμα υλικά και χρησιμοποιείται συχνά στην προσομοίωση της κατεργασίας.

Παρόλα αυτά η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη επιλογή για την κατεργασία, είναι βάσει του κριτηρίου Hill. Το κριτήριο Hill είναι προτιμητέο καθώς λαμβάνει υπόψη την ανισοτροπία που χαρακτηρίζει τα ελάσματα, ιδιαίτερα όσα προέρχονται από ψυχρή διέλαση. [36][31][37][38][8]. Η επιλογή αυτή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και από την σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων που έκαναν χρήση και των δυο κριτηρίων με πειραματικά αποτελέσματα [39]. Παρόλα αυτά, στη γενική μορφή του κριτηρίου Hill, ο αριθμός των σταθερών που απαιτούνται είναι εννιά, (πίνακας πλαστικής ενδοτικότητας). Πολλές από αυτές τις παραμέτρους δεν είναι πάντα γνώστες. Συνήθης παραδοχή για τα ελάσματα είναι η θεώρηση επίπεδης εντατικής κατάστασης που οδηγεί, στην απαλοιφή των τριών από τις σταθερές, έτσι ώστε το κριτήριο Hill να μπορεί να εκφραστεί βάσει των συντελεστών ανισοτροπίας Lankford R_0 , R_{45} , R_{90} , που είναι εύκολα μετρήσιμες για ελάσματα [40][41]. Έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί επιτυχώς κριτήρια διαρροής υλικού, τα οποία θεωρούν ότι η ανισοτροπία του κάθε επίπεδου εξαρτάται από περισσότερες από 3 παραμέτρους λαμβάνοντας συχνά υπόψη την μη εξάρτηση των συντελεστών Lankford στις διάφορες κατευθύνσεις.

1.3.6 Σχέση τάσης παραμόρφωσης

Ένα από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα τάσεων παραμορφώσεων είναι το ισότροπο Swift Power law το οποίο προτιμάται για την προσομοίωση των περισσότερων υλικών [42][7][8][16][31] και λαμβάνει υπόψη την εργοσκήρυνση που χαρακτηρίζει πολλά υλικά. Ένα άλλο μοντέλο είναι το Armstrong-Frederick που λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο Bauschinger (ανισοτροπία του υλικού μετά την παραμόρφωση) και το Μικτό κινηματικό- ισότροπο μοντέλο που είναι συνδυασμός των δυο προηγούμενων και αποτελεί γενίκευση τους. Το Μικτό μοντέλο, σύμφωνα με τους Bambach και Markus, μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα [30]. Παρόλα αυτά στο μοντέλο είναι απαραίτητη η γνώση δυο παραμέτρων, οι οποίες μεταβάλλονται με την ισοδύναμη παραμόρφωση. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι στα περισσότερα εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων η σχέση ισοδύναμης τάσης -ισοδύναμης παραμόρφωσης δίνεται μέσω γραμμικής παρεμβολής δεδομένων σημείων. Πρέπει ακόμα να σημειωθεί η επιρροή του εκθέτη ισότροπης εργοσκήρυνσης στην διαμορφωσιμότητα του υλικού. Για μικρές παραμορφώσεις η αύξηση του εκθέτη έχει θετική επίπτωση στην εργοσκήρυνση, ενώ για μεγάλες παραμορφώσεις έχει αρνητική επίπτωση [43].

Η σχέση ισοδύναμης τάσης ισοδύναμης παραμόρφωσης οδηγεί στον υπολογισμό μιας ισοδύναμης ενέργειας παραμόρφωσης, η οποία πρέπει να ισούται με την ενέργεια που προκύπτει από τις διατμητικές τάσεις. Παράλληλα, στην πλαστική περιοχή πρέπει να ικανοποιείται η διατήρηση του όγκου. [41]

$$\text{Γενικευμένο Κριτήριο Hill: } f(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma - a)^T M(\sigma - a) - \sigma_o(\epsilon_o)}$$

$$\text{Κριτήριο Hill για επίπεδη εντατική κατάσταση: } f(\sigma) = \sqrt{\sigma_1^2 + \frac{R_0(1+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)}\sigma_2^2 - \frac{2R_0}{R_0+1}\sigma_1 * \sigma_2 - \sigma_o(\epsilon_o)}$$

Όπου: σ_0 = ισοδύναμη τάση $R_{0/90}$ = συντελεστών ανισοροπίας Lankford
 ϵ_0 = ισοδύναμη παραμόρφωση α =μετατόπιση της πλαστικής περιοχής λόγω
 M =πίνακας πλαστικής ενδοτικότητας κινηματικής εργοσκληρύνησης

1.3.7 Κριτήρια αστοχίας

Η κατεργασία Single Point Incremental Forming (SPIF), και γενικότερα η κατεργασία ISF φαίνεται να προσφέρει καλύτερη διαμορφωσιμότητα από άλλες κατεργασίες ελάσματος. Αν και ο ακριβής λόγος της αύξησης της διαμορφωσιμότητας δεν έχει διασαφηνιστεί πλήρως, φαίνεται να σχετίζεται με δύο ή ένα από δύο μηχανισμούς. Σύμφωνα με τον πρώτο, η παραμόρφωση οφείλεται κυρίως στις διατμητικές τάσεις κατά την διεύθυνση του πάχους σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους κοίλανσης που η παραμόρφωση οφείλεται κυρίως σε ορθές τάσεις [44] [6]. Σύμφωνα με την δεύτερη θεωρία η περιοχή διαρροής στις κατεργασίες ISF είναι μικρή και συνεχώς μετατοπίζεται, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ανάπτυξη "λαιμού".[1]

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καθώς και πλήθος πειραματικών αποτελεσμάτων, θεωρούμε ότι το διάγραμμα Forming Limit Curve (FLC) που χρησιμοποιείται συνήθως για κατεργασίες διαμόρφωσης δεν ισχύει για την συγκεκριμένη κατεργασία. Αντί αυτού προτείνεται η χρήση του διαγράμματος Fracture Forming Limit (FFL) που ορίζει ότι το άθροισμα των δυο ανεξαρτήτων ορθών παραμορφώσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή η οποία καθορίζεται συνήθως πειραματικά [45][46][47]. Πρόκειται δηλαδή για κριτήριο που στηρίζεται στην μέγιστη επιτρεπτή λέπτυνση του υλικού.

Ένα άλλο κριτήριο που έχει θεωρηθεί για την κατεργασία είναι η κλίση των τοιχωμάτων, η οποία δεν μπορεί να μεταβάλλεται πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή ανά πάσο. Το κριτήριο στηρίζεται στην αστοχία λόγω της αύξησης της διατμητικής δύναμης. Παρόλα αυτά, είναι προφανές ότι αυτός ο περιορισμός δεν λαμβάνει υπόψη το σύνολο των φορτίσεων που ασκούνται στο έλασμα και συνήθως αποτελεί ένα άνω όριο .[6]

1.4 Πρόβλεψη της τελικής γεωμετρίας μέσω παρεμβολής

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της κατεργασίας είναι ότι το τελικό τεμάχιο αποκλίνει σημαντικά από την ιδεατή μορφή, λόγω της ελαστικής επαναφοράς του υλικού. Οι Amborgio et al. (2007) προσπάθησαν να προβλέψουν την διαφορά της ιδεατής γεωμετρίας κόλουρης πυραμίδας από αυτήν που τελικά κατασκευάζεται. Μέσα από μια σειρά πειραμάτων και μετρήσεων, πρότειναν δύο σχέσεις, οι οποίες προβλέπουν την απόκλιση των ακμών και του κέντρου του πυθμένα της πυραμίδας, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους [48]. Αργότερα, οι Vebert et al. (2011) και οι Behera et al. (2011, 2013), στηριζόμενοι στην παρατήρηση ότι κάποιοι συνδυασμοί γεωμετριών οδηγούν σε συγκεκριμένου τύπου αποκλίσεις, πρότειναν μια διαδικασία για την πρόβλεψη της τελικής γεωμετρίας και, στην συνέχεια, την διόρθωση της, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση της ιδεατής. Αρχικά, πρότειναν την ταξινόμηση των διάφορων επιφανειών και των τρόπων σύνδεσης τους. Στην συνέχεια, όρισαν τους κατασκευαστικά εφικτούς συνδυασμούς. Έπειτα, για διάφορες γεωμετρίες, έγινε αναγνώριση των διαφόρων επιφανειών που τις αποτελούν, καθώς και του τρόπου ένωσης τους. Οι γεωμετρίες κατασκευάστηκαν και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα ιδεατά, οδηγώντας στην

δημιουργία ενός αρχείου αποκλίσεων. Μετά, τα αρχεία αποκλίσεων καθώς και οι ιδεατές γεωμετρίες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για να προβλεφθούν άλλες κατασκευές, μέσω πολυπαραμετρικής προσαρμοστικής παλινδρομικής ανάλυσης (Multivariate adaptive regression splines). Τα αποτελέσματα της πρόβλεψης ήταν ικανοποιητικά, αλλά η μέθοδος εφαρμόστηκε μόνο σε συγκεκριμένες γεωμετρίες και με περιορισμένο αριθμό παραμέτρων κατεργασίας. Η μέθοδος αυτή μπορεί να επεκταθεί σε πάρα πολλές περιπτώσεις, αλλά απαιτείται η επανάληψη της διαδικασίας συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπ' όψη οι παράμετροι της κάθε περίπτωσης [49]; [50]; [51]; [33].

1.5 Παράμετροι Κατεργασίας

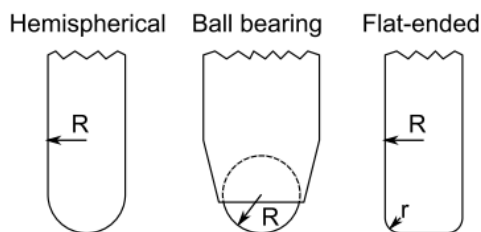
1.5.1 Εργαλείο

Η επιλογή εργαλείου αφορά κυρίως τον τύπο του εργαλείου καθώς και το μέγεθος του. Ως υλικό κατασκευής επιλέγονται κυρίως εργαλειοχάλυβες ή καρβίδια [52] [1][53].

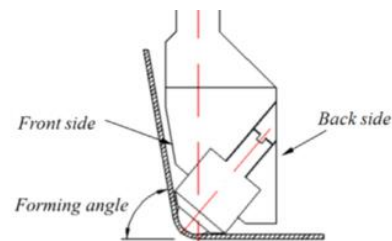
Υπάρχουν τρεις μορφές εργαλείων που χρησιμοποιούνται ευρέως αυτή την στιγμή. (Εικόνα 1-)

- Με σφαιρική κεφαλή
- Με επίπεδη κεφαλή (κυλινδρικά)
- Με κυλιόμενο σφαιρίδιο στην απόληξη (rolling ball)

Από τους τρεις τύπους εργαλείων, ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος φαίνεται να είναι αυτός με τη σφαιρική κεφαλή. Η χρήση κυλιόμενου σφαιριδίου μειώνει αισθητά την τριβή και οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα επιφανείας και αύξηση της διαμορφωσιμότητας, αλλά, λόγω της κατασκευής του εργαλείου, υπάρχει περιορισμός στη μέγιστη γωνία του τοιχώματος και την αξονική ως προς το εργαλείο ταχύτητα, έτσι ώστε η επαφή να περιορίζεται στη σφαίρα. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να αντισταθμισθεί με χρήση κεκλιμένου εργαλείου (orb) (Εικόνα 1-3 orb tool) ή εργαλειομηχανής με βαθμούς ελευθερίας ως προς την διεύθυνση του εργαλείου [52]. Η επίδραση της τριβής στη διαμορφωσιμότητα δεν έχει διασαφηνιστεί, όπως θα φανεί και από την μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου. Επίσης, η χρήση εργαλείου με επίπεδη κεφαλή φαίνεται να έχει ευνοϊκή επίδραση σε σχέση με το σφαιρικό εργαλείο σε κάποιες περιπτώσεις, αν και η επίδραση του συγκεκριμένου εργαλείου δεν έχει διασαφηνιστεί επαρκώς μέχρι στιγμής [43].



Εικόνα 1-2 Βασικοί τύποι εργαλείων



Εικόνα 1-3 orb tool

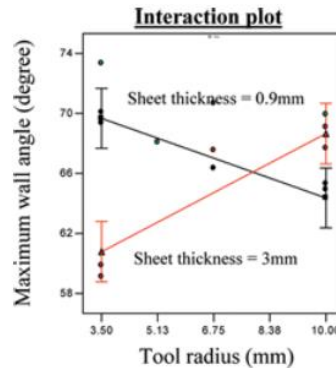
Μέγεθος εργαλείου

Η επιλογή του μεγέθους του εργαλείου έχει μελετηθεί κυρίως για ημισφαιρικά εργαλεία και ως κυρία διάσταση θεωρήθηκε η ακτίνα της κατάληξης του. Οι Ham and Jeswiet θεώρησαν ότι η χρήση μικρότερου εργαλείου θα είχε θετική επίδραση στη διαμορφωσιμότητα [54]. Στην συνέχεια οι Hussain

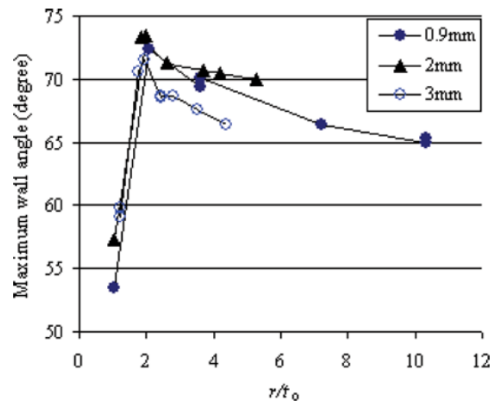
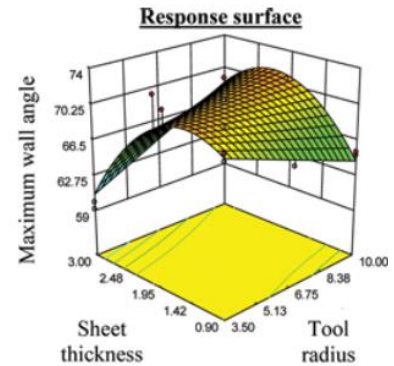
et al. παρατήρησαν ότι όταν η ακτίνα του εργαλείου μειώνονταν κάτω από μια συγκεκριμένη διάμετρο, το εργαλείο δημιουργούσε “κρατήρα” ο οποίος αποτελούσε πολύ σημαντικό ελάττωμα (Εικόνα 1-4) .Το κρίσιμο μέγεθος του εργαλείου κάτω από το οποίο φαίνεται να σχηματίζεται το ελάττωμα είναι ανάλογο του αρχικού πάχους του ελάσματος (Εικόνα 1- **Error! Reference source not found.**1-6) και εξαρτάται από την επιλογή υλικού. Αν και η μοντελοποίηση της δημιουργίας κρατήρα κατά την μέθοδο δεν έχει υλοποιηθεί, φαίνεται να ευνοείται από την αύξηση της τάσης διαρροής του υλικού και την αύξηση της αξονικής μετατόπισης του εργαλείου (step down). Η ακτίνα του εργαλείου φαίνεται να επιλέγεται βάσει του λόγου της ακτίνας του προς το πάχος του ελάσματος για την εξασφάλιση μέγιστης διαμορφωσιμότητας. (εικόνα 1-6) .[55][56]



Εικόνα 1-4 Δημιουργία κρατήρα



Εικόνα 1-5 Επίδραση διαμέτρου εργαλείου κα πάχους ελάσματος στη μέγιστη γωνία τοιχώματος (διομορφωσιμότητα)

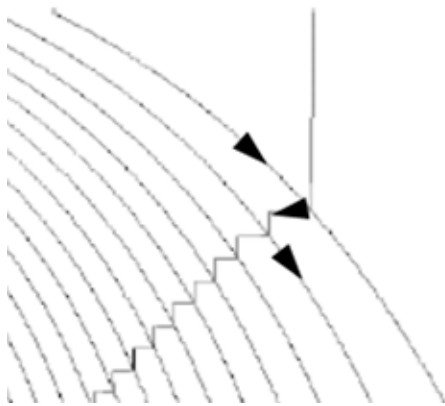


Εικόνα 1-6 Επίδραση εργαλείου στην διαμορφωσιμότητα

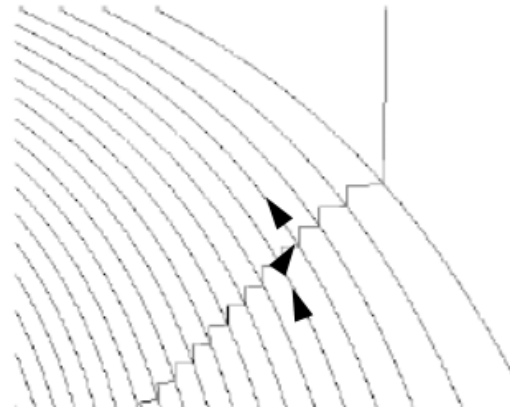
1.5.2 Τροχιά εργαλείου

Η τροχιά του εργαλείου φαίνεται να διαφοροποιεί τα αποτελέσματα της κατεργασίας.

Για την διαμόρφωση μιας κοιλότητας υπάρχουν δυο μέθοδοι όσον αφορά το σημείο έναρξης και πέρατος της κατεργασίας. Η τροχιά του εργαλείου μπορεί να ξεκινάει από την άκρη της κοιλότητας και να συνεχίζει προς τα μέσα (Εικόνα 1-1-7), ενώ στην δεύτερη περίπτωση το εργαλείο ξεκινάει από το εσωτερικό της κοιλότητας και συνεχίζει προς το εξωτερικό (Εικόνα 1- 1-8) [57].

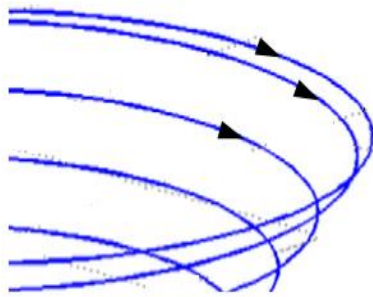


Εικόνα 1-7 Τροχιά από το εξωτερικό προς το εσωτερικό

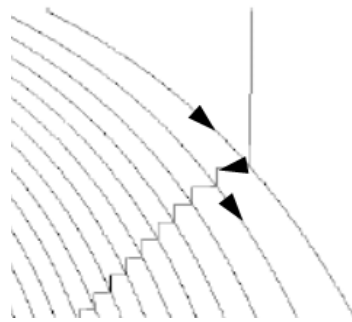


Εικόνα 1-8 Τροχιά από το εσωτερικό προς το εξωτερικό

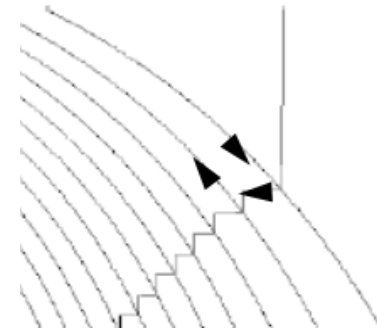
Η ταχύτητα πρόωσης μπορεί να είναι συνεχής και να έχει συνιστώσες ταχύτητες προς το εσωτερικό της κοιλότητας και κάθετα προς την αρχική επιφάνεια του ελάσματος, δημιουργώντας μια τροχιά που παραπέμπει σε σπείρα Εικόνα 1-. Μια άλλη στρατηγική που μπορεί να ακολουθηθεί είναι η τροχιά να αποτελείται από κλειστές 'υποτροχιές' οι οποίες είναι "παράλληλα" μετατοπισμένες (offset). Στην δεύτερη περίπτωση μπορεί η ταχύτητα του εργαλείου να έχει είτε ίδια (Εικόνα 1-) είτε αντίθετη (Εικόνα 1-) κατεύθυνση με την προηγούμενη τροχιά.



Εικόνα 1-9 Σπειροειδής τροχιά



Εικόνα 1-10 Σταθερή κατεύθυνση



Εικόνα 1-11 Εναλλασσόμενη κατεύθυνση

Συστάσεις για την ταχύτητα και το βάθος διαμόρφωσης του εργαλείου

Αξονική ταχύτητα και βήμα καθόδου (step-down)

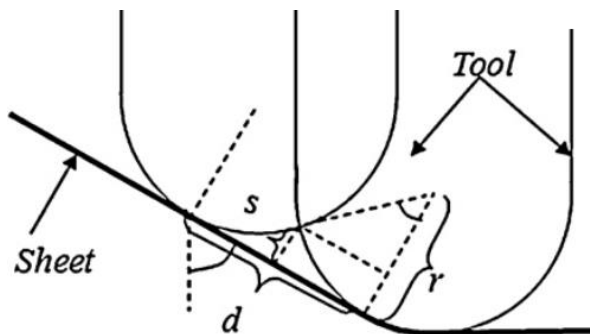
Η επιλογή του βήματος καθόδου και της αξονικής ταχύτητας φαίνεται να εξαρτάται από τις υπόλοιπες παραμέτρους της κατεργασίας, κύρια την επιλογή του υλικού. Το step down επιδρά έμμεσα στην διαμορφωσιμότητα και την τραχύτητα της επιφάνειας μέσω διαφόρων μηχανισμών. Κάποιες από αυτές τις επιδράσεις έχουν συνοψισθεί από τους Mc Anulty et al. όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 1.

Πίνακας 1 Βήμα καθόδου: συνοψιση συμπερασμάτων (Mc Anulty 2015).

Δημοσίευση	Αιτιολόγηση συμπεράσματος
Μείωση του βήματος καθόδου για αύξηση της διαμορφωσιμότητας	
Hussain 2008	Για το τιτάνιο, με την αύξηση του βήματος καθόδου, περιλαμβάνεται στον μηχανισμό παραμόρφωσης και «τράβηγμα» του ελάσματος. Έτσι, η παραμόρφωση παύει να είναι τοπική.

Lee 2008	Προκαλείται αύξηση της τριβής με την αύξηση του βήματος καθόδου, το οποίο οδηγεί σε ρυτίδωση και σκίσιμο του θερμοπλαστικού φύλλου.
Durante 2011	Η αύξηση της διεπιφάνειας εργαλείου-ελάσματος λόγω αύξησης του βήματος καθόδου οδηγεί σε μείωση της διαμορφωσιμότητας.
Centero 2014	Ένα μικρότερο βήμα καθόδου οδηγεί σε πιο ομαλή παραμόρφωση που είναι ευνοϊκή για τη διαμορφωσιμότητα.
Μετριασμός του βήματος καθόδου για αύξηση της διαμορφωσιμότητας	
Ambrogio 2006	Ένα πολύ μικρό βήμα καθόδου μπορεί να οδηγήσει σε φθορά του ελάσματος.
Obikawa 2009	Ένα πολύ μικρό step down επιβάλλει επαναλαμβανόμενες ορθές και κάθετες τάσεις στην ίδια περιοχή. Αυτές οι φορτίσεις μπορεί να επιδεινώνουν υπάρχουσες ατέλειες στο υλικό και να προκαλέσουν πρόωμη αστοχία.
Αύξηση του βήματος καθόδου για αύξηση της διαμορφωσιμότητας	
Begudanch 2015	Οφείλεται στις ρεολογικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών υλικών. Είναι πιθανό το παραπάνω συμπέρασμα να μην είναι απόλυτο και μέσα από παραπάνω ερευνά να συνιστάται μετριασμός του βήματος καθόδου.

Μια άλλη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι ότι η αύξηση του βήματος καθόδου μειώνει την ποιότητα επιφάνειας λόγω δημιουργίας scallops . Η δημιουργία scallops εξαρτάται επίσης και από την επιλογή ακτίνας του εργαλείου. Μια προσεγγιστική σχέση για το ύψος των scallops μπορεί να υιοθετηθεί από την κλασική θεωρία κατεργασιών [58].



$$d = 2 * \sqrt{2rs + s^2}$$

$$d^2 = a^2 + b^2$$

- s ύψος scallop κάθετα στην επιφάνεια
- a μήκος βήματος καθόδου
- β ακτινική μετατόπιση του εργαλείου κατά το βήμα καθόδου ως προς τον άξονα του εργαλείου
- r ακτίνα του εργαλείου

Εικόνα 1-12 Απλοποιημένος υπολογισμός των αυλακώσεων

Ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου

Η επιλογή της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου επιλέγεται έτσι ώστε να επιβάλλονται στο έλασμα οι επιθυμητές συνθήκες τριβής. Οι παρακάτω παρατηρήσεις αφορούν τη χρήση εργαλείου με σφαιρική απόληξη. Η ταχύτητα περιστροφής στην περίπτωση εργαλείου με κυλιόμενο σφαιρίδιο είναι αδιάφορη. Για την επιλογή της ταχύτητας περιστροφής υπάρχουν δυο στρατηγικές. Σύμφωνα με την πρώτη, η ταχύτητα περιστροφής επιλέγεται ως συνάρτηση της κυρίας ταχύτητας του εργαλείου έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η σχετική ταχύτητα του εργαλείου και του ελάσματος που βρίσκονται σε επαφή. Σύμφωνα με την δεύτερη στρατηγική, η ταχύτητα περιστροφής επιλέγεται έτσι ώστε να αυξηθεί το δαπανώμενο λόγω τριβής έργο και να υπάρξει τοπικά μια επιθυμητή αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η αύξηση της διαμορφωσιμότητας λόγω αύξησης της θερμοκρασίας έχει αποδοθεί

στο ότι το υλικό γίνεται πιο μαλακό ή στο ότι αλλάζει η κρυσταλλική δομή του. Η σχέση ταχύτητας περιστροφής – διαμορφωσιμότητας δεν είναι πλήρως κατανοητή ενώ η διαμορφωσιμότητα για κάθε υλικό και συνθήκες κατεργασίας εμφανίζει άλλες φορές μέγιστο ή ελάχιστο σε συγκεκριμένη περιοχή στροφών και σε άλλες περιπτώσεις συνεχή αύξηση με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Επιπλέον, λόγω αύξησης της ταχύτητας περιστροφής αναφέρθηκαν προβλήματα ποιότητας επιφανείας που οδηγούν σε περιορισμό της ταχύτητας περιστροφής. Η φορά περιστροφής του εργαλείου επιλέγεται συνήθως ομόρροπη (climbing) [43].

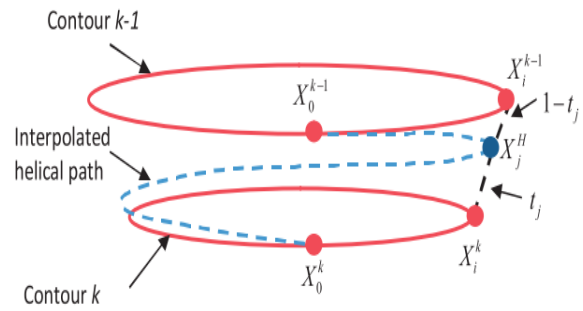
Άλλες συστάσεις για επιλογή τροχιάς

Η επιλογή σπειροειδούς τροχιάς προτιμάται σε πολλές περιπτώσεις, καθώς λόγω της ομαλής κίνησης του εργαλείου οι παραμορφώσεις και οι τάσεις είναι πιο μικρές και ομοιόμορφες. Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζει και η ασκούμενη δύναμη.[59]

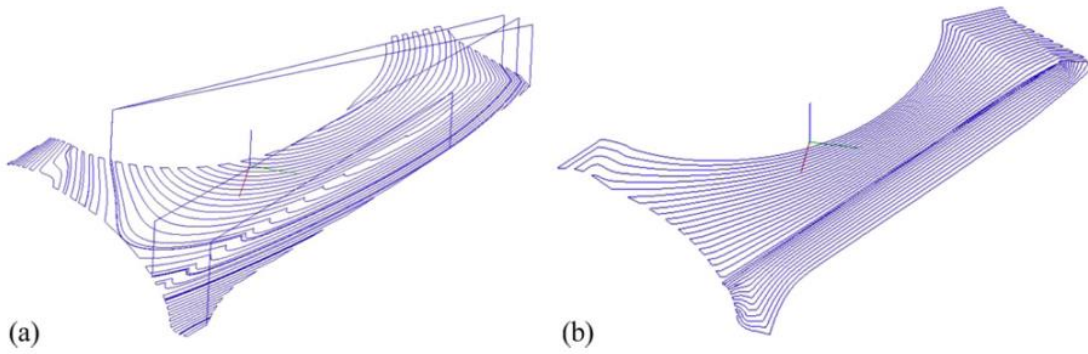
Σύμφωνα με τους Koras και Kampus, όταν η τροχιά του εργαλείου ξεκινά από το εξωτερικό της κοιλότητας επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια ως προς το τελικό βάθος της κοιλότητας, ενώ επιτυγχάνεται σε πολλές περιπτώσεις και καλύτερη ακρίβεια στο κέντρο της κοιλότητας σε σχέση με όταν η τροχιά ξεκινάει από το κέντρο της κοιλότητας. Αυτή η στρατηγική φαίνεται να υιοθετείται καθολικά όταν εφαρμόζεται ένα πάσο. [57]

Η χρήση offset υπο-τροχιών με εναλλασσόμενη διεύθυνση (Εικόνα 1-) φαίνεται να αναιρεί την επίδραση της τριβής όσον αφορά τις παραμορφώσεις και τις παραμένουσες τάσεις καθώς η επίδραση της κάθε τροχιάς είναι αντίθετη αυτής από τις γειτονικές [7]. Παρόλα αυτά, πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει επιλογές λίπανσης και εργαλείων με τις οποίες η τριβή μπορεί να διατηρηθεί πολύ χαμηλά.

Σύμφωνα με τους Lu et al., προτείνεται η παρακάτω διαδικασία για την δημιουργία τροχιών ανά feature της επιφάνειας. Αρχικά, γίνεται αναγνώριση των κρίσιμων ακμών της επιφάνειας με σκοπό να χωριστεί η αρχική επιφάνεια σε υπο-επιφάνειες. Στην συνέχεια, δημιουργούνται τροχιές οι οποίες, αντίθετα με την συνήθη θεώρηση, μπορούν να έχουν συνεχώς μεταβαλλόμενη μετατόπιση ως προς το επίπεδο του αρχικού ελάσματος και να δημιουργούνται έτσι ώστε ο λόγος της απόστασης τους από της δυο πλησιέστερες κρίσιμες ακμές να παραμένει σταθερός. Μπορεί να γίνει χρήση σπειροειδούς τροχιάς, η οποία θα δημιουργείται με παρεμβολή ανάμεσα στις αντίστοιχες επιθυμητές τροχιές. Αυτή η στρατηγική φαίνεται να επιτυγχάνει καλύτερη ποιότητα επιφάνειας στις ακμές και σε πολλές περιπτώσεις καλύτερη διαστατική ακρίβεια (Εικόνα) .Η μέθοδος αυτή φαίνεται ότι ενδείκνυται όταν υπάρχουν χαρακτηριστικά στο τεμάχιο με μεταβλητή κλίση και απόσταση κατά την κάθετη διεύθυνση του αρχικού ελάσματος, ιδιαίτερα όταν αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν πολύπλοκη μορφή, π.χ. ακμές με μεταβαλλόμενη κλίση (Εικόνα), ή όταν υπάρχουν επιφάνειες με μεταβαλλόμενο μήκος κατά την διεύθυνση της κίνησης του εργαλείου [58]. Επίσης, έχουν προταθεί στρατηγικές διαδοχικών πάσων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται γεωμετρίες με μεγάλη κλίση [60][19].



Εικόνα 1-13 Παρεμβολή για αποφυγή step down

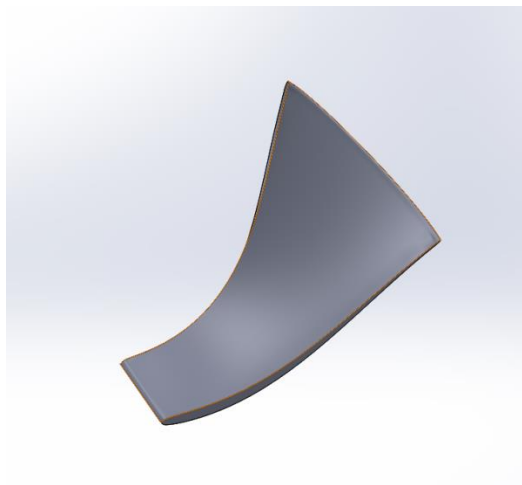


Εικόνα 1-14 Δημιουργία τροχειών βάσει features

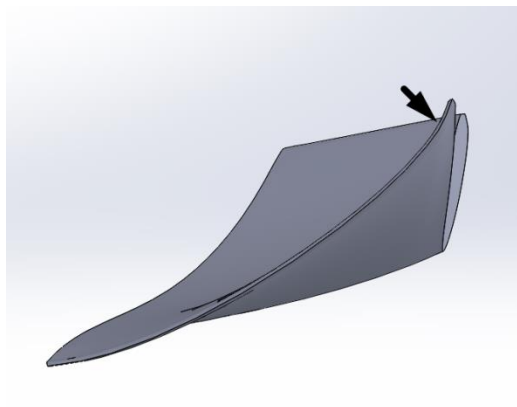
2 Δημιουργία γεωμετρίας -Παράμετροι κατεργασίας

2.1 Το πτερύγιο υδροστροβίλου

Το περίγειο Francis δόθηκε ως δεδομένο. Η χορδή είχε μήκος 132mm. Το πτερύγιο χαρακτηρίζεται από μεγάλη καμπυλότητα κοντά στην μια ακμή του, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα προβληματικό για την κατεργασία(εικόνα 2-2).



Εικόνα 2-1 Επιθυμητό πτερύγιο



Εικόνα 2-2 Περιοχή έντονης καμπυλότητας

2.2 Συμβάσεις σχετικά με τις διεύθυνσεις

Στην συνέχεια της διπλωματικής, θα γίνει συχνά αναφορά σε διάφορες κατευθύνσεις με τον παρακάτω τρόπο.

Ορίζεται, αρχικά, σύστημα συντεταγμένων x y z με τον άξονα z κάθετο στο επίπεδο του ελάσματος πριν την κατεργασία και παράλληλο με τον άξονα του εργαλείου.

Ως επάνω επιφάνεια θα αναφέρεται η επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή το εργαλείο.

Ως βάθος θα αναφέρεται η απόσταση κατά των άξονα z από το επίπεδο του αρχικού ελάσματος.

Ως ακτινική διεύθυνση θα αναφέρεται η διεύθυνση προς το κέντρο της κοιλότητας κάθετα στον άξονα z. Αν και η κοιλότητα δεν έχει κυλινδρικό σχήμα για να είναι σωστός από μαθηματικής άποψης ο ορισμός αυτός, κάτι τέτοιο κρίνεται απαραίτητο καθώς αυτή η διεύθυνση έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

2.3 Επιλογή υλικού

Η κατεργασία επιλέχθηκε να γίνει σε 3 κράματα αλουμινίου. Κράματα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρων σε αυτήν την κατεργασία με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε αλουμίνιο (AA1050O) το οποίο είχαμε προηγουμένως κατεργαστεί θερμικά (ανόπτηση ,350° για δυο ώρες ,ψύξη σε 12 ώρες) έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε την απαραίτητη ολκιμότητα. Το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, καθώς ήταν άμεσα διαθέσιμο και εξασφάλιζε λόγω της μεγάλης ολκιμότητας του ($e_{uts}=0,34$) ότι δεν θα έχουμε θραύση του ελάσματος.

Σε δεύτερη φάση, επιλέχθηκε κράμα αλουμινίου AA6082O. Το έλασμα προήλθε, επίσης, από θερμική κατεργασία (ανόπτηση ,420° για δυο ώρες ,ψύξη σε 12 ώρες). Αν και για το συγκεκριμένο αλουμίνιο δεν έχουμε βιβλιογραφικές αναφορές για την χρήση του, επιλέχθηκε καθώς παρουσίαζε μηχανολογικό ενδιαφέρον και θα μπορούσε να ικανοποιήσει προδιαγραφές αυτής της εφαρμογής. Έχει μεγάλη ολκιμότητα ($e_{uts}=0,18$), μπορεί να κατεργαστεί θερμικά ύστερα από την διαμόρφωση του για απόκτηση μεγάλης αντοχής, (κατά την κατεργασία η τάση διαρροής είναι χαμηλή γεγονός που διευκολύνει την κατεργασία και βελτιώνει την διαστατική ακρίβεια). Επιπλέον, παρουσιάζει ικανοποιητική αντίσταση στην διάβρωση.

Σε τρίτη φάση, χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου AA5083O. Επιλεχθηκε καθώς διαθέτει υψηλή σκληρότητα σε σχέση με την τάση διαρροής. Ελπίζαμε ότι η σκληρότητα θα οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα επιφανείας. Η μεγάλη τάση διαρροής όπως έχει αναφερθεί και σε άλλα σημεία θα οδηγούσε σε χειρότερη διαστατική ακρίβεια. Παράλληλα, θα αύξανε τις δυνάμεις για την διαμόρφωση για τις οποίες υπήρχαν κάποιοι περιορισμοί (άτρακτος εργαλειομηχανής ,πάκτωση ελάσματος). Επιπλέον, διαθέτει ικανοποιητική ολκιμότητα.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι για την επιλογή του υλικού υπήρχαν και περιορισμοί στα διαθέσιμα στην αγορά κράματα.

2.4 Δημιουργία τελικής γεωμετρίας

Για την κατασκευή του επιθυμητού τεμαχίου (πεπερύνιο francis) απαραίτητη ήταν η δημιουργία κοιλότητας από το έλασμα (επίπεδη επιφάνεια) η οποία θα περιείχε την επιθυμητή γεωμετρία .Η τελική γεωμετρία προκύπτει από την κοπή αυτής της κοιλότητας. Η επιφάνεια αυτή δημιουργήθηκε σε πρόγραμμα cad με δεδομένο την επιθυμητή γεωμετρία του τεμαχίου.

Η γεωμετρία του τεμαχίου αρχικά είχε μορφή στερεού η οποία όμως δεν ήταν δυνατό να προκύψει από έλασμα μέσω της κατεργασίας και για αυτό το λόγο απλοποιήθηκε σε επιφάνεια στο χώρο. Η επιφάνεια αυτή τοποθετήθηκε σε απόσταση από μια επίπεδη επιφάνεια (αρχικό έλασμα). Δημιουργήθηκε οπή στο αρχικό έλασμα (περιοχή κατεργασίας του) και στην συνέχεια ενώθηκε η

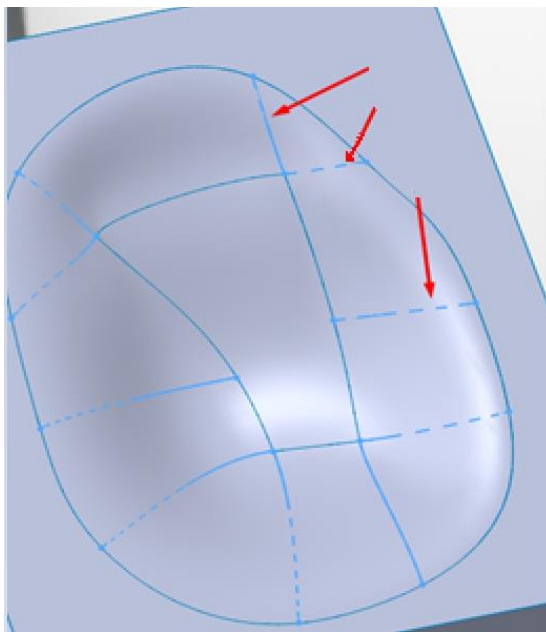
επιφάνεια του τεμαχίου με την επίπεδη επιφάνεια. Η δημιουργία της τελικής κοιλότητας εξαρτιόταν από:

- Την σχετική θέση του πτερυγίου σε σχέση με το αρχικό έλασμα
- Το μέγεθος του ελάσματος
- Την περιοχή κατεργασίας το βάθος της κοιλότητας
- Την τοποθέτηση οδηγών καμπύλων και σημείων (εικόνα 2-3) .

Υπήρχαν αρκετοί παράγοντες οι οποίοι έπρεπε να μετριαστούν (οptimization) μέσα από την επιλογή των προαναφερθέντων παραμέτρων. Οι κυριότεροι αυτών ήταν :

- Ο περιορισμός της κλίσης των τοιχωμάτων της κοιλότητας έτσι ώστε να αποφευχθεί η θραύση της. Ιδιαίτερη βαρύτητα είχε η περιοχή του τελικού τεμαχίου, όπου έπρεπε να περιοριστεί και η λέπτυνση (εικόνα 2-4).
- Η απλοποίηση της γεωμετρίας και η αποφυγή έντονων καμπυλοτήτων, καθώς τα παραπάνω μπορεί να οδηγήσουν σε κακή διαστατική ακρίβεια. (Υπενθυμίζεται ότι η διαστατική ακρίβεια είναι το κύριο πρόβλημα της κατεργασίας.) (εικόνα 2-6)
- Περιορισμός του μεγέθους της αρχικής επιφάνειας (μέγεθος ελάσματος) καθώς και της κατεργασμένης περιοχής(κοιλότητας), έτσι ώστε να περιοριστεί ο χρόνος κατεργασίας , το μέγεθος του ελάσματος και της βάσης στήριξης και να είναι δυνατή η κατεργασία του στην διαθέσιμη εργαλειομηχανή.
- Τοποθέτηση του πτερύγιου σε κάποια απόσταση από τα άκρα της κοιλότητας, καθώς αυτά αναμένεται να παραμορφωθούν σημαντικά.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η παραμόρφωση στα άκρα της κοιλότητας ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν που είχε αρχικά υποτεθεί αυθαίρετα. Για το λόγο αυτό, η γεωμετρία της κοιλότητας στις περιπτώσεις των ελασμάτων AA6082O και AA5083O είναι ελαφρά μεγαλύτερη και το πτερύγιο είναι τοποθετημένο χαμηλότερα.

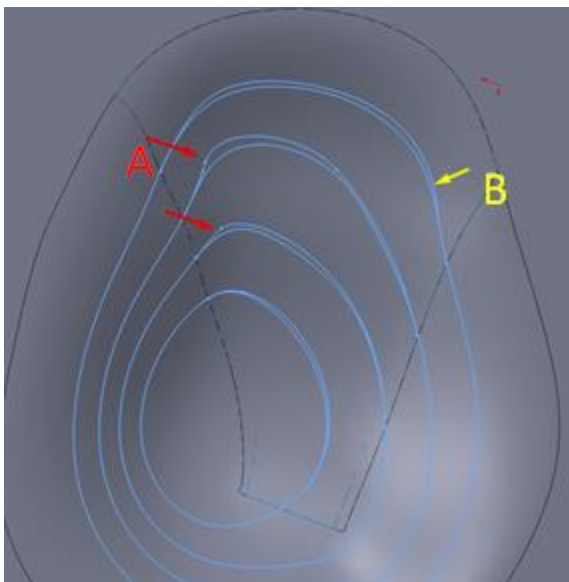


Εικόνα 2-3 Δημιουργία αρχικής κοιλότητας

- <math><36^\circ</math>
- <math><42^\circ</math>
- $>42^\circ$



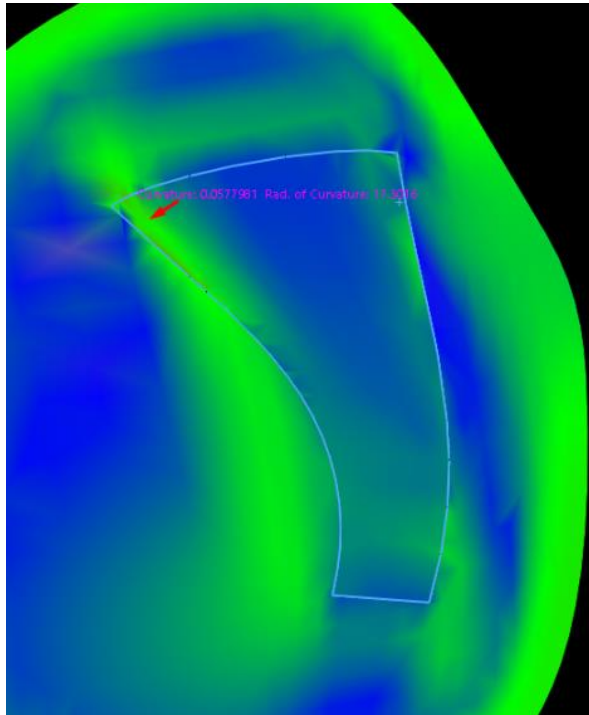
Εικόνα 2-4 Κλίση τοιχωμάτων τελικής κοιλότητας



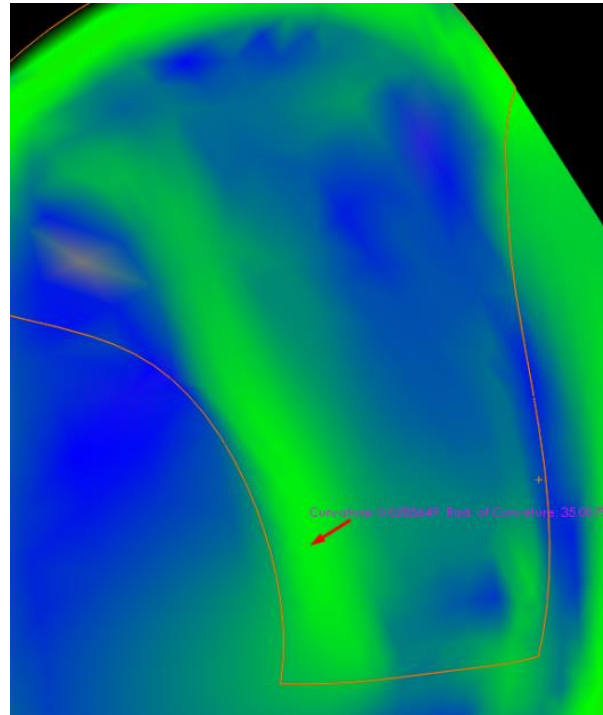
Εικόνα 2-5 Ισοϋψείς καμπύλες στις δυο επιφάνειες

Παρόλα αυτά στην επιθυμητή γεωμετρία του πτερύγιου υπήρχαν έντονες κλίσεις (κοντά στις ακμές) (εικόνες 2-6 A, 2-7). Η ελάχιστη ακτίνα της καμπυλότητας είναι 17,3mm. Οι τροχιές που θα δημιουργούνταν θα έπρεπε να τέμνουν αυτές τις ακμές “σχεδόν κάθετα” δημιουργώντας πρόβλημα στην ποιότητα επιφανείας και στην διαστατική ακρίβεια [58]. Για αυτόν τον λόγο, προτιμήθηκε η κατεργασία της επιφάνειας σε δυο φάσεις. Κατά την πρώτη, θα δημιουργούνταν μια απλοποιημένη κοιλότητα (εικόνα 2-6 εικόνα 2-7) με ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας 37mm μακριά από το πτερύγιο που είναι η περιοχή ενδιαφέροντος. Κατά την δεύτερη φάση, θα τροποποιούνταν η κοιλότητα για να αποδοθούν οι πιο έντονες καμπυλότητες του πτερύγιου (εικόνα 16 εικόνα 18). Βάσει αυτής της

στρατηγικής προέκυψαν δυο επιφάνειες .Η κατεργασία σε δυο φάσεις με κάθετες τροχιές σύμφωνα με την βιβλιογραφία φαίνεται να οδηγεί σε πιο ομοιόμορφες τάσεις στο έλασμα .[15]



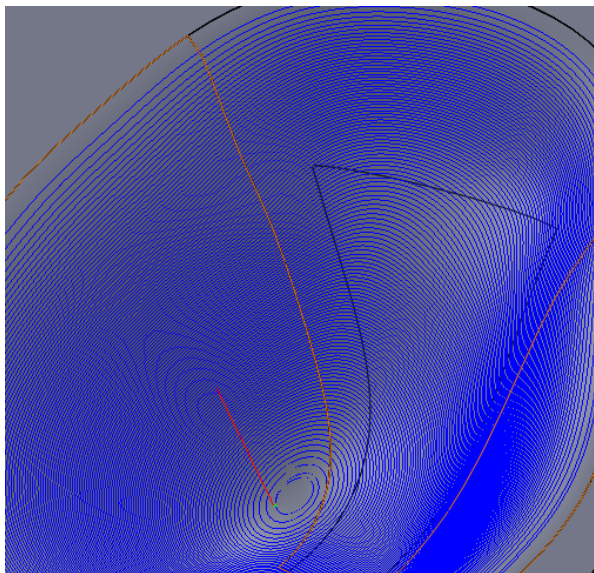
Εικόνα 2-6 Καμπυλότητα τελικής κοιλότητας



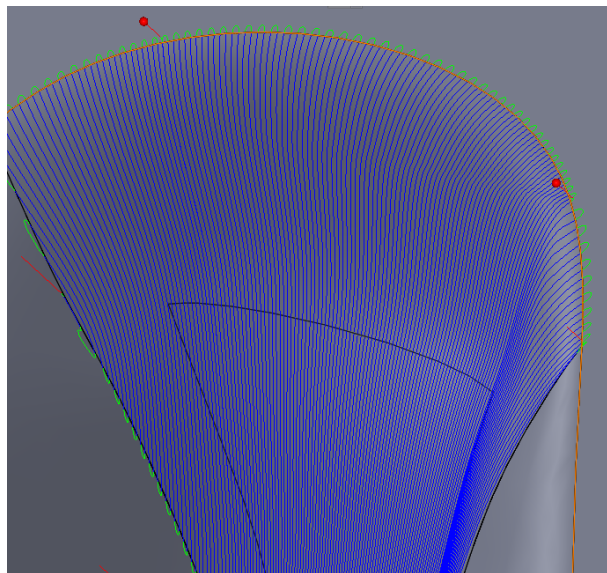
Εικόνα 2-7 Καμπυλότητα αρχικής κοιλότητας

2.5 Καθορισμός τροχιάς

Η τροχιά του εργαλείου δημιουργήθηκε σε πρόγραμμα cam (Solidcam)ενσωματωμένο (integrated)στο πρόγραμμα cad(Solidworks). Επιλέχτηκε σπειροειδής τροχιά για την δημιουργία της αρχικής κοιλότητας (εικόνα 2-8)και παράλληλες τροχιές (zigzag) στην περιοχή του πτερυγίου για την δημιουργία των έντονων καμπυλοτήτων(εικόνα 2-9).



Εικόνα 2-8 Σπειροειδής τροχειά



Εικόνα 2-9 Παράλληλη (zig zag) τροχειά

Παράμετροι κατεργασίας

Οι βασικές παράμετροι της κατεργασίας είναι η ταχύτητα πρόωσης, η ταχύτητα περιστροφής, το sterpdown, η επιλογή λιπαντικού και η επιλογή εργαλείου. Αποφασίστηκε ότι θα επιλεγεί εργαλείο με ημισφαιρική κατάληξη. Η παράμετρος που χαρακτηρίζει το εργαλείο είναι συνεπώς η ακτίνα του ημισφαιρίου. Οι παραπάνω παράμετροι επιλέχθηκαν βάση βιβλιογραφικών προτάσεων .

Συνολικά έγιναν 5 πειράματα. Στα πρώτα τρία, διαφοροποιήθηκε το υλικό έτσι ώστε να περιοριστούν οι αυλακώσεις που παρατηρούνταν. Στην συνέχεια, έγιναν αλλά δυο πειράματα. Ως υλικό για τα επιπλέον πειράματα επιλέχθηκε το 5083H111. Αυτό έγινε γιατί, λόγω της στιβαρότητας του, τα παραγόμενα τεμάχια παρουσίαζαν την μεγαλύτερη διαστατική απόκλιση. Τα σφάλματα που δημιουργούνταν σε πολλές περιπτώσεις (σφάλματα ευθυγράμμισης, προσομοίωσης , μέτρησης με scanner) ήταν συγκρίσιμα με τις διαστατικές αποκλίσεις. Η μελέτη λοιπών τεμαχίων με μεγαλύτερη απόκλιση θα οδηγούσε στην εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Στο τέταρτο και πέμπτο πείραμα, επιλέχθηκε να διαφοροποιηθεί η ακτίνα του εργαλείου. Χρησιμοποιήθηκε ένα μικρότερο εργαλείο ακτίνας 5mm. Η σχέση της ακτίνας του εργαλείου με την διαμορφωσιμότητα έχει μελετηθεί (κεφαλαίο 1-4-1) ,παρόλα αυτά δεν έχει μελετηθεί η σχέση της διαστατικής ακρίβειας με την ακτίνα του εργαλείου. Η βασική υπόθεση είναι ότι ένα μικρότερο εργαλείο θα δημιουργεί μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε μικρότερη περιοχή. Έτσι, λόγω της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού θα αναμέναμε πτώση της δύναμης στο εργαλείο και αρά μικρότερες ελαστικές παραμορφώσεις. Παρόλα αυτά, το τέταρτο πείραμα οδήγησε σε αστοχία του ελάσματος.

Για τον λόγο αυτό, στο πέμπτο πείραμα η ταχύτητα πρόωσης μειώθηκε και η ταχύτητα περιστροφής αυξήθηκε. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτές τις παραμέτρους αναφέρονται στα κεφαλαία 1-4-2 ,5-4,6-1.

Επιπλέον, αναφέρουμε ότι αποφεύχθηκε να γίνει διαφοροποίηση πολλών παραμέτρων ανά πείραμα. Παρόλα αυτά, η διαφοροποίηση μιας παραμέτρου μπορεί να έπρεπε να οδηγήσει σε διαφοροποίηση και άλλων παραμέτρων έτσι ώστε να ακολουθούνται οι συστάσεις της βιβλιογραφίας. Κάτι τέτοιο, όμως, ήταν εξαιρετικά πολύπλοκο και θα οδηγούσε σε ασαφή αποτελέσματα.

Για όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε λυπαντικό Interflon food lube H 100cst(40°).

Κράμα	10500 6082 O 5083 H111	
Ακτίνα εργαλείου	R=7mm	Επιλογή για βελτίωση ποιότητας επιφανείας και εξασφάλιση διαμορφωσιμότητας[53] [51] ^{1 2}
Step down	d=0.45mm	Επιλογή για βελτίωση ποιότητας επιφανείας και εξασφάλιση διαμορφωσιμότητας[52] [57]. Ελήφθησαν περιορισμοί και για την μείωση του χρόνου προσομοίωσης.
Ταχύτητα πρόωσης	F=1000mm/min	Εξασφάλιση διαμορφωσιμότητας και περιορισμός χρόνου κατεργασίας. [57]
Ταχύτητα περιστροφής	S=50rpm	Ελάχιστη δυνατή ταχύτητα περιστροφής εργαλειομηχανής. Περιορισμός σχετικής ταχύτητας εργαλείου –ελάσματος.

1) Αρχικά, είχε επιλεγεί για τα ελάσματα 6082 O και 5083 H111 εργαλείο διαμέτρου 10mm. Παρόλα αυτά, λόγω των έντονων προβλημάτων στην ποιότητα επιφανείας που είχαμε στο έλασμα 10500 χρησιμοποιήθηκε και στα 3 ελάσματα εργαλείο ακτίνας 7mm.

2) Η βιβλιογραφία [51] G. Hussain, H. R. Khan, L. Gao, and N. Hayat, “Guidelines for tool-size selection for single-point incremental forming of an aerospace alloy,” Mater. Manuf. Process., vol. 28, no. 3, pp. 324–329, αναφέρεται σε έλασμα 6061O το οποίο έχει παρόμοια σκληρότητα, τάση διαρροής και περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία με το έλασμα 6081O.

Κράμα	5083 H111	
Ακτίνα εργαλείου	R=5mm	Βελτίωση διαστατικής ακριβείας
Step down	d=0.45mm	Επιλογή για βελτίωση ποιότητας επιφανείας και εξασφάλιση διαμορφωσιμότητας [52] [57]. Ελήφθησαν περιορισμοί και για την μείωση του χρόνου προσομοίωσης.
Ταχύτητα πρόωσης	F=1000mm/min	Εξασφάλιση διαμορφωσιμότητας και περιορισμός χρόνου κατεργασίας. [57]
Ταχύτητα περιστροφής	S=50rpm	Ελάχιστη δυνατή ταχύτητα περιστροφής εργαλειομηχανής. Περιορισμος σχετικής ταχύτητας εργαλείου -ελάσματος

Κράμα	5083 H111	
Ακτίνα εργαλείου	R=5mm	Βελτίωση διαστατικής ακριβείας

Step down	d=0.45mm	Επιλογή για βελτίωση ποιότητας επιφανείας και εξασφάλιση διαμορφωσιμότητας[52] [57]. Ελήφθησαν περιορισμοί και για την μείωση του χρόνου προσομοίωσης.
Ταχύτητα πρόωσης	F=680mm/min	Επίτευξη διαμορφωσιμότητας
Ταχύτητα περιστροφής	S=1000rpm	Επίτευξη διαμορφωσιμότητας , βελτίωση ποιότητας επιφανείας

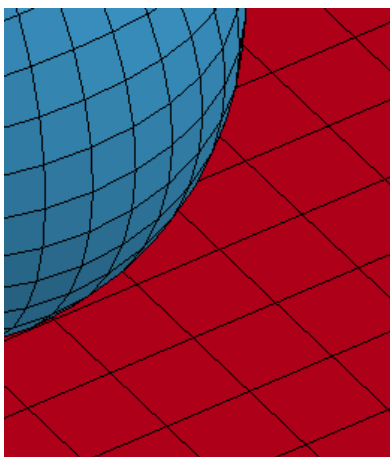
3 Προσομοίωση κατεργασίας

3.1 Επιλογή παραμέτρων προσομοίωσης

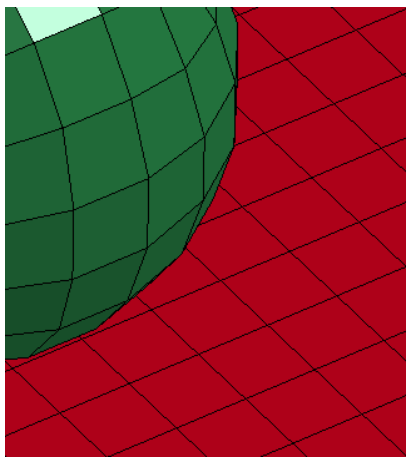
Η προσομοίωση έγινε στο λογισμικό LsDyna R8.1.

3.1.1 Μοντελοποίηση επαφής

Για την μοντελοποίηση της επαφής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος **segment to segment contact**. Η μέθοδος είναι penalty based αλλά σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους (node to segment), η διείδυση, βάσει της οποίας υπολογίζονται οι δυνάμεις, υπολογίζεται ως απόσταση ακμών ή επιφανείων των στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή. Στην προσομοίωση επιλέχτηκε να οριστεί η επαφή ανάμεσα σε επιφάνειες. Αυτή η προσέγγιση κρίθηκε απαραίτητη, καθώς η επαφή διαφορετικά συνέβαινε ανάμεσα σε λίγα στοιχεία και μεταβάλλονταν έντονα λόγω της διακριτοποίησης. Τα προβλήματα αυτά επιδεινώνονταν από τις έντονες κορυφές και ακμές που προέκυπταν στο εργαλείο(εικόνα 3-2), καθώς έπρεπε να συμβιβαστούν και άλλα προβλήματα, όπως ο μικρός λόγος επιφανείων των master προς slave στοιχείων (εικόνα 3-1). Μειονεκτήματα της παραπάνω μεθόδου αποτελούν ο αυξημένος υπολογιστικός χρόνος, καθώς και η συνεχή αύξηση της διείδυσης κατά την σχετική μετατόπιση των δυο επιφανείων. Η αυξημένη διείδυση αντιμετωπίστηκε παρόλα αυτά σε ικανοποιητικό βαθμό αυξάνοντας το contact stiffness ,και επιλέγοντας ανάλογη επιλογή (Sbopt=sliding option). Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι στην επαφή έπρεπε να ληφθεί υπόψη η μεταβολή του πάχους των στοιχείων. Αυτό επιτυγχάνεται προβάλλοντας τα στοιχεία της επιφάνειας του ελάσματος σε απόσταση ίση με το μισό πάχος του ελάσματος.



Εικόνα 3-1 Καλή απόδοση της γεωμετρίας, κακός λόγος στοιχείων



Εικόνα 3-2 Κακή απόδοση της γεωμετρίας, καλύτερος λόγος στοιχείων

3.1.2 Δημιουργία πλέγματος

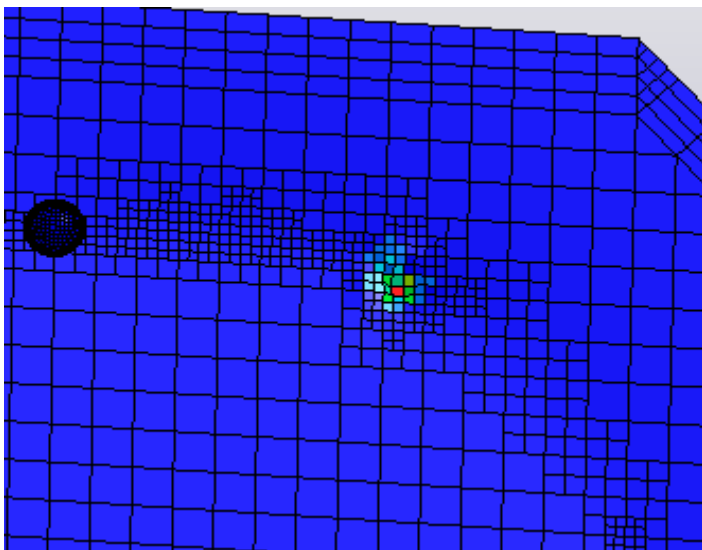
Το πλέγμα αποτελούνταν από δυο τμήματα. Το έλασμα (slave surface) και το εργαλείο (master surface).

Το έλασμα προσομοιάστηκε με επιφάνεια διακριτοποιημένη κυρίως από τετράγωνα στοιχεία Belytscko_Tsay με 5 κόμβους ολοκλήρωσης κατά τη διεύθυνση του πάχους (εικόνα 3-6) για την

απόδοση της πλαστικής κάμψης. Τα συγκεκριμένα στοιχεία παρείχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αποδεκτό χρόνο (είναι τα ταχύτερα shell element). Χρησιμοποιήθηκε, επιπλέον, προσαρμοστική επαναδιακριτοποίηση για την μείωση του μεγέθους του προβλήματος και την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας. Τα στοιχεία που δημιουργούνται μετά την επαναδιακριτοποίηση μπορεί να ενώνονταν στο αρχικό στοιχείο βάσει μιας ανάλογης διαδικασίας επανασύνθεσης (fussion).

Το κριτήριο επαναδιακριτοποίησης ορίστηκε βάσει της σχετικής γωνίας των γειτονικών στοιχείων, έτσι ώστε:

- Να υπάρχει απόδοση της καμπυλότητας στο έλασμα και ιδιαίτερα στα ' άκρα του πυθμένα' του τεμαχίου όπου υπάρχει η μεγαλύτερη καμπυλότητα
- Να υπάρχει επαφή του εργαλείου καθ' όλη την διάρκεια της κατεργασίας με πυκνό πλέγμα για την ικανοποιητική προσομοίωση της επαφής. Η μεταβολή της επαφής από πυκνό σε αραιό πλέγμα οδηγούσε πολλές φορές σε αστάθεια του μοντέλου, υπερβολικά μεγάλες τοπικές παραμορφώσεις (Εικόνα 3-3).Επίσης, προβληματικές ήταν οι απότομες μεταβολές στο αριθμό των στοιχείων που προκαλούνταν από κακό συνδυασμό στις τιμές που καθόριζαν την επαναδιακριτοποίηση - επανασύνθεση.
- Πιθανότατα, μπορεί να υπήρχε και διείσδυση του εργαλείου κάτω από την επιφάνεια κατά την επανασύνθεση των στοιχείων.



Εικόνα 3-3 Μεγάλες παραμορφώσεις στην άρχη του πυκνού πλέγματος

Η τιμή της σχετικής γωνίας στην οποία συνέβαινε η επαναδιακριτοποίηση, καθώς, και η χρονική διάρκεια ανάμεσα στις διαδοχικές επαναδιακριτοποιήσεις επανακαθορίστηκαν τρεις φορές στην διάρκεια της κάθε προσομοίωσης, έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα παραπάνω κριτήρια. Ο επανακαθορισμός της κρίσιμης τιμής βάσει της οποίας θα γίνονταν η επαναδιακριτοποίηση έγινε καθώς στην αρχή της προσομοίωσης η καμπυλότητα στις περιοχές της επαφής ήταν μικρή και έτσι έπρεπε η επαναδιακριτοποίηση να συμβαίνει σε μικρότερες γωνίες.

Η επανασύνδεση των στοιχείων χρησιμοποιούσε επίσης ως κριτήριο την σχετική γωνία αναμεσα σε γειτονικά στοιχεία. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιούσε διαφορετική τιμή σχετικής γωνίας από την επαναδιακριτοποίηση ως κριτήριο. Το κριτήριο αυτό έχει ως σκοπό την μείωση των στοιχείων σε περιοχές στις οποίες η σχετική γωνία των στοιχείων μειώθηκε. Παρόλα αυτά, δεν ήταν δυνατόν ο επανακαθορισμός της τιμής της γωνιάς βάσει της οποίας θα γίνονταν η επανασύνδεση των στοιχείων, με αποτέλεσμα η συμβολή της να είναι περιορισμένη.

Οι περιοχές κοντά στην πάκτωση εξαιρέθηκαν από την προσαρμοστική επαναδιακριτοποίηση και επαναδιακριτοποιήθηκαν κατά την δημιουργία του αρχικού πλέγματος. Αυτό ήταν απαραίτητο καθώς οι περιοχές αυτές είχαν έντονη παραμόρφωση, αλλά η επαναδιακριτοποίηση τους οδηγούσε σε έντονη αλλαγή της γεωμετρίας του πλέγματος και την δημιουργία ταλαντώσεων.

Το εργαλείο αποτελούνταν από εξαεδρικά στοιχεία, τα οποία προσομοίαζαν μια κοίλη σφαίρα. Τα στοιχεία έπρεπε να είναι επαρκώς μικρά έτσι ώστε να αποδίδεται ικανοποιητικά η σφαιρικότητα του εργαλείου μειώνοντας τις έντονες κορυφές, αλλά και να μην είναι υπερβολικά μικρά σε σχέση με το πλέγμα του ελάσματος. Υπενθυμίζεται ότι ενδείκνυται η master επιφάνεια να έχει μεγαλύτερα στοιχεία από την slave για την αποφυγή έντονου θορύβου και την αύξηση της ευστάθειας. Επιλέχτηκε να μοντελοποιηθεί το εργαλείο ως στερεό για να αποφευχθούν διάκενα στην master surface καθώς είναι κοίλη και η επαφή θα έπρεπε να προβληθεί σε απόσταση ίση με το πάχος του ελάσματος. (Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπιζονταν τελικά σε κάποιο βαθμό και με την επιλογή segment to segment.)

3.1.3 Μοντελοποίηση υλικού

Η ισοδύναμη τάση διαρροής υπολογίστηκε βάση του κριτηρίου barlat2000 το οποίο στηρίζεται στον υπολογισμό της ισοδύναμης διατμητικής ενέργειας. Αφορά επίπεδη εντατική κατάσταση. Είναι 6 παραμέτρων (οι οποίες υπολογίζονται βάση των συντελεστών ανισορροπίας Lankford και της τάσης διαρροής στις κατευθύνσεις 0°, 45°, 90°). Συμφώνα με το εγχειρίδιο του προγράμματος, έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και ενδείκνυται για ελάσματα αλουμινίου. Η δεύτερη σχέση που απαιτείται είναι αυτή της ισοδύναμης τάσης -ισοδύναμης παραμόρφωσης, η οποία εξαρτάται από την κράτυνση του υλικού. Ως κύριος μηχανισμός κράτυνσης θεωρήθηκε η εργοσκήρυση. Ύστερα από παρεμβολή -προεκβολή των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η κράτυνση του υλικού προσομοιάζεται καλύτερα από το εκθετικό μοντέλο. Από την παρεμβολή προέκυψαν και οι απαραίτητοι συντελεστές για το εκθετικό μοντέλο διαρροής κατά τον εφελκυσμό.

$$\sigma = (\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$$

Οι παραπάνω συντελεστές υπολογίστηκαν βάσει πειραμάτων εφελκυσμού συμφώνα με το πρότυπο E8_m και E517_m ASTM INTERNATIONAL στο έλασμα AA1050O και AA105H14. Τα δοκίμια κατασκευαστήκαν σε εργαλειομηχανή της σχολής (okuma mx45 vae). Άλλες παράμετροι (young modulus, poisson ratio, density) δώθηκαν από παραγωγούς (Azom, Leichtmetall). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ήταν πολύ κοντά στις ιδιότητες των ελασμάτων όπως αναγράφονται στην βιβλιογραφία ή παρέχονται από τους προμηθευτές (απόκλιση μικρότερη του 2% με εξαίρεση δείκτες Lankford στο έλασμα 1050h14), οπότε θεωρήθηκε σκόπιμο να παραλειφτούν τα πειράματα εφελκυσμού και να χρησιμοποιηθούν οι προτεινόμενες τιμές για το aa6082o. Λόγω της ανόπτησης την οποία έχει υποστεί

το έλασμα aa6082 δεν αναμένεται να προκύψουν οι διαφοροποιήσεις που υπήρχαν λόγω ανισοτροπίας στο έλασμα aa1050H14.

Αναφέρεται επιπλέον ότι το υλικό δεν παρουσιάζει λέπτυνση κατά την ελαστική φόρτιση ($E_z = \text{inf}$), καθώς κάτι τέτοιο οδηγούσε σε συνεχή λέπτυνση του ελάσματος και αφύσικα αποτελέσματα (πολύ μεγάλη λέπτυνση). Αυτό οφείλετε πιθανώς σε αδυναμία ικανοποιητικής επαναφοράς μετά το πέρας της ελαστικής φόρτισης. Υπενθυμίζεται ότι το πάχος του ελάσματος είναι μια διάσταση που δεν προκύπτει ως απόσταση αναμεσα σε κόμβους αλλά αποδίδεται στο στοιχείο.

Παρατίθενται οι ιδιότητες των υλικών:

	10500	60820	5083H111
Density	0.0027gr/mm ³		
Young Modulus	69GP		
Poisson ratio	0.33		
Yild Strenght	37MPa	83.5MPa	180MPa
Strainght Coefficient(k) ¹	92MPa	242MPa	410MPa
Strain Hardening (n) ¹	0.142	0.21	0.16
Vickers hardness	22HV	36HV	78.5HV
Ellongation at break	0.34	0.18	0.16-0.17

1)Υπενθυμίζεται ότι $\sigma_{\text{yield}} = k \cdot \epsilon_{\text{eq}}^n$

Επιπλέον, αναφέρεται ότι το έλασμα 5083H111 ενδέχεται να παρουσιάζει σημαντική ανισοροπία. Καθώς δεν έγινε προσομοίωση στο έλασμα, η ακριβής τιμή των παραμέτρων του δεν είναι τόσο καθοριστικής σημασίας.

3.1.4 Άλλες παράμετροι

Συνοριακές συνθήκες

Τα άκρα του ελάσματος θεωρήθηκαν πακτωμένα. Στη σφαίρα επιβλήθηκε τρισδιάστατη κίνηση, η οποία ορίστηκε ως παρεμβολή σημείων στο χώρο συναρτήσεως του χρόνου. Για την δημιουργία του αρχείου των σημείων –χρόνου (εικόνα 3-5) χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα Matlab το οποίο χρησιμοποίησε ως είσοδο το πρόγραμμα rs274(gcode) (εικόνα 3-4), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην συνεχεία και για την διεξαγωγή της κατεργασίας στην εργαλειομηχανή. Η ταχύτητα του εργαλείου στην προσημείωση σε σχέση με την πραγματική ταχύτητα κατά την κατεργασία αυξήθηκε κατά 300 φορές (time scaling) για τον περιορισμό του χρόνου προσομοίωσης.

N298 · X99.0723 · Y37.2541 ·
 N300 · X99.4164 · Y37.0319 ·
 N302 · X99.9436 · Y36.7065 ·
 N304 · X100.4708 · Y36.3606 ·
 N306 · X100.7307 · Y36.1984 ·
 N308 · X100.9981 · Y36.0204 ·
 N310 · X101.5253 · Y35.6785 ·
 N312 · X102.0525 · Y35.3698 ·

Εικόνα 3-4 Προγραμμα Gcode, ένας πίνακας με στοιχεία χαρακτήρες

0.01, 99.072	0.01, 37.254	0.013, 0.05
1.000, 99.072	1.000, 37.254	1.000, -0.494
1.003, 99.416	1.003, 37.032	7.510, -0.494
1.009, 99.944	1.009, 36.706	7.521, -0.494
1.014, 100.471	1.014, 36.361	7.527, -0.495
1.017, 100.731	1.017, 36.198	7.549, -0.496
1.020, 100.998	1.020, 36.020	7.554, -0.496
1.025, 101.525	1.025, 35.679	7.559, -0.497
1.031, 102.052	1.031, 35.370	7.570, -0.498

Εικόνα 3-5 Τρεις πίνακες χρόνου-συντεταγμένων στο αντίστοιχο άξονα

Περεταίρω μείωση του υπολογιστικού χρόνου και διατήρηση της ευστάθειας

Έγινε επιλεκτική αύξηση μάζας (mass scaling) στοιχείων με μικρές ακμές έτσι ώστε να μην μειωθεί το time step. Για την διατήρηση της ευστάθειας χρησιμοποιήθηκε επίσης stiffness form hourglass control καθώς τα στοιχεία bellytchko tsay είναι μερικής ολοκλήρωσης. Επιπλέον, για να περιοριστεί η κινητική ενεργεία σε επιτρεπτά επίπεδα χρησιμοποιήθηκε απόσβεση στους κόμβους του ελάσματος, η οποία ήταν αυξημένη στην περιοχή της επαφής λόγω αυξημένου contact stiffness. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και στις περισσότερες προσομοιώσεις θεωρείται ότι η κινητική ενεργεία είναι αποδεκτή όσο παραμένει κάτω από το 10% της συνολικής, στην συγκεκριμένη προσομοίωση, η αποδεκτή κινητική ενεργεία του ελάσματος ήταν κατά πολύ μικρότερη (0,001%), ίσως λόγω της συνεχής αύξησης της συνολικής ενέργειας σε πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η κινητική ενέργεια στο έλασμα προκύπτει από την κίνηση των κόμβων στην περιοχή της επαφής, έτσι ώστε να προκύψει η παραμόρφωση.

3.2 Στάδια προσομοίωσης

Προσομοίωση έγινε για τα ελάσματα AA1050O και AA6082O σε 6 πυρήνες σε επεξεργαστή Amd Ryzen 7 1700. Οι απαιτήσεις σε μνήμη ήταν περιορισμένες (μικρότερες του 1Gb).

AA1050 O

Η προσομοίωση στο AA1050 κράτησε 292 ώρες. Η προσομοίωση της κατεργασίας έγινε σε δυο φάσεις. Η πρώτη φάση ήταν η explicit ανάλυση και αφορούσε την παραμόρφωση του ελάσματος από το εργαλείο. Στην συνέχεια, ακολούθησε προσομοίωση (implicit) για την ελευθέρωση εξωτερικών (πάκτωση) και εσωτερικών δυνάμεων (springback). Η implicit προσομοίωση χρειάζεται αμελητέο

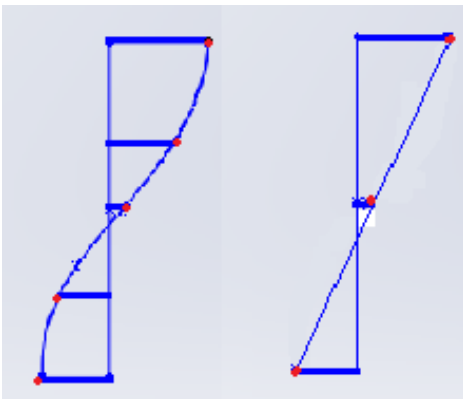
χρόνο (περίπου 15 λεπτά). Στην συνέχεια, βάσει της κατανομής του πάχους του κάθε ελάσματος, δημιουργήθηκε μοντέλο στερεού σώματος από όπου προέκυψε η τελική γεωμετρία.

AA6082O

Η προσομοίωση στο AA1050 κράτησε 265 ώρες. Η προσομοίωση της κατεργασίας έγινε σε τέσσερις φάσεις. Στην πρώτη φάση, έγινε προσομοίωση της κατεργασίας κατά την ελικοειδείς κίνηση του εργαλείου. Στην συνέχεια, ακολούθησε προσομοίωση απελευθέρωσης εσωτερικών τάσεων (implicit), προσομοίωση της κατεργασίας κατά την παράλληλη κίνηση του εργαλείου στην περιοχή του εργαλείου (zig-zag) και τέλος προσομοίωση απελευθέρωσης των εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων.

Η επιλογή για να γίνει η προσομοίωση σε τέσσερις φάσεις επιλέχτηκε έτσι ώστε:

- Κατά την δεύτερη φάση της προσομοίωσης, το σχετικό βάθος του εργαλείου σε σχέση με την επιφάνεια του ελάσματος θα εξαρτάται από τη σχετική θέση του εργαλείου σε σχέση με την επιφάνεια και όχι με την προηγούμενες θέσεις του εργαλείου, όπως γίνονταν κατά την κατεργασία της πρώτης φάσης. Παρόλα αυτά, η μεταβολή της γεωμετρίας ήταν πολύ μικρή.
- Κατά την διάρκεια της έμμεσης επίλυσης (πρώτο springback) ήταν δυνατή η μείωση του αριθμού των στοιχείων και η διατήρηση πυκνού πλέγματος μόνο στην περιοχή που θα συνέχιζε η κατεργασία κατά την δεύτερη φάση. Πρέπει να τονιστεί ότι η μείωση στον υπολογιστικό χρόνο ήταν σημαντική, καθώς η γεωμετρία των επιφανειών AA6082O και AA5083O είναι διαφοροποιημένη σε σχέση με την γεωμετρία του AA1050O και θα απαιτούσε υπό ίδιες συνθήκες σημαντικά περισσότερο χρόνο.



Εικόνα 3- 6 Κατανομή τάσεων σε ελαστοπλαστικό υλικό σε στοιχεία με πέντε και τρεις κόμβους κατά το πάχος

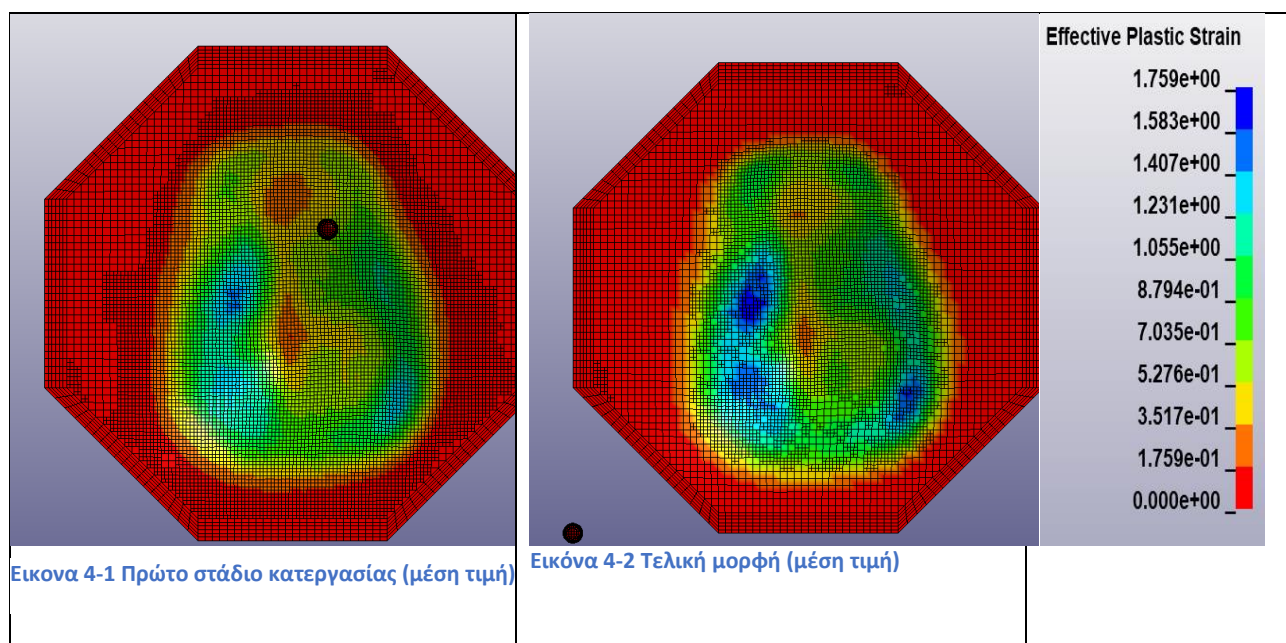
Παρόλα αυτά πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά τις διαδοχικές φάσεις της κατεργασίας δεν ήταν δυνατή η διατήρηση των τάσεων σε 2 από τους 5 κόμβους ολοκλήρωσης κατά το πάχος του ελάσματος. Έτσι, οι αρχικές τιμές των τάσεων σε αυτούς τους κόμβους κατά την έναρξη της τρίτης φάσης της προσομοίωσης προκύπτουν από παρεμβολή ανάμεσα στους άλλους 3 κόμβους και οδηγούν σε γραμμική κατανομή των τάσεων κατά το πάχος του ελάσματος (Εικόνα 3-6). Η απώλεια των τιμών στους 2 από τους 5 κόμβους δεν ήταν αναμενομένη αν λάβουμε υπόψη την περιγραφή των δυνατοτήτων του προγράμματος από το εγχειρίδιο. Η ανακρίβεια λόγω του παραπάνω ενδέχεται να είναι σημαντική.

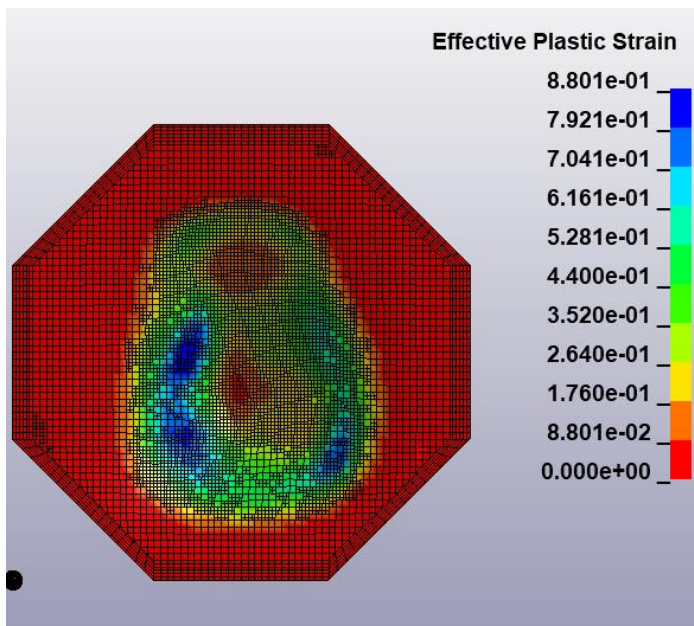
4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Βάσει των προσομοιώσεων προέκυψαν αποτελέσματα παραμορφώσεων και εναπομεινάντων τάσεων στο έλασμα. Επίσης, προέκυψαν τα μεγέθη των μετατοπίσεων από τα οποία εκτιμήθηκε η διαστατική ακρίβεια.

Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση ελάσματος AA60820

Παρατηρούμε μικρή αύξηση της παραμόρφωσης κατά την δεύτερη φάση η όποια όμως δεν αφορά αποκλειστικά την περιοχή στην οποία βρίσκεται το εργαλείο. Επίσης, είναι εμφανής ο μικρότερος αριθμός στοιχείων στην δεύτερη περίπτωση. Οι πιο έντονες παραμορφώσεις φαίνεται να είναι στις περιοχές με μεγαλύτερη κλίση (Εικόνες 4-1, 4-2).

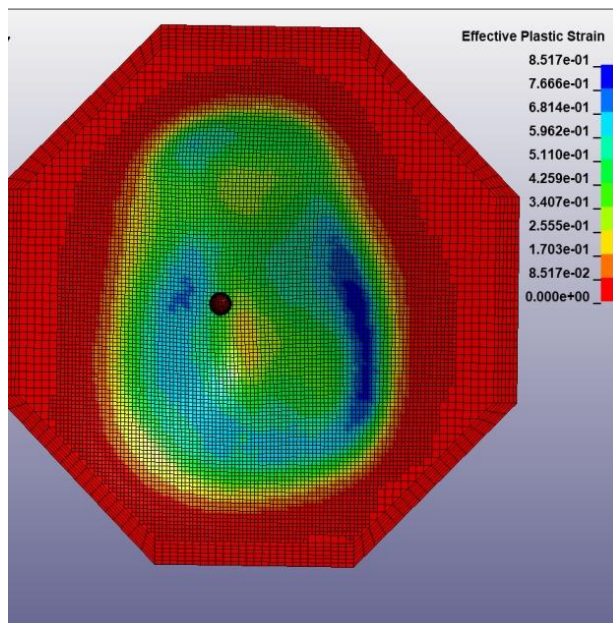




Σημαντική ήταν πάντως η μεταβολή της παραμόρφωσης κατά το πάχος του ελάσματος. Το γεγονός αυτό εξαρτάται κυρίως από την κάμψη του ελάσματος. Παρόλα αυτά όπως έχουμε προαναφέρει αν και τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να προσομοιάσουν την κάμψη δεν μπορούν να προσομοιάσουν άλλα φαινόμενα που συνδέονται με την κατά το πάχος μεταβολή των εντατικών μεγεθών. Εκτενέστερη ανάλυση στην παράγραφο 7.3.

Εικόνα 4-3 Ισοδύναμη παραμόρφωση(μέση κατά το πάχος επιφάνεια)

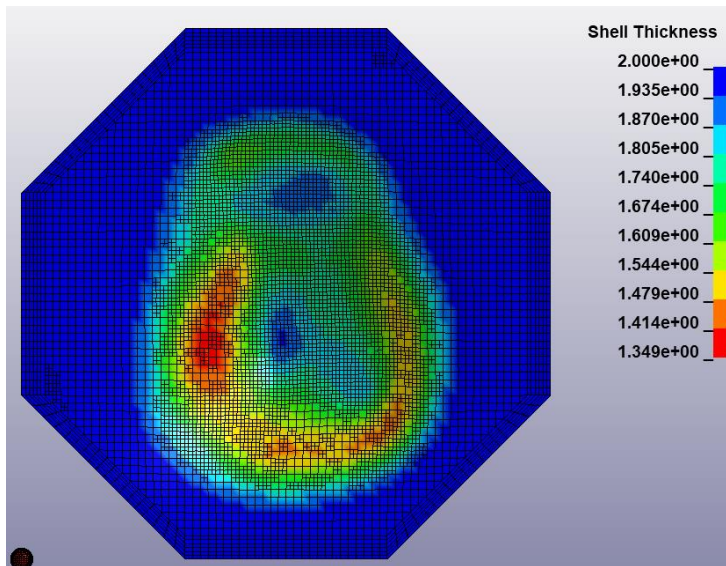
Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση ελάσματος AA10500



Στην περίπτωση του ελάσματος AA10500, τα μεγέθη είναι σαφώς μικρότερα από την περίπτωση του ελάσματος 60820. Παρόλα αυτά η αιτία αυτής της διαφοροποίησης δεν γίνεται αντιληπτή. Λόγω της σημαντικότερης κράτυνσης του 10500, αναμενόταν σε ένα βαθμό μικρότερη ισοδύναμη παραμόρφωση (αντίσταση σε λαιμό) η οποία θα κατανέμεται σε μεγαλύτερη περιοχή. Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση σε επίπεδη εντατική κατάσταση ήταν όντως ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη στο έλασμα 60820 χωρίς να δικαιολογεί αυτήν την απόκλιση. Η μεταβολή των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά το πάχος του ελάσματος στην περίπτωση του ελάσματος 10500 μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη.

Εικόνα 4-4 Ισοδύναμη μέση παραμόρφωση

Εκτίμηση του πάχους του ελάσματος



Εικόνα 4-5 Πρόβλεψη της κατανομής πάχους στο έλασμα 60820

Προέκυψε επίσης εκτίμηση για την κατανομή του πάχους του ελάσματος. (Αν και το πάχος του ελάσματος αφορά απόσταση στην προσομοίωση αντιμετωπίστηκε ως εντατικό μέγεθος). Υπενθυμίζεται ότι η λέπτυνση του ελάσματος θεωρείται ο κυριότερος λόγος αστοχίας. Μεγαλύτερη λέπτυνση παρουσιάστηκε στις περιοχές με μεγάλη κλίση. Παρόλα αυτά, η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση δεν εξαρτάται μονοσήμαντα από την λέπτυνση του ελάσματος, καθώς ο εφελκυσμός αν και ο κύριος μηχανισμός παραμόρφωσης δεν είναι ο μόνος. Παρατηρούμε επίσης ότι οι μεταβολές του πάχους διατηρούνται χαμηλά στην περιοχή από την οποία θα προκύψει το πτερύγιο (περιοχή ενδιαφέροντος).

Η κατανομή του πάχους στην περίπτωση του ελάσματος 10500 δεν παρουσίαζε σημαντικές διαφορές. Επίσης, μπορούμε να υποθέσουμε ότι τόσο το έλασμα 10500 όσο και το έλασμα 60820 είναι διαμορφώσιμα από την κατεργασία και δεν θα οδηγήσουν σε ρηγμάτωση της επιφάνειας.[61][47].

4.1 Εκτίμηση των δυνάμεων

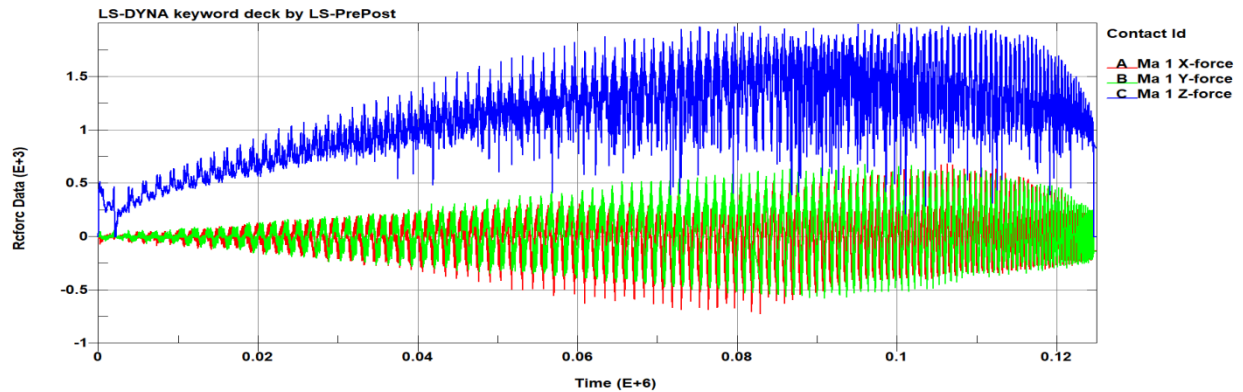
Κατά την προσομοίωση έγινε επίσης εκτίμηση των δυνάμεων που ασκούνται στο εργαλείο και των δυνάμεων που ασκούνται στην έδραση του ελάσματος.

4.1.1 Δύναμη στο εργαλείο

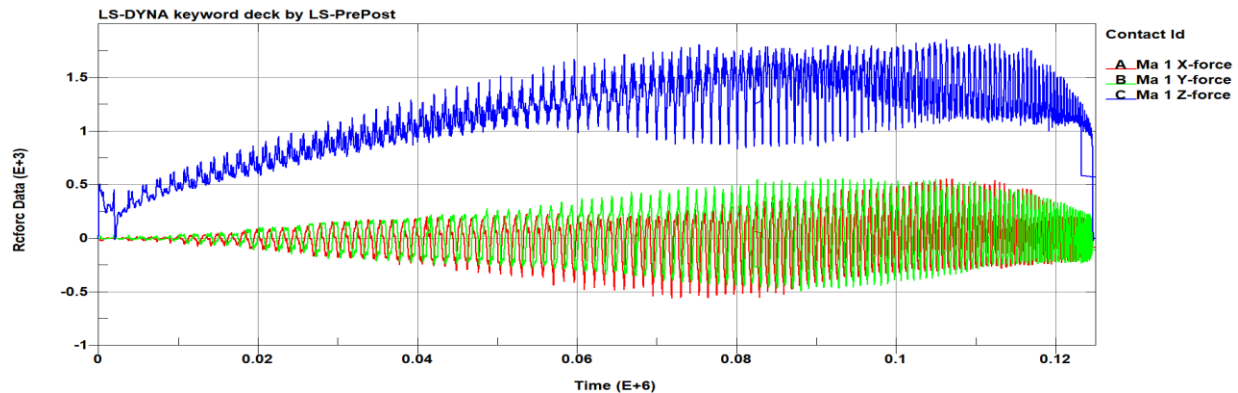
Η δύναμη στο εργαλείο είχε ως συνιστάμενες δυνάμεις την αξονική και την ακτινική ως προς την διεύθυνση του εργαλείου. Η ακτινική δύναμη είχε φορά από τα τοιχώματα προς το εσωτερικό της κοιλότητας. Από αυτές η πιο μεγάλη δύναμη ήταν η αξονική με την ακτινική δύναμη να είναι σημαντικά μικρότερη. Η ακτινική δύναμη παρόλα αυτά ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οδηγούσε στην δημιουργία βέλους κάμψης στο εργαλείο και την απόκλιση του από την επιθυμητή θέση (περειαίρω ανάλυση στην παράγραφο 7.2.1). Επιπλέον, υπήρχε περιορισμός ως προς την μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί στην άτρακτο. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί στην άτρακτο της Okuma mn45E δεν ήταν γνωστή. Ανάλογης ή και μικρότερης υποδύναμης εργαλειομηχανές (όπως η Hass Mini Mill και η Hass Umc500) έχουν ως μέγιστη επιτρεπτή δύναμη 7 με 12 φορές μεγαλύτερη από τις δυνάμεις που υπολογιστήκαν στην προσομοίωση για το έλασμα 60820 για όλους του άξονες. Οπότε, η κατεργασία θεωρήθηκε ασφαλής για την εργαλειομηχανή.

Πρέπει, επιπλέον, να αναφερθεί ότι στον υπολογισμό της δύναμης 'αντανακλώνται' πολλά από τα προβλήματα που υπάρχουν στην επαφή (κεφάλαιο 3.1.1). Έτσι υπήρχε έντονος θόρυβος ο οποίος

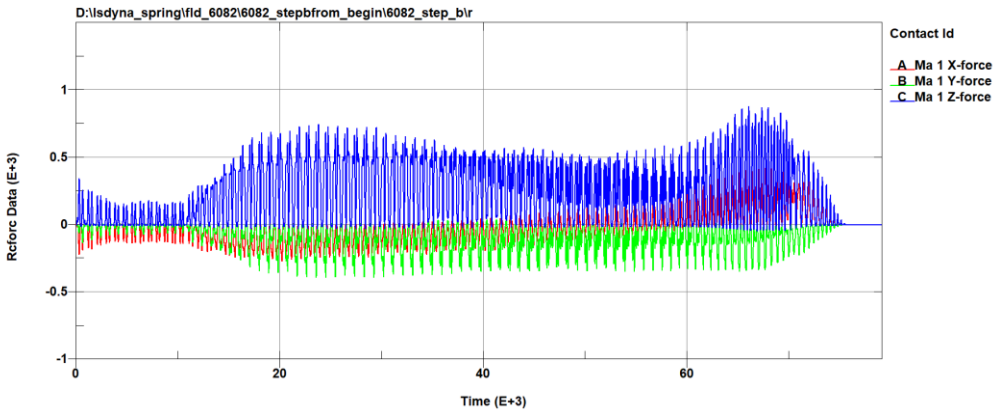
μπορούσε να απαλειφθεί. Για να είναι δυνατή η εκτίμηση του θορύβου (και αρά και των προβλημάτων στην επαφή) ιδιαίτερα σημαντική ήταν η περίοδος αποθήκευσης των αποτελεσμάτων της δύναμης. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί έντονη περιοδικότητα στην δύναμη. Τα peaks σε αυτήν την περιοδικότητα εμφανίζονταν κυρίως σε περιοχές οι οποίες ήταν πλησιέστερα στην πάκτωση του ελάσματος και είχαν μεγαλύτερη στιβαρότητα. Αυτή η περιοδικότητα στα αποτελέσματα οφείλονταν σε μικρότερο βαθμό και σε παράγοντες οι οποίοι δεν είχαν να κάνουν με την πραγματικότητα (artifacts) (παράγραφος 7.1).



Εικόνα 4-6 Δυνάμεις κατά την σπειροειδή κίνηση στο έλασμα 60820

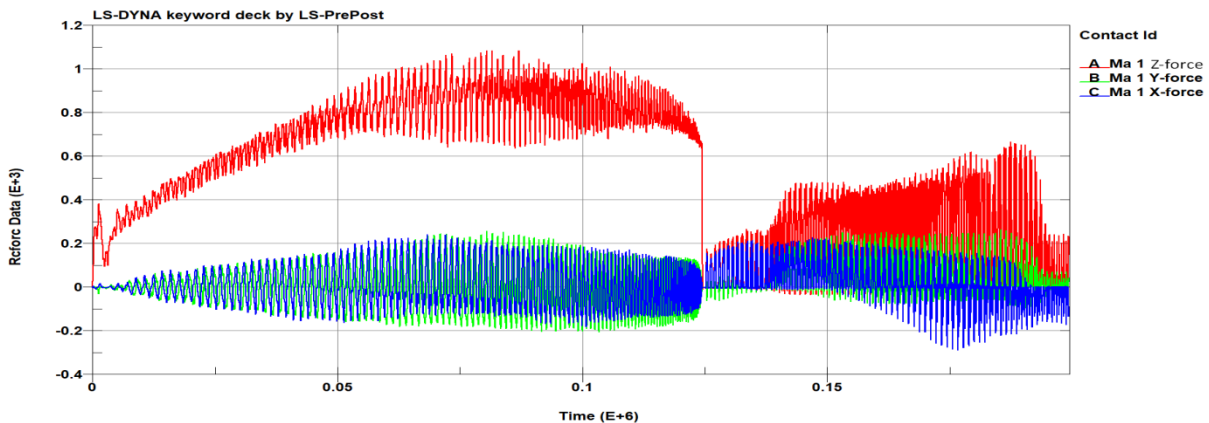


Εικόνα 4-7 Δυνάμεις κατά την σπειροειδή κίνηση στο έλασμα 60820 μετά την απάλειψη θορύβου



Εικόνα 4-8 Δυνάμεις κατά την παράλληλη κίνηση στο έλασμα 6082O μετά από την απάλειψη θορύβου

Από τα διαγράμματα της δύναμης παρατηρούμε ότι κατά την παράλληλη κίνηση του εργαλείου η δύναμη διαφοροποιείται έντονα καθώς μεταβάλλεται το σχετικό βάθος του εργαλείου ως προς την αρχική επιφάνεια (εικόνα 4-8).Επίσης, παρατηρούμε ότι η δύναμη κατά την σπειροειδή κίνηση του εργαλείου στην αρχή αυξάνεται μέχρι να σταθεροποιηθεί σε κάποια τιμή γύρω στα 1500N. Αυτή η αύξηση στην δύναμη οφείλεται στην μεταβολή της κλίσης των τοιχωμάτων και στην κράτυνση που παρουσιάζει το υλικό. Στο τέλος, παρουσιάζεται πάλι πτώση της δύναμης καθώς η κλίση των τοιχωμάτων μικραίνει.



Εικόνα 4-9 Δυνάμεις καθ' όλη την κίνηση του εργαλείου στο έλασμα 1050O μετά την απάλειψη θορύβου

Το μέγεθος της δύναμης ήταν σαφώς μικρότερο στην περίπτωση του ελάσματος AA1050O, αν και ακολουθούσε ανάλογη μεταβολή.

Αναφέρουμε ότι η ισοδύναμη παραμόρφωση κυμαίνεται γύρω στο 0,45 και φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από το υλικό. Αυτή η παραμόρφωση αντιστοιχεί σε ισοδύναμη εφελκυστική δύναμη:

	1050O	6082O	5083H111
Ισοδύναμη εφελκυστική τάση διαρροής ($\epsilon_{eq}=0.45$)	80MPa	200MPa	360MPa
Μέγιστη αξονική δύναμη στο εργαλείο κατά την προσομοίωση	950N	1650N	
Μέγιστη ακτινική δύναμη στο εργαλείο κατά την προσομοίωση	220N	500N	

Από τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι η δύναμη στο εργαλείο μεταβάλλονταν με ρυθμό μικρότερο από τον ανάλογο σε σχέση με την αύξηση της τάση διαρροής. Συνεπώς, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η μέγιστη αξονική δύναμη στην περίπτωση του ελάσματος 5083H111 δεν θα ξεπεράσει κατά πολύ τα 3000N.

4.1.2 Δυνάμεις στην έδραση του ελάσματος

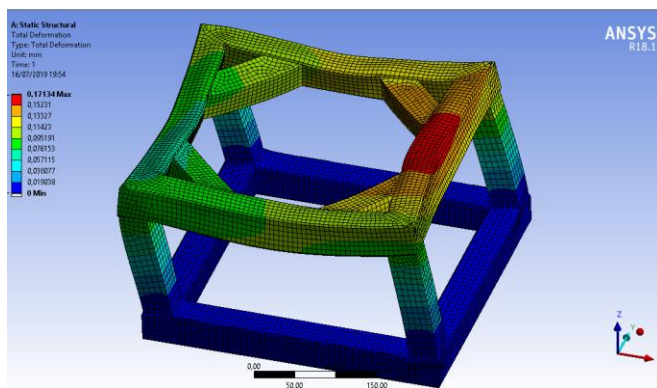
Η κύρια τάση που ασκείται στο έλασμα για την έδραση του είναι η ορθή εφελκυστική η οποία έχει φορά προς το κέντρο του ελάσματος. Αυτές οι τάσεις αντισταθμίζονται από διατμητικές τάσεις που προέρχονται από την τριβή ανάμεσα στο έλασμα και την βάση του. Οι εφελκυστικές τάσεις που ασκούνται στο έλασμα κοντά στην πάκτωση υπολογίστηκαν από προσομοίωση ως δυνάμεις σε κόμβους οι οποίοι ήταν πακτωμένοι. Οι δυνάμεις που ασκούνταν στους κόμβους μεταβάλλονταν σημαντικά σε μέτρο. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες είναι η απόσταση του εργαλείου από την περιοχή στην οποία βρίσκονται και η δύναμη που ασκεί το εργαλείο αυτήν την στιγμή στο έλασμα.

Στην αρχή της κατεργασίας ήταν μέχρι 700N/mm. Παρ' όλα αυτά στην συνέχεια περιορίζονταν κάτω από τα 300N/mm καθώς το έλασμα διαμορφώνονταν αποκτούσε κάποια επιπλέον στιβαρότητα, το εργαλείο απείχε περισσότερο από την έδραση και άρα οι δυνάμεις κατανέμονται πιο ομοιόμορφα. Επιπλέον, η δημιουργία της κοιλότητας οδήγησε μάλλον σε στήριξη των περιοχών που βρίσκονταν υπό κατεργασία.

5 Προετοιμασία και εκτέλεση κατεργασίας

5.1 Μελέτη και κατασκευή βάσης στήριξης

Αποφασίστηκε να κατασκευαστεί η βάση από στρατζαριστούς δοκούς διατομής 40X40mm πάχους 2mm από χάλυβα καθώς ήταν άμεσα διαθέσιμοι. Έγινε προσομοίωση της βάσης σε πρόγραμμα Ansys με δεδομένο την φόρτισή της, από την συγκράτηση του ελάσματος. Η δύναμη που απαιτείται για την συγκράτηση του ελάσματος ορίστηκε ως η δύναμη στην πάκτωση από την προσομοίωση της κατεργασίας (Isdyna) για το κράμα 60820, αν και στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε έλασμα με μεγαλύτερη τάση διαρροής (5083). Ύστερα από την προσομοίωση αποφασίστηκε η ενίσχυση της βάσης με επιπλέον δοκούς κατά την διαγώνια διεύθυνση. (Εικόνα 5 -1) Για την κατασκευή της βάσης οι δοκοί συγκολλήθηκαν με την μέθοδο smaw.



Εικόνα 5-1 Μετατόπιση της βάσης κατά την φόρτιση

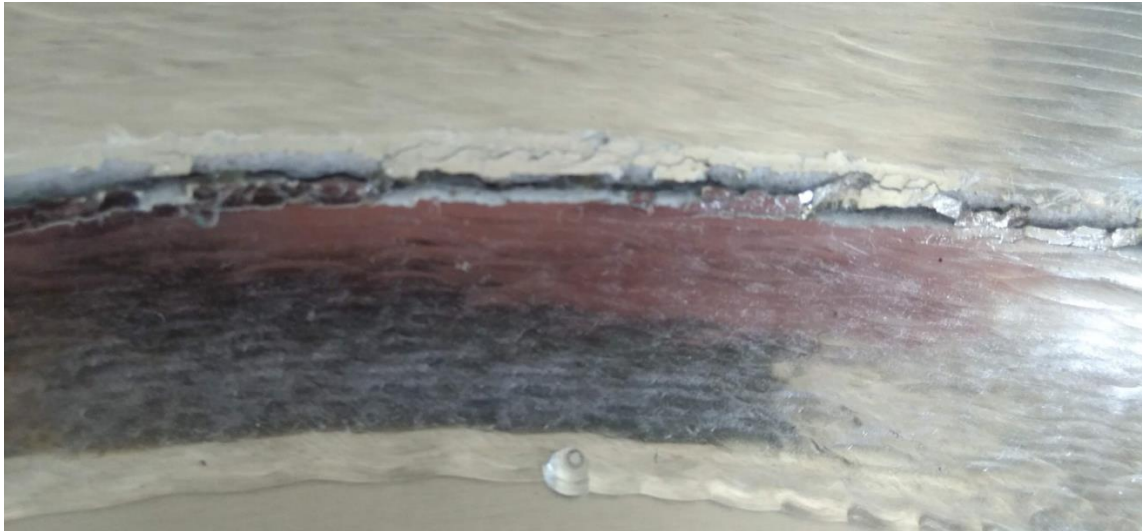
Στην συνέχεια, έγινε ανάλυση της επαφής ανάμεσα στα δυο τμήματα της βάσης και το έλασμα με πεπερασμένα στοιχεία. Υπολογίστηκε η απαραίτητη συνολική προένταση των κοχλιών (400kN) που θα εξασφάλιζαν την επαρκή συγκράτηση του ελάσματος. Στην προσομοίωση ελήφθησαν υπόψη και οι ανοχές στην παραλληλότητα των τμημάτων καθώς και η περιοδικότητα των δυνάμεων. Αποφασιστήκε ότι θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν 20 κοχλίες (ντίζες) M12. Λόγω της μεγάλης προέντασης τους (20 kN ανά κοχλία) χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον ράβδοι χάλυβα ορθογωνικής διατομής 40X4mm (λάμες) για την μεταφορά της προέντασης στην βάση, από τους κοχλίες.

5.2 Κατασκευή εργαλείων

Δυο εργαλεία ακτίνας στην κεφαλή 7mm και 5mm κατασκευαστήκαν από ανοξείδωτο χάλυβα σε τόρνο της σχολής (hass tl1)(εικόνα 6-6). Η διάμετρος του προβόλου ήταν 14mm. Η σκληρότητα του χάλυβα μετρήθηκε σε μικροσκληρόμετρο ως 280HV30, η οποία θεωρήθηκε επαρκής για την διαμόρφωση αλουμινίου. Η αρχική σκληρότητα των ελασμάτων από μέτρηση σε σκληρόμετρο ήταν aa110500 22HV5, aa60820 36HV30 ,aa5083H111 78.5HV30. Πρέπει να αναφερθεί ότι αναμένεται μια μικρή αύξηση κατά την κατεργασία λόγω εργοσκληρυνσης.

5.3 Θραύση ελάσματος 5083H111 με εργαλείο ακτίνας 5mm (πείραμα 4)

Από την αρχή της κατεργασίας του ελάσματος παρατηρήθηκε η δημιουργία πολύ κακής επιφάνειας (θα αναλυθεί στην συνέχεια). Μικρή αύξηση της ταχύτητάς περιστροφής ίσως οδήγησε σε περιορισμό του προβλήματος. Όταν το εργαλείο βρισκόταν σε βάθος περίπου 10mm από την αρχική επιφάνεια παρατηρήθηκε η δημιουργία ρωγμών μόνο στην πάνω επιφάνεια σε περιοχή λίγο υψηλότερα από την περιοχή στην οποία βρισκόταν το εργαλείο. Στην περιοχή των ρωγμών δημιουργήθηκε έντονη κλίση. Οι ρωγμές αυτές συνέχισαν να αναπτύσσονται μέχρι που αναπτύχθηκαν καθ'όλο το πάχος του ελάσματος και σε αρκετά μεγάλη περιοχή όταν το εργαλείο βρισκόταν αρκετά μακριά από την περιοχή. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν σε περιοχή με ιδιαίτερα επιβαρυμένη επιφάνεια. Το πάχος του ελάσματος στην περιοχή αυτή ήταν 1,8mm (περίπου) γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν υπήρξε ιδιαίτερα έντονος εφελκυσμός. Υπήρξε σαφής αύξηση της σχετικής γωνίας των δυο επιφανειών στα όρια της ρωγμής (εικόνα 5-1). Συνεπώς, η ύπαρξη καμπτικών δυνάμεων θα ήταν σημαντική. Όπως φαίνεται και από την προσομοίωση στα άλλα υλικά, η ύπαρξη διατμητικών παραμορφώσεων συνέβαλε στην αστοχία του ελάσματος.



Εικόνα 5-2 Ρωγμή και αποτύπωμα εργαλείου (πείραμα 4)

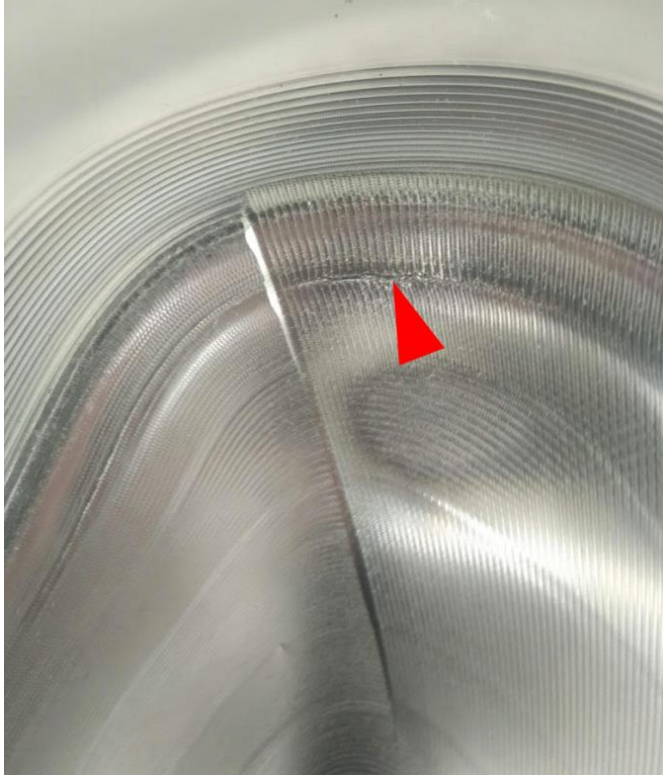
5.4 Περίπτωση ελάσματος 5083H1111 με εργαλείο ακτίνας 5mm και αυξημένη ταχύτητα περιστροφής (πείραμα 5)

Όπως προαναφέραμε στο προηγούμενο πείραμα μικρή αύξηση της ταχύτητας περιστροφής φαίνεται να επιδρά θετικά στην ποιότητα της επιφάνειας. Για αυτό το λόγο, το πείραμα επαναλήφθηκε με αυξημένη ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου (spindle speed). Η νέα ταχύτητα περιστροφής ήταν 1000rpm, η οποία ήταν σαφώς πολύ μεγαλύτερη από τα 50 rpm. Επίσης, η ταχύτητα πρόωσης μειώθηκε από τα 1000mm/min στα 700mm/min. Πρέπει να αναφερθεί ότι, υπό τις νέες συνθήκες, η παραγωγή θερμότητας ήταν σημαντική. Η θερμοκρασία στο εργαλείο αυξήθηκε σημαντικά. Μικρότερη αύξηση υπήρχε στο έλασμα και στο λιπαντικό. Όπως και στην περίπτωση του προηγούμενου πειράματος, αναπτύχθηκαν επιφανειακές ρωγμές στα ίδια σημεία με τις προηγούμενες συνθήκες. Παρόλα αυτά η ρωγμές αυτές ήταν κατά πολύ μικρότερες και δεν οδήγησαν αρχικά στην κατάρρευση της περιοχής. Υπήρξε, επίσης, αύξηση της καμπυλότητας κοντά στις ρωγμές, η οποία ήταν επίσης

μικρότερη από την προηγούμενη φορά. Ανάλογες ρωγμές παρουσιάστηκαν και σε άλλα τρία διαφορετικά 'βάθη' . Την κάθε φορά όμως η ένταση των ρηγματώσεων μειώνονταν σε όσο μεγαλύτερο βάθος βρίσκονταν (εικόνα 5-3). Τελικά στο έλασμα σχηματίστηκε μικρή διαμπερή ρωγμή κατά την δεύτερη φάση της κατεργασίας (παράλληλη κίνηση του εργαλείου) (εικόνα 5-4).



Εικόνα 5-3 Τεμάχιο πειράματος 5



Εικόνα 5-4 Λεπτομέρεια απο το πείραμα5 όπου διακρίνεται η ρωγμή

6 Έλεγχος και μελέτη των παραγομένων τεμαχίων

6.1 Ποιότητα επιφάνειας

Γίνεται εύκολα εμφανής από την οπτική παρατήρηση των τεμαχίων ότι η επιφάνεια παρουσιάζει προβληματική ποιότητα και ιδιαίτερα έντονες αυλακώσεις που προκληθήκαν από το εργαλείο. Τα προβλήματα στη επιφάνεια θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν σε πολλές περιπτώσεις ως πρόβλημα waviness πάρα ως προβλήματα roughness. Η κάτω πλευρά παρουσιάζει επίσης ανάλογο πρόβλημα με αυλακώσεις (εικόνα 6-4). Κατά την διάρκεια της κατεργασίας παρατηρήθηκε επίσης έντονη παρουσία γρεζιού στο λιπαντικό.

Στην περίπτωση του aa10500 το πρόβλημα ήταν ιδιαίτερα έντονο καθώς παρατηρήθηκε επιπλέον χοντρό γρέζι, τα σωματίδια του οποίου γίνονταν εύκολα διακριτά από το μάτι. Επιπλέον, υπήρξε έντονη επικάλυψη του γρεζιού στο εργαλείο (adhesion) που οδηγούσε στην διαστατική παραμόρφωση του εργαλείου και στην υποβάθμιση της ποιότητας της επιφάνειας του. Το λιπαντικό αντικαταστάθηκε τρεις φορές κατά την διάρκεια της κατεργασίας καθώς κρίθηκε επιθυμητή η απομάκρυνση του γρεζιού. Η επιδείνωση του προβλήματος στην περίπτωση του aa10500 αποδίδεται εύκολα στη μικρή σκληρότητα και τάση διαρροής του.



Εικόνα 6-1 Απόβλητα κατά το πείραμα 4



Εικόνα 6-2 Γρέζι στο λιπαντικό

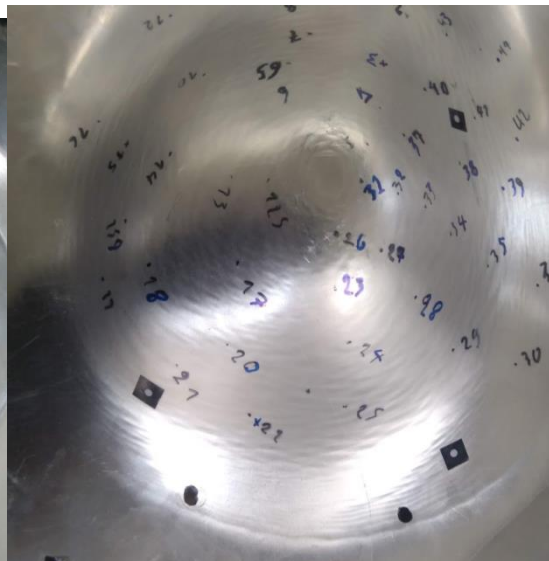
Στην περίπτωση του ελάσματος 5083 με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής η ποσότητα του γρεζιού μειώθηκε σημαντικά. Παρόλα αυτά όταν χρησιμοποιήθηκε εργαλείο ακτίνας 5mm, υπήρξε παραγωγή αποβλήτου από το αλουμίνιο και πιο έντονες αυλακώσεις από όταν χρησιμοποιήθηκε εργαλείο ακτίνας 7mm. Τα απόβλητα είχαν μήκος μερικά χιλιοστά (5-10mm). Η περαιτέρω υποβάθμιση της επιφάνειας στην περίπτωση αυτή ήταν σε κάποιο βαθμό αναμενόμενη, γιατί υπήρξε αύξηση της πίεσης στην επιφάνεια του ελάσματος. Η μείωση της επιφάνειας επαφής όπως εκτιμήθηκε από στίγματα στο εργαλείο ήταν αρκετά μεγάλη (εικόνα6-6). Στην περίπτωση του ελάσματος 5083 με εργαλείο ακτίνας 5mm και μεγάλη ταχύτητα περιστροφής υπήρξε αύξηση του γρεζιού στο λιπαντικό σε πολύ μεγάλο

βαθμό. Αν και παρατηρήθηκε παραγωγή αποβλήτων αυτή ήταν σχετικά μικρότερη. Παρόλα αυτά, τα απόβλητα ήταν αρκετά μεγάλα (40-100mm) σε μήκος με αποτέλεσμα να τυλίγονται γύρω από το εργαλείο, κάνοντας εξαιρετικά δύσκολη την απομάκρυνση τους. Αυτή η συμπεριφορά μάλλον αποδίδεται στο ότι λόγω αύξησης της θερμοκρασίας το έλασμα (αρά και τα απόβλητα) έγινε πιο όλκιμο. Σημειώνουμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα απόβλητα ήταν έντονα στην περιοχή όπου σημειώθηκαν οι ρωγμές. Θα ήταν δύσκολο να αποφανθούμε σχετικά με τη μείωση του πραγματικού βάθους των αυλακώσεων που δημιουργήθηκαν σε αυτήν την περίπτωση. Παρόλα αυτά, μπορούμε να πούμε ότι η ποιότητα της επιφάνειας είναι σαφώς καλύτερη, καθώς έπαψε να υπάρχει συμβολή στις ταλαντώσεις των αυλακώσεων. Ιδιαίτερα έντονη ήταν η βελτίωση στην κάτω πλευρά του ελάσματος (εικόνα 6-3).

Πρέπει να αναφερθεί ότι η ποιότητα της κάτω πλευράς στο τέταρτο πείραμα (5082H111 r5mm S=50grm) δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στην κάτω επιφάνεια. Οπότε, αυτή η βελτίωση συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής και όχι με το γεγονός ότι, λόγω της έντονης κάμψης και της μερικής κατάρρευσης διατομών, η δύναμη μειώθηκε.



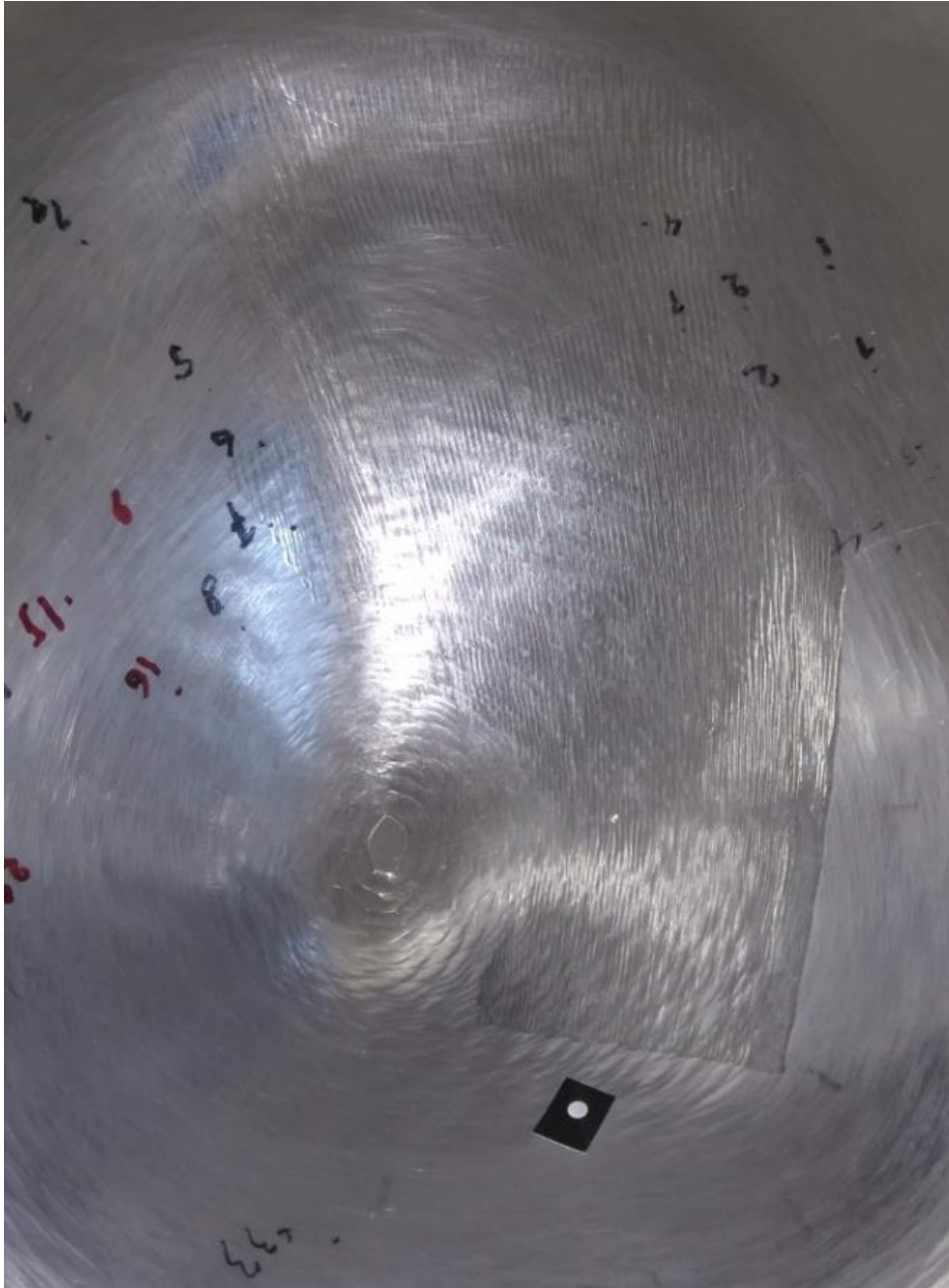
Εικόνα 6-3 Κάτω πλευρά τεμαχείου (πείραμα 5)



Εικόνα 6-4 Κάτω πλευρά τεμαχείου (πείραμα 3)

Επίσης, παρατηρούμε δυο περιοχές με ιδιαίτερα έντονο το πρόβλημα:

- Οι περιοχές που κατεργαστήκαν πρώτες και όπου η κλίση των τοιχωμάτων ήταν μικρή. Το πρόβλημα οφείλεται στο ότι, λόγω σταθερού step down, η περιοχή καλύπτονταν από λίγα “περάσματα” του εργαλείου.
- Περιοχές που κατεργάστηκαν και με “παράλληλη κίνηση” του εργαλείου όπου πάλι η κλίση των τοιχωμάτων ήταν μικρή. Παρόλα αυτά, η απόσταση αναμεσα στα διαδοχικά περάσματα του εργαλείου ήταν ικανοποιητική. Η τόσο μεγάλη υποβάθμιση της επιφάνειας φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με άλλες βιβλιογραφικές αναφορές [15].



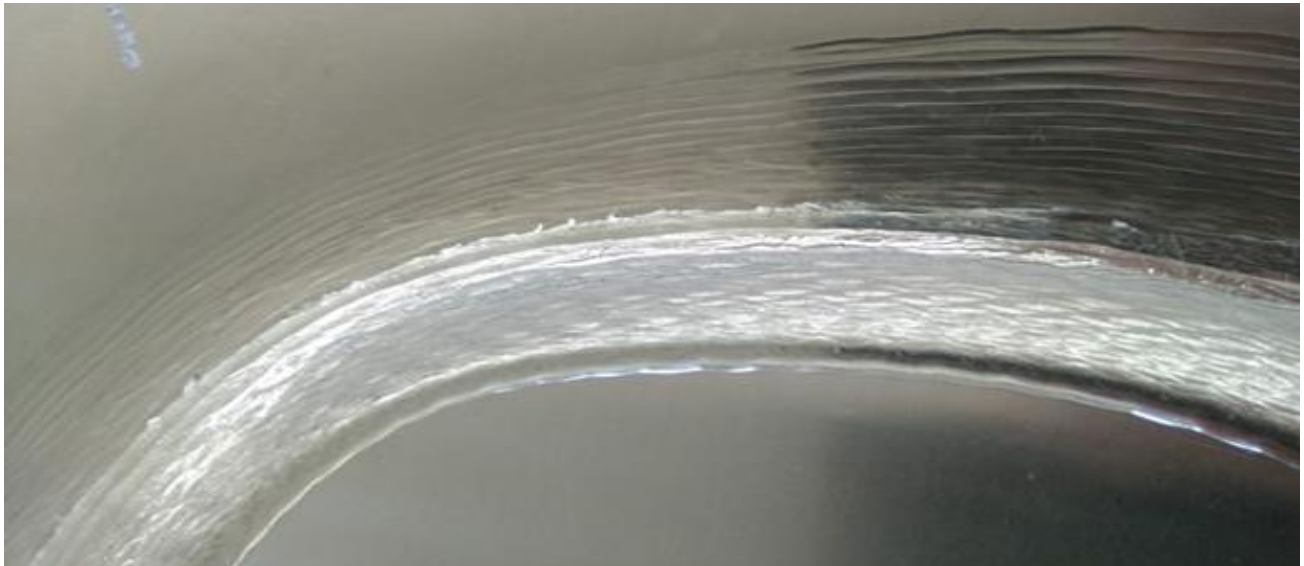
Εικόνα 6-5 Εσωτερική πλευρά κοιλότητας
(5083H111)

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση της παράλληλης κίνησης του εργαλείου (περιοχή πτερυγίου) η δύναμη που ασκούνταν από το εργαλείο και επομένως και οι παραμορφώσεις των ελασμάτων ήταν σχετικά μικρές. Αναφέρεται ότι βάσει της προσομοίωσης στο έλασμα 60820 η μέση δύναμη στο εργαλείο κατά την παράλληλη κίνηση του εργαλείου ήταν 500N ενώ κατά την σπειροειδή κίνηση του εργαλείου η μέση δύναμη ήταν περίπου 1500N (κεφάλαιο 4.1.1). Παρόλα αυτά, δεν μπορούμε να οδηγηθούμε σε κάποια αιτιολόγηση από μηχανικής άποψης αυτού του φαινομένου. Παράλληλα, παρατηρούμε έντονο κυματισμό των αυλακώσεων στις περιπτώσεις με χαμηλή ταχύτητα

περιστροφής του εργαλείου. Επίσης, αναφέρουμε ότι υπήρχε ασυνέχεια στο “τοίχωμα” που δημιουργούνταν εσωτερικά από το εργαλείο (εικόνα 6-7). Αυτό το γεγονός φαίνεται να σχετίζεται με τις ταλαντώσεις στην επιφάνεια καθώς τα διαδοχικά περάσματα θα προκαλούσαν αυτές τις ατέλειες σε διαφορετικά σημεία. Στην περίπτωση του περιστρεφόμενου εργαλείου με μεγάλη ταχύτητα, η περίοδος των ταλαντώσεων αυξήθηκε σε μεγάλο βαθμό, ενώ μειώθηκε επίσης σε πολύ μεγάλο βαθμό το πλάτος τους. Η ύπαρξη κυματώσεων στην περίπτωση αυτή μπορεί να οφείλεται και στην αδυναμία απομάκρυνσης των αποβλήτων ή σε άλλους παράγοντες. Η ύπαρξη των ταλαντώσεων στην περίπτωση της χαμηλής περιστροφικής ταχύτητας μπορεί να οφείλεται σε φαινόμενα stick and slip του εργαλείου ή, και, στην συσσώρευση πλαστικοποιημένου υλικού στην περιοχή μπροστά από το εργαλείο (εικόνα 5-2). Η γρήγορη ταχύτητα αναμεσα στο εργαλείο και αυτήν την περιοχή μπορεί να επιδρά θετικά στην απομάκρυνση αυτού του συσσωρευμένου υλικού.



Εικόνα 6-6 Εργαλεία ακτίνας 5mm και 7mm όπου διακρίνονται τα στίγματα από την επαφή



Εικόνα 6-7 Λεπτομέρεια από την επιφάνεια (Πείραμα 4)

6.2 Διαστατική ακρίβεια

Ως επιφάνεια αναφοράς θεωρούμε την επιφάνεια στο εσωτερικό της κοιλότητας (επάνω επιφάνεια). Για όλες τις συγκρίσεις επιφανειών (αρχείο cad, αρχείο προσομοίωσης, και αρχείο scann) θα χρησιμοποιείται αυτή η επιφάνεια.

Για την μέτρηση της διαστατικής ακρίβειας των τεμαχίων, αρχικά, αποτυπώθηκαν με scanner λευκού φωτός (ICAM M300) οι επιφάνειες τους.

6.2.1 Σύγκριση κατεργασμένου τεμαχίου με ιδεατή γεωμετρία

Αρχικά, εισήχθησαν σε πρόγραμμα cad-3dscan (Geomagic) τα αρχεία που προέκυπταν από το 3dscanning (.ply). Τα αρχεία αυτά είχαν κοινό σύστημα αναφοράς. Ύστερα από επεξεργασία, ενοποιήθηκαν τα πολύγωνα σε δυο (ένα για κάθε επιφάνεια), μειώθηκε ο θόρυβος και προεκβλήθησαν τα πολύγωνα σε περιοχές της επιφάνειας όπου η πληροφορία ήταν φτωχή.

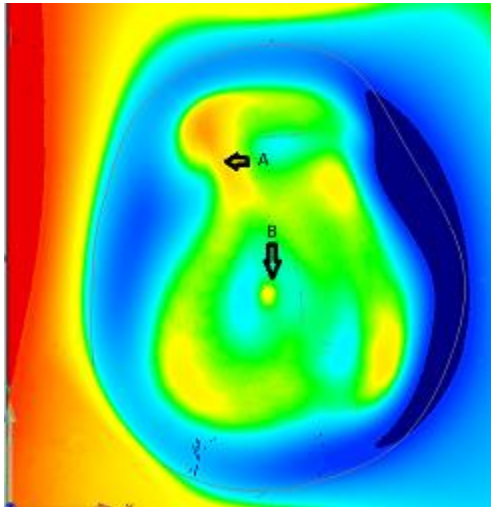
Ευθυγράμμιση της γεωμετρίας cad με την πραγματική γεωμετρία σε κοινό σύστημα αναφοράς

Αρχικά, για την δημιουργία συστήματος αναφοράς στο κατεργαζόμενο τεμάχιο επιλέχτηκε να δημιουργηθεί πλήθος οπών στο έλασμα με γνώστη θέση, στο σύστημα αναφοράς που γίνονταν η κατεργασία. Οι οπές αυτές θα αναγνωρίζονταν από το σχετικό πρόγραμμα ως κύκλοι (πράσινα σημεία Εικόνα 6-2) οι οποίοι θα είχαν γνωστή θέση xy. Για το προσδιορισμό του επιπέδου Z θα χρησιμοποιούνταν έντονα σημάδια που προέκυπταν από τους πλαστικούς αρμούς (κόκκινα βέλη Εικόνα 6-2). Παρόλα αυτά, υπήρχε αδυναμία να προσδιοριστεί το z=0 πριν την έναρξη της κατεργασίας (setup-μηδενισμός του εργαλείου) λόγω “χαλαρότητας” του ελάσματος. Επιπλέον, υπήρξε έντονη παραμόρφωση από την απελευθέρωση εσωτερικών δυνάμεων στις μη κατεργασμένες περιοχές (springback). Λόγω των παραπάνω και της σχετικά καλής διαστατικής ακριβείας επιλέχτηκε να τοποθετηθεί η πραγματική γεωμετρία σε σχέση με την γεωμετρία cad βάσει ανάλυσης ελαχιστοποίησης της απόκλισης (best fit analysis). Η ανάλυση best fit γίνεται βάσει υπολογισμού μέσης τιμής της απόκλισης με ελάχιστα τετράγωνα (rms), η οποία είναι γνωστό ότι επιβαρύνει υπέρμετρα τις μεγάλες αποκλίσεις. Μεγάλες αποκλίσεις προκύπταν σε τρεις περιοχές (Εικόνες 6-8, 6-10, 6-11, 6-12):

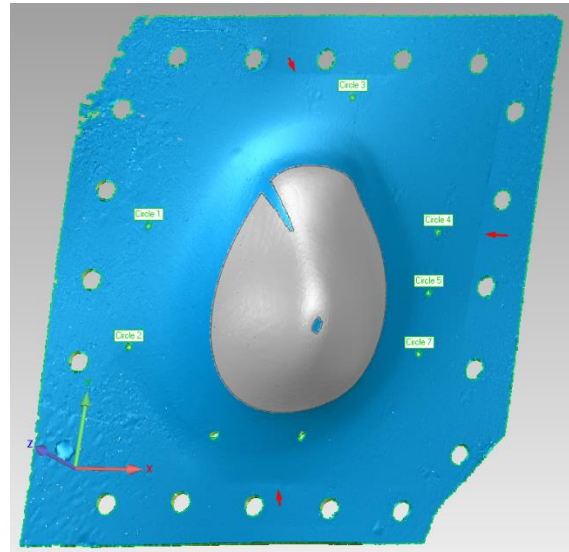
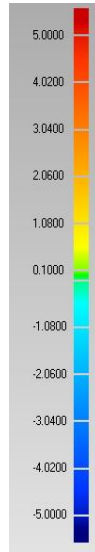
- ❖ Περιοχή με έντονη καμπυλότητα και δημιουργία σαγματικού σημείου κοντά σε ακμή του πτερυγίου (Εικόνα 6-8 A)
- ❖ Μικρή περιοχή κοντά στο κέντρο του κυκλίου η οποία δεν κατεργάστηκε και δεν αποτελεί περιοχή ενδιαφέροντος (Εικόνα 6-8 B)
- ❖ Περιοχές που δημιουργήθηκαν στην αρχή της κατεργασίας ενώ η δύναμη ήταν σχετικά χαμηλή, οι παραμορφώσεις μικρές και η καμπυλότητα μεγάλη (περεταίρω ανάλυση στην ενότητα 5.3.4)
- ❖ Περιοχές εκτός της κοιλότητας (Εικόνα 6-8)

Αναφέρεται ότι η διαφοροποίηση των δυο ευθυγραμμίσεων ήταν σχετικά μικρή (μικρότερη του 0,35mm στα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν ως features). Παρόλα αυτά, ήταν σημαντική ως ποσοστό της απόκλισης των δυο επιφανειών.

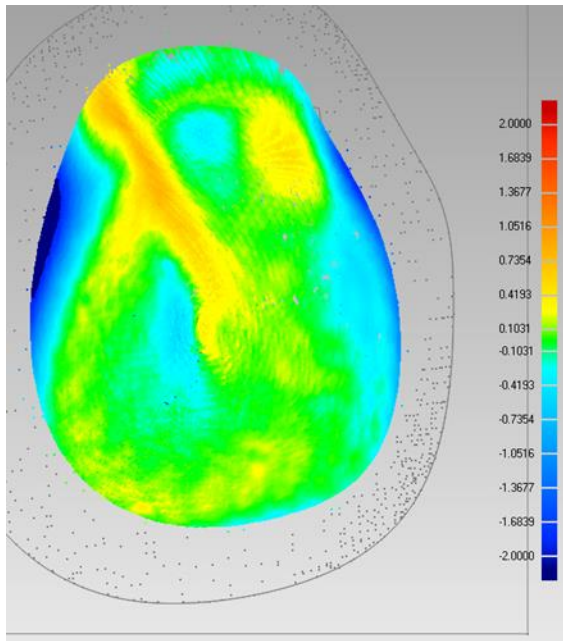
Παράθεση των plot



Εικόνα 6-8 Απόκλιση της παραγόμενης επιφάνειας (αρχείο scann) από την ιδεατή (αρχείο cad).5082H111

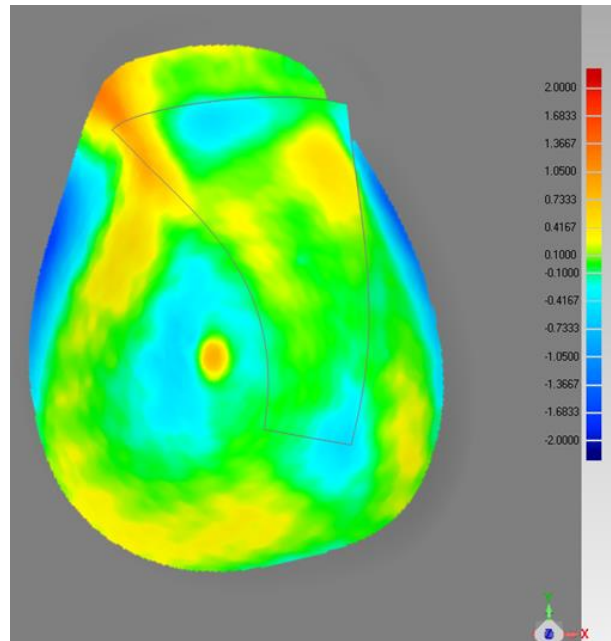


Εικόνα 6-9 Περιοχή που χρησιμοποιήθηκε για την ευθυγράμμιση των αρχείων (γκρι χρώμα) σε σχέση με την συνολική (.5082H111)



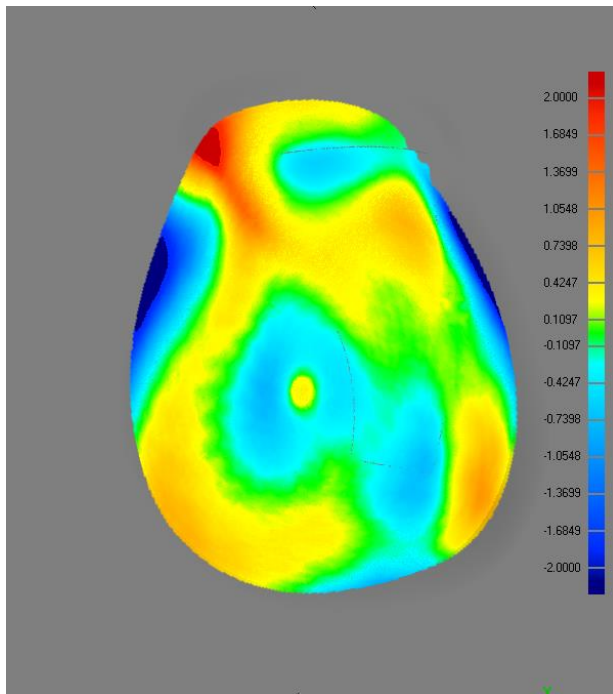
Εικόνα 6-10 Απόκλιση γεωμετρίας στο έλασμα AA 10500

Απόκλιση rms =0.3904



Εικόνα 6-11 Απόκλιση γεωμετρίας στο έλασμα AA 60820

Απόκλιση rms =0.288



Εικόνα 6-12 Απόκλιση γεωμετρίας στο έλασμα AA5083H111

Απόκλιση rms =0.559

6.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαστατική ακρίβεια

6.3.1 Τάση διαρροής

Η αύξηση της τάσης διαρροής οδηγεί σε αύξηση της ελαστικής περιοχής και της ελαστικής επαναφοράς. Επιπλέον, οι μεγαλύτερες εσωτερικές τάσεις, όταν απελευθερωθούν, θα οδηγήσουν σε μεταβολή της γεωμετρίας. Η τάση διαρροής εξαρτάται τόσο από την αρχική τάση διαρροής όσο και από την κράτυνση. Στην περίπτωση του έντονα κρατυνόμενου υλικού, η περιοχή η οποία απαιτείται για να “σταθεροποιηθεί” η κατεργασία αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη. Έτσι το πρόβλημα που παρατηρείται κοντά στα άκρα της κοιλότητας θα είναι πολύ πιο έντονο. Το πρόβλημα αυτό αναμένεται να παρουσιαστεί και σε άλλες περιοχές οι οποίες έχουν μικρότερες παραμορφώσεις από γειτονικές περιοχές που κατεργαστήκαν στην συνέχεια. Ως έντονα κρατυνόμενα υλικά μπορούμε να θεωρήσουμε και τα τρία κράματα. Παρόλα αυτά, το AA1050 έχει χαμηλή τάση διαρροής ακόμα και όταν έχει υποστεί έντονες παραμορφώσεις (UTS 76MPa). Οπότε το πρόβλημα αυτό δεν είναι τόσο έντονο στην περίπτωση του.

6.3.2 Ενδοτικότητα εργαλείου-βάσης

Η ενδοτικότητα του εργαλείου και της βάσης στήριξης αναμένεται να οδηγήσει σε μικρότερες παραμορφώσεις στην κοιλότητα. Ο παράγοντας αυτός θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 7.2

6.3.3 Υπόθεση για την επίδραση της μεταβολής στην καμπυλότητα των διατομών

Παρακάτω ακολουθεί μια υπόθεση για τον τρόπο που μεταβάλλεται η γεωμετρία μακριά από το σημείο επαφής. Αυτές οι μεταβολές οδηγούν σε αποκλίσεις αναμεσα στην επιθυμητή γεωμετρία και την παραγομένη. Οι μεταβολές αυτές φαίνεται να είναι ιδιαίτερα έντονες κατά την “ακτινική” διεύθυνση.



Εικόνα 6-13 Μεταβολή στην κοίλη γεωμετρία



Εικόνα 6-14 Μεταβολή στην κυρτή γεωμετρία

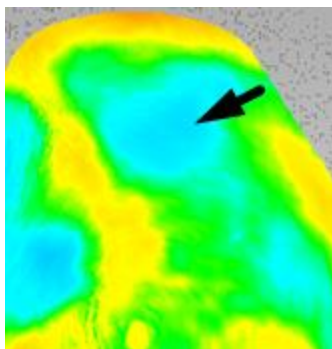
Όταν το εργαλείο θα βρίσκεται σε λίγο χαμηλότερο σημείο αναμένεται να δημιουργηθούν εφελκυστικές δυνάμεις που θα οδηγήσουν στην μείωση της καμπυλότητας. Συνεπώς αναμένεται σημεία σε κοίλη περιοχή κατά την ακτινική διεύθυνση να βρεθούν σε χαμηλότερη θέση (εικόνα 6-13),

ενώ σημεία σε κυρτή περιοχή να βρεθούν σε υψηλότερη θέση (εικόνα 6-14). Μετά την αφαίρεση της δύναμης από την περιοχή που ασκούνταν μπορεί οι περιοχές μακριά από την επαφή να επανέλθουν. Παρόλα αυτά, βάσει του παραπάνω μηχανισμού, η στιβαρότητα του ελάσματος αναμένεται να έχει μειωθεί, οπότε η μετατόπιση που επιβάλλει το εργαλείο στην περιοχή δεν θα προκύψει από την παραμόρφωση της, αλλά από αυτήν την μετατόπιση η όποια μπορεί να είναι ελαστική.

Η παραμόρφωση αυτή δεν φαίνεται να εξαρτάται αυστηρά από το αν η περιοχή αυτή είναι κυρτή ή κοίλη, αλλά από την σχετική θέση του εργαλείου σε σχέση με την περιοχή.

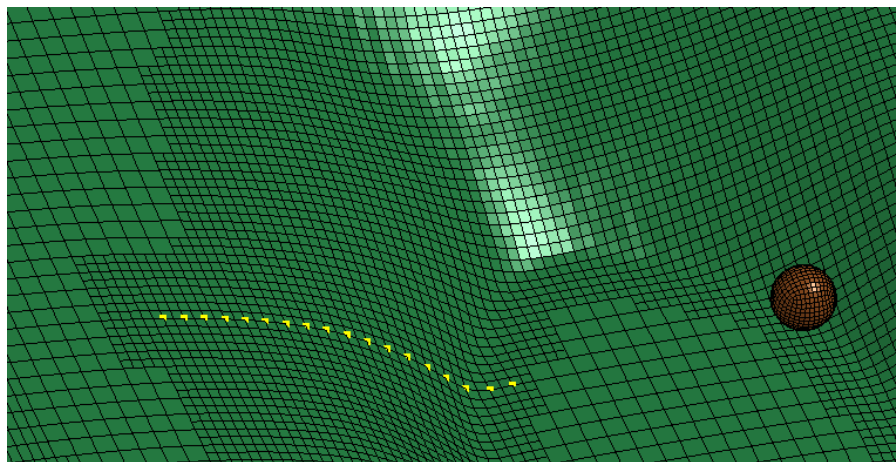
Η μεταβολή αυτή μπορούμε συνεπώς να πούμε ότι σχετίζεται με την καμπυλότητα των περιοχών, καθώς και την μεταβολή της δύναμης που ασκείται από το εργαλείο και την μεταβολή της τάσης διαρροής στις διάφορες περιοχές. Συνεπώς, δεν μπορούμε να πούμε αυστηρά ποιές περιοχές θα παρουσιάσουν πιο έντονα αυτό το πρόβλημα και σε ποιο βαθμό. Πάντως, η απόκλιση στην ιδεατή γεωμετρία και την κατασκευασμένη παρουσιάζει εξάρτηση βάσει των μεταβολών στις "ακτινικές" διατομές. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να προβλεφθούν σε ένα ικανοποιητικό βαθμό από την προσομοίωση.

Ως τέτοιο πρόβλημα ακρίβειας μπορεί να θεωρηθεί και η συστηματικά μεγαλύτερη παραμόρφωση που προκύπτει στην περιοχή της επάνω ακμής του πτερυγίου(εικόνα 6-15) . Παρόλα αυτά, υπήρχε συστηματική αδυναμία πρόβλεψής της από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

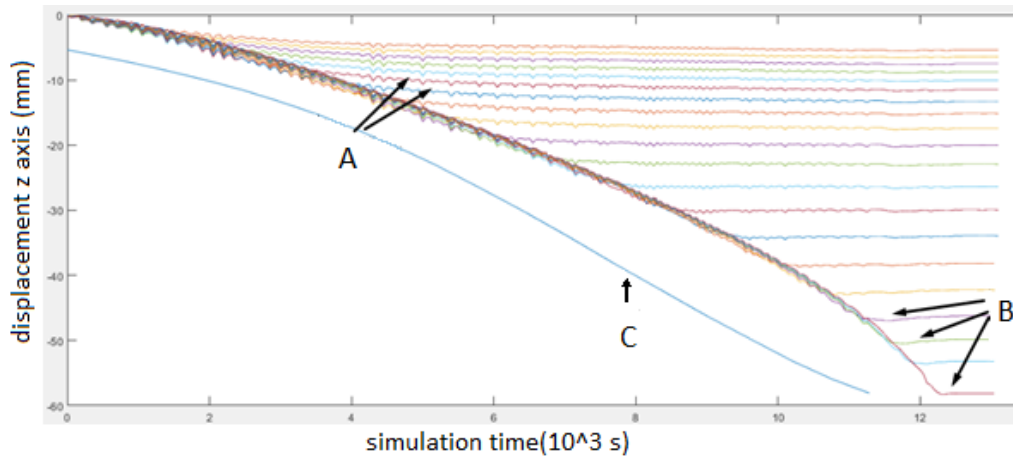


Εικόνα 6-15 Λεπτομερεια απο την αποκλιση της προσομοιωσης (60820)

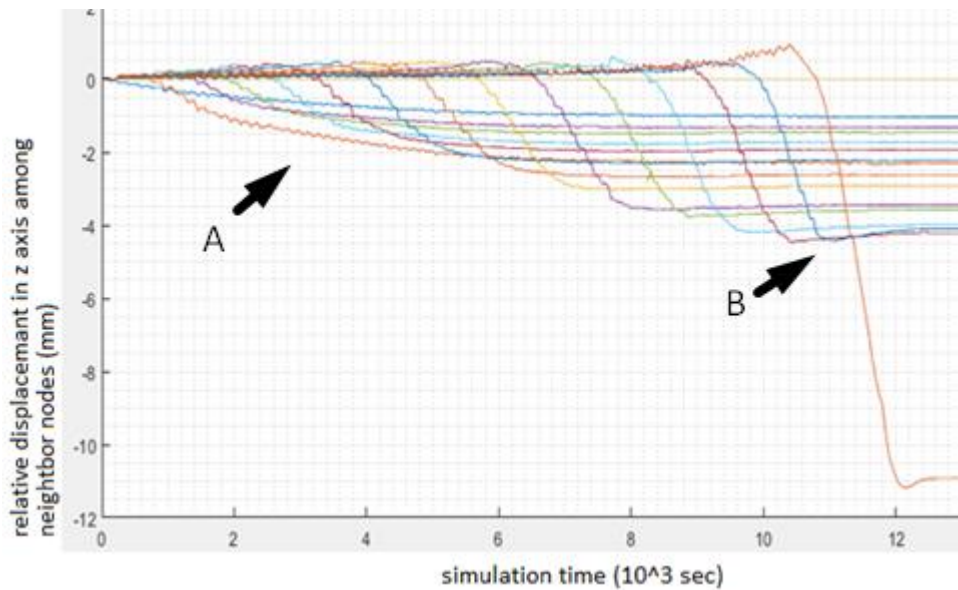
Τα παρακάτω διαγράμματα προκύπτουν από την προσομοίωση και σκοπό έχουν την κατανόηση της μεταβολής της γεωμετρίας κατά την διάρκεια της κατεργασίας.



Εικόνα 6-16 Κόμβοι για τους οποίους έγιναν τα διαγράμματα

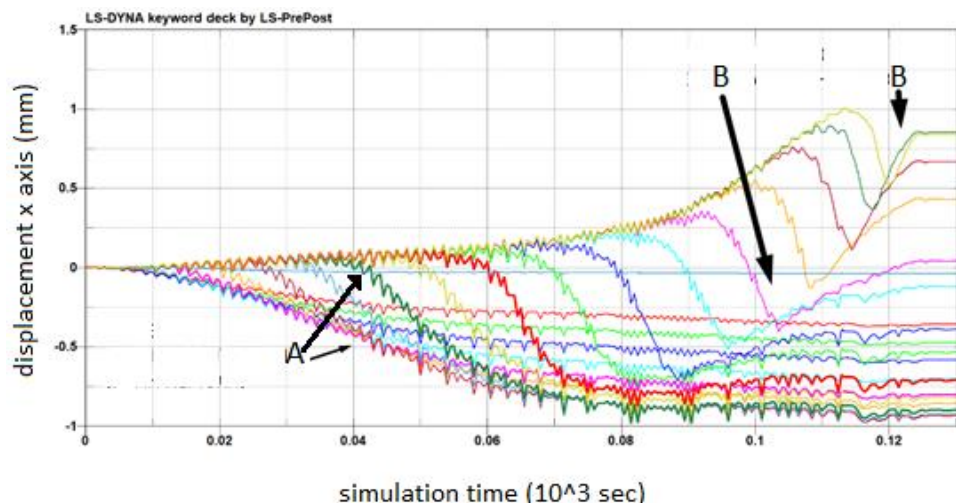


Εικόνα 6-17 Μεταβολή κάθετης στο έλασμα μετατόπισης σε κόμβους συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 6-18 Διαφορά της κάθετης μετατόπισης (Z) των κόμβων από τον προηγούμενο κόμβο

Η διαφορά της κάθετης μετατόπισης ανάμεσα στους κόμβους ουσιαστικά δηλώνει την μετατόπιση του κόμβου λόγω της παραμόρφωσης της περιοχή στην οποία βρίσκεται. Η μεταβολή των μετατοπίσεων μετά το πέρας του εργαλείου, καθώς, και η περίοδος κατά την οποία το εργαλείο ήταν στην περιοχή των κόμβων είναι πιο εμφανή.



Εικόνα 6-19 Μετατόπιση κατά την διεύθυνση που αποτελεί τομή του εγκάρσιου ως προς το εργαλείο επίπεδο με το επίπεδο της διατομής (“Ακτινικά” της κοιλότητας)

Σχόλια για τα διαγράμματα

A: Κόμβοι οι οποίοι παραμορφώνονται αρχικά και βρίσκονται σε έντονα κοίλη περιοχή τείνουν να παραμορφώνονται και μετά το πέρας του εργαλείου.

B: Κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται σε κυρτή περιοχή τείνουν να μειώνουν την μετατόπιση τους μετά το πέρας του εργαλείου

C: Διατομή του ελάσματος από την οποία προέρχονται οι κόμβοι

Η υπόθεση περί κυρτών και κοίλων περιοχών που εφελκύνεται επιβεβαιώνεται και από την “ακτινική” κίνηση των κόμβων. Παρατηρούμε απότομη μεταβολή της μετατόπισης που συμβαίνει την περίοδο κατά την οποία το εργαλείο βρίσκεται στην περιοχή των κόμβων. Μετά από την μεταβολή αυτή, οι κόμβοι στην κοίλη περιοχή συνεχίζουν να μετατοπίζονται κατά την αρνητική διεύθυνση για ένα διάστημα, ενώ οι κόμβοι που βρίσκονται σε κυρτές περιοχές μετατοπίζονται κατά την θετική διεύθυνση.

6.3.4 Περιοχές κοντά στα άκρα της κοιλότητας

Οι περιοχές που δημιουργήθηκαν στην αρχή της κατεργασίας ενώ η δύναμη ήταν σχετικά χαμηλή και οι παραμορφώσεις μικρές παρουσιάζουν έντονες αποκλίσεις. Οι κύριοι παράγοντες που φαίνεται να συμβάλλουν σε αυτές τις αποκλίσεις είναι:

- Η μεγάλη καμπυλότητά τους. Ο παράγοντας αυτός αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο παράγοντας αυτός αναμένεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις.
- Οι μικρές παραμορφώσεις είχαν ως αποτέλεσμα το υλικό στην περιοχή αυτή να διαρρέει σε μικρότερη τάση σε σχέση με τις περιοχές με μεγαλύτερη παραμόρφωση λόγω κράτυνσης. Έτσι, η περιοχή αυτή συνέχισε να παραμορφώνεται και όταν το εργαλείο ήταν σε κάποια απόσταση από την περιοχή αυτή, αλλά η δύναμη είχε αυξηθεί, με αποτέλεσμα να διαρρέει περιοδικά για ένα μικρό ακόμα διάστημα. Αυτός ο μηχανισμός αναμένεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις του χειλούς.

- Η έντονη συμβολή στην παραμόρφωση από ελαστικές δυνάμεις (οι οποίες όταν αφαιρέθηκαν οδήγησαν στην επαναφορά της περιοχής). Ο παραπάνω παράγοντας αναμένεται να οδηγήσει σε μικρότερες παραμορφώσεις.

Είναι εμφανή η μεγαλύτερη επίδραση των δυο πρώτων μηχανισμών σε σχέση με τον τελευταίο, καθώς στην περιοχή η αξονική ως προς το εργαλείο μετατόπιση της επιφάνειας ήταν μεγαλύτερη.

Επίσης, μπορούν να γίνουν οι παραπάνω παρατηρήσεις που αφορούν τα διαγράμματα της προηγούμενης ενότητας :

- οι κόμβοι με την μικρότερη τελική μετατόπιση, αυτοί δηλαδή που βρίσκονται στα άκρα της κοιλότητας, παραμορφώνονται σημαντικά για μεγαλύτερο διάστημα. Ανάλογη μεταβολή έχουμε και σε εντατικά μεγέθη, όπως η ισοδύναμη τάση στην περιοχή και η ισοδύναμη παραμόρφωση (εικόνες 6-17 A 6-18 A).
- Τα “peak “ που οφείλονται στην ελαστική παραμόρφωση είναι πιο έντονα στο άκρο του χείλους και σημαντικά ως ποσοστό της συνολικής μετατόπισης (εικόνες 6-17, 6-18).
- Η σχετική αύξηση του ύψους των κόμβων σε περιοχές εντός της κοιλότητας που δεν έχει διέλθει το εργαλείο οφείλεται στις θλιπτικές τάσεις της εσωτερικής περιοχής της κοιλότητας που οδηγούν στον λυγισμό της (εικόνες 6-17 6-18).

6.4 Πάχος ελάσματος

Η κατανομή του πάχους του ελάσματος αν και αποτελεί κανονικά μέρος της διασταλτικής ακρίβειας του τεμαχίου παρουσιάζεται ξεχωριστά, καθώς η κατανομή του πάχους δεν οριστική εξ'αρχής στην επιθυμητή γεωμετρία (δεν θα μπορούσε). Επιπλέον, η μέτρηση του έγινε με διαφορετική μέθοδο. Γι' αυτό παρουσιάζεται ξεχωριστά.

Το πάχος του κατεργασμένου τεμαχίου αν και αρχικά επιχειρήθηκε να υπολογιστεί βάσει της γεωμετρίας που παρήχθει από το scanner, τελικά διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα ότι η ακρίβεια των μετρήσεων δεν ήταν ικανοποιητική (περίπου 0.15mm). Για αυτό τον λόγο μετρήθηκε το πάχος των κατεργασμένων ελασμάτων σε ένα πλήθος σημείων (περίπου 50 ανά τεμάχιο) με ακουστική μέθοδο. Το πλήθος των σημείων κρίνεται ικανοποιητικό, καθώς η μεταβολή του πάχους ήταν ομαλή. Επίσης, ελήφθησαν δειγματικά επιπλέον μετρήσεις πάχους, οι τιμές των οποίων είναι εξαιρετικά κοντά στην παρεμβολή του ανάμεσα στα προϋπάρχουν σημεία. Παρότι η επιφάνεια στην οποία γίνονταν οι μετρήσεις ήταν καμπύλη και με σχετικά φτωχή ποιότητα επιφάνειας, οι μετρήσεις του πάχους πρέπει να θεωρούνται αξιόπιστες με ακρίβεια τουλάχιστον τριών σημαντικών ψηφίων, καθώς επιβεβαιώθηκαν και από περιορισμένες μετρήσεις με μικρόμετρο όπου αυτό ήταν εφικτό. Η απόκλιση ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα είναι περιορισμένη. Αν και δεν ξέρουμε την ακριβή αντιστοίχιση

ανάμεσα στα σημεία που έγιναν οι μετρήσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα σημεία της προσομοίωσης φαίνεται να υπάρχει απόκλιση ανάμεσα στα δεδομένα μικρότερη του 0,07mm. Για αυτό το λόγο, είναι δύσκολο να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις αποκλίσεις του πάχους, αν δεν γίνει ακριβής αντιστοίχιση των σημείων. Παρόλα αυτά, τα σημεία, οι μετρήσεις του πάχους σε αυτά και εικόνες με την θέση τους στα τεμάχια 60820 και 5083H111(R=7mm) παρατίθενται στο κεφάλαιο 10-1.

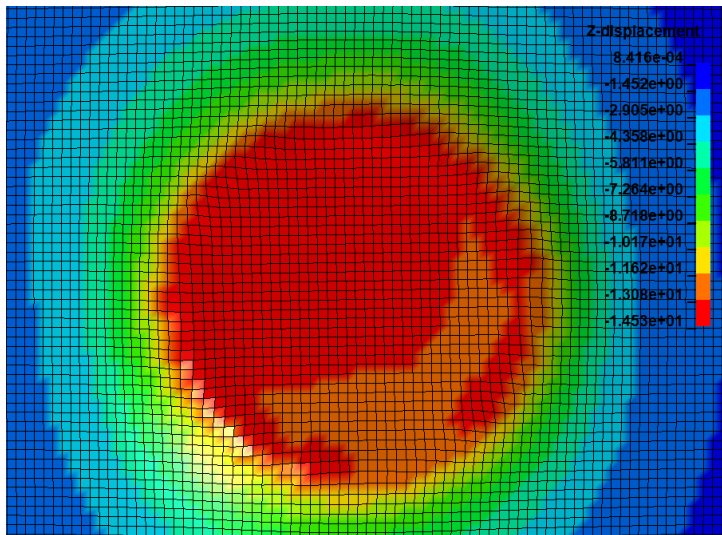
6.5 Παρατηρήσεις επί της προσομοίωσης

6.5.1 Διαφορετικός προσανατολισμός στοιχείων ως προς την τροχία του εργαλείου

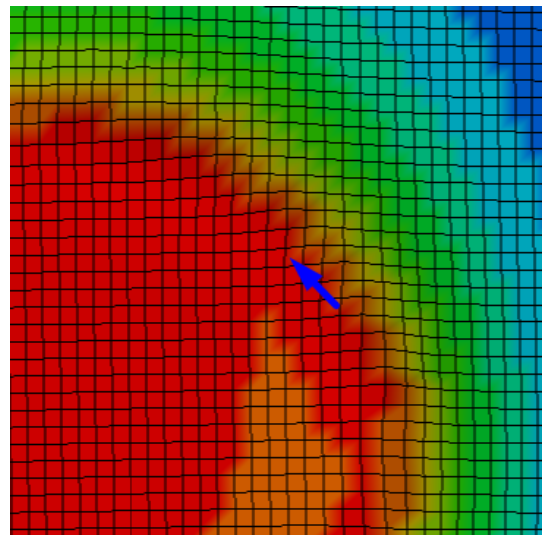
Είναι εμφανές ότι η τροχία του εργαλείου δεν χαρακτηρίζεται από κάποια συμμετρία ως προς το έλασμα. Για τον λόγο αυτό, δεν ήταν δυνατό να δημιουργηθεί πλέγμα που να έχει κάποια συμμετρία ως προς την διεύθυνση κίνησης του εργαλείου. Οι ακμές των στοιχείων έχουν δηλαδή διαφορετικό προσανατολισμό ως προς την κίνηση του εργαλείου. Ο προσανατολισμός αυτός ποικίλει από 0° έως 45°. Οι διάφορες στα αποτελέσματα βάσει του προσανατολισμού των στοιχείων οφείλονται σε δυο κυρίως λόγους:

- Τα στοιχεία Belytchko –Tsay που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν έντονα warpage[62]. Το πρόβλημα αυτό γίνεται πιο έντονο όσο μεγαλώνει η σχετική γωνιά των ακμών με την τροχία του εργαλείου. Το πρόβλημα αυτό οδηγεί στο να μην αναγνωρίζεται σωστά η κατεύθυνση στην οποία κάμπτεται το στοιχείο. Άλλοι τύποι στοιχείων όπου οι ολοκλήρωση γίνεται σε περισσότερους κόμβους δεν παρουσιάζουν αυτό το πρόβλημα, αλλά είναι υπολογιστικά περισσότερο απαιτητικοί. Το πρόβλημα αυτό περιορίζεται σημαντικά με την χρήση μικρότερων στοιχείων.(εικόνα 6-20)
- Η απόδοση της γεωμετρίας της επαφής εξαρτάται από το μέγεθος των στοιχείων στην ακτινική διεύθυνση της επαφής και κατατα στην τροχία του εργαλείου. Επιπλέον, τα εντατικά μεγέθη διαφοροποιούνται έντονα κοντά στην περιοχή της επαφής. Πολλά από αυτά τα μεγέθη αντιπροσωπεύονται με μια τιμή στο κάθε στοιχείο. Έτσι, λόγω μη γραμμικότητας της μεταβολής των μεγεθών αυτών, οδηγούμαστε σε διαφορετικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα στην εικόνα 6-23, οι πλαστικές παραμορφώσεις διαφοροποιούνται ακτινικά ως προς τους κύκλους που διαγράφει το εργαλείο. Παρόλα αυτά, στην περιοχή A, η μεταβολή γίνεται ανά 1,8mm, ενώ στην περιοχή B ανα 2,7mm.

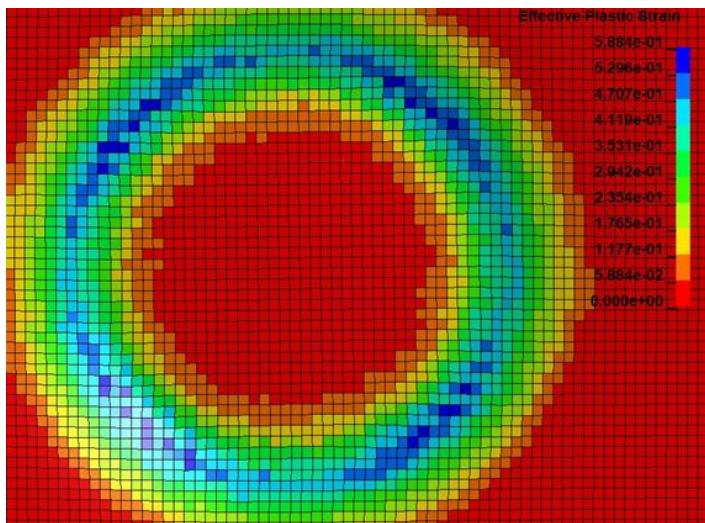
Το πρόβλημα αυτό μελετήθηκε και έγινε αντιληπτό σε ένα βαθμό σε προσομοιώσεις όπου το πρόβλημα ήταν σχεδόν ακτινικά συμμετρικό και τα στοιχεία είχαν αρχική γεωμετρία τετράγωνη, με πλέγμα δηλαδή παρόμοιο με της προσομοίωσης. Το υλικό είναι ομογενοποιημένο και αντιστοιχεί σε έλασμα AA6061O (παρόμοιο με το AA6082O). Η ιδεατή γεωμετρία αντιστοιχεί σε κούρσο κώνο. Θεωρητικά οι μόνοι λόγοι που το πρόβλημα δεν είναι συμμετρικό είναι λόγω σπειροειδής τροχιάς και οκταγωνικού σχήματος πάκτωσης. Παρόλα αυτά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο κύκλος δεν αποδίδεται ακριβώς. Περιοχές όπου οι ακμές των στοιχείων είναι σε γωνιά 45° ως προς την ακτινική διεύθυνση φαίνεται να παρουσιάζουν μικρότερη καμπυλότητα από τις υπόλοιπες και να βρίσκονται σχετικά υψηλότερα (εικόνες 6-20, 6-21).



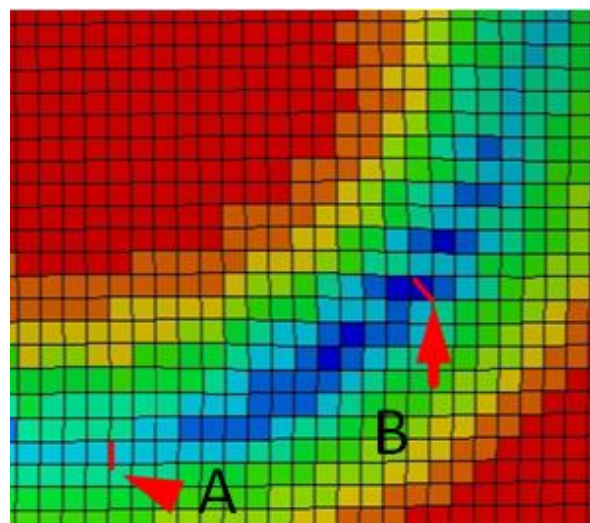
Εικόνα 6-20 Μεταβολή βάθους



Εικόνα 6-21 Παρουσία warping κατεύθυνση καμψης



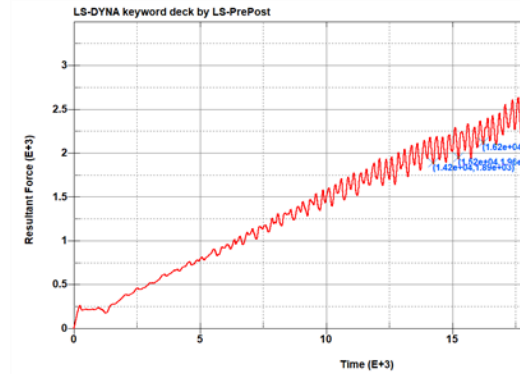
Εικόνα 6-22 Μεταβολή της πλαστικής παραμόρφωσης ανάλογα με την σχετική γωνία των ακμών ως προς την ακτίνα



Εικόνα 6-23 Λεπτομέρεια της πλαστικής παραμόρφωσης

Μεταβολή δύναμης κατά την προσομοίωση

Παρατηρήθηκε επίσης διακύμανση των δυνάμεων ανάλογα με την θέση του εργαλείου. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αύξηση των δυνάμεων όταν το εργαλείο διέρχονταν παράλληλα στις ακμές των στοιχείων σε σχέση με όταν διέρχονταν σε μεγαλύτερη σχετική γωνία από αυτές. (Εικόνα 6-24) Η συμπεριφορά αυτή είναι δύσκολο να αποδοθεί κάπου πάντως συμβάλλει στο γεγονός ότι η συμπεριφορά των στοιχείων διαφοροποιείται.



Εικόνα 6-24 Κατακόρυφη στο έλασμα δύναμη

6.5.2 Συνοριακές συνθήκες – Επαφή

Όπως αναφέραμε ήδη η στήριξη του ελάσματος προσομοιάστηκε με πάκτωση και το εργαλείο με απαραμόρφωτη σφαίρα. Παρόλα αυτά, το παραπάνω δεν είναι απόλυτα ακριβές. Ανάλυση των δυνάμεων γίνεται στο κεφάλαιο 4-1.

Στην περίπτωση της εδράσης, οι δυνάμεις ήταν αρκετά μεγάλες.

- Η βάση έχει σημαντική ενδοτικότητα. Σε προσομοιώσεις της βάσης, η μετατόπιση ήταν της τάξεως του 0,5mm.
- Μπορεί να υπήρξε ολίσθηση του ελάσματος σε σχέση με την βάση. Σε contact analysis, η σχετική μετατόπιση ήταν 0,08mm. Η ανάλυση αυτή λάμβανε υπόψη την μεγάλη έλλειψη παραλληλότητας των επιπέδων της στήριξης, δεν ήταν δυνατό ωστόσο να προσομοιαστούν καλύτερα οι υπόλοιπες ατέλειες της στήριξης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε περιορισμένη ποσότητα λιπαντικού από την κατεργασία σε περιοχές που αποτελούσαν διεπιφάνεια της πάκτωσης. Οι υποψίες για προβληματική στήριξη εντείνονται λόγω ανομοιόμορφης επαναφοράς (springback) στις περιοχές της στήριξης (περιοχές εξωτερικά της κοιλότητας) και ανομοιόμορφα σημάδια από πλαστικούς αρμούς ή σημάδια διεπαφής.

Το ολοκλήρωμα των δυνάμεων στην έδραση αναμένεται να ισούται με την δύναμη που ασκείται στο εργαλείο. Παρόλα αυτά, η δύναμη αυτή είναι πολύ μικρή σε σχέση με την στιβαρότητα της βάσης και η συμβολή της στην παραμόρφωση της αγνοείται.

Στην περίπτωση του εργαλείου :

- Οι δυνάμεις που ασκούνται κάθετα στο άξονα του εργαλείου οδηγούν στην κάμψη του. Οι δυνάμεις αυτές σύμφωνα με την προσομοίωση Ls dyna οδηγούν σπάνια σε βέλος κάμψης μέχρι 0,75mm.

Πρέπει να τονιστούν όμως οι παρακάτω παράγοντες οι οποίοι περιορίζουν την επίδραση των παραπάνω:

- Οι δυνάμεις στην έδραση οι οποίες δεν κατανέμονταν σε μεγάλο βαθμό και οδηγούσαν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις ήταν στην αρχή της κατεργασίας σε περιοχές με χαμηλό ενδιαφέρον.
- Τα παραπάνω σφάλματα σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να αθροιστούν, καθώς οι δυνάμεις που τα προκαλούν είναι εξαρτημένες.

6.5.2.1 Επίδραση των παραμορφώσεων της στήριξης και του εργαλείου.

- Η ελαστική παραμόρφωση της στήριξης θα οδηγήσει σε μικρότερες παραμορφώσεις του ελάσματος, κυρίως κατά την αρχή της κατεργασίας κοντά στα άκρα της κοιλότητας. Επίσης, θα παρατηρηθούν μικρότερες παραμορφώσεις στις περιοχές εξωτερικά τις κοιλότητας.
- Η ελαστική παραμόρφωση του εργαλείου θα οδηγήσει σε μικρότερη τελική γεωμετρία. Οι τομές της επιφάνειας με επίπεδα παράλληλα στο αρχικό επίπεδο του ελάσματος, αναμένεται να είναι μικρότερες.

6.5.3 Μερική μείωση των διαστάσεων του προβλήματος

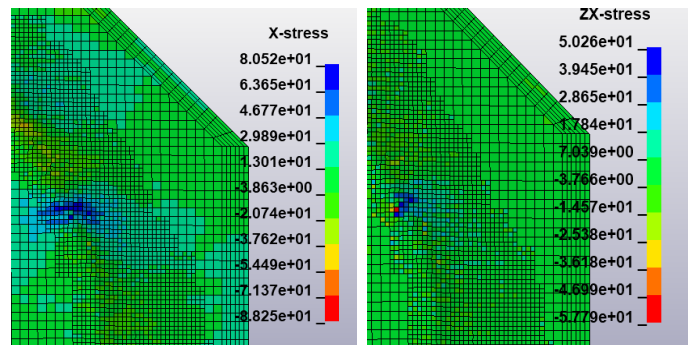
Το έλασμα αποδίδεται ως επιφάνεια. Παρόλα αυτά, η περιοχή όπου γίνεται η επαφή και η ακτίνα καμπυλότητας που παρατηρείται ανάμεσα στον πυθμένα και τα τοιχώματα του κυαθίου κατά την κατεργασία του είναι συγκρίσιμα αν όχι μικρότερα του πάχους του ελάσματος. Με την προσέγγιση αυτή δεν μπορούμε να προσομοιώσουμε συνεπώς σε ικανοποιητικό βαθμό την παραμόρφωση σε

αυτήν την περιοχή. Αδυνατούμε να προσομοιώσουμε σε ικανοποιητικό βαθμό την κατανομή των πιέσεων (γραμμική κατανομή)

και την κατανομή των διατμητικών δυνάμεων στο πάχος του ελάσματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αγνοούνται και οι παραμορφώσεις που προκαλούν. Επιπλέον, η ισοδύναμη τάση διαρροής ορίζεται μονοσήμαντα στο κάθε στοιχείο. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί επιρρέπεια του στοιχείου Belytsko-Tsay σε shear locking. Αναφέρεται ότι η σημαντικότητα της παραμόρφωσης στην περιοχή της επαφής αποτέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνών που είχαν όμως διαφορετικά αποτελέσματα. (κεφάλαιο 1-2)[6][5][4][32]

Όπως φαίνεται παρόλα αυτά από την προσομοίωση τα μεγέθη αυτά ήταν σημαντικά, ιδιαίτερα στην περιοχή της επαφής. (εικόνες 6-25 6-26)

Συνεπώς, η ύπαρξη έντονων μεταβολών κατά το πάχος και εγκάρσιων διατμητικών τάσεων επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια της προσομοίωσης.



Εικόνα 6-25 Μεση εφελκυστική τάση (Mpa)

Εικόνα 6-26 Μεση διατμητική τάση (Mpa)

6.5.4 Άλλοι παράγοντες

6.5.4.1 Παράγοντες στην επαφή

Οι κύριες αιτίες των λοιπών προβλημάτων στην επαφή μπορεί να προκύπτουν από:

- Την επιλογή **contact stiffness**. Είναι μια ομάδα παραμέτρων η οποία είναι κρίσιμη στον υπολογισμό της δύναμης που προκύπτει στην επαφή βάσει της διείδυσης της μιας επιφάνειας στην άλλη. Δεν υπάρχει τρόπος να προβλεφθεί από πριν ποιές είναι οι βέλτιστες τιμές. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι παράμετροι, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η δύναμη που ασκείται στους κόμβους για την ίδια διείδυση. Έτσι, θα είναι μικρότερη η διείδυση της μιας επιφάνειας στην άλλη. Παρόλα αυτά, η δύναμη μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την πραγματική και να οδηγήσει σε μεγαλύτερη από την πραγματική ταχύτητα και αρά και μετατόπιση των κόμβων. Επίσης, λάθος επιλογές μπορεί να οδηγήσουν σε υπερβολικό θόρυβο ή αστάθεια.
- Λόγω **διακριτοποίησης γεωμετρίας σφαιρικού άκρου**. Η γεωμετρία αν και είναι σφαιρική προκύπτει από ένα σύνολο τετράπλευρων επιφανειών. Έτσι, αυτή αναμένεται να είναι μικρότερη σε κάποιες περιοχές. Άρα και η διείδυση μεταξύ των επιφανειών να είναι επίσης μικρότερη από την πραγματική.
- **Δημιουργία αυλακώσεων**. Η δημιουργία αυλακώσεων συμβάλλει κυρίως στην αδυναμία πρόβλεψης της θραύσης, η οποία δεν παρουσιάστηκε στα πειράματα για τα οποία έγινε προσομοίωση. Παρόλα αυτά, το φαινόμενο αυτό φαίνεται να οδηγεί σε αλλαγή της γεωμετρίας της επαφής. Αναμένεται οι δυνάμεις που ασκούνται να διαφοροποιηθούν.
- **Συνθήκες τριβής**.

6.5.4.2 Άλλοι παράγοντες που απλοποιεί η προσομοίωση

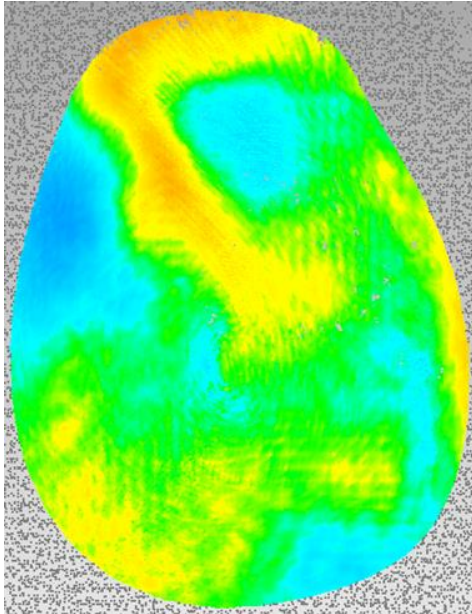
- Αλλά προβλήματα διακριτοποίησης και μη επαρκής ακριβείας των στοιχείων Belytchko-Tsay τα οποία είναι γραμμικά.
- Μη γνωστή σχέση τάσεων – παραμορφώσεων πέρα από το σημείο λαιμού στο πείραμα εφελκυσμού.
- Χρήση hourglass control και απόσβεσης (κυρίως στην επαφή).

6.5.4.3 Διαφορές πραγματικότητας προσομοίωσης

- Άγνωστο σημείο μηδενισμού πριν την κατεργασία. Όπως είπαμε ήδη δεν υπήρχε τρόπος να μηδενιστεί το εργαλείο με ακρίβεια, κυρίως στο επίπεδο Z. Αυτό μάλλον οδήγησε σε μεγαλύτερη παραμόρφωση του ελάσματος κατά την αρχή της κατεργασίας. Παρόλα αυτά, η επίδραση αυτής της σχετικής μετατόπισης φαίνεται να μειώνεται σε περιοχές σε μεγαλύτερο βάθος. Αποτέλεσμα του παραπάνω ήταν και το γεγονός ότι οι περιοχές έξω από την κοιλότητα παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση.
- Μη προσομοίωση του τμήματος του ελάσματος που συμβάλλει στην πάκτωση, μπορεί να οδηγήσει σε διάφορες στην ελαστική επαναφορά.
- Κακή διαστατική ακρίβεια της βάσης.

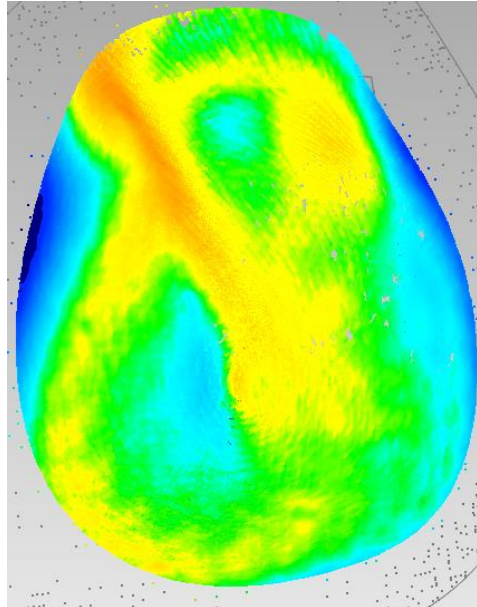
7 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος

AA10500



Απόκλιση RMS=0.275

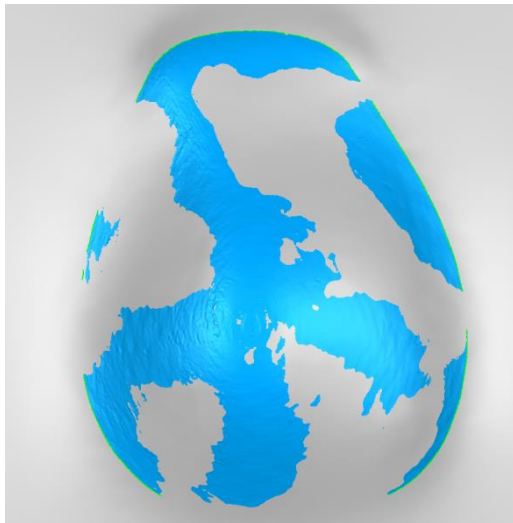
Εικόνα 7-1 Απόκλιση πραγματικής γεωμετρίας από την προσομοίωση



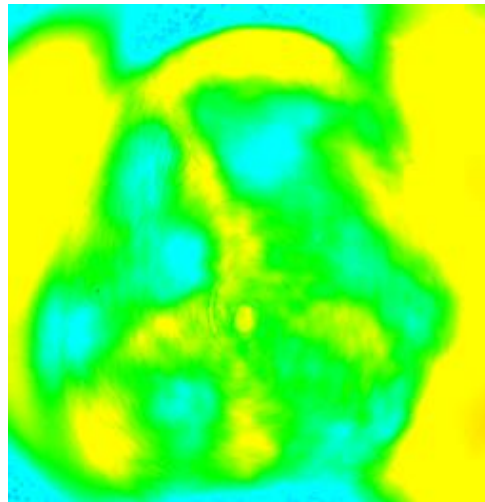
Απόκλιση RMS=0.38

Εικόνα 7-2 Απόκλιση πραγματικής γεωμετρίας από ιδεατή γεωμετρία

AA60820

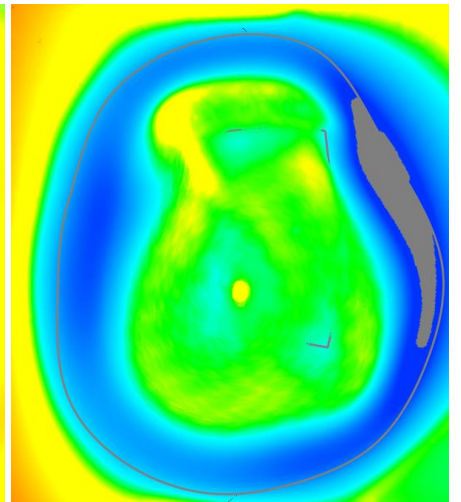


Εικόνα 7-3 Η πραγματική γεωμετρία (μπλε) σε σχέση με την γεωμετρία που προκύπτει από την προσομοίωση



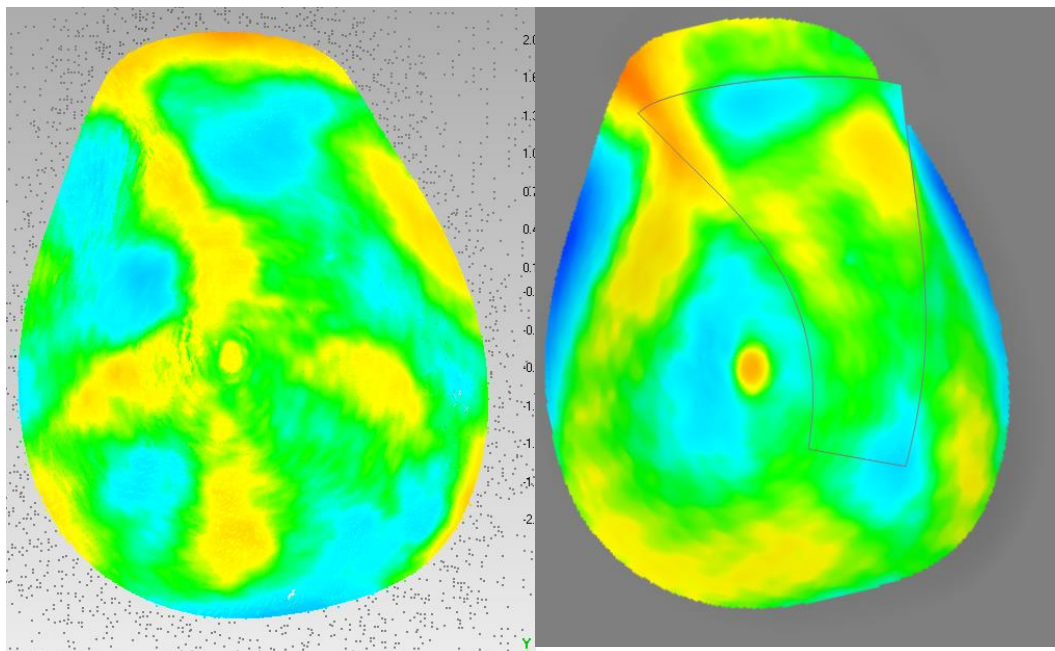
Απόκλιση RMS=0.78mm

Εικόνα 7-4 Απόκλιση πραγματικής γεωμετρίας από την προσομοίωση



Απόκλιση RMS>3.7mm

Εικόνα 7-5 Απόκλιση πραγματικής γεωμετρίας από ιδεατή γεωμετρία



Απόκλιση RMS0=0.234mm

Εικόνα 7-6 Απόκλιση πραγματικής γεωμετρίας από την προσομοίωση

Απόκλιση RMS=0.29mm

Εικόνα 7-7 Απόκλιση πραγματικής γεωμετρίας από ιδεατή γεωμετρία

(Στις περιοχές με θετική απόκλιση η πρώτη γεωμετρία είναι "υψηλότερα" από την δεύτερη)

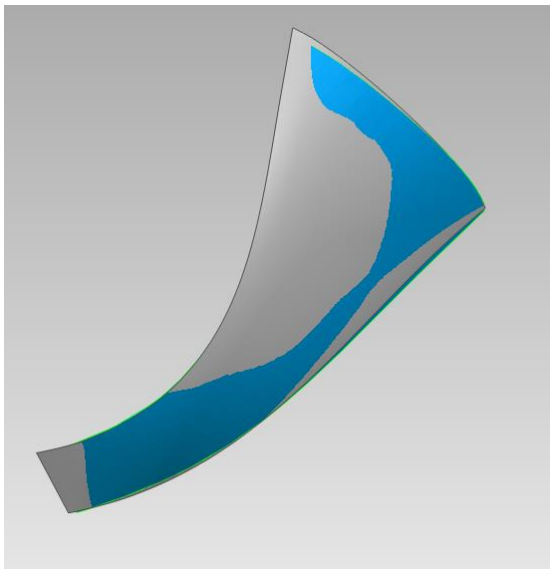
7.1 Παρατηρήσεις

- Πολύ καλύτερη ακρίβεια στις περιοχές έξω από την κοιλότητα και κοντά στα άκρα της
- Μερική πρόβλεψη των προβλημάτων που δημιουργούνται από κοίλες και κυρτές επιφάνειες (κυρίως 60820)
- Μερική πρόβλεψη της ανακρίβειας στην ακμή του πτερυγίου (έντονη καμπυλότητα). Η πραγματική γεωμετρία εξακολουθεί να έχει μεγαλύτερη καμπυλότητα από την προσομοίωση.
- Εμφάνιση προβλημάτων λόγω προσανατολισμού του πλέγματος στην περίπτωση της προσομοίωσης 60820. Οι περιοχές στις οποίες το εργαλείο διέρχεται παράλληλα στις ακμές των στοιχείων φαίνεται να τείνουν να βρίσκονται σε σχετικά χαμηλότερη θέση στην προσομοίωση. Το γεγονός ότι οι περιοχές που βρίσκονται στις υπόλοιπες θέσεις τείνουν να βρίσκονται σε χαμηλότερες θέσεις είναι σχετικό και προκύπτει βάσει της ευθυγράμμισης των δυο γεωμετριών βάσει των αποκλίσεων. Συνεπώς, δεν μπορούμε να αποφανθούμε αν οι περιοχές στις οποίες διέρχεται το εργαλείο σε γωνία 45° σε σχέση με τις ακμές, τείνουν να παραμορφώνονται λιγότερο ή αν αυτές που βρίσκονται σε σχετική γωνία 0° παραμορφώνονται περισσότερο από την πραγματική γεωμετρία.

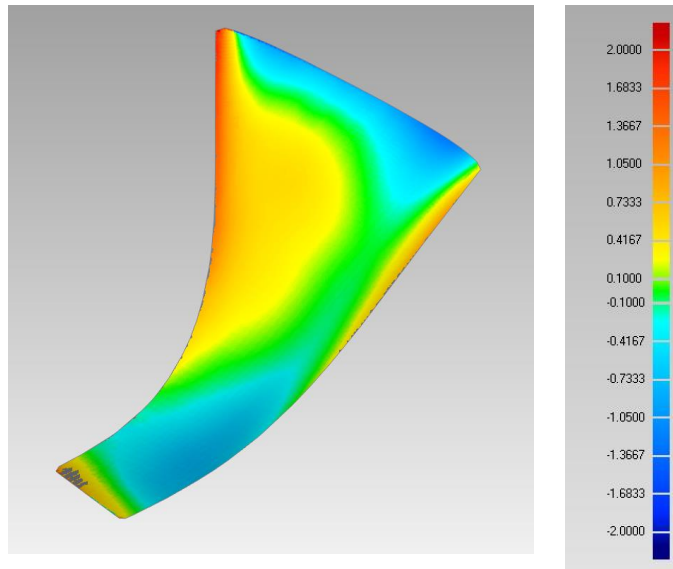
8 Σύγκριση ονομαστικής και προσομοιωμένης μορφής πτερύγιου

Η κοπή του ελάσματος για την παραγωγή της τελικής γεωμετρίας του πτερύγιου απαιτούσε εξοπλισμό ο οποίος δεν ήταν διαθέσιμος (laser, edm, plasma, και άλλα). Για αυτό το λόγο, έγινε μόνο πρόβλεψη της τελικής γεωμετρίας μέσω προσομοίωσης.

Πτερύγιο από AA10500



Εικόνα 8-1 Σύγκριση πτερυγίου από προσομοίωση (μπλε) σε σχέση με την επιθυμητή γεωμετρία (γκρι)

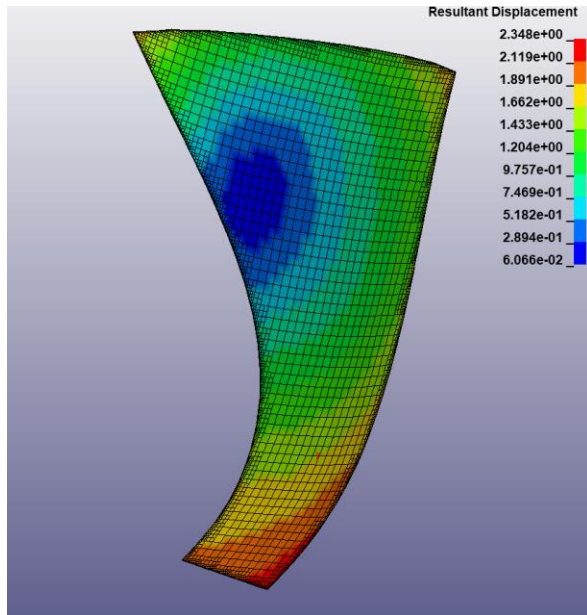


Απόκλιση Rms= 0.62

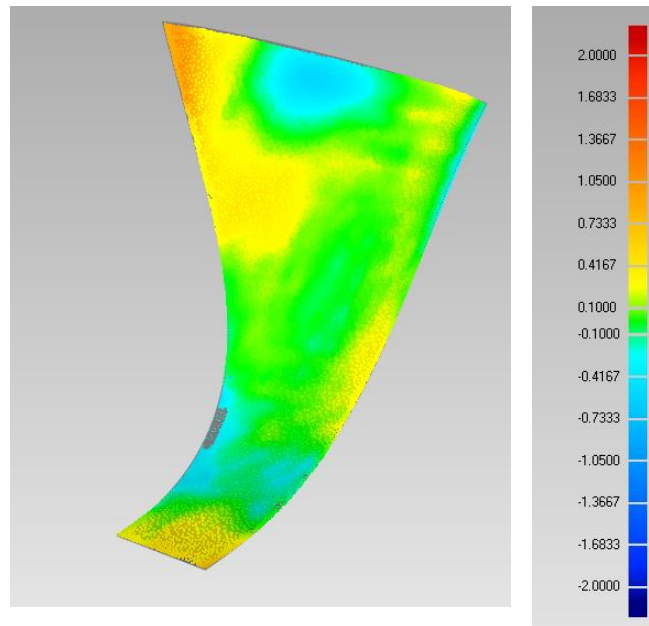
Εικόνα 8-2 Απόκλιση επιθυμητής γεωμετρίας από γεωμετρία προσομοίωσης

Λόγω της ελαστικής επαναφοράς, η κυρτότητα στην κύρια διεύθυνση μειώθηκε και αυξήθηκε ελαφρά το μήκος της χορδής. Η κυρτότητα στην διεύθυνση του πλάτους (width) επίσης παρουσίασε μικρή μείωση με αντίστοιχη αύξηση του πλάτους του πτερυγίου.

Πτερύγιο από 60820



Εικόνα 8-3 Συνιστάμενες μετατοπίσεις (μέτρο) κατά την ελαστική επαναφορά μετά την κοπή του.



Απόκλιση Rms= 0.405

Εικόνα 8-4 Απόκλιση επιθυμητής γεωμετρίας από γεωμετρία προσομοίωσης

Στην περίπτωση του ελάσματος 6082 παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της κυρτότητας στην κύρια διεύθυνση και αντίστοιχη μείωση του μήκους χορδής. Επίσης, παρατηρήθηκε μικρή μείωση της κυρτότητας κατά το πλάτος του ελάσματος που εστιάζονταν στην πάνω αριστερά ακμή.

9 Συμπεράσματα

9.1 Επιλογή τροχίων συνθηκών κατεργασίας

Πρέπει να αναγνωρισθεί ότι η υποβάθμιση της επιφάνειας από την παράλληλη τροχία του εργαλείου δύσκολα θα αντισταθμιστεί από τα τυχόν οφέλη από πιθανή βελτίωση διαστατικής ακρίβειας και ομοιογενέστερων παραμορφώσεων. Η τόσο μεγάλη επίδρασή της παράλληλης τροχιάς του εργαλείου στην ποιότητα της επιφάνειας δεν έχει γίνει κατανοητή και δεν ήταν αναμενόμενη, βάσει βιβλιογραφικών αναφορών[8]. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι, λόγω της πολύπλοκης μορφής της γεωμετρίας, δεν ήταν δυνατό να διατηρηθεί σταθερή η απόσταση ανάμεσα στις δυο επιφάνειες στις οποίες βρίσκονταν οι τροχιές του εργαλείου. Πολύ πιθανό είναι μεταβολή (αύξηση) της απόστασης αυτών των επιφανειών να έχει θετική επίδραση στην ποιότητα της επιφάνειας. Η επιλογή να γίνει η κατεργασία σε δυο τροχιές μάλλον έχει αρνητική επίδραση και στην διαστατική ακρίβεια, καθώς αυξάνονται οι ελαστικές παραμορφώσεις. Με την αρνητική επίδραση των παραλλήλων τροχίων συνάδει και η εικόνα 5-4. Η απόσταση ανάμεσα στην επιφάνεια της πρώτης και της δεύτερης φάσης είναι πολύ μεγαλύτερη.

Επίσης, μπορούμε ευκολά να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη μιας μεγάλης ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα επιφάνειας και βελτιώνει την διαμορφωσιμότητα. Παρόλα αυτά, αυξάνεται η παραγωγή γρεζιού. Η επιλογή λιπαντικού καθώς και η ποιότητα της επιφάνειας του εργαλείου αποκτούν συνεπώς μεγαλύτερη σημασία.

9.2 Προσομοίωση

Η πηγή της κύριας δυσκολίας στη προσομοίωση ήταν ότι έπρεπε να γίνει προσομοίωση μιας μεγάλης περιοχής που είχε χαρακτηριστικά ελάσματος (shell) και μιας μικρότερης περιοχής με σημαντική καμπυλότητα (σημείο επαφής) όπου υπήρχαν έντονες μεταβολές κατά το πάχος του ελάσματος. Έτσι, έπρεπε να εξασφαλιστεί επαρκής ακρίβεια σε μια μικρή περιοχή η οποία άλλαζε, ενώ παράλληλα διατηρούνταν μικρό το μέγεθος του προβλήματος. Πρέπει να αναφέρουμε ότι ενώ και το Isdyna φαίνεται να προσφέρει αρκετές εντολές για να ανταπεξέλθει αποδοτικά στα προβλήματα που προκαλεί η φύση της προσομοίωσης, πολλά από αυτά λειτουργούσαν εντός κάποιων στενών πλαισίων και ήταν σχεδιασμένα να ανταποκρίνονται σε συνήθεις προσομοιώσεις.

(Χαρακτηριστικά αναφέρονται επανακαθορισμός (θεωρητικά όλων) των παραμέτρων της προσομοίωσης, επαναδιακριτοποίηση της περιοχής κοντά στην επαφή, περιοδική μείωση του αριθμού των στοιχείων και άλλα.)

Επιπλέον, δυσκολία προέκυπτε από τις πολλές διαδοχικές θέσεις στις οποίες βρισκόντανε το εργαλείο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται πολύ ο υπολογιστικός χρόνος.

Λόγω της πολύ μεγαλύτερης στιβαρότητας του ελάσματος 60820 από το 10500, το οποίο είχε αρχικά επιλεγεί, οι δυνάμεις στο εργαλείο και άρα και το βέλος κάμψης ήταν σημαντικά. Εύλογο λοιπόν θα ήταν το εργαλείο να παρουσίαζε ελαστική συμπεριφορά κατά τις διευθύνσεις x-y. Κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ εύκολο να προσομοιαστεί στο μοντέλο αν το εργαλείο συνδέονταν μέσω ελατηρίων σε κόμβους

και επιβάλλονταν η κίνηση στους άξονες x-y από τους κόμβους. Ακόμα καλύτερη θα ήταν η επιλογή ενός στιβαρότερου εργαλείου.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η προσομοίωση μπορεί να προβλέψει ορισμένες από τις αποκλίσεις που θα δημιουργηθούν, αλλά μπορεί να εισάγει και κάποια προβλήματα (artifacts).

9.3 Παρατηρήσεις για την προσομοίωση της τελικής μορφής των πτερυγίων

Παρατηρούμε ότι η απόκλιση της ιδεατής τελικής γεωμετρίας του πτερυγίου (cad) από την γεωμετρία του πτερυγίου όπως υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις είναι αποτέλεσμα :

- Των αποκλίσεων της ιδεατής γεωμετρίας της κοιλότητας σε σχέση με την κατασκευασμένη κοιλότητα
- Των αποκλίσεων της κατασκευασμένης κοιλότητας σε σχέση με την γεωμετρία της κοιλότητας που προκύπτει από την προσομοίωση
- Των μετατοπίσεων που προκύπτουν στη γεωμετρία του πτερυγίου μετά την κοπή του από το υπόλοιπο έλασμα κατά την προσομοίωση

Η διαφοροποίηση στην μετατόπιση κατά την ελαστική επαναφορά ανάμεσα στα δυο πτερύγια δεν είναι ερμηνεύσιμη. Παρόλα αυτά είναι μικρή, καθώς η μεταβολή των κύριων διαστάσεων των πτερυγίων και στις δυο περιπτώσεις είναι μικρότερη του 1%.

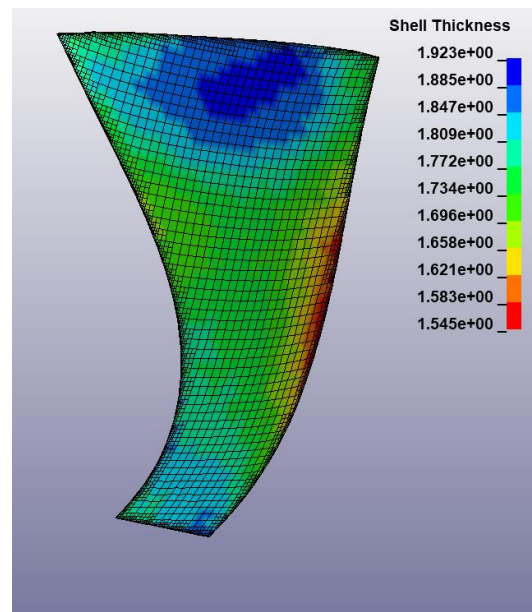
Επιπλέον, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η καμπυλότητα και η διαστατική ακρίβεια των πραγματικών επιφανειών στην πάνω αριστερά ακμή του πτερυγίου είναι μικρότερη από αυτήν που προέβλεψε η προσομοίωση. Συνεπώς η πραγματική ακρίβεια του πτερυγίου ιδιαίτερα στην περιοχή αυτή αναμένεται να είναι ακόμα μικρότερη.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η διαστατική ακρίβεια δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκής για την παράγωγη των πτερυγίων.

Επίσης, σημαντικές είναι και οι αποκλίσεις στο πάχος των πτερυγίων .

Ιδιαίτερα σημαντικό θα είναι το πρόβλημα της διαστατικής ακρίβειας και της μεταβολής του πάχους για τις ακμές η οποίες θα αποτελούν μέρος της συναρμογής με το κέλυφος.

Ίσως θα ήταν εφικτή η βελτίωση της διαστατικής ακρίβειας μέσα από τον καθορισμό γεωμετρίας ο οποίο θα αντισταθμίζει τις αποκλίσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος.



Εικόνα 9-1 Μεταβολή πάχους στο πτερύγιο (AA6082O) σύμφωνα με τη προσομοίωση

9.4 Μελλοντική εργασία

Ενδιαφέρον θα ήταν να μελετηθούν οι προσομοιώσεις κατεργασιών οι οποίες έχουν μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στο επιθυμητό τεμάχιο και το παραγόμενο όπως η κατεργασία στο έλασμα 5083H111. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται να μελετηθεί αν το σφάλμα ανάμεσα στην προσομοίωση και την πραγματικότητα θα παραμείνει σταθερό και θα κυμανθεί στα επίπεδα των προηγούμενων σφάλματων ή αν το σφάλμα της προσομοίωσης θα αυξηθεί. Αν δηλαδή υπάρχει κάποιος λόγος ο οποίος οδηγεί την προσομοίωση σε συστηματικό σφάλμα εξαρτώμενο από το σφάλμα της κατεργασίας ή αν αυτό παραμένει σταθερό. Αν το σφάλμα παραμένει σταθερό, η προσομοίωση της κατεργασίας θα έχει ενδιαφέρον για κατεργασίες όπου αναμένεται μεγαλύτερο σφάλμα.

Να ελεγχθεί αν η μείωση της ακτίνας του εργαλείου συμβάλλει στην διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου. Κάτι τέτοιο επιχειρήθηκε κατά την συγκεκριμένη διπλωματική, όμως κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατό, καθώς τα τεμάχια οδηγήθηκαν σε θραύση. Παρόλα αυτά, η θραύση των τεμαχίων μπορεί να αντιμετωπιστεί (μικρότερο *stepdown* αλλαγή γεωμετρίας και άλλα). Αυτή η υπόθεση πρέπει να ελεγχθεί και σε προσομοιώσεις υπό κλίμακα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται καλή ακρίβεια και μικρή διάρκεια της προσομοίωσης. Η μείωση της ακτίνας του εργαλείου σε προσομοίωση επιχειρήθηκε για την κατασκευασμένη γεωμετρία της διπλωματικής. Παρόλα αυτά η αύξηση του μεγέθους του προβλήματος ήταν πολύ μεγάλη για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση.

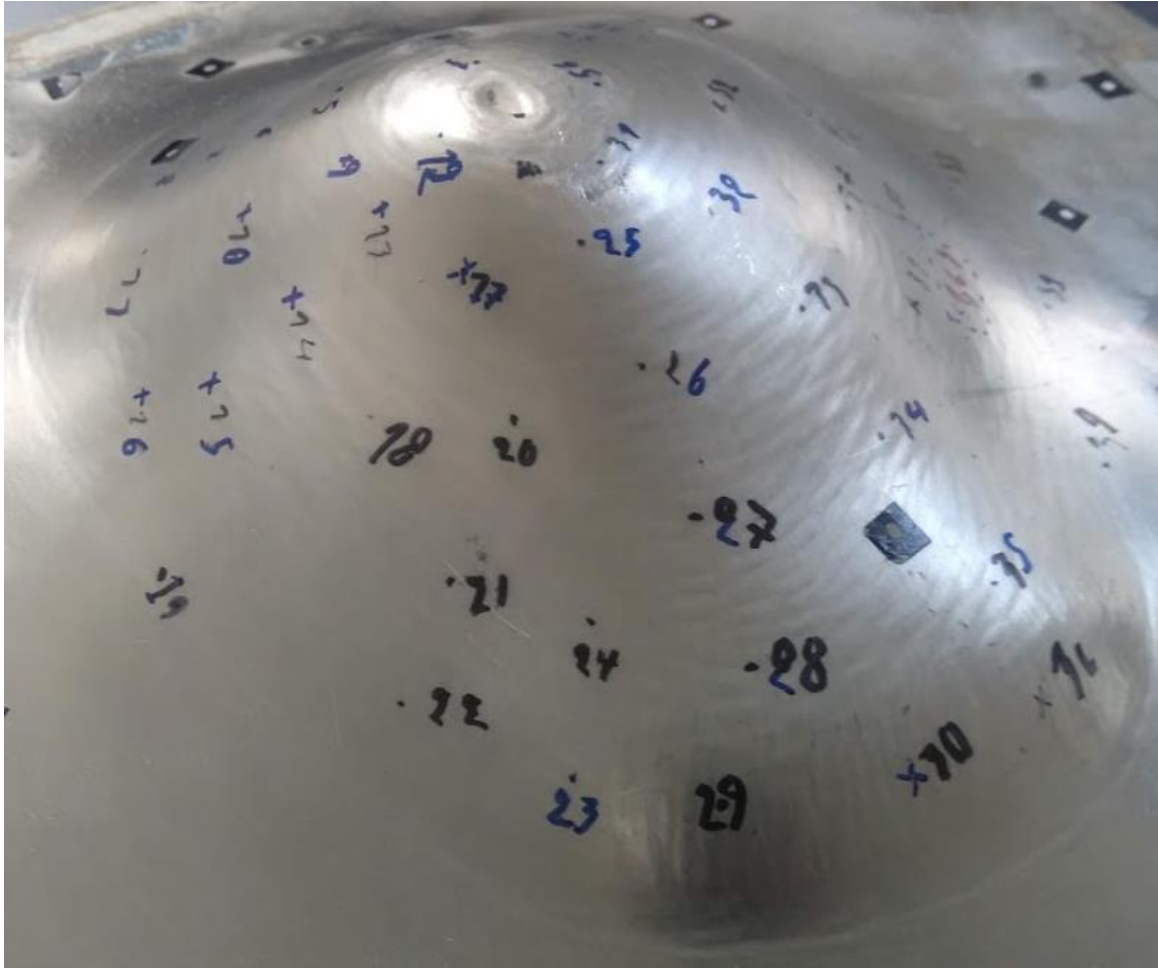
Παρόλα αυτά πρέπει να αναφερθεί ότι στην κατεργασία *isrf* τα δεδομένα για τις παραμέτρους κατεργασίας είναι πολλές φορές ελλιπή ή αντικρουόμενα. Επίσης, στηρίζονται σε μικρο αριθμο πειραμάτων και είναι δύσκολο να εξαχθούν συμπεράσματα. Σημαντική θα ήταν λοιπόν η συστηματική αναγνώριση των εφαρμογών της κατεργασίας (τι προσδοκεί να κατασκευάσει η βιομηχάνια με την κατεργασία πια είναι η απαραίτητη ακρίβεια και ποιό είναι το αποδεκτό κόστος) η ταξινόμηση των περιπτώσεων σε οικογένειες και η εξαγωγή συμπερασμάτων κανόνων και προτάσεων σχετικά με τις δυνατότητες της κατεργασίας και με τις συνθήκες που αυτή πρέπει να εκτελείται. **Δηλαδή μπορούμε να πούμε ότι μέχρι στιγμής η βιβλιογραφία αναφέρεται αποσπασματικά σε περιπτώσεις και λείπει μια συστηματική και γενική προσέγγιση.**

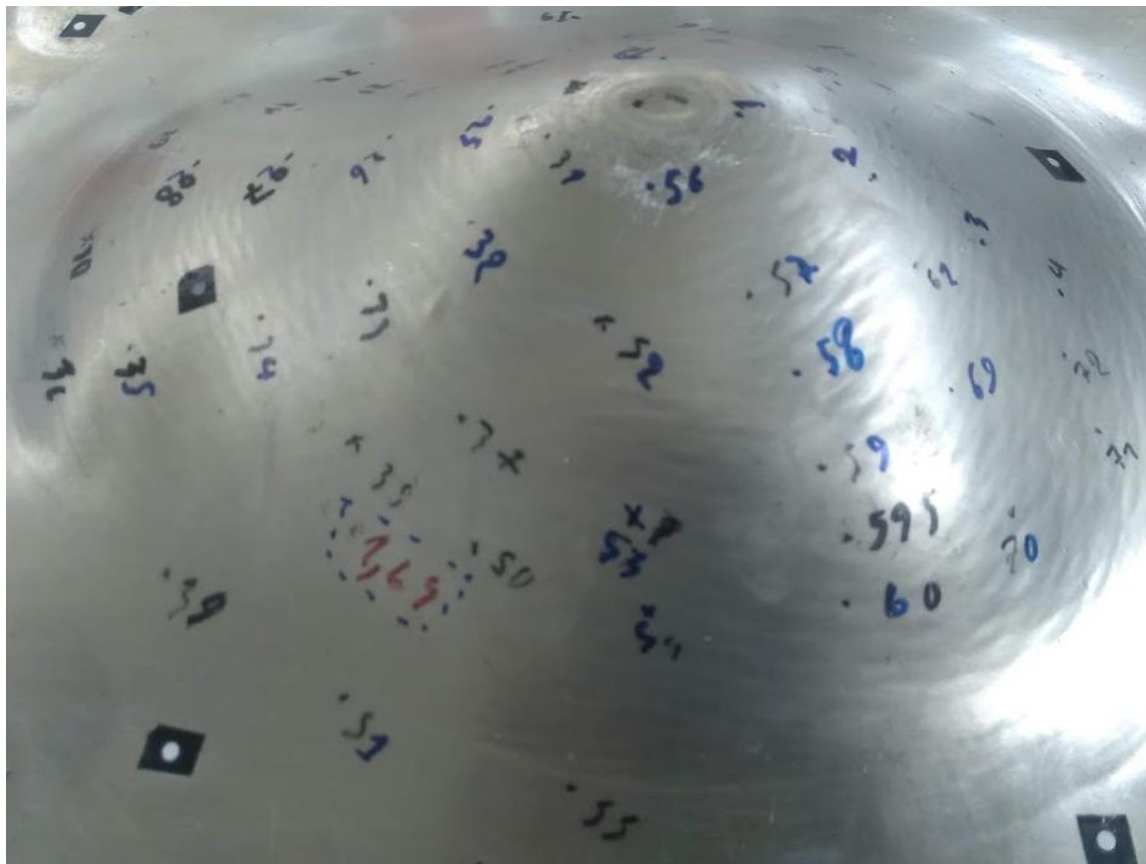
10 Παράρτημα

10.1 Μετρήσεις πάχους

Σημεία που έγιναν μετρήσεις στο έλασμα 60820



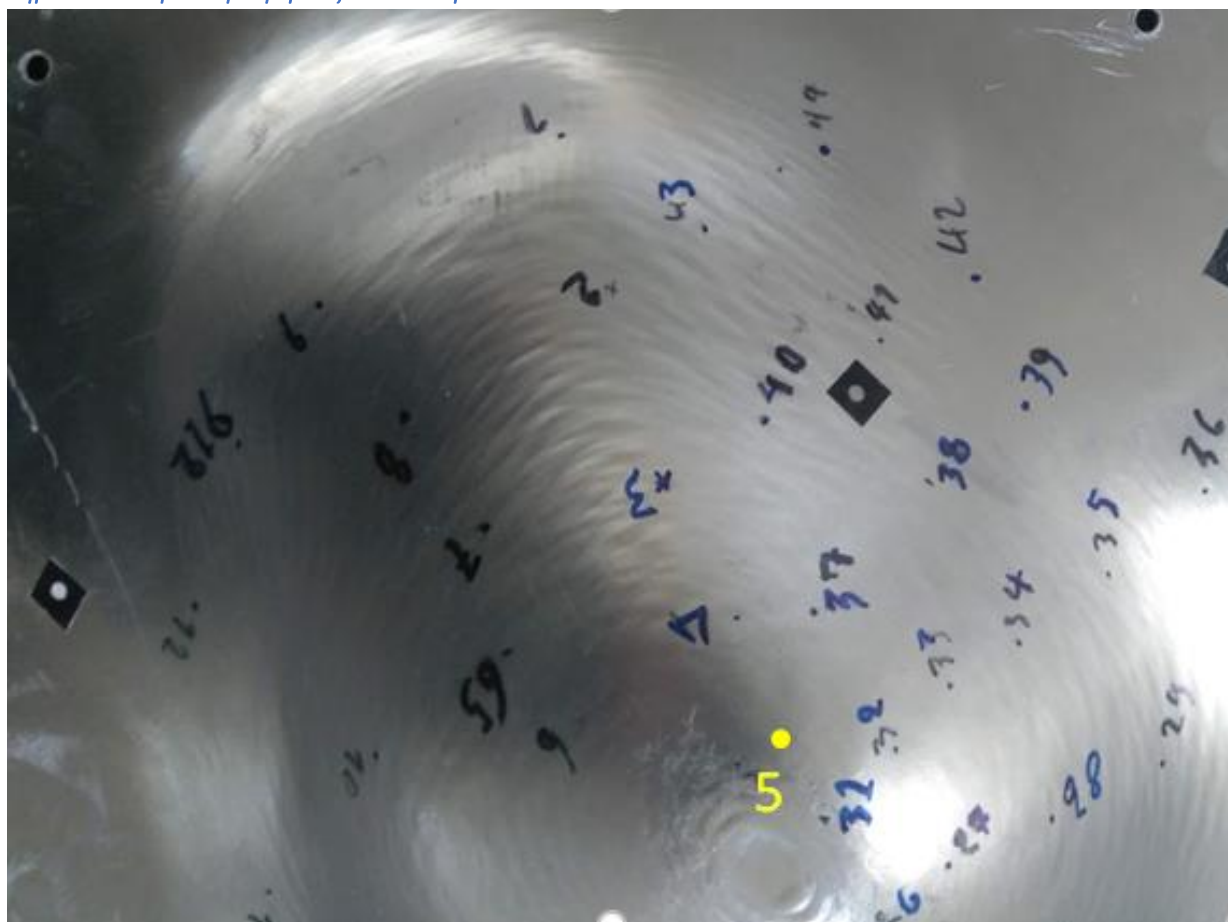


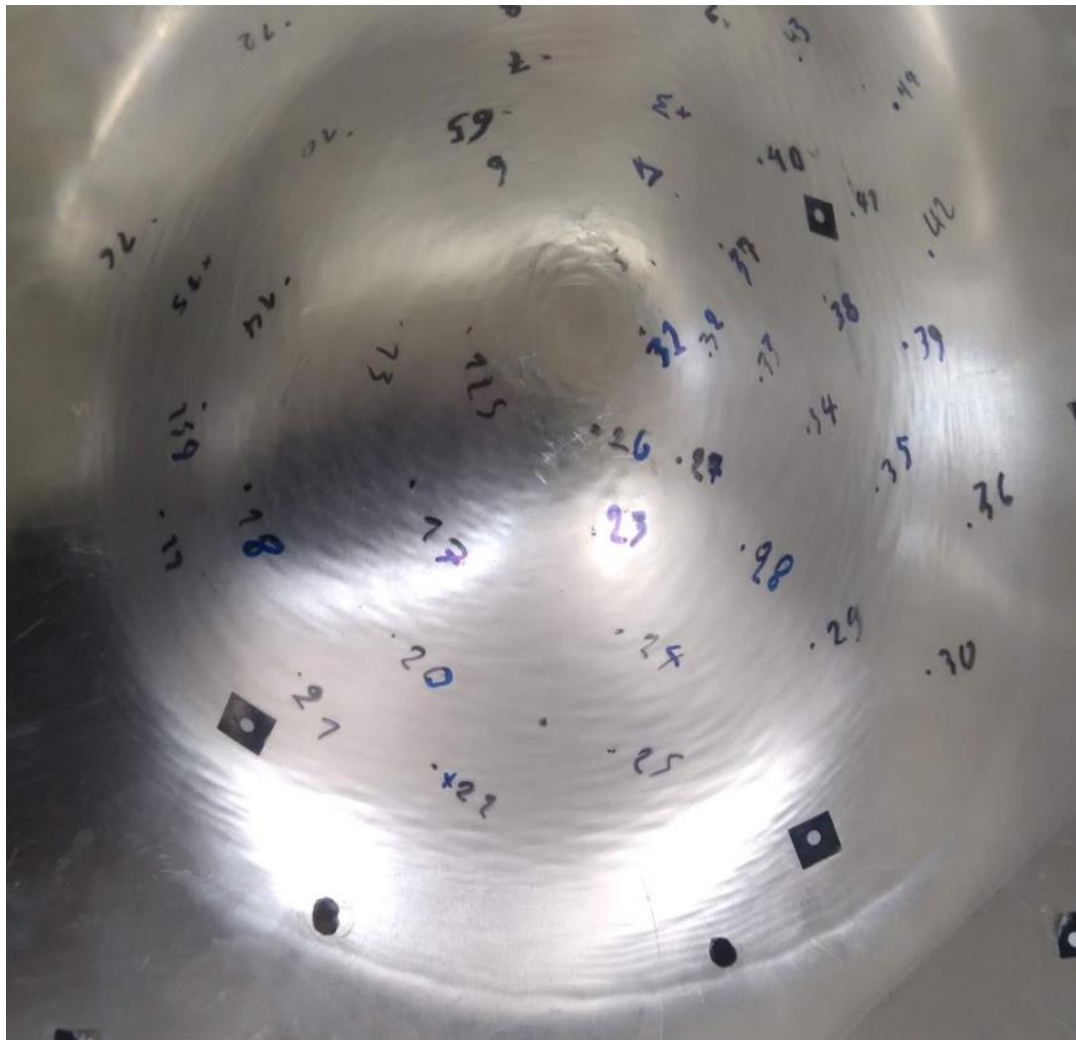


Έλασμα 5083H111 (R=7mm)				
Αριθμός σημείου	Πάχος (mm)		Αριθμός σημείου	Πάχος (mm)
1	1,90		29	1,65
2	1,70		30	1,69
3	1,57		31	1,82
4	1,54		32	1,72
5	1,64		33	1,69
6	1,56		34	1,82
7	1,54		35	1,79
8	1,60		36	1,69
9	1,59		37	1,58
10	1,49		38	1,53
11	1,58		39	1,89
12	1,83		50	1,51
13	1,58		51	1,92
14	1,46		52	1,76
15	1,52		53	1,52
16	1,66		54	1,49
17	1,61		55	1,90

18	1,50		56	1,86
185	1,65		57	1,79
19	1,80		58	1,77
20	1,57		59	1,69
21	1,70		595	1,54
22	1,92		60	1,46
23	1,75		61	1,69
24	1,76		69	1,66
25	1,77		70	1,48
26	1,69		71	1,58
27	1,80		72	1,56
28	1,78			

Σημεία που έγιναν μετρήσεις στο έλασμα 5083H1111





Έλασμα 5083H111 (R=7mm)				
Αριθμός σημείου	Πάχος (mm)		Αριθμός σημείου	Πάχος (mm)
1	1,66		22	1,62
2	1,74		23	1,66
3	1,65		24	1,56
4	1,65		25	1,55
5	1,79		26	1,82
6	1,70		27	1,64
65	1,65		28	1,52
7	1,72		29	1,58

9	1,84		30	1,86
10	1,78		31	1,86
11	1,61		32	1,62
12	1,78		33	1,48
125	1,84		34	1,43
13	1,77		35	1,65
14	1,62		36	1,90
15	1,53		37	1,55
158	1,51		38	1,50
16	1,77		39	1,76
17	1,75		40	1,50
18	1,73		41	1,76
19	1,48		42	1,88
20	1,57		43	1,71
205	1,53		44	1,87
21	1,54			

11 Βιβλιογραφία

- [1] J. L. Padrao, "Single Point Incremental Forming," *Msc Thesis*, pp. 64–70, 2009.
- [2] M. B. Silva, M. Skjoedt, P. A. F. Martins, and N. Bay, "Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 1, pp. 73–83, 2008.
- [3] Y. . H. Kim and J. . J. Park, "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130–131, no. 3, pp. 42–46, 2002.
- [4] P. A. F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, and M. B. Silva, "Theory of single point incremental forming," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 247–252, 2008.
- [5] Y. Fang, B. Lu, J. Chen, D. K. Xu, and H. Ou, "Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 8, pp. 1503–1515, 2014.
- [6] K. Jackson and J. Allwood, "The mechanics of incremental sheet forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 3, pp. 1158–1174, 2009.
- [7] S. Dejardin, S. Thibaud, J. C. Gelin, and G. Michel, "Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 2, pp. 363–369, 2010.
- [8] C. Henrard, "Numerical Simulations of the Single Point Incremental Forming Process," no. November, 2008.
- [9] "What are the differences between implicit and explicit?," *LS-DYNA Support*, p. 2.
- [10] "Courant-Friedrichs-Lewy condition - Encyclopedia of Mathematics," *Kluwer Academic Publishers*. [Online]. Available: https://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Courant-Friedrichs-Lewy_condition. [Accessed: 13-Mar-2018].
- [11] "Time step size," *LS-DYNA Support*, p. 3.
- [12] J. Wang, M. Nair, and Y. Zhang, "An Efficient Force Prediction Strategy in Single Point Incremental Sheet Forming," *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 761–771, 2016.
- [13] G. Ambrogio, L. Filice, F. Gagliardi, and F. Micari, "Sheet Thinning Prediction in Single Point Incremental Forming," *Adv. Mater. Res.*, vol. 6–8, no. January 2005, pp. 479–486, 2005.
- [14] K. Suresh and S. P. Regalla, "Effect of Mesh Parameters in Finite Element Simulation of Single Point Incremental Sheet Forming Process," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpc, pp. 376–382, 2014.
- [15] R. Breaz, O. Bologa, M. Tera, and G. Racz, "Researches regarding the use of complex trajectories and two stages processing in single point incremental forming of two layers sheet," *Steel Res. Int.*, vol. SPL. ISSUE, no. Special Edition:14th International Conference, 2012.
- [16] J. Naranjo, V. Miguel, A. Martínez-Martínez, L. M. Gómez-López, M. C. Manjabacas, and J. Coello, "Analysis and Simulation of Single Point Incremental Forming by ANSYS®," *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 1104–1111, 2015.

- [17] “Mass scaling,” *LS-DYNA Support*, p. 20.
- [18] C. Robert, P. Dal Santo, A. Delamézière, A. Potiron, and J. L. Batoz, “On some computational aspects for incremental sheet metal forming simulations,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. SUPPL. 1, pp. 1195–1198, 2008.
- [19] M. Skjoedt, N. Bay, B. Endelt, and G. Ingarao, “Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. SUPPL. 1, pp. 1199–1202, 2008.
- [20] N. Moser, D. Pritchett, H. Ren, K. F. Ehmann, and J. Cao, “An Efficient and General Finite Element Model for Double-Sided Incremental Forming,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 138, no. 9, p. 091007, 2016.
- [21] S. W. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, and J. H. Lee, “A Study on Warm Incremental Forming of AZ31 Alloy Sheet,” *Trans. Mater. Process.*, vol. 17, no. 5, pp. 373–379, Aug. 2008.
- [22] M. Bambach and G. Hirt, “Error analysis in explicit finite element analysis of incremental sheet forming,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 908, pp. 859–864, 2007.
- [23] ANSYS Inc., “Thin Wall Structure Simulation Ansys,” *Ansys Manual*. 2006.
- [24] Ansys, “SOLSH190,” *16.2.3/help*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLSH190.html. [Accessed: 10-Mar-2018].
- [25] Ansys, “SOLID185,” *Ansys/16.2.3//help*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID185.html. [Accessed: 10-Mar-2018].
- [26] Ansys, “SOLID186,” *Ansys/16.2.3//help*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html. [Accessed: 10-Mar-2018].
- [27] Ansys, “5.2. Shell Elements,” *Ansys/16.2.3//help*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_ShellElements.html. [Accessed: 10-Mar-2018].
- [28] Ansys, “SHELL281,” *Ansys/16.2.3/help*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SHELL281.html. [Accessed: 10-Mar-2018].
- [29] Ansys, “SHELL181,” *Ansys/16.2.3/help*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html. [Accessed: 10-Mar-2018].
- [30] M. Bambach, “Performance Assessment of Element Formulations and Constitutive Laws for the Simulation of Incremental Sheet Forming (ISF),” *Proc. VIII Int.*, no. December, pp. 1–4, 2005.
- [31] C. Lequesne, C. Henrard, and C. Bouffioux, “Adaptive remeshing for incremental forming simulation,” *Numer. Simul.*, vol. 32, no. 0, pp. 4–8, 2008.
- [32] M. Skjoedt, M. B. Silva, P. a F. Martins, and N. Bay, “Strain Paths and Fracture in Multi Stage Single Point Incremental Forming,” *9th Int. Conf. Technol. Plast.*, no. October 2015, pp. 239–244, 2008.

- [33] C. F. Guzmán, J. Gu, J. Duflou, H. Vanhove, P. Flores, and A. M. Habraken, "Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, no. 25, pp. 3594–3604, 2012.
- [34] A. J. Martínez-Donaire, D. Morales-Palma, A. Caballero, M. Borrego, G. Centeno, and C. Vallellano, "Numerical explicit analysis of hole flanging by single-stage incremental forming," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 132–138, 2017.
- [35] ANSYS, "SHELL163," *Ansys/16.2.3//help*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SHELL163.html. [Accessed: 11-Mar-2018].
- [36] C. Bouffioux, C. Henrard, J. Gu, J. R. Duflou, A. M. Habraken, and H. Sol, "Development of an inverse method for identification of materials parameters in the single point incremental forming process," *IDDRG 07 Conf. Proc.*, no. January 2015, pp. 257–264, 2007.
- [37] C. Henrard *et al.*, "Comparison of FEM Simulations for the Incremental Forming Process," *Adv. Mater. Res.*, vol. 6–8, no. July 2014, pp. 533–542, 2005.
- [38] C. Henrard, C. Bouffioux, L. Duchêne, J. R. Duflou, and A. M. Habraken, "Validation of a New Finite Element for Incremental Forming Simulation Using a Dynamic Explicit Approach," *Key Eng. Mater.*, vol. 344, no. July, pp. 495–502, 2007.
- [39] C. Bouffioux *et al.*, "Identification of material parameters to predict Single Point Incremental Forming forces," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. SUPPL. 1, pp. 1147–1150, 2008.
- [40] P. Dasappa, K. Inal, and R. Mishra, "The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, no. 25, pp. 3528–3550, 2012.
- [41] ANSYS, "4.2. Rate-Independent Plasticity," *Ansys16.2.3*. [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_thry/thy_mat1.html. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [42] G. Centeno, I. Bagudanch, A. J. Martínez-Donaire, M. L. García-Romeu, and C. Vallellano, "Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming," *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 20–29, 2014.
- [43] T. McAnulty, J. Jeswiet, and M. Doolan, "Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 43–54, 2017.
- [44] J. M. Allwood, D. R. Shouler, and A. E. Tekkaya, "The Increased Forming Limits of Incremental Sheet Forming Processes," *Key Eng. Mater.*, vol. 344, pp. 621–628, 2007.
- [45] J. J. Park and Y. H. Kim, "Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 140, no. 1–3 SPEC., pp. 447–453, 2003.
- [46] T. Issn, S. Gatea, D. Xu, H. Ou, and G. McCartney, "McCartney, Graham (2017) Evaluation of formability and fracture of pure titanium in incremental sheet forming . International Journal of Advanced Manufacturing Evaluation of formability and fracture of pure titanium in incremental sheet forming," pp. 1–17, 2017.

- [47] C. Pandivelan and A. K. Jeevanantham, "Formability evaluation of AA 6061 alloy sheets on single point incremental forming using CNC vertical milling machine," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 1343–1353, 2015.
- [48] G. Ambrogio, V. Cozza, L. Filice, and F. Micari, "An analytical model for improving precision in single point incremental forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 191, no. 1–3, pp. 92–95, 2007.
- [49] J. Verbert, A. K. Behera, B. Lauwers, and J. R. Duflou, "Multivariate Adaptive Regression Splines as a Tool to Improve the Accuracy of Parts Produced by FSPIF," *Key Eng. Mater.*, vol. 473, no. March, pp. 841–846, 2011.
- [50] A. K. Behera, H. Vanhove, B. Lauwers, and J. R. Duflou, "Accuracy Improvement in Single Point Incremental Forming through Systematic Study of Feature Interactions," *Key Eng. Mater.*, vol. 473, no. March, pp. 881–888, 2011.
- [51] A. K. Behera, J. Verbert, B. Lauwers, and J. R. Duflou, "Tool path compensation strategies for single point incremental sheet forming using multivariate adaptive regression splines," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 45, no. 3, pp. 575–590, 2013.
- [52] B. Lu *et al.*, "Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 85, pp. 14–29, 2014.
- [53] K. Karbowski, "Application of incremental sheet forming," *Manag. Prod. Eng. Rev.*, vol. 6, no. 4, pp. 55–59, 2015.
- [54] M. Ham and J. Jeswiet, "Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 241–244, 2006.
- [55] G. Hussain, H. R. Khan, L. Gao, and N. Hayat, "Guidelines for tool-size selection for single-point incremental forming of an aerospace alloy," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 28, no. 3, pp. 324–329, 2013.
- [56] G. Hussain, L. Gao, and N. Hayat, "Forming parameters and forming defects in incremental forming of an aluminum sheet: Correlation, empirical modeling, and optimization: Part A," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 26, no. 12, pp. 1546–1553, 2011.
- [57] J. Kopac and Z. Kampus, "Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., pp. 622–628, 2005.
- [58] B. Lu, J. Chen, H. Ou, and J. Cao, "Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 7, pp. 1221–1233, 2013.
- [59] A. Blaga, O. Bologa, V. Oleksik, and R. Breaz, "Influence of tool path on main strains, thickness reduction and forces in single point incremental forming process," *Proc. Manuf. Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 2–7, 2011.
- [60] D. Adams and J. Jeswiet, "Design rules and applications of single-point incremental forming," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 229, no. 5, pp. 754–760, 2015.
- [61] Saad Arshad, "SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING Saad Arshad," *MSC theses*, 2012.
- [62] A. Haufe, K. Schweizerhof, and P. Dubois, "Properties & Limits : Review of Shell Element Formulations Motivation – from shells to solids ?," *LS-DYNA Dev. Forum*, no. September, pp. 1–

35, 2013.