



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**Διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων για επισκευές με Προσθετική
Κατασκευή: Μια εφαρμογή στη διεργασία DED**

ΠΟΡΕΥΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

105819

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ, Ιούλιος 2024

Η προσθετική κατασκευή ορίζεται ως "η διαδικασία σύνδεσης υλικών για τη δημιουργία αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατου μοντέλου, συνήθως στρώμα προς στρώμα, σε αντίθεση με τις αφαιρετικές μεθόδους κατασκευής, όπως η παραδοσιακή κατεργασία". Οι διαδικασίες προσθετικής κατασκευής είναι από τις πιο σημαντικές και ταχέως αναπτυσσόμενες μη συμβατικές μεθόδους κατεργασίας λόγω των μοναδικών πλεονεκτημάτων τους όσον αφορά την ευελιξία, την ικανότητα παραγωγής γεωμετρικά πολύπλοκων εξαρτημάτων και τον υψηλό βαθμό αξιοποίησης των υλικών. Αξιοποιώντας την προσθετική κατασκευή, μπορούν να παραχθούν εξαρτήματα με περίπλοκες και πολύπλοκες γεωμετρίες. Τα εξαρτήματα αυτά μπορούν να κατασκευαστούν από προσαρμοσμένα υλικά με ελάχιστη σπατάλη υλικών και επιλέγοντας μια ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών, των κεραμικών και των μετάλλων.

Ενώ η προσθετική κατασκευή παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στην ανάπτυξη προϊόντων και στην κατασκευή μικρού όγκου, σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν είναι ικανή να παράγει τελικά, λειτουργικά προϊόντα. Χαρακτηριστικά που απαιτούν πολύ υψηλή ακρίβεια ή επιφάνειες με χαμηλή τραχύτητα χρειάζονται περαιτέρω διεργασίες αφαιρετικής κατεργασίας (διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση κ.λπ.). Επιπλέον, μερικές φορές απαιτούνται δομές στήριξης κατά τη φάση "κατασκευής" του τεμαχίου, προκειμένου να υποστηριχθούν προεξέχουσες δομές και πρέπει να αφαιρεθούν κατά τη διάρκεια της μεταγενέστερης επεξεργασίας.

Ο συνδυασμός των αφαιρετικών ή συμβατικών διαδικασιών κατασκευής μπορεί να γίνει με προηγμένες διαδικασίες προσθετικής κατασκευής προκειμένου να δημιουργηθεί η υβριδική λύση, όπου η υβριδική κατασκευή (HM) είναι η πιο υποσχόμενη, καθώς υπάρχουν πολλοί τομείς εφαρμογής που η διαδικασία αυτή μπορεί να προσφέρει ανταγωνιστικές λύσεις. Το βιομηχανικό ενδιαφέρον για την υβριδική κατασκευή αυξάνεται, λόγω των συνεχών εξελίξεων στις δυνατότητες του εξοπλισμού, της πιο προηγμένης μοντελοποίησης και προσομοίωσης της διαδικασίας και του εντοπισμού των αναγκών των πελατών. Κλάδοι όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η ενέργεια, η ναυπηγική και η αεροναυπηγική αρχίζουν σιγά σιγά να διερευνούν τις διαδικασίες υβριδικής κατασκευής, χρησιμοποιώντας αφαιρετικές διαδικασίες και διαδικασίες προσθετική κατασκευή, καθώς τους επιτρέπει να παράγουν εξαρτήματα υψηλής αξίας και μεγάλης κλίμακας. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι η παραγωγή εξαρτημάτων με τη χρήση των διαδικασιών προσθετικής κατασκευής, απαιτεί μετεπεξεργασία με συμβατική κατεργασία, για την επίτευξη καλής ποιότητας επιφάνειας και ανοχών των διαστάσεων. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή δεν επιτρέπει μόνο την κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων, αλλά κυρίως επιτρέπει

εργασίες επισκευής με χρήση προσθετικής κατασκευής, χρησιμοποιώντας ειδικές μηχανές ή ρομποτικά συστήματα. Η ενσωμάτωση πολλαπλών διεργασιών σε μία μόνο μηχανή, παρέχοντας σημαντικά οφέλη κόστους και χρόνου.

Τα τελευταία χρόνια, η υβριδική κατασκευή έχει γίνει πιο προσιτή στις βιομηχανίες σε συνδυασμό με τις ελκυστικές δυνατότητες και το χαμηλότερο κόστος, οδηγώντας στην εξέταση της για την κατασκευή επισκευών για διάφορες εφαρμογές, από τους κατασκευαστές καλουπιών έως τις ναυτικές και ενεργειακές βιομηχανίες. Ωστόσο, η επισκευή ενός εξαρτήματος με τη χρήση υβριδικής κατασκευής δεν αξίζει πάντα την προσπάθεια και θα μπορούσε ενδεχομένως να είναι πιο απαιτητική σε υλικά ή ενέργεια ή να οδηγήσει σε ένα κατώτερο εξάρτημα. Κάθε λύση υβριδικής κατασκευής, που ενσωματώνει αφαιρετικές και προσθετικές διεργασίες, έχει μοναδικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς, επομένως οι μηχανικοί πρέπει να διαδραματίσουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση της επισκευασιμότητας και της καταλληλότητας μιας λύσης υβριδικής κατασκευής για κάθε συγκεκριμένο εξάρτημα από μόνο του.

Αυτή η κατά περίπτωση αξιολόγηση είναι απαραίτητη επειδή κάθε εξάρτημα έχει υποστεί βλάβη με διαφορετικό τρόπο και έχει διαφορετικές προδιαγραφές που είναι δύσκολο να ομαδοποιηθούν. Ως εκ τούτου, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για πλαίσια, ροές εργασίας ή εργαλεία προκειμένου να βοηθηθούν είτε οι μηχανικοί είτε οι εταιρείες να εκτιμήσουν την αξία μιας διαδικασίας επισκευής με τη χρήση λύσεων υβριδικής κατασκευής που πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές τους, ενώ παράλληλα επιτυγχάνουν την τεχνολογική απόδοση με βάση διάφορους τεχνικούς και οικονομικούς βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs).

Η επισκευή εξαρτημάτων με τη χρήση υβριδικής κατασκευής ή αποκλειστικά μέσω προσθετικής κατασκευής δεν είναι πάντα η πιο αποτελεσματική λύση από άποψη κόστους, χρόνου και χρήσης πόρων. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην παροχή ενός ολοκληρωμένου πλαισίου που βοηθά στον προσδιορισμό της πιο αποτελεσματικής στρατηγικής επισκευής, αξιολογώντας και συγκρίνοντας διάφορους παράγοντες. Το πλαίσιο εξετάζει το οικονομικό κόστος, τον χρόνο επεξεργασίας, την κατανάλωση υλικών και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, διασφαλίζοντας ότι η επιλεγμένη μέθοδος επισκευής είναι βελτιστοποιημένη για την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα. Μέσω αυτής της ανάλυσης, η έρευνα επιδιώκει να καθοδηγήσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στην επιλογή της βέλτιστης προσέγγισης για κάθε συγκεκριμένο σενάριο επισκευής, βελτιώνοντας τελικά τη συνολική αποτελεσματικότητα της διαδικασίας επισκευής.

Η ανάπτυξη μιας ροής λήψης αποφάσεων και συνοδευτικών εργαλείων για τη βελτιστοποίηση της ροής εργασιών της διαδικασίας επισκευής και την απόφαση σχετικά με την αξιοποίηση της υβριδικής κατασκευής για ένα συγκεκριμένο κατεστραμμένο εξάρτημα αποτελεί σημαντικό ερευνητικό αντικείμενο, ιδίως για τις επερχόμενες τεχνολογίες κατασκευής.

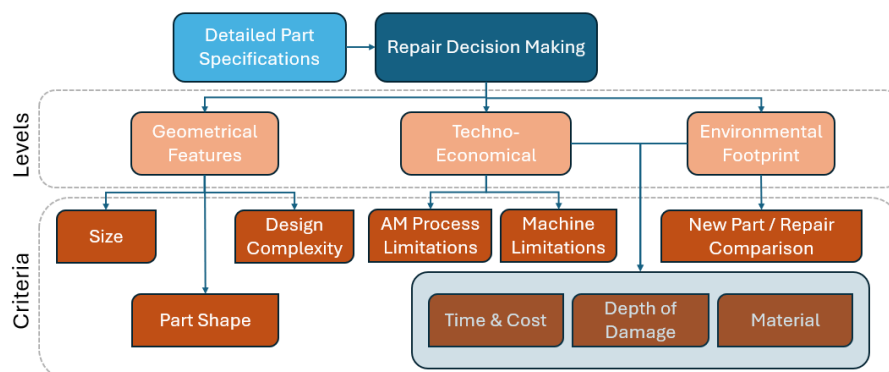
Οι βιομηχανίες ενδιαφέρονται κυρίως για την επισκευή εξαρτημάτων υψηλής αξίας για να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής τους. Για παράδειγμα, η βιομηχανία καλουπιών είναι κυρίως ευαίσθητη στο κόστος, ενώ στη ναυτική βιομηχανία επισκευών (π.χ. εξαρτήματα μηχανών από πλοία), ο χρόνος επισκευής είναι κυρίως κρίσιμος λόγω των οικονομικών κυρώσεων που συνδέονται με την καθυστέρηση της παράδοσης των αγαθών, και στη συνέχεια ακολουθούν οι εκτιμήσεις κόστους. Για παράδειγμα, τα καλούπια μπορεί να έχουν τιμή σχεδόν μισό εκατομμύριο ευρώ, ενώ συχνά απαιτείται επισκευή μόνο για επιφανειακές βλάβες. Μέχρι τώρα, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι όπως η συγκόλληση ή η επένδυση με λείζερ και στη συνέχεια το φινίρισμα του εξαρτήματος με λείανση και στίλβωση. Το πρόβλημα είναι ότι αυτές οι πρωτόγονες λύσεις υβριδικής κατασκευής μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη διάρκεια ζωής για το επισκευασμένο καλούπι, όπου οι πηγές των ελαττωμάτων στα επισκευασμένα εξαρτήματα, προέρχονται από τη μη εστιασμένη εισαγωγή θερμότητας και έχουν ως αποτέλεσμα την αποκόλληση του προστιθέμενου υλικού.

Σύμφωνα με ανεξάρτητες οικονομικές μελέτες, το 2024 αναμένεται αύξηση κατά 15,5% του μεριδίου αγοράς των υπηρεσιών που σχετίζονται με τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής, γεγονός που μεταφράζεται σε αύξηση κατά 1 δισεκατομμύριο ευρώ. Η συσχέτιση αυτή δείχνει ότι οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτές τις διαδικασίες είναι υψηλής αξίας όχι μόνο λόγω του επιπέδου της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, αλλά και λόγω των πλεονεκτημάτων σχεδιασμού και κατασκευής που προσφέρουν. Ταυτόχρονα, η αύξηση αυτή προέρχεται από την απορρόφηση διεργασιών που προηγουμένως εκτελούνταν με συμβατικές μεθόδους, όπου οι εργασίες επισκευής και ρύθμισης ή τα προσαρμοσμένα εξαρτήματα δεν θα μπορούσαν να παραχθούν με άλλο τρόπο. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος υποστήριξης αποφάσεων μπορεί να χρησιμεύσει ως διαβατήριο για την εκτέλεση διεργασιών με το υβριδικό σύστημα παραγωγής που προηγουμένως δεν θα αποτελούσαν εναλλακτική λύση. Αυτό υποστηρίζεται επίσης από τη σταθερότητα της διαδικασίας που επιτυγχάνεται μέσω των συστημάτων παρακολούθησης, επιβεβαιώνοντας την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος με ελάχιστη χρήση πόρων.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι περισσότερες διαδικασίες λήψης αποφάσεων επικεντρώνονται σε μία ή δύο μόνο από τις πτυχές της απόφασης προσθετικής κατασκευής, όπως οι συνδυασμοί υλικών, διεργασιών και μηχανών, ενώ οι περισσότερες μελέτες δεν παρουσιάζουν την επίδραση του συνδυασμού όλων των εναλλακτικών λύσεων, η οποία είναι σημαντική για τη λήψη τεκμηριωμένης απόφασης σχετικά με υβριδικές λύσεις κατασκευής.

Αν και οι παράγοντες αυτοί έχουν παραδοσιακά μελετηθεί μεμονωμένα, θα πρέπει συλλογικά να τροφοδοτούν μια ενιαία μεθοδολογία υποστήριξης αποφάσεων που θα αξιολογεί αν η επισκευή ή η ανακατασκευή είναι η βέλτιστη προσέγγιση για ένα συγκεκριμένο εξάρτημα.

Για την επιλογή μεταξύ επισκευής και ανακατασκευής ενός κατεστραμμένου εξαρτήματος απαιτείται μια αρχιτεκτονική υποστήριξης βάσει αποφάσεων. Αυτό ποσοτικοποιεί τη λήψη αποφάσεων καθορίζοντας τις εισροές αυτής της ροής εργασίας ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί μάζας με βάση διάφορες απαιτήσεις μηχανικής (αφαιρούμενο/προστιθέμενο υλικό), το σχετικό κόστος, η ενέργεια ανά μάζα εναπόθεσης και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την παραγωγή 1 kg υλικού. Για την εξαγωγή αυτών των τιμών τα απαιτούμενα βήματα απεικονίζονται με ένα σχήμα στην Εικόνα 1, το οποίο αναλύεται από την παρούσα ενότητα. Αυτή η ροή εργασίας θα πρέπει να παράγει πλήρη και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα, επομένως απαιτούνται κάποιες λεπτομέρειες σχετικά με το εξάρτημα, όπως τα δεδομένα CAD, οι συνθήκες λειτουργίας του (όπου σε ένα αυτοκίνητο ή αεροπλάνο) κ.λπ. Στη συνέχεια, η ροή εργασίας θα προχωρήσει στους 3 κύριους πυλώνες λήψης αποφάσεων: Γεωμετρική πολυπλοκότητα, τεχνοοικονομικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.



Εικόνα 1: Ροή εργασίας για τη λήψη αποφάσεων

Η πολυπλοκότητα ενός εξαρτήματος αξιολογείται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Το πρώτο είναι το μέγεθος του τεμαχίου, διότι μπορεί να αποτελεί κριτήριο μη αποδοχής: πολύ μεγάλο για τις δυνατότητες της μηχανής ή μη εφικτό με μια διαδικασία προσθετικής κατασκευής εάν το τεμάχιο είναι πολύ μικρό. Στη συνέχεια, ορίζονται και αξιολογούνται τα σύνθετα χαρακτηριστικά, όπως η ύπαρξη τοιχωμάτων, εσωτερικών καναλιών ή μικρών χαρακτηριστικών κ.λπ. Τα όρια της συμβατικής μηχανουργικής κατεργασίας έχουν μελετηθεί ευρέως, αλλά αυτά των διεργασιών προσθετικής κατασκευής καλύπτονται από τις κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό για την προσθετική κατασκευή (DfAM). Ωστόσο, οι διεργασίες επιδιόρθωσης πιθανότατα θα έχουν πρόσθετους περιορισμούς, δεδομένου ότι το υλικό εναποτίθεται πάνω σε προϋπάρχοντα χαρακτηριστικά. Τέλος, τα εξαρτήματα επισημαίνονται με το αν ήταν περιστροφικής ή πρισματικής φύσης, δεδομένου ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την πολυπλοκότητα της επισκευής.

Μετά την αξιολόγηση της γεωμετρικής πολυπλοκότητας, είναι σημαντικό να ποσοτικοποιηθούν οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη μηχανή και τη διαδικασία. Αυτοί οι περιορισμοί αφορούν τη διαδικασία προσθετικής κατασκευής και αφορούν τη διαμόρφωση της μηχανής, τον τύπο της πρώτης ύλης, τον χώρο εργασίας και το βάρος που μπορεί να υποστηρίξει το περιστροφικό τραπέζι. Ενώ τα ρομποτικά συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερο φάκελο εργασίας σε σύγκριση με τις τυπικές εργαλειομηχανές για υβριδική κατασκευή, στερούνται σημαντικά την ακαμψία που απαιτείται για την επεξεργασία σκληρών υλικών. Οι περιορισμοί και η καταλληλότητα των διαδικασιών προσθετικής κατασκευής τεκμηριώνονται εκτενώς στη βιβλιογραφία. Παράλληλα με αυτά τα κριτήρια, το παρόν επίπεδο αξιολόγησης αξιολογεί τη σκοπιμότητα της διαδικασίας επισκευής. Αυτό περιλαμβάνει την εξέταση παραγόντων όπως η έκταση της βλάβης, το υλικό και η μάζα του κατεστραμμένου εξαρτήματος, καθώς και ο χρόνος και το κόστος της διαδικασίας επισκευής. Αυτές οι μετρικές αποτελούν κοινές εισροές τόσο στο επίπεδο του περιβαλλοντικού αποτυπώματος όσο και στο τεχνοοικονομικό επίπεδο, όπως απεικονίζεται στο Εικόνα 1, επηρεάζοντας το κάθε επίπεδο με διαφορετικούς τρόπους. Κατά συνέπεια, όλα αυτά τα κριτήρια καθορίζουν συλλογικά το ολοκληρωμένο σχέδιο που απαιτείται για τη λειτουργία επισκευής σε μια συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης και αξιολογούν τη σκοπιμότητά του.

Για κάθε σύστημα παραγωγής, χρησιμοποιούνται μοντέλα κόστους για την αξιολόγηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στο τελικό κόστος μιας συγκεκριμένης διαδικασίας.

Σύμφωνα με, το κόστος της υβριδικής κατασκευής είναι το άθροισμα του κόστους για τη διαδικασία προσθετικής κατασκευής, C_{AM} και του κόστους για τη συμβατική κατεργασία, C_M . Το μοντέλο κόστους για την υβριδική κατασκευή λαμβάνει υπόψη τις μεταβλητές εισόδου $r_{t,M}$ και $r_{t,AM}$ οι οποίες αντιπροσωπεύουν το κόστος ανά μονάδα χρόνου για τον χειριστή και τη μηχανή, το $P_{AM,m}$ και $P_{M,m}$ οι οποίες δηλώνουν τη μέση ηλεκτρική κατανάλωση, και r_e το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου. Επιπλέον, t_{AM} και t_M υποδηλώνουν τους χρόνους διεργασίας για την προσθετική κατασκευή και τη συμβατική κατεργασία αντίστοιχα. Σταθερό κόστος, $C_{f,M}$ και $C_{f,AM}$ τα οποία δεν εξαρτώνται από τις παραμέτρους λειτουργίας (όπως οι αποσβέσεις και το κόστος συντήρησης), λαμβάνονται επίσης υπόψη. Ωστόσο, οι υπολογισμοί αποκλείουν παράγοντες όπως η περίοδος απόσβεσης και η αξιοποίηση των περιουσιακών στοιχείων.

$$C_{HM} = C_M + C_{AM} \quad (1)$$

$$C_M = (r_{t,M} + P_{M,m}r_e)t_M + C_{f,M} + C_{tl} + RM_c \quad (2)$$

$$C_{AM} = (r_{t,AM} + P_{AM,m}r_e)t_{AM} + C_{f,AM} + v_m r_m \quad (3)$$

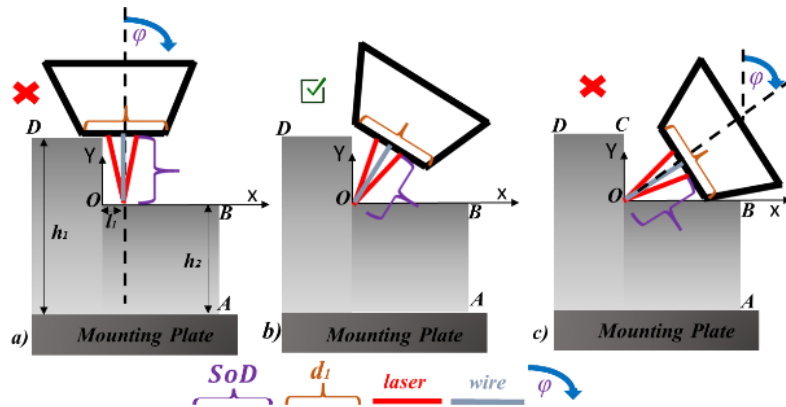
Οι κύριες διαφορές στα μοντέλα κόστους προκύπτουν από τους όρους v_m και r_m οι οποίοι υποδηλώνουν τον όγκο εναπόθεσης προσθετικής κατασκευής και το κόστος υλικού ανά μονάδα όγκου αντίστοιχα. Επιπλέον, RM_c αντιπροσωπεύει το κόστος των πρώτων υλών για την κατασκευή, ενώ C_{tl} υποδηλώνει το κόστος εργαλείων για τη συμβατική κατεργασία. Το κόστος εργαλείων υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η γεωμετρία και οι προδιαγραφές του κοπτικού εργαλείου, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου και η διαδικασία κατεργασίας, οι οποίοι συμβάλλουν στον προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας με βάση τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις κοπής και τις παραμέτρους της διαδικασίας. Αυτά τα μοντέλα κόστους δεν λαμβάνουν υπόψη το κόστος απογραφής για την ανάπτυξη νέων υλικών. Οι αναφερόμενες εισροές παρέχουν μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των πληροφοριών που απαιτούνται για κάθε διεργασία για τον ακριβή προσδιορισμό του σχετικού κόστους.

Για να ποσοτικοποιηθούν αυτοί οι περιορισμοί, απαιτούνται διάφορες εισροές που σχετίζονται με τη μηχανή, όπως η απόσταση απόστασης (SoD), η απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου εναπόθεσης και του τεμαχίου, η γεωμετρία και η διαμόρφωση της κεφαλής, η κατεύθυνση τροφοδοσίας του υλικού, η πηγή θερμότητας και ο αριθμός των ακτίνων λέιζερ. Αν και υπάρχουν πολλαπλές διαμορφώσεις κεφαλών, η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται σε μια διαμόρφωση με ομοαξονική τροφοδοσία υλικού και εκτός άξονα λέιζερ, εξάγοντας τους

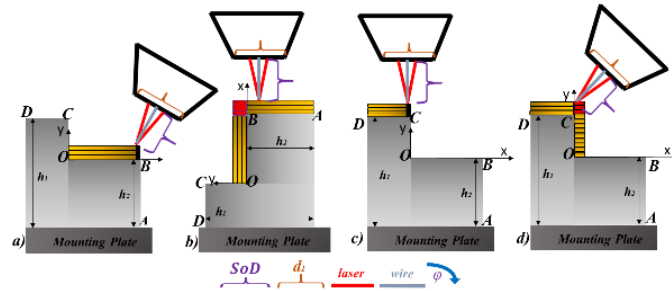
περιορισμούς της (Σχήμα 2). Θεωρείται ότι το υλικό προστίθεται στον όγκο με ύψος h_2 κατά μήκος της ακμής (OB), ξεκινώντας κοντά στο σημείο O και καταλήγει στο σημείο B . Ο πρώτος περιορισμός για αυτό το σενάριο είναι η μέγιστη διαφορά ύψους (βήμα) μεταξύ της επιφάνειας που χρήζει επισκευής και των γύρω χαρακτηριστικών, η οποία ισούται με $h_1 - h_2$. Ο επόμενος περιορισμός αφορά την απόσταση L_1 που καθορίζεται από το μοτίβο της δέσμης λέιζερ, τη διάμετρο της δέσμης λέιζερ, την κατεύθυνση τροφοδοσίας του σύρματος και τη διάμετρο του σύρματος. Για να ξεκινήσει η εναπόθεση κοντά στο σημείο O , η κεφαλή πρέπει να κλίνει γύρω από τον άξονα z κατά γωνία φ (Σχήμα 2α) μέχρι μια μέγιστη τιμή που υπολογίζεται από την εξίσωση (4) και απεικονίζεται στο Σχήμα 2c. Η γωνία φ και η τοποθέτηση της κεφαλής σε σχέση με το σημείο O μπορούν να επηρεάσουν τη συγκόλληση του εναποτιθέμενου υλικού με το τεμάχιο. Όταν η κεφαλή εναπόθεσης έχει κλίση, η συνιστώσα y του ρυθμού τροφοδοσίας σύρματος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ως εισροή διεργασίας για την εξουδετέρωση της γωνίας κλίσης της κεφαλής.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{SoD}{d_1/2}\right) \quad (4)$$

Ένας άλλος παράγοντας είναι η πρόκληση της εναπόθεσης υλικού μέχρι μια άκρη, όπως B και C , με σημεία εκκίνησης O και D αντίστοιχα. Το υλικό που εναποτίθεται στην άκρη τείνει να συρρικνώνεται προς την προηγούμενως εναποτιθέμενη τροχιά, δημιουργώντας ένα κενό, όπως φαίνεται με μαύρο χρώμα στο Σχ. 3α. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, το τεμάχιο περιστρέφεται κατά 90 μοίρες ώστε να καθίσει κάθετα στην πλάκα στήριξης (Σχήμα 3b). Σε αυτόν τον προσανατολισμό, η εναπόθεση αρχίζει στη θέση B για να καλυφθεί το κενό (σημειωμένο με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 3β) και στη συνέχεια συνεχίζεται η εναπόθεση υλικού μέχρι την άκρη A .

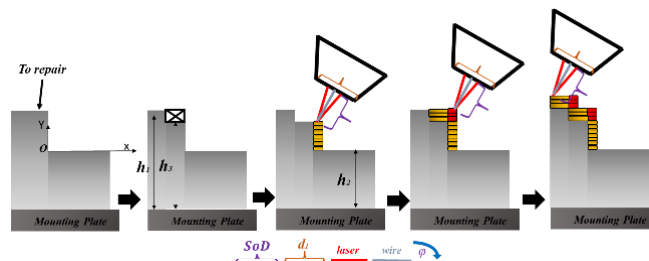


Σχήμα 2: Εξαγωγή περιορισμών σχετικά με τη μέγιστη γωνία εργασίας και το σημείο εκκίνησης



Σχήμα 3: Διαφορετικές προσεγγίσεις για την πλήρη κάλυψη των ελεύθερων επιφανειών με βήμα στα άκρα

Ωστόσο, εάν η εργασία επισκευής πρέπει να πραγματοποιηθεί πάνω από την άκρη (DC), η περιστροφή του τεμαχίου για την αλλαγή της διαμόρφωσής του δεν μπορεί να γίνει λόγω επικείμενης σύγκρουσης μεταξύ της κεφαλής και του όγκου με ύψος h_2 . Κατά συνέπεια, πρέπει να προστεθούν υλικά μέσω του όγκου με ύψος h_2 , αλλά μόνο σε διάφορες διαδρομές (Σχήμα 3γ,δ). Η τελευταία κατάσταση είναι δυνατή μόνο όταν $h_1 - h_2$ είναι μικρότερη από την SoD. Εάν $h_1 - h_2$ είναι μεγαλύτερο από το SoD, τότε τα χαρακτηριστικά πρέπει να κατεργαστούν με συμβατικά εργαλεία ώστε να δημιουργηθούν βήματα όπως στο Εικόνα 4 όπου $h_1 - h_3$ και $h_3 - h_2$ είναι κάτω από το SoD. Στη συνέχεια, η εναπόθεση συνεχίζεται σε κάθε βήμα χωριστά. Μεγάλη ποσότητα προπαρασκευαστικής εργασίας είναι απαραίτητη υπό αυτή την περίπτωση, με το πλάτος του βήματος να είναι ανάλογο της τιμής του πλάτους της τροχιάς.

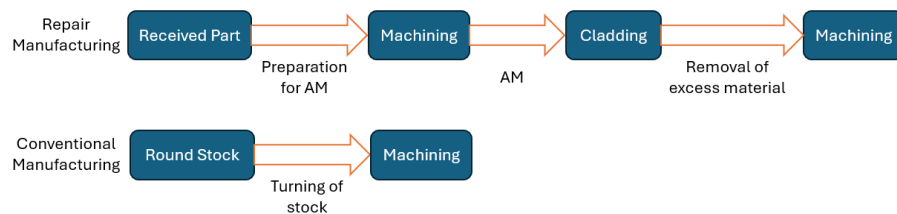


Εικόνα 4: Χειρισμός των επιφανειών όπου το βήμα ύψους υπερβαίνει το SoD

Το πλεόνασμα των υλικών στις διεπαφές που προστίθενται με στόχο την επίτευξη καλής πρόσφυσης μεταξύ του νέου υλικού και του τεμαχίου και στη συνέχεια την επίτευξη της επιθυμητής ανοχής και επιφανειακού φινιρίσματος μέσω της μετα-επεξεργασίας. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι θα παραμείνει αρκετό υλικό για την αφαίρεση και τον καθαρισμό των αποβλήτων της επιφάνειας σε ονομαστικές τιμές που διαστασιολογούνται για το πραγματικό τεμάχιο. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της μετεπεξεργασίας, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί μια σταθερή διαδικασία κατά το φραιζάρισμα ή την τόνρευση με τον έλεγχο της ελάχιστης τιμής

εμπλοκής του εργαλείου, η οποία υποδηλώνει ένα ακτινικό βάθος κοπής μεταξύ κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου. Αυτό γίνεται ακόμη πιο εμφανές σε περιπτώσεις κατεργασίας λεπτότοιχων τεμαχίων, οπότε είναι σημαντικό ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, προκειμένου να αποφευχθούν υπερβολικοί κραδασμοί ή φλύκταινες, το τεμάχιο εργασίας σταθεροποιεί τα κοπτικά εργαλεία. Συνολικά, αυτοί οι περιορισμοί επηρεάζουν την ποσότητα του υλικού που προστίθεται και αφαιρείται σε κάθε βήμα, τον χρόνο και το κόστος επισκευής και τις εισροές που απαιτούνται για την τεχνοοικονομική ανάλυση. Επιπλέον, είναι προφανές ότι, παρόλο που η προσθετική κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία επισκευής, τα στάδια προ-επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας μπορεί να οδηγήσουν σε μια μη αποδοτική διαδικασία από άποψη κόστους και βιωσιμότητας.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η πλευρά της βιωσιμότητας της ροής λήψης αποφάσεων, εξετάζεται μια πολυεπίπεδη ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ), όπου η επισκευή συγκρίνεται με την κατασκευή ενός νέου εξαρτήματος από την αρχή όσον αφορά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.



Εικόνα 5: Σύγκριση της ροής εργασίας μεταξύ συμβατικής και επισκευαστικής κατασκευής

Το επίπεδο διεργασίας υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας και τις σχετικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιώντας τις προδιαγραφές εισροής θερμότητας και το χρόνο διεργασίας για την προσθετική διεργασία και τη μετεπεξεργασία, ενώ οι συμβατικοί υπολογισμοί θερμότητας λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια χύδην που απαιτείται για την επεξεργασία ενός χύδην υλικού από το οποίο μπορεί να σχηματιστεί ένα επιθυμητό σχήμα τεμαχίου. Σε επίπεδο εργαλειομηχανής, εκτός από τις εκπομπές άνθρακα αυτών των διεργασιών, υπάρχουν επίσης εκπομπές άνθρακα που προκύπτουν από τη χρήση ισχύος βοηθητικού εξοπλισμού και υλικών που καταναλώνονται κατά τη διάρκεια των διεργασιών. Στο επίπεδο του συστήματος λαμβάνονται στη συνέχεια υπόψη αυτές οι υπολογιζόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα επιπλέον εκείνων που σχετίζονται με την ενσωματωμένη ενέργεια των εξαρτημάτων (βάρος πριν από την εναπόθεση και βάρος μετά την εναπόθεση) και το αρχικό βάρος του χύδην υλικού για σκοπούς ανακατασκευής. Η επιλογή των υλικών έχει επίσης σημασία για τον υπολογισμό αυτό. Για τον πολυεπίπεδο υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SimaPro (v.9.3.03) με

τη βάση δεδομένων Ecoinvent Database 3.1 (με βάση το "Allocation, default system model" ως μοντέλα για το ανθρακικό αποτύπωμα).

Στη συνέχεια, για το επίπεδο της εργαλειομηχανής, αναμένονται (MRM) κατά τη μετα- και προεπεξεργασία για την περίπτωση επισκευής ή η μάζα του υλικού που αφαιρείται κατά την κατασκευή από το μηδέν. Τέλος, για το επίπεδο του συστήματος, η μάζα του αρχικού όγκου (MIB) του υλικού για την τελευταία περίπτωση και η μάζα του άξονα όπως παραλήφθηκε μετά τη χρήση (IM) συν το βάρος του εναποτιθέμενου υλικού (DeM) για την περίπτωση επισκευής είναι οι επιθυμητές εισοδοί.

Τέλος, για την ανάλυση σε επίπεδο διεργασίας, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την αποτελεσματικότητα της πηγής θερμότητας και της ισχύος εργασίας για το αναμενόμενο υλικό, τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού (MRR), τον χρόνο εναπόθεσης (DeT) και τον χρόνο κατεργασίας (Mt). Στη συνέχεια, σε επίπεδο εργαλειομηχανής, θα πρέπει να παρουσιαστεί η μάζα του αφαιρούμενου υλικού (MRM) ή η νέα μάζα των κατεργασμένων υλικών. Τέλος, όσον αφορά το επίπεδο του συστήματος, οι επιθυμητές εισοδοί είναι η μάζα του αρχικού όγκου (MIB), η μάζα του άξονα όπως παραλήφθηκε μετά τη χρήση IM και στη συνέχεια το βάρος του εναποτιθέμενου υλικού DeM.

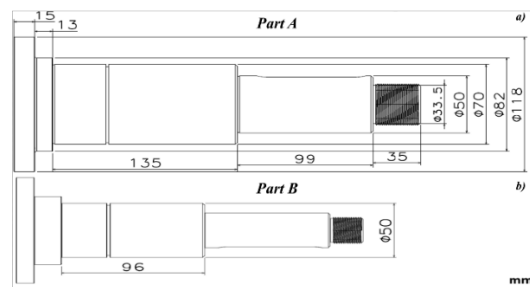
Η ροή εργασίας υποστήριξης αποφάσεων που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα έχει υλοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα εργαλείο λογισμικού, συγκεκριμένα με τη χρήση του Microsoft Excel. Η εφαρμογή αυτή ενοποιεί όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σε μια ενιαία, προσβάσιμη θέση, βελτιώνοντας έτσι τη διαδικασία υπολογισμού. Το εργαλείο που βασίζεται στο Excel ενσωματώνει σταθερές παραμέτρους που εξαρτώνται από το μηχάνημα και ζητά συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη και συστηματική προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων. Με τη συγκέντρωση των δεδομένων και των υπολογισμών, το εργαλείο αυτό ενισχύει την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της ροής εργασίας, διασφαλίζοντας ότι λαμβάνονται υπόψη όλες οι σχετικές μετρήσεις και ότι μπορούν να ληφθούν τεκμηριωμένες αποφάσεις με ευκολία.

Επιπλέον, μια εμπειρική προσέγγιση είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων ορίων που σχετίζονται με τις ιδιότητες των υλικών, τους χρόνους επεξεργασίας και τον ειδικό χειρισμό ορισμένων βασικών περιοχών. Βοηθά επίσης στην κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αφαιρετικών και των προσθετικών διεργασιών όταν αυτές ενσωματώνονται σε μια ενιαία ροή εργασίας. Για παράδειγμα, παράγοντες όπως η απαγωγή

θερμότητας και οι ρυθμοί εναπόθεσης υλικού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά στην πράξη, καθώς μπορεί να υπάρχουν καθυστερήσεις από την ίδια τη μηχανή που δεν σχετίζονται με τη διαδικασία προσθετικής κατασκευής, αλλά εξακολουθούν να επηρεάζουν τη συνολική αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα της διαδικασίας κατασκευής. Για τους λόγους αυτούς, η εφαρμογή του εργαλείου σε μια πραγματική μελέτη περίπτωσης ήταν απαραίτητη προκειμένου να επικυρωθούν και να βελτιωθούν οι παράμετροι του ή ακόμη και ολόκληρη η προσέγγιση με βάση τις προκλήσεις του πραγματικού κόσμου. Στις επόμενες συνεδρίες θα παρουσιαστεί η πειραματική φάση της ροής εργασίας. Το πειραματικό μέρος της μελέτης περίπτωσης θα αντιμετωπιστεί με ένα υβριδικό ρομποτικό κύτταρο παραγωγής που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού. Η ρομποτική κυψέλη αποτελείται από έναν ρομποτικό βραχίονα Yaskawa GP225 που είναι τοποθετημένος σε μια χαλύβδινη κατασκευή σχεδιασμένη με γνώμονα τη φορητότητα. Όσον αφορά τις δυνατότητες υβριδικής κατασκευής, η κυψέλη διαθέτει μια κεφαλή φρεζαρίσματος, μια κεφαλή προσθετικής κατασκευής και έναν τρισδιάστατο σαρωτή. Όταν δεν χρησιμοποιείται, κάθε εναλλάξιμη κεφαλή αποθηκεύεται στη δική της κλειστή βάση.

Για τη μελέτη περίπτωσης σχετικά με τη ροή εργασίας υποστήριξης αποφάσεων αξιολογήθηκαν δύο περιπτώσεις, όπου και οι δύο είναι κυλινδρικοί άξονες από αντλία καυσίμου ναυτικής πετρελαιομηχανής ενός μεγάλου πλοίου. Σημειώνεται ότι το βάθος της βλάβης είναι ελάχιστο, λίγα mm, αλλά αυτό ήταν αρκετό και στις δύο περιπτώσεις για να προκαλέσει το εξάρτημα να βρεθεί εκτός ανοχής και να θεωρηθεί κατεστραμμένο. Αυτοί οι άξονες επισκευάζονται πειραματικά με τη χρήση AISI SS316 (χάλυβας), αλλά στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε το Ti-6Al-4V (τιτάνιο), ώστε να απεικονιστεί η σημασία της επιλογής υλικού στη ροή λήψης αποφάσεων.

Πρώτα απ' όλα, πρέπει να καθοριστούν οι προδιαγραφές, οι απαιτήσεις και οι συνθήκες λειτουργίας των εξαρτημάτων. Τα τεχνικά σχέδια μπορείτε να τα δείτε στο Σχήμα 6:



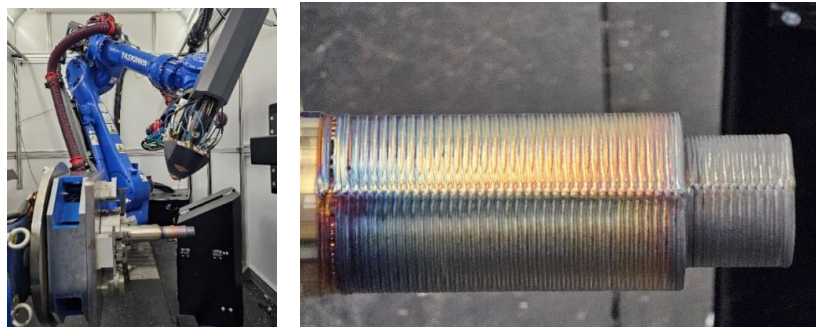
Σχήμα 6 α) Μέρος Α που χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις SR2, SR4, SM2, SM4 και β) Μέρος Β που χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις SR1, SR3, SM1, SM3.

Αν και μπορεί να σημειωθεί ότι τα δύο αυτά μέρη έχουν διαφορετική διαστασιολόγηση, το πιο σημαντικό πράγμα που πρέπει να προσδιοριστεί είναι ότι η έκταση της βλάβης είναι διαφορετική στο μέρος Α σε σχέση με το μέρος Β, εισάγοντας άλλη μια μεταβλητή στην ανάλυση. Με αυτό το δεδομένο, ο κατασκευαστής διευκρινίζει ότι για αυτά τα εξαρτήματα, η αναμενόμενη ακρίβεια διαστάσεων είναι $\pm 50 \mu\text{m}$ και $Ra=0,4 \mu\text{m}$ για την τραχύτητα της επιφάνειας.

η πειραματική διαδικασία επισκευής των δύο διαφορετικών τμημάτων που περιγράφονται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας της διεξαγωγής πειραμάτων με υλικά τιτανίου, τόσο για την προσθετική κατασκευή όσο και για τις αφαιρετικές διεργασίες. Ως εκ τούτου, οι πειραματικές μελέτες περίπτωσης που διεξήχθησαν αφορούν μόνο τα SR2 & SR1

Το πρώτο βήμα ήταν να φινιριστεί και να δημιουργηθεί μια λεία επιφάνεια για την προσθετική λειτουργία, έτσι ο άξονας κατεργάστηκε σε τόρνο για να καθαριστεί η κατεστραμμένη περιοχή και να δημιουργηθεί μια καλή επιφάνεια για να συνδεθεί το προστιθέμενο υλικό με το αρχικό εξάρτημα.

Ακολούθησαν οι προσθετικές πράξεις. Ένας άλλος περιορισμός της προσθετικής διαδικασίας είναι το ύψος της γεωμετρίας δίπλα στην περιοχή επιδιόρθωσης, το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 6 mm (δεδομένου ότι 6 mm είναι η απαιτούμενη απόσταση της κεφαλής από το επίπεδο εναπόθεσης για την ομαλή λειτουργία της διαδικασίας). Για πρόσθετη ασφάλεια, η κεφαλή είχε κλίση 15° από τον κατακόρυφο άξονα, ώστε να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη απόσταση από τα μη κινούμενα μέρη. Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για την επισκευή του άξονα περιελάμβανε τη διατήρηση του βραχίονα σταθερού ενώ το τραπέζι περιστρεφόταν. Αυτή ήταν η καλύτερη λύση, καθώς η λίμνη τήγματος θα ήταν συνεχώς παράλληλη με το έδαφος και δεν θα αντιμετώπιζε προβλήματα με τη ροή του λιωμένου υλικού προς την κατεύθυνση της βαρύτητας, αλλά πρόσθεσε κάποιο χρόνο επεξεργασίας, καθώς το περιστρεφόμενο τραπέζι δεν είναι ατελείωτο και έπρεπε να κάνει μια αντίστροφη κίνηση.



Σχήμα 7: Αποτέλεσμα της διαδικασίας SR1 DED AM

Η εναπόθεση υλικού σε μια υπάρχουσα γεωμετρία δοκιμάστηκε πρώτα σε έναν άλλο άξονα κατασκευασμένο από παρόμοιο κράμα χάλυβα για να επαληθευτεί η ικανότητα της κυψέλης να εκτελέσει αυτό το έργο. Επιπλέον, η εναπόθεση υλικού πάνω σε μια υπάρχουσα γεωμετρία αποτέλεσε άλλη μια πρόκληση για την επισκευή, καθώς η διείσδυση του εναποτιθέμενου υλικού στον αρχικό άξονα είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της πρόσφυσης μεταξύ των δύο υλικών και την αποφυγή σημαντικής υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων του άξονα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι προστέθηκαν περίπου 1-2 mm επιπλέον υλικού, ή 3 επιπλέον στρώματα, πέραν της ονομαστικής διαμέτρου, προκειμένου να υπάρχει αρκετό υλικό για την τελική επεξεργασία, καθώς τα στρώματα έχουν κορυφές και κοιλάδες που διαφορετικά θα δημιουργούσαν προβλήματα.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμαστικής φάσης της διαδικασίας επισκευής, το σημείο μηδενισμού των λείζερ της κεφαλής DED ήταν ένα ενδιαφέρον θέμα προς διερεύνηση. Αρχικά θεωρήθηκε ότι τα λείζερ θα έπρεπε να στοχεύουν τη διάμετρο που θα επενδυθεί με υλικό. Αυτή η υπόθεση δημιούργησε προβλήματα, καθώς όταν ένα επισκευασμένο τεμάχιο υποβλήθηκε σε κατεργασία μετά την επεξεργασία στον τόρνο, εμφανίστηκε ένα ελάττωμα κοντά στη ρίζα του βήματος. Αυτό το ελάττωμα είναι κρίσιμο, καθώς μπορεί να αποτελέσει την αρχή μιας ρωγμής που θα διαδοθεί στο υπόλοιπο εξάρτημα. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το ζήτημα, τα λείζερ έπρεπε να μηδενιστούν ελαφρώς στο βήμα πάνω από τη διάμετρο που θα επενδυθεί και όχι απευθείας στην ίδια τη διάμετρο. Σκεπτόμενοι μια λογική εξήγηση αυτού του φαινομένου, σκέφτηκα ότι εφόσον η θέση του meltpool θα είναι πάντα παράλληλη με το έδαφος, η βαρύτητα έλκει το υλικό που θα εναποτίθετο στο κάθετο τοίχωμα του σκαλοπατιού να είναι παράλληλο με το έδαφος και γεμίζει όλη την περιοχή της διαμέτρου που διαφορετικά θα δημιουργούσε κενά.

Το τελικό στάδιο είναι η διαδικασία φινιρίσματος του άξονα για την επίτευξη των επιθυμητών διαστάσεων. Αρχικά, ο άξονας κατεργάζεται σε τόρνο και στη συνέχεια σε μηχανή λείανσης για να επιτευχθεί η επιθυμητή επιφανειακή τραχύτητα και ακρίβεια διαστάσεων.

Η παρουσιαζόμενη ροή εργασίας υποστήριξης αποφάσεων κατευθύνει τον χρήστη να προτιμήσει τις εργασίες επισκευής όταν απαιτούνται σύνθετα υλικά ή σχήματα. Ενώ η συμβατική κατεργασία μπορεί να μειώσει το κόστος σε μαζικά παραγόμενα εξαρτήματα, το αποτέλεσμα της ροής εργασίας υποστήριξης αποφάσεων είναι ότι η επισκευή ενός μεμονωμένου εξαρτήματος μπορεί να είναι τόσο οικονομικά αποδοτική όσο και περιβαλλοντικά πιο βιώσιμη. Για μεγάλα εξαρτήματα, ο χρόνος επισκευής αυξάνεται επίσης μαζί με την κατανάλωση ενέργειας στην

προσθετική κατασκευή, ενώ από την άλλη πλευρά, στις συμβατικές διεργασίες το σημαντικό κόστος είναι το χύδην υλικό. Επομένως, ενώ ο χρόνος και το κόστος της διαδικασίας δεν είναι συγκρίσιμα μεταξύ των δύο διαδικασιών, η ανάλυση υποστήριξης αποφάσεων μπορεί να δώσει μια οριστική απάντηση σχετικά με την πραγματική αξία. Ως ενδεικτικό παράδειγμα των αποτελεσμάτων της τεχνικοοικονομικής ανάλυσης, μπορεί να φανεί ότι κατά τη σύγκριση των περιπτώσεων SR2 και SM2, η επισκευή του εξαρτήματος θα κόστιζε περίπου 250% περισσότερο από την κατασκευή του εξαρτήματος από την αρχή, και αυτό προκύπτει από τον αυξημένο χρόνο λειτουργίας της μηχανής προσθετικής κατασκευής, όπου το κόστος ανά ώρα είναι υψηλό. Ωστόσο, κατά τη σύγκριση των περιπτώσεων SR4 και SM4, το κόστος και των δύο είναι πανομοιότυπο, δεδομένου ότι το κόστος των πρώτων υλών είναι πολύ υψηλό και είναι συγκρίσιμο με τη λειτουργία της μηχανής AM, μετατοπίζοντας το βάρος στις περιβαλλοντικές πτυχές για την τελική απόφαση. Η αντίστροφη πλευρά αυτού, είναι η σύγκριση των περιπτώσεων SR3 & SM3, όπου η μικρότερη βλάβη απαιτούσε την προσθήκη λιγότερων υλικών, επομένως το κόστος της επισκευής είναι σχεδόν το μισό του κόστους της ανακατασκευής.

Κατά τη σύγκριση της επισκευής και της ανακατασκευής ενός άξονα του ίδιου υλικού και μεγέθους, το αποτύπωμα άνθρακα της συνολικής λειτουργίας (σε επίπεδο συστήματος) είναι χαμηλότερο για τη διαδικασία επισκευής. Ωστόσο, εάν η απόφαση λαμβάνεται με βάση την κατανάλωση ενέργειας κατά την ίδια τη διαδικασία και τις σχετικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η συμβατική διαδικασία κατασκευής είναι πιο βιώσιμη. Η διαφορά στα αποτελέσματα οφείλεται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με το υλικό και οι οποίες είναι συνήθως ο καθοριστικός παράγοντας για τη βιωσιμότητα μιας λειτουργίας. Όταν συγκρίνονται διαφορετικά υλικά για την ίδια διαδικασία, τότε οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με την επιλογή του υλικού, καθώς έχουν ενσωματωμένη ενέργεια που σχετίζεται με τη φάση παραγωγής της πρώτης ύλης.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια δομημένη ροή εργασίας υποστήριξης αποφάσεων που παρέχει μια ταχεία διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με την καταλληλότητα επισκευής ενός κατεστραμμένου εξαρτήματος, λαμβάνοντας υπόψη διεπιστημονικές πτυχές, όπως τεχνικοοικονομικές περιβαλλοντικές, αλλά και τις μηχανολογικές απαιτήσεις του ίδιου του εξαρτήματος. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου μπορούν να συνοψιστούν στο ότι χωρίς ένα τέτοιο εργαλείο, η ροή εργασίας θα ήταν σημαντικά διαφορετική, καθώς ο μηχανικός θα έπρεπε

να αναλύσει χειροκίνητα τον αντίκτυπο κάθε πτυχής και στη συνέχεια να εξετάσει τις τεχνικές προδιαγραφές και τους περιορισμούς των διαδικασιών προκειμένου να κάνει την τελική επιλογή.

Οι μελέτες περίπτωσης που πραγματοποιήθηκαν ήταν πραγματικές εφαρμογές της ροής εργασίας υποστήριξης αποφάσεων, όπου το εργαλείο καθορίζει αν η καλύτερη προσέγγιση είναι η επισκευή ή η κατασκευή από την αρχή δύο μοναδικών κατεστραμμένων αξόνων που προέρχονται από τη ναυπηγική βιομηχανία, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από AISI 316L και Ti-6Al-4V. Προκειμένου να βρεθεί ο αντίκτυπος κάθε προαναφερθείσας πτυχής, εντοπίστηκαν οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη διαδικασία και τη μηχανή, αναδεικνύοντας τις πραγματικές δυνατότητες ενός συρμάτινου συστήματος προσθετικής κατασκευής DED-LB/M. Αν και οι τεχνικοί περιορισμοί καθορίστηκαν μέσω της κατανόησης της διαδικασίας και της πειραματικής διερεύνησης, η οικονομική αξιολόγηση βασίστηκε σε αναπόφευκτες παραδοχές που θα μπορούσαν ενδεχομένως να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Η ροή εργασίας υποστήριξης αποφάσεων που αναπτύχθηκε δείχνει ότι για εξαρτήματα χαμηλής μάζας, το κόστος επισκευής είναι σημαντικά υψηλότερο από την ανακατασκευή λόγω του υψηλού λειτουργικού κόστους της μηχανής προσθετικής κατασκευής. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η μάζα, το κόστος υλικού και επεξεργασίας γίνεται συγκρίσιμο με το λειτουργικό κόστος της μηχανής προσθετικής κατασκευής. Όσον αφορά την αποδοτικότητα του χρόνου, η ανακατασκευή είναι η ταχύτερη μέθοδος και για τους δύο αυτούς άξονες. Από περιβαλλοντική άποψη, η ενσωματωμένη ενέργεια της πρώτης ύλης επηρεάζει σημαντικά τους υπολογισμούς σε σύγκριση με την κατανάλωση ενέργειας της διαδικασίας. Επομένως, οι διαδικασίες επισκευής είναι πιο βιώσιμες από περιβαλλοντική άποψη τόσο για τους άξονες υψηλής όσο και για τους άξονες χαμηλής μάζας.

Όσον αφορά τις μελλοντικές εργασίες, αυτή η ροή εργασίας μπορεί επίσης να βελτιωθεί με την περαιτέρω επικύρωση της ροής εργασίας μέσω προηγμένων δοκιμών και την εφαρμογή της σε πραγματικό κόσμο σε επιχειρησιακά περιβάλλοντα, γεγονός που θα ενίσχυε την αξιοπιστία και την αξιοπιστία του εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων, με την τελειοποίηση της ροής εργασίας υποστήριξης αποφάσεων ώστε να περιλαμβάνει πιο λεπτομερή οικονομικά μοντέλα ή με την επέκταση της μελέτης ώστε να περιλαμβάνει άλλες διαδικασίες και υλικά προσθετικής κατασκευής και, τέλος, με την ανάπτυξη μιας πιο φιλικής προς το χρήστη διεπαφής και αυτοματοποιημένης ροής εργασίας που θα μπορούσε να καταστήσει το εργαλείο πιο προσιτό στους επαγγελματίες του κλάδου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Αγγλικό Σύμβολο	Ελληνική Μετάφραση	Μονάδες Μέτρησης
AM	Προσθετική κατασκευή	-
CNC	Υπολογιστικός αριθμητικός έλεγχος	-
CAD	Σχεδιασμός με τη βοήθεια υπολογιστή	-
3D	Τρισδιάστατος χώρος	-
KPIs	Βασικοί δείκτες επιδόσεων	-
DED	Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας	-
HM	Υβριδική κατασκευή	-
LPBF	Σύντηξη πούδρας τραπεζιού με λέιζερ	-
SoD	Απόσταση από το τραπέζι	mm
WAAM	Προσθετική κατασκευή τόξου σύρματος	-
LMD	Εναπόθεση μετάλλων με λέιζερ	-
TIG	Αδρανές αέριο με Βολφράμιο	-
MIG	Μέταλλο με Αδρανές αέριο	-
PBF	Σύντηξη πούδρας τραπεζιού	-
AHP	Διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης	-
LCA	Ανάλυση κύκλου ζωής	-
GUI	Γραφική διεπαφή χρήστη	-
CAGR	Σύνθετος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης	-
RPM	Στροφές ανά λεπτό	r/min
DfAM	Σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή	-