

Εισαγωγή και βασικές αρχές

Περίληψη

Η τεχνολογία που περιγράφεται στο παρόν βιβλίο αναφερόταν αρχικά ως ταχεία πρωτοτυποποίηση. Ο όρος «ταχεία πρωτοτυποποίηση» (RP) χρησιμοποιείται σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους για να δηλώσει την ταχεία φυσική αναπαράσταση ενός συστήματος ή ενός αντικειμένου πριν από την εισαγωγή του στην αγορά ως εμπορικού προϊόντος. Με άλλα λόγια, η έμφαση δίνεται στην επιτάχυνση της διαδικασίας δημιουργίας του πρωτοτύπου ή του βασικού μοντέλου από το οποίο, στη συνέχεια, θα προκύψουν βελτιωμένα μοντέλα, καθώς και το τελικό προϊόν. Οι σύμβουλοι επιχειρήσεων και οι μηχανικοί λογισμικού χρησιμοποιούν τον όρο «ταχεία πρωτοτυποποίηση» για να περιγράψουν μια διαδικασία ανάπτυξης μιας επιχείρησης ή ενός λογισμικού που είναι τμηματικά διαρθρωμένα, και η οποία δίνει την ευκαιρία στους πελάτες και τους άλλους ενδιαφερομένους να εξετάσουν και να σχολιάσουν κριτικά διάφορες ιδέες και λύσεις που προτείνονται ενόσω διαρκεί η διαδικασία ανάπτυξης. Στην περιοχή της ανάπτυξης προϊόντων, ο όρος «ταχεία πρωτοτυποποίηση» έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να δηλώσει τεχνολογίες που δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας φυσικών πρωτοτύπων με τη χρησιμοποίηση απευθείας ψηφιακών δεδομένων. Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στις παραπάνω τεχνολογίες, οι οποίες αναπτύχθηκαν αρχικά για την κατασκευή πρωτοτύπων, σήμερα όμως χρησιμοποιούνται σε πολύ περισσότερες εφαρμογές.

1.1 Τι είναι η προσθετική κατασκευή;

Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) είναι ο καθιερωμένος πλέον όρος αυτού που τα προηγούμενα χρόνια αποκαλούσαμε «ταχεία πρωτοτυποποίηση» (Rapid Prototyping – RP) και σήμερα είναι γνωστό στο ευρύ κοινό ως τριδιάστατη εκτύπωση (3D printing). Ο όρος «RP» χρησιμοποιείται σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους για να δηλώσει την ταχεία φυσική αναπαράσταση ενός συστήματος ή ενός αντικειμένου πριν από την εισαγωγή του στην αγορά ως εμπορικού προϊόντος. Με άλλα λόγια, η έμφαση δίνεται στην επιτάχυνση της διαδικασίας δημιουργίας του πρωτοτύπου ή του βασικού μοντέλου από το οποίο στη συνέχεια θα προκύψουν βελτιωμένα μοντέλα, καθώς και το τελικό προϊόν. Οι σύμβουλοι επιχειρήσεων και οι μηχανικοί λογισμικού χρησιμοποιούν, επίσης, τον όρο «RP» για να περιγράψουν μια διαδικασία ανάπτυξης μιας επιχείρησης ή ενός λογισμικού που είναι τμηματικά διαρθρωμένα, και η οποία δίνει την ευκαιρία στους πελάτες και τους άλλους ενδιαφερομένους να εξετάσουν και να σχολιάσουν κριτικά διάφορες ιδέες και λύσεις που προτείνονται ενόσω διαρκεί η διαδικασία ανάπτυξης. Στην περιοχή της ανάπτυξης προϊόντων, ο όρος «RP» έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να δηλώσει τεχνολογίες που δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας φυσικών πρωτοτύπων με τη χρησιμοποίηση απευθείας ψηφιακών δεδομένων. Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στις παραπάνω τεχνολογίες, οι οποίες αναπτύχθηκαν αρχικά για την κατασκευή πρωτοτύπων, σήμερα, όμως, χρησιμοποιούνται σε πολύ περισσότερες εφαρμογές.

Οι χρήστες της τεχνολογίας RP αντελήφθησαν ότι ο όρος «RP» είναι ανεπαρκής, κυρίως διότι δεν μπορεί να περιγράψει τις πλέον σύγχρονες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας. Η ποιότητα των κατασκευαζόμενων αντικειμένων από τις μηχανές αυτής της τεχνολογίας έχει βελτιωθεί σε τέτοιο σημείο, ώστε πλέον τα αντικείμενα αυτά να προσομοιάζουν στα τελικά προϊόντα σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Σήμερα, πολλά τελικά προϊόντα παράγονται απευθείας από τέτοιες μηχανές και, άρα, δεν είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν ως «πρωτότυπα». Επίσης, ο όρος «RP» δεν υποδηλώνει την προσθετικού χαρακτήρα κατασκευαστική αρ-

χή αυτών των τεχνολογιών. Μια τεχνική επιτροπή που έχει πρόσφατα συσταθεί στην ASTM International απεφάνθη ότι πρέπει να υιοθετηθεί διαφορετική ορολογία για τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Αν και η συζήτηση γύρω από το θέμα αυτό δεν έχει ολοκληρωθεί, τα πρότυπα που έχουν πρόσφατα συμφωνηθεί και υιοθετηθεί από την ASTM γι' αυτή την τεχνολογία χρησιμοποιούν τον όρο «προσθετική κατασκευή» (additive manufacturing) [1].

Συντομογραφικά αναφερόμαστε σ' αυτή την τεχνολογία ως AM, βασική αρχή της οποίας είναι το ότι ένα μοντέλο, που αρχικά δημιουργείται με τη χρησιμοποίηση ενός τριδιάστατου συστήματος Computer-Aided Design (3D CAD), μπορεί να κατασκευαστεί απευθείας χωρίς να απαιτείται προηγουμένως ο προγραμματισμός της διαδικασίας παραγωγής του. Μολονότι στην πραγματικότητα το θέμα δεν είναι τόσο απλό όσο κατ' αρχάς θα νόμιζε κάποιος, η AM απλοποιεί σε σημαντικό βαθμό τη διαδικασία κατασκευής 3D αντικειμένων απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD. Άλλες κατασκευαστικές διεργασίες απαιτούν προσεκτική και λεπτομερή ανάλυση της γεωμετρικής μορφής του κομματιού, ώστε να καθοριστεί, για παράδειγμα, η σειρά κατασκευής των διαφορετικών μορφολογικών χαρακτηριστικών του, το ποια εργαλεία και ποιες κατασκευαστικές διεργασίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν, καθώς και τι είδους διατάξεις συγκράτησης του κομματιού θα απαιτηθούν επιπροσθέτως για την ολοκλήρωσή του. Αντίθετα, με την AM απαιτούνται μόνο μερικές βασικές διαστασιακές λεπτομέρειες και μικρή κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της μηχανής AM και του χρησιμοποιούμενου υλικού κατασκευής του κομματιού.

Το «κλειδί» για να κατανοήσουμε πώς λειτουργεί η AM είναι ότι το κομμάτι δημιουργείται με τη διαδοχική πρόσθεση υλικού σε στρώσεις (layers)· η κάθε στρώση αντιστοιχεί σε μια λεπτή διατομή (cross-section) του κομματιού που προκύπτει από τα αρχικά δεδομένα CAD. Προφανώς, κάθε στρώση έχει συγκεκριμένο πάχος, οπότε το δημιουργούμενο κομμάτι θα αποτελεί προσέγγιση των αρχικών δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.1. Όσο λεπτότερη είναι η κάθε στρώση, τόσο πλησιέστερα προς το αρχικό είναι το τελικά δημιουργούμενο κομμάτι. Η λειτουργία όλων των σύγχρονων εμπορικά διαθέσιμων μηχανών AM στηρίζεται στη στρωματική προσέγγιση, ενώ τα κύρια σημεία διαφοροποίησής τους είναι το υλικό που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται και συγκολλούνται μεταξύ τους οι στρώσεις. Οι παραπάνω διαφορές καθορίζουν στοιχεία του τελικού κομματιού όπως τη γεωμετρική ακρίβειά του (accuracy) και τις υλικές και μηχανικές ιδιότητές του. Καθορίζουν, επίσης, παράγοντες όπως τον χρόνο κατασκευής, την έκταση της



Εικόνα 1.1 Απεικόνιση ενός φλιτζανιού τσαγιού σε σύστημα CAD μαζί με επιπλέον απεικονίσεις, στις οποίες διακρίνεται η επίδραση που έχει στο κατασκευαστικό αποτέλεσμα το διαφορετικό πάχος στρώσης

απαιτούμενης μετεπεξεργασίας (post-processing), το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης μηχανής AM και το συνολικό κόστος της μηχανής και της όλης κατασκευαστικής διαδικασίας.

Σε τούτο το κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της προσθετικής κατασκευής και μια γενική περιγραφή της διαδικασίας της AM, καλύπτοντας όλο το φάσμα: από τον σχεδιασμό μέχρι τις εφαρμογές. Στη συνέχεια εξετάζονται τα αποτελέσματα της AM στον σχεδιασμό και την κατασκευή προϊόντων, ενώ γίνεται μια προσπάθεια ώστε να βοηθηθούμε να αντιληφθούμε τις αλλαγές που έχει επιφέρει στην όλη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων. Δεδομένου ότι η AM αποτελεί ένα, αυξανόμενης σημασίας, εργαλείο για την ανάπτυξη προϊόντων, στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται μερικά συναφή εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων.

1.2 Ποια είναι η χρήση των αντικειμένων AM;

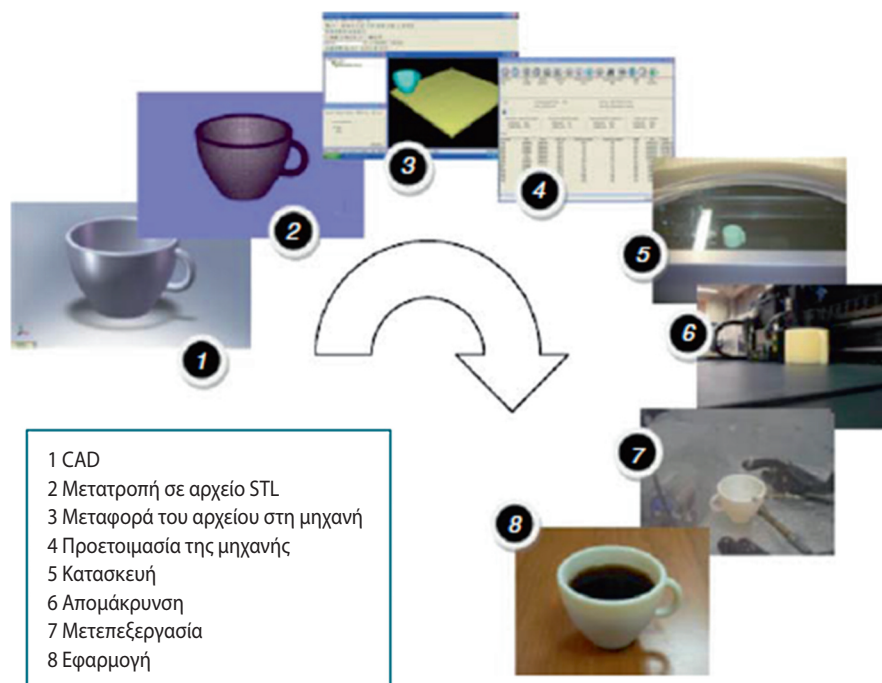
Το βιβλίο περιέχει πολλές εφαρμογές της AM. Θα διαπιστώσετε ότι ο αριθμός αυτών των εφαρμογών συνεχώς αυξάνεται καθώς οι διεργασίες AM εξελίσσονται και βελτιώνονται. Αρχικά, η AM χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία μοντέλων προϊόντων, με σκοπό την αναπαράσταση της γεωμετρικής μορφής τους κατά τη διαδικασία της ανάπτυξής τους. Είναι ευρέως γνωστό ότι τα φυσικά μοντέλα βοηθούν στο να αντιληφθούμε πλήρως τις προθέσεις του σχεδιαστή κατά τη φάση της ανάπτυξης της βασικής σχεδιαστικής ιδέας ενός προϊόντος (conceptual design), σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι τα απλά σχέδια στο χαρτί ή τα παραστατικότερα ψηφιακά μοντέλα. Ενώ τα σχέδια δημιουργούνται με μεγαλύτερη ευκολία και πολύ γρήγορα, τις περισσότερες φορές απαιτείται η κατασκευή φυσικού μοντέλου, προκειμένου να γίνει πλήρης αξιολόγηση μιας σχεδιαστικής λύσης ή πρότασης.

Καθώς τα χρησιμοποιούμενα υλικά, η γεωμετρική ακρίβεια και, γενικότερα, η όλη ποιότητα του κατασκευαστικού αποτελέσματος της AM βελτιώνονται και η τεχνολογία εξελίσσεται, η AM έπαψε να αποτελεί απλά και μόνο ένα εργαλείο κατασκευής μοντέλων. Πολύ γρήγορα τα φυσικά μοντέλα άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την παροχή πολύτιμων πληροφοριών αναφορικά μ' αυτό που είναι γνωστό ως τα «3 Fs» (form, fit, function), ήτοι: μορφή, συναρμογή, λειτουργία. Εν πρώτοις, τα μοντέλα χρησιμοποιούνταν, προκειμένου να κατανοήσουμε τη μορφή και τον γενικότερο σχεδιασμό ενός προϊόντος (μορφή – form). Η βελτίωση της ακρίβειας των διεργασιών AM επέτρεψε την κατασκευή μοντέλων με γεωμετρικές ανοχές τέτοιες, ώστε να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε δοκιμές συναρμολόγησης (συναρμογή – fit). Η βελτίωση των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών κατασκευής έδωσε τη δυνατότητα, με τον κατάλληλο χειρισμό, να μπορούμε να αξιολογήσουμε ένα αντικείμενο αναφορικά με το πώς τελικά θα λειτουργήσει (λειτουργία – function).

Ο ισχυρισμός ότι η AM είναι χρήσιμη μόνο για την κατασκευή φυσικών μοντέλων δεν είναι ακριβής και σίγουρα υποεκτιμά τις δυνατότητες της τεχνολογίας αυτής. Η AM συνδυαζόμενη διαδοχικά με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει σημαντικά τους χρόνους και τα κόστη ανάπτυξης ενός προϊόντος. Τελευταίως, κάποιες από τις τεχνολογίες αυτές έχουν γνωρίσει τέτοια εξέλιξη, που το κατασκευαστικό αποτέλεσμά τους είναι κατάλληλο για τελική χρήση. Τούτο εξηγεί για ποιον λόγο η ορολογία μετεξελίχθηκε από «ταχεία πρωτοτυποποίηση» σε «προσθετική κατασκευή». Επιπλέον, η χρήση της τεχνολογίας laser υψηλής ισχύος δίνει τη δυνατότητα άμεσης κατασκευής κομματιών από μια πληθώρα διαφορετικών μετάλλων, γεγονός που διευρύνει περισσότερο το φάσμα εφαρμογών της AM.

1.3 Γενικά η διεργασία της AM

Από την εικονική αναπαράσταση του συστήματος CAD μέχρι το τελικό φυσικό αποτέλεσμα της AM μεσολαβούν αρκετά βήματα. Διαφορετικά προϊόντα εμπλέκουν την AM με διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό βαθμό. Στα μικρά σε μέγεθος και σχετικά απλά προϊόντα, η AM χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή μοντέλων απεικόνισης της μορφής τους, ενώ στα μεγάλα σε μέγεθος και περισσότερο πολύπλοκα προϊόντα, που παρουσιάζουν μεγαλύτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον από τη σκοπιά του μηχανικού, η AM εμπλέκεται σε πολλές διαφορετικές φάσεις της επαναληπτικής διαδικασίας σχεδιασμού και ανάπτυξής τους. Επιπλέον, στις αρχικές φάσεις της διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος, κατά τη διάρκεια των οποίων απαιτούνται αδρά μόνο φυ-



Εικόνα 1.2 Η γενική διεργασία AM, από το σύστημα CAD ως το τελικό κομμάτι: Παρουσιάζονται και τα οκτώ βήματα

σικά μοντέλα, η AM χρησιμοποιείται μόνο λόγω της κατασκευαστικής ταχύτητάς της. Σε επόμενες φάσεις της διαδικασίας τα απαιτούμενα κομμάτια πιθανόν να χρειάζονται προσεκτικό καθάρισμα και μετεπεξεργασία (όπως επιφανειακό γυαλοχάρτισμα και προετοιμασία, καθώς και βαφή), προτού να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν. Στην περίπτωση αυτή η AM είναι χρήσιμη, διότι μπορεί να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε μορφολογική πολυπλοκότητα χωρίς χρησιμοποίηση ειδικών εργαλείων. Στα επόμενα θα εξετάσουμε λεπτομερώς τα διάφορα στάδια της διεργασίας της AM. Συνοψίζοντας όμως, οι περισσότερες διεργασίες AM περιλαμβάνουν, σε κάποιο βαθμό τουλάχιστον, τα επόμενα οκτώ βήματα (όπως παρουσιάζονται στην Εικ. 1.2).

1.3.1 Βήμα 1: CAD

Όλα τα κομμάτια που κατασκευάζονται με AM αρχίζουν από ένα ψηφιακό μοντέλο με το οποίο περιγράφεται η εξωτερική γεωμετρία τους. Προς τούτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν οποιοδήποτε επαγγελματικό λογισμικό CAD στερεάς μοντελοποίησης, το αποτέλεσμα, όμως, του οποίου πρέπει οπωσδήποτε να είναι μια 3D στερεά ή επιφανειακή αναπαράσταση. Συσκευές αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering) (π.χ. laser και οπτικής σάρωσης) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αυτής της αναπαράστασης.

1.3.2 Βήμα 2: Μετατροπή σε αρχείο STL

Σχεδόν όλες οι μηχανές AM δέχονται ως δεδομένα αρχεία της μορφής STL, που έχει καθιερωθεί ως το de facto πρότυπο. Όλα σχεδόν τα συστήματα CAD σήμερα μπορούν να εξαγάγουν δεδομένα σε μορφή αρχείου STL. Το αρχείο αυτό περιγράφει την κλειστή εξωτερική επιφάνεια του αρχικού μοντέλου CAD και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των στρώσεων.

1.3.3 Βήμα 3: Μεταφορά στη μηχανή AM και επεξεργασία του αρχείου STL

Το αρχείο STL που περιγράφει το κομμάτι πρέπει να μεταφερθεί στη μηχανή AM. Εδώ, θα πρέπει το αρχείο να υποστεί μια σχετική επεξεργασία, ώστε το κομμάτι να έχει το κατάλληλο μέγεθος για την κατασκευή του, θέση και προσανατολισμό.

1.3.4 Βήμα 4: Προετοιμασία της μηχανής

Η μηχανή AM πρέπει να προετοιμαστεί κατάλληλα, προτού να αρχίσει η διαδικασία κατασκευής. Η προετοιμασία αυτή αναφέρεται σε κατασκευαστικές παραμέτρους όπως είναι οι περιορισμοί που εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής, η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας, το πάχος της στρώσης, οι διάφορες επιλογές χρονισμού κ.λπ.

1.3.5 Βήμα 5: Κατασκευή

Η κατασκευή του κομματιού είναι κυρίως μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που εκτελείται χωρίς ουσιαστική επιτήρηση. Απαιτείται στοιχειώδης μόνο παρακολούθηση της μηχανής από καιρού εις καιρόν, ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι δεν έχει συμβεί κάποιο λάθος, όπως, για παράδειγμα, να έχει εξαντληθεί το υλικό κατασκευής ή να υπάρχει κάποιο σφάλμα στην ηλεκτρική τροφοδοσία της μηχανής και το λογισμικό κ.λπ.

1.3.6 Βήμα 6: Απομάκρυνση

Όταν η μηχανή AM ολοκληρώσει την κατασκευή, το κομμάτι πρέπει να απομακρυνθεί από τη μηχανή. Τούτο απαιτεί, κατά κάποιο τρόπο, αλληλεπίδραση με τη μηχανή, η οποία μπορεί να διαθέτει ασφαλιστικές δικλίδες/μηχανισμούς που να εξασφαλίζουν, για παράδειγμα, ότι η θερμοκρασία της είναι αρκούντως χαμηλή ή ότι δεν βρίσκονται σε κίνηση κάποια μέρη της.

1.3.7 Βήμα 7: Μετεπεξεργασία

Όταν τα κομμάτια απομακρυνθούν από τη μηχανή μπορεί να μην είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν αμέσως και να χρειάζονται κάποιο επιπλέον καθάρισμα. Τα κομμάτια ενδέχεται κατά το στάδιο αυτό να μη διαθέτουν την απαιτούμενη μηχανική αντοχή ή να έχουν ακόμη τα στηρίγματα τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν. Τούτο πολλές φορές απαιτεί χρόνο, καθώς και προσεκτική χειρωνακτική εργασία από έμπειρο προσωπικό.

1.3.8 Βήμα 8: Εφαρμογή

Στο στάδιο αυτό τα κομμάτια μπορεί να είναι έτοιμα για χρήση. Εντούτοις, είναι δυνατόν να μην έχουν την αποδεκτή ποιότητα για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα και να απαιτείται περαιτέρω μικροεπεξεργασία. Για παράδειγμα, μπορεί να απαιτείται αστάρωμα ή βαφή, ώστε να έχουν μια αποδεκτή επιφανειακή υφή και φινίρισμα. Εάν το απαιτούμενο φινίρισμα είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, τότε οι επεξεργασίες αυτές μπορεί να είναι περίπλοκες και χρονοβόρες. Μπορεί, επίσης, τα κομμάτια να πρέπει να συναρμολογηθούν μαζί με άλλα μηχανικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα και κομμάτια, προκειμένου να σχηματίσουν το τελικό μοντέλο ή προϊόν.

Έχοντας εξαντλήσει την παρουσίαση όλων των σταδίων που συνιστούν την AM, είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτό ότι οι μηχανές AM απαιτούν σχολαστική συντήρηση. Επειδή πολλές από τις μηχανές AM χρησιμοποιούν ευαίσθητα laser ή τεχνολογία εκτυπωτών, δεν πρέπει να λειτουργούν σε ρυπαρό ή θορυβώδες περιβάλλον και χωρίς προσεκτική παρακολούθηση. Μολονότι έχουν γενικά σχεδιαστεί για να λειτουργούν χωρίς επιτήρηση, είναι πολύ σημαντικό να έχουν προβλεφτεί τακτικοί έλεγχοι στο πλάνο συντήρησής τους, με το επίπεδο συντήρησης να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία της κάθε μηχανής AM. Πρέπει, ακόμα, να τονιστεί ότι τα περισσότερα από τα υπάρχοντα διεθνή πρότυπα υλικών και διαδικασιών δεν καλύπτουν τη διεργασία της AM, γεγονός που δικαιολογεί το ιδιαίτερο ενδιαφέρον της τεχνικής επιτροπής F42 της ASTM αναφορικά με τις τεχνολογίες της AM, η οποία καταβάλλει προσπάθειες, προκειμένου να αντιμετωπιστεί και να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα [1]. Πολλοί προμηθευτές όμως, συστήνουν στους πελάτες τους περιοδικούς ελέγχους των μηχανών, σύμφωνα με συγκεκριμένα πλάνα συντήρησης, ώστε να είναι εξασφαλισμένο ότι αυτές λειτουργούν εντός των αποδεκτών ορίων.

Εκτός από τις μηχανές, τα υλικά κατασκευής μπορεί να απαιτούν και αυτά ειδική μεταχείριση. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν ως υλικό κατασκευής ορισμένες από τις διεργασίες AM έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής, ενώ ίσως να χρειάζεται να φυλάσσεται υπό ειδικές συνθήκες, ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις. Πρέπει, εκτός των άλλων, να αποφεύγεται η έκθεσή τους στην υγρασία, το πολύ φως και, εν γένει, σε ρύπους. Στις περισσότερες διεργασίες AM το υλικό κατασκευής μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε περισ-

σότερες από μία κατασκευαστικές εργασίες. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση του ίδιου υλικού σε πολλές διαφορετικές κατασκευαστικές εργασίες είναι δυνατόν να οδηγήσει σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων του. Προκειμένου, λοιπόν, να κατασκευάζονται αντικείμενα με καθορισμένη και σταθερή ποιότητα υλικού, μέσω ανακυκλωμένης πρώτης ύλης, θα πρέπει να ακολουθείται αυστηρά συγκεκριμένη διαδικασία.

1.4 Γιατί χρησιμοποιούμε τον όρο «προσθετική κατασκευή» (Additive Manufacturing);

Μέχρι τώρα θα έχετε ήδη αντιληφθεί ότι η τεχνολογία στην οποία αναφερόμαστε είναι εκείνη που χρησιμοποιεί προσθετική διεργασία, συνδέοντας υλικό, στρώση με στρώση. Ο όρος «προσθετική κατασκευή» –ή AM– φαίνεται ότι περιγράφει τη συγκεκριμένη τεχνική πολύ ικανοποιητικά· χρησιμοποιούνται, όμως, και άλλοι όροι. Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε και άλλους όρους που έχουν χρησιμοποιηθεί για να περιγραφεί η τεχνολογία αυτή, προσπαθώντας έτσι να εξηγήσουμε εμμέσως τον γενικό σκοπό και τα οφέλη της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

1.4.1 Αυτοματοποιημένη κατασκευή (Automated Fabrication – Autofab)

Ο όρος αυτός καθιερώθηκε στο ευρύ κοινό από τον Marshall Burns στο βιβλίο του με τον ίδιο ακριβώς τίτλο, το οποίο ήταν ένα από τα πρώτα συγγράμματα που κάλυπτε την τεχνολογία αυτή στις αρχές της δεκαετίας του 1990 [2]. Στο βιβλίο δίνεται έμφαση στην αυτοματοποίηση της κατασκευής προϊόντων, που έμμεσα συνεπάγεται απλοποίηση της όλης διαδικασίας, καθώς και αφαίρεση της όποιας ανθρώπινης παρέμβασης σ' αυτή. Υπολογιστές και μικροελεγκτές (microcontrollers) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ενεργοποιητών (actuators), αλλά και για την παρακολούθηση των τιμών των μεταβλητών του συστήματος. Ο όρος αυτός μπορεί εξίσου να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή άλλων ειδών CNC κέντρων κατεργασιών, δεδομένου ότι δεν γίνεται καμιά απευθείας αναφορά στον τρόπο με τον οποίο δομούνται τα κομμάτια, ούτε και στον αριθμό των σταδίων από τα οποία πρέπει να περάσουν προτού να κατασκευαστούν, παρόλο που ο Burnes έχει εστιάσει στις ίδιες ακριβώς τεχνολογίες που περιγράφονται και στο παρόν σύγγραμμα. Μερικές σημαντικές τεχνολογίες AM έχουν παραληφθεί, δεδομένου ότι αυτές εμφανίστηκαν μετά τη συγγραφή του βιβλίου του.

1.4.2 Κατασκευή ελεύθερης μορφής ή κατασκευή ελεύθερης μορφής στερεού (Freeform Fabrication or Solid Freeform Fabrication)

Η έμφαση εδώ δίνεται στην ικανότητα των διεργασιών AM να κατασκευάζουν στερεά αντικείμενα που έχουν γεωμετρικά πολύπλοκη μορφή. Μερικές φορές το πλεονέκτημα αυτών των τεχνολογιών περιγράφεται μέσω της φράσης «πολυπλοκότητα χωρίς κόστος» («complexity for free»), κάτι που υπονοεί ότι είναι εντελώς αδιάφορο το σχήμα του αντικειμένου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Ο χρόνος και η προσπάθεια που θα απαιτηθούν για την κατασκευή στη μηχανή ενός απλού κύβου ή ενός κυλίνδρου είναι περίπου ίδιοι με εκείνους που θα δαπανηθούν για την κατασκευή ενός πολύπλοκου ανατομικού κομματιού ή ενός οργάνου που έχει ανάλογο όγκο. Η αναφορά στην «ελεύθερη μορφή» («freeform») παραπέμπει στο ότι η κατασκευαστική διεργασία δεν εξαρτάται καθόλου από τη μορφή του κατασκευαζόμενου κομματιού. Το χαρακτηριστικό αυτό τις διαφοροποιεί από τις περισσότερες συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες, οι οποίες περιπλέκονται σημαντικά καθώς αυξάνει η γεωμετρική πολυπλοκότητα του κομματιού.

1.4.3 Προσθετική κατασκευή ή στρωματική κατασκευή (Additive Manufacturing or Layer-Based Manufacturing)

Οι όροι αυτοί παραπέμπουν στον τρόπο με τον οποίο στις διεργασίες AM δημιουργούνται/δομούνται τα κομμάτια, δηλαδή με την προσθήκη στρώσεων υλικού. Τούτο είναι εντελώς αντίθετο μ' αυτό που συμβαίνει στις κατεργασίες κοπής, όπου υλικό αφαιρείται από την αρχική μάζα της πρώτης ύλης. Πρέπει να σημειωθεί ότι μερικές από τις τεχνολογίες που περιγράφουμε δεν είναι αμιγώς προσθετικές, υπό την έννοια ότι μπορεί σε

κάποιο σημείο να προσθέτουν υλικό, σε κάποιο άλλο, όμως, στάδιο της διεργασίας να χρησιμοποιούν και αφαιρετικές τεχνικές. Σήμερα όλες οι εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες λειτουργούν με βάση τον στρωματικό τρόπο. Εντούτοις, τίποτα δεν υποδηλώνει ότι ο στρωματικός τρόπος δημιουργίας του κομματιού είναι υποχρεωτικός και ότι στο μέλλον δεν θα εμφανιστούν συστήματα που θα προσθέτουν υλικό με διαφορετικούς τρόπους, που, όμως, πάλι θα ανήκουν στις κατηγορίες των τεχνολογιών που εξετάζουμε στο παρόν σύγγραμμα. Μικρή παραλλαγή του όρου «προσθετική κατασκευή» – «Additive Manufacturing» στην Αγγλική – αποτελεί ο όρος «Additive Fabrication», που έχει εισαχθεί από τον Terry Wohlers, έναν καθιερωμένο στον συγκεκριμένο τεχνολογικό χώρο βιομηχανικό σύμβουλο, ο οποίος μάλιστα συντάσσει μια εγκυρότατη ετήσια έκθεση αναφορικά με την κατάσταση του συγκεκριμένου βιομηχανικού κλάδου [3]. Ωστόσο, οι περισσότεροι από τους απασχολούμενους επαγγελματίες στον αντίστοιχο κλάδο προτιμούν τον όρο «manufacturing» αντί του «fabrication», θέλοντας να αποφύγουν τον ελαφρά αρνητικό συνειρμό του «fabrication», ότι δηλαδή το κατασκευαζόμενο κομμάτι είναι κάποιο «πρωτότυπο» και όχι το τελικό αντικείμενο. Επίσης, σε ορισμένες περιοχές του κόσμου ο όρος «fabrication» έχει συνδεθεί με την κάμψη μεταλλικών φύλλων και τις ανάλογες μηχανουργικές κατεργασίες, οπότε οι προερχόμενοι από τις αντίστοιχες περιοχές αντιδρούν στη χρήση του όρου «fabrication» για τις τεχνολογίες που εξετάζουμε εδώ. Έτσι η χρήση του όρου «Additive Manufacturing» – «προσθετική κατασκευή» κερδίζει συνεχώς έδαφος· ο ίδιος ο Wohlers δε τον έχει πλέον υιοθετήσει στις πλέον πρόσφατες δημοσιεύσεις και παρουσιάσεις του.

1.4.4 Στερεολιθογραφία ή 3D εκτύπωση (Stereolithography or 3D Printing)

Οι δύο αυτοί όροι είχαν αρχικά χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν συγκεκριμένες μηχανές. Η στερεολιθογραφία (stereolithography – SL) έχει εισαχθεί από την αμερικανική εταιρεία 3D Systems [4, 5], ενώ ο όρος 3D εκτύπωση (3D printing) έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί από ερευνητές στο MIT [6], όπου και επινοήθηκε η συγκεκριμένη τεχνολογία, που στηρίζεται σε αρχή παρόμοια με εκείνη της εκτύπωσης ink-jet. Και οι δύο όροι αναφέρονται στις διδιάστατες διεργασίες της λιθογραφίας και της εκτύπωσης, τις οποίες έχουν προσπαθήσει να επεκτείνουν στην τρίτη διάσταση. Δεδομένου ότι οι περισσότεροι άνθρωποι είναι εξοικειωμένοι με την τεχνολογία της εκτύπωσης, η ιδέα τού να τυπώνει κάποιος ένα φυσικό τριδιάστατο αντικείμενο δεν φαίνεται παράλογη. Πολλοί θεωρούν ότι ο όρος «τριδιάστατη (3D) εκτύπωση» θα επικρατήσει τελικά για την περιγραφή των τεχνολογιών της AM. Τούτο επιβεβαιώνεται από το έντονο ενδιαφέρον που έχουν επιδείξει τα τελευταία χρόνια τα μέσα ενημέρωσης για τη συγκεκριμένη τεχνολογία, ενώ είναι πιθανότερο το ευρύ κοινό να γνωρίζει τον όρο 3D εκτύπωση παρά οποιονδήποτε άλλο όρο που αναφέρεται στο παρόν βιβλίο.

1.4.5 Ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping)

Ο όρος «ταχεία πρωτοτυποποίηση» καθιερώθηκε ακριβώς λόγω της διαδικασίας (της κατασκευής πρωτοτύπων) που η τεχνολογία αυτή ήρθε να βελτιώσει ή να αντικαταστήσει. Τόσο οι κατασκευαστές όσο και οι σχεδιαστές προϊόντων θεωρούσαν ότι η κατασκευή πρωτοτύπων αποτελεί μια σύνθετη, ανιαρή και δαπανηρή διαδικασία κυρίως κατά τις πρώτες δημιουργικές φάσεις της διαδικασίας ανάπτυξης και εισαγωγής ενός νέου προϊόντος. Η τεχνολογία RP αποδείχτηκε ότι μπορεί να επιταχύνει σε σημαντικό βαθμό αυτή τη διαδικασία, οπότε υιοθετήθηκε και ο συγκεκριμένος αυτός όρος. Σήμερα, όμως, οι χρήστες και οι δημιουργοί της τεχνολογίας αυτής έχουν αντιληφθεί ότι η AM μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σημαντικότερες εφαρμογές πέραν της κατασκευής πρωτοτύπων.

Οι σημαντικές βελτιώσεις που έχουν επιτευχθεί στην κατασκευαστική ακρίβεια και τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής διευρύνουν τους ορίζοντες εφαρμογής της τεχνολογίας όπως για παράδειγμα στην εκτέλεση δοκιμών, την κατασκευή εργαλείων παραγωγής, την παραγωγή τελικών προϊόντων, καθώς και άλλους τομείς πολύ πέραν αυτού που σημαίνει η λέξη «πρωτοτυποποίηση». Όμως, και οι περισσότεροι από τους όρους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως δεν είναι εντελώς πετυχημένοι. Υπάρχει πάντα η πιθανότητα πολλοί να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν τον όρο «RP», χωρίς βεβαίως να εννοούν αποκλειστικά την κατασκευή πρωτοτύπων κατά τρόπο ανάλογο μ' αυτό που συμβαίνει με την IBM, η οποία κατασκευάζει πληθώρα προϊόντων που δεν σχετίζονται καθόλου με μηχανές γραφείου, ή την 3M, που παράγει προϊόντα εκτός του μεταλλευτικού βιομηχανικού κλάδου. Θα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να δούμε πώς θα εξελιχθεί η συγκεκριμένη ορολογία στο μέλλον.

Σε όλο το βιβλίο, έχουμε, κατά το δυνατόν, χρησιμοποιήσει τον όρο «προσθετική κατασκευή» ή τη συντομογραφία του, AM, ως έναν γενικό όρο, προκειμένου να περιγράψουμε την ομάδα των τεχνολογιών που παρουσιάζουμε. Πρέπει να τονιστεί ότι, στη βιβλιογραφία, οι περισσότεροι από τους όρους που παρουσιάσαμε προηγουμένως εμφανίζονται να εναλλάσσονται μεταξύ τους· η χρήση, όμως, διαφορετικής ορολογίας μπορεί να δίνει έμφαση στην αντίστοιχη κάθε φορά εφαρμογή της τεχνολογίας. Έτσι, ο αναγνώστης τόσο του βιβλίου αυτού όσο και γενικότερα της σχετικής βιβλιογραφίας, προκειμένου να αντιληφθεί πλήρως το νόημα του κάθε όρου, πρέπει να αναφερθεί στο γενικότερο περιεχόμενο και τα συμφραζόμενα.

1.5 Τα πλεονεκτήματα της AM

Πολλοί ισχυρίζονται ότι η τεχνολογία αυτή έχει φέρει επανάσταση στην ανάπτυξη και την παραγωγή προϊόντων. Κάποιοι έχουν προχωρήσει ακόμα παραπέρα, ισχυριζόμενοι ότι η παραγωγή προϊόντων, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα, θα πάψει να υπάρχει εάν ακολουθήσουμε την AM μέχρι το απώτερο σημείο της εξέλιξής της, καθώς επίσης και ότι βιώνουμε μια νέα βιομηχανική επανάσταση. Συχνά θεωρούμε ότι η AM είναι μία από τις πολλές επαναστατικές τεχνολογίες που προκαλούν αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζουμε τα προϊόντα και ιδρύουμε επιχειρήσεις. Θα θέλαμε, επομένως, να αναρωτηθούμε: «Γιατί συμβαίνει αυτό;», «Τι είναι εκείνο που διαθέτει η AM, και το οποίο ενθουσιάζει και εμπνέει κάποιον σε τέτοιο σημείο, ώστε να προβαίνει στις παραπάνω δηλώσεις;».

Κατ' αρχάς, ας θεωρήσουμε «ταχύ» τον χαρακτήρα αυτής της τεχνολογίας. Το πλεονέκτημα της ταχύτητας δεν αναφέρεται μόνο στον χρόνο που δαπανάται για την κατασκευή ενός κομματιού. Η επιτάχυνση της όλης διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι χρησιμοποιούμε υπολογιστές από την αρχή μέχρι το τέλος. Επειδή ως σημείο εκκίνησης χρησιμοποιείται το 3D CAD σύστημα και η μεταφορά των δεδομένων στη μηχανή AM είναι απρόσκοπτη, υπάρχει μικρότερος προβληματισμός αναφορικά με τη μετατροπή των δεδομένων ή την ερμηνεία του σχεδιαστικού στόχου. Όπως ακριβώς τα 3D CAD συστήματα έχουν τόσο εξελιχθεί ώστε «παίρνεις αυτό ακριβώς που βλέπεις» (What You See Is What You Get – WYSIWYG), αντίστοιχα με την AM θα μπορούσαμε να πούμε ότι «κατασκευάζεις αυτό ακριβώς που βλέπεις» (What You See Is What You Build – WYSIWYB).

Το απρόσκοπτο στην όλη διαδικασία αναφέρεται και στη μείωση ακριβώς των σταδίων της διαδικασίας. Άσχετα με την πολυπλοκότητα του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί, η κατασκευή στη μηχανή AM πραγματοποιείται σε ένα και μοναδικό βήμα. Οι περισσότερες από τις άλλες κατασκευαστικές διεργασίες θα απαιτούσαν την εκτέλεση πολλαπλών και επαναληπτικών βημάτων. Καθώς εντάσσουμε περισσότερα χαρακτηριστικά στην προτεινόμενη σχεδιαστική λύση, ο αριθμός των βημάτων αυτών μπορεί να αυξηθεί δραματικά. Ακόμη και μια μικρή σχετικά σχεδιαστική αλλαγή μπορεί να επιφέρει σημαντική αύξηση στον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής με συμβατικές μεθόδους. Η AM, επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί αποτελεσματικό τρόπο υπολογισμού του χρόνου κατασκευής ενός μοντέλου, ανεξάρτητα από το ποιες αλλαγές θα γίνουν κατά τις αρχικές διαμορφωτικές φάσεις της ανάπτυξης ενός προϊόντος.

Παρόμοια, ο αριθμός των απαιτούμενων διαδικασιών και πόρων μπορεί να μειωθεί σημαντικά με την AM. Εάν ένας επιδέξιος τεχνίτης αναλάμβανε την κατασκευή ενός πρωτοτύπου με βάση μια σειρά σχεδίων CAD, θα ανακάλυπτε ότι για την ολοκλήρωση της κατασκευής του θα έπρεπε να ακολουθήσει μια σειρά από πολύ συγκεκριμένα βήματα. Τούτο είναι απόρροια του γεγονότος ότι πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα πλήθος από μεθόδους και τεχνικές που ξεκινούν από την κατεργασία με το χέρι και μέσω τεχνικών χύτευσης και διαμόρφωσης καταλήγουν σε CNC κατεργασία. Η κατεργασία με το χέρι και άλλες ανάλογες τεχνικές είναι ανιαρές, επίπονες και συνοδεύονται από λάθη. Η τεχνική της χύτευσης είναι δύσκολη και μπορεί να δημιουργεί πολλά απορρίμματα, προφανώς δε απαιτεί την κατασκευή ενός ή περισσότερων καλουπιών. Η κατεργασία με εργαλειομηχανές CNC απαιτεί λεπτομερή και προσεκτικό προγραμματισμό, καθώς και μια διαδοχικών σταδίων προσέγγιση, που πολύ πιθανόν να απαιτεί με τη σειρά της την κατασκευή ιδιοσυσκευών συγκράτησης. Προϋπόθεση για όλα τα παραπάνω είναι αφενός μεν ότι οι προαναφερθείσες κατασκευαστικές μεθοδολογίες είναι άμεσα διαθέσιμες, αφετέρου δε ότι οι τεχνίτες τις γνωρίζουν και είναι σε θέση να τις εκτελέσουν με επιτυχία.

Η AM μπορεί να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να αποφύγουμε, ή τουλάχιστον να απλοποιήσουμε, πολλές από εκείνες τις διαδικασίες οι οποίες αποτελούνται από πολλές φάσεις. Η AM επικουρούμενη από άλλες τεχνι-

κές όπως η χύτευση πλαστικών με εύκαμπτα καλούπια σιλικόνης, η διάτρηση, η στίλβωση, η λείανση κ.λπ., είναι σε θέση να παράγει μεγάλη ποικιλία κομματιών με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά. Μηχανουργεία που έχουν υιοθετήσει τις τεχνολογίες AM είναι σαφέστερα καθαρότερα, έχουν βελτιώσει τη ροή της εργασίας τους και είναι σε θέση να αναλάβουν τη διεκπεραίωση μεγαλύτερης ποικιλίας εργασιών από ό,τι στο παρελθόν.

1.6 Η διαφορά της AM από την κατεργασία CNC

Όπως αναφέρθηκε στην παρουσίαση της αυτοματοποιημένης κατασκευής, η AM έχει συγγενικό DNA με την τεχνολογία της κατεργασίας CNC. Η τεχνολογία CNC βασίζεται στους υπολογιστές και χρησιμοποιείται για την κατασκευή προϊόντων, ενώ διαφέρει κυρίως στο ότι, κατά κύριο λόγο, είναι αφαιρετική και όχι προσθετική διεργασία· απαιτεί δε ως πρώτη ύλη μια μάζα υλικού που έχει ανάλογες διαστάσεις με εκείνες του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται διάφορα θέματα αναφορικά με τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί μια σύγκριση μεταξύ των κατεργασιών CNC και της AM. Σκοπός μας με την ενότητα αυτή δεν είναι το να επηρεάσουμε κάποιον στην επιλογή της μίας ή της άλλης διεργασίας, αλλά περισσότερο το να προσδιορίσουμε πώς μπορούν να εφαρμοστούν οι διεργασίες αυτές στις διάφορες φάσεις της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντων ή στους διαφορετικούς τύπους προϊόντων.

1.6.1 Υλικό

Αρχικά η AM αναπτύχθηκε με βάση τα πολυμερή υλικά, τα βιομηχανικά κεριά και τα φύλλα χαρτιού. Στη συνέχεια ακολούθησαν τα συνθετικά υλικά, τα μέταλλα και τα κεραμικά. Οι εργαλειομηχανές CNC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατεργασία μαλακών υλικών, όπως το MDF (medium-density fiberboard), αφρώδη υλικά και κεριά που επιδέχονται κατεργασία, ακόμη δε και κάποια πολυμερή. Όμως, η χρήση εργαλειομηχανών CNC για την κατεργασία μαλακών υλικών περιορίζεται κυρίως στην προετοιμασία μοδέλων/προτύπων που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες με πολλές φάσεις, όπως η χύτευση μετάλλων. Όταν η κατεργασία CNC χρησιμοποιείται για την κατασκευή τελικών προϊόντων, παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα με σκληρά, σχετικά ψαθυρά υλικά, όπως διάφοροι χάλυβες και άλλα κράματα μετάλλων, δημιουργώντας αντικείμενα με υψηλή διαστασιακή ακρίβεια και αυστηρά καθορισμένες ιδιότητες. Αντίθετα, κομμάτια που έχουν κατασκευαστεί με AM μπορεί να εμφανίζουν εσωτερικά κενά ή ανισοτροπία, ελαττώματα που οφείλονται στον προσανατολισμό κατασκευής τους, τις τιμές των κατασκευαστικών παραμέτρων ή τον τρόπο εισαγωγής του σχεδίου τους στη μηχανή AM. Παράλληλα, κομμάτια κατασκευασμένα από εργαλειομηχανές CNC είναι συνήθως περισσότερο ομοιογενή, με προβλέψιμη ποιότητα.

1.6.2 Ταχύτητα

Η υψηλών ταχυτήτων κατεργασία CNC (high-speed machining) αφαιρούν υλικό ταχύτερα από ό,τι η AM μπορεί να προσθέσει υλικό ανάλογου όγκου. Τούτο, όμως, είναι ένα μέρος μόνο της πραγματικότητας, καθώς η AM μπορεί να κατασκευάσει ένα κομμάτι σε μία και μοναδική φάση. Οι εργαλειομηχανές CNC απαιτούν σημαντική προετοιμασία και προγραμματισμό της διεργασίας, κυρίως όταν τα προς κατασκευήν αντικείμενα έχουν πολύπλοκο σχήμα. Αναφορικά με την ταχύτητα, λοιπόν, θα πρέπει να θεωρήσουμε τον συνολικό χρόνο που δαπανάται από την κάθε διεργασία και όχι απλά και μόνο τον χρόνο που αντιστοιχεί στην αφαίρεση ή την πρόσθεση του αντίστοιχου υλικού. Οι κατεργασίες CNC είναι συνήθως κατασκευαστικές διεργασίες πολλών φάσεων, απαιτούν δε την επανατοποθέτηση ή την επαναμεταφορά του κατασκευαζόμενου κομματιού εντός της ίδιας εργαλειομηχανής ή τη χρησιμοποίηση περισσότερων της μίας εργαλειομηχανών. Η κατασκευή ενός κομματιού σε μια μηχανή AM μπορεί να διαρκέσει μερικές μόνο ώρες, ενώ πολύ συχνά η σύγχρονη κατασκευή πολλαπλών αντικειμένων δρομολογείται ως μια μεμονωμένη εργασία AM. Το φινιρίσμα του κομματιού είναι δυνατόν να διαρκέσει μερικές ημέρες εάν υπάρχει η απαίτηση για καλή τελική ποιότητα. Η εκτέλεση της αντίστοιχης κατεργασίας ακόμη και σε 5-αξόνων υψηλών ταχυτήτων εργαλειομηχανή CNC θα μπορούσε να διαρκέσει εβδομάδες, παρουσιάζοντας σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας αναφορικά με τον εκτιμώμενο χρόνο ολοκλήρωσής της.

1.6.3 Πολυπλοκότητα

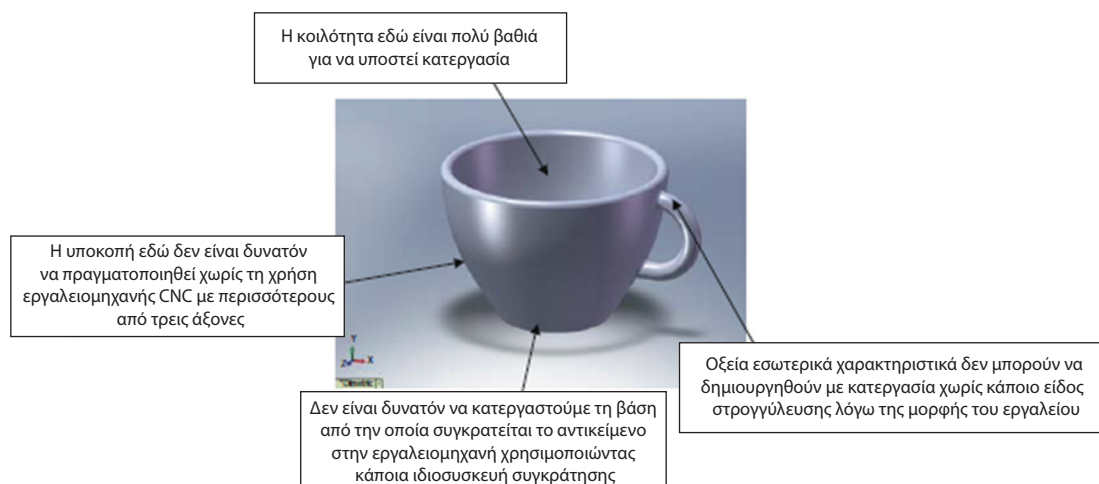
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πλεονέκτημα της AM ως προς τις κατεργασίες CNC είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνει η γεωμετρική πολυπλοκότητα του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί. Εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί εργαλειομηχανή CNC για την κατασκευή ενός κομματιού απευθείας σε μία μοναδική μεμονωμένη εργασία, τότε είναι πολύ πιθανόν να υπάρχουν κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα είναι αδύνατον να κατασκευαστούν. Επειδή το κοπτικό εργαλείο της εργαλειομηχανής είναι τοποθετημένο στην άτρακτό της, πολύ πιθανόν να υπάρχουν προβλήματα προσβασιμότητας ή σύγκρουσης, τα οποία να εμποδίζουν την κατάλληλη τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου στην επιφάνεια που πρέπει να τύχει κατεργασίας. Τέτοιοι περιορισμοί δεν υφίστανται στη AM, οπότε υποκοπές και εσωτερικά χαρακτηριστικά μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν χωρίς ιδιαίτερο προγραμματισμό της διεργασίας. Υπάρχουν, επίσης, αντικείμενα που είναι αδύνατον να κατασκευαστούν με κατεργασίες CNC, εκτός και αν διαιρεθούν σε ξεχωριστά κομμάτια τα οποία θα επανασυνδεθούν σε κάποια επόμενη φάση. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, την περίπτωση που έχουμε να κατεργαστούμε ένα πλοίο το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό ενός μπουκαλιού. Πώς είναι δυνατόν να κατεργαστείτε το πλοίο ενόσω βρίσκεται τοποθετημένο στο εσωτερικό του μπουκαλιού; Το πιθανότερο είναι να κατεργαστείτε το καθένα ξεχωριστά και να επινοήσετε έναν τρόπο για να τα συναρμολογήσετε ή να συνδέσετε μεταξύ τους. Με την AM μπορείτε να κατασκευάσετε συγχρόνως το πλοίο και το μπουκάλι το ένα μέσα στο άλλο. Ένας ειδικός, επομένως, στις κατεργασίες CNC πρέπει να μελετήσει και να αναλύσει κάθε κομμάτι προτού ξεκινήσει την κατασκευή του, ώστε να είναι εξασφαλισμένο ότι, πράγματι, το κομμάτι μπορεί να κατασκευαστεί και να καθορίσει ποιες ακριβώς τεχνικές πρέπει να χρησιμοποιήσει. Μολονότι, βεβαίως, είναι δυνατόν να υπάρχουν αντικείμενα που δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με την AM, μια τέτοια περίπτωση είναι σαφέστατα λιγότερο πιθανή, ενώ γενικά υπάρχουν τρόποι που θα μπορούσαμε να ξεπεράσουμε μια τέτοια κατάσταση χωρίς μεγάλη δυσκολία.

1.6.4 Ακρίβεια

Οι μηχανές AM λειτουργούν με γεωμετρική ανάλυση (resolution) που αγγίζει τις μερικές δεκάδες μικρά. Είναι δε σύνηθες να έχουν διαφορετική διαστασιολογική ανάλυση κατά μήκος των διαφορετικών ορθογωνίων αξόνων. Κατά κανόνα, ο κάθετος άξονας κατασκευής που αντιστοιχεί στο πάχος της στρώσης έχει χαμηλότερη ανάλυση συγκριτικά με τους άλλους δύο άξονες που προσδιορίζουν το επίπεδο κατασκευής. Η ακρίβεια στο κατασκευαστικό επίπεδο καθορίζεται από τη διάταξη τοποθέτησης του κατασκευαστικού μηχανισμού, η οποία περιλαμβάνει κάποιου είδους μικρομειωτήρες στροφών και μικροκινητήρες. Ο μηχανισμός, επίσης, αυτός καθορίζει και το ελάχιστο μέγεθος των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που είναι δυνατόν να επιτευχθούν. Για παράδειγμα, η SL χρησιμοποιεί μια δέσμη laser ως τμήμα του κατασκευαστικού της μηχανισμού, η τοποθέτηση/σκόπευση της οποίας επιτυγχάνεται συνήθως με τη βοήθεια κατοπτρικών γαλβανομετρικών οδηγών. Η ανάλυση των γαλβανομέτρων καθορίζει τις συνολικές διαστάσεις των αντικειμένων που κατασκευάζονται, ενώ η διάμετρος της δέσμης laser καθορίζει το ελάχιστο πάχος τοιχώματος. Η ακρίβεια των εργαλειομηχανών CNC, από την άλλη, καθορίζεται κυρίως από μια αντιστοιχη ανάλυση στην τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου, η οποία, όμως, εδώ είναι η ίδια και ως προς τους τρεις ορθογώνιους άξονες, καθώς και από τη διάμετρο του περιστροφικού κοπτικού εργαλείου. Υπάρχουν παράγοντες που προσδιορίζονται από τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, όπως η ακτίνα των εσωτερικών γωνιών. Το πάχος του τοιχώματος, όμως, είναι δυνατόν να είναι μικρότερο από τη διάμετρο του κοπτικού εργαλείου, δεδομένου ότι πρόκειται για διεργασία αφαίρεσης υλικού. Και στις δύο περιπτώσεις η επίτευξη πολύ μεγάλης ακρίβειας και λεπτομέρειας είναι συνάρτηση της επιθυμούμενης γεωμετρίας και των ιδιοτήτων του υλικού κατασκευής.

1.6.5 Γεωμετρία

Ουσιαστικά η AM μετασχηματίζει ένα πολύπλοκο 3D πρόβλημα σε μια αλληλουχία από απλές 2D διατομές που έχουν ένα ονομαστικό πάχος. Με τον τρόπο αυτόν αφαιρείται η σύνδεση των επιφανειών στις τρεις διαστάσεις, ενώ η συνοχή επιτυγχάνεται μέσω της εγγύτητας του ενός στρώματος με το αμέσως γειτονικό του. Δεδομένου ότι τούτο δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί με τις εργαλειομηχανές CNC, η κατεργασία των επιφανει-



Εικόνα 1.3 Μορφολογικά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν προβλήματα κατά την κατεργασία CNC

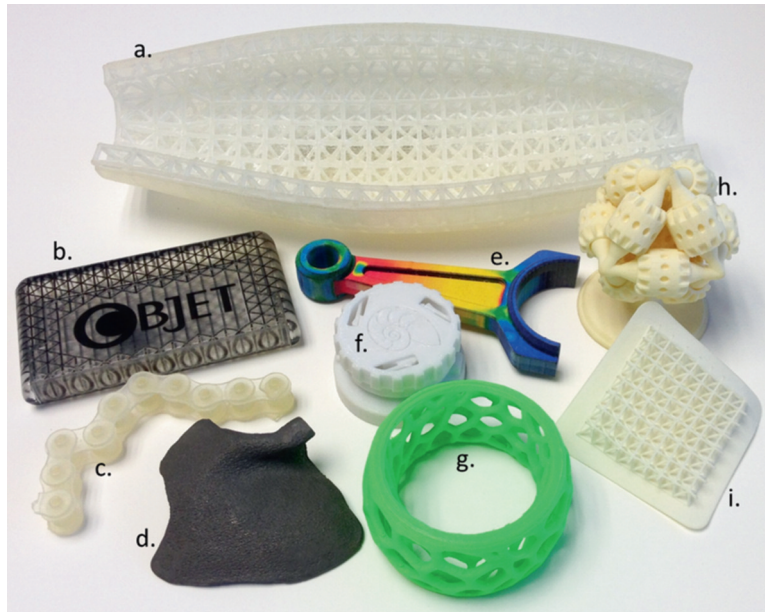
ών πρέπει να πραγματοποιηθεί κανονικά στον χώρο των τριών διαστάσεων. Με τις απλούστερες γεωμετρίες, όπως τους κυλίνδρους, τα κυβοειδή, τους κώνους κ.λπ., τούτο συνιστά μια σχετικά εύκολη διαδικασία, η οποία καθορίζεται με τη σύνδεση σημείων κατά μήκος μιας τροχιάς· τα σημεία απέχουν μεγάλες αποστάσεις το ένα από το άλλο, ο προσανατολισμός, όμως, του κοπτικού εργαλείου παραμένει ο ίδιος. Στην περίπτωση των επιφανειών ελεύθερης μορφής, τα σημεία αυτά μπορεί να βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο με πολύ συχνές και σημαντικές μεταβολές στον προσανατολισμού του κοπτικού εργαλείου. Τέτοιου είδους γεωμετρικές επιφάνειες είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προκύψουν με τις εργαλειομηχανές CNC, ακόμα και αν αυτές διαθέτουν δυνατότητες 5-αξονικής ή υψηλότερης παρεμβολής. Υποκοπές, κλειστοί εσωτερικοί όγκοι, οξείες εσωτερικές γωνίες και άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά πέραν κάποιου ορίου αστοχούν και δεν μπορούν να κατασκευαστούν. Παρατηρήστε, για παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στο αντικείμενο που παρουσιάζεται στην Εικ. 1.3. Πολλά από τα χαρακτηριστικά αυτά θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να προκύψουν με κατεργασίες CNC, χωρίς ειδική μεταχείριση του κομματιού σε κάποια φάση της κατεργασίας.

1.6.6 Προγραμματισμός

Ο προγραμματισμός μιας εργαλειομηχανής CNC μπορεί να είναι ιδιαίτερα επίπονος και περιλαμβάνει την επιλογή του κοπτικού εργαλείου, τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου, τη θέση και τη γωνία προσέγγισης του κοπτικού εργαλείου στην προς κατεργασία επιφάνεια κ.λπ. Πολλές μηχανές AM απαιτούν σχετική ρύθμιση και επιλογή των τιμών ορισμένων παραμέτρων, όμως το εύρος, η πολυπλοκότητα και οι συνέπειες των επιλογών αυτών είναι ασήμαντες συγκριτικά με τις αντίστοιχες των εργαλειομηχανών CNC. Η χειρότερη δυνατή συνέπεια που θα μπορούσε να έχει ο λανθασμένος προγραμματισμός μιας μηχανής AM θα ήταν τελικά ένα όχι και τόσο καλά κατασκευασμένο αντικείμενο. Λανθασμένος προγραμματισμός μιας εργαλειομηχανής CNC, ωστόσο, θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα σοβαρή βλάβη της εργαλειομηχανής ή και πρόκληση ανθρώπινου τραυματισμού.

1.7 Παράδειγμα κομματιών AM

Στην Εικ. 1.4 παρουσιάζονται πολλά αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί με μερικές από τις συνήθεις διεργασίες AM. Το αντικείμενο α. έχει κατασκευαστεί από μια μηχανή στερεολιθογραφίας και παρουσιάζει την άτρακτο ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους, το τοίχωμα της οποίας έχει ενισχυθεί με σύμμορφη πλεγματική δομή (βλέπε Κεφ. 4 για περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με τη συγκεκριμένη διεργασία). Πληρέστερη περιγραφή αυτού του αντικειμένου παρουσιάζεται στο κεφάλαιο «Σχεδιασμός για προσθετική κατα-



Εικόνα 1.4 Αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί με AM

σκευή». Τα αντικείμενα b. και c. έχουν κατασκευαστεί με εναπόθεση υλικού (material jetting) (Κεφ. 7). Το αντικείμενο b. παρουσιάζει τη δυνατότητα της σύγχρονης εναπόθεσης διαφορετικών υλικών, κατά την οποία μια ομάδα ακροφυσίων της μηχανής έχει εναποθέσει το διαφανές υλικό, ενώ άλλη ομάδα έχει εναποθέσει το μαύρο υλικό για τη δημιουργία των γραμμών και του ονόματος Objet. Το αντικείμενο c. αποτελεί τμήμα μιας αλυσίδας. Το κομμάτι c. διαθέτει περιστροφικές αρθρώσεις που λειτουργούν, και οι οποίες έχουν κατασκευαστεί με τις απαιτούμενες για τις αρθρώσεις κατασκευαστικές χάρες, καθώς και μια διαλυόμενη δομή στηριγμάτων (support structure). Το αντικείμενο d. είναι ένα μεταλλικό κομμάτι που κατασκευάστηκε από μηχανή σύντηξης μεταλλικής πούδρας σε κλίνη (metal powder bed fusion), που επιτυγχάνει τη σύντηξη με μια δέσμη ηλεκτρονίων (Κεφ. 5). Το κομμάτι αυτό αποτελεί μοντέλο ιατρικού εμφυτεύματος για το πρόσωπο. Το αντικείμενο e. έχει κατασκευαστεί σε μηχανή στρωματικών φύλλων (sheet laminated machine) του οίκου Mcor Technologies, που διαθέτει δυνατότητες ink-jet εκτύπωσης για τη δημιουργία των διαφορετικών χρωμάτων. Τα αντικείμενα f. και g. έχουν κατασκευαστεί με εξώθηση υλικού (material extrusion) (Κεφ. 6). Το αντικείμενο f. είναι ένας μηχανισμός καστανίας σύσφιγξης και έχει δημιουργηθεί ως μια μεμονωμένη κατασκευαστική εργασία από μια βιομηχανική μηχανή AM. Πάλι, η λειτουργία του μηχανισμού επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό των αρθρώσεων και τη χρήση διαλυόμενης δομής στηριγμάτων. Το αντικείμενο g. έχει κατασκευαστεί σε μια προσωπική μηχανή χαμηλού κόστους (την οποία διαθέτει στο σπίτι του ένας εκ των συγγραφέων του βιβλίου). Τα αντικείμενα h. και i. έχουν κατασκευαστεί με μια μηχανή σύντηξης πολυμερικής πούδρας σε κλίνη (polymer powder bed fusion). Το αντικείμενο h. αποτελεί το ευρύτατα γνωστό μοντέλο «brain-gear», που παριστάνει έναν τριδιάστατο μηχανισμό μετάδοσης κίνησης. Όταν ένα από τα γρανάζια του περιστραφεί, τότε περιστρέφονται και όλα τα υπόλοιπα. Δεδομένου ότι για τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με τη διεργασία της σύντηξης πολυμερικής πούδρας σε κλίνη δεν απαιτείται να υπάρχει δομή στηριγμάτων, η λειτουργία του μηχανισμού και η περιστροφή των γραναζιών επιτυγχάνονται με την πρόβλεψη των κατάλληλων κατασκευαστικών χαρών, καθώς και της σχολαστικής αφαίρεσης της πούδρας που παραμένει μη πολυμεριζόμενη στις περιοχές μεταξύ των κινούμενων μερών. Το αντικείμενο i. είναι ένα κομμάτι με πλεγματική δομή και δείχνει τις δυνατότητες της AM για την κατασκευή κομματιών με πολύπλοκη γεωμετρικά μορφή.

1.8 Άλλες συναφείς τεχνολογίες

Η συνηθέστερη μέθοδος εισαγωγής δεδομένων για την τεχνολογία της AM είναι μέσω της μεταφοράς ενός αρχείου γεωμετρικών δεδομένων που έχει μετατραπεί σε μορφή STL, και το οποίο αρχικά έχει δημιουργηθεί με ένα συμβατικό 3D σύστημα CAD. Υπάρχουν, όμως, και άλλοι τρόποι για να δημιουργηθούν αρχεία STL, καθώς επίσης και άλλες τεχνολογίες που μπορούν να συνδυαστούν με την τεχνολογία της AM. Μερικές απ' αυτές εξετάζονται στην ενότητα αυτή.

1.8.1 Τεχνολογία αντίστροφης μηχανικής

Ολοένα και περισσότερα μοντέλα δημιουργούνται από γεωμετρικά δεδομένα που προέρχονται από όργανα 3D απεικόνισης και λογισμικό αντίστροφης μηχανικής (Reverse Engineering – RE). Υπ' αυτή την έννοια, RE είναι η διαδικασία εξαγωγής των γεωμετρικών δεδομένων που περιγράφουν ένα αντικείμενο από το ίδιο το αντικείμενο. Τα δεδομένα αυτά είναι αρχικά διαθέσιμα σε μια μορφή που ονομάζεται «νέφος σημείων» («point cloud»), κάτι που υπονοεί ότι υπάρχει ένα σύνολο σημείων τα οποία δεν συνδέονται μεταξύ τους και παριστάνουν τις επιφάνειες οι οποίες ορίζουν το αντικείμενο. Τα σημεία πρέπει να συνδυαστούν μεταξύ τους με λογισμικό RE, όπως το Geomagic [7], και το οποίο μπορεί επίσης να συνδυάσει νέφη σημείων που προέρχονται από διαφορετικές σαρώσεις, καθώς και να εκτελέσει άλλες λειτουργίες, όπως την αφαίρεση «οπών» από τα δεδομένα (hole-filling) και την εξομάλυνσή τους. Σε πολλές περιπτώσεις τα δεδομένα δεν είναι πλήρη. Για παράδειγμα, τα αντικείμενα πρέπει κατά την εκτέλεση της σάρωσης να συγκρατούνται κατά κάποιο τρόπο μέσω συσκευών συγκράτησης, γεγονός που αναπόφευκτα οδηγεί στο να μη έχουν σαρωθεί κανονικά όλες οι επιφάνειες του αντικειμένου οι οποίες γειτνιάζουν με την περιοχή συγκράτησης. Επιπλέον, μερικές επιφάνειες μπορεί να καλύπτουν κάποιες άλλες, όπως με τις περιπτώσεις των βαθιών σχισμών και των χαρακτηριστικών που βρίσκονται στο εσωτερικό των αντικειμένων, με συνέπεια η δεδομένη αναπαράσταση του αντικειμένου να μην αποδίδει ακριβώς το πραγματικό γεωμετρικό του σχήμα. Προσφάτως έχει συντελεστεί θεαματική πρόοδος στην τεχνολογία της σάρωσης. Ένα κατάλληλα διαμορφωμένο κινητό τηλέφωνο με την ενσωματωμένη κάμερά του είναι σε θέση σήμερα να εκτελέσει υψηλής ποιότητας 3D σάρωση με κόστος λίγες εκατοντάδες δολάρια, κάτι το οποίο πριν από λίγα μόλις χρόνια θα απαιτούσε ένα ακριβό σύστημα σάρωσης με laser ή στερεοσκοπική κάμερα αξίας 100.000 ή και περισσότερων δολαρίων.

Τα τεχνολογικά αντικείμενα σαρώνονται συνήθως με τη χρήση τεχνολογιών που στηρίζονται στη σάρωση με δέσμη laser ή σε αισθητήρες αφής (touch-probe). Για αντικείμενα που έχουν πολύπλοκα εσωτερικά μορφολογικά χαρακτηριστικά ή ανατομικά μοντέλα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η αξονική τομογραφία (Computerized Tomography – CT), η οποία αρχικά αναπτύχθηκε για ιατρικές απεικονίσεις, χρησιμοποιείται όμως και για τη σάρωση βιομηχανικών προϊόντων. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής είναι ουσιαστικά παρόμοια με εκείνη της AM. Σαρώνει στρώση προς στρώση το αντικείμενο, χρησιμοποιεί δε στη συνέχεια ειδικό λογισμικό για να συνδέσει τις στρώσεις αυτές και έτσι να καθορίσει τις οριακές επιφάνειες του αντικειμένου. Τα όρια γειτονικών στρώσεων συνδέονται μεταξύ τους ώστε να διαμορφώσουν επιφάνειες. Το πλεονέκτημα της CT είναι ότι μπορεί να αναπαραστήσει και χαρακτηριστικά που ευρίσκονται στο εσωτερικό των αντικειμένων. Για τη δημιουργία σε βιομηχανικό επίπεδο υψηλής ανάλυσης απεικονίσεων της τάξης του 1 μm, χρησιμοποιούνται ακτίνες X υψηλής ενέργειας. Μια άλλη μέθοδος η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη γεωμετρική ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου είναι εκείνη που στηρίζεται στην τεχνολογία Capture Geometry Inside [8], και η οποία λειτουργεί κατά τρόπο αντίστροφο από εκείνον της τεχνολογίας της AM, χρησιμοποιώντας 2D απεικόνιση για να αποτυπώσει τη γεωμετρία των διατομών, καθώς το αντικείμενο μεταφορικά και κυριολεκτικά τεμαχίζεται στρώση προς στρώση. Προφανώς πρόκειται για μια καταστροφική τεχνική αποτύπωσης της γεωμετρίας και ως τέτοια δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιονδήποτε τύπο προϊόντος.

Η AM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή των αντικειμένων που έχουν σαρωθεί, κατά κάποιο τρόπο λειτουργώντας ως μια διαδικασία αποστολής 3D Fax. Πολύ πιθανότερα, όμως, τα δεδομένα να τροποποιηθούν και/ή να συνδυαστούν με άλλα δεδομένα ώστε να σχηματιστούν συνθετότερα αντικείμενα ελεύθερης μορφής, και τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν το χαρακτηριστικό της «πολυπλοκότητας χωρίς κόστος»

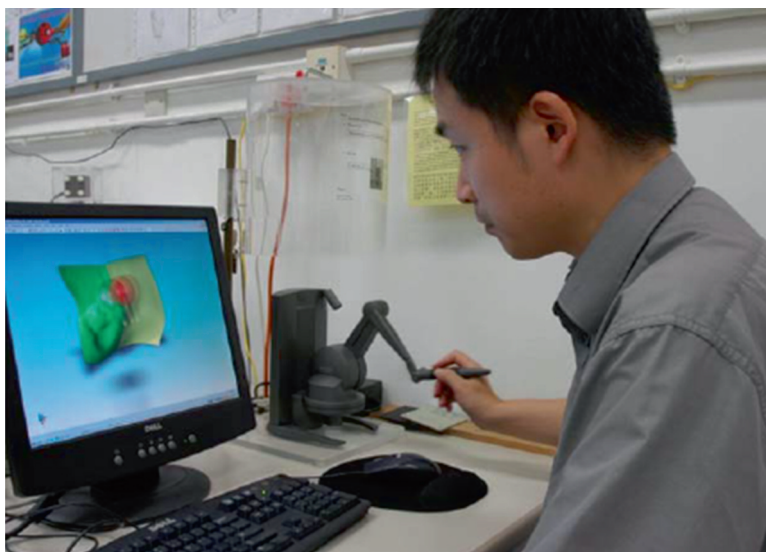
που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή. Ως παράδειγμα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε την περίπτωση όπου τα προσωπικά γεωμετρικά δεδομένα ενός ασθενούς συνδυάζονται με μεθοδολογίες μηχανολογικού σχεδιασμού, προκειμένου να κατασκευαστεί ένα εξατομικευμένο ιατρικό εμφύτευμα. Το σημείο αυτό εξετάζεται λεπτομερέστερα παρακάτω στο βιβλίο.

1.8.2 Μελέτη με τη βοήθεια Η/Υ (Computer Aided Engineering)

Τα συστήματα 3D CAD αποτελούν σημαντικότερο εργαλείο για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός προϊόντος. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης ενός σχεδιαστικού εργαλείου το οποίο στηρίζεται σε κάποιο λογισμικό είναι η ευχέρεια που προσφέρει για την πραγματοποίηση σχεδιαστικών αλλαγών εύκολα και με μικρό κόστος. Όσο μεγαλύτερο ποσοστό του κύκλου ανάπτυξης ενός προϊόντος πραγματοποιείται με σχεδιαστικό λογισμικό κατά τη διάρκεια του οποίου το προϊόν υφίσταται σε εικονική μορφή, τόσο περισσότερο εξασφαλίζουμε οι όποιες σχεδιαστικές αλλαγές να πραγματοποιούνται στο ψηφιακό μοντέλο που περιγράφει το υπό ανάπτυξη προϊόν παρά σ' αυτό καθ' αυτό το φυσικό προϊόν. Όσο περισσότερα γνωρίζουμε για το πώς πρόκειται να συμπεριφερθεί ένα προϊόν *προτού* να κατασκευαστεί, τόσο περισσότερο επιτυχημένο θα είναι τελικά αυτό το προϊόν όταν κυκλοφορήσει στην αγορά. Τούτος είναι επίσης και ο οικονομικά αποδοτικότερος τρόπος για να χειριστούμε τη διαδικασία ανάπτυξης ενός προϊόντος. Εάν τα όποια πιθανά προβλήματα αναδειχθούν αφότου έχει συντελεστεί η φυσική κατασκευή του προϊόντος, τούτο μπορεί να έχει ως συνέπεια σημαντικότερο κόστος. Τα συστήματα 3D CAD μπορούν να χρησιμοποιήσουν την AM, προκειμένου να οπτικοποιήσουν και να ελέγξουν σχεδιαστικές προτάσεις, προτού παρθούν οι οριστικές σχεδιαστικές αποφάσεις και αρχίσει η πραγματική παραγωγή του προϊόντος. Εντούτοις, όσο η προτεινόμενη σχεδιαστική λύση είναι πολυπλοκότερη και εξαρτώμενη από την ίδια την απόδοση του προϊόντος στην πράξη, τόσο λιγότερο διαφωτιστικές και χρήσιμες είναι οι προηγούμενες μέθοδοι. Επίσης, τα συστήματα 3D CAD συνδέονται και με άλλα πακέτα λογισμικού τα οποία χρησιμοποιούν αριθμητικές τεχνικές, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM), για τον υπολογισμό της μηχανικής συμπεριφοράς μιας σχεδιαστικής λύσης, υπό τη γενική ονομασία «Λογισμικά μελέτης με τη βοήθεια Η/Υ» (Computer Aided Engineering – CAE). Τα λογισμικά αυτά έχουν τη δυνατότητα να υπολογίσουν τις δυνάμεις και τις τάσεις που αναπτύσσονται, να εκτελέσουν κινηματική και δυναμική ανάλυση, να μελετήσουν τη ροή και, εν γένει, να διερευνήσουν υπολογιστικά διάφορες άλλες παραμέτρους, ώστε να διαπιστωθεί πόσο καλά μπορεί να συμπεριφερθεί η προτεινόμενη σχεδιαστική λύση κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Αν και δεν είναι ιδιαίτερα εύκολο τα λογισμικά αυτά να υπολογίσουν ακριβώς τη συμπεριφορά ενός κομματιού, εντούτοις για ορισμένα κρίσιμα κομμάτια ο συνδυασμός του CAE, που συμπληρώνεται με πειραματική διερεύνηση με δοκίμια προετοιμασμένα με AM, θα μπορούσε να αποτελέσει μια πολύ χρήσιμη λύση. Επιπλέον, με την έλευση της άμεσης ψηφιακής κατασκευής (Direct Digital Manufacturing), στην οποία η AM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απευθείας παραγωγή τελικών προϊόντων, υπάρχει η αυξημένη ανάγκη τα εργαλεία CAE να εκτιμήσουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες αυτών των κομματιών πριν από την AM, ούτως ώστε τα προϊόντα αυτά να είναι σωστά κατασκευασμένα με την πρώτη, συνιστώντας έτσι την έννοια του σχεδιασμού για προσθετική κατασκευή (Design for Additive Manufacturing – D for AM).

1.8.3 Απτικό CAD

Τα συστήματα 3D CAD έχουν δομηθεί σε γενικές γραμμές σύμφωνα με την αρχή ότι τα μοντέλα δομούνται αρχικά με τη βοήθεια βασικών γεωμετρικών σχημάτων, τα οποία, στη συνέχεια, συνδυάζονται μεταξύ τους κατά διαφορετικούς τρόπους, ώστε να προκύψουν συνθετότερα σχήματα. Η προσέγγιση αυτή περιγράφει με επιτυχία τα γνωστά σε όλους μας τεχνολογικά προϊόντα, δεν είναι, όμως, το ίδιο αποτελεσματική όταν αναφέρεται σε λιγότερο συνηθισμένες σχεδιαστικές προτάσεις. Πολλά καταναλωτικά προϊόντα έχουν αναπτυχθεί από ιδέες που έχουν προταθεί από καλλιτέχνες και σχεδιαστές και όχι από μηχανικούς. Σημειώνουμε, επίσης, ότι η AM έχει δώσει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ελευθερίας στην έκφραση. Πράγματι, η AM έχει αρχίσει να γίνεται ένα ιδιαίτερα δημοφιλές μεταξύ των καλλιτεχνών και των γλυπτών, όπως ο Bathsheba Grossman [9] ο οποίος αξιοποιεί τη γεωμετρική ελευθερία της AM για να δημιουργήσει εντυπωσιακά γλυπτά. Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε σήμερα με ορισμένα σχεδιαστικά εργαλεία που στηρίζονται στους υπολογιστές είναι το



Εικόνα 1.5 Σύστημα μοντελοποίησης ελεύθερης μορφής

ότι περιορίζουν ή εγκλωβίζουν τη δημιουργική διεργασία, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για συστήματα CAD που παρέχουν μεγαλύτερη ελευθερία. Τα απτικά συστήματα (haptic-based) μοντελοποίησης CAD, όπως το πειραματικό σύστημα που φαίνεται στην Εικ. 1.5 [10], τα οποία λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με εκείνο του εμπορικά διαθέσιμου συστήματος μοντελοποίησης της Freeform [11], δημιουργούν ένα σχεδιαστικό περιβάλλον που είναι περισσότερο διαισθητικό σε σύγκριση με τα τυπικά συστήματα CAD. Χρησιμοποιούν συνήθως μια απτική ρομποτική διάταξη ανάδρασης που ονομάζεται «Phantom» και παρέχει ανάδραση δύναμης αναφερόμενη στο εικονικό περιβάλλον μοντελοποίησης. Ένα αντικείμενο μπορεί να εμφανίζεται στην οθόνη του συστήματος, γίνεται, όμως, και αισθητό στον τριδιάστατο χώρο μέσω της Phantom. Το περιβάλλον μοντελοποίησης περιλαμβάνει, επίσης, αυτό που είναι γνωστό ως εικονικός πηλός (Virtual Clay), που μπορεί να παραμορφωθεί υπό την επίδραση δύναμης που εφαρμόζεται με τη χρησιμοποίηση του απτικού κέρσσορα/δρομέα. Έτσι δημιουργείται ένας μηχανισμός άμεσης αλληλεπίδρασης με το υλικό μοντελοποίησης, κατά τρόπο εντελώς ανάλογο με έναν γλύπτη που αλληλεπιδρά με τον πραγματικό πηλό. Τα αποτελέσματα των συστημάτων αυτών είναι φυσικότερα, μπορούν δε να συνδυαστούν με τις επιφάνειες ελεύθερης μορφής των τυπικών τεχνικών συστημάτων CAD για τον σχεδιασμό προϊόντων. Καθώς οι καταναλωτές γίνονται ολοένα και πιο απαιτητικοί και οξυδερκείς, βλέπουμε ότι το πιθανότερο είναι τα συστήματα CAD για μη μηχανικούς, όπως σχεδιαστές, γλύπτες και άτομα του γενικού πληθυσμού, να γίνουν κοινός τόπος.

1.9 Το παρόν σύγγραμμα

Υπάρχουν πολλά κείμενα που περιγράφουν τις διεργασίες της προσθετικής κατασκευής είτε σε αυτοτελή ειδικά εγχειρίδια είτε ως μεμονωμένες ενότητες μέσα σε άλλα βιβλία. Μέχρι τώρα, όμως, δεν υπάρχουν βιβλία αφιερωμένα στη διδασκαλία αυτής της τεχνολογίας με περιεκτικό τρόπο και σε πανεπιστημιακό επίπεδο. Πρόσφατα, τα πανεπιστήμια άρχισαν να εισάγουν την προσθετική κατασκευή σε διάφορα αναλυτικά προγράμματα σπουδών: είτε ως τμήματα μεμονομένων ενοτήτων είτε ως αυτοτελή μαθήματα μεταπτυχιακού επιπέδου. Σκοπός του παρόντος εγχειριδίου είναι να υποστηρίξει τα προγράμματα αυτά με μια περιεκτική περιγραφή, καλύπτοντας όσο το δυνατόν περισσότερες τεχνολογίες. Οι συγγραφείς του παρόντος συγγράμματος έχουν διαμορφώσει και εισαγάγει ανάλογα προγράμματα στα πανεπιστήμιά τους και προχώρησαν στη συγγραφή του βιβλίου, διότι πιστεύουν ότι δεν υπάρχει σήμερα κάποιο αντίστοιχο σύγγραμμα που να καλύπτει επαρκώς, σε εύρος και βάθος το συγκεκριμένο αντικείμενο. Επιπλέον, με το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη 3D εκτύπωση, πιστεύουμε ότι το κείμενο αυτό μπορεί να συμβάλει με τρόπο αποτελεσματικό στην κα-

τανόηση των τεχνολογιών AM που εξετάζει. Αν και το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι ιδιαίτερα δημοφιλές, είναι σαφές ότι υπάρχει σημαντικό έλλειμμα κατανόησης από πολλούς σε σχέση με το εύρος των εφαρμογών που η AM έχει να προσφέρει.

Τα πρώτα κεφάλαια του παρόντος βιβλίου εξετάζουν γενικά θέματα που αφορούν την AM, ενώ έπονται κεφάλαια που εστιάζουν σε συγκεκριμένες τεχνολογίες. Τα τελευταία κεφάλαια επικεντρώνονται στις γενικές διεργασίες και τις εφαρμογές. Αναμένουμε ο αναγνώστης να είναι εξοικειωμένος με την τεχνολογία των CAD συστημάτων τριδιάστατης στερεάς μοντελοποίησης, καθώς επίσης να έχει κάποιες έστω και μικρές γνώσεις γύρω από τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την κατασκευή προϊόντων. Αναμένουμε ότι η πλειονότητα των αναγνωστών θα έχουν υπόβαθρο μηχανικού ή σχεδιαστή, ειδικότερα δε σχεδιαστή προϊόντων ή μηχανολόγου μηχανικού ή μηχανικού υλικών ή μηχανικού παραγωγής. Επειδή, επίσης, η τεχνολογία AM ενέχει σε μεγάλο βαθμό θέματα ηλεκτρονικών και τεχνολογίας της πληροφορίας, το παρόν σύγγραμμα θα μπορούσε να φανεί χρήσιμο και σε αναγνώστες με υπόβαθρο σε εφαρμογές πληροφορικής και μηχανικής.

1.10 Ασκήσεις

1. Να δώσετε τρεις διαφορετικούς ορισμούς για την ταχεία πρωτοτυποποίηση, όπως παρουσιάζεται στο βιβλίο, πέρα από εκείνον της προσθετικής κατασκευής.
2. Να βρεθούν από το διαδίκτυο διαφορετικά παραδείγματα εφαρμογών της AM που καταδεικνύουν τη χρήση τους για «μορφή», «συναρμογή» και «λειτουργία».
3. Τι λειτουργίες μπορούν να εκτελεστούν με δεδομένα νέφους σημείων από ένα λογισμικό αντίστροφης μηχανικής; Πώς τα εργαλεία αυτά διαφέρουν από ένα συμβατικό λογισμικό 3D CAD;
4. Ποιος είναι ο προσφιλέστερος σε εσάς όρος (AM, κατασκευή ελεύθερης μορφής, RP κ.λπ.) για να περιγράψετε αυτή την τεχνολογία και γιατί;
5. Δημιουργήστε έναν κατάλογο συνδέσμων βίντεο στο διαδίκτυο που να δείχνουν διαφορετικές τεχνολογίες AM, καθώς και αντιπροσωπευτικές παραγωγικές διαδικασίες.
6. Φτιάξτε έναν κατάλογο διαφορετικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών AM σαν μέσο για τη σύγκρισή τους με την κατεργασία CNC. Κάτω από ποιες προϋποθέσεις υπερτερεί η AM και κάτω από ποιες θα υπερτερούσε η κατεργασία CNC;
7. Πώς λειτουργεί η απτική συσκευή γραφείου Phantom και για ποιον λόγο μπορεί να είναι περισσότερο χρήσιμη για τη δημιουργία μοντέλων ελεύθερης μορφής από ό,τι ένα συμβατικό 3D CAD σύστημα;

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm
2. Burns M (1993) Automated fabrication: improving productivity in manufacturing. Prentice Hall, Englewood Cliffs
3. Wohlers TT (2009) Wohlers report 2009: rapid prototyping & tooling state of the industry. Annual world-wide progress report. Wohlers Associates, Detroit
4. Jacobs PF (1995) Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling. SME, New York
5. 3D Systems. www.3dsystems.com
6. Sachs EM, Cima MJ, Williams P, Brancazio D, Cornie J (1992) Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. J Eng Ind 114(4):481–488
7. Geomagic Reverse Engineering software. www.geomagic.com
8. CGI. Capture geometry inside. www.cgiinspection.com
9. Grossman B. www.bathsheba.com
10. Gao Z, Gibson I (2007) A 6 DOF haptic interface and its applications in CAD. Int J Comput Appl Technol 30(3):163–171
11. Sensable. www.sensable.com