

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η Τεχνολογία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

ΗΛΙΑΣ ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΗΣ

Μηχανολόγος - Ηλεκτρολόγος, Μηχανικός

Θέτοντας σοβαρή υποψηφιότητα για τον τίτλο της "τεχνολογίας της δεκαετίας του 2000", η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D-Printing) υπόσχεται να αλλάξει με απροσδόκητους τρόπους την οικονομία και την καθημερινή ζωή. Αν και οι ελπίδες που καλλιεργούνται σχετικά με τις δυνατότητες της νέας αυτής τεχνολογίας χαρακτηρίζονται αναμφίβολα από κάποια δόση υπερβολής, οι προοπτικές που ανοίγονται στον χώρο της κατασκευής προτύπων, μοντέλων, καλουπιών, αλλά και εργαλείων, ανταλλακτικών, εξαρτημάτων και αντικειμένων ευρείας χρήσης είναι εντυπωσιακές.

Η μετατροπή μιας ιδέας σε σχέδιο και κατόπιν σε αντικείμενο, είναι μια σύνθετη διαδικασία με λιγότερα ή περισσότερα ενδιάμεσα στάδια που αποτελούσε και αποτελεί αυτό που ονομάζουμε γενικά "παραγωγή". Για τη μετάβαση από τον ιδεατό κόσμο του σχεδίου στον φυσικό κόσμο των αντικειμένων, απαιτείτο (παλαιότερα) η μεσολάβηση ενός αριθμού εργατών και τεχνιτών, οι οποίοι χρησιμοποιώντας τη δύναμη, την πείρα, τις δεξιότητες και τα εργαλεία τους, έδιναν μορφή και υλική υπόσταση στο σχέδιο. Εδώ και τρεις δεκαετίες περίπου τη μεσολάβηση αυτή σε πολλούς τομείς της παραγωγής, αναλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο αυτοματοποιημένα συστήματα που βασίζονται στη ρομποτική. Σήμερα, η ανάπτυξη νέων μηχανών και τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης ανοίγει τον δρόμο στο επόμενο στάδιο εξέλιξης της αυτοματοποίησης, το οποίο περιγράφεται ως "άμεση ή ταχεία παραγωγή" (direct/rapid manufacturing) και συνίσταται στην απευθείας μετάβαση από τον κόσμο του ψηφιακού πλέον σχεδίου ή μοντέλου στον κόσμο των φυσικών αντικειμένων! Οι μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιούν τα δεδομένα ψηφιακών αρχείων τα οποία έχουν δημιουργηθεί/σχεδιαστεί είτε από κάποιον μηχανικό είτε έχουν προκύψει από τη σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου, για να κατασκευάσουν, "τυπώνοντας" σε τρεις διαστάσεις, το φυσικό αντικείμενο. Η χρήση του όρου "τρειςδιάστατη εκτύπωση" (3-D Printing) για την περιγραφή των εν λόγω μηχανών και κατασκευαστικών μεθόδων, αντανάκλα τις ιδιαίτερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται, οι οποίες θυμίζουν (ή και προέρχονται) σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο λειτουργίας των σημερινών εκτυπωτών λέιζερ ή ink-jet.

Οι τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τις μεθόδους κατασκευής (παραδοσιακές ή μη) διαφόρων προϊόντων οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα: Το σύνολο των κατασκευαστικών αυτών μεθόδων βασίζεται ουσιαστικά στην αφαίρεση υλικού από ακατέργαστα, χυτά, σφυρήλατα ή πρεσσαριστά τεμάχια, είτε με τη χρήση εργαλείων χειρός, είτε με τη χρήση εργαλειομηχανών (τόρνων, φρεζών, δραπάνων κλπ.), είτε με τη χρήση αυτοματοποιημένων μηχανών CNC ή κέντρων κατεργασίας ελεγχόμενων από υπολογιστή, μέχρις ότου το αντικείμενο λάβει την επιθυμητή μορφή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, από την άλλη πλευρά, αποτελεί μια διαδικασία πρόσθεσης υλικού, κατά την οποία η κατασκευή ενός αντικειμένου πραγματοποιείται με την εναπόθεση, στερεοποίηση ή συγκόλληση διαδοχικών λεπτών στρώσεων υλικού, κατάλληλα διαμορφωμένων με τη χρήση τεχνικών παρόμοιων με τις τεχνικές της διδιάστατης εκτύπωσης, σύμφωνα με το αποθηκευμένο στον υπολογιστή σχέδιο ή εικόνα.

Ως τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης λοιπόν, μπορεί να περιγραφεί ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες παραπέμπουν στη λειτουργία των σημερινών εκτυπωτών λήζερ ή ink-jet και οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός αντικειμένου με τη διαδικασία της αλληλεπίθεσης διαδοχικών και κατάλληλα διαμορφωμένων λεπτών στρώσεων υλικών.

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης η οποία έχει ιστορία δύο περίπου δεκαετιών, ξεκίνησε με την ανάπτυξη των τεχνικών ταχείας προτυποποίησης (Rapid Prototyping, RP) κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι οποίες αποσκοπούσαν στην απάλειψη των ατελειών και στη δραστική μείωση του χρόνου κατασκευής των πρωτοτύπων διαφόρων προϊόντων.

Η κατασκευή προτύπων αποτελούσε πάντα μέρος της διαδικασίας σχεδίασης και ανάπτυξης ενός προϊόντος, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της λειτουργικότητάς του και στην ενσωμάτωση σε αυτό διαφόρων επιθυμητών χαρακτηριστικών. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές που αναπτύσσουν τμήματα μηχανισμών, ή αντικείμενα πολύπλοκης μορφής, μπορούν να αποκτήσουν, να μεταφέρουν ή να εξηγήσουν σε άλλους πολύ περισσότερα στοιχεία και πληροφορίες διαθέτοντας ένα χειροπιαστό, ακριβές, τρισδιάστατο μοντέλο, αντί ενός σχεδίου ή μιας απεικόνισης του αντικειμένου στην οθόνη ενός υπολογιστή. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός ακριβούς πρωτοτύπου του εξαρτήματος κάποιου κινητήρα, επιτρέπει στους μηχανικούς να διαπιστώσουν με ευχέρεια αν το συγκεκριμένο τμήμα ταιριάζει από την άποψη των διαστάσεων και της μορφής του με το υπόλοιπο λειτουργικό σύνολο. Κατ' ανάλογο τρόπο, οι υπεύθυνοι της προώθησης στην αγορά ενός καταναλωτικού προϊόντος μπορούν, έχοντας στα χέρια τους ένα ακριβές πρωτότυπο του αντικειμένου που προτείνει το σχεδιαστικό τμήμα, να διαπιστώσουν εύκολα και έγκαιρα εάν αυτό έχει τις επιθυμητές αναλογίες, το σχήμα ή τα άλλα χαρακτηριστικά που απαιτεί το κοινό στο οποίο απευθύνεται.

Παλαιότερα, η διαδικασία της κατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων και προτύπων συνίστατο στη χρονοβόρα και υψηλού κόστους κατασκευή προτύπων από έμπειρους και επιδέξιους τεχνίτες με τη χρήση εργαλείων χειρός και μικρών εργαλειομηχανών ακριβείας. Εκτός από τον χρόνο και το κόστος, η διαδικασία ήταν παραδοσιακής προτυποποίησης, ενείχε πάντα ένα στοιχείο ασάφειας, καθώς μεταξύ του αρχικού σχεδίου και του μοντέλου μεσολαβούσε πάντα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό το χέρι και η αντίληψη του κατασκευαστή μοντέλων. Η κατάσταση αυτή άρχισε να αλλάζει με τη χρησιμοποίηση εργαλειομηχανών ελεγχόμενων από υπολογιστή, καθώς οι παράμετροι του κατασκευαζόμενου προτύπου μπορούσαν να ελεγχθούν εξαρχής ώστε να ανταποκρίνονται με ακρίβεια στο βασικό σχέδιο. Και πάλι όμως η διαδικασία ήταν χρονοβόρα και ακριβή, ιδίως στην περίπτωση που τυχόν μικρότερες ή μεγαλύτερες τροποποιήσεις επέβαλλαν την εκ νέου κατασκευή του μοντέλου.

Η ανάπτυξη των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης, αποτέλεσε το καθοριστικό σημείο τομής με το παρελθόν. Οι νέες μηχανές, επέτρεψαν την κατασκευή πρωτοτύπων ή αντιγράφων ακριβείας, απευθείας από ψηφιακά μοντέλα των αντικειμένων δημιουργημένα με τη χρήση λογισμικού CAD (Computer Aided Design), με μικρότερο κόστος και μέσα σε διάστημα ωρών αντί των εβδομάδων ή των μηνών που απαιτούσαν οι παλαιότερες διαδικασίες.

Η δραστική μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής των προτύπων, βελτιστοποιεί τη διαδικασία της ανάπτυξης ενός προϊόντος, παρέχοντας στους κατασκευαστές τη χρονική άνεση να τελειοποιήσουν τα προϊόντα τους στο πιο κρίσιμο στάδιο της ανάπτυξής τους, αυτό της βασικής σχεδίασης, με αποτέλεσμα να φθάνουν στην αγορά ολοκληρωμένα, ταχύτερα και με μικρότερο κόστος. Ήδη από το 1994 οι τεχνικοί της εταιρίας αεροπορικών κινητήρων Pratt & Whitney δήλωναν ότι η εισαγωγή τεχνικών ταχείας προτυποποίησης για την κατασκευή χυτών ακριβείας, επέτρεψε μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής της τάξης του 70 έως 90%. Ας επισημάνουμε στο σημείο αυτό πως "ταχεία" προτυποποίηση δεν σημαίνει "στιγμιαία": στην πράξη, όλα σχεδόν τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με τις μεθόδους αυτές απαιτούν τρεις έως 72 ώρες, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση συνοδεύεται ακόμη από αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά το μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν (όχι μεγαλύτερα των 0,125 κυβικών μέτρων) και τα χρησιμοποιούμενα υλικά (η κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων είναι σχετικά δύσκολη).

Οι τεχνολογίες ταχείας προτυποποίησης που είναι διαθέσιμες στην αγορά σήμερα, περιλαμβάνουν έξι βασικές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης, κάθε μία από τις οποίες έχει τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματά της: τη στερεολιθογραφία (stereolithography, STL), την επιλεκτική σύντηξη με τη χρήση ακτίνων λέιζερ (selective laser sintering, SLS), την παραγωγή αντικειμένων μέσω της συγκόλλησης λεπτών φύλων (Laminated Object Manufacturing, LOM), την κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης/σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (Fused Deposition Modeling), την τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet (3D ink-jet Printing) και μία παραλλαγή της στερεολιθογραφίας γνωστή ως Solid Ground Curing, SGC.

Όλες οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης ακολουθούν μια κοινή διαδικασία πέντε σταδίων:

- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD του σχεδίου ή του σκαναρισμένου αντικειμένου.
- Μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL.
- "Τεμαχισμό" με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, του αρχείου STL σε λεπτές "διατομές" ελάχιστου πάχους.
- Κατασκευή του αντικειμένου με τη διαδοχική αλληλεπίθεση των διατομών.
- Καθαρισμό και τελικό φινίρισμα του μοντέλου.

Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου εκτελείται κατά κανόνα με λογισμικό δημιουργίας στερεών μοντέλων όπως το Pro/Engineer και όχι με λογισμικό τύπου AutoCAD καθώς το πρώτο τείνει να αναπαριστά τα τρισδιάστατα αντικείμενα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα υπάρχον αρχείο CAD ή να δημιουργήσει ένα νέο, ειδικά για τις ανάγκες της προτυποποίησης. Η διαδικασία αυτή είναι κοινή για όλες τις τεχνικές ταχείας προτυποποίησης.

Η μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL (Stereolithography), αποτελεί το δεύτερο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης, έχοντας καθιερωθεί ως πρότυπο εξαρχής από τη βιομηχανία προτυποποίησης καθώς ήταν η πρώτη τεχνική ταχείας προτυποποίησης που αναπτύχθηκε. Οι διάφορες εκδόσεις του λογισμικού CAD, χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγορίθμους για την αναπαράσταση στερεών (τρειςδιάστατων) αντικειμένων. Η format STL αναπαριστά μια τρισδιάστατη επιφάνεια ως ένα σύνολο στοιχειωδών επιπέδων τριγώνων, που θυμίζουν την πολυεδρική όψη της επιφάνειας ενός κατεργασμένου διαμαντιού. Επειδή τα αρχεία STL χρησιμοποιούν στοιχειώδη επίπεδα, δεν μπορούν να αναπαραστήσουν καμπύλες επιφάνειες, παρά μόνο κατά προσέγγιση. Η αύξηση του αριθμού των στοιχειωδών τριγώνων επιτρέπει καλύτερη προσέγγιση, αλλά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του αρχείου. Μεγάλα και πολύπλοκα αρχεία σημαίνουν μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας και κατασκευής. Συνεπώς, οι σχεδιαστές πρέπει να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις ακρίβειας με τις ανάγκες ευχρηστίας ώστε να κατασκευάσουν ένα χρήσιμο αρχείο STL. Και αυτή η διαδικασία είναι κοινή για όλες τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Το τρίτο βήμα της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνίσταται στο «τρέξιμο» ενός προγράμματος το οποίο προετοιμάζει την κατασκευή του αντικειμένου που αναπαριστά το αρχείο STL. Το λογισμικό του προγράμματος αυτού διαιρεί ("τεμαχίζει") το ψηφιακό μοντέλο σε έναν αριθμό λεπτών εγκάρσιων διατομών (πάχους 0,01 έως 0,7 mm, ανάλογα με την τεχνική εκτύπωσης), ενώ μπορεί να δημιουργήσει και μια βοηθητική δομή, που θα χρησιμοποιείται για τη στήριξη του πρωτοτύπου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του (σε περίπτωση που υπάρχουν εσωτερικές κοιλότητες, πρόβολοι, ή λεπτά τοιχώματα). Στην αγορά προσφέρονται σήμερα διάφορα τέτοια προγράμματα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, τα περισσότερα από τα οποία επιτρέπουν στον χρήστη να ρυθμίσει το μέγεθος, τη θέση και τον προσανατολισμό του ψηφιακού μοντέλου. Ο προσανατολισμός του μοντέλου καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αυτό θα κατασκευαστεί, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι ιδιότητες των αντικειμένων που κατασκευάζονται με τις τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν είναι όμοιες και στις τρεις συντεταγμένες x,y,z. Για παράδειγμα στη συντεταγμένη z (κατακόρυφη) τα αντικείμενα τείνουν να είναι λιγότερο ακριβή και όχι τόσο στιβαρά, απ' ό,τι στο επίπεδο x,y. Επιπλέον, ο προσανατολισμός του μοντέλου καθορίζει κατά ένα μέρος τον χρόνο που θα απαιτηθεί για την κατασκευή του πρωτοτύπου, εφόσον οι σχεδιαστές προτιμούν να επιλέγουν τη συντεταγμένη z για τη μικρότερη διάσταση του αντικειμένου, έτσι ώστε να μειώσουν τον αριθμό των διαδοχικών λεπτών διατομών που θα εναποθεθούν η μία πάνω στην άλλη, μειώνοντας έτσι τον συνολικό χρόνο κατασκευής.

Το τέταρτο στάδιο είναι η κατασκευή του φυσικού αντικειμένου με τη χρήση των έξι τεχνικών που προαναφέρθηκαν, από μηχανές οι οποίες κατασκευάζουν μία-μία τις διατομές στις οποίες διαιρέθηκε το

ψηφιακό μοντέλο, χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά (ρητίνες, πλαστικά, χαρτί, κεραμικά ή μέταλλα σε σκόνη κλπ.). Οι περισσότερες μηχανές είναι αυτόματες και απαιτούν μικρή ανθρώπινη παρέμβαση.

Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αντικειμένου από τη μηχανή και την απόσπασή του από τυχόν στηρίγματα. Μερικά πρωτότυπα κατασκευασμένα από φωτοευαίσθητα υλικά υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία σκλήρυνσης πριν παραδοθούν για χρήση. Μπορεί επίσης να απαιτηθεί ο καθαρισμός και το φινίρισμα της επιφάνειας του πρωτοτύπου ή άλλες επεμβάσεις που σχετίζονται με την εμφάνιση ή την αντοχή του.

ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

● **Στερεολιθογραφία (Stereolithography):** Η στερεολιθογραφία είναι η παλαιότερη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης. Την εφηύρε ο Charles Hall το 1984 και κατοχυρώθηκε το 1986. Με την τεχνική αυτή κατασκευάζονται τρισδιάστατα αντικείμενα από υγρά φωτοευαίσθητα πολυμερή, τα οποία στερεοποιούνται όταν εκτεθούν σε υπεριώδη ακτινοβολία. Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια βάση η οποία βυθίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή εποξική ή ακρυλική ρητίνη. Αρχικά, η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό (ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί). Κατόπιν μια κεφαλή λέιζερ υπεριωδών ακτίνων χαμηλής ισχύος κινούμενη στους άξονες x και y, διαγράφει το σχήμα της διατομής (όπως προβλέπεται από το ψηφιακό σχέδιο) φωτίζοντας και στερεοποιώντας τις αντίστοιχες περιοχές του στρώματος του πολυμερούς (τα υπόλοιπα τμήματα του οποίου παραμένει υγρά). Κατόπιν η βάση βυθίζεται μέσα στο υγρό πολυμερές κατά το πάχος της επόμενης διατομής, ενώ ένας κύλινδρος "απλώνει" και οριζοντιώνει το υγρό πάνω στο στερεοποιημένο τμήμα και η κεφαλή λέιζερ χαράσσει τη νέα διατομή πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Στη συνέχεια το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο, πλένεται, αφαιρούνται τα τυχόν στηρίγματά του και κατόπιν τοποθετείται σε ένα "φούρνο" υπεριωδών ακτίνων για τη τελική σκλήρυνση. Ας αναφέρουμε ότι κατά τα πρώτα χρόνια της στερεολιθογραφίας, τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα ήταν σχετικά εύθραυστα, ενώ εμφάνιζαν διάφορες στρεβλώσεις και παραμορφώσεις κατά τη φάση της σκλήρυνσης, αλλά τα προβλήματα αυτά διορθώθηκαν αργότερα. Οι πρώτες μηχανές στερεολιθογραφίας κατασκευάστηκαν από την εταιρία 3D Systems που εδρεύει στη Valencia της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ το 1988 και η οποία παραμένει έως σήμερα επικεφαλής της αγοράς στον τομέα των μηχανών ταχείας προτυποποίησης.

● **Selective Laser Sintering (SLS):** Η τεχνική SLS αναπτύχθηκε από τον Carl Deckard στο Πανεπιστήμιο του Texas και κατοχυρώθηκε το 1989. Στην τεχνική αυτή μια ακτίνα λέιζερ λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά (νάυλον, ελαστομερή ή μέταλλα) τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος "στρώνει" μια ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους πάνω σε μια επιφάνεια και μια κεφαλή λέιζερ διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής λιώνοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά την σκόνη. Κατόπιν η επιφάνεια κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής, τοποθετείται εκ νέου σκόνη την οποία στρώνει ο κύλινδρος και η κεφαλή λέιζερ διαγράφει την επόμενη διατομή στερεοποιώντας την πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Η περίσσεια της σκόνης κάθε στρώματος λειτουργεί ως υποστήριγμα του κατασκευαζόμενου αντικειμένου.

● **Laminated Object Manufacturing (LOM):** Η τεχνική LOM, η οποία αναπτύχθηκε από την αμερικανική εταιρία Helisys, βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με τη συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού που φέρουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας (heat-activated glue). Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χαρτί, ενώ αργότερα η εταιρία ανέπτυξε και χρησιμοποίησε και άλλα υλικά (αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά αλλά και λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης). Οι συσκευές LOM λειτουργούν ως εξής: Μια διάταξη τροφοδοσίας τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού πάνω σε μια βάση και κατόπιν ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από αυτό πιέζοντάς το ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν. Στη συνέχεια μια κεφαλή λέιζερ "κόβει" το σχήμα της διατομής πάνω στο χαρτί και κατόπιν χαράζει μικρά τετράγωνα στο υπόλοιπο τμήμα του ώστε να διευκολύνεται η απόσπαση του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του. Αφού κοπεί το πρώτο στρώμα, η βάση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται από τη διάταξη τροφοδοσίας και κατόπιν η βάση ανέρχεται λίγο ώστε ο θερμαινόμενος κύλινδρος να πιέσει και να κολλήσει το δεύτερο φύλλο στο πρώτο. Ακολουθεί η κοπή της

νέας διατομής από την κεφαλή λέιζερ και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου, το οποίο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται χαρτί θα έχει την υφή ξύλου. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η επικάλυψη του αντικειμένου με χρώμα ή βερνίκι ώστε να μη προσβάλλεται και παραμορφώνεται από την υγρασία. Όταν χρησιμοποιούνται ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης το αντικείμενο πρέπει να υποστεί μια διαδικασία "σύντηξης" (sintering) για την αύξηση της αντοχής του. Ας σημειωθεί εδώ ότι από το 2001 η εταιρία Helisys δεν δραστηριοποιείται πλέον στην αγορά.

● **Fused Deposition Modeling (FDM):** Στην τεχνική αυτή ίνες θερμού πλαστικού υλικού εξέρχονται από μια κεφαλή η οποία κινείται στο επίπεδο x-y. Η κεφαλή εναποθέτει λεπτές στρώσεις του πλαστικού πάνω σε μια βάση κατά τρόπο παρόμοιο με την εναπόθεση κρέμας πάνω σε ένα κέικ από έναν ζαχαροπλάστη, διαγράφοντας την πρώτη διατομή. Επειδή η βάση βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, το υλικό στερεοποιείται γρήγορα. Κατόπιν η βάση κατέρχεται και η κεφαλή εναποθέτει το δεύτερο στρώμα πάνω στο πρώτο. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Μηχανές FDM κατασκευάζονται από την αμερικανική εταιρία Startasys σε δύο εκδόσεις: μία για την ταχεία κατασκευή μοντέλων που αποδίδουν τη γενική ιδέα ενός σχεδίου και μία βραδείας εκτύπωσης που επιτρέπει την κατασκευή πρωτοτύπων ακριβείας. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν ABS, διάφορα ελαστομερή, πολυκαρβονικά υλικά, πολυφαινολσουλφονάλη κλπ.

● **Solid Ground Curing (SGC):** Η τεχνική αυτή η οποία αναπτύχθηκε από την αμερικανική εταιρία Cubital America, θεωρείται παραλλαγή της στερεολιθογραφίας, καθώς χρησιμοποιεί και αυτή υπεριώδεις ακτίνες για τη σκλήρυνση φωτοευαίσθητων πολυμερών. Σε αντίθεση με τη στερεολιθογραφία, στην τεχνική SGC οι υπεριώδεις ακτίνες φωτίζουν και σκληραίνουν ολόκληρο το στρώμα του υλικού και όχι το τμήμα που αντιστοιχεί στη διατομή του. Η διαδικασία ξεκινά με τον ψεκασμό ενός στρώματος φωτοευαίσθητης ρητίνης πάνω σε μια βάση. Κατόπιν η μηχανή κατασκευάζει μια "φωτομάσκα" (δηλαδή ένα είδος στένσιλ) που διαγράφει τη διατομή του μοντέλου. Το στένσιλ αυτό τυπώνεται πάνω σε μια γιάλινη πλάκα (τοποθετημένη πάνω από τη βάση με τη ρητίνη), με τη χρήση μιας ηλεκτροστατικής διαδικασίας παρόμοιας με αυτή των φωτοτυπικών μηχανημάτων. Κατόπιν το στένσιλ εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία η οποία διέρχεται μόνο από τα διαφανή τμήματά του σκληραίνοντας στις αντίστοιχες περιοχές το στρώμα ρητίνης. Μετά τη σκλήρυνση του στρώματος, η μηχανή απομακρύνει την περίσσεια υγρής ρητίνης και ψεκάζει κερί στη θέση της, το οποίο λειτουργεί ως στήριγμα του αντικειμένου κατά την διάρκεια της κατασκευής του. Ακολουθεί λείανση της άνω επιφάνειας του στρώματος ώστε να γίνει επίπεδη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Οι μηχανές SGC, είναι ογκώδεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μεγάλων αντικειμένων.

● **3D ink-jet Printing:** Η τεχνική αναφέρεται σε μια κατηγορία μηχανών που χρησιμοποιούν τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet. Η πρώτη από τις μηχανές αυτές (γνωστή ως 3D Printing, 3DP) αναπτύχθηκε από το MIT το οποίο χορήγησε δικαιώματα κατασκευής σε έναν αριθμό εταιριών (Soligen Corporation, Extrude Hone, Z Corporation και άλλες). Ο εκτυπωτής ZCorp 3D της Z Corporation αποτελεί τυπικό παράδειγμα της κλάσης: Τα αντικείμενα κατασκευάζονται πάνω σε μια βάση η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο που περιέχει το υλικό υπό μορφή σκόνης. Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας, η βάση κατέρχεται κατά το πάχος μιας διατομής και μια διάταξη τροφοδοσίας απλώνει πάνω της μια κατάλληλη ποσότητα σκόνης. Κατόπιν μια κεφαλή ink-jet που κινείται κατά τους άξονες x, y ψεκάζει επιλεκτικά ένα συγκολλητικό υγρό το οποίο στερεοποιεί τη σκόνη διαγράφοντας το επιθυμητό σχήμα της διατομής. Η περίσσεια σκόνης που απομένει χρησιμεύει για τη στήριξη του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Στη συνέχεια η βάση κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής. Προστίθεται και πάλι η ανάλογη ποσότητα σκόνης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή, το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο και με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα καθαρίζεται από την περίσσεια σκόνης. Τα τελειωμένα τεμάχια μπορούν να ψεκάστούν με κερί, κυανοακρυλική κόλλα ή με άλλες ουσίες για να βελτιωθεί η αντοχή τους και το φινίρισμα της επιφάνειάς τους. Το τυπικό πάχος κάθε διατομής είναι 0,1 mm. Η τεχνική είναι υψηλής ταχύτητας, ενώ παράγει αντικείμενα με σχετικά αδρό φινίρισμα. Η Z Corp χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά υλικά, μια σκόνη με βάση αμύλου (η οποία δεν παράγει στιβαρά αντικείμενα, αλλά μπορεί να καεί και συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή

χυτών ακριβείας) και μία κεραμική σκόνη. Προφέρει επίσης τη δυνατότητα εισαγωγής χρωμάτων στην κατασκευή.

Οι μηχανές 3D ink-jet Printing της εταιρίας 3D Systems (γνωστές και ως Thermo ή Multi-jet Printers) χρησιμοποιούν μια γραμμική διάταξη κεφαλών ink-jet για την ταχεία κατασκευή μοντέλων από θερμοπλαστικό υλικό. Εάν το αντικείμενο έχει μικρό πλάτος, είναι δυνατή η κατασκευή κάθε διατομής με μία μόνο διέλευση της κεφαλής, αλλιώς εκτελούνται περισσότερες διελεύσεις μέχρι να κατασκευαστεί η διατομή.

Οι μηχανές της σειράς Model Maker της εταιρίας Sanders Prototype χρησιμοποιούν μια διαφορετική τεχνική ink-jet: Οι μηχανές διαθέτουν δύο κεφαλές ink-jet, από τις οποίες η μία εναποθέτει θερμοπλαστικό υλικό χαμηλού σημείου τήξης και η άλλη κερι για τη στήριξη του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Μετά την εκτύπωση κάθε διατομής, μια κεφαλή με κοπτικό εργαλείο φρεζάρει τη διατομή ώστε να αποκτήσει ομοιόμορφο πάχος. Η διαδικασία αυτή αποδίδει πρωτότυπα εξαιρετικής ακριβείας και για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιείται στην κατασκευή κοσμημάτων.

ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΑΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΤΑΧΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Οι εφαρμογές και τα οφέλη από τη χρήση των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων είναι πολλαπλά. Πρώτον, τα πρωτότυπα διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ όλων των συντελεστών της παραγωγής, διότι η κατανόηση των τρισδιάστατων αντικειμένων είναι ευκολότερη από την ανάγνωση διδιάστατων σχεδίων. Σήμερα, η επικοινωνία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς πολλά επιμέρους τμήματα της παραγωγικής διαδικασίας εκτελούνται ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, η ταχεία κατασκευή και ανταλλαγή πρωτοτύπων στο στάδιο της σχεδίασης, επιτρέπει στο τμήμα παραγωγής μιας κατασκευάστριας εταιρίας να ετοιμάσει τα κατάλληλα εργαλεία και να αρχίσει να εγκαθιστά τις γραμμές παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα το καλλιτεχνικό τμήμα μπορεί να αρχίσει τη σχεδίαση της συσκευασίας πριν ακόμη οριστικοποιηθεί το σχέδιο του προϊόντος.

Δεύτερον, η κατασκευή πρωτοτύπων η οποία ήταν ανέκαθεν αναγκαία για τη διεξαγωγή μετρήσεων και δοκιμών στο στάδιο της σχεδίασης ενός προϊόντος, ώστε να διαπιστωθούν έγκαιρα τυχόν προβλήματα λειτουργικότητας, αντοχής κ.ά. επιταχύνεται και διευρύνεται με τη χρήση μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες καθιστούν εύκολη πλέον την ταχεία κατασκευή ενός πρωτοτύπου ώστε να μελετηθούν και να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες και κατόπιν την επανασχεδίασή του και την κατασκευή νέου πρωτοτύπου κ.ο.κ., διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα με τις παλαιότερες μεθόδους κατασκευής πρωτοτύπων.

Τρίτον, εκτός από το πλεονέκτημα της ταχύτητας, η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει δυνατότητες που δεν προσφέρουν τα παλαιότερα, μεταλλικά συνήθως, πρωτότυπα. Για παράδειγμα οι τεχνικοί της Porsche χρησιμοποίησαν πρωτότυπα από διαφανές πλαστικό του καλύμματος του συστήματος μετάδοσης των μοντέλων της σειράς 911, κατασκευασμένο με την τεχνική της στερεολιθογραφίας, για να μελετήσουν παραστατικά την κυκλοφορία της βαλβολίνης, ενώ η γαλλική SNECMA που κατασκευάζει στροβιλοκινητήρες χρησιμοποίησε το πρωτότυπο ενός στροβίλου το οποίο κατασκευάστηκε επίσης με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, για να μελετήσει την καταπόνηση των πτερυγίων του με τη βοήθεια φωτοελαστικών μεθόδων ανάλυσης.

Αλλά τα σημαντικότερα οφέλη αναμένονται από τη μεταφορά των τεχνικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης από τον χώρο της ταχείας προτυποποίησης, στην ταχεία κατασκευή εργαλείων (Rapid Tooling) και κυρίως στην ταχεία παραγωγή έτοιμων προς διάθεση προϊόντων (Rapid Manufacturing).

Η ταχεία κατασκευή εργαλείων αποτελεί μια από τις πλέον επιθυμητές εφαρμογές των τεχνικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Είναι γνωστό ότι η κατασκευή εργαλείων (tooling) αποτελεί ένα από τα πιο χρονοβόρα και ακριβά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, λόγω της υψηλής ποιότητας που απαιτείται. Τα εν λόγω εργαλεία (κυρίως καλούπια, μήτρες, αλλά και εργαλεία κατεργασίας μετάλλου) έχουν συχνά πολύπλοκη γεωμετρία, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να είναι σκληρά, να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, να διαθέτουν εξαιρετικά λείες επιφάνειες και να χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων (της τάξης του 0,01 mm). Σήμερα τα εργαλεία αυτά κατασκευάζονται είτε σε ειδικά μηχανήματα CNC, είτε με

τη μέθοδο της ηλεκτροδιάθρωσης, είτε στο χέρι. Οι μέθοδοι αυτές είναι ακριβές και χρονοβόρες και είναι προφανές ότι οι βιομηχανίες θα χαιρέτιζαν οποιαδήποτε τεχνική μείωνε τον χρόνο και το κόστος κατασκευής. Η ταχεία κατασκευή εργαλείων με τη χρήση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης, εκτιμάται ότι θα μειώσει το κόστος και τον χρόνο κατασκευής τους έως και 75%.

Τα θήματα που έχουν γίνει μέχρι στιγμής στον τομέα αυτόν αφορούν κυρίως την έμμεση κατασκευή εργαλείων (indirect tooling), η οποία συνίσταται στην κατασκευή προτύπων με βάση τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν καλούπια και μήτρες. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι κυρίως παραλλαγές της στερεολιθογραφίας (STL), της σύντηξης (SLS) ή της συγκόλλησης (LOM), ενώ ως υλικά χρησιμοποιούνται κατά κανόνα μίγματα κεραμικών και μετάλλων υπό μορφή σκόνης.

Ωστόσο, η άμεση κατασκευή εργαλείων απευθείας από αρχεία CAD, η οποία θα επέτρεπε την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης, απέχει ακόμη αρκετά χρόνια, αν και τα πρώτα θήματα έχουν ήδη γίνει. Μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνικές άμεσης και ταχείας κατασκευής καλουπιών παραγωγής, βασίζεται στην επιλεκτική σύντηξη (sintering) χαλύβδινων σφαιριδίων η οποία επιτυγχάνεται χάρη στην επικάλυψή τους με πολυμερές υλικό. Το καλούπι τοποθετείται στη συνέχεια σε φούρνο όπου το πολυμερές που καίγεται, αντικαθίσταται από χαλκό, ο οποίος διεισδύει και καλύπτει τα κενά, μεγιστοποιώντας την πυκνότητα του αντικειμένου. Τα καλούπια που κατασκευάζεται με τη μέθοδο αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για 50.000 περίπου χυτεύσεις.

Μια άλλη τεχνική που αφορά την απευθείας κατασκευή εργαλείων κατεργασίας μετάλλων, χρησιμοποιεί ως υλικά ανοξειδωτο χάλυβα, inconel 625 (έναν χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο), χάλυβα κατασκευής εργαλείων H13, βολφράμιο, και καρβίδια τιτανίου. Μια κεφαλή λήξερ προκαλεί την επιλεκτική τήξη ενός λεπτού άνω στρώματος του υλικού διαγράφοντας την προβλεπόμενη διατομή, πάνω στην οποία ψεκάζεται κατόπιν σκόνη μετάλλου η οποία στερεοποιείται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε διαδοχικά στρώματα έως ότου σχηματισθεί η επιθυμητή μορφή του εργαλείου. Η τεχνική αυτή γνωστή ως LENS (Laser Engineered Net Shaping) έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή τεμαχίων υψηλής πυκνότητας με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, καθώς η προστιθέμενη σκόνη συντήκεται με το βασικό υλικό, αλλά προς το παρόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την κατασκευή αντικειμένων με απλές, ομοιόμορφες διατομές.

Η Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing) όπως έχει γίνει γνωστή η αυτοματοποιημένη παραγωγή έτοιμων προς πώληση προϊόντων, κατευθείαν από ψηφιακά δεδομένα CAD, αποτελεί την πλέον εντυπωσιακή και υποσχόμενη εξέλιξη της Ταχείας Προτυποποίησης. Τα πλεονεκτήματα της ταχείας παραγωγής δεν περιορίζονται μόνο στην αύξηση της ταχύτητας, στην ορθολογικοποίηση της παραγωγής και στη συνακόλουθη μείωση χρόνου και κόστους, αλλά επεκτείνονται και στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες (μηχανικές και άλλες) των κατασκευαζόμενων με τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης προϊόντων. Για παράδειγμα, ο έλεγχος σε μικροσκοπικό επίπεδο της δομής των προϊόντων μέσω της προσεκτικής επιλογής του υλικού, του πάχους και της μορφής των διαδοχικών διατομών, μπορεί να επιτρέψει την κατασκευή στιβαρότερων τεμαχίων από τα αντίστοιχα που κατασκευάζονται με συμβατικές τεχνικές χύτευσης ή σφυρηλάτησης. Επίσης, είναι δυνατή η εξοικονόμηση βάρους, καθώς η διαδικασία επιτρέπει την ενίσχυση με υλικό ακριβώς εκείνων των περιοχών όπου αυτό είναι αναγκαίο. Ακόμη, διευκολύνεται η κατασκευή πολύπλοκων μορφών, οι οποίες αν και βέλτιστες από σχεδιαστική άποψη, θα ήταν πολύ δύσκολο ή αντισυμβατικό να κατασκευαστούν με τις συμβατικές μεθόδους. Τέλος, είναι δυνατή η παρασκευή προϊόντων με ειδικά χαρακτηριστικά, όπως τα χάπια της αμερικανικής εταιρίας Therics, τα οποία κατασκευάζονται με την αλληλεπίθεση διαδοχικών στρώσεων διαφορετικών υλικών, επιτρέποντας την απελευθέρωση συγκεκριμένων δόσεων φαρμάκου ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Οι τομείς της παραγωγής στους οποίους έχουν ήδη εισαχθεί τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, περιλαμβάνουν την κατασκευή αεραγωγών και άλλων εξαρτημάτων για κινητήρες jet και πυραυλοκινητήρες, καλυμμάτων για τα ηλεκτρικά συστήματα αγωνιστικών αυτοκινήτων, ηλεκτρονικών και ηλεκτρομηχανικών εξαρτημάτων από κεραμικά υλικά, κεραμικών φίλτρων υψηλής απορροφητικότητας, μικρών γρναζιών, εξαρτημάτων αντλιών, βοηθημάτων ακοής, ιατρικών εμφυτευμάτων και προσθετικών οστών, τρισδιάστατων αρχιτεκτονικών μοντέλων, τρισδιάστατων

τοπογραφικών μοντέλων για τον σχεδιασμό στρατιωτικών επιχειρήσεων, αντιγράφων αρχαιολογικών ευρημάτων, αλλά και μοντέλων βρεφών λίγο πριν τη γέννησή τους (!) για ανυπόμονους γονείς.

Ο περιορισμένος αριθμός των προϊόντων που κατασκευάζονται με τη χρήση μηχανημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον, καθώς τα μηχανήματα θα γίνονται όλο και πιο γρήγορα με τη χρήση ισχυρότερων υπολογιστών, σύνθετου λογισμικού και βελτιωμένων συστημάτων ελέγχου και υλικών. Επίσης, βελτιώσεις στα οπτικά των λέιζερ και των σερβομηχανισμών που κινούν τις κεφαλές εκτύπωσης θα επιτρέψουν την αύξηση της ακρίβειας (η οποία φθάνει σήμερα τα 0,08 mm στους άξονες x,y αλλά είναι μικρότερη στον άξονα z) και βελτίωση του φινιρίσματος των επιφανειών των κατασκευαζόμενων αντικειμένων. Σημαντική αύξηση των προϊόντων αναμένεται επίσης καθώς όλο και περισσότερα υλικά (κεραμικά, σύνθετα και ιδίως μέταλλα) θα γίνονται διαθέσιμα σε μορφή τέτοια ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα μηχανήματα.

Η διάδοση των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον τομέα των ανταλλακτικών αυτοκινήτων και άλλων οχημάτων. Οι κατασκευαστές δεν θα χρειάζεται πλέον να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ανταλλακτικών, ούτε οι πελάτες να περιμένουν ημέρες για την άφιξή τους, καθώς οι παραγωγοί θα μπορούν κατασκευάζουν ανταλλακτικά γρήγορα και on-demand. Επίσης, θα διευκολυνθεί η προμήθεια προϊόντων περιορισμένης παραγωγής και η κατασκευή παλαιότερων ή δυσεύρετων εξαρτημάτων και ανταλλακτικών. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι επίσης ιδανική για την κατασκευή προϊόντων κατά παραγγελία: Για παράδειγμα, με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο του κρανίου ενός ατόμου, είναι δυνατή η κατασκευή ενός κράνους με εξαιρετική εφαρμογή στο συγκεκριμένο άτομο. Επίσης, είναι γνωστό ότι η NASA πειραματίζεται με τη χρήση μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή γαντιών και άλλων τμημάτων διαστημικών στολών, τα οποία θα ταιριάζουν απόλυτα στις σωματικές αναλογίες και διαστάσεις του αστροναύτη που θα τα φορέσει. Οι δυνατότητες της χρήσης τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα αυτόν είναι ανεξάντλητες, καθώς αυτή επιτρέπει το customizing μιας μεγάλης ποικιλίας συσκευών, αντικειμένων προσωπικής χρήσης, παιχνιδιών ή προϊόντων για χομπίστες.

Ο Αμερικανικός Στρατός έχει δώσει μια νέα διάσταση στην τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς μελετά την κατασκευή κινητών μονάδων τοποθετημένων σε φορητά, οι οποίες θα μπορούν να συνοδεύουν τεθωρακισμένα και άλλα οχήματα στο πεδίο της μάχης και να κατασκευάζουν επιτόπου ανταλλακτικά, με βάση ψηφιακά αρχεία ή το επιτόπου σκανάρισμα των αντικειμένων.

Αρκετοί ερευνητές και κατασκευαστές μιλούν για την προοπτική της διάθεσης μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης απευθείας στους καταναλωτές και για τις πραγματικά επαναστατικές αλλαγές που θα επέφεραν αυτές στη λειτουργία της παραγωγής και της οικονομίας. Έχοντας στο γραφείο ή στο σπίτι του ένα μηχάνημα τρισδιάστατης εκτύπωσης, ο κάθε καταναλωτής θα μπορούσε να κατασκευάζει ο ίδιος αντικείμενα, εξαρτήματα, ανταλλακτικά, παιχνίδια κλπ., είτε προμηθευόμενος ψηφιακά σχέδια, είτε σκανάροντας φυσικά αντικείμενα. Προς το παρόν, πάντως, το κόστος των μηχανημάτων αυτών (τα φθηνότερα κοστίζουν 25.000-30.000 δολάρια) δεν επιτρέπει την απόκτησή τους από τον οποιονδήποτε καταναλωτή. Αρκετοί αναλυτές εκτιμούν πως ακόμη και αν το κόστος των μηχανών αυτών πέσει στα 10.000 δολάρια μέσα στην επόμενη δεκαετία, οι κύριοι χρήστες θα ήταν ένας αριθμός αυτοαπασχολούμενων τεχνικών οι οποίοι θα κατασκεύαζαν πρωτότυπα ή custom προϊόντα, καθώς και οι χομπίστες εκείνοι οι οποίοι θα ήταν διατεθειμένοι να διαθέσουν τα απαραίτητα χρήματα. Για μεγάλης κλίμακας διάθεση των μηχανών αυτών σε καταναλωτές, δεν μπορεί να γίνει λόγος αν η τιμή τους δεν πέσει στο επίπεδο των 1000 δολαρίων.

Οι προσδοκίες πάντως που έχουν εκφραστεί κατά καιρούς από διάφορες πλευρές, οι οποίες υπαινίσσονται την περίπου γενικευμένη χρήση των παραπάνω μηχανών σε βαθμό που το σύνολο σχεδόν των τομέων της παραγωγής θα εξοπλιστεί με μηχανήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης και κάθε καταναλωτής θα μπορεί να κατασκευάσει άμεσα το αντικείμενο της αρεσκείας του αρκεί να προμηθευτεί ένα μηχάνημα λίγο μεγαλύτερο από έναν εκτυπωτή, φαίνονται μάλλον εξωπραγματικές τουλάχιστον για το άμεσο μέλλον. Αλλωστε, είναι αμφίβολο αν οι τεχνικές Ταχείας Παραγωγής θα αντικαταστήσουν άλλες μεθόδους και ιδίως τις τεχνικές μαζικής παραγωγής, οι οποίες είναι οικονομικότερες όταν πρόκειται να παραχθούν μεγάλες ποσότητες προϊόντων.

Όπως και αν έχει πάντως, η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς σε πολλές χώρες του κόσμου. Οι ΗΠΑ θεωρούνται επικεφαλής στον τομέα, αλλά η Γερμανία, η Ιαπωνία και το Ισραήλ έχουν πραγματοποιήσει αξιοσημείωτη πρόοδο, ενώ αναμένεται ότι η τεχνολογία θα βρει σημαντική ανταπόκριση και σε λιγότερο ανεπτυγμένες τεχνολογικά χώρες. Μια από τις πλέον ενδιαφέρουσες εξελίξεις θα είναι η ανάπτυξη της λεγόμενης Παραγωγής από Απόσταση On-Demand (Distance Manufacturing On-Demand), η οποία συνδυάζει τεχνικές Ταχείας Παραγωγής με το Internet και θα επιτρέπει τόσο την αποστολή ψηφιακών σχεδίων προς τις κατασκευάστριες εταιρίες για άμεση παραγωγή, όσο και την προμήθεια/αγορά έτοιμων ψηφιακών σχεδίων για παραγωγή από τους ενδιαφερόμενους. Ας επισημάνουμε τέλος, πως η εμφάνιση των τεχνολογιών ταχείας προτυποποίησης/παραγωγής, έδωσε ώθηση και στον παραδοσιακό τομέα της κατασκευής προϊόντων με τη χρήση εργαλειομηχανών. Οι πρόοδοι στο λογισμικό αριθμητικού ελέγχου (numerical control), αλλά και στις δυνατότητες των μηχανημάτων αυτών, οδήγησαν στην αύξηση της ταχύτητας και της ακρίβειας των κατεργασιών. Τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας διαθέτουν μηχανήματα με πολλαπλούς άξονες η ταχύτητα των οποίων μπορεί να φθάσει έως και 100.000 στρ./λεπτό, με ανάλογη αύξηση των ταχυτήτων πρόωσης των εργαλείων, επιτρέποντας εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού, οι οποίοι μεταφράζονται σε ταχείς ρυθμούς παραγωγής. Αναμφίβολα, οι εργαλειομηχανές και τα κέντρα κατεργασίας θα εξακολουθήσουν και στο μέλλον να αποτελούν βασική συνιστώσα της παραγωγής (κυρίως όταν πρόκειται για την κατεργασία μετάλλων) και είναι ασφαλέστερο να υποθέσουμε ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση μάλλον θα συμπληρώσει παρά θα υποκαταστήσει τις μεθόδους αυτές.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) *WHATEVER YOU WANT, New Scientist, 30/9/2000.***
- (2) *INSTANT MANUFACTURING, Technology Review, November 2003.***
- (3) *www.newscientist.com, 3D PRINTER TO CHURN OUT COPIES OF HIMSELF, 18 March 2005***
- (4) *www.wohlerassociates.com***
- (5) *www.padtinc.com/rm/gen***
- (6) *www.infovis.net/printMag.***
- (7) *Home.att.net/~castleisland/3dprint.***
- (8) *//um3d.dc.umich.edu/equipment_3d_printer.***
- (9) *www.ad-mkt-review.com/public***
- (10) *www.zcorp.com***
- (11) *www.machinedesign.com***