

## Laboratorium Szybkiego Prototypowania

W Laboratorium prowadzona jest działalność dydaktyczna oraz realizowane są prace w zakresie:

- projektowania bezpośredniego prototypów i wytwarzania ich modeli fizycznych w żywicy epoksydowej,
- projektowania odwrotnego (reverse engineering) poprzez identyfikacje trójwymiarowe obiektów, ich modelowanie geometryczne oraz wykonanie modeli prototypów,

- projektowania i wytwarzania prototypów narzędzi i oprzyrządowania (wykorzystuje się metodę TAF). Laboratorium jest wyposażone w oprogramowaną numerycznie maszynę SLA-250 amerykańskiej firmy 3D z ukierunkowaniem na w/w prace, dydaktykę oraz komercyjną działalność.

Szybkie wytwarzanie prototypów (ang. Rapid Prototyping) z zastosowaniem metody stereolitografii. Szybkie wytwarzanie prototypów w ramach szybkiego rozwoju produktu. Współczesne firmy znajdują się pod presją nieustannego i ciągle rosnącego zapotrzebowania na nowe, konkurencyjne wyroby po coraz to niższych cenach. Zróżnicowane potrzeby przyszłych użytkowników (gust, moda, przyzwyczajenia kulturowe) wymuszają konieczność elastycznego i szybkiego przeobrażania parku maszynowego w narzędzia oraz skrócenia cykli produkcyjnych niewielkim nakładem inwestycyjnym. Stąd też firmy muszą wykorzystywać odpowiednie narzędzia, by móc zrealizować te trudne i często sprzeczne zadania. Stosowane, od lat osiemdziesiątych, systemy wspomaganie projektowania i wytwarzania, pozwalają znacznie zmniejszyć czasochłonność opracowania nowych wyrobów, także po mniejszych kosztach, albowiem wiele prób i badań nad nowymi wyrobami realizuje się wirtualnie w systemach komputerowych wspomaganie modelowania, wytwarzania i analizy inżynierskiej CAD/CAM/CAE (ang. Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing/ Computer Aided Engineering). Mimo znacznego ułatwienia i przyspieszenia prac z zastosowaniem tych systemów nie można całkowicie z całej fazy wytworzenia wyrobu wyeliminować wytworzenie prototypu. Wytworzony prototyp nawet jako model fizyczny produktu we wstępnej jego fazie rozwoju, pozwala na identyfikację ewentualnych błędnych lub nietrafionych założeń i decyzji, a następnie ich wyeliminowanie lub zmianę. Już na tym etapie, na podstawie takiego modelu, można opracować konstrukcję narzędzi do finalnego wytwarzania produktu przy produkcji seryjnej. Na następnych etapach rozwoju produktu, można wykonać wzorce funkcjonalne i prototypy techniczne. Wielokrotnie tworzenie i poprawianie prototypów modeli fizycznych możliwe się stało poprzez wynalezienie i zastosowanie w produkcji technik szybkiego wytwarzania prototypu (ang. Rapid Prototyping - RP) i szybkiego wytwarzania narzędzi, to jest form odlewniczych dla krótkich serii informacyjnych (ang. Rapid Tooling - RT). Zasadniczym celem zastosowań tych technologii jest modelowanie fizyczne (modele geometryczne, funkcjonalne, wizualne, montażowe, prototypy techniczne) na podstawie obiektów komputerowych 3D, głównie w celu oceny funkcji użytkowych, estetyki produktu, oraz oceny marketingowej. Niestety prototypy wykonane technikami RP i RT nie odpowiadają całkowicie wymaganiom dotyczącym funkcjonalności, ukształtowania czy jakości rzeczywistego produktu. Ich głównym zadaniem jest umożliwienie wskazanie słabych miejsc w rozwoju produktu, których eliminacja bez tych technologii pociągnęłaby za sobą znacznie większe koszty niż koszty poniesione na wytworzenie prototypów technologiami RP i RT. Pierwszą techniką, która umożliwiła szybkie wytwarzanie prototypów była metoda stereolitografii (SL). U zarania tej metody stało wynalezienie przez R. Hulla fotoinicjatorów, tj. dodatków do płynnych żywic, które powodowały po naświetleniu, rozpoczęcie procesu polimeryzacji. W 1987 powstała firma 3D Systems, która zaczęła rozpowszechniać metodę SL i sprzedawać maszyny do szybkiego wytwarzania prototypów metodą SL. Dwa lata później w 1989 r. opracowano technikę RP &ndash; SLS (ang. Selective Laser Sintering) polegająca na spiekaniu sproszkowanego materiału, którym są topliwe tworzywa sztuczne. Obok tych metod rozwinęły się jeszcze techniki jak: wyłoczone osadzanie materiału &ndash; FDM (ang. Fused Deposition Modeling), laminowanie warstw materiału &ndash; LOM (ang. Laminated Object Manufacturing), osadzanie materiału kroplami stopionego materiału &ndash; IJP (ang. Ink Jet Printing) oraz spajanie proszku strumieniem kropli spoiwa 3 DP (ang. 3D Printing). W 1999 r. maszynę SLA250/30 firmy 3D Systems do stereolitografii kupił Instytut Mechaniki i Konstrukcji Politechniki Warszawskiej. Idea procesu stereolitografii (rys.1.) zastosowany w maszynie SLA polega na lokalnej zmianie stanu fazowego jednorodnego ośrodka (zmianie ciec w ciało stałe) pod działaniem promieni UV lasera. Proces zmiany płynnej żywicy w zestaloną pod wpływem promieniowania nosi nazwę fotopolimeryzacji. Istota inicjowania fotopolimeryzacji polega na stworzeniu przez światło lasera rodników polimeryzacji, które wzajemnie oddziaływując z cząsteczkami monomeru, a następnie inicjują wzrost łańcuchów polimerowych. Tor wiązki lasera sterowany jest poprzez zwierciadło dynamiczne za pośrednictwem komputera, sterującego również pracą maszyny stereolitograficznej. Polimeryzacja przebiega tylko w obszarze naświetlania promieniem lasera w ściśle określonej objętości. Stąd też metoda ta charakteryzuje się stosunkowo dużą dokładnością.

Rys.1. Idea procesu wytwarzania prototypów metodą stereolitografii

Budowa maszyny stereolitograficznej Rys.2. Maszyna stereolitograficzna SLA250/30. 1 &ndash; laser, 2 &ndash; układ optyczny, 3 &ndash; przestrzeń robocza, 4 &ndash; zestaw kontrolny z komputerem

Maszyna stereolitograficzna zbudowana jest z czterech podstawowych modułów (rys.2): 1. lasera, 2. układu optycznego, 3. przestrzeni roboczej, 4. zestawu kontrolnego wraz z komputerem sterującym pracą maszyny. Laser maszyny SLA250/30 jest laserem jonowym, helowo-kadmowym. Laser ten emituje wiązkę w zakresie promieniowania ultrafioletowego o długości fali 325 nm (nadfiolet) i mocy od 2 do 40 mW. Średnicą wiązki padającej na płynną żywicę wynosi około 0,125 mm (zależnie od indywidualnego wykonania każdego lasera). Układ optyczny składa się ze zwierciadeł, których zadaniem jest zwiększenie skupienia promienia lasera oraz skierowania go do przestrzeni roboczej maszyny. Na układ optyczny składają się (rys.3): 1. przesłona (migawka) sterująca otwieraniem i zamykaniem drogi optycznej promienia lasera, 2. ekspander skupiający promień lasera. Im promień jest bardziej skupiony tym uzyskuje się większą gęstość mocy pozwalającą na szybsze spolimeryzowanie żywicy. Ponadto mniejsza średnica promienia zwiększa dokładność budowy a zwłaszcza umożliwia uzyskać większą rozdzielczość, która pozwala na budowę modeli składających się z drobnych i małych elementów. 3. zwierciadła kierujące, 4. zwierciadło dynamiczne, kierujące wiązkę do przestrzeni roboczej maszyny oraz przemieszczające wiązkę lasera po powierzchni żywicy. Rys. 3. Laser i układ optyczny maszyny stereolitograficznej. 1 &ndash; laser, 2 &ndash; przesłona, 3 &ndash; zwierciadła kierujące, 4 &ndash; ogniskowanie wiązki, 5 &ndash; okno optyczne, 6 &ndash; zwierciadło dynamiczne, 7 &ndash; płyta optyczna. Zwierciadła (kierujące i dynamiczne) pokryte są powłoką o wysokim współczynniku odbicia promieni lasera. Przestrzeń robocza maszyny (rys.4) stanowią: 1. zbiornik z płynną żywicą o pojemności 32,2 dm<sup>3</sup>, 2. perforowana platforma robocza z mechanizmem śrubowym. Mechanizm śrubowy napędzany silnikiem elektrycznym przemieszcza w pionowo platformę. Ruch góra-dół jest sterowany komputerem i zależy jest od aktualnej fazy procesu budowy. Otwory w platformie pozwalają na swobodne spływanie żywicy z modelu do zbiornika po zakończeniu procesu wytwarzania. Platforma umożliwia budowę prototypów o rozmiarach 250x250x250 mm i masie 9,1 kg, 3. zgarniacz zbierający nadmiar żywicy i precyzyjnie ustalając grubość nowo budowanej warstwy, 4. mechanizm kontrolno-sterujący utrzymujący żądany poziom żywicy w zbiorniku. W skład urządzenia kontrolno-sterującego poziomem żywicy wchodzi: laser He-Ne, elementy światłoczułe oraz nurnik. Zależnie od poziomu żywicy, sygnał pochodzący od fotoelementu steruje poziomem zanurzenia nurnika w żywicy utrzymując jej zadany poziom. Rys.4. Uwidoczniona przestrzeń robocza maszyny stereolitograficznej; 1 &ndash; zbiornik z cieplą żywicą, 2 &ndash; platforma robocza, 3 &ndash; zgarniacz, 4 &ndash; mechanizm kontrolno-sterujący

Zestaw kontrolny wraz z komputerem służy do kontrolowania i sterowania procesem wytwarzania prototypu. Ekran monitora pozwala, np. śledzić proces wytwarzania np. wyświetla kształt aktualnie budowanej warstwy, określa ile warstw zostało do zakończenia budowy, podaje aktualną moc lasera itp. Proces szybkiego wytwarzania modeli fizycznych. Typowy proces wytwarzania prototypu metodą stereolitografii można podzielić na następujące etapy (rys. 5): 1. utworzenie modelu geometrycznego w systemie CAD, 2. aproksymacja modelu bryłowego formatem STL, 3. przygotowanie procesu technologicznego służącego wytworzeniu prototypu &ndash; modelu fizycznego na maszynie z którym wiąże się: □ weryfikacja poprawności danych zapisanych w formacie STL, □ orientacja modelu w przestrzeni roboczej maszyny, □ utworzeniu podpór pod tworzony prototyp, □ określenie parametrów technologicznych procesu, tj.: - grubości nakładanej warstwy, - kompensacji "prześwietlenia" warstw, - kompensacji szerokości wiązki lasera, - liczby przejść i szybkość ruchu zgarniacza, - stylu budowy warstw. □ wygenerowanie plików sterujących procesem wytwarzania i przesłanie ich do układu sterowania maszyny, 4. wytworzenie prototypu &ndash; modelu fizycznego w żywicy. Rys.5. Etapy szybkiego wytwarzania prototypu metodą stereolitografii SL4. 1. Utworzenie modelu geometrycznego w systemie CAD. Pierwszym i podstawowym warunkiem wytwarzania w technologii RP jest uzyskanie trójwymiarowego modelu bryłowego w systemie CAD. Model bryłowy zapewnia, że geometria modelu jest zawsze zamknięta. Takiej pewności nie daje model powierzchniowy. Model może być zbudowany z brył prostokreślnych tzw. prymitywów (walec, sześcian, prostopadłościan itp.) Może także powstać z wykorzystaniem standardowych narzędzi edycyjnych takich jak: wyciąganie, obrót, ucinanie, fazowanie, zaokrąglanie itp. Pozyskanie, poprzez pomiary współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi lub trójwspółrzędnościowymi skanerami laserowymi, chmury punktów, która odpowiednio przetworzona, pozwala uzyskać model bryłowy pomierzonego obiektu. Pewną odmianą tego sposobu pomiaru obiektów jest pomiar np. człowieka, mumii, czy szczątków archeologicznych. Wykorzystuje się technikę znaną z diagnostyki medycznej, tj. rentgenowską tomografię komputerową lub tomografię rezonansu magnetycznego. Odpowiednie przetworzenie obrazów medycznych, np. pozwala wyodrębnić kontury interesujących obszarów, które pokryte płatem powierzchniowymi umożliwiają uzyskanie modelu bryłowego. Jak widać na rys.6 model bryłowy może być o różnym stopniu złożoności. Jedynym ograniczeniem dla metody stereolitografii jest grubość ścianki modelu, która nie może być mniejsza niż średnica promienia lasera.

Rys. 6. Modele bryłowe zbudowane z brył prostokreślnych a), z wykorzystaniem techniki wyciągania b) oraz model kości udowej pomierzonej tomografem komputerowym c) 4.2. Aproxymacja modelu bryłowego formatem STL Uzyskany w systemie CAD 3D model bryłowy aproksymuje się trójkątnymi płaciami połączonymi ze sobą w wierzchołkach. Charakterystyczną cechą takiej aproksymacji jest zamiana krzywizn (linii) zarysów zewnętrznych i wewnętrznych ścianek, przez cięciwy będące bokami trójkątnych płatów. Przy zapisywaniu zarysu określana jest odległość między jego krzywizną, a cięciwą (rys.7).

Rys.7. Zakładane odchyłki przy aproksymacji formatem STL Określany jest również kąt jaki tworzą między sobą boki trójkątów, tj. (cięciwy). Im mniejsze wartości liczbowe nadamy tym charakterystykom, tym model, będzie opisany większą liczbą trójkątnych płatów. Jednocześnie sprowadza się to do zwiększenia rozmiaru pliku z danymi. W pliku takim zapisywane są współrzędne wierzchołków i składowe wektora normalnego określającego orientację (wypukłość) ścianki. Uzyskuje się tym samym model zapisany w formacie STL. Może on być całkowitym odzwierciedleniem opisywanej geometrii (w przypadku obiektów zbudowanych z płaskich powierzchni) lub jedynie być przybliżeniem 3D geometrii obiektu w systemie CAD utworzonej np. przez powierzchnie cylindryczne, stożkowe, czy powierzchnie swobodne itp. (rys.8). Rys.8. Odwzorowanie powierzchni modelu (płaskiej i &bdquo;krzywoliniowej&rdquo;) a) trójkątnymi płaskimi płaciami powierzchniowymi &dash; formatem STL b) Model obiektu aproksymowany formatem STL jest czytelny przez oprogramowanie komputerowe maszyny. Umożliwia on tym samym przygotowanie procesu technologicznego i wytworzenie prototypu tego modelu. 4.3. Przygotowanie procesu technologicznego wytworzenia prototypu Pierwszym krokiem przygotowywania procesu technologicznego jest przeprowadzenie weryfikacji poprawności danych dotyczących modelu wirtualnego, a zapisanego formatem STL. Najpowszechniejszymi błędami modeli zapisanych tym formatem są: przeciwne kierunki wektorów normalnych przy opisie płatów trójkątnych, przypisanie krawędzi do więcej niż jednego trójkąta, szczeliny i luki geometryczne pomiędzy płaciami modelu (rys.9). Nieprzeprowadzenie analizy, bądź przeprowadzenie jej niedokładnie może skutkować niepoprawnym wytworzeniem modelu fizycznego.

Rys. 9. Błędy związane z budową aproksymowanych modeli geometrycznych formatem STL:

- zwroty wektorów normalnych zgodne z ogólnym kierunkiem generacji trójkątnych płatów,
- zwrot jednego wektora normalnego przeciwnie do kierunku generowanej siatki, z trójkątnych płatów,
- poprawne przypisanie krawędzi trójkątnych płatów,
- niepoprawne przypisanie krawędzi trójkątnych płatów,
- szczeliny w aproksymowanej powierzchni modelu wirtualnego

W kolejnym, tj. drugim kroku dokonuje się wirtualnie, właściwego zorientowania modelu w przestrzeni roboczej maszyny (rys.10a). Pozwala to na minimalizację negatywnych czynników wpływających na dokładność wytwarzania modelu oraz minimalizację czasu potrzebnego na jego budowę. Orientacja modelu w przestrzeni roboczej maszyny polega na: umieszczeniu modelu na perforowanej platformie roboczej (na której tworzony jest model), określeniu minimalnej i niezbędnej odległości między pierwszą warstwą modelu a platformą roboczą, minimalizacji liczby powierzchni pochyłonych (z uwagi na tzw. efekt schodkowy), maksymalizację liczby powierzchni w płaszczyźnie poziomej XY (z uwagi na większą dokładność budowy w osi Z), zminimalizowanie objętości zamkniętych, tj. takich 3D obszarów w modelu, które zatrzymują żywicę przy ruchach przestawczych stołu roboczego. W trzecim kroku niezbędne jest utworzenie podpór (rys.10b). Model fizyczny budowany jest na perforowanej platformie roboczej, do której jest on mocowany. Zadaniem podpór jest nie tylko pewne mocowanie modelu, ale też dokładne jego ustalenie na platformie. Podpory oddzielają model od platformy umożliwiając jego łatwiejsze usunięcie po zakończeniu budowy (nie pozostawiając trudnych do usunięcia śladów), zapobiegają zniekształceniom prototypu w czasie jego tworzenia, tj. utwardzania kolejnych warstw żywicy oraz wspierają powierzchnie wymagające dodatkowego podparcia. Następnym, czwartym krokiem przygotowania procesu jest określenie jego parametrów technologicznych, tj. takich jak: grubość nakładanych warstw, kompensacja &bdquo;prześwietlenia&rdquo; warstw, kompensacja wynika z średnicy wiązki lasera, liczby przejść i szybkości ruchu zgarniacza, a także ze stylu budowy warstw. Szczególnie tutaj ważnym parametrem jest grubość warstwy, albowiem znacząco on wpływa na dokładność, poprzez wspomniany już efekt schodkowy (rys.11) oraz czas tworzenia prototypu. Zmniejszenie grubości warstw zwiększa dokładność prototypu jednakże realizowane jest to kosztem zwiększania czasu tworzenia. Na czas ten wpływają także dodatkowe czynności, jak np. przerwy na uspokojenie powierzchni żywicy między kolejnymi czynnościami procesu wytwórczego.

Rys.10. Orientacja modelu w przestrzeni roboczej maszyny a), generacja podpór b)

Ostatnim etapem jest wygenerowanie plików sterujących pracą maszyny SLA. Pliki inicjują analizę, w której dzieli się wirtualny obiekt z podporami na warstwy o zadanej grubości, aproksymują geometrię modelu podzielonego na warstwy poprzez zbiór wektorów, oblicza optymalną trajektorię wypełniania przekrojów i formuje program do wykonania konkretnego prototypu. 4.4. Wytworzenie prototypu w

żywicy Model budowany jest na ruchomej platformie zanurzonej w zbiorniku z ciekłą żywicą. Początkowo odległość płyty nośnej podnośnika od powierzchni ciekłego polimeru równa się odległości pierwszej warstwy kształtowanego prototypu. W obszarze poddanym działaniu promienia lasera, tworzy się warstwa utwardzonego polimeru, która przykleja się do perforowanej platformy roboczej. Po zakończeniu kształtowania warstwy, platformę z zestaloną warstwą opuszcza się o zadaną wielkość, równą grubości kolejnej warstwy, w głąb zbiornika z ciekłym polimerem. W procesie stereolitografii przedmioty tworzone są metodą przyrostową warstwa po warstwie. Poprzez warstwowe scalenie polimeru i kolejne obniżanie platformy powstaje trójwymiarowy model fizyczny wytwarzanego obiektu. Po wykonaniu wszystkich warstw platforma zostaje podniesiona, co powoduje całkowite wynurzenie modelu. Następnie model po wyjęciu z przestrzeni roboczej poddany jest obróbce wykańczającej. Polega ona na oczyszczeniu modelu z nieutwardzonego polimeru. Następnie utwardza się w go komorze tzw. dodatkowego usieciowana (polimeryzacji) pod działaniem promieni nadfioletowych a następnie usuwa się podpory. Gotowy prototyp można poddać jeszcze dodatkowej obróbce, np. szlifowaniu, polerowaniu, malowaniu, itp. Żywice są łatwo obrabialne można je również kleić, szpachlować i lakierować. Wszystkie procesy wykończeniowe zależą wyłącznie od przeznaczenia późniejszego modelu fizycznego.

Rys. 11. Efekt schodkowy w zależności od przestrzennej orientacji modelu przy tej samej grubości nakładanej warstwy a) oraz w zależności od grubości nakładanej warstwy g przy tej samej orientacji modeli b)

5. Wady i zalety stereolitografii. Do zalet wytwarzania prototypów metodą stereolitografii można zaliczyć:  szybkie tworzenie prototypu  możliwość budowy modelu fizycznego o wysokim stopniu złożoności geometrii oraz powierzchniach swobodnych, przy czym grubość ścianek jest nie mniejsza niż średnica wiązki lasera,  relatywnie niskie koszty wytwarzania. Stereolitografia charakteryzuje się także wadami do których należą:  ograniczone, przestrzenią roboczą maszyny, wymiary prototypów,  ograniczony zbiór możliwych do wykorzystania materiałów w procesie wytwarzania,  wymagania mechaniczne części które spełnione są tylko w ograniczonym zakresie,  ograniczona dokładność (ok.  $\pm 0,1$  mm),  niska jakość powierzchni pochyłonych (efekt schodkowy),  pozostałości na powierzchniach podpartych podporami po usunięciu podpór. 6. Zastosowania metody stereolitografii w przemyśle i medycynie. 6.1. Zastosowania w przemyśle.

Rys.12. Łopátka turbiny; a) model bryłowy, b) model STL, c) model z podporami podczas przygotowywania procesu wytwórczego

Rys. 13. Obudowa; a) model bryłowy, b) model STL, c) model z podporami podczas przygotowywania procesu wytwórczego

Rys. 14. Butelka; a) model bryłowy, b) model STL, c) model z podporami podczas przygotowywania procesu wytwórczego

Rys.15. Pokrętko a) model bryłowy, b) model STL, c) model z podporami podczas przygotowywania procesu wytwórczego

Rys.16. Obudowa; a) model bryłowy, b) model STL, c) model z podporami podczas przygotowywania procesu wytwórczego 6.2. Zastosowania w medycynie. Rys. 17. Wytworzone modele fizyczne bliższej części kości udowej a) i endoprotezy b). Rys.18. Zabieg alloplastyki na wytworzonych modelach. a) Resekowanie główki kości udowej, b) osadzenie endoprotezy w jamę szpikową kości.

Rys.19. Analiza stopnia wypełnienia jamy szpikowej endoprotezą. Rys. 20. Odbudowa zniszczonej miednicy koszykiem panewkowym a), model szkieletowy koszyka b), model bryłowy koszyka c), aproksymowany formatem STL model koszyka d), model fizyczny koszyka e) Rys.21. Rozłożone elementy endoprotezy krążka kręgosłupa lędźwiowego a), Endoproteza w złożeniu b)