

POLITECHNIKA RZESZOWSKA  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Katedra Techniki Wytwarzania i Automatyzacji

Rzeszów, 8.12.2016

#### STRESZCZENIE PRACY DOKTORSKIEJ

### **Dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach rapid technologii**

**Autor:** mgr inż. Ireneusz Cena

**Promotor:** dr hab. inż. Andrzej Kawalec, prof. PRz

W rozprawie doktorskiej opracowano algorytm wyboru odpowiedniej rapid technologii wykonania wyrobu. Algorytm ten powstał w wyniku własnych badań naukowych i długoletniego doświadczenia zdobytego w przemyśle samochodowym. Na przykładach pokazano jak przyjąć właściwą metodę przyrostową wytwarzania wyrobu.

Na początku pracy przeprowadzono przegląd literatury w zakresie metod szybkiego prototypowania (Rapid Prototyping) oraz szybkiego wytwarzania (Rapid Manufacturing). Zwrócono uwagę zarówno na metody rapid technologii jak i stosowane materiały oraz modele testowe. Omówiono ich klasyfikację, podając m.in. ich wady i zalety. Przedstawiono najważniejsze informacje dotyczące zagadnień odwzorowania modeli wirtualnych w rapid technologiach. Zwięźle omówiono zagadnienia dokładności odwzorowania modeli wirtualnych oraz ich dyskretyzacji i triangulacji powierzchni.

W dalszej części podano cel, zakres i hipotezę pracy. Następnie zwięźle omówiono metodykę badań eksperymentalnych oraz analizy ich wyników.

W celu wykonania badań porównawczych dotyczących wybranych rapid technologii oraz stosowanych w nich materiałów opracowano **nowatorskie modele testowe**, tzw. *benchmarki*. Modele te cechują się tym, że zawierają w niedużej przestrzeni **wiele powierzchni płaskich i krzywoliniowych, wewnętrznych i zewnętrznych o różnych kształtach**. Pozwalają one na wszechstronne zbadanie dokładności kształtowo-wymiarowej przedmiotów wykonywanych rapid technologiami. Dla zbadania zarówno dokładności kształtowo-wymiarowej, jakości powierzchni, jak i struktury wewnętrznej wyrobów otrzymywanych z użyciem rapid technologii opracowano także specjalny model testowy, powierzchniowo-strukturalny. Uwzględnia on różne kąty nachylenia badanych powierzchni płaskich i krzywoliniowych do podstawy oraz otwory wewnętrzne a jednocześnie jest dostosowany do badań topografii powierzchni. Model ten posłużył również do **porównania efektywności wybranych rapid technologii i kształtowania ubytkowego**.

W dalszej części pracy opisano sposób wykonania poszczególnych modeli oraz podano wyniki wszechstronnych pomiarów dotyczących ich **dokładności kształtowo-wymiarowej, topografii powierzchni** i wybranych **właściwości mechanicznych materiałów**. Pomiarów wykonano używając **nowoczesnych metod i urządzeń pomiarowych**: stykowych, optycznych i innych, w tym m.in. współrzędnościowej techniki pomiarowej, skanerów optycznych, mechanicznych i elektronicznych przyrządów pomiarowych, profilometru, mikroskopów optycznych, tomografu komputerowego, ma-

szyny wytrzymałościowej, przyrządów do pomiaru twardości i innych. Pomiarzy dotyczące kształtu i wymiarów oraz właściwości mechanicznych materiałów wielokrotnie powtarzano a uzyskane wyniki przeliczono i przeanalizowano **metodami statystyki matematycznej**. Wyznaczono podstawowe statystyczne charakterystyki opisowe i pozycyjne, zastosowano testowanie postawionych hipotez statystycznych i określono przedziały ufności najważniejszych parametrów.

W odniesieniu do chropowatości i falistości **obliczono i przeanalizowano szereg parametrów, w tym parametry wysokości, przestrzenne, hybrydowe i funkcyjne**, które dostarczają informacji o różnych cechach topografii powierzchni mających wpływ na jakość powierzchni i jej właściwości użytkowe. Omówiono również podstawowe charakterystyki rozkładów tych parametrów. Wyniki badań wszechstronnie przeanalizowano w kontekście technologii i materiałów użytych do wykonania modeli. Ponadto przedstawiono wyniki badań dotyczących **struktury wewnętrznej modeli** wykonanych z użyciem wybranych rapid technologii. Wykonano badania porównawcze kształtowania ubytkowego modelu powierzchniowo-strukturalnego oraz badania właściwości mechanicznych materiałów.

W kolejnych rozdziałach dokonano porównania otrzymanych wyników oraz przeanalizowano zmiany parametrów opisujących dokładność kształtowo-wymiarową oraz topografię powierzchni i właściwości mechaniczne materiałów. Na podstawie uzyskanych wyników badań **sformułowano rekomendacje dotyczące wyboru rapid technologii** w zależności od stopnia złożoności kształtu modelu, jego wielkości oraz wymagań dotyczących dokładności kształtowo-wymiarowej i jakości powierzchni. Przedstawiono najważniejsze czynniki mające wpływ na wielkość **kosztów wykonania** wyrobów rapid technologiami oraz wzajemne relacje między nimi, co stanowi podstawę do przybliżonej oceny kosztów wykonania wyrobu rapid technologiami.

W dalszej części dysertacji **zaproponowano algorytm wyboru rapid technologii** dla wyrobu. Przedstawiono kilka przykładów wyrobów seryjnych, wykonywanych technologiami formowania wtryskowego. Przy wyborze rapid technologii oraz ich parametrów procesowych i materiałów na prototypy ww. wyrobów zastosowano opracowany w dysertacji algorytm. **Porównano dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w prototypach wykonanych rapid technologiami i odpowiednich wyrobach seryjnych**. Analiza porównawcza dokładności odwzorowania modeli wirtualnych w ww. prototypach, wykonanych rapid technologiami z użyciem opracowanego algorytmu, oraz w wyrobach seryjnych wskazuje na prawidłowość zarówno zaproponowanych rekomendacji, jak i opracowanego algorytmu wyboru rapid technologii. Wykonane w ramach pracy doktorskiej badania umożliwiły sformułowanie końcowych wniosków **poznawczych oraz użytkowych**, potwierdzających słuszność postawionej hipotezy i osiągnięcie celu pracy. W ostatnim rozdziale pracy określono oryginalne elementy pracy i wskazano kierunki dalszych prac badawczych w odniesieniu do wybranych zagadnień rozważanych w pracy doktorskiej.

Cytowane w pracy publikacje umieszczono w bibliografii liczącej 237 pozycji. Szczegółowe wyniki badań zebrano w formie tabel, wykresów, rysunków i fotografii pogrupowanych w 5 załącznikach. Są one cytowane w zasadniczej części dysertacji. W pracy znajduje się 77 tabel i 334 rysunki. Dysertacja liczy 350 stron.

**Słowa kluczowe:** *rapid technologie, wzorce modelowe, krzywoliniowe powierzchnie brzegowe, dokładność odwzorowania modeli wirtualnych, dokładność kształtowo-wymiarowa, topografia powierzchni, struktura wewnętrzna wyrobu, właściwości mechaniczne materiałów*

RZESZÓW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics  
Department of Manufacturing Techniques and Automation

Rzeszów, 8.12.2016

PhD THESIS ABSTRACT

## **The accuracy of representation of virtual models with selected rapid technologies**

**Author:** mgr inż. Ireneusz Cena

**Supervisor:** DSc PhD Eng. Andrzej Kawalec, prof. RUT

In this thesis the author developed an algorithm for the selection of a correct rapid technology for the prototype manufacturing, based on the results of own scientific studies and years of experience in automotive industry. Examples are also given which show proper selection of suitable rapid technology for product manufacturing.

At the beginning of this dissertation there is presented a review of the literature in the range of Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing processes. The attention is paid to rapid technologies as well as used materials and test models. Their classification is discussed, among others, with their disadvantages and advantages. Next, the most important information concerning the representation of virtual models using rapid technologies is presented. Problems concerning the accuracy of representation of virtual models as well as their discretization and surface triangulation are briefly discussed.

In the following the objective, range and the hypothesis of dissertation are expressed. The methodology of experimental studies and analysis of the results is briefly presented.

**The innovative test models, benchmarks,** are developed to carry out the comparison research concerning selected rapid technologies and used materials. These models are characterized by **many planar and curvilinear, inner and outer surfaces of different shapes**. They enable comprehensive investigation of the accuracy of forms and dimensions concerning products made using rapid technologies. Special surface-structural test model is developed for testing the accuracy of forms and dimensions as well as the quality of surface texture and the inner structure of objects made with rapid technologies. That model considers planar and curvilinear surfaces with different angles of inclination to the base surface and inner holes. At the same time it is adapted to surface texture testing. That model is also used for **the comparison of rapid technologies and subtractive manufacturing effectiveness**.

In the next part of dissertation there is described complete information on how the developed test models are made. There are also given the results of comprehensive measurements concerning **the accuracy of forms and dimensions, surface quality** and selected **mechanical properties**. The measurements are done using **modern methods and measuring devices**: contact, optical and others – coordinate measuring machine, optical scanners, mechanical and electronic measuring devices, profilometer, optical microscopes, computer tomographs, tensile strength testing machine, hardness testing machines and others. The measurements concerning dimensions, shape and

mechanical properties of materials were repeated many times and obtained results were used for statistical computations. They are analyzed using **mathematical statistics methods**. Fundamental descriptive and order statistics are determined. Testing of developed hypotheses is performed. Coefficient confidence intervals are computed for the most important parameters.

In the case of roughness and waviness **several parameters, including height, spatial, hybrid and functional parameters, are calculated and analyzed**. Those parameters provide information about different features of surface topography which influence its evaluation. The basic characteristics of statistical distribution of those parameters are discussed. The research results are comprehensively analyzed in the context of the technologies and materials used for the rapid manufacturing of investigated models. Furthermore, there are presented research results concerning the **inner structure** of the models made using the chosen and analyzed in the dissertation rapid technologies. Comparative investigations concerning the subtractive manufacturing of the surface-structural test model and the mechanical properties of materials are made.

In the next chapters there are compared and analyzed the obtained results and the changes of parameters describing the accuracy of forms and dimensions as well as parameters describing the surface topography and mechanical properties of materials. On the ground of obtained testing results there are formulated a couple of **recommendations concerning the selection of rapid technologies**. That selection depends on the complexity of applied shapes, size of a product and requirements considering the accuracy of forms and dimensions as well as surface quality. There are presented the most important factors influencing the quantity of **product manufacturing costs** with rapid technologies and interactions between those factors. It is the basis for the estimated costs evaluation of the product manufacturing with rapid technologies.

In the following an **algorithm is proposed for the selection of a suitable rapid technology** for product manufacturing. Next, several examples of parts manufactured using injection moulding technology in series are presented. The prototypes of those parts were made using rapid technologies which had been selected, including process parameters and materials, using the developed algorithm. **The accuracy of forms and dimensions of the above-mentioned serial parts and their prototypes made with rapid technologies is compared**.

A comparative analysis of the accuracy of representation of virtual models in aforesaid prototypes manufactured with selected rapid technologies using the developed algorithm and in serial parts indicates the correctness of the proposed recommendations and the algorithm for the selection of a suitable rapid technology. The investigations made within the range of this thesis allowed to draw final **cognitive and utilitarian conclusions** which confirm correctness of the stated hypothesis and reaching the objective of the thesis. In the last chapter of the thesis there are determined the original elements of the thesis and the directions of future research concerning selected problems investigated in the thesis.

Publications referenced in the thesis are enumerated in bibliography containing 237 items. Detailed results of testing are given in tables, graphs, drawings and photos. They are grouped in 5 appendices. They are referenced in the main part of the thesis. The thesis contains 77 tables and 334 figures. The thesis is written on 350 pages.

**Key words:** *rapid technologies, benchmarks, curvilinear boundary surfaces, accuracy of representation of virtual models, accuracy of dimensions and forms, surface topography, internal structure of a product, mechanical properties of materials*