

Wybrane aspekty jakości w sferze przedprodukcyjnej

Wstęp

Współczesny rynek wymusza szybkie zmiany w zakresie rozwoju oferowanych produktów. Proces ten wymusza staranne przygotowanie wyrobu już w sferze przedprodukcyjnej. W tej sferze ważne jest, by dysponować już odpowiedniej jakości wyrobem w pojedynczych ilościach, gdyż znacznie to skraca cały proces przygotowania produkcji, jak i umożliwia weryfikację i dopracowanie jego konstrukcji. Na tym etapie modele i prototypy wyrobów wykonuje się metodami szybkiego prototypowania, które umożliwiają ich wykonanie bezpośrednio z modelu CAD, bez stosowania tradycyjnych metod obróbki. Jednym z aspektów jakości wykonywanych części jest struktura ich powierzchni. Powierzchnie te cechuje specyficzna struktura powierzchni, zwana efektem „schodkowym”, która jest usuwana w procesie dodatkowej obróbki wykończeniowej (tj. tzw. *postprocessing*). Aby minimalizować ten proces należy zwrócić uwagę na parametry procesu wykonania modelu. Natomiast poznanie mechanizmów tworzenia się nierówności umożliwia przygotowanie tych urządzeń w sposób ograniczający niekorzystne cechy powstającej struktury powierzchni. Celem tego artykułu jest opisanie parametrów, które wpływają na chropowatość powierzchni pionowych elementów wykonywanych metodą Stereolitografii oraz prezentacja wyników badań eksperymentalnych tych powierzchni.

1. Chropowatość powierzchni pionowych

Metoda Stereolitografii wykonywania modeli i prototypów powstała jako jedna z pierwszych wśród technologii szybkiego prototypowania (RP). Metody te wykonują model rzeczywisty (prototyp) bezpośrednio z modelu wirtualnego CAD 3D, bez stosowania obróbki tradycyjnej i oprzyrządowania. Powstaje on w jednym położeniu, bez określania prefabrykatu i jego stanów pośrednich. Podstawową zasadą podczas wykonywania modeli metodami przyrostowymi jest wirtualny podział modelu CAD 3D na warstwy, a następnie realizacja ich w urządzeniu RP. W Stereolitografii model

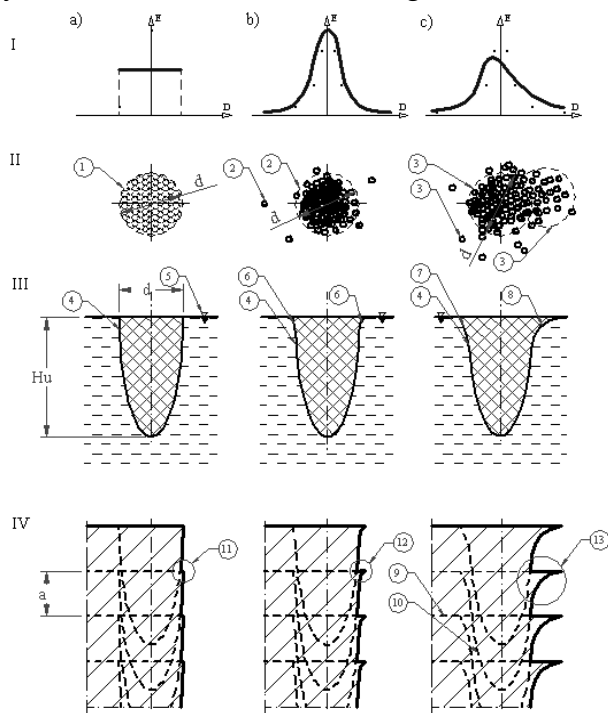
* Dr inż., Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechnika Gdańska, sdzionk@pg.gda.pl

CAD 3D dzielimy na warstwy przyrostowe o grubości od 50 do 150 μm , a następnie są one wykonywane poprzez skanowanie laserem płynnego fotopolimeru, co powoduje jego zestalanie się. Taki proces tworzenia modelu powoduje, że na powierzchniach ukośnych modeli wykonywanych tą metodą powstaje struktura „schodkowa” profilu nierówności. Modele tej struktury, jak i częściowe opisy powstających nierówności, przedstawiono między innymi w literaturze [Reeves, Cobb, 1997; Campbell i inni, 2002; Ahn i inni, 2009; Dzionk, 2010].

Struktura ta nie tworzy się na powierzchniach pionowych, natomiast inne zjawiska powodują, że powstają na nich dodatkowe elementy geometrycznej struktury powierzchni. Jedną z przyczyn tworzenia się tych nierówności jest stan wiązki skanującej lasera. W metodzie Stereolitografii wiązka skanująca lasera jest skupiana za pomocą układu optycznego tworząc ognisko na poziomie powierzchni żywicy. Generalnie dążymy do tego, aby kształt tego ogniska był kołem i rozkład energii w nim równomierny, co schematycznie przedstawia segment na rysunku 1. Jest to bardzo trudne do uzyskania, gdyż brak precyzji w wykonaniu elementów układu optycznego powoduje rozpraszanie się światła i w tym przypadku celem jest uzyskanie wiązki maksymalnie skupionej, mimo że występują w niej niewielkie odbicia światła (segment b na rysunku 1).

W trakcie eksploatacji taki układ ma tendencję do rozkalibrowywania się, np. pod wpływem występujących: drgań, kurzu itp. i następuje rozproszenie światła na większym obszarze aniżeli zakładany obszar zogniskowania (d) (segment c na rysunku 1). Takie rozkalibrowanie wiązki powoduje zmianę kształtu utwardzanej objętości żywicy przez laser. Dla wiązki idealnej kształt ten przypomina paraboloidę (rysunek IIa) (ang. *bullet*) natomiast dla wiązki rozkalibrowanej dodatkowe fragmenty światła utwardzają żywicę w miejscach poza obszarem zogniskowania wiązki, powodując znaczne zniekształcenie tej objętości w strefie powierzchniowej. Skanowanie granicy warstw taką wiązką powoduje żywica utwardzona, przez dodatkowe fragmenty rozproszonego światła tworzy dodatkowe nierówności na powierzchniach pionowych. Schemat powstawania tych dodatkowych nierówności został przedstawiony w segmencie IV na rysunku 1.

Rysunek 1. Schemat rozkładu energii w wiązce laserowej



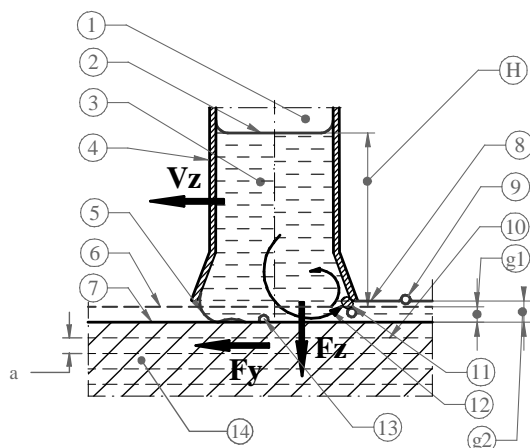
Legenda: a – wiązka idealna, b – wiązka dopuszczalna, c – wiązka rozkalibrowana, I – rozkład promieniowania we wiązce, II – kształt ogniska wiązki, III – kształt utwardzania się żywicy podczas oświetlenia wiązką lasera, IV – kształt nierówności na powierzchni pionowej, 1 – granica wiązki, 2 – fragmenty światła we wiązce dopuszczalnej, 3 – fragmenty światła we wiązce rozproszonej, 4 – zarys granicy utwardzonej żywicy wiązką idealną, 5 – znacznik poziomy żywicy, 6 – dopuszczalne odchylenia, 7, 8 – niedopuszczalne obszary utwardzenia żywicy dla wiązki rozkalibrowanej, 9 – granica warstw, 10 – zarys granicy utwardzania, 11 – nierówności powstające poprzez skanowanie wiązką idealną, 12 – nierówności powstające poprzez skanowanie wiązką dopuszczalną, 13 – nierówności powstające poprzez skanowanie wiązką rozkalibrowaną, E – energia wiązki, D – odległość od osi wiązki, d – obszar skupienia wiązki, H_u – głębokość utwardzania żywicy, a – grubość warstw przyrostowych.

Źródło: Opracowanie własne.

Kolejnym z istotnych czynników wpływających chropowatość powierzchni pionowych jest praca zgarniacza. Zadaniem zgarniacza jest nałożenie kolejnej warstwy płynnej żywicy na wcześniej utwardzoną warstwę. Jest on tak zbudowany, że poza obrębem modelu zasysa żywicę ze zbiornika i przemieszczając się pozostawia na powierzchni przyrostowej modelu warstwę płynnej żywicy o zaprogramowanej grubości. Schemat pracy zgarniacza przedstawia rysunku 2. Ze względu na znaczną lepkość żywicy

ruch zgarniacza nad powierzchnią modelu powoduje powstawanie sił oddziaływujących na wykonywany model.

Rysunek 2. Schemat pracy zgarniacza



Legenda: V_z – prędkość przemieszczania zgarniacza, F_y – siła oddziaływania zgarniacza na wykonywany model w kierunku osi y , F_z – siła oddziaływania zgarniacza na wykonywany model w kierunku osi z , 1 – obszar podciśnienia w zgarniaczu, 2 – poziom żywicy w zgarniaczu, 3 – żywica, 4 – ścianka zgarniacza, 5 – powierzchnia czołowa nakładanej żywicy, 6 – granica warstwy przyrostowej, 7 – powierzchnia modelu, 8 – powierzchnia żywicy za zgarniaczem, 9 – pęcherzyki powietrza, 10 – granica warstw przyrostowych, 11 – narost z żywicy na zgarniaczu, 12 – kierunki zawirowania żywicy w skutek ruchu zgarniacza, 13 – pęcherzyki powietrza zamykane podczas nakładania żywicy, 14 – materiał modelu, H – wysokość żywicy w zgarniaczu, g_1 – różnica pomiędzy powierzchnią żywicy za zgarniaczem a grubością warstwy przyrostowej, g_2 – grubość warstwy nakładanej żywicy, a – grubość warstw przyrostowych.

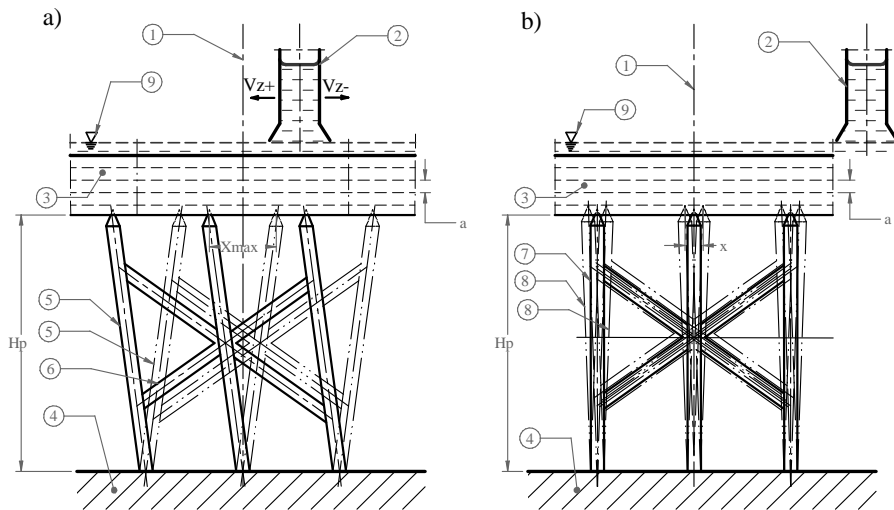
Źródło: Opracowanie własne.

Siły te możemy rozłożyć na kierunek y (F_y tj kierunek ruchu zgarniacza) i kierunek z (F_z tj kierunek przyrastania modelu). Siła w kierunku z F_z powoduje odkształcenia modelu w obszarze dolnych warstw przyrostowych, natomiast działanie siły F_y wzdłuż kierunku ruchu zgarniacza powoduje przemieszczanie się modelu w stosunku do osi głównej urządzenia, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.

Ruch zgarniacza nad powierzchnią modelu powoduje jego przemieszczanie się na podporach i są to odkształcenia, które powodują sprężyste wychylenia go na dystansie x_{\max} (rysunek 3a). Po przejściu zgarniacza poza jego obręb oddziaływania sił ustają i model cofa się w kierunku pozycji wyjściowej. Niestety nie powraca na tę pozycję (7 na rysunku 2b). Po wychyleniu pozostaje on w pozycji lekko przemieszczonej przedstawionej na

rysunku 3b. Zgarniacz zazwyczaj jest zaprogramowany by nakładać żywicę naprzemiennie w dwóch kierunkach (zgodnie z kierunkiem osi z i w kierunku do niej przeciwnym). Taki ruch zgarniacza powoduje przemieszczanie się modelu w tych kierunkach i wielkość przemieszczenia w stosunku do osi głównej urządzenia powoduje przesunięcia w układaniu warstw, gdyż system skanowania określa granice warstw przyrostowych w oparciu o położenie osi głównej urządzenia.

Rysunek 3. Schemat przemieszczania się modeli podczas nanoszenia kolejnych warstw żywicy



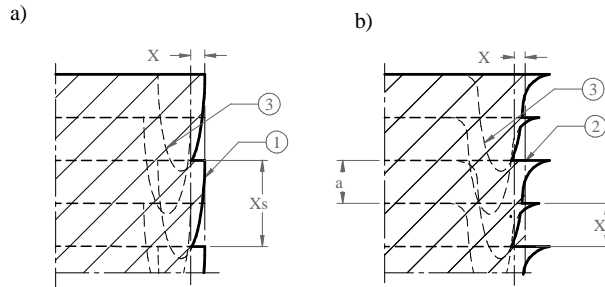
Legenda: a – przemieszczanie się modelu podczas ruchu zgarniacza, b – przemieszczenie modelu po ustaniu ruchu zgarniacza, 1 – centralna oś urządzenia, 2 – zgarniacz, 3 – wykonywany model, 4 – platforma urządzenia, 5 – słupek podpór wychylony podczas ruchu zgarniacza, 6 – średnik (ukośnik) struktury podpór, 7 – słupek podpór w pozycji wyjściowej, 8 – słupek podpór w pozycji po ustaniu ruchu zgarniacza, 9 – znacznik poziomu żywicy, V_{z+} – prędkość zgarniacza w kierunku zgodnym ze wektorem współrzędnych urządzenia, V_{z-} – prędkość zgarniacza w kierunku przeciwnym do wektora współrzędnych urządzenia, H_p – wysokość podpór, a – grubość warstw przyrostowych, x – zakres przemieszczania się modelu wynikający z wychyleń podpór po ustaniu ruchu zgarniacza, x_{max} – zakres wychyleń podpór w trakcie ruchu zgarniacza.

Źródło: Opracowanie własne.

Przemieszczający się model powoduje powstawanie na ściankach pionowych strukturę powierzchni przesuniętych warstw, co schematycznie przedstawia rysunek 4. Wielkość uskoków we wysokości poszczególnych wzniesień zależą od wielu czynników, z których najistotniejsze są to prędkość przesuwu zgarniacza, lepkość żywicy, podatność podpór na odkształ-

cenia, która zależna też od ich wysokości (H_p na rysunku 3). Struktura taka powstaje tylko na kierunku pracy zgarniacza. W celu minimalizacji skutków tego zjawiska powinno się minimalizować wysokość podpór (H_p na rysunku 3), co nie zawsze jest możliwe ze względu na inne cechy wykonywanego modelu np. potrzebę łatwego oddzielenia go od platformy.

Rysunek 4. Schemat nierówności powierzchni powstających na ściankach pionowych



Legenda: a – schemat nierówności powstających na ściankach pionowych skanowanych wiązką skupioną b – schemat nierówności powstających na ściankach pionowych skanowanych wiązką rozkalibrowaną, 1, 2 – profil geometryczny nierówności, x – zakres przemieszczania się modelu w skutek ruchu zgarniacza, a – grubość warstwy.

Źródło: Opracowanie własne.

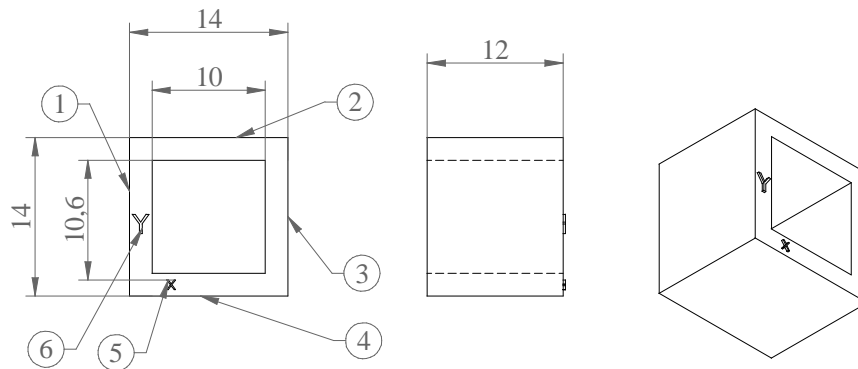
2. Badania eksperymentalne

2.1. Opis badań

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych metodą Stereolitografii. Próbki te zostały wykonane na urządzeniu typu Viper S12 firmy 3D SYSTEMS. Kształt i wymiary próbek przedstawiono na rysunku 5. Korzystając z oprogramowania „Lightyear” przygotowano program sterujący, w którym przyjęto grubość warstw przyrostowych 0,15 mm, natomiast średnicę wiązki skanującej lasera 0,25 mm. Zaprogramowano pojedyncze naprzemienne przejście zgarniacza na każdą warstwę. Wysokość podpór wynosiła 10mm. Oś próbki umieszczono na centralnej osi urządzenia (środek platformy) oraz powierzchnie mierzone ustawiono równoległe do osi współrzędnych urządzenia. W celu ułatwienia określenia położenia próbki w stosunku do układu współrzędnych maszyny zostały na niej wykonane znaczniki. Przy takim ustawieniu próbki kąt pochylenia profilu warstwy wynosił $\phi=50^\circ$. Próbki wykonano z żywicy o handlowej nazwie „ACCURA SI10”. Po wykonaniu oczyszczono je z resztek żywicy stosując izopropanol jako rozpuszczalnik, oraz poddano 20 minutowemu działaniu promienio-

wania UV w urządzeniu PCA. Pomiary przeprowadzono z użyciem profilometru T1000 Firmy Hommel Tester.

Rysunek 5. Rysunek próbki badawczej

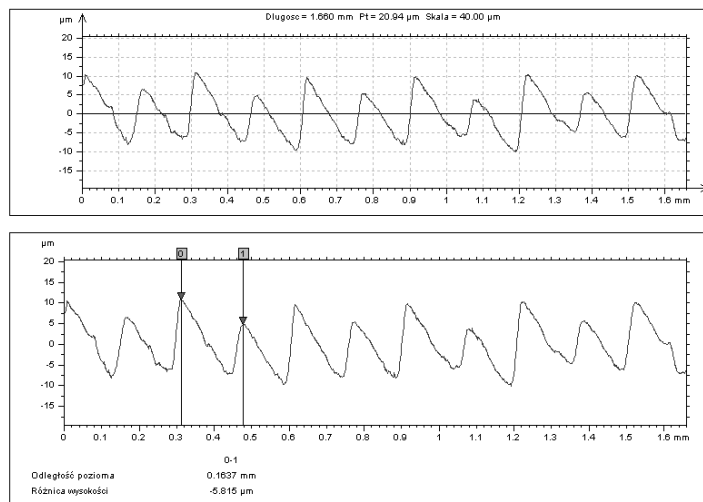


Legenda: 1÷4 – powierzchnie próbki, na których wykonano pomiary, 5, 6 – znaczniki wg, których ustawiano próbkę na platformie urządzenia.

Źródło: Opracowanie własne.

2.2. Wyniki badań

Rysunek 6. Profilogramy powierzchni równoległej do zgniatacza (powierzchnia Y)



Źródło: Opracowanie własne.

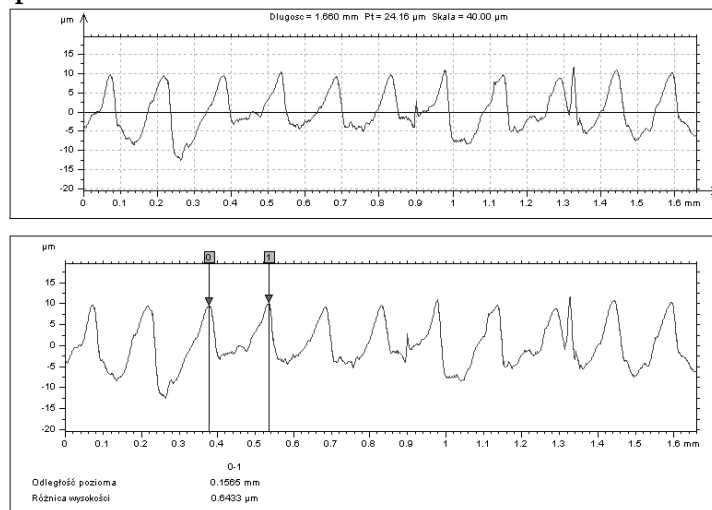
Na rysunku 6 przedstawiono profilogram powierzchni próbki ustawionej równoległe do zgniatacza. Powierzchnia ta w skutek ruchów zgniatacza prawdopodobnie ulegała przemieszczaniu, co można zauważyć to

na rysunku. Wzniesienia nierówności profilu mają charakterystyczny kształt, przy czym, na co drugim wzniesieniu widoczna jest różnica wysokości. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych na wykresie wynosi ona ok. $5,8 \mu\text{m}$.

Natomiast na rysunku 7 powierzchni położonej prostopadle do zgarniacza nie są widoczne różnice we wysokości wzniesień. Z pomiarów wynika, że różnica wysokości wzniesień wynosi ok. $0,6 \mu\text{m}$ i przypisać to można tolerancji pozycjonowania plami laserowej.

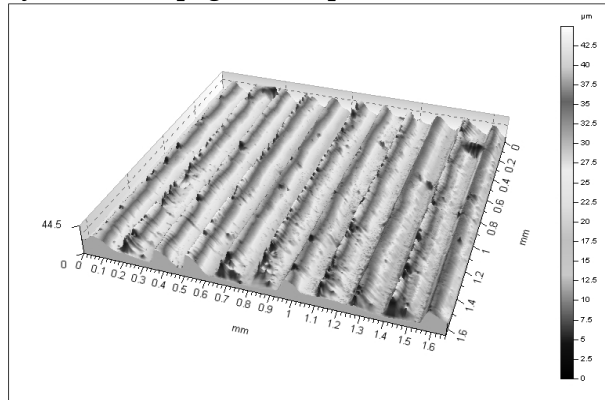
Powierzchnia ta nie ulegała przemieszczaniu podczas pracy zgarniacza natomiast kształt nierówności może wynikać z rozkalibrowania plamki lasera.

Rysunek 7. Profilogramy powierzchni prostopadłej do zgarniacza (powierzchnia X)



Źródło: Opracowanie własne.

Na rysunku 8 przedstawiono topografię 3D powierzchni próbki. Można na nim zauważyć szereg dodatkowych nierówności pojawiających się na grzbietach nierówności. Maja one kształt pojedynczych pików i prawdopodobną przyczyną ich powstawania jest wyżej opisane rozproszenie światła w plamce laserowej.

Rysunek 8. Topografia 3D powierzchni

Źródło: Opracowanie własne.

Zakończenie

Wykonując modele metodą Stereolitografii należy uwzględnić, że na powierzchniach pionowych tworzą się nierówności, których nie przewidują programy symulacyjne.

Parametry ustawienia urządzenia głównie decydują o ich wielkości i charakterze. Ruch zgarniacza i podatność konstrukcji wspierającej może spowodować, że na ściankach pionowych ustawionych prostopadle do siebie charakter nierówności mogą się różnić. Natomiast rozproszenia światła powstające w systemie skanowania powierzchni również powodują powstawanie dodatkowej struktury powierzchni.

Literatura

1. Ahn. D. i inni (2009), *Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing*, „Journal of materials processing technology”, vol. 209.
2. Campbell R.I. i inni (2002), *Surface roughness for rapid prototyping models*, „Computer Aided Design”, no. 34.
3. Dzionk S. (2010), *Surface Roughness Model for Components Created by Stereolithography Method, Solid State Phenomena*, „Mechatronic Systems and Materials: Materials Production Technology”, vol. 165.
4. Reeves P.E., Cobb R.C. (1997), *Reducing the surface deviation of stereolithography using in-process techniques*, „Rapid Prototyping Journal”, vol. 3, no. 1.

Streszczenie

Korzystając z modeli możemy znacząco skrócić procesy przygotowania wyrobu i jego produkcji (sfera przedprodukcyjna). Jednym z aspektów jakości oczekiwanej od tych modeli jest stan powierzchni, niestety części wykonywane metodami szybkiego prototypowania charakteryzują się efektem schodkowym na powierzchniach pochyłych. Aby tego uniknąć, zaleca się takie ustawienie modelu, by większość powierzchni była pionowa lub pozioma, lecz na tych powierzchniach tworzą się także nierówności. Artykuł ten opisuje proces powstawania dodatkowych nierówności na powierzchniach pionowych modeli wykonywanych metodą Stereolitografii oraz przedstawia badania eksperymentalne obrazujące strukturę powstającej chropowatości.

Słowa kluczowe

chropowatość powierzchni, metody szybkiego prototypowania, powierzchnie pionowe

Selected aspects of quality in the sphere of pre-production (Summary)

The use of models significantly reduces the preparation process of a new product and its manufacturing (sphere of pre-production). One of the aspects of the quality expected from these models is the surface roughness. Models made by rapid prototyping method have a staircase effect on sloped surfaces. To avoid this it is recommended to set the model in the way the most of surfaces are vertical or horizontal. Unfortunately, there are some irregularities formed on vertical surfaces. This article describes the process of creating additional irregularities on vertical surfaces of elements made by Stereolithography method, and presents experimental studies showing the structure of the resulting roughness.

Keywords

surface roughness, rapid prototyping method, Stereolithography, vertical surfaces