

Stefan DZIONK¹

MODELOWANIE POWIERZCHNI ELEMENTÓW WYKONYWANYCH METODĄ STEREOLITOGRAFII

Modele wykonywane metodami przyrostowymi charakteryzują się specyficzną strukturą powierzchni tj. tzw. "efektem schodkowym". Struktura taka zazwyczaj nie jest akceptowana przez odbiorcę i w celu uzyskania odpowiedniej jakości powierzchni wykonuje się dodatkową obróbkę np.: skrawaniem (jest to tzw. postprocessing). Właściwości powstającej struktury powierzchni można zmieniać w ograniczonym zakresie poprzez sposób ustawienia modelu na platformie. Aby przewidywać wysokość powstających nierówności tworzy się modele chropowatości powierzchni przedmiotów wykonywanych metodami przyrostowymi. W artykule przedstawiono różne modele chropowatości powierzchni elementów wykonywanych metodą stereolitografii w zakresie parametrów wysokościowych, a także ich porównanie do powierzchni rzeczywistej.

1. WPROWADZENIE

Stereolitografia (*Stereolithography*) jest jedną z pierwszych metod przyrostowych zaliczana do grupy technik szybkiego prototypowania. Metody przyrostowe umożliwiają wytworzenie trójwymiarowych modeli fizycznych (prototypów) w oparciu o geometrię zaprojektowaną w systemie modelowania przestrzennego CAD 3D (*computer aided design*). W tym procesie model CAD jest dzielony na warstwy o określonej grubości (zazwyczaj jest to w zakresie 10÷100 μm, ale są też urządzenia wykonujące elementy gdzie stosuje się grubość warstwy ok. 1 μm). Podział ten odbywa się za pomocą specjalnych programów komputerowych, w które wyposażony jest dział przygotowujący technologię. Dane obejmujące wykonywany przedmiot lub przedmioty, gdyż można jednocześnie wykonywać wiele różnych części, zapisuje się w formie pliku komputerowego. Tak przygotowany plik danych zostaje przesłany do urządzenia, w którym następuje wykonanie przedmiotu fizycznego z wcześniej wybranego materiału. Powyższy schemat działań charakterystyczny jest dla wszystkich metod przyrostowych, w tym także dla stereolitografii SLA. W tej metodzie wykonanie przedmiotu polega na utwardzeniu płynnego fotopolimeru w miejscach, gdzie znajduje się materiał wyrobu. Fotopolimer została się pod wpływem światła ultrafioletowego UV (*ultraviolet*). Źródłem światła jest laser Nd:YVO₄ emitujący promieniowanie o długości ok. 354,7 nm, którego promień przemieszcza się po powierzchni

¹ Politechnika Gdańska, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, E-mail: sdzionk@mech.pg.gda.pl

żywicy formując warstwę zgodną z zapisem danych odpowiedniej warstwy podzielonego przedmiotu.

Po zeskanowaniu przez laser całej warstwy przedmiotu platforma, na której umiejscowiony jest przedmiot lub przedmioty obniża się o grubość warstwy. Następnie zgarniacz przemieszczając się nanosi na powierzchnię kolejną warstwę żywicy o zaprogramowanej grubości i cykl skanowania powierzchni promieniowaniem laserowym powtarza się. Kształt warstwy zmienia się w zależności od przekroju modelu na stosownej wysokości. Schemat działania urządzenia do wykonywania modeli metodą SLA można znaleźć w pracach [4],[5],[6].

W modelowaniu stereolitografii promień skanujący przedstawia się zazwyczaj w postaci równoległej wiązki o przekroju kołowym. W rzeczywistości wiązka skanująca ma kształt wydłużonego stożka, którego przekrój na poziomie powierzchni żywicy powinien być kołem o zadanej średnicy. W przypadku wiązki stożkowej kąt pochylenia profilu warstwy określany jest jako ϕI i kąt ten w stosunku do kąta ϕ stosowanego w modelowaniu profilu powierzchni dla wiązki równoległej określić można zależnością:

$$\phi I = \phi \pm 0,5\beta \quad (1)$$

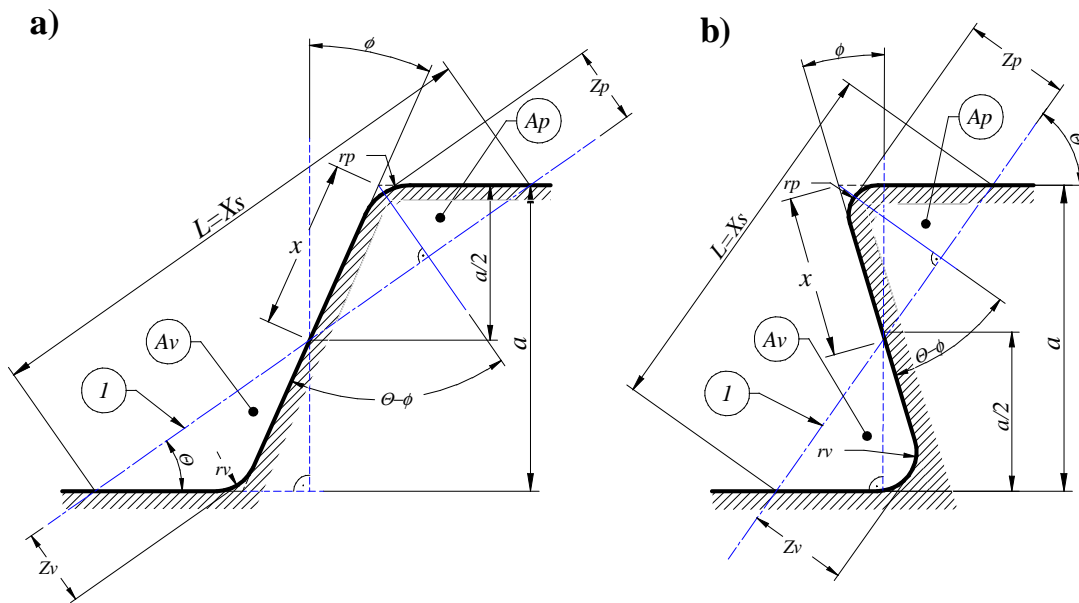
gdzie: ϕ - kąt pochylenia profilu warstwy przedmiotu dla wiązki równoległej, ϕI - kąt pochylenia profilu warstwy przedmiotu dla wiązki stożkowej, β - kąt skupienia wiązki stożkowej.

W prezentowanych modelach pomija się kąt skupienia wiązki laserowej β i kąt pochylenia profilu warstwy ϕI jest przyjmowany jak dla wiązki równoległej ϕ .

2. MODELE OBLICZENIOWE PROFILU CHROPOWATOŚCI

W oparciu o omówioną wyżej zasadę na rys. 1 przedstawiono zarys profilu nierówności powierzchni charakterystycznego dla metody stereolitografii. Na podstawie tego zarysu określa się modele obliczeniowe parametrów wysokościowych Ra i Rz . Parametr Ra dla takiego profilu przyjmuje się w przybliżony sposób poprzez opisanie nierówności powierzchni prostymi figurami geometrycznymi. Zsumowanie tak określonych pól powierzchni wzniesień i wgłębień (na rys. 1 A_p i A_v) na długości odcinka elementarnego a następnie podzielenie tej wartości przez jego długość określa wartość parametru średniego. W stosowanych modelach spotyka się dodatkowe uproszczenia takie jak: ograniczenie profilu do zarysu prostokątnego, brak zaokrągleń wzniesień i wgłębień i inne (występują, gdy przyjmujemy wskaźniki $r_p = r_v = 0$ lub kąt $\phi = 0$).

W literaturze większość modeli obliczeniowych parametrów chropowatości oparta jest na modelu „ostrych krawędzi z profilem prostokątnym”. Jest to najprostszy model i w nim uwzględnia się tylko dwa parametry procesu wytwarzania tj.: grubość warstwy (a) i pochylenie powierzchni w stosunku do warstw przyrostowych (Θ) [1],[8]. Ten model stosuje się również w programach komputerowych modelujących nierówności powierzchni na elementach wykonywanych metodami przyrostowymi [1].



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zarysu powierzchni przedmiotu wykonywanego metodą stereolitografii: a) zarys powierzchni przy dodatnim kącie wychylenia wiązki, b) zarys powierzchni przy ujemnym kącie wychylenia wiązki, *l* - linia odniesienia zarysu, ϕ - kąt wychylenia wiązki skanującej (na rysunku wartość kąta określona w wartościach bezwzględnych), θ - kąt pochylenia powierzchni, *L* - odcinek linii odniesienia do obliczania zarysu profilu, *a* - grubość warstwy przyrostowej, *Ap* - pole wzniesienia, *Av* - pole wgłębienia, *Zp* - wysokość wzniesienia, *Zv* - głębokość wgłębienia, *x* - długość zarysu profilu, *rp* - promień zaokrąglenia wzniesień, *rv* - promień zaokrąglenia wgłębień
 Fig. 1. Schematic presentation of the surface profile of the element manufactured by stereolithography method: a) the profile of the surface with a positive angle of the beam balancing, b) the profile of the surface with a negative angle of the beam balancing, *l* - reference line, ϕ - angle of beam balancing (the angle of the figure is specified on the absolute value), θ - angle of the surface inclination, *L* - reference section for calculating of the contour profile parameters, *a* - thickness of incremental layer, *Ap* - peak area, *Av* - valley area, *Zp* - the height of the peak, *Zv* - depth of the valley, *x* - the length of the profile, *rp* - radius of rounding peaks, *rv* - radius of valley rounding

Model ten można przedstawić w postaci:

$$Ra(\theta) = \frac{a}{4} |\cos \theta| \quad (0^0 < \theta < 180^0) \tag{2}$$

gdzie: *Ra* - parametr chropowatości, *a* - grubość warstwy przyrostowej, θ - kąt pochylenia wykonywanej powierzchni.

We wszystkich modelach obliczeniowych występują pewne zakresy zmienności kąta pochylenia powierzchni θ (określone kątem θ^*), dla których rezultaty modelowania znacznie odbiegają od wyników pomiarów powierzchni rzeczywistej. Wynika to z metody wykonywania przedmiotów technikami przyrostowymi, gdyż na powierzchni o kącie pochylenia $0 < \theta < \theta^*$ nie powstanie „schodek”, a powierzchnia będzie powierzchnią poziomą. Wartość obliczeniowa parametru *Ra* takiej powierzchni powinna wynosić zero, natomiast model określony wzorem 2 takich wartości w tym zakresie nie przyjmuje. Wobec tego z modelowania należy wyłączyć zakresy kątów $(0 \text{ deg} \pm \theta^*)$ i $(180 \text{ deg} \pm \theta^*)$ gdzie wartość kąta θ^* można obliczyć ze wzoru

$$\theta^* \leq \operatorname{arctg} \frac{a}{2b} \quad (3)$$

gdzie: a - grubość warstwy, θ^* - kąt graniczny pochylenia profilu warstwy, b - szerokość powierzchni.

Model uwzględniający kąt pochylenia profilu przedstawia zależność [8]:

$$Ra(\theta, \phi) = \frac{a |\cos \theta + \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \phi|}{4} \quad (4)$$

gdzie: a - grubość warstwy przyrostowej, ϕ - kąt wychylenia wiązki skanującej, θ - kąt pochylenia powierzchni.

Przebieg zmian wartości parametru określonego wzorem 4 można znaleźć w literaturze [3],[5],[8]. Rzeczywista powierzchnia przedmiotu ma dodatkowe nierówności na powierzchni takie jak: pęcherzyki powietrza i kraterzyki na powierzchniach „górných” oraz „przereagowania” i pozostałości konstrukcji wsporczej na powierzchniach „dolnych”. Te elementy geometrycznej struktury powierzchni można uwzględnić w wartościach obliczanego parametru Ra . Można to zamodelować dodatkowym współczynnikiem, który wg [8] ma postać:

$$\xi(\theta, \phi, k_1, k_2) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{(90 + \phi) - \theta}{90 + \phi} k_1 & \text{gdy } \theta \in (0^\circ, (90^\circ + \phi)) \\ \frac{\theta - \phi - 90}{90 - \phi} k_2 & \text{gdy } \theta \in ((90^\circ + \phi), 180^\circ) \\ 0 & \text{gdy } \theta = (90 + \phi) \end{array} \right\} \quad (5)$$

gdzie: $\xi(\theta, \phi, k_1, k_2)$ - współczynnik uwzględniający dodatkowe nierówności powierzchni dolnych i górnych, ϕ - kąt wychylenia wiązki skanującej, θ - kąt pochylenia powierzchni, k_1 - parametr Ra nierówności powierzchni poziomej „górnęj”, k_2 - parametr Ra nierówności powierzchni poziomej „dolnej”. Wobec tego całkowitą wartość parametru dla tych modeli można określić wzorem:

$$Ra_T(\theta, \phi) = Ra(\theta, \phi) + \xi(\theta, \phi, k_1, k_2) \quad (6)$$

gdzie: $Ra_T(\theta, \phi)$ - sumaryczny parametr nierówności powierzchni, $Ra(\theta, \phi)$ - parametr nierówności powierzchni określony wg wzoru (7), $\xi(\theta, \phi, k_1, k_2)$ - parametr dodatkowych nierówności powierzchni.

Modele, które nie uwzględniają zaokrąglenia krawędzi są nazywane modelami „ostrých” krawędzi. Z badań wynika, iż podczas wykonywania modeli występuje zjawisko „menniskowania” polimeru i w narożach pojawiają się zaokrąglenia. Natomiast na krawędziach zewnętrznych zaokrąglenia powstają na skutek niepełnego utwardzenia żywicy na granicy warstw, spowodowane rozproszeniem światła na obrzeżach plamki lasera. Zjawisko to uwzględnia model z zaokrąglonymi krawędziami, przedstawiony na bazie wzoru (1). W literaturze [7] spotyka się też model uwzględniający tylko jeden promień zaokrąglenia $r_v=0$ (tyko segment 1 i 2 wzoru 2).

$$Ra(a, \theta, r_p, r_v) = \underbrace{\frac{a}{4} |\cos \theta|}_{(1)} - \underbrace{\frac{(r_p^2 + r_v^2)(1 - \pi/4) |\sin \theta|}{a}}_{(2)} + \underbrace{\frac{[(r_p^2 - r_v^2)(1 - \pi/4)]^2}{a^3} |\tan \theta \sin \theta|}_{(3)} \quad (7)$$

gdzie: a - grubość warstwy przyrostowej, θ - kąt pochylenia powierzchni, r_p - promień zaokrąglenia wzniesienia (naroże zewnętrzne), r_v - promień zaokrąglenia wgłębienia (naroże wewnętrzne) 1÷3 - wyżej opisane segmenty wzoru, które opisują: (1) - model krawędzi ostrych, (2) - model krawędzi zaokrąglonych, (3) - poprawka wynikająca z przemieszczenia linii odniesienia

Powyższy wzór precyzyjniej określa rzeczywisty profil nierówności. Natomiast jego stosowanie wiąże się z szeregiem ograniczeń, które zawężają zakres zmian kąta pochylenia powierzchni θ . Wynika to głównie z założenia, że promienie zaokrąglenia są styczne do zarysu profilu, co określa zależność:

$$r_p + r_v \leq a \quad (8)$$

gdzie: a - grubość warstwy przyrostowej, r_p - promień zaokrąglenia wzniesienia (naroże zewnętrzne), r_v - promień zaokrąglenia wgłębienia (naroże wewnętrzne).

Ten sam warunek ogranicza stosowanie modelu w zakresie powierzchni pionowych. Dopuszczalny zakres kątów pochylenia powierzchni określa wzór:

$$|\operatorname{tg} \theta| \leq \frac{a}{r_p + r_v} \quad (9)$$

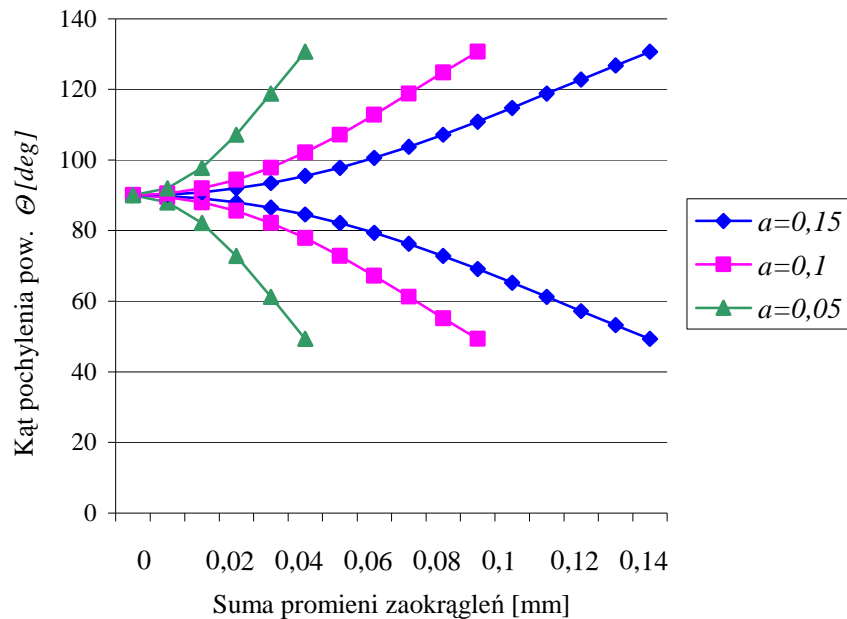
gdzie: θ - kąt pochylenia powierzchni, a - grubość warstwy przyrostowej, r_p - promień zaokrąglenia wzniesienia (naroże zewnętrzne), r_v - promień zaokrąglenia wgłębienia (naroże wewnętrzne).

Kolejnym ograniczeniem stosowania jest drugi i trzeci segment wzoru 7, jako że parametr Ra nie może przyjmować wartości ujemnych, należy spełnić następującą nierówność:

$$\frac{a^2}{4(r_p^2 + r_v^2) \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)} \geq |\operatorname{tg} \theta| \quad (10)$$

gdzie: r_p - promień zaokrąglenia wzniesienia, r_v - promień zaokrąglenia wgłębienia, a - grubość warstwy przyrostowej, θ - kąt pochylenia powierzchni.

Zakres ograniczeń określony wzorem 10 przedstawia rys. 2. Można na nim zauważyć, że przy dużych wartościach promieni zaokrąglenia, tj. gdy ich suma jest na poziomie grubości warstwy znacznie zmniejsza się zakres zmienności kąta pochylenia powierzchni θ w którym można stosować w/w zależność dla obliczania parametru Ra .



Rys. 2. Wykres ograniczeń stosowania modelu obliczeniowego zakresie powierzchni pionowych
 Fig. 2. Graph of restrictions for calculation model in the range of vertical surfaces

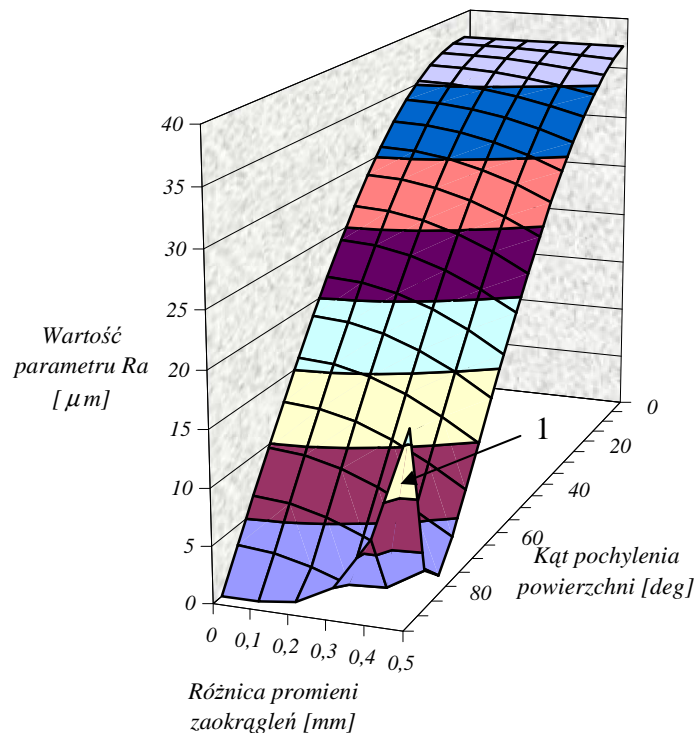
Na rysunku 3 przedstawiono wykres zmian parametru Ra według modelu określonego wzorem 7. Wykres ten jest określony dla zmienności kąta Θ ($0 \div 90\text{deg}$), gdyż kąt $\Theta = 90\text{deg}$ jest poza zakresem dopuszczalnym stosowania tego modelu. Należy również stosować inne ograniczenia tego modelu określone wzorami 8 - 10. Na rysunku 3 fragment powierzchni określony (1) został wyliczony poza zakresem dopuszczalnym stosowania tego modelu, a więc są to nieprawidłowe wyliczenia. W przypadku, gdy istnieje potrzeba obliczenia wartości parametru Ra dla kąta pochylenia powierzchni Θ będącego poza zakresem dopuszczalnym dla modelu krawędzi zaokrąglonych, to należy zastosować inny model obliczeniowy bądź przyjąć szacunkową wartość parametru, gdyż wyniki uzyskane z modelu krawędzi zaokrąglonych poza jego zakresem dopuszczalnym obarczone są bardzo dużym błędem.

Dotychczasowe modele obliczeniowe określały wartości parametrów średnich chropowatości powierzchni. Jest potrzeba określenia parametrów maksymalnych nierówności powierzchni np. w celu określenia grubości warstwy zdejmowanej podczas dodatkowej obróbki powierzchni. Parametr Rt tj. największe wzniesienie i największe wgłębienie na długości odcinka pomiarowego najlepiej określała by grubość zdejmowanej warstwy. Przydatny byłby też parametr powierzchniowy Sz . W modelach obliczeniowych zakłada się regularny kształt profilu. W tym przypadku, wartość parametru Rt jest równa wartości parametru Rz .

Wartości parametru Rz dla prostokątnego zarysu profilu o niezaokrąglonych wzniesieniach i wgłębieniach można przedstawić wzorem:

$$Rz = a|\cos \Theta| \quad (11)$$

gdzie: R_z - najwyższa wysokość profilu na długości odcinka elementarnego, a - grubość warstwy przyrostowej, θ - kąt pochylenia powierzchni.



Rys. 3. Wykres zmienności parametru R_a w obliczeniowym modelu prostokątnym krawędzi zaokrąglonych dla grubości warstwy $a = 0,15\text{mm}$: 1 – fragment wykresu poza obszarem dopuszczalnym modelu
 Fig. 3. Roughness parameter R_a graph of the rounded rectangular profile for the thickness of incremental layer $a = 0.15\text{mm}$: 1 - the fragment outside of the permissible area

Model uwzględniający kąt pochylenia profilu ma postać:

$$R_z = \frac{a}{\cos \phi} |\cos(\theta + \phi)| \quad (12)$$

gdzie: R_z - najwyższa wysokość profilu na długości odcinka elementarnego, a - grubość warstwy przyrostowej, θ - kąt pochylenia powierzchni, ϕ - kąt pochylenia profilu warstwy.

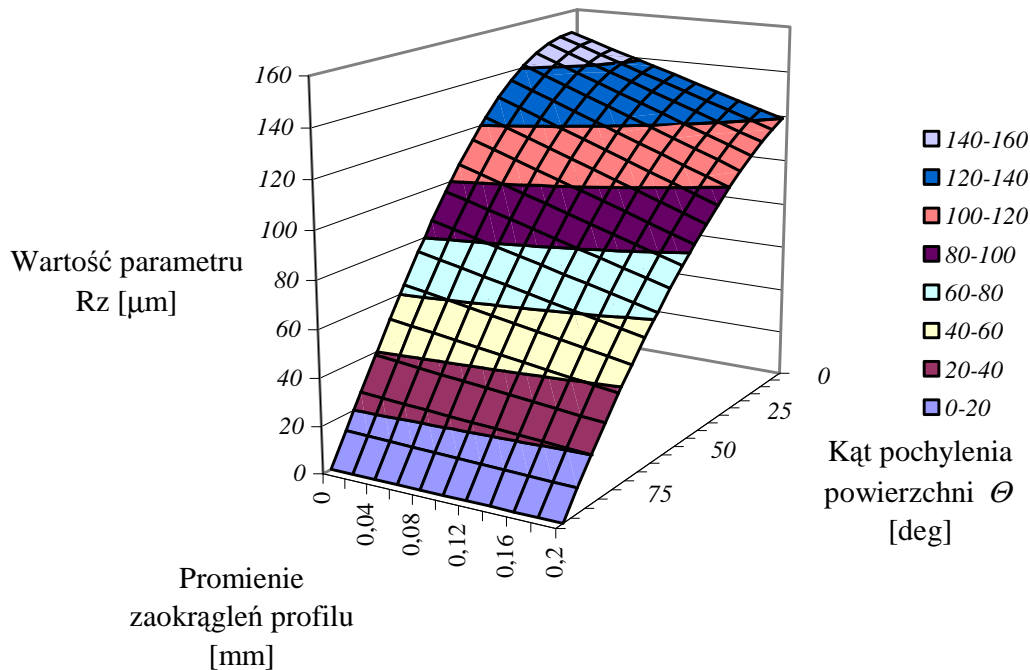
Przebieg zmienności parametru R_z określony wzorami 11 i 12 ma podobny charakter do przebiegu parametru R_a określony wzorami 2 i 4. Wartości obliczone parametru R_z są w stosunku do wartości parametru R_a czterokrotnie większe.

Zależność na obliczenie parametru R_z dla zarysu prostokątnego z zaokrąglonymi wzniesieniami i wgłębieniami można przedstawić w postaci:

$$R_z = a |\cos \theta| + (r_p + r_v) [1 - (|\sin \theta| + |\cos \theta|)] \quad (13)$$

gdzie: R_z - maksymalna wysokość nierówności na długości odcinka elementarnego, a - grubość warstwy przyrostowej, θ - kąt pochylenia powierzchni, r_p - promień zaokrąglenia wzniesień, r_v - promień zaokrąglenia wgłębień.

Obliczając wartość parametru Rz na podstawie powyższej zależności należy stosować się do ograniczeń, które są określone wzorami 3 i 8. Jest ich znacznie mniej w stosunku do ograniczeń wymaganych podczas stosowania adekwatnego modelu parametru Ra (wzór 7). Natomiast porównując wykresy zmienności obu parametrów tj. rys. 3 i rys. 4 można zauważyć, że wielkość promieni zaokrągleń bardziej wpływa na zmniejszanie się wartości parametru Rz niż analogicznego parametru Ra , jednocześnie dla parametru Rz nie występuje zakres wyłączający dla kąta pochylenia $\Theta = 90\text{deg}$.



Rys. 4. Wykres zmienności parametru Rz w obliczeniowym modelu prostokątnym krawędzi zaokrąglonych dla grubości warstwy $a = 0,15$ mm

Fig. 4. The graph of Rz parameter variation of the rounded rectangular profile for the thickness of incremental layer $a = 0.15$ mm

Model obliczeniowy wartości parametru Rz dla zarysu z kątem pochylenia profilu oraz zaokrąglonymi wzniesieniami i wgłębieniami można przedstawić w postaci:

$$Rz = a \left| \cos(\theta) - \tan(\phi) \sin(\theta) \right| + (r_p + r_v) \left\{ 1 - \left[\left| \cos(\theta) \right| + \tan\left(\frac{1}{4}\pi + \frac{1}{2}\phi\right) \left| \sin(\theta) \right| \right] \right\} \quad (14)$$

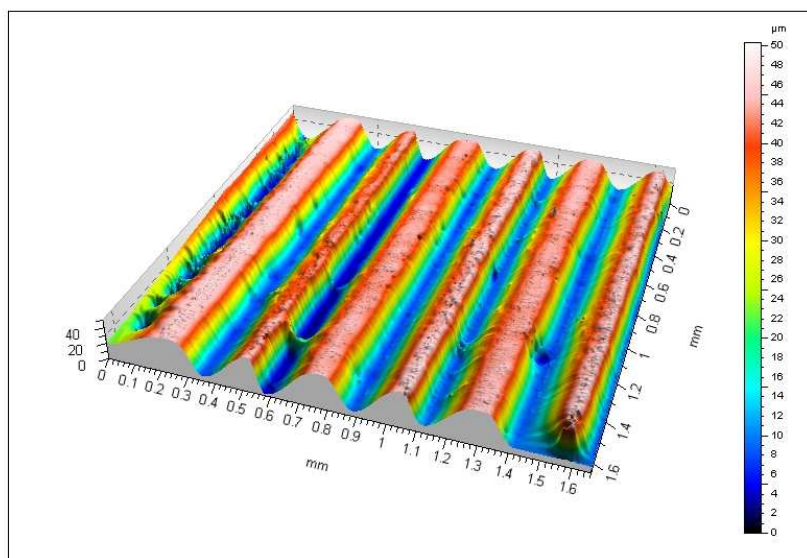
gdzie: Rz - maksymalna wysokość nierówności na długości odcinka elementarnego, a - grubość warstwy przyrostowej, θ - kąt pochylenia powierzchni, ϕ - kąt pochylenia profilu warstwy, r_p - promień zaokrąglenia wzniesień, r_v - promień zaokrąglenia wgłębien.

W tym modelu w zakresie powierzchni pionowych tj. $\Theta = 90\text{deg}$ i $\Theta = 270\text{deg}$ występują nieciągłości. Wielkość przedziału nieciągłości zależna jest od wartości kąta pochylenia profilu ϕ . Dokładniejszy opis zmian parametru Rz dla różnych modeli obliczeniowych można znaleźć w literaturze [5].

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania przeprowadzono wykonując próbki z żywicy o handlowej nazwie “ACCURA SI10” na urządzeniu do wykonywania modeli metodą stereolitografii m-ki Viper SI². Program sterujący przygotowano korzystając z oprogramowania „Lightyear”. Grubość warstw przyrostowych wynosiła $a = 0,15$ mm a średnica wiązki skanującej lasera $d = 0,25$ mm. Próbkę umieszczono w centralnej osi urządzenia (środek platformy) gdzie kąt pochylenia profilu $\phi = 0$. Po wykonaniu próbki oczyszczono z resztek żywicy stosując izopropanol, a następnie w urządzeniu PCA (*post cure apparatus*) poddając je 20 minutowemu działaniu promieniowania UV. Zadaniem urządzenia PCA było zakończenie procesu fotopolimeryzacji żywicy na powierzchni przedmiotu (powierzchnia po umyciu jest „lepka” ten proces to usuwa).

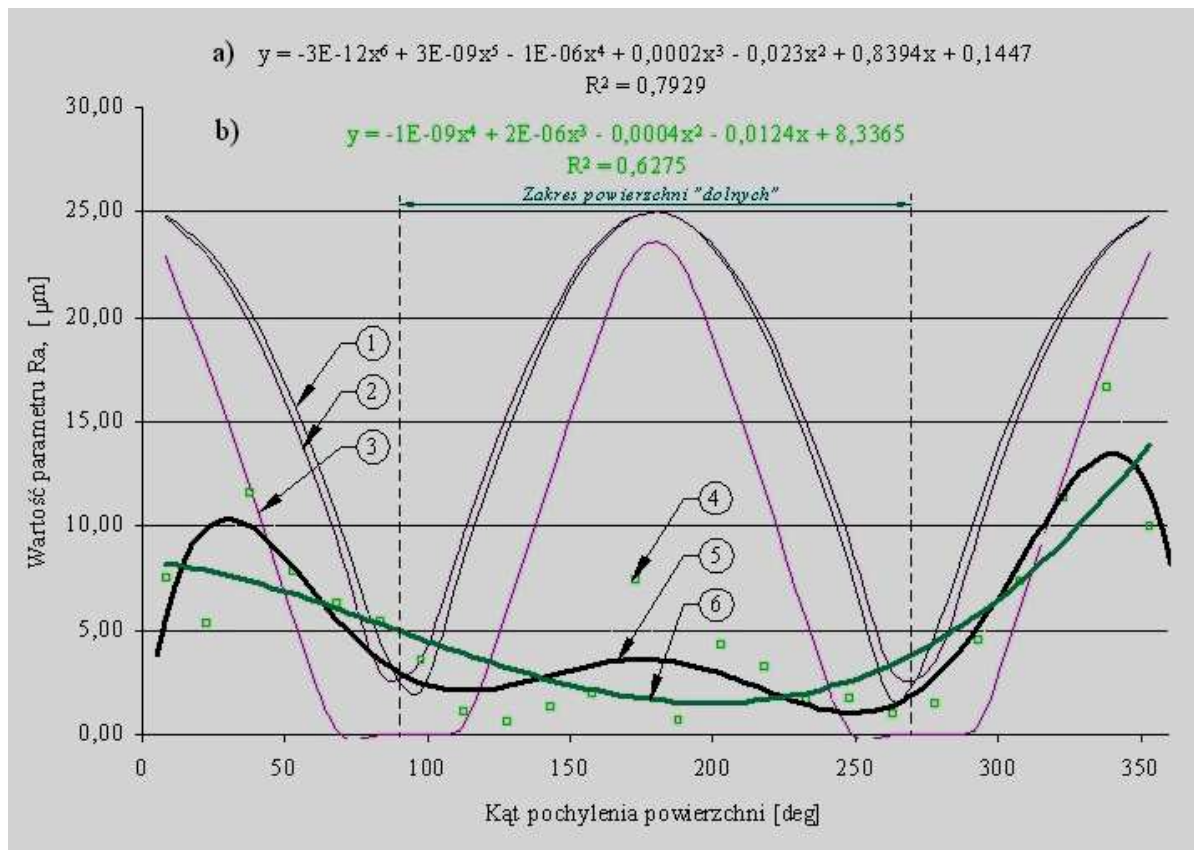
Na rysunku 5 przedstawiono typową powierzchnię elementu wykonanego metodą stereolitografii. Jest to powierzchnia „górną” i nie występują na niej wady charakterystyczne dla powierzchni dolnych. Można na niej zauważyć charakterystyczną strukturę schodkową powierzchni. Występują na niej zróżnicowane wysokości wzniesień i wgłębień. Promienie zaokrąglenia wzniesień i wgłębień nie mają stałej wartości. Grzbiety wzniesień mają nieregularny kształt.



Rys. 5. Topografia powierzchni „górnej” o kącie nachylenia $\theta = 38deg$
Fig. 5. The up-facing surface topography for the sloping surface angle $\theta = 38deg$

Na rysunku 6 przedstawiono wartości porównawcze modeli obliczeniowych z wartościami pomiarowymi parametru Ra wykonanymi dla pełnego zakresu pochylenia powierzchni. Można zauważyć asymetrię w obszarze powierzchni górnych poziomych tj. dla otoczenia kąta $\Theta = 0$ deg i $\Theta = 360$ deg. Może ona wynikać z metody pomiarów, gdzie odstęp między kolejnymi wzniesieniami jest większy od odcinka elementarnego, co powoduje, że nierówność „schodka” w zależności od umiejscowienia odcinka pomiarowego jest lub nie jest zaliczana do wartości mierzonego parametru. Powoduje to zwiększenie się

rozstępu wyników pomiaru, gdyż dla części pomiarów odcinek elementarny położony jest między wzniesieniami i otrzymujemy mniejsze wartości parametrów w stosunku do pomiarów obejmujących wzniesienie.

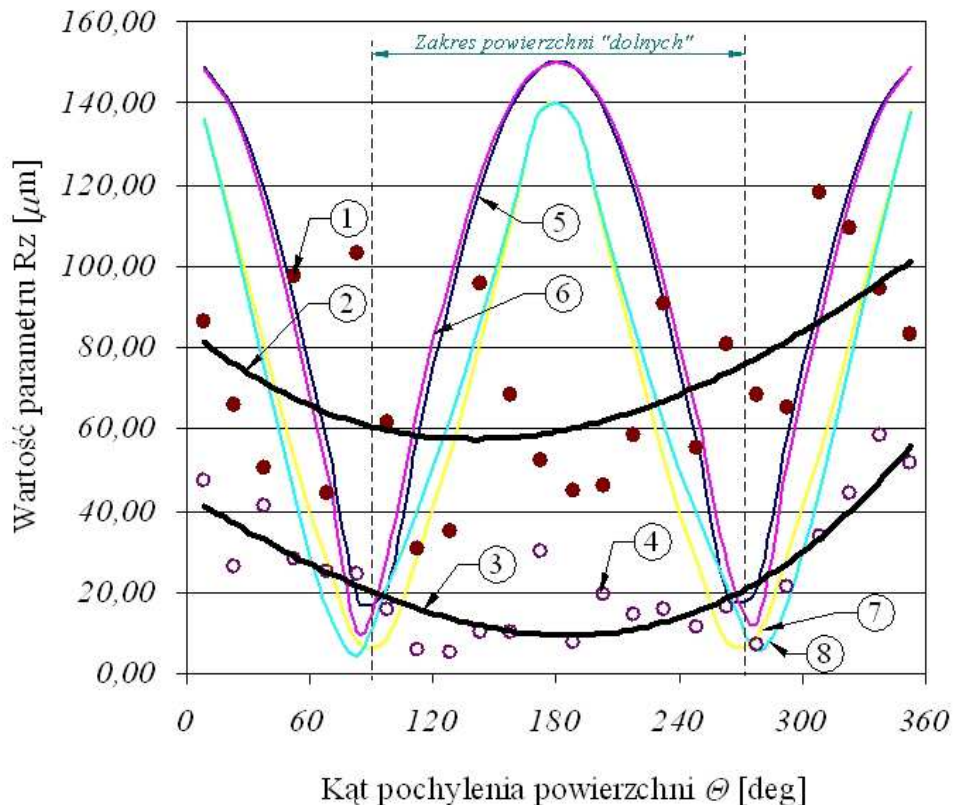


Rys. 6. Wykres porównawczy modeli obliczeniowych nierówności powierzchni z wartościami parametru Ra uzyskanego z pomiarów: 1 - model krawędzi ostrych, 2 - model krawędzi ostrych z pochyleniem profilu, 3 - model krawędzi zaokrąglonych, 4 - wyniki pomiaru parametru Ra , 5 - wielomian aproksymujący wyniki pomiaru parametru Ra wg formuły (a), 6 - wielomian aproksymujący pomiaru parametru Ra wg formuły (b)

Fig. 6. Comparison models and result of measurement for Ra parameter: 1 - "sharp edge" mode, 2 - "sharp edge" model with inclination layer profile, 3 - "round edge" model, 4 - the results of measurement of the surface parameter Ra , 5 - regression curve of the measurement results of parameter Ra according to the formula (a), 6 - regression curve of the measurement results of parameter Ra according to the formula (b)

Spośród wartości parametru Ra obliczanych na podstawie modeli (wzory 2, 4 i 7) najbardziej zbliżone do wyników pomiaru otrzymuje się korzystając z modelu obliczeniowego krawędzi zaokrąglonych (wzór 7). W tym modelu w przedziałach jego nieokreśloności (tj. dla kąta pochylenia powierzchni $\theta = 90$ deg i $\theta = 270$ deg i w ich otoczeniu) przyjęto wartości zerowe. W zakresie powierzchni „dolnych”, dla których kąt pochylenia powierzchni θ zawiera się w przedziale od 90 deg do 180 deg, występują znaczne różnice pomiędzy wartościami obliczonymi a wynikami pomiaru. Zależność ta występuje dla wszystkich modeli obliczeniowych. Można przypuszczać, że spowodowane to jest tworzeniem się na tych powierzchniach dodatkowej warstwy wynikającej ze zjawiska „przereagowania” (overcure). Ta dodatkowa warstwa niweluje efekt „schodkowości” dając wyniki pomiaru znacznie różniące się od wyliczeń modelowych. W tej warstwie można

zauważyć dużą zmienność wskaźników pomiędzy poszczególnymi pomiarami, która może być spowodowana dodatkowymi czynnikami takimi jak: pozostawione fragmenty konstrukcji podpierającej na tej powierzchni oraz wady, które są charakterystyczne dla tego typu powierzchni.



Rys. 7. Wykres porównawczy wartości parametrów nierówności powierzchni obliczonych na podstawie modeli z wynikami pomiaru parametru Rz i Sz : 1 - wartości pomiarowe parametru Sz , 2 - wielomian aproksymujący wartości pomiarowe parametru Sz , 3 - wielomian aproksymujący wartości pomiarowe parametru Rz , 4 - wartości pomiarowe parametru Rz , 5 - wyniki modelu obliczeniowego prostokątnego krawędzi ostrych parametru Rz , 6 - wyniki modelu obliczeniowego krawędzi ostrych z pochyleniem profilu parametru Rz , 7 - wyniki modelu obliczeniowego prostokątnych krawędzi zaokrąglonych parametru Rz , 8 - wyniki modelu obliczeniowego z pochyleniem profilu krawędzi zaokrąglonych parametru Rz

Fig. 7. Comparison chart surface roughness values calculated from the model with the results of the measurement of Rz and Sz parameter: 1 - measured values of Sz parameter, 2 - regression curve of approximating the measured values of Sz parameter, 3 - regression curve of approximating the value of the Rz parameter measuring, 4 - measured values of parameter Rz , 5 - the results of the calculation model parameter rectangular sharp edges Rz , 6 - the results of the calculation model of the tilting edge sharp profile parameter Rz , 7 - the results of the calculation model parameter rectangular rounded edge Rz , 8 - the results of the calculation model with rounded edge profile tilt parameter Rz

Rysunek 7 przedstawia porównanie wartości parametru Rz uzyskanego z modeli obliczeniowych z wartościami zmierzonymi. Można na nim zauważyć znaczny rozrzut pomiędzy zmierzonymi parametrami Rz i Sz , gdyż średnia wartość parametru Sz jest o $40\mu\text{m}$ większa od parametru Rz . Można przypuszczać, że na mierzonej powierzchni poza regularnymi elementami profilu występują pojedyncze wzniesienia, które są mierzone

głównie w układzie topografii powierzchni. Powstawanie tego typu wzniesień spowodowane jest prawdopodobnie między innymi: zanieczyszczeniem (właściwościami) żywicy, tworzącymi się na powierzchni pęcherzykami powietrza. W literaturze [5] można znaleźć bardziej szczegółowy opis powierzchni w pełnym zakresie zmienności kąta pochylenia powierzchni Θ .

4. PODSUMOWANIE

Wykonując przedmioty metodą stereolitografii w ograniczonym zakresie można wpływać na wartości parametrów ich struktury geometrycznej powierzchni. Przewidując wartości parametrów struktury powierzchni przedmiotów należy zwrócić uwagę na ograniczenia w stosowanych modeli obliczeniowych.

W zakresie parametrów średnich (Ra) elementów wykonywanych metodą stereolitografii modele „ostrzych” krawędzi generują wyniki przeszacowane. Model zaokrąglonych krawędzi jest bardziej precyzyjny, natomiast ma wiele ograniczeń i nieciągłości (nie modeluje pełnego zakresu pochylenia powierzchni).

W zakresie parametrów maksymalnych (Rz i Sz) dokładność modelowania jest mniejsza. Natomiast rozgraniczając zakres zmienności kąta pochylenia powierzchni Θ na powierzchnie „górne” i „dolne”, to wyniki modelowania wartości parametru Rz są bardziej zbliżone do wyników pomiaru w zakresie powierzchni „górných”. Znaczne różnice pomiędzy wartościami parametrów uzyskanych z modelowania i pomiarów dla powierzchni dolnych wynikają z dodatkowej warstwy powstającej z „przereagowania” żywicy. Wady w niej występujące wprowadzają dużą przypadkowość w wartościach pomiarowych. Można to zauważyć porównując pomiarowy parametr Sz z modelowanym parametrem Rz . Na ten stan mają także wpływ inne czynniki, których nie uwzględniają modele obliczeniowe między innymi mogą to być: rodzaj i lepkość polimeru (żywicy), stopień jej zanieczyszczenia, stopień rozproszenia plamki lasera i inne.

LITERATURA

- [1] CAMPBELL R.I., et al, 2002, *Surface roughness for rapid prototyping models*, Computer Aided Design, 34, 717-725.
- [2] DAEKEON A., HOCHAN K., SEOKHEE L., 2009, *Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing*, Journal of Materials Processing Technology, 209, 664-671.
- [3] DZIONK S., 2010, *Surface roughness model for components created by stereolithography method*, Solid State Phenomena, Mechatronic Systems and Materials: Materials Production Technology, 165, 268-273.
- [4] DZIONK S., 2013, *Surface structure of components created by stereolithography*, Solid State Phenomena, Mechatronic Systems and Materials: Materials Production Technology, 199, 338-343.
- [5] DZIONK S., 2013, *Modelowanie i analiza nierówności powierzchni elementów wykonywanych metodą stereolitografii*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- [6] DZIONK S., PRZYBYLSKI W., 2012, *Charakterystyka chropowatości powierzchni przedmiotów wykonywanych metodą stereolitografii*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 2, 32, 83-91, ISDN 1233-9709.

- [7] HONG S.B., KWAN H.L., 2006, *Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing*. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 28, 307-313.
- [8] REEVES P.E., COBB R.C., 1997, *Reducing the surface deviation of stereolithography using in process techniques*. Rapid Prototyping Journal, 3/1, 20-31.

SURFACE ROUGHNESS MODELLING OF ELEMENTS CREATED BY STEREOLITHOGRAPHY METHOD

Stereolithography is an additive rapid prototyping method. This method is based on the principle of solidifying a liquid photopolymer (resin) by laser radiation. Models obtained with this method are characterized by a specific surface structure called "stairstep effect". It causes that, the surface should be processed by additional finishing (postprocessing). To minimize the additional machining process, the model should be set in the relation to incremental layers so that the roughness of significant surfaces was optimal. In order to optimize this process, surface roughness models of components are created, which were made using stereolithography method. This paper presents the various models of surface roughness described in the literature and also compares the consistency of mapping models with the actual surface.