

УДК 621.9

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Торлин В.Н., Фалалеев А.П., Мешков В.В., Огрызков С.В.

Исследуется возможность повышения геометрической точности трехмерных объектов при изготовлении их методами RP-технологий (rapid prototyping).

Рассмотрим множество способов формообразования трехмерных объектов сложной конфигурации методами RP-технологий. Все способы, в отличие от традиционных методов удаления материала для получения детали, объединяет процесс послойного наращивания материала. Применяемые процессы наращивания материала основаны на изменении фазового состояния специальной среды, это может быть полимеризация, склеивание, спекание и т.д. [1,4,5].

Все исследованные на сегодняшний день способы позволяют изготавливать 3-х мерные объекты сложной конфигурации с определенной геометрической точностью и шероховатостью поверхности, которые зависят от конструкции самой детали, режимов формообразования и размера (площади) источника локального затвердевания.

Достижение заданной геометрической точности и высокой производительности формообразования возможно только при назначении оптимальных режимов. Основными переменными процесса являются: V_U – скорость движения источника локального затвердевания, h_U – высота наращиваемого за проход слоя, d_U – площадь пятна затвердевания, которая является функцией от V_U при использовании таких технологий, как SLA (стереолитография), SLS (лазерное спекание), FDM (жидкое выдавливание) и не зависит от V_U при использовании LOM (производство слоистых объектов) и BPM (производство с использованием баллистики). Тогда производительность процесса P будет определяться выражением

$$P = V_U d_U h_U, \quad (1)$$

а функция цели задачи оптимизации рассчитывается по формуле

$$\Phi = \frac{1}{V_U d_U h_U}, \quad (2)$$

физический смысл которой – основное время операции.

Основное ограничение в задаче оптимизации определяется величиной деформации зоны затвердевания, которая возникает в связи с тем, что при затвердевании материала происходит его усадка,

вызывающая внутренние напряжения и соответствующие деформации как образующегося элемента, так связанных с ним соседних объемов.

Рассмотрим методику

построения функции ограничения

по величине деформации

изготавливаемого объекта на

примере разработки процесса для

изготовления детали, показанной

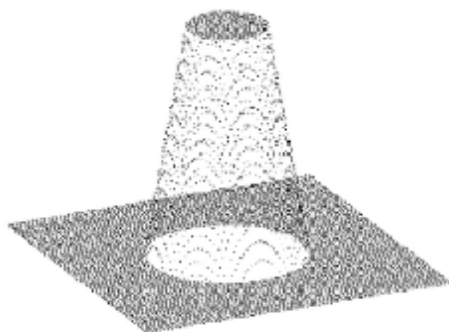


Рисунок 1 – 3-D модель производимого объекта *на рисунке 1.*

В соответствии с методикой RP-технологии [1], деталь изготавливается послойно. В данном примере рассматривается технология, не требующая поддерживающих структур (SLS), при использовании других технологий, например SLA, 3-D модель дополняется поддержками для нависающих объектов, что усложняет конструкцию но придает ей требуемую жесткость. Тогда задачу оптимизации необходимо скорректировать с учетом увеличения удельных напряжений после удаления дополнительных опор.

При затвердевании слоев в микрообъемах материала возникают касательные напряжения, деформирующие слои. Нарастание напряжений происходит неравномерно и повторяет маршрут движения пятна

затвердевания (рисунок 2). Для определения величин деформаций рассмотрим задачу для слоя толщиной h , на поверхности которого действуют касательные напряжения τ_{xy} . Величина этого напряжения полностью описывается бигармонической функцией $\phi = 1/(6\pi xz^3)$, удовлетворяющей уравнениям равновесия и совместности механики сплошной среды [2]. Распределение касательных

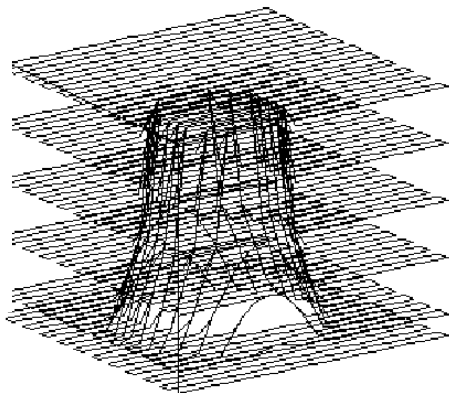


Рисунок 2 – Маршрут движения источника затвердевания (BPM)

напряжений по глубине слоя при интенсивности внешнего воздействия Q_τ определяется выражением

$$\tau_{xy}(z) = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \cdot \partial z} = \frac{1}{h^2} Q_\tau \cdot z^2, \quad (3)$$

где интенсивность Q_τ определяется как

$$Q_\tau = d_U^2 \cdot W, \quad (4)$$

где W – мощность источника полимеризации (затвердевания), определяющая интенсивность возникновения τ_{xy} .

Деформации возникают при $\tau_{xy} \geq [\tau_C]$, где $[\tau_C]$ – сдвиговое напряжение, которое зависит от материала и конструкции детали. Предельные напряжения длительной прочности ниже предельно допустимых, поэтому в напряженных деталях часто наблюдается деформация по истечению 1-5 недель после производства [4].

Соответствующие данному напряженному состоянию величины деформаций слоя толщиной h определяем из выражения [2]

$$U_{xz} = \frac{Q_\tau}{4\pi} \left[\left(\frac{\lambda + 3G}{\lambda + G} + \frac{X^2}{R^2} \right) \frac{1}{RG} - \frac{2}{(\lambda + G)R} + \left(1 - \frac{X^2}{R(R+Z)} \right) \frac{1}{(\lambda + G)(R+G)} \right], \quad (5)$$

где $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$; $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; E – модуль

упругости материала изделия; ν – коэффициент Пуассона.

Деформации U_{xz} каждого слоя в конечном итоге создадут геометрические отклонения возводимого объекта в целом. На рисунке 3 показан фрагмент детали, изображенной на рисунке 1, полученной послойным прототипированием. Наружный и внутренний размеры, заданные чертежом D и d , отличаются от реальных D_P и d_P на величину U_{xz} , возникающую в каждом слое. Обозначим разницу этих размеров через Δ_H , Δ_B :

$$\Delta_H = D_P - D,$$

$$\Delta_B = d - d_P.$$

Варьируя переменными V_U , d_U , h_U в зависимости от

$$\Delta_y = \frac{\Delta_H + \Delta_B}{2}, \quad (7)$$

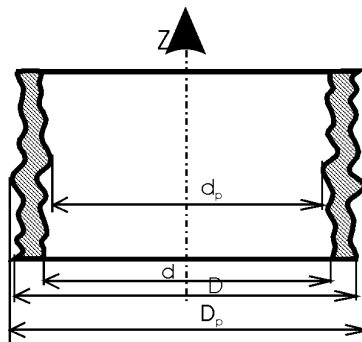


Рисунок 3 – Деформации детали в

где Δ_y – погрешность управления перемещениями, получаем изменение $\Phi(V_U, d_U, h_U) = \Phi(X_1, X_2, X_3)$. В качестве ограничения принимаем выражение (7), которое после преобразования примет вид

$$\Delta_y = 2 \cdot a \cdot X_1^2 \cdot X_2.$$

В этих же обозначениях функция цели будет иметь вид

$$\Phi(V_U, d_U, h_U) = \frac{1}{X_1 X_2 X_3}. \quad (8)$$

Задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi(V_U, d_U, h_U) &= \frac{1}{X_1 X_2 X_3} \rightarrow \min \\ 2 \cdot a \cdot X_1^2 \cdot X_2 &\leq b \\ X_1 \geq 0, X_2 \geq 0, X_3 &\geq 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где b – допуск на отклонение размера изделия.

Для решения задачи использовался метод штрафных функций, в

соответствии с которым задача (9) преобразуется в задачу

минимизации без ограничений

$$\varphi(X_1, X_2, X_3, r) = \frac{1}{X_1 X_2 X_3} + r_i \left(\frac{1}{b - 2 \cdot a \cdot X_1^2 \cdot X_2} + \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} \right), \quad (10)$$

где r_i – последовательность малых величин

$$r_i = \frac{r_{i-1}}{10}.$$

Численная реализация метода штрафных функций для задачи (10) в соответствии с [3] была выполнена при следующих исходных данных: $E = 3,17 \cdot 10^4$ Мпа, $\nu = 0,32$, $\rho = 1750$ кг/м³, коэффициент усадки $k = 0,092$, $[\tau_c] = 160$ Мпа.

В результате были получены оптимальные значения переменных $X_1 = 6,47$ мм/с, $X_2 = 0,87$ мм², $X_3 = 0,72$ мм, которые обеспечивают оптимальный режим управления процессом при заданном ограничении по точности.

Библиография

- 1 Евсеев А.В. Изготовление физических моделей методом стереолитографии / А.В. Евсеев, С.В. Камаев, Е.В. Коцюба // Автоматизация проектирования. — 1999. — № 2. — С. 1–14.
- 2 Седов Л.И. Механика сплошных сред / Л.И. Седов. — М.: Наука 1971. — 475 с.
- 3 Банди Б. Методы оптимизации / Б. Банди. — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.
- 4 Hopkinson N. Rapid prototyping for direct manufacture / N. Hopkinson, P. Dickens // Rapid prototyping Journal. — 2001. — V. 7. — P. 36–45.
- 5 Khoshnevis B. Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials / B. Khoshnevis, S. Bukkapatnam // Rapid prototyping Journal. — 2001. — V. 1. — P. 52–67.

Поступила в редакцию 07.12.2001 г.