

А. А. САПРЫКИН, инж., А. В. ВАЛЬТЕР, инж.

Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета

Производительность процесса 2,5-координатного формообразования и технологичность изделий сложной пространственной формы

В настоящее время при проектировании изделий и технологий в машиностроении активно применяют системы автоматизированного проектирования. Наиболее распространенными машиностроительными САПР являются CAD-системы — инструмент конструктора и CAM-, CAPP-системы — инструмент технолога. При этом на предприятиях, как правило, группы конструкторов и технологов выделены в отдельные структурные единицы — отделы и конструкторское проектирование изделий производится сравнительно независимо от технологического. В то же время в процессе проектирования конструктор обязан учитывать требования к технологичности изделия. Существует большое количество нормативных и справочных материалов, позволяющих конструкторам учитывать данные требования в большинстве типичных случаев. Однако отсутствует общая методика определения технологичности изделий со сложной формой поверхностей, которые чаще всего обрабатываются на станках с ЧПУ. Таким образом, оценить технологичность данных изделий

можно только на этапе технологической подготовки производства после составления управляющей программы для оборудования с ЧПУ. Возникает задача — разработать эффективный "инструмент" для оценки технологичности изделий со сложной формой поверхностей на этапе конструкторской подготовки производства.

В ходе исследования методов повышения производительности процесса селективного лазерного спекания (СЛС) предложен способ прототипирования с переменной толщиной слоя¹. При оценке величины сокращения времени изготовления прототипа по сравнению с методом СЛС с постоянной толщиной слоя² [1] установили, что при прочих равных условиях (объем изделия, требуемая точность и т. п.) данная величина зависит от формы изготавливаемого прототипа (рис. 1). При этом время, затрачиваемое на его изготовление, пропорционально числу слоев N , на которые разбито изделие:

$$T = tN, \quad (1)$$

где t — среднее время на изготовление одного слоя прототипа.

В свою очередь число слоев обратно пропорционально среднему значению толщины слоя $Z_{\text{ср}}$:

$$N = \frac{H}{Z_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где H — высота спекаемой модели.

Если рассмотреть некоторое сечение изделия (рис. 2), то максимальная толщина слоя Z , обеспечивающая требуемую точность изделия h , будет определяться формой прототипа:

$$Z = \frac{h}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

где φ — угол подъема номинального профиля.

При переходе к рассмотрению объемного тела величина Z будет зависеть от относительной ориентации единичного нормального вектора к поверхности изделия n и единичного вектора направления технологической оси z . Ориентация может быть выражена при помощи следующего показателя:

$$p = |z \times n|. \quad (4)$$

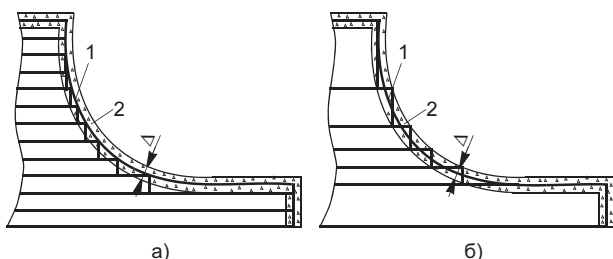


Рис. 1. Способы разбиения модели на слои (Δ — допуск): а — традиционный; б — "высокой" точности; 1 — номинальный профиль поверхности; 2 — поле допуска

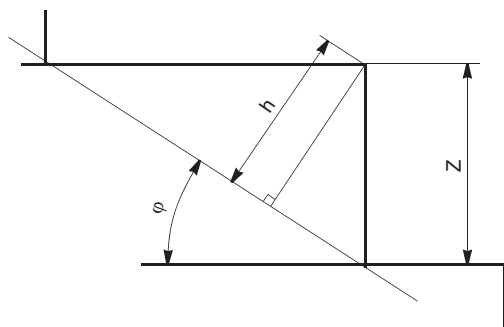


Рис. 2. Схема к определению толщины слоя

¹ Патент 2262741 (РФ).

² Патент 2268493 (РФ).

Тогда из основного тождества тригонометрии можно получить максимальную толщину слоя для некоторого участка поверхности модели:

$$Z = \frac{h}{\sqrt{1-p^2}} \quad (5)$$

Чтобы определить среднюю толщину спекаемого слоя по всем поверхностям модели, необходимо усреднить значение показателя p . Для этого воспользуемся принятым в машинной графике представлением поверхностей в виде набора смежных треугольников (полигонов) [2] (рис. 3):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (|z \times n_i| F_i)}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (6)$$

где P — среднее по всей модели значение показателя ориентации нормалей поверхностей модели; n_i — значение единичных нормальных векторов полигонов поверхностей модели; F_i — площадь полигонов поверхностей.

При этом необходимо учитывать, что поверхности, нормали которых коллинеарны оси z (на рис. 4 выделены жирной линией), формируются независимо от требований к точности поверхности и толщины спекаемого слоя. Данные поверхности не должны участвовать в определении максимальной толщины слоя. Таким образом, при расчете показателя P в выражении (6) необходимо учитывать нормали и площади лишь тех полигонов, для которых выполняется условие

$$|z \times n_i| < 1. \quad (7)$$

Среднее время на изготовление одного слоя прототипа можно определить из следующего уравнения (рис. 5):

$$t = \frac{S}{k_n d v} \quad (8)$$

где S — среднее значение площадей сечений модели; k_n — коэффициент перекрытия; d — диаметр пятна лазерного луча; v — скорость перемещения луча лазера.

Среднее значение площадей сечений модели

$$S = \frac{\Phi}{H} \quad (9)$$

где Φ — объем модели.

С учетом выражений (2)—(9) запишем уравнение (1) в следующем виде:

$$T = \frac{\Phi \sqrt{1-P^2}}{k_n d v h} \quad (10)$$

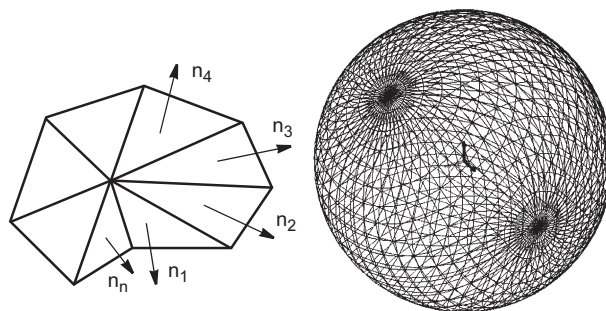


Рис. 3. Представление поверхностей посредством триангуляции

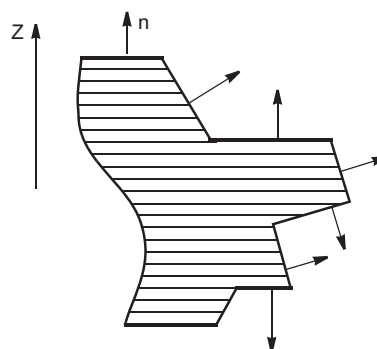


Рис. 4. Влияние нормалей на максимальную толщину слоя

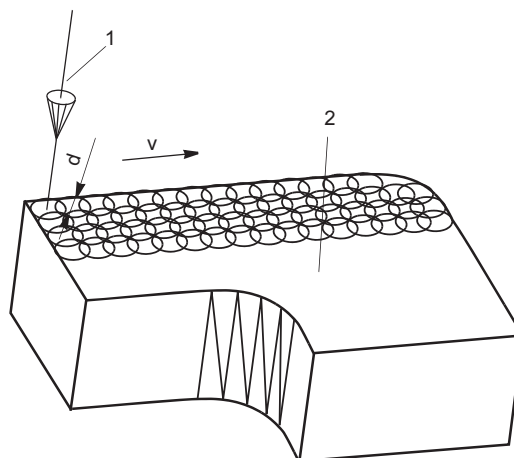


Рис. 5. Схема процесса формообразования селективным лазерным спеканием: 1 — лазерный луч; 2 — прототип

В данном выражении только одна величина P характеризует влияние формы изделия на время его изготовления. Таким образом, показатель P можно назвать показателем технологичности формы изделия. При этом следует отметить, что он является инвариантным относительно аффинных преобразований модели и зависит только от направления технологической оси z . Это свидетельствует о том, что он является объективной мерой целесообразности той или иной формы изделия с точки зрения затрат времени на его изготовление.

На рис. 6 приведены объемные тела с соответствующими показателями технологичности. Особо следует отметить группу призматических тел, для которых $P = 1$. При формальной подстановке данного значения показателя технологичности в выражение (10) получим абсурдный на первый взгляд результат — время на изготовление такого прототипа будет равно нулю. Причина такого результата заложена в уравнениях (2) и (3). Дело в том, что точность h таких моделей будет обеспечиваться независимо от толщины слоя, однако физически толщина слоя всегда ограничена либо технологическими возможностями оборудования, либо высотой модели. Поэтому в формуле (2) число слоев не может быть менее 1. Несмотря на это, с помощью показателя P на этапе проектирования изделия можно оценить, насколько технологичным оно будет.

Рассматривая методы оценки производительности процесса селективного лазерного спекания, невозможно не заметить аналогии с любым другим 2,5-координатным методом формообразования,

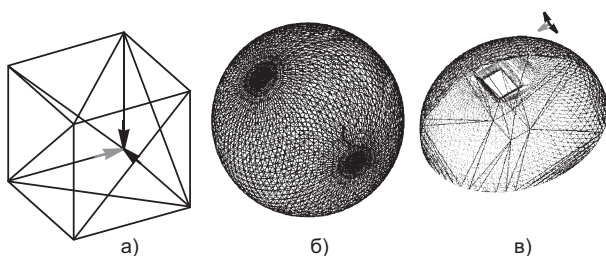


Рис. 6. Сравнительная оценка показателя технологичности: а—в — P равен 1, 0,785 и 0,750 соответственно

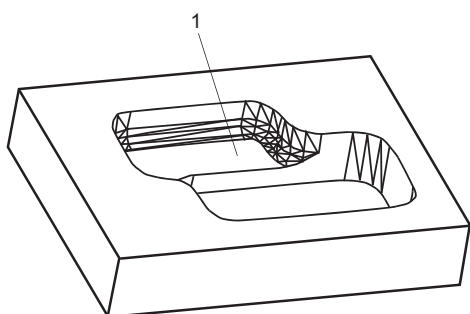


Рис. 7. Конструктивный элемент 1 заготовки, получаемый фрезерованием

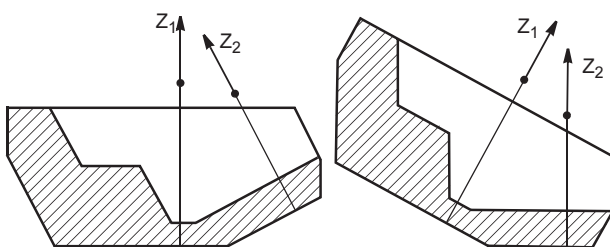


Рис. 8. Варианты ориентации заготовки относительно технологической оси z

например фрезерованием [3]. В обоих случаях поверхности изделия формируются одинаково, соответственно и способы повышения производительности данных методов должны пересекаться, а также должны быть схожими способы ее оценки.

Поскольку при 2,5-координатной обработке также требуется обеспечить максимальную точность при максимальной производительности, рекомендуется назначать переменную глубину обработки конструктивного элемента с учетом формы обрабатываемой поверхности. Возможность расчета траектории для подобных случаев должна присутствовать в САМ-системах, подготавливающих управляющие программы для 2,5-координатной обработки.

На примере 2,5-координатного фрезерования с переменной глубиной резания выражение (10) можно заменить следующим выражением для определения времени на обработку:

$$T = \frac{\Phi_{кз} \sqrt{1 - P^2}}{d_{ф} S_{м} h}, \quad (11)$$

где $\Phi_{кз}$ — объем конструктивного элемента, подлежащего обработке (рис. 7); $d_{ф}$ — диаметр фрезы; $S_{м}$ — минутная подача.

Значение показателя технологичности P зависит от направления технологической оси z (рис. 8). Это является следствием общеизвестного факта, что время обработки зависит от ориентации заготовки относительно системы координат технологического оборудования. При этом P может выступать в качестве целевой функции при оптимизации положения заготовки на станке с точки зрения минимизации затрат времени на обработку и предъявляемых требований к точности изделия.

Реализация алгоритма оценки показателя технологичности не представляет особых сложностей и не требует значительных затрат ресурсов ЭВМ, поскольку при визуализации трехмерных объектов в любой САПР используется триангуляция поверхностей с определением нормалей полигонов [2].

Таким образом, предложенный показатель является эффективным средством оценки технологичности поверхностей сложной формы на этапе конструирования изделий и может широко применяться в различных САД/САМ-системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малов И. Е. Технологии изготовления деталей с применением лазерных методов быстрого прототипирования // Технология машиностроения. 2005. № 10. С. 13—18.
2. Ли К. Основы САПР (САД/САМ/САЕ). Санкт-Петербург: Питер, 2004. 560 с.
3. Луценко М. А. Повышение производительности фрезерования 3D-поверхностей на станках с ЧПУ // Оборудование и инструмент для профессионалов. 2006. № 3. С. 36—39.