

ний коромысла в зоне металлических пластинок 23 составляет 0,02 – 0,04 мм. Величина этих перемещений зависит от соотношения геометрических параметров L_1, L_2 коромысла 6. Чем больше параметр K_s , тем выше эффективность регистрации скачков коромысла при выводе РИОР из расточенного отверстия в тех случаях, когда величина радиального износа режущего элемента после обработки одной заготовки менее 5 мкм. Важно отметить, что при таких малых величинах радиального износа режущего элемента срабатывание механизма самокомпенсации РИОР происходит только после обработки нескольких заготовок. Поэтому в этих случаях важно обеспечить более высокую чувствительность механизма самокомпенсации износа (4 – 5 мкм).

Чувствительность датчика определялась на стенде при плавном вводе вращающегося РИОР в конусообразное отверстие калибра и в условиях обработки стали 20Х с твердостью НВ до 216. Режимы обработки: скорость резания до 0,2 – 0,3 м/с; глубина резания и подача с непрерывно-периодической самокомпенсацией износа - $0,15 \cdot 10^{-3}$ м, $0,2 - 0,25 \cdot 10^{-3}$ м/об.

Установлено, что более высокие параметры чувствительности механизма самокомпенсации износа РИОР при равных условиях натяга в отверстиях калибра и заготовки достигаются в процессе резания. Это связано с влиянием неравномерной силы резания на повышение порога чувствительности механизма самокомпенсации износа.

Разработанный метод автоматизированного контроля износа режущего элемента РИОР позволяет повысить эффективность использования за счет более полного использования его режущих способностей, исключить появление брака в условиях автоматизированного производства. РИОР за счет автоматизированного контроля износа его рабочих элементов.

Список использованных источников: 1. Джусурия Т.Г. Комбинированная обработка точных координированных отверстий. - Одесса: АО БАХВА, 2003. - 108 с. 2. Расточная головка: А.с. 1386376 СССР, МКИ В23В 29/03 / Г.Д. Григорьян, Т.Г. Джусурия, Г.М. Бурбан (СССР). - №1240509 4/27; Заявлено 10.06.86; Опубл. 07.04.88, Бюл. № 13. - 4 с. 3. Активный контроль в машиностроении: Справочник / Педь Е.И., Высоцкий А.В. и др. / Под ред. Е.И. Педь. - М.: Машиностроение, 1978. - 352 с. 3.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

Появление систем компьютерного 3D моделирования позволило конструкторам и технологам уже на стадии проектирования получать ответы на большинство вопросов, связанных с технологичностью изделий и трудоемкостью их изготовления. Использование показателя сложности позволяет решать целый ряд производственных задач, возникающих на основных этапах жизненного цикла промышленного изделия, в частности, на этапах технической и организационно-экономической подготовки производства. Во-первых, сложность изделия представляет собой неотъемлемое свойство и определяется на основе его конструкторско-технологических признаков. Во-вторых, сложность позволяет оценивать трудоемкость и затраты на изготовление в организационно-технических условиях конкретной производственной системы. Поэтому оценка степени сложности изделий, на базе рассмотрения их компьютерных 3D моделей, является актуальной задачей.

Анализ литературы

Задача определения сложности изделий рассматривается в современных научных работах. В основном исследования проведены в области определения конструктивно-технологической сложности изделия, характеризующей его неотъемлемое свойство. При оценке сложности учитывались геометрические, структурные и другие свойства изделия, а также предъявляемые к ним конструкторские и технологические требования. Сложность рассматривается как мера затрат ресурсов на реализацию различных этапов жизненного цикла машиностроительного изделия.

Для этого в работах [11, 12, 13] были разработаны специальные математические модели, общим принципом формирования которых является иерархическая декомпозиция изделия на структурные составляющие – детали, т. е. производится выделение первичных элементов изделия. Далее производится декомпозиция детали с выделением элементарных поверхностей, которые характеризуются определенной геометрической формой и технологическими параметрами, представленными в виде коэффициентов. Для каждого уровня иерархической структуры изделия применяется специально разработанная функция для определения значения показателя сложности.

Задаче разработки показателя сложности деталей посвящены работы [21, 23, 25]. Показатель структурной сложности представляет собой совокупность конструктивных и технологических параметров детали, инструментов и приспособлений. Для реальной количественной оценки сложности детали требуется наличие достаточно обширной базы данных по аналогичным деталям с целью построения определенных корреляционных зависимостей. В работах также не учитывается способ построения модели детали.

В работе [22] предложен метод оперативной оценки конструктивной и технологической сложности машиностроительной детали путем анализа ее трехмерной САД-модели. Основным достоинством предложенного метода является отсутствие необходимости в привлечении статистической информа-

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, Л.Н. Абдурайимов,
Ю.Б. Витязев, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЛОЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Розглянуто підхід до оцінки ступеня складності поверхонь промислових виробів на основі гауссової (повної) та середньої кривизни. В якості кількісного показника прийнято добуток інформаційної ентропії гауссової і середньої кривизни поверхні. Наведено результати тестування запропонованого підходу на основних аналітичних поверхнях і триангуляційних 3D моделях.

Рассмотрен подход к оценке степени сложности поверхностей промышленных изделий на основе гауссовой (полной) и средней кривизны. В качестве количественного показателя принято произведение информационной энтропии гауссової и средней кривизны поверхности. Приведены результаты тестирования предлагаемого подхода на основных аналитических поверхностях и триангуляционных 3D моделях.

The approach to assessing the degree of the surfaces complexity of industrial products based on the Gaussian (total) and the mean curvature. As a quantitative characteristics accepted a product of an information entropy of the Gaussian and mean surface curvature. The results of testing the proposed approach to the basic analytical surfaces and triangulated 3D models.

Постановка проблемы

В настоящее время одной из наиболее важных задач любого машиностроительного предприятия является эффективная организация производственного процесса. Рациональная организация производственного процесса невозможна без проведения тщательной технической подготовки производства. Одной из самых ответственных и трудоемких ее частей является технологическое проектирование, трудоемкость которого составляет 30-40% (от общей трудоемкости технической подготовки) в условиях мелкосерийного производства, 40-50% при серийном и 50-60% при массовом производстве [14].

Существует необходимость в разработке количественного показателя, характеризующего сложность и трудоемкость изготовления промышленного изделия. Такая необходимость в оценке сложности промышленных изделий возникает на протяжении всего цикла подготовки производства. Оценка может позволить выявить уровень технологичности изделий, учесть трудозатраты при их изготовлении и др.

Сложность и трудоемкость изготовления промышленных изделий напрямую зависят от сложности составляющих поверхностей и влияют на общую себестоимость. При выпуске машиностроительной продукции минимизация себестоимости является важным требованием обеспечения эффективности технологического процесса.

ции по аналогичным деталям. Исходные данные для выполнения анализа сложности получают из электронной модели детали, соответствующей требованиям ГОСТ 2.052-2006 [9]. Предложенная в данном методе математическая модель основана на том, что сложность отдельной поверхности детали является функцией от ряда параметров: кривизны, допустимых отклонений размеров, геометрической формы, взаимного расположения элементов и допустимой шероховатости поверхностей.

Определению сложности изделия на базе применения элементов интегральной геометрии и теории информации посвящена работа [27]. Сложность изделия рассматривается с двух различных сторон: внутренней – как сложность структуры или степени взаимозависимости между деталями (внутренняя сложность) и внешней – степень взаимодействия с описывающей изделие сферой (внешняя сложность).

Рассмотренные работы ориентированы, прежде всего, на решение технологических задач оценки сложности применительно к традиционным технологиям изготовления. Для работы с триангуляционными 3D моделями, используемыми в интегрированных генеративных технологиях (Rapid Prototyping) [7, 8], необходимо разработать количественный показатель для оценки их сложности.

Цель статьи – рассмотреть возможность разработки количественного показателя оценки сложности поверхностей промышленных изделий на базе их триангуляционных 3D моделей для использования при технологической подготовке производства на этапе предшествующем материализации.

Изложение основного материала

В настоящее время с появлением систем компьютерного 3D моделирования существенно повысилась эффективность процесса проектирования и изготовления машиностроительной продукции. Трехмерное моделирование является неотъемлемой частью современного машиностроительного производства. При переходе на 3D моделирование отпала необходимость в проектировании чертежей традиционными методами. В связи с этим время выпуска конструкторской документации существенно сократилось.

Триангуляционные модели, используемые в интегрированных генеративных технологиях, содержат описания трехмерной геометрии изделий в виде системы большого количества связанных между собой плоских треугольников. Каждый треугольник триангуляционной 3D модели определяется координатами своих вершин и характеризуется нормалью к его поверхности (направляющими косинусами). Задача разработки количественного показателя оценки сложности поверхностей изделия должна основываться на данных, содержащихся в триангуляционной 3D модели.

В качестве одного из подходов для оценки степени сложности поверхностей промышленного изделия предполагается использование информации о

кривизне его поверхностей. Как правило, поверхность промышленного изделия представляет собой совокупность элементарных аналитических поверхностей. Расчет кривизны таких элементарных гладких поверхностей является достаточно сложной задачей. Под гладкостью поверхности понимается условие существования в каждой ее точке касательной плоскости, наличие кривизны и др.

Из дифференциальной геометрии известно [5, 18], что нормальная кривизна поверхности – это величина, характеризующая отклонение поверхности в произвольном направлении от своей касательной плоскости в некоторой точке.

Рассмотрим локальный участок гладкой поверхности S (рис. 1) без учета точек, принадлежащих границе рассматриваемого участка. Возьмем точку M и рассмотрим все кривые, расположенные на этой поверхности, условно проходящие через нее. При этом все касательные, которые можно провести к этим кривым в точке M будут лежать в одной плоскости, которая вследствие этого называется касательной. Прямая, перпендикулярная касательной плоскости в точке M , называется нормалью \vec{N} к поверхности [5].

Построим плоскость P_1 , которая содержит точку M и нормаль к поверхности \vec{N} так, что пересечение этой плоскости с поверхностью S образует контур Π_1 (рис. 1). Можно определенным образом параметризовать $\Pi(S)$ так, что $\Pi(0) = M$ и $\Pi'(0) = T_1$. Кривые, получающиеся при пересечении поверхности с плоскостями, проходящими через нормаль к поверхности, называются нормальными сечениями. Нормальная кривизна $k_M(T_1)$ в направлении T_1 определяется как скалярное произведение $\Pi''(0) = k_M(T_1) \cdot \vec{N}$. Если построить плоскость P_2 , то определим новый контур Π_2 на поверхности S со своей собственной нормальной кривизной. Плоскость P_2 перпендикулярна P_1 и соответствует ее повороту вокруг вектора \vec{N} . В касательной плоскости существуют два перпендикулярных направления T_1 и T_2 (рис. 1) такие, что нормальную кривизну k_M в произвольном направлении T_φ в точке M можно представить формулой Эйлера [2, 17, 19]:

$$k_M(T_\varphi) = k_1 \cos^2 \varphi + k_2 \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где $k_1 = k_M(T_1)$ и $k_2 = k_M(T_2)$ – главные кривизны локального участка гладкой поверхности S в точке M ;

φ – полярный угол в касательной плоскости, отсчитываемый от одного из главных направлений до T_φ ($T_\varphi = T_1 \cos \varphi + T_2 \sin \varphi$; $-\pi \leq \varphi < \pi$).

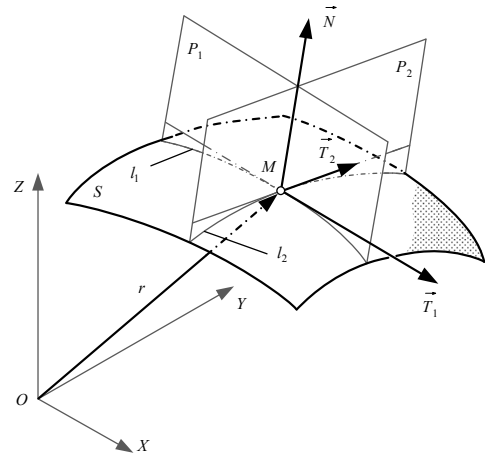


Рисунок 1 – Нормальная кривизна локального участка гладкой поверхности S в точке M : \vec{N} – нормаль к поверхности; P_1 и P_2 – плоскости, проходящие через нормаль \vec{N} и точку M ; l_1 и l_2 – нормальные сечения; \vec{T}_1 и \vec{T}_2 – главные направления

Из формулы Эйлера (1) следует, что для определения нормальной кривизны поверхности в произвольном направлении достаточно знать главные кривизны поверхности.

При этом гауссовой или полной кривизной поверхности K называется величина, определяемая произведением главных кривизн [17]:

$$K = k_1 k_2. \quad (2)$$

Из дифференциальной геометрии известно, что гауссова кривизна K является объектом внутренней геометрии поверхностей, в частности не изменяется при изометрических изгибаниях. Полная кривизна K является мерой формы локального участка поверхности S , хотя с ее использованием связана некоторая потеря информации по сравнению с использованием главных кривизн k_1 и k_2 . Потеря этой информации может быть восстановлена введением в рассмотрение средней кривизны H локального участка поверхности S в заданной точке. Средней кривизной поверхности H называется величина, определяемая соотношением [17]:

$$H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2). \quad (3)$$

Обратный переход к k_1, k_2 определяется следующей зависимостью:

$$k_{1,2} = H \pm \sqrt{H^2 - K}. \quad (4)$$

По знакам гауссовой K и средней H кривизны, а также по соотношениям главных кривизн k_1 и k_2 , локальные участки гладких поверхностей делятся на различные типы (табл. 1). Гауссова кривизна может принимать отрицательные значения для поверхностей имеющих локальные участки седлообразной формы, т. е. главные кривизны имеют разные знаки, а, следовательно, главные сечения имеют противоположные направления выпуклости. Примерами поверхностей с отрицательной кривизной являются: однополостный гиперболоид, гиперболический параболоид, катеноид, закрытый тор и др.

Применительно к триангуляционным 3D моделям определять кривизны их поверхностей на базе применения теории классической дифференциальной геометрии не вполне корректно в силу нарушения условия гладкости их поверхностей. В последние десятилетия появилась новая область – дискретная дифференциальная геометрия, которая лежит на стыке дифференциальной и дискретной геометрии. Данная область геометрии ставит своей целью изучение геометрических объектов, которые образованы конечным числом простейших элементов, и разрабатывает дискретные аналоги понятий и методов классической дифференциальной геометрии. Дискретная дифференциальная геометрия вызывает интерес не только важными теоретическими приложениями, но и своими связями с компьютерной графикой. Важным примером этой связи служат триангуляционные поверхности [3].

Взаимосвязь дискретной и гладкой версий теории приводит к важным результатам, как в теории поверхностей, так и в теории многогранников. Классическими достижениями дискретной дифференциальной геометрии являются фундаментальные результаты А.Д. Александрова [1] и А.В. Погорелова [16] в метрической теории многогранников и выпуклых поверхностей.

Кривизна поверхности

Определению кривизны поверхности в дискретном случае посвящено достаточное количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Среди них следует отметить работу [26], в которой рекомендуется использовать метод Гаусса-Бонне, обеспечивающий рациональное соотношение между точностью и скоростью вычислений.

Таблица 1 – Характеристики локальных участков гладкой поверхности S [18]

гауссова (полная) K	Кривизна		Название	Вид локального участка
	средняя H	соотношение главных кривизн k_1 и k_2		
$K > 0$	$H > 0$	$k_1 > k_2 > 0$	Выпуклый эллиптический	
		$k_1 = k_2 > 0$	Выпуклый омбилический	
	$H < 0$	$k_1 > k_2 < 0$	Вогнутый эллиптический	
		$k_1 = k_2 < 0$	Вогнутый омбилический	
$K = 0$	$H > 0$	$k_1 > k_2 = 0$	Выпуклый параболический	
	$H = 0$	$k_1 = k_2 = 0$	Уплотнения	
	$H < 0$	$k_2 < k_1 = 0$	Вогнутый параболический	
$K < 0$	$H > 0$	$k_1 > k_2; k_1 > k_2 $	Гиперболический псевдовыпуклый	
	$H = 0$	$k_1 = -k_2$	Минимальный	
	$H < 0$	$k_1 > k_2; k_1 < k_2 $	Гиперболический псевдовогнутый	

В данном подходе при определении кривизны поверхности в вершинах триангуляционной модели участвуют те ребра и треугольники, которые инцидентны рассматриваемой вершине. Для нахождения гауссовой кривизны поверхности в вершине V_k (рис. 2), необходимо определить полный угол при V_k – сумма внутренних углов φ_i для каждого треугольника F_i . При переходе от случая использования теоремы Гаусса-Бонне для гладких поверхностей [17, 19, 20] к дискретному случаю, интегральная гауссова кривизна \bar{K}_k локального участка триангуляционной поверхности при вершине V_k (рис. 2) определяется по следующему соотношению [26]:

$$\bar{K}_k = \iint_S K_k dS = 2\pi - \sum_{i=1}^{N_k} \varphi_i, \quad (5)$$

где K_k – гауссова кривизна поверхности в окрестности dS вершины V_k ;
 N_k – количество треугольников, ребра которых инцидентны вершине V_k ;
 φ_i – внутренний угол треугольника F_i при вершине V_k .

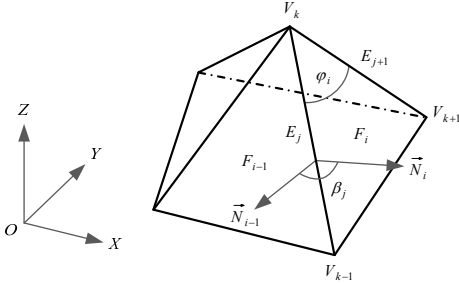


Рисунок 2 – Схема определения гауссовой (полной) и средней кривизны локального участка триангуляционной поверхности при вершине V_k ; F_{i-1} и F_{i+1} – смежные треугольники с общим ребром E_j ; φ_i – внутренний угол треугольника F_i при вершине V_k ; E_j – ребро, инцидентное вершине V_k ; β_j – двугранный угол при ребре E_j (угол между нормальными \vec{N}_{i-1} и \vec{N}_i треугольников F_{i-1} и F_i)

Аналогичным образом для определения интегральной средней кривизны \bar{H}_k локального участка триангуляционной поверхности при вершине V_k (рис. 2) используется следующее соотношение [26]:

$$\bar{H}_k = \iint_S H_k dS = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{N_k} E_j \beta_j, \quad (6)$$

где H_k – средняя кривизна поверхности в окрестности dS вершины V_k ;
 E_j – длина общего ребра двух смежных треугольников, инцидентного вершине V_k ;
 β_j – двугранный угол при ребре E_j (угол между нормальными смежных по ребру E_j треугольников F_{i-1} и F_i).

Для получения гауссовой и средней кривизны в вершине V_k из интегральных выражений (5)-(6), предполагается, что кривизна равномерно распределена вокруг этой вершины и нормализована по области [26]:

$$K_k = \frac{\bar{K}_k}{S} = \frac{2\pi - \sum_{i=1}^{N_k} \varphi_i}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N_k} S_i}, \quad (7)$$

$$H_k = \frac{\bar{H}_k}{S} = \frac{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^{N_k} E_j \beta_j}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N_k} S_i},$$

где S_i – площадь i -го треугольника F_i , стороны которого инцидентны вершине V_k .

Для нахождения полного угла при вершине V_k триангуляционной модели необходимо вычислить сумму внутренних углов треугольников φ_i . Величина угла φ_i для отдельного треугольника F_i (рис. 2) с координатами вершин $V_{k-1}(x_{k-1}; y_{k-1}; z_{k-1})$, $V_k(x_k; y_k; z_k)$ и $V_{k+1}(x_{k+1}; y_{k+1}; z_{k+1})$ может быть рассчитана по следующей зависимости [4]:

$$\varphi_i = \arccos \left(\frac{\overline{V_k V_{k-1}} \cdot \overline{V_k V_{k+1}}}{\left| \overline{V_k V_{k-1}} \right| \cdot \left| \overline{V_k V_{k+1}} \right|} \right), \quad (8)$$

где координаты векторов $\overline{V_k V_{k-1}}$ и $\overline{V_k V_{k+1}}$ определяются на базе координат вершин треугольника F_i $\overline{V_k V_{k-1}} = \{x_{k-1} - x_k; y_{k-1} - y_k; z_{k-1} - z_k\}$ и $\overline{V_k V_{k+1}} = \{x_{k+1} - x_k; y_{k+1} - y_k; z_{k+1} - z_k\}$.

Длина ребра E_j определяется как длина вектора $\overline{V_k V_{k-1}}$ (рис. 2) по следующей зависимости [4]:

$$\left| \overline{V_k V_{k-1}} \right| = \sqrt{(x_{k-1} - x_k)^2 + (y_{k-1} - y_k)^2 + (z_{k-1} - z_k)^2}. \quad (9)$$

Двугранный угол β_j при ребре E_j определяется как угол между нормальными $\vec{N}_{i-1} = \{N_{x,i-1}; N_{y,i-1}; N_{z,i-1}\}$ и $\vec{N}_i = \{N_{x,i}; N_{y,i}; N_{z,i}\}$ к треугольникам

F_{i-1} и F_i соответственно (рис. 2) и определяется следующей зависимостью [4]:

$$\beta_j = \arccos \left(\frac{\overline{N_{i-1}} \cdot \overline{N}_i}{\left| \overline{N_{i-1}} \right| \cdot \left| \overline{N}_i \right|} \right) = \arccos \left(\frac{N_{x,i-1} N_{x,i} + N_{y,i-1} N_{y,i} + N_{z,i-1} N_{z,i}}{\sqrt{N_{x,i-1}^2 + N_{y,i-1}^2 + N_{z,i-1}^2} \cdot \sqrt{N_{x,i}^2 + N_{y,i}^2 + N_{z,i}^2}} \right). \quad (10)$$

Определение площади S_i треугольника F_i с вершинами V_{k-1} , V_k и V_{k+1} производится с учетом [6, 10] по следующим зависимостям:

$$S_i = \frac{1}{2} \sqrt{S_{Minor1(i)}^2 + S_{Minor2(i)}^2 + S_{Minor3(i)}^2}, \quad (11)$$

где $S_{Minor1(i)}$, $S_{Minor2(i)}$, и $S_{Minor3(i)}$ определяются следующим образом:

$$S_{Minor1(i)} = \begin{vmatrix} y_{k,i} - y_{k-1,i} & z_{k,i} - z_{k-1,i} \\ y_{k+1,i} - y_{k-1,i} & z_{k+1,i} - z_{k-1,i} \end{vmatrix} = y_{k,i} z_{k+1,i} - y_{k+1,i} z_{k,i} - y_{k-1,i} z_{k+1,i} + y_{k-1,i} z_{k,i};$$

$$S_{Minor2(i)} = - \begin{vmatrix} x_{k,i} - x_{k-1,i} & z_{k,i} - z_{k-1,i} \\ x_{k+1,i} - x_{k-1,i} & z_{k+1,i} - z_{k-1,i} \end{vmatrix} = x_{k,i} z_{k+1,i} - x_{k+1,i} z_{k,i} - x_{k-1,i} z_{k+1,i} + x_{k-1,i} z_{k,i};$$

$$S_{Minor3(i)} = \begin{vmatrix} x_{k,i} - x_{k-1,i} & y_{k,i} - y_{k-1,i} \\ x_{k+1,i} - x_{k-1,i} & y_{k+1,i} - y_{k-1,i} \end{vmatrix} = x_{k,i} y_{k+1,i} - x_{k+1,i} y_{k,i} - x_{k-1,i} y_{k+1,i} + x_{k-1,i} y_{k,i}.$$

Полученные расчетные соотношения позволяют определять гауссову K и среднюю H кривизны локальных участков в вершинах триангуляционной поверхности.

На первоначальном этапе исследований в качестве показателя сложности поверхностей были выбраны средние значения кривизн. Однако проведенные исследования анализа триангуляционных моделей показали их слабую связь со сложностью определяемой экспертно. В процессе анализа результатов моделирования возникла рабочая гипотеза о том, что необходим обобщенный критерий оценки сложности на базе информационной энтропии значений кривизн.

Информационная энтропия кривизны

Информационные энтропии предлагается рассчитывать на основе полученных значений гауссовой K и средней H кривизны. Информационная

энтропия играет центральную роль в теории информации в качестве меры ее количества. Одна из фундаментальных работ по теории информации принадлежит К. Шеннону [24]. Определение величины информационной энтропии $I(x)$ для интервального вариационного ряда значений исследуемого признака x выполняется по следующей зависимости:

$$I(x) = -k \sum_{i=1}^m p_i \log_b(p_i), \quad (12)$$

где p_i – относительная частота исследуемого признака x ($\sum_{i=1}^m p_i = 1$);

m – количество одинаковых интервалов разбиения;

b – основание логарифма ($b \geq 2$);

k – коэффициент, определяемый из некоторых соображений (знак минус учитывает, что для случая $p_i < 1$, $\log_b(p_i) < 0$).

Количество интервалов разбиения выбирается по следующей зависимости [15]:

$$m_{\min} \dots m_{\max} = (0,55 \dots 1,25) N_{\text{vert}}^{0,4}, \quad (13)$$

где N_{vert} – общее количество вершин триангуляционной модели.

Энтропия должна быть равна 1, если значения относительных частот p_i во всех интервалах равны (равномерное распределение исследуемого признака), 0 – если $p_i = 1$ в одном интервале, а в остальных $p_i = 0$ (в нашем случае $p_i \neq 0$ для крайних интервалов).

Рассмотрим определение коэффициента k для предельного случая – равномерного распределения:

$$I(x) = -k \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \log_b \left(\frac{1}{m} \right) = -k \log_b \left(\frac{1}{m} \right) = 1, \quad (14)$$

тогда $k = 1 / -\log_b \left(\frac{1}{m} \right)$. Полученное выражение для k зависит от основания логарифма b и количества интервалов m . Если принять $b = m$, то k всегда будет равен 1 при любом m , а интервал возможных значений информационной энтропии $I(x)$ будет находиться в диапазоне $[0, 1]$. Дополнительно надо учесть математическую обработку значений $p_i = 0$ с при использовании логарифмирования (защитить вычислительную процедуру). Тогда окончательно имеем:

$$I(x) = -\sum_{i=1}^m [p_i \log_m(p_i), \text{ если } p_i > 0; \text{ иначе } 0]. \quad (15)$$

По полученному выражению информационной энтропии $I(x)$ были проведены тестовые расчеты для 10 аналитических поверхностей (рис. 3) и 8

триангуляционных моделей (рис. 4). В качестве исследуемых признаков при определении значений информационной энтропии $I(K)$, $I(H)$ использовались гауссова K и средняя кривизна поверхности H . Поверхности и триангуляционные модели на базе экспертных оценок расположены в порядке увеличения степени сложности (рис. 3, 4). Анализ результатов показал, что полученные оценки не являются представительными.

Поэтому для получения более представительных показателей сложности было решено использовать комплексные показатели с диапазоном возможных значений $[0, 1]$. В качестве таких комплексных показателей рассматривались полусумма информационных энтропий $I(K)$, $I(H)$ и их произведение:

$$I_1 = \frac{1}{2}(I(K) + I(H)); \quad I_2 = I(K) \cdot I(H).$$

Анализ результатов показал, что на базе тестовых поверхностей и моделей (рис. 3, 4) использование комплексного показателя I_2 позволяет добиться лучших результатов по сравнению с I_1 . Поэтому в качестве показателя сложности целесообразно использовать I_2 , определяемого как произведение информационных энтропий гауссовой и средней кривизны поверхности.

Выводы

Рассмотрена возможность разработки количественного показателя оценки сложности поверхностей промышленных изделий на базе их триангуляционных 3D моделей для использования при технологической подготовке производства на этапе предшествующем материализации.

Предложен количественный показатель и расчетные зависимости для оценки сложности поверхностей промышленных изделий. В качестве показателя сложности рекомендуется использовать произведение информационных энтропий гауссовой и средней кривизны поверхностей.

Информационно-статистический подход к оценке степени сложности поверхностей промышленных изделий на базе анализа их триангуляционных 3D моделей создает предпосылки к дальнейшей их классификации и повышению уровня подготовки специалистов предметной области интегрированных генеративных технологий.

Результаты работы могут быть использованы при технологической подготовке производства сложных изделий на этапе предшествующем материализации.

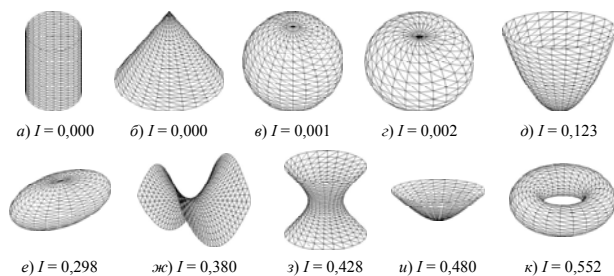


Рисунок 3 – Основные аналитические поверхности, расположенные в порядке увеличения величины сложности, определяемой на базе информационной энтропии I : а – цилиндрическая; б – коническая; в – сферическая; г – тор закрытый ($r < R$); д – эллиптический параболоид; е – эллипсоид; ж – гиперболический параболоид; з – однополостный гиперболюид; и – двуполостный гиперболюид (часть); к – тор открытый ($r > R$)

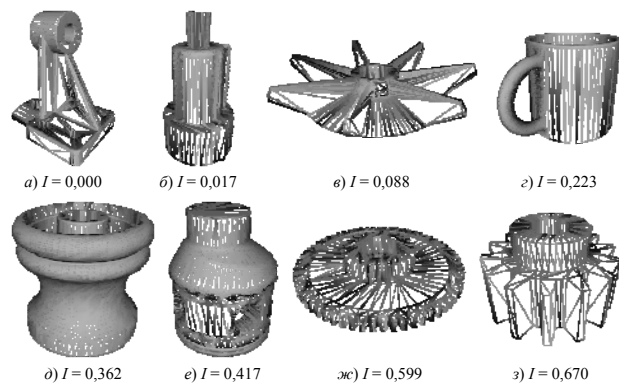


Рисунок 4 – Тестовые триангуляционные 3D модели изделий, расположенные в порядке увеличения величины сложности, определяемой на базе информационной энтропии I : а – кронштейн; б – корпус детали; в – винт; г – кружка; д – корпус соединительного устройства; е – хвостовая часть детали; ж – центральная шестерня; з – ходовая шестерня

Разработанный подход к оценке степени сложности поверхностей промышленных изделий на базе анализа их триангуляционных 3D моделей вошел составной частью в систему морфологического анализа, разрабатываемую на кафедре «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф.Семко Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Список использованных источников: 1. Александров А.Д. Выпуклые многогранники / Александров А.Д. – М.: Гостехиздат, 1950. – 428 с. 2. Бакельман И.Я. Введение в дифференциальную геометрию «в целом» // И.Я. Бакельман, А.Л. Вернер, Б.Е. Кантор. – М.: Наука, 1973. – 440 с. 3. Бобенко А.И. О принципах дискретизации дифференциальной геометрии. Геометрия сфер / А.И. Бобенко, Ю.Б. Суриц // Успехи математических наук. – 2007. – Т. 62, Вып. 1. – С. 3-50. 4. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с. 5. Гильберт Д. Наглядная геометрия / Д. Гильберт, С. Кон-Фоссен; пер. с нем. – М.: ОНТИ НТКП СССР, 1936. – 302 с. 6. Доброскок В.Л. Интегральные характеристики триангуляционных 3D моделей изделий / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдураимов, С.И. Чернышов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 92-101. 7. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [для студ. высш. учеб. заведений] / [Грабченко А.И., Вуков Ю.Н., Доброскок В.Л. и др.]; под ред. А.И. Грабченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с. 8. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления : монография / [Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И. и др.]; под ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. – [2-е изд.]. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с. 9. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения: ГОСТ 2.052-2006. – [Действ. с 2006-09-01]. – Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. – 14 с. 10. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с. 11. Коршунов А.И. Введение в теорию конструктивно-технологической сложности изделий машиностроения / Коршунов А.И. // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 66-67. 12. Коршунов А.И. Исследование конструктивно-технологической сложности машиностроительного изделия / Коршунов А.И. // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 11. – С. 36-37. 13. Коршунов А.И. Создание автоматизированных систем управления машиностроительными производствами на основе теории конструктивно-технологической сложности : автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук : спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)» / А.И. Коршунов. – Ижевск, 2008. – 44 с. 14. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник / Маталин А.А. – [2-е изд.]. – СПб.: Изд-во «Лань», 2008. – 512 с. 15. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. 16. Погорелов А.В. Внешняя геометрия выпуклых поверхностей / Погорелов А.В. – М.: Наука, 1969. – 760 с. 17. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия / Погорелов А.В. – [6-е изд.]. – М.: Изд-во «Наука», 1974. – 176 с. 18. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / Радзевич С.П. – К.: Растан, 2001. – 592 с. 19. Раивеский П.К. Курс дифференциальной геометрии / Раивеский П.К. – [3-е изд.]. – М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1950. – 428 с. 20. Степанов С.Е. Теорема Гаусса-Бонне / С.Е. Степанов // Сорский образ. журнал. – 2000. – Т. 6, № 9. – С. 116-121. 21. Теория сложности: монография / [Шарин Ю.С., Якимович Б.А., Толмачев В.Г., Коршунов А.И.]. – Ижевск: Изд-во ИЖГТУ, 1999. – 132 с. 22. Троицкий Д.И. Количественная оценка сложности машиностроительных деталей / Троицкий Д.И. // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2011. – № 3. – С. 62-65. 23. Шарин Ю.С. Теория сложности и ее использование в машиностроении / Ю.С. Шарин, Т.Ю. Поморцева. – Екатеринбург: ЦНТИ, 1996. – 237 с. 24. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. М.: Изд-во ин. лит-ры, 1963. – 829 с. 25. Якимович Б.А. Теоретические основы конструктивно-технологической сложности изделий и структур стратегий производственных систем машиностроения: монография / Якимович Б.А., Коршунов А.И., Кузнецов А.П. – Ижевск: Изд-во ИЖГТУ, 2007. – 280 с. 26. Magid E. A comparison of Gaussian and mean curvature estimation methods on triangular meshes of range image data / E. Magid, O. Soldea, E. Rivlin // J. of Computer Vision and Image Understanding – 2007. – Vol. 107. – Iss. 3. – P. 139-159. 27. Rigau J. Shape complexity based on mutual information / J. Rigau, M. Feixas, M. Sbert // Proceeding of SMI'2005. – 2005. – P. 357-362.

Поступила в редакцию 25.04.2012

УДК621.822.5:677.494.743.41

Е.Н. Еремин, д-р техн. наук, Д.А. Негров, канд. техн. наук, Губин Д.С., Омск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕССОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

У статті розглядається вплив параметрів ультразвукового пресування на механічні та триботехнічні властивості композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену і розробці на цій основі технології виготовлення підшипників ковзання.

В статті розглядається вплив параметрів ультразвукового пресування на механічні та триботехнічні властивості композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену і розробка на цій основі технології виготовлення підшипників ковзання.

In article it is considered influences of parameters of ultrasonic pressing on mechanical and tribotechnical properties of composite materials on a basis PTF and development on this basis of manufacturing techniques of bearings of sliding.

В настоящее время детали узлов трения, изготовленные из различных металлов и сплавов, постепенно заменяются полимерами и полимерными композиционными материалами, в частности на основе политетрафторэтилена [1]. Это позволяет понизить себестоимость изделий, повысить их надежность и долговечность. В тоже время область применения этих материалов очень ограничена, поскольку они обладают недостаточно высоким пределом прочности и модулем упругости, что приводит к значительному деформированию поверхностных слоев при трении и интенсивному изнашиванию.

Существующие способы повышения механических и триботехнических свойств, политетрафторэтилена, такие как, введение модификаторов в полимерную матрицу и изменение режимов технологических операций (измельчение и перемешивание компонентов, прессование, термообработка) позволяют частично решить эту проблему [2].

Для более эффективного решения этой задачи необходимо применение новых методов и технологических способов, которые бы позволили существенно повысить механические и триботехнические свойства полимеров, и тем самым расширить область их применения в производстве. Поэтому данная работа, посвященная совершенствованию технологии изготовления подшипников скольжения из композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, является актуальной.

Основой технологии, используемой при производстве изделий из полимерных композиционных материалов, является прессование из порошков заготовок и их последующее спекание. При прессовании фактически закладываются будущие свойства изделий – плотность, прочность, упругость, из-