

Сравнительный анализ вариантов моделирования реальной геометрии поверхностей деталей ГТД

И.А. Грачев¹, М.А. Болотов¹, В.А. Печенин¹, Е.В. Кудашов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Геометрические отклонения поверхностей деталей неизбежно возникают во время их изготовления. Известно, что накопленные дефекты поверхностей деталей и сборочных единиц на всем жизненном цикле изделия влияют на их функциональные характеристики. Зачастую моделирование сборки и анализ размерных связей изделий выполняют с использованием номинальной геометрии деталей без учета геометрических отклонений формы и расположения поверхностей деталей. Достоверность размерного анализа без учёта геометрических отклонений формы и расположения поверхностей деталей не является достаточной для решения технологических задач в условиях цифрового производства. Целью данной статьи является исследование влияния способов и моделей представления реальной геометрии на точность её воспроизведения. В качестве объекта исследований выступает сборочная единица ротора турбины низкого давления авиационного двигателя. Рассмотрены три методики формирования реальной геометрии, которые используются при реализации виртуального моделирования сборки. Представлены сравнительные результаты моделирования сборки с использованием рассматриваемых методик построения реальной геометрии, а также оценено их влияние на контролируемые сборочные параметры.

1. Введение

Геометрические отклонения формы и расположения поверхностей детали присутствуют на всем производственном цикле от заготовок до готового изделия. Известно, что геометрические отклонения поверхностей деталей и сборочных единиц оказывают воздействие на эксплуатационные параметры изделия, к которым относятся ресурс, надёжность, топливная эффективность двигателей и других показателей машин и оборудования. Для достижения высоких значений эксплуатационных характеристик требуется ужесточать требования к параметрам размерной точности, таких как величины геометрических допусков деталей или сборочных единиц. На двигателестроительном производстве для моделирования и анализа собираемости изделий используется номинальная геометрия деталей без учета геометрических отклонений. В цифровом производстве необходимо не только прогнозировать сборочные параметры, но и управлять этими геометрическими отклонениями деталей на протяжении жизненного цикла изделия.

Возникающие во время механической обработки геометрические отклонения, можно разделить на два основных вида: систематические и случайные [2,3]. Такая классификация основывается на большом производственном опыте. Отклонения формы и расположения поверхностей деталей присутствуют на каждой детали, выпускаемой механическим цехом, но

некоторые отклонения могут присутствовать только на нескольких заготовках. Систематические отклонения являются детерминированными, ожидаемыми и воспроизводимыми [4]. Данные отклонения возникают из ошибок зажима заготовки, неправильности базирования или кинематической неточности самого станка. Случайные отклонения возникают в результате изменений в производственном процессе, таких как изменение свойств материала, износ инструмента или колебания параметров окружающей среды. Из-за этих различных характеристик систематические и случайные геометрические отклонения обычно моделируются с использованием различных методов, даже если они могут быть классифицированы как один и тот же тип геометрического отклонения (например, волнистость).

Первые методики моделирования геометрических отклонений позволяли создавать 3D объект с оптимальными сгенерированными вариациями на основе использования параметрической твердотельной модели [1] и прибавлением к ней различных вариаций [5–7]. Недостатки данного метода можно отнести к деталям имеющим несколько сложных геометрических отклонений. Названные недостатки привели к использованию сплошных смещений [8,9], которые затем были распространены на продленные вариационные поверхности [10–12] и поле допуска [13]. Также в различных методиках по моделированию геометрических отклонений используются сплайны (кривые Безье и NURBS) [14]. В статьях [1,15] представлены подходы, основанные на построении зон допуска на основе твердотельного моделирования. Для моделирования зон допуска используются кинематические формулы, такие как линейные однородные матричные преобразования [16] или торсоры малого смещения (SDT) [17,18], другие подходы, основанные на кинематике [19] или векторные петли [20,21] для моделирования геометрических отклонений (обычно в пределах определенных зон допуска) на основе непрерывного геометрического представления [22].

Для прогнозирования сборочных параметров сборки ротора ГТД, необходимо иметь достоверные данные о размерно-точностных параметрах собираемых деталей. Универсальным, распространенным и наиболее точным средством измерения в двигателестроении является координатно-измерительная машина. Данные полученные с координатно-измерительной машины используются в построении реальных поверхностей деталей, так как при измерении могут присутствовать выбросы, которые могут достигать до 0,1 мм, что существенно может сказаться на смоделированной реальной поверхности, так как контролируемые сборочные параметры находятся в промежутке от 0,01 до 0,1 мм, где точность построения может существенно повлиять на результаты прогнозирования.

Таким образом, актуальной задачей является разработка методик моделирования реальных поверхностей деталей, позволяющие решать задачи размерно-точностного анализа и синтеза при учёте дефектов поверхностей деталей.

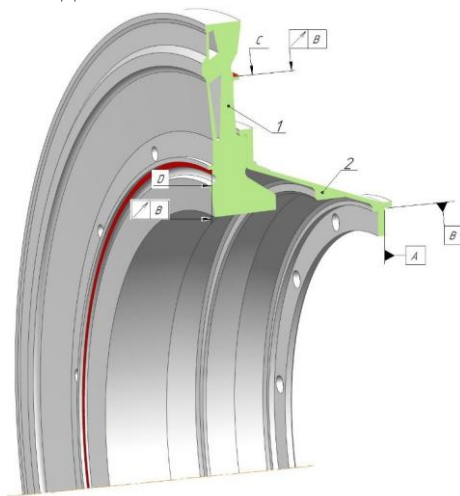


Рисунок 1. Сборочная единица и контролируемые поверхности, 1 – диск с дефлектором, 2 – проставка.

2. Объект исследования

В качестве объекта рассматривается сборка двух деталей турбины низкого давления: проставки и диска. На рисунке 1 приведен эскиз рассматриваемой сборочной единицы.

На рисунке 1 базы A и B образуют ось вращения (базовую ось). Относительно базовой оси заданы требования на торцевое биение поверхности D диска, радиальное биение поверхности C диска. Рассмотрим разработанные методики формирования реальных моделей деталей, входящих в рассматриваемую сборочную единицу.

3. Методики формирования реальных моделей деталей

На рисунке 2 приведена обобщающая методика формирования реальных моделей деталей.

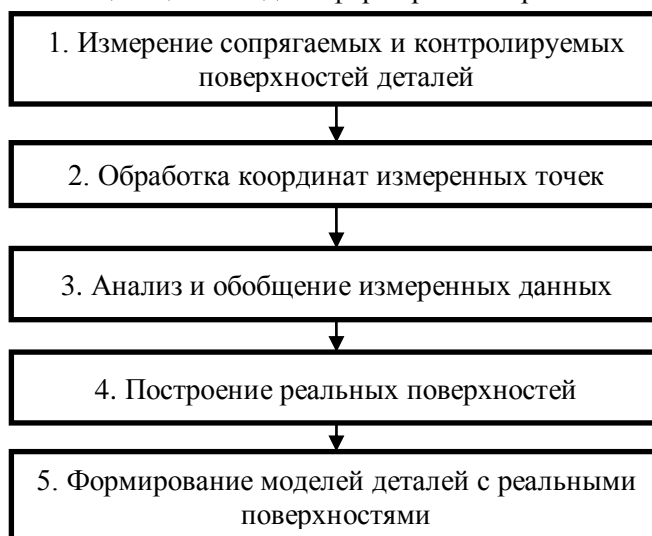


Рисунок 2. Методика формирования реальных моделей.

Реальная модель детали, отражающая ее геометрические параметры, формируется на основе измерений. Первый этап методики, измерение сопрягаемых и контролируемых поверхностей, производится при помощи оборудования, позволяющего получать данные по координатам точек в пространстве. В частности, использовалась контактная координатно-измерительная машина ZEISS MMZ G 20/30/20 с датчиком VAST gold.

Первый и пятый этапы являются одинаковыми для сравниваемых методик. В первой методике этапы два и три не применяются; во второй методике проводится дополнительная обработка координат измеренных точек, но отсутствует анализ и обобщение измеренных данных; в третьей методике присутствуют соответственно все пять этапов методики на рисунке 2. Соответственно первая методика является наименее трудоемкой, а третья – наиболее.

На заключительном этапе точки экспортировались в САД-систему NX, где происходит построение реальных моделей поверхностей.

Для описания поверхностей деталей, имеющих геометрические отклонения формы, использовались поверхности, образованные из бикубических порций (порции Кунса [23]). Описываемая поверхность представляет собой сегмент, соответствующий значениям параметров $0 \leq u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$. Порция Кунса образуется в результате сопряжения граничных сплайновых кривых и определяется выражением:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} u^i v^j, \quad (1)$$

где $P(u, v)$ – точка бикубической поверхности; a_{ij} – алгебраические векторные коэффициенты с компонентами x , y и z .

Комбинирование порций Кунса позволяет определить поверхность произвольной формы и размера. Поверхность в (1) является интерполяционным инструментом задания поверхности, т.е. кривые и поверхности проходят через задающие точки. Однако в ряде задач требуется

сглаживать данные, например, при обработке измеренной информации. Универсальным инструментом аппроксимации являются NURBS-сплайны и поверхности, описываемые параметрическими функциями вида [23]:

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} \cdot P_{ij} \cdot N_{ik}(u) \cdot N_{jl}(v)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} \cdot N_{ik}(u) \cdot N_{jl}(v)} \quad (2)$$

где P_{ij} – координаты (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) задающей точки в трехмерном пространстве; u, v – параметры для вычисления координат точек сплайновой поверхности, изменяющиеся в диапазонах $[t_{k-1}, t_{n+1}]$ и $[s_{l-1}, s_{m+1}]$ соответственно; $h_{i,j}$ – однородные координаты задающих точек; $N_{ik}(u)$, $N_{jl}(v)$ – базисные функции (или сопряжения) сплайна в параметрических направлениях u и v соответственно; t, s – узловые значения параметра, у которых функции $N_{ik}(u)$ и $N_{jl}(v)$ не равны нулю; k, l – степень кусочного сплайна в направлении параметров u и v соответственно; n, m – количество точек вдоль направлений u и v .

Для неструктурированных данных (первая методика) используется построение аппроксимирующей поверхности из (2). В случае проведения обработки и анализа измеренных данных строится интерполирующая поверхность (1). Этап загрузки координат обработанных точек поверхностей и построения самих поверхностей был автоматизирован при помощи программного приложения в модуле NX/Open API на языке программирования Visual Basic. Используя построенные поверхности производится перестроение номинальной CAD-модели [24]. Получившаяся модель является реальной моделью детали, учитывающий реальные отклонения геометрии.

3.1. Формирование реальных моделей без этапа обработки данных измерений

Для выгрузки данных по координатам точек измеренных поверхностей использовалась разработанная программа «ScanExporter», разработанная на языке C#. В программе выбирается файл или группа файлов из каталога и производится извлечение всех точек объектов. После импорта данных из Calypso 5.6 они сохраняются в файл формата *.csv. Структура файла состоит из заголовков, координат точек и компонент векторов нормалей в точках.

Данные из этого файла загружаются в программу среды MATLAB и в формате *.txt или *.xlsx сохраняются только интересующие нас точки поверхностей из общего массива измеренных данных. Далее следует 4 этап общей методики на рисунке 2, и для описания поверхностей используются NURBS (2).

3.2. Вторая методика, включающая предварительную обработку измеренных данных

Во второй методике проводится обработка координат точек, которая заключается в фильтрации и сглаживании значений в измерениях и упорядочивании структуры точек на поверхностях, имеющих достаточно высокие отклонения формы. Рассмотрим подробнее эти две подзадачи обработки. Данные после измерений загружаются в математический пакет, в нашем случае – пакет прикладных программ MATLAB.

Координаты после измерения могут иметь «выпадающие» значения по причине наличия загрязнений на поверхности, неправильного срабатывания датчика и др. На аттестованном измерительном приборе такие значения встречаются редко, например при измерении 160 точек может набраться десять таких значений, величина которых может составить в среднем от 5 до 30 мкм и выше. Для фильтрации таких значений на цилиндрических и плоских поверхностях, так же как для расчета отклонений расположения, сначала необходимо вписать в массив измеренных точек заменяющие элементы: соответственно «цилиндр» и «плоскость», по методу наименьших квадратов.

Для фильтрации использовался метод скользящей средней. Величины после фильтраций численно равны среднему арифметическому значений исходной функции за установленный период и вычисляется по формуле [25]:

$$SMA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i}, \quad (3)$$

где SMA_t – значение скользящего среднего в точке t ;

n – количество значений исходной функции для расчета скользящего среднего (сглаживающий интервал);

p_{t-i} – значение исходной функции в точке $t - i$.

В случае цилиндрических граней производится фильтр величина полярных радиусов, а в случае торцевых граней производится фильтр координат точек вдоль оси, перпендикулярной торцевой грани. Точки с выпадающими значениями выше 5 мкм просто удалялись из массива.

При использовании фильтров для уменьшения влияния или вовсе исключения выбросов возникают дополнительные погрешности. Эти погрешности связаны с тем, что в фильтруемые участки профиля могут искажаться из-за влияния выбросов, расположенных в некоторой близости к этим участкам. Оценка погрешностей, вносимых фильтрами является отдельной сложной задачей и может быть выполнена с использованием метода имитационного моделирования [26]. В ходе метода имитационного моделирования необходимо формировать исходный профиль, принимаемый в качестве действительного, прибавлять к нему случайные выбросы, выполнять его фильтрацию этого профиля с использованием рассматриваемого фильтра и сравнивать получившийся после фильтрации профиль, с профилем, который закладывался в качестве действительного. Погрешность фильтрации зависит от размаха выбросов и дискретности измеряемых точек. Величина погрешностей при фильтрации составляет до 50% от величины случайной погрешности, то есть достигают 1,5 мкм.

Упорядочивание структуры точек заключается в вычислении равномерно распределенных координат точек и вычислении координат точек, не хватающих для построения структуры данных, таким образом, чтобы они образовывали сетку кривых для задания поверхности (1). Вычисление координат точек заключается в формировании сечений поверхностей деталей посредством аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек поверхностей посредством сплайнов.

3.3. Третья методика

Как было описано ранее, в третьей методике после этапа предварительной обработки измеренных данных присутствует этап анализа и обобщения. Для описания отклонения формы подбирается гармонический ряд, при помощи которого можно с достаточной точностью описать дискретный ряд данных отклонения формы, полученный на предыдущих этапах. Выражение используемого гармонического ряда имеет следующий вид:

$$\delta_\phi(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \sin(k \cdot (2 \cdot \pi \cdot x / \tau + \theta_k)) + (1 + (-1)^k) \cdot \pi / 2, \quad (4)$$

где A_k – набор амплитуд членов гармонического ряда; θ_k – фазы членов гармонического ряда; k – частоты членов гармонического ряда; τ – период функции (длина кривой); x – текущая длина кривой, ограниченной начальной и текущей точками (угол).

Для получения параметров ряда использовалось дискретное преобразование Фурье. Кроме анализа отклонения формы, рассчитываются: отклонения радиусов цилиндрических поверхностей; параметры отклонений расположения (углы наклона к координатным осям, сдвиг поверхностей). Параметры отклонения расположения вычисляются исходя из параметров заменяющих элементов «цилиндр» и «плоскость», рассчитываемых по методу наименьших квадратов (МНК) от координат измеренных точек.

Полученные в результате параметры используются для обобщения данных, задания смоделированных по с использованием рассчитанных параметров отклонений точек:

$$\vec{p}_p = (\vec{p}_u + \vec{n} \cdot \delta_\phi) \cdot R + \vec{t}, \quad (5)$$

где \vec{p}_p, \vec{p}_n – вектор координат точек (x, y, z) соответственно измеряемой (моделируемой) и номинальной (CAD) поверхностей; \vec{n} – вектор нормали в точке \vec{p}_n ; δ_ϕ – величина отклонения формы в точке \vec{p}_n ; R, t – матрица поворота и вектор транспонирования координат точки \vec{p}_n , характеризующие отклонение расположения.

Таким образом, в третьей методике координаты измеренных точек сначала «раскладываются» на компоненты, по которым их можно воспроизвести искусственно. Торцевые и плоские грани рассматриваемых в исследовании деталей на этапе четыре в третьей методике являются заметающими [27], их можно получить путём перемещения одной кривой вдоль некоторой направляющей кривой, в пространстве.

4. CAE – расчёт сборки деталей

Реальные модели служат для виртуальной проверки возможности сборки и показателей качества. Виртуальная сборка производится с использованием метода конечных элементов. Создание конечно-элементной модели (КЭМ) и задание граничных условий выполнялось в программном комплексе ANSYS Workbench в модуле «Static Structural».

Используемый модуль не позволяет проводить моделирование с имеющим зазором между деталями. Заданный предварительно натяг в 3D моделях приводит к значительному ухудшению результатов, для устранения названной проблемы выполнялись следующие действия:

- Проводилось генерирование КЭМ сетки с заданной структурой;
- Определялась величина зазора между торцевыми сопрягаемыми поверхностями 3D моделей;
- Производилось перемещение детали в осевом направлении на определенную ранее величину.

Все контакты между сопрягаемыми поверхностями КЭМ использовались с трением «Frictional», с величиной равной 0,15. Зазор между торцевыми поверхностями детали и гайки (головки болта) компенсировались за счёт функции «Adjust to Touch».

Остальные задаваемые параметры в контактных парах общие и необходимы для повышения сходимости задачи и точности расчёта. Алгоритм определения точек контакта на узлы элементов целевой поверхности устанавливалось на «Nodal-Normal To Target», что позволяет точнее определить взаимодействия деталей с действительными гранями.

Следующим этапом является задание ограничений и приложение силовой нагрузки. Для имитации приложения силового воздействия на рассматриваемые детали использовалась упрощённая 3D модель болтового соединения. Осевое усилие в КЭМ болтового соединения моделировалось с задавалась функцией «Bolt Pretension» с заданными этапами нагружения. Фиксации проставки производилось по базовым поверхностям A и B с использованием функции «Fixed Support», которая позволяет исключить перемещения и вращения по всем трём осям.

Для дальнейшего анализа деформированные модели, формируемые для каждого взаимного углового положения, генерируются общая деформация с использованием функции «Total Deformation» и сохраняются формате *.stl.

5. Результаты работы

Эксперимент по сборке выполнялся в следующей последовательности:

1. Измерение контактирующих и контрольных поверхностей деталей;
2. Сборка деталей по нулевым меткам, на специальной оснастке, которая имитирует соединение проставки с диском 3 ступени, вала и имитатора диска 4 ступени;
3. Измерение точек контрольных поверхностей C и D (рисунок 1) относительно баз имитатора вала (специальной оснастки) и выполняется расчет торцевых и радиальных биений;
4. Диск снимается, и поворачивается на 120 градусов относительно нулевых меток и повторяется измерение сборочных параметров.

Этапы 3 и 4 выполняются для трёх угловых положений.

5. Выполняется экспорт данных в виде координат измеренных точек в формате *.txt.

В системе MATLAB осуществлялись этапы 1-3 общей методики на рисунке 1, в системе NX производилось создание реальных моделей (этапы 4-5 методики на рисунке 1), виртуальный расчет сборочных параметров выполнялся в программе ANSYS. В таблице 1 приведены результаты спрогнозированных сборочных параметров с использованием трех различных методик формирования реальных моделей.

Таблица 1. Спрогнозированные сборочные параметры.

	Сборочный параметр, поверхность	Эксперимент, мм	Методика формирования реальных моделей, мм		
			№ 1	№ 2	№ 3
Взаимное угловое положен. деталей, град.	Радиальное биение, С	0.159	0.135	0.100	0.167
	Торцевое биение, D	0.098	0.127	0.127	0.124
	Радиальное биение, С	0.134	0.092	0.147	0.097
	Торцевое биение, D	0.079	0.096	0.098	0.063
	Радиальное биение, С	0.133	0.144	0.151	0.109
	Торцевое биение, D	0.084	0.104	0.103	0.085

Сходимость результатов моделирования с действительными параметрами, полученными в ходе сборки, оценивалось посредством вычисления абсолютных отклонений:

$$\delta_a = P_m - P_{изм}, \quad (6)$$

и относительных отклонений:

$$\delta_{отн} = \delta_a / P_{изм} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где P_m – параметр, вычисленный в результате моделирования; $P_{изм}$ – измеренный параметр.

Анализ методов построения поверхностей с реальной геометрией представлен в таблице 2.

Таблица 2. Анализ методов построения поверхностей с реальной геометрией.

Взаимное угловое положен. деталей, град.	Сборочный параметр, поверхность	Методика формирования реальных моделей					
		№ 1		№ 2		№ 3	
		Отклонение					
		δ_a , мм	$\delta_{отн}$, %	δ_a , мм	$\delta_{отн}$, %	δ_a , мм	$\delta_{отн}$, %
	Радиальное биение, С	-0.024	-15.15	-0.060	-37.56	0.007	4.64
	Торцевое биение, D	0.029	29.14	0.029	29.46	0.026	26.56
	Радиальное биение, С	-0.043	-31.72	0.013	9.62	-0.037	-27.46
	Торцевое биение, D	0.017	21.53	0.019	24.00	-0.016	-20.57
	Радиальное биение, С	0.011	8.00	0.018	13.28	-0.024	-17.91
	Торцевое биение, D	0.020	24.09	0.019	22.48	0.001	1.37

Исходя из результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, минимальные отклонения от результатов экспериментов получаются при использовании 3 методики, более высокие – при использовании 1 и 2 методик. Малое расхождение при прогнозировании торцевого биения при использовании 1 и 2 методик объясняется тем, что измерения точек поверхностей проводились практически в лабораторных условиях, и этап обработки измеренных данных (методика на рисунке 2) мало влияет на точность воспроизведения геометрии. Максимальная величина отклонений при использовании 3 методики составила 27,5%.

Отклонения между прогнозными и измеренными величинами радиального биения во многом объясняется тем, что угловое положение проставки в сборочной единице обеспечивается болтовыми соединениями. Позиционирование отверстий под болтовое соединение составляет 0,02 мм, что существенно повлияло на сборочные параметры в натурном эксперименте. При моделировании процесса сборки положение отверстий оставались номинальными, что привело к высоким расхождениям теоретических и экспериментальных

данных. На рисунках 3 и 4 приведены сравнительные результаты экспериментальных и спрогнозированных результатов сборочных параметров.

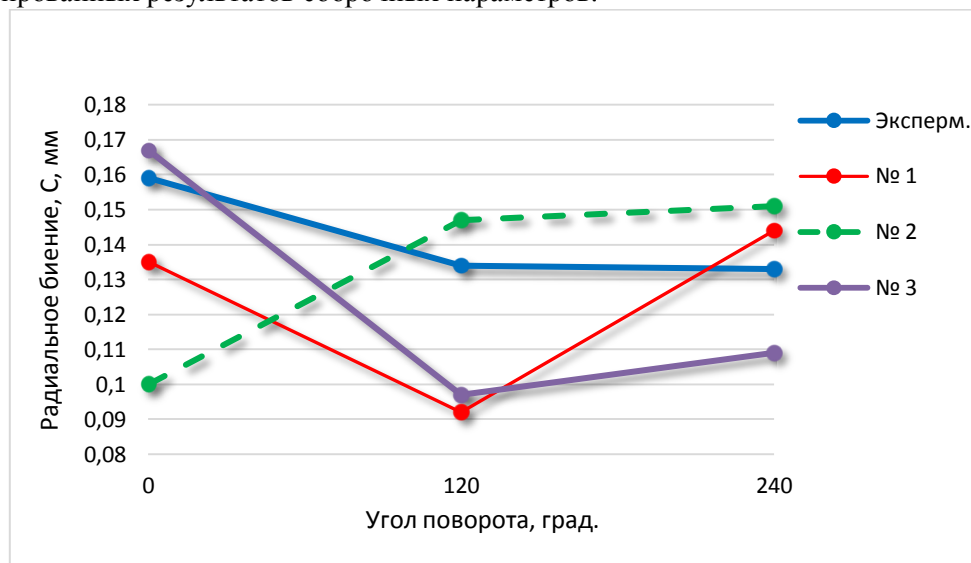


Рисунок 3. Результаты прогнозирования радиального биения поверхности С.

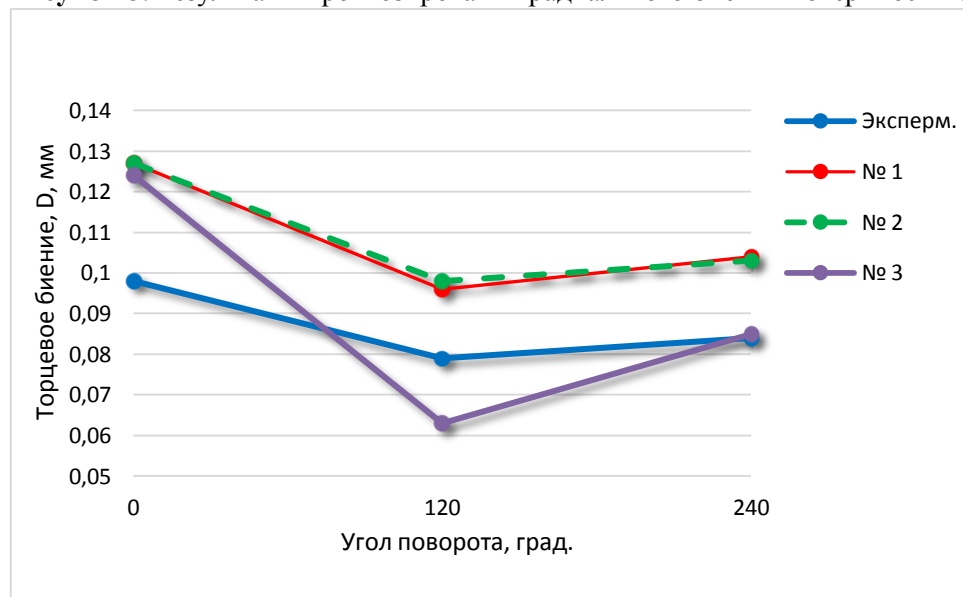


Рисунок 3. Результаты прогнозирования торцевого биения поверхности D.

6. Заключение

В статье приведены результаты исследований влияния способов и моделей представления реальной геометрии на точность прогнозирования сборочных параметров. Рассмотренные методики моделирования реальных поверхностей деталей, позволяют решать задачи размерно-точностного анализа и синтеза при учёте дефектов поверхностей деталей. Полученные результаты прогнозирования сборочных параметров сборки деталей ротора турбины позволяют говорить о применении рассмотренных методик на реальном производстве.

В дальнейшем планируется проведение большего количества экспериментов по сборке и измерению. Перспективным подходом построения реальных моделей для решения задачи цифрового прогнозирования качества изделий выступает третья методика, позволяющая обобщить погрешности партии деталей и тем самым провести моделирования гораздо большей выборки поверхностей, доходящей до 1000 и более случаев. Кроме того, ограниченный набор параметров, характеризующий реальную геометрию, получаемый в процессе реализации

третьей методики, позволяет использовать на основе рассмотренного моделирования сборки и другие методы расчета сборочных параметров (например, машинное обучение) для сокращения трудоемкости.

7. Благодарности

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90263».

8. Литература

- [1] Ameta, G. Comparison of spatial math models for tolerance analysis: Tolerance-maps, deviation domain, and TTRS / G. Ameta, S. Samper, M. Giordano // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2011. – Vol. 11(2). – P. 021004.
- [2] Henke, R. Methods for evaluation of systematic geometric deviations in machined parts and their relationships to process variables / R. Henke, K. Summerhays, J. Baldwin, R. Cassou, C. Brown // *Precision Engineering*. – 1999. – Vol. 23(4). – P. 273-292.
- [3] DiStefano, P. Geometric modelling of mechanical parts affected by shape error / P. DiStefano, L. DiAngelo // *Proceedings of the 8th International Design Conference DESIGN – Dubrovnik, Croatia, 2004*. – P. 157-162.
- [4] Zhang, M. Discrete shape modeling for geometrical product specification: contributions and applications to skin model simulation // *Ecole normale supérieure de Cachan – ENS Cachan, 2011*.
- [5] Hillyard, R. Analysis of dimensions and tolerances in computer-aided mechanical design / R. Hillyard, I. Braid // *Computer-Aided Design*. – 1978. – Vol. 10(3). – P. 161-166.
- [6] Turner, J. Tolerances in computer-aided geometric design / J. Turner, M. Wozny // *The Visual Computer*. – 1987. – Vol. 3(4). – P. 214-226.
- [7] Turner, J. New methods for tolerance analysis in solid modeling // *International Conference on Computer Integrated Manufacturing – Troy, 1988*. – P. 306-314.
- [8] Requicha, A.A.G. Toward a theory of geometric tolerancing // *International Journal of Robotics Research*. – 1983. – Vol. 2(45). – P. 45-60.
- [9] Rossignac, J.R. Offsetting operations in solid modeling / J.R. Rossignac, A.A.G. Requicha // *Computer Aided Geometric Design*. – 1986. – Vol. 3. – P. 129-148.
- [10] Boyer, M. Modeling spaces for toleranced objects / M. Boyer, N. Stewart // *International Journal of Robotics Research*. – 1991. – Vol. 10(5). – P. 570-582.
- [11] Gupta, S. Variational solid modeling for tolerance analysis / S. Gupta, J. Turner // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1993. – Vol. 13(3). – P. 64-74.
- [12] Guilford, J. Advanced tolerance analysis and synthesis for geometric tolerances / J. Guilford, J. Turner // *Proceedings of the International Forum on Dimensional Tolerancing and Metrology, Dearborn, Michigan*. – 1993. – Vol. 27. – P. 187-198.
- [13] Ostrovsky-Berman, Y. Tolerance envelopes of planar mechanical parts with parametric tolerances / Y. Ostrovsky-Berman, L. Joskowicz // *Computer-Aided Design*. – 2005. – Vol. 37(5). – P. 531-544.
- [14] Stoll, T. *Product Lifecycle Management: Geometric Variations* / T. Stoll, S. Wittmann, H. Meerkamm // *Tolerance Analysis with detailed Part Modeling – John Wiley & Sons, Inc., 2010*.
- [15] Kethara Pasupathy, T.M. A survey of mathematical methods for the construction of geometric tolerance zones / T.M. Kethara Pasupathy, E.P. Morse, R.G. Wilhelm // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2003. – Vol. 3(1). – P. 64-75.
- [16] Whitney, D.E. Representation of geometric variations using matrix transforms for statistical tolerance analysis in assemblies / D.E. Whitney, O.L. Gilbert, M. Jastrzebski // *Research in Engineering Design*. – 1994. – Vol. 6(4). – P. 191-210.
- [17] Bourdet, P. Controlling a complex surface with a 3 axis measuring machine / P. Bourdet, A. Clement // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1976. – Vol. 25(1). – P. 359-361.

- [18] Bourdet, P. The concept of the small displacement torsor in metrology / P. Bourdet, L. Mathieu, C. Lartigue, A. Ballu // *Advanced Mathematical Tools in Metrology II*. World Scientific Publishing Company, 1996. – P. 110-122.
- [19] Loose, J.P. Kinematic analysis of dimensional variation propagation for multistage machining processes with general fix-ture layouts / J.P. Loose, S. Zhou, D. Ceglarek // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2007. – Vol. 4(2). – P. 141-152.
- [20] Gao, J. Generalized 3-d tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments / J. Gao, K. Chase, S. Magleby // *IEE Transactions*. – 1998. – Vol. 30(4). – P. 367-377.
- [21] Wittwer, J.W. The direct linearization method applied to position error in kinematic linkages / J.W. Wittwer, K.W. Chase, L.L. Howell // *Mechanism and Machine Theory*. – 2004. – Vol. 39(7). – P. 681-693.
- [22] Dantan, J.Y. Mathematical issues in mechanical tolerance analysis / J.Y. Dantan, N. Gayton, A. Dumas, A. Etienne, A.J. Qureshi // *Proceedings of the 13th Colloque National AIP PRIMECA – Le Mont Dore*, 2012,
- [23] Rogers, D.F. *Mathematical Elements for Computer Graphics* / D.F. Rogers, J.A. Adams – New York, London: McGrawHill, 1990. – 604 p.
- [24] Печенин, В.А. Разработка действительных моделей объектов для условий цифрового производства / В.А. Печенин, И.А. Грачев, Н.В. Рузанов, М.А. Болотов // *Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*. – 2019. – Ч 1. – С. 197-199.
- [25] Грешилов, А.А. Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
- [26] Болотов, М.А. Моделирование процесса измерения пера лопатки компрессора ГТД, контролируемой на ким, при базировании по хвостовику трапециевидной формы // М.А. Болотов, В.А. Печенин, А.О. Чевелева // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 177-181.
- [27] Болотов М.А. Нейросетевая модель в цифровом прогнозировании геометрических параметров относительного положения деталей авиационных двигателей / М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, Д.М. Балякин // *Сборник трудов V международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ)*. – Самара: Новая техника, 2019. – Т. 4. – С. 608-616.

Comparative analysis of simulation options for the real geometry of the surfaces of gas turbine engine parts

I.A. Grachev¹, M.A. Bolotov¹, V.A. Pechenin¹, E.V. Kudashov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Geometric deviations of parts surfaces inevitably occur during parts manufacture. It is known that the accumulated defects of parts surfaces and assembly units throughout the entire product life cycle impact on their functional characteristics. Often, assembly simulation and dimensional ties analysis of products is performed by using the nominal geometry of parts without taking into account geometric deviations of the shape and location of parts surfaces. The accuracy of dimensional analysis without taking into account geometric deviations of the shape and location of parts surfaces is not sufficient to solve technological problems in digital production. The purpose of this article is to study the influence of methods and models for building the real geometry on the accuracy of its reproduction. The subject of research is the assembly unit of the rotor of a low-pressure turbine of an aircraft engine. Three techniques for building the real geometry, which are used to realize assembly virtual simulation, are considered. Comparative results of assembly simulation with the use of considered techniques of real geometry building are presented, and their influence on the controlled assembly parameters is estimated.