

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ ШЕСТЕРНЕЙ

А. С. Серков, В. В. Деркач, С. В. Михайленко, Л. Б. Серкова

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В работе экспериментально исследовано возникновение технологических упругих деформаций центральных отверстий шестерней малой технологической жесткости (нежестких шестерней), вызванных вследствие их закрепления в трехкулачковых самоцентрирующих патронах. Выполнено экспериментальное сравнение схемы закрепления за эвольвенту со схемой закрепления за наружный диаметр. Построены графики искажения формы отверстия от круглости в зависимости от момента затяжки прилагаемого к рукоятке динамометрического ключа. При помощи метода наименьших квадратов подтверждена предполагаемая линейная зависимость графиков искажения формы отверстия от круглости в зависимости от момента затяжки прилагаемого к рукоятке динамометрического ключа. Выполнены сравнения результатов, полученных при помощи эксперимента с результатами, полученными ранее при помощи компьютерного моделирования; подтверждена адекватность компьютерных моделей и достоверность полученных экспериментальных результатов. Экспериментально установлено, что при закреплении за эвольвенту возникает в среднем на 30,23 % меньше величина искажения формы отверстия от круглости по отношению к схеме закрепления за наружный диаметр. Данные результаты доказывают, что схема закрепления за эвольвенту шестерней малой технологической жесткости является наилучшей с точки зрения наименьшего искажения формы отверстий от круглости в сравнении со схемой закрепления за наружный диаметр.

Научная новизна заключается в исследовании влияния сил закрепления на искажение формы отверстия шестерни малой технологической жесткости при закреплении ее за наружный диаметр и за эвольвенту в трехкулачковом самоцентрирующем патроне. Полученные в результате исследований данные позволят научно обоснованно назначать параметры зажимных устройств при изготовлении шестерней малой технологической жесткости, используемых в летательных аппаратах.

Ключевые слова: технологические упругие деформации, шестерни, зубчатые колеса, сателлиты, малая технологическая жесткость, технологическая наследственность, искажение формы от круглости, погрешность закрепления.

Введение

Шестерни малой технологической жёсткости в летательных аппаратах обычно находятся в местах, где требуется передача вращения между различными частями механизма. Также они могут применяться в гидравлических системах для передачи давления жидкости от насоса к исполнительным механизмам. В системах, отвечающих за газораспределение шестерни малой технологической жёсткости, могут применяться для передачи вращательного движения от приводного вала к распределительному валу, который открывает и закрывает клапаны двигателя, потому что требуется точная синхронизация работы клапанов для обеспечения оптимального сгорания топлива, а также для эффективности работы двигателя. Поэтому точность синхронизации работы клапанов зависит от качества и точности изготовления шестерней малой технологической жёсткости.

Также шестерни малой технологической жёсткости широко используются в системах управления самолётами, а именно:

1. В механизмах управления полётом. Применение таких шестерней в механизмах управления полётом позволяет обеспечить плавность хода и уменьшить нагрузку на систему управления.

2. В элеронах и закрылках. Применение таких шестерней в элеронах и закрылках обеспечивают высокую точность и надёжность работы этих элементов.

3. В приводах вспомогательного оборудования. Применение данных шестерней в приводах вспомогательного оборудования, таких как насосы гидравлических систем, генераторы электроэнергии и другие агрегаты, позволяет снизить вибрации и повысить надёжность работы механизмов.

4. В шасси самолёта. Применение их в шасси самолёта, а именно в системе выпуска и уборки шасси обеспечивает высокую точность и надёжность движения компонентов шасси при их складывании и раскладывании.

5. В топливных системах. Применение их в топливных системах, а именно в топливных насосах и других элементах топливной системы обеспечивает точное дозирование топлива и минимизирует износ компонентов системы.

Таким образом, шестерни малой технологической жёсткости находят широкое применение в летательных аппаратах благодаря своей способности снижать нагрузки, уменьшать вибрации и обеспечивать точную работу и надёжность различных систем самолёта.

В процессе изготовления шестерней малой технологической жёсткости существует сложность, а именно во время механической обработки технологические упругие деформации оказывают прямое влияние на возникновение погрешности закрепления, от значения которой зависит точность и качество их изготовления. Именно поэтому исследование и разработка методов, способов, приёмов, направленных на минимизацию погрешности закрепления, являются важным направлением исследований в области изготовления деталей малой технологической жёсткости летательных аппаратов.

Кроме того, учитывая нынешние тенденции к снижению веса летательных аппаратов и повышению их эффективности, использование тонкостенных деталей, имеющих малую массу и малую технологическую жёсткость, становятся всё более распространёнными. Однако это также повышает требования к качеству и точности механической обработки шестерней малой технологической жёсткости.

Также стоит сказать, о том, что погрешности изготовления шестерней при их эксплуатации приводят к повышению динамических нагрузок, вибрации, шуму в агрегатах; в результате такие механизмы преждевременно выходят из строя [1]. Исходя из этого можно сделать вывод: чем выше точность изготовления шестерней, тем выше степень надёжности систем летательных аппаратов.

В данной научной работе подробно не будет рассматриваться проблема обеспечения точности и качества изготовления шестерней малой технологической жёсткости, т. к. более подробно её можно изучить в работах [2–19].

В работах [20–23] на оптических моделях методом фотомеханики исследуется напряженно-деформированное состояние шестерней малой технологической жёсткости, у которых на этапе финишной механической обработки искажена форма центрального отверстия от круглости, вследствие действия технологических упругих деформаций, вызванных силой закрепления от кулачков самоцентрирующего патрона. По этой причине при посадке с натягом такой шестерни с искажённой формой отверстия от круглости на базовую деталь возникает неравномерное давление на контуре её отверстия, вследствие чего возникает предварительное неравномерное напряженно-деформированное состояние в переходных галтелях между её зубьями, что снижает ресурс её по изгибным напряжениям. Поэтому при изготовлении подобных деталей есть смысл рассчитывать технологические упругие деформации, что даст возможность прогнозировать погрешности закрепления для нахождения оптимального решения по её уменьшению.

Далее приведены результаты исследований двух схем закрепления шестерней малой технологической жёсткости, а именно: 1) закрепление за наружный диаметр; 2) закрепление за эвольвенту через установочные калиброванные ролики.

Вторая схема закрепления наиболее оптимальна с точки зрения размерного анализа, так как обеспечивается короткая размерная цепь между центральным отверстием и делительной окружностью

[16, с. 59], [18, с. 235], [24–27]. В работах [28–33] были выполнены исследования напряженно-деформированного состояния шестерней малой технологической жёсткости, в результате сделан вывод о том, что при закреплении за эвольвенту возникает гораздо меньше напряжений, чем при закреплении за наружный диаметр. В работе [34] при помощи компьютерного моделирования выполнены исследования искажения формы отверстий от круглости шестерней малой технологической жёсткости, в результате сделан вывод о том, что при закреплении шестерней за эвольвенту в трехкулачковом самоцентрирующем патроне искажение формы отверстий от круглости в среднем на 30,72 % меньше, чем при закреплении их за наружный диаметр. Для подтверждения адекватности компьютерной модели и проверки достоверности полученных экспериментальных результатов необходимо выполнить проверку полученного среднего значения.

Таким образом, данная тема исследования технологических упругих деформаций отверстий шестерней малой технологической жёсткости при закреплении их в патроне остаётся актуальной и имеет большое практическое значение для развития технологий производства и конструкций летательных аппаратов.

Цель исследования — выявление наилучшей схемы закрепления шестерней малой технологической жёсткости в трехкулачковом самоцентрирующем патроне с точки зрения наименьшего искажения формы их отверстий, вызванного моментом затяжки на рукоятке динамометрического ключа (силой закрепления) для обеспечения или повышения точности их изготовления.

Задачи

Для достижения поставленной цели исследования необходимо выполнить экспериментальное исследование технологических упругих деформаций отверстия шестерни при закреплении её в трехкулачковом самоцентрирующем патроне за наружный диаметр и за эвольвенту. Также для полноты исследования необходимо построить графики зависимости искажения формы отверстия от круглости в зависимости от прилагаемого момента затяжки к рукоятке динамометрического ключа для обеих схем закрепления, выполнить статистическую обработку полученных результатов эксперимента, сравнить полученные искажения формы отверстия от круглости при закреплении шестерни за эвольвенту с закреплением за наружный диаметр, сравнить ранее полученные результаты компьютерного моделирования с экспериментальными результатами данной научной работы, дать рекомендации по минимизации искажения формы отверстия от круглости (погрешности закрепления) центральных отверстий шестерней малой технологической жёсткости для случая применения трехкулачковых самоцентрирующих патронов.

Основная часть

Далее будут представлены оснащения, порядок проведения эксперимента и экспериментальные результаты определенного искажения формы отверстия от круглости шестерни малой технологической жёсткости, закрепленной в трехкулачковом самоцентрирующем патроне в стандартных закалённых кулачках. В работе представлены исследо-

вания шестерни малой технологической жёсткости одного типоразмера и одного материала, потому что для выявления наилучшей схемы закрепления шестерни в трехкулачковом самоцентрирующем патроне этого вполне достаточно, т. к. относительно малая прикладываемая сила закрепления не будет вызывать пластических деформаций, т. е. шестерня будет испытывать только упругие деформации, что говорит о линейности задачи, которая подчиняется закону Гука. Также можно привести принцип подобия, который гласит, что если две системы геометрически подобны друг другу, а именно для шестерней малой технологической жёсткости это правило должно выполняться, то их механические характеристики также будут пропорциональными. Это означает, что при изменении размеров технологической системы (например, увеличение всех линейных и диаметральных размеров в два раза), напряжения и упругие деформации останутся неизменными, но с условием, что сила должна тоже изменяться пропорционально размерам, это можно доказать из следующих формул:

$$\sigma = \frac{2F}{2S}, \rightarrow \sigma = \frac{F}{S},$$

где σ — нормальное напряжение, МПа; F — сила, Н; S — площадь поперечного сечения, мм. Закон Гука утверждает, что напряжение прямо пропорционально деформации, это выражается следующей формулой:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где E — модуль Юнга, МПа; ε — относительное удлинение. Далее можно вывести формулу:

$$\frac{F}{S} = E \cdot \varepsilon,$$

$$\varepsilon = \frac{F}{S \cdot E}.$$

Если применить принцип подобия, т. е. взять две одинаковые технологические системы и далее во второй увеличить все линейные, диаметральные размеры и прикладываемую силу в два раза, то выражения будут выглядеть следующим образом:

$$\varepsilon_1 = \frac{F}{S \cdot E},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{2F}{2S \cdot E}, \rightarrow \varepsilon_2 = \frac{F}{S \cdot E},$$

тогда

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2.$$

Получается, что для выявления наилучшей схемы закрепления шестерней малой технологической жёсткости с точки зрения наименьшего искажения формы их отверстий при закреплении в трехкулачковых самоцентрирующих патронах нет необходимости в данном случае исследовать шестерни других типоразмеров, достаточно исследовать только одну шестерню малой технологической жёсткости одного типоразмера и одного материала.

Стоит отметить, что в данной работе рассматриваются только те случаи, когда силы закрепления

действует на шестерни на равном угловом расстоянии друг от друга, в данном случае это расстояние равно 120 градусам, другими словами, полученные результаты исследования будут справедливы только для тех случаев, где силы закрепления шестерней действуют на равном расстоянии друг от друга, которое зависит от количества зубьев, в противном случае можно будет говорить только о качественной оценке, а не о количественной, так как явно при изменении количества зубьев будет меняться эпюра напряжений, соответственно и искажение формы отверстия от круглости будет другим, но эта тема уже другого научного исследования.

В работе было принято предельное значение затяжки динамометрическим ключом, равным $M_{s315} = 42,5$ Н·м. Это объясняется тем, что при превышении данного значения была вероятность того, что шестерня могла начать испытывать пластические деформации, которые перестали бы подчиняться закону Гука. В этом случае задача перестала бы быть линейной, соответственно, было бы невозможно выполнить количественную оценку искажения формы отверстия от круглости, так как шестерня одна, а схемы закрепления две, в результате пластические деформации внесли бы неясность в количественную оценку. Также при производстве таких деталей пластические деформации совсем недопустимы, это считается браком.

Шестерня малой технологической жёсткости изготовлена по геометрическим параметрам и марке материала, представленным в работах [34, 35]. Компьютерная модель шестерни малой технологической жёсткости из работы [34] является цифровым двойником исследуемой шестерни данной работы, поэтому это даёт полное право сравнивать полученные результаты компьютерного исследования [34] с результатами, полученными лабораторным экспериментом.

Оснащение эксперимента:

1. Динамометрический ключ TA-B0060-12 производителя Automotive Equipment & Tools с рабочим моментом затяжки $M_{s31} = 10...60$ Н·м.
2. Трехкулачковый самоцентрирующий патрон 7100-0002П [36] производителя GRIFF.
3. Комплект из 3-х обратных закалённых кулачков (фактическое среднее арифметическое значение твёрдости по методу Роквелла — 57,22 HRCэ) к патрону 7100-0002П [36] (производитель FUERDA).
4. Координатно-измерительная машина ручная Mitutoyo Crysta Plus M443.
5. Шестерня изготовлена из стали 38ХС [37] (фактическое среднее арифметическое значение твёрдости по методу Роквелла — 38,17 HRCэ).
6. Комплект из 3-х установочных калиброванных роликов, изготовленных из стали ШХ15 [38] (фактическое среднее арифметическое значение твёрдости по методу Роквелла — 61,78 HRCэ).

В эксперименте шестерня малой технологической жёсткости закреплялась в трехкулачковом самоцентрирующем патроне за наружный диаметр (рис. 1а) и за эвольвенту через установочные калиброванные ролики (рис. 1б), диаметр которых рассчитывался по методу, описанному в работе [39]. Также диаметр установочных калиброванных роликов можно рассчитать при помощи программы для ЭВМ [40].

Для удобства закрепления и наглядности измерения места прогиба u_{As3i}° раскрашены белым цветом (под кулачками), а места выгибания u_{Bs3i}° (между кулачками) — зелёным цветом (цифра 3 в индексе



Рис. 1. Закрепление шестерни:
а) за наружный диаметр; б) за эвольвенту
Fig. 1. Fixing a gear: a) by external diameter;
б) by involute

обозначает количество кулачков самоцентрирующего патрона; индекс s обозначает схему закрепления, при закреплении за наружный диаметр $s = 1$, при закреплении за эвольвенту $s = 2$.

Для выполнения эксперимента использовалась координатно-измерительная машина ручная Mitutoyo Crysta Plus M443, на столе которой располагался трехкулачковый самоцентрирующий патрон 7100-0002П [36] с закреплённой в нём шестерней малой технологической жёсткости. Закрепление шестерни малой технологической жёсткости в трехкулачковом самоцентрирующем патроне осуществлялось при помощи динамометрического ключа ТА-В0060-12.

При помощи шупа, оснащённого наконечником сферической формы, выполненным из рубина, происходит измерение прогиба y_{As3i}^{ϑ} контура отверстия шестерни в местах приложения сил закрепления (под кулачками, белый цвет), а выгибание y_{Bs3i}^{ϑ} измеряется в сечении шестерни, расположенном посередине между кулачками (зелёный цвет).

Погрешность измерений координатно-измерительной машины Mitutoyo Crysta Plus M443, согласно техническому паспорту, может составлять не более 0,004 мм. Согласно сертификату калибровки динамометрического ключа ТА-В0060-12, погрешность момента затяжки при работе по часовой стрелке не превышает 2,4 %.

Порядок проведения эксперимента при закреплении шестерни малой технологической жёсткости за наружный диаметр (рис. 1а) был следующим:

1. Шестерня без усилия (кулачки патрона доводились до касания с наружным диаметром шестерни $M_{s3i} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$) центрировалась в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 7100-0002П [36] и далее, в соответствии с 1 из (табл. 1), три раза измерялось отклонение формы отверстия шестерни $\Delta d_{13i}^{\vartheta}$, полученные результаты записывались в табл. 1.

2. При помощи динамометрического ключа ТА-В0060-12 производилось закрепление исследуемой шестерни малой технологической жёсткости в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 7100-0002П [36], при этом на рукоятке динамометрического ключа ТА-В0060-12 прилагался момент затяжки M_{s3i} соответствующий заданному из табл. 1.

3. Производились измерения технологических упругих деформаций отверстия шестерни напротив каждого из трёх кулачков (прогибы y_{A13i}^{ϑ}), а также по середине между ними (выгибания y_{B13i}^{ϑ}). На экране ЭВМ, подключённой к координатно-измерительной машине Mitutoyo Crysta Plus M443, выводились значения искажения формы отверстия $\Delta d_{13i}^{\vartheta}$. Данные измерения в соответствии с 1 из табл. 1 проводились три раза, результаты измерений искажения формы отверстия $\Delta d_{13i}^{\vartheta}$ заносились в табл. 1.

4. Пункты 2 и 3 повторялись для всех заданных моментов затяжки M_{s3i} из табл. 1.

5. Все полученные результаты эксперимента заносились в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента при закреплении шестерни малой технологической жёсткости за наружный диаметр

Table 1. Experimental results for fixing a gear of small technological stiffness by the external diameter

Схема закрепления	l, шт.	i	M_{s3i} , Н·м	$\Delta d_{13i}^{\vartheta}$, мм			$\Delta d_{13i}^{\vartheta}$	$\Delta d_{13i}^{\vartheta}$	$\Delta r_{13i}^{\vartheta}$
				Количество повторных измерений l					
				1	2	3			
За наружный диаметр	3	1	0	0,003	0,003	0,004	0,0033	0,0000	0,0017
		2	10,0	0,024	0,025	0,024	0,0243	0,0210	0,0105
		3	12,5	0,027	0,027	0,028	0,0273	0,0240	0,0120
		4	15,0	0,030	0,031	0,030	0,0303	0,0270	0,0135
		5	17,5	0,033	0,034	0,034	0,0337	0,0303	0,0152
		6	20,0	0,036	0,037	0,036	0,0363	0,0330	0,0165
		7	22,5	0,040	0,039	0,039	0,0393	0,0360	0,0180
		8	25,0	0,043	0,042	0,042	0,0423	0,0390	0,0195
		9	27,5	0,046	0,045	0,045	0,0453	0,0420	0,0210
		10	30,0	0,049	0,048	0,049	0,0487	0,0453	0,0227
		11	32,5	0,052	0,053	0,052	0,0523	0,0490	0,0245
		12	35,0	0,055	0,054	0,055	0,0547	0,0513	0,0257
		13	37,5	0,059	0,058	0,059	0,0587	0,0553	0,0277
		14	40,0	0,062	0,061	0,061	0,0613	0,0580	0,0290
		15	42,5	0,065	0,065	0,066	0,0653	0,0620	0,0310
		16	0,0	0,004	0,003	0,003	0,0033	0,0000	0,0017

6. Шестерня раскреплялась из трехкулачкового самоцентрирующего патрона 7100-0002П [36].

Средние арифметические значения измеренных искажений формы отверстия шестерни малой технологической жёсткости рассчитывались по формуле:

$$\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{13i1}^{\mathcal{E}} + \Delta d_{13i2}^{\mathcal{E}} + \Delta d_{13i3}^{\mathcal{E}}}{l}$$

Перед п. 6 порядка проведения эксперимента измерялись остаточные пластические деформации контура отверстия шестерни, сцентрированной без усилия ($M_{s316} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$) в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 7100-0002П [36], в результате сделан вывод, что остаточных пластических деформаций не возникло, т. к. $\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}} = \Delta d_{13i6}^{\mathcal{E}} = 0,0040 \text{ мм}$.

Далее определялись искажения формы отверстия шестерни с учётом отклонения формы отверстия $\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}}$ по формуле:

$$\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}} = \Delta d_{13i}^{\mathcal{E}} - \Delta d_{13i}^{\mathcal{E}}$$

Отклонение формы отверстия шестерни $\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}}$ и $\Delta d_{13i6}^{\mathcal{E}}$ ($M_{s316} = M_{s316} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$) необходимо преобразовать в искажение формы отверстия от круглости по формуле:

$$\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}}}{2},$$

$$\Delta r_{13i6}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{13i6}^{\mathcal{E}}}{2}.$$

Далее необходимо преобразовать искажение формы отверстия шестерни $\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}}$ в искажение формы отверстия от круглости по формуле:

$$\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{13i}^{\mathcal{E}}}{2}.$$

Измеренные и рассчитанные результаты занесены в табл. 1.

Порядок проведения эксперимента при закреплении шестерни малой технологической жёсткости за эвольвенту через установочные калиброванные ролики (рис. 16) был следующим:

1. Шестерня без усилия (кулачки патрона доводились до касания с установочными калиброванными роликами, установленными между зубьями шестерни $M_{s31} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$) центрировалась в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 7100-0002П [36] и далее, в соответствии с l из табл. 2, три раза измерялось отклонение формы отверстия шестерни $\Delta d_{13i1}^{\mathcal{E}}$, полученные результаты записывались в табл. 2.

2. При помощи динамометрического ключа ТА-В0060-12 производилось закрепление исследуемой шестерни малой технологической жёсткости в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 7100-0002П [36], при этом на рукоятке динамометрического ключа ТА-В0060-12 прилагался момент затяжки $M_{s3i'}$ соответствующий заданному из табл. 2.

3. Производились измерения технологических упругих деформаций отверстия шестерни напротив каждого из трёх кулачков (прогибы $u_{A23i}^{\mathcal{E}}$), а также по середине между ними (выгибания $u_{B23i}^{\mathcal{E}}$). На экране ЭВМ, подключённой к координатно-измерительной машине Mitutoyo Crysta Plus M443, выводились значения искажения формы отверстия $\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}$. Данные измерения в соответствии с l из табл. 2 производились три раза, результаты измерений искажения формы отверстия $\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}$ заносились в табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента при закреплении шестерни малой технологической жёсткости за эвольвенту через установочные калиброванные ролики

Table 2. Experimental results for fixing a gear of low technological stiffness by the involute through setting calibrated rollers

Схема закрепления	n, шт.	i	M _{s3i'} , Н·м	Δd _{23i1} ^Э , мм			Δd _{23i} ^Э	Δd _{23i} ^Э	Δr _{23i} ^Э
				Количество повторных экспериментов l					
				1	2	3			
За эвольвенту	3	1	0,0	0,003	0,004	0,003	0,0033	0,0000	0,0017
		2	10,0	0,018	0,019	0,018	0,0183	0,0150	0,0075
		3	12,5	0,020	0,020	0,021	0,0203	0,0170	0,0085
		4	15,0	0,022	0,023	0,023	0,0227	0,0193	0,0097
		5	17,5	0,025	0,024	0,025	0,0247	0,0213	0,0107
		6	20,0	0,027	0,027	0,026	0,0267	0,0233	0,0117
		7	22,5	0,029	0,028	0,029	0,0287	0,0253	0,0127
		8	25,0	0,031	0,030	0,031	0,0307	0,0273	0,0137
		9	27,5	0,033	0,032	0,033	0,0327	0,0293	0,0147
		10	30,0	0,034	0,035	0,034	0,0343	0,0310	0,0155
		11	32,5	0,037	0,037	0,036	0,0367	0,0333	0,0167
		12	35,0	0,039	0,038	0,039	0,0387	0,0353	0,0177
		13	37,5	0,041	0,042	0,041	0,0413	0,0380	0,0190
		14	40,0	0,043	0,044	0,043	0,0433	0,0400	0,0200
		15	42,5	0,045	0,045	0,046	0,0453	0,0420	0,0210
		16	0,0	0,003	0,003	0,004	0,0033	0,0000	0,0017

4. Пункты 2 и 3 повторялись для всех заданных моментов затяжки M_{s3i} из табл. 2.

5. Все полученные результаты эксперимента $\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}$ заносились в табл. 2.

6. Шестерня раскреплялась из трехкулачкового самоцентрирующего патрона 7100-0002П [36].

Средние арифметические значения измеренных искажений формы отверстия шестерни малой технологической жёсткости рассчитывались по формуле:

$$\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{23i1}^{\mathcal{E}} + \Delta d_{23i2}^{\mathcal{E}} + \Delta d_{23i3}^{\mathcal{E}}}{3}$$

Перед п. 6 порядка проведения эксперимента измерялись остаточные пластические деформации контура отверстия шестерни, сцентрированной с моментом затяжки $M_{s316} = 0$ Н·м в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 7100-0002П [36]; в результате сделан вывод, что остаточных пластических деформаций не возникло, т. к. $\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}} = \Delta d_{23i6}^{\mathcal{E}} = 0,0040$ мм.

Далее определялись искажения формы отверстия шестерни с учётом отклонения формы отверстия $\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}$ по формуле:

$$\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}} = \Delta d_{23i}^{\mathcal{E}} - \Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}$$

Отклонение формы отверстия шестерни $\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}$ и $\Delta d_{23i6}^{\mathcal{E}}$ ($M_{s31} = M_{s316} = 0$ Н·м) необходимо преобразовать в искажение формы отверстия от круглости по формулам:

$$\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}}{2}$$

$$\Delta r_{23i6}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{23i6}^{\mathcal{E}}}{2}$$

Далее необходимо преобразовать искажение формы отверстия шестерни $\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}$ в искажение формы отверстия от круглости по формуле:

$$\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta d_{23i}^{\mathcal{E}}}{2}$$

Измеренные и рассчитанные результаты занесены в табл. 2.

На рис. 2 и рис. 3 представлены графики зависимости искажений формы отверстия от круглости $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ в зависимости от момента затяжки M_{s3i} динамометрическим ключом ТА-В0060-12 при $i = 2...15$.

Исходя из полученных графиков (рис. 2 и рис. 3), можно предположить, что полученные кривые зависимости искажений формы отверстия от круглости $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ в зависимости от момента затяжки M_{s3i} динамометрическим ключом ТА-В0060-12 для обеих схем закрепления в трехкулачковом самоцентрирующем патроне имеют линейную зависимость.

После проведения экспериментов кулачки шестерни и установочные калиброванные ролики были визуально осмотрены на отсутствие смятий в местах контакта их друг с другом в момент закрепления. В результате смятий не было выявлено.

Далее для обработки полученных экспериментальных результатов использовался статистический метод обработки результатов — метод наименьших квадратов [41–45], в итоге были получены уравнения функций кривых искажения формы

За наружный диаметр

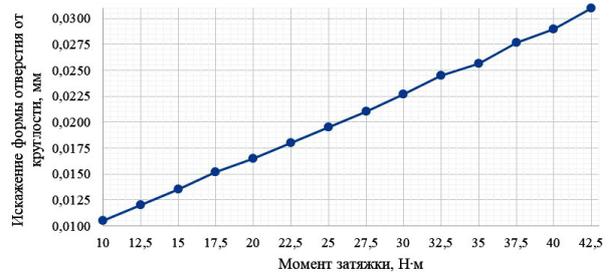


Рис. 2. График зависимости искажений формы отверстия от круглости $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ в зависимости от момента затяжки M_{s3i} (закрепление за наружный диаметр)
Fig. 2. Dependence diagram of hole shape distortion from $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ roundness as a function of tightening torque M_{s3i} (fixing by external diameter)

За эвольвентный профиль

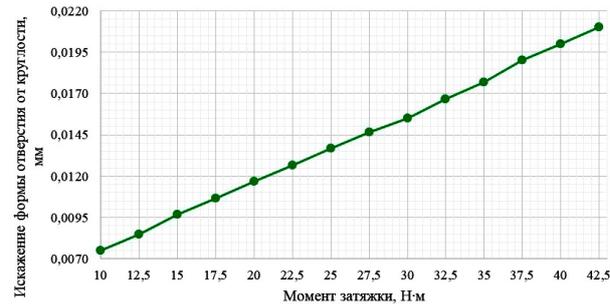


Рис. 3. График зависимости искажений формы отверстия от круглости $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ в зависимости от момента затяжки M_{s3i} (закрепление за эвольвентный профиль)
Fig. 3. Dependence diagram of hole shape distortion from $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ roundness as a function of tightening torque M_{s3i} (fixing by involute)

отверстия от круглости y_{s3i}''' шестерни малой технологической жёсткости в зависимости от момента затяжки x_{Ms3i} динамометрическим ключом ТА-В0060-12. Расчёты и обработка результатов эксперимента методом наименьших квадратов не представлены в данной работе, т. к. это значительно увеличило бы её объём, поэтому ниже будут представлены только полученные уравнения функций кривых искажения формы отверстия от круглости y_{s3i}''' .

Уравнение функции кривой искажения формы отверстия от круглости y_{13i}''' шестерни малой технологической жёсткости в зависимости от момента затяжки x_{Ms3i} динамометрическим ключом ТА-В0060-12 (закрепление за наружный диаметр):

$$y_{13i}''' = 0,00062452 7473 \cdot x_{Ms3i} + 0,00409186 8132$$

Уравнение функции кривой искажения формы отверстия от круглости y_{23i}''' шестерни малой технологической жёсткости в зависимости от момента затяжки x_{Ms3i} динамометрическим ключом ТА-В0060-12 (закрепление за эвольвенту):

$$y_{23i}''' = 0,00041239 5604 \cdot x_{Ms3i} + 0,00339604 3956$$

Далее необходимо выполнить проверку правильности полученных уравнений функций y_{s3i}''' , для этого необходимо в них подставить значения x_{Ms3i} и выполнить расчёт.

Далее экспериментальные результаты $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ необходимо сравнить со статистическими результатами y_{s3i}^m по формуле:

$$\partial r_{s3i}^{\mathcal{E}} = \left| \frac{\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}} - y_{s3i}^m}{\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}} \right| \cdot 100 \%$$

Сравнение экспериментальных результатов $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ со статистическими результатами y_{s3i}^m представлено в табл. 3 и табл. 4.

Сравнение экспериментальных результатов $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ со статистическими результатами y_{s3i}^m не превышают 1,94 %, следовательно, полученные экспериментальным методом значения искажения формы

Таблица 3. Сравнение экспериментальных результатов $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ со статистическими результатами y_{13i}^m (закрепление за наружный диаметр)
Table 3. Comparison of the $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$ experimental results with the y_{13i}^m statistical results (fixing by external diameter)

n , шт.	i	$M_{s3i} = \frac{H \cdot M}{x_{M s3i}}$	Результаты, полученные экспериментальным методом $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$, мм	Результаты, полученные методом наименьших квадратов y_{13i}^m , мм	Сравнение экспериментальных результатов со статистическими $\partial r_{13i}^{\mathcal{E}}$, %
3	2	10	0,0105	0,0103	1,94 %
	3	12,5	0,0120	0,0119	0,84 %
	4	15	0,0135	0,0135	0,00 %
	5	17,5	0,0152	0,0150	1,11 %
	6	20	0,0165	0,0166	-0,60 %
	7	22,5	0,0180	0,0181	-0,55 %
	8	25	0,0195	0,0197	-1,02 %
	9	27,5	0,0210	0,0213	-1,41 %
	10	30	0,0227	0,0228	-0,58 %
	11	32,5	0,0245	0,0244	0,41 %
	12	35	0,0257	0,0260	-1,28 %
	13	37,5	0,0277	0,0275	0,61 %
	14	40	0,0290	0,0291	-0,34 %
	15	42,5	0,0310	0,0306	1,31 %

Таблица 4. Сравнение экспериментальных результатов $\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}$ со статистическими результатами y_{23i}^m (закрепление за эвольвенту)
Table 4. Comparison of the $\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}$ experimental results with the y_{23i}^m statistical results (fixing by involute)

n , шт.	i	$M_{s3i} = \frac{H \cdot M}{x_{M s3i}}$	Результаты, полученные экспериментальным методом $\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}$, мм	Результаты, полученные методом наименьших квадратов y_{23i}^m , мм	Сравнение экспериментальных результатов со статистическими $\partial r_{23i}^{\mathcal{E}}$, %
3	2	10	0,0075	0,0075	0,00 %
	3	12,5	0,0085	0,0086	-1,16 %
	4	15	0,0097	0,0096	0,69 %
	5	17,5	0,0107	0,0106	0,63 %
	6	20	0,0117	0,0116	0,57 %
	7	22,5	0,0127	0,0127	-0,26 %
	8	25	0,0137	0,0137	-0,24 %
	9	27,5	0,0147	0,0147	-0,23 %
	10	30	0,0155	0,0158	-1,90 %
	11	32,5	0,0167	0,0168	-0,79 %
	12	35	0,0177	0,0178	-0,75 %
	13	37,5	0,0190	0,0189	0,53 %
	14	40	0,0200	0,0199	0,50 %
	15	42,5	0,0210	0,0209	0,48 %

Таблица 5. Сравнение экспериментальных результатов значений искажения формы отверстия от круглости $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ шестерни малой технологической жёсткости в зависимости от схемы закрепления
 Table 5. Comparison of experimental results of distortion values of bore shape from roundness of the $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ gear of small technological stiffness according to the fixing scheme

n , шт	i	$M_{s3i} = x_{Ms3i}$ Н·м	$\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$, мм	$\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}$, мм	$\Delta r_{\Delta s3i}^{\mathcal{E}}$, %
3	2	10	0,0105	0,0075	28,57%
	3	12,5	0,0120	0,0085	29,17%
	4	15	0,0135	0,0097	28,15%
	5	17,5	0,0152	0,0107	29,61%
	6	20	0,0165	0,0117	29,09%
	7	22,5	0,0180	0,0127	29,44%
	8	25	0,0195	0,0137	29,74%
	9	27,5	0,0210	0,0147	30,00%
	10	30	0,0227	0,0155	31,72%
	11	32,5	0,0245	0,0167	31,84%
	12	35	0,0257	0,0177	31,13%
	13	37,5	0,0277	0,0190	31,41%
	14	40	0,0290	0,0200	31,03%
	15	42,5	0,0310	0,0210	32,26%

отверстия от круглости $\delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ в зависимости от момента затяжки M_{s3i} динамометрическим ключом ТА-В0060-12 для обеих схем закрепления в трехкулачковом самоцентрирующем патроне имеют линейную зависимость.

Далее необходимо выполнить сравнение экспериментальных результатов значений искажения формы отверстия от круглости $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ шестерни малой технологической жёсткости в зависимости от схемы закрепления в трехкулачковом самоцентрирующем патроне 7100-0002П [36], для этого необходимо выполнить расчёты по формуле:

$$\Delta r_{\Delta s3i}^{\mathcal{E}} = \frac{\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}} - \Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}}{\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}} \cdot 100 \%$$

Сравнение полученных экспериментальных результатов значений искажения формы отверстия от круглости $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ шестерни в зависимости от схемы закрепления представлено в табл. 5.

Согласно сравнению экспериментальных результатов (табл. 5) при закреплении шестерней малой технологической жёсткости за эвольвенту в трехкулачковых самоцентрирующих патронах искажение формы отверстия от круглости $\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}$ в среднем на 30,23 % меньше, чем при закреплении их за наружный диаметр $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$.

Согласно численным результатам компьютерного моделирования научной статьи [34], при закреплении шестерней малой технологической жёсткости за эвольвенту в трехкулачковых самоцентрирующих патронах искажение формы отверстия от круглости $\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}$ в среднем на 30,72 % меньше, чем при закреплении их за наружный диаметр $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$.

Далее необходимо выполнить сравнение численных результатов компьютерного моделирования с экспериментальными результатами по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta r_{\Delta s3i}^{\Delta} &= \frac{\Delta r_{\Delta s3i}^{\Delta \text{ cp}} - \Delta r_{\Delta s3i}^{\mathcal{E} \text{ cp}}}{\Delta r_{\Delta s3i}^{\Delta \text{ cp}}} \cdot 100 \% = \\ &= \frac{30,72 \% - 30,23 \%}{30,72 \%} \cdot 100 \% = 1,60 \% \end{aligned}$$

Сравнение численных результатов компьютерного моделирования с экспериментальными результатами не превышает 1,60 %, следовательно, таким образом подтверждается адекватность компьютерной модели и достоверность экспериментальных результатов.

Заключение

1) сравнение экспериментальных результатов $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ со статистическими результатами u_{s3i}^m не превышает 1,94 %, следовательно, полученные экспериментальным методом значения искажения формы отверстия от круглости $\Delta r_{s3i}^{\mathcal{E}}$ в зависимости от момента затяжки M_{s3i} динамометрическим ключом ТА-В0060-12 для обеих схем закрепления в трехкулачковом самоцентрирующем патроне имеют линейную зависимость;

2) согласно сравнению экспериментальных результатов (табл. 5) при закреплении шестерней малой технологической жёсткости за эвольвенту через установочные калиброванные ролики в трехкулачковых самоцентрирующих патронах искажение формы отверстия от круглости $\Delta r_{23i}^{\mathcal{E}}$ в среднем на 30,23 % меньше, чем при закреплении их за наружный диаметр $\Delta r_{13i}^{\mathcal{E}}$;

3) сравнение численных результатов компьютерного моделирования научной работы [34] с экспериментальными результатами данной научной работы не превышает 1,60 %, следовательно, таким образом подтверждается адекватность компьютерной модели и достоверность экспериментальных результатов;

4) на основании полученных результатов исследований сделан вывод о том, что закрепление шестерней малой технологической жёсткости за эвольвенту через установочные калиброванные ролики в самоцентрирующих патронах является наилучшим в совокупности с точкой зрения обеспечения наименьшего искажения формы отверстий от круглости (погрешности закрепления) и короткой размерной цепи по сравнению с закреплением за наружный диаметр. Таким образом, при механи-

ческой обработке шестерней малой технологической жёсткости, закрепляя их в трехкулачковых самоцентрирующих патронах за эвольвенту, можно повысить точность и качество их изготовления, а для большего эффекта можно закреплять такие шестерни в многокулачковых самоцентрирующих патронах (более 3-х кулачков) [34] с базовыми технологическими поверхностями кулачков, имеющих кольцевые канавки или выполненных из материала, имеющего высокий коэффициент трения покоя, это даст возможность существенно снизить необходимый момент затяжки $M_{зт}$ на рукоятке динамометрического ключа для надёжного удержания механически обрабатываемых шестерней малой технологической жёсткости, а значит, и минимизировать искажение формы их отверстий от круглости (погрешность закрепления), в результате повысить точность и качество их изготовления;

5) гипотетически возможно минимизировать искажение формы отверстий от круглости шестерней малой технологической жёсткости, если передать эту вредную функцию, а именно передать технологические упругие деформации другим элементам технологической системы, например, выполнить установочные калиброванные ролики малой технологической жёсткости, таким образом возможно добиться такого эффекта, что шестерни вовсе не будут испытывать или будут испытывать незначительные технологические упругие деформации, в результате этого повысится точность и качество их изготовления, но в этом случае нужно применять для установочных калиброванных роликов материалы, имеющие высокую степень изотропности, чтобы обеспечить высокую точность центрирования шестерней при их закреплении в самоцентрирующих патронах;

6) также гипотетически возможно минимизировать искажение формы отверстий от круглости шестерней малой технологической жёсткости, если предварительно их охлаждать в азоте, таким образом, на момент их закрепления и последующей механической обработки они будут иметь временную жёсткость, в результате этого повысится точность и качество их изготовления.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90226.

Список источников

1. Печенин В. А., Болотов М. А. Математическая модель, имитирующая базирование зубчатых колёс на КИМ при использовании штифтов // Неделя науки СПбПУ: сб. тр. конф. / под ред. М. С. Кокорина. Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, 2015. С. 285–287. ISBN 978-5-7422-5080-7. EDN: WIEAPZ.
2. Галузина Т. В., Поляков А. В. Исследование изменений формы и расположения кольцевых заготовок малой жёсткости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3-3 (27). С. 222–226. EDN: RYZIDR.
3. Константинова А. Н. Экспериментальное обоснование применения подхода «смягченных» режимов резания для обработки тонкостенных деталей // Евразийский союз ученых. 2018. № 4-1 (49). С. 22–25. EDN: XPIEVV.
4. Фролов А. А., Васильев А. С. Исследование деформированного состояния заготовок типа колёс при установке на

станках токарной группы. URL: https://studvesna.ru/db_files/articles/1511/article.pdf (Дата обращения: 25.07.2024).

5. Жаргалова А. Д., Гаврюшин С. С., Лазаренко Г. П., Семисалов В. И. О «мягких» режимах резания для обработки тонкостенных деталей // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8, № 6 (37). С. 117–128. EDN: ХХУНН.
6. Еремейкин П. А., Жаргалова А. Д., Гаврюшин С. С. Расчётно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20, № 1. С. 22–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32. EDN: YQYOIH.
7. Еремейкин П. А., Жаргалова А. Д., Гаврюшин С. С. Автоматизированная система для инженерного анализа деформаций тонкостенных деталей при токарной обработке // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твёрдого тела: сб. науч. тр. / под ред. В. Г. Зубчанинова, А. А. Алексеева. Тверь: Изд-во Тверского гос. техн. ун-та, 2018. Вып. 2. С. 31–35. ISBN 978-5-7995-0975-0. EDN: XZBRXV.
8. Кильдеев Т. А., Осипов Т. А. Анализ способов обработки резанием тонкостенных трубчатых заготовок // Научные исследования в области технических и технологических систем: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Аэтерна, 2018. С. 117–120. EDN: YLCCDG.
9. Жедь О. В., Копылов В. В. Напряжённо-деформированное состояние втулок в зависимости от сил зажима в самоцентрирующем патроне // Грузовик. 2018. № 11. С. 24–28.
10. Серков А. С., Масыгин В. Б., Серкова Л. Б. Упругие деформации колец и втулок при их закреплении в самоцентрирующих патронах и их влияние на точность механической обработки // Известия Тульского государственного университета: технические науки. 2022. № 2. С. 389–397. EDN: ZCPNEK.
11. Бояршинов С. В., Кулешова З. Г., Шатилов А. А. Деформации заготовок при закреплении в станочных приспособлениях и их влияние на точность механической обработки. Москва: Машиностроение, 1983. 43 с.
12. Куклев А. С., Тазетдинов М. М. Оснастка для обработки нежёстких деталей высокой точности. Москва: Машиностроение. 1978, 104 с.
13. Серков А. С., Масыгин В. Б., Серкова Л. Б. Оптимизация технологии производства шестерней, зубчатых колёс, сателлитов // Известия Тульского государственного университета. Технические Науки. 2021. № 4. С. 134–139. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-134-139. EDN: TYYUXP.
14. Елисеев Ю. С. Производство зубчатых колёс газотурбинных двигателей. Москва: Высшая школа. 2001. 492 с.
15. Чуприков А. О. Технологическое обеспечение точности токарной обработки тонкостенных сварных корпусов на основе учета упругих деформаций: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2013. 180 с.
16. Калашников С. Н., Калашников А. С., Коган Г. И. [и др.]. Производство зубчатых колёс: справ. / под общ. ред. Б. А. Тайца. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1990. 464 с.
17. Тайц Б. А. Точность и контроль зубчатых передач / под ред. Е. Г. Гинзбурга. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1978. 137 с.
18. Калашников С. Н., Калашников А. С. Зубчатые колёса и их изготовление. Москва: Машиностроение, 1983. 264 с.
19. Пономарев В. П., Батов А. С., Захаров А. В. [и др.]. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин. Москва: Машиностроение. 1984, 184 с.
20. Жедь О. В., Копылов В. В. Влияние формы отверстия зубчатого венца на его предварительное напряжённое состояние при сборке с базовой деталью Часть 1 // Грузовик. 2017. № 12. С. 14–15. EDN: YLTHBV.
21. Жедь О. В. Влияние формы отверстия зубчатого венца на его предварительное напряжённое состояние при сборке с базовой деталью Часть 2 // Грузовик. 2018. № 1. С. 18–22. EDN: YLVMHB.

22. Рогов В. А. Влияние предварительного напряженного состояния зубчатого венца вследствие натяга с базовой деталью в расчетах на изгибную прочность зуба // Технология машиностроения. 2018. № 8. С. 31–39. EDN: YLTHBV.

23. Zhed O., Koshelenko A., Khishova K. The effect of the stressed state of the ring gear due to interference with the base part in calculating the flexural strength of the tooth // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709, Issue 2. P. 022035-1–022035-8. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022035.

24. Серков А. С. Внедрение универсальной оснастки в процесс шлифования отверстия и торца заготовки сателлита // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 316–320. EDN: NCEIXO.

25. Повышение качества центрирования зубчатых колес. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/20050244.htm> (дата обращения: 31.03.2023).

26. Центрирование зубчатых колес по эвольвентному шлицевому профилю базового отверстия. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20041246.htm> (дата обращения: 31.03.2023).

27. Маликов А. А., Малахов Г. В., Михайлов А. В. Определение параметров зубчатого венца заготовок с предварительно оформленными зубьями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-1. С. 344–353. EDN: ZEGJDH.

28. Рогов В. А., Кошеленко А. С., Хишова Е. С. Исследование напряжённого состояния зубчатого венца на оптических моделях от сил зажима в самоцентрирующем патроне // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2015. № 4. С. 29–37. EDN: VBJUVH.

29. Рогов В. А., Кошеленко А. С., Хишова Е. С. Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния зубчатого венца, вызванного зажимом в самоцентрирующем патроне при механической обработке // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. № 4 (35). С. 36–41. EDN: VHZCWB.

30. Рогов В. А., Кошеленко А. С., Жедь О. В., Хишова Е. С. Исследование методом фотомеханики напряженно-деформированного состояния зубчатого венца от сил зажима в самоцентрирующем патроне на этапах механической обработки // Грузовик. 2016. № 2. С. 19–22. EDN: VOIPHT.

31. Рогов В. А., Кошеленко А. С., Хишова Е. С. Исследование напряженного состояния зубчатого венца на оптических моделях от сил зажима в самоцентрирующем патроне // Технология машиностроения. 2016. № 3. С. 10–14. EDN: WAOOBD.

32. Серков А. С., Масыгин В. Б., Серкова Л. Б. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки зубчатого колеса на математических моделях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 362–373. EDN: RVGUEM.

33. Серков А. С., Масыгин В. Б., Артюх Р. Л., Серков Л. Б. [и др.]. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки зубчатого колеса с применением математических моделей в зависимости от сил зажима в трех- и шестиклачковых самоцентрирующих патронах // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-13-18. EDN: QDXEER.

34. Серков А. С. Исследование упругих деформаций центральных отверстий зубчатых колёс, вызванных силами закрепления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 3–19. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-3-4. EDN: EOYKAN.

35. Серков А. С. Зависимости силы закрепления зубчатого колеса при шлифовании центрального отверстия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 278–289. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-278-279. EDN: GNBLZX.

36. ГОСТ 2675–80. Патроны самоцентрирующие трёхклачковые. Основные размеры. Введ. 1981–07–01. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. 11 с.

37. ГОСТ 4543–2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. Введ. 2017–10–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 53 с.

38. ГОСТ 801–2022. Прокат из подшипниковой стали. Технические условия. Введ. 2023–08–01. Москва: Российский институт стандартизации, 2023. 45 с.

39. Серков А. С., Масыгин В. Б., Серкова Л. Б. Разработка графической методики расчёта конструктивных элементов для закрепления зубчатых колёс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 389–397. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-389-398. EDN: HFFFGT.

40. Расчёт диаметра роликов при закреплении по зубьям: программа для ЭВМ № 2022617841 / Серков А. С., Масыгин В. Б. № 2022616889; заявл. 19.04.2022; рег. 26.04.2022.

41. Идельсон Н. И. Способ наименьших квадратов и теория математической обработки наблюдений. Москва: Геодезиздат, 1947. 358 с.

42. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Ленинград: Физматгиз, 1962. 352 с.

43. Мазмишвили А. И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов. Москва: Недра, 1978. 311 с.

44. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Москва: Юнити-Дана, 2001. Т. 2. 432 с.

45. Мазуров Б. Т., Падве В. А. Метод наименьших квадратов (статика, динамика, модели с уточняемой структурой) // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). 2017. Т. 22, № 2. С. 22–35. EDN: YZFXGB.

СЕРКОВ Александр Сергеевич, ассистент кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8065-4788

AuthorID (РИНЦ): 987557

Адрес для переписки: Sanya_93@bk.ru

ДЕРКАЧ Валерий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3504-7789

AuthorID (SCOPUS): 57194834776

Адрес для переписки: Altair_73@mail.ru

МИХАЙЛЕНКО Степан Викторович, ассистент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7414-6496

ORCID: 0000-0002-6806-9915

Адрес для переписки: Stepan_01.01@mail.ru

СЕРКОВА Любовь Борисовна, старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1236-8615

ORCID: 0000-0001-5918-2476

AuthorID (SCOPUS): 57211269167

Адрес для переписки: Lubashka_2010@mail.ru

Для цитирования

Серков А. С., Деркач В. В., Михайленко С. В., Серкова Л. Б. Экспериментальное исследование технологических упругих деформаций центральных отверстий шестерней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 87–99. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-87-99.

Статья поступила в редакцию 27.08.2024 г.

© А. С. Серков, В. В. Деркач, С. В. Михайленко, Л. Б. Серкова

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TECHNOLOGICAL ELASTIC DEFORMATIONS OF THE CENTRAL HOLES OF GEARS

A. S. Serkov, V. V. Derkach, S. V. Mikhailenko, L. B. Serkova

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The research experimentally investigates the occurrence of technological elastic deformations of the central holes of gears of low technological rigidity (non-rigid gears) caused by their fixation in 3-cam self-centering cartridges. The authors present an experimental comparison of the attachment scheme by the involute with the scheme by the external diameter. Moreover, the graphs of distortion of the hole shape from roundness as a function of the torque applied to the wrench handle were plotted. The least squares method was used to confirm the assumed linear dependence of the graphs of hole shape distortion from roundness as a function of the tightening torque applied to the wrench handle. The authors compare the results obtained by the experiment with the obtained earlier using computer modeling, the adequacy of computer models and the reliability of the experimental results. Experimentally it was determined that at fixing by involute there is on 30,23 % less value of hole shape distortion from roundness in comparison with the scheme of fixing by external diameter. As a result, the scheme of fixing by involute with a gear of low technological rigidity is the best in terms of hole shape distortion from roundness in comparison with the scheme of fixing by external diameter.

The scientific novelty is to investigate the influence of clamping forces on the hole shape distortion of a gear of small technological rigidity when fixed by its external diameter and involute in a 3-cam self-centering chuck. The resulting data allows scientifically justifying assignment of parameters of clamping devices in the production of gears of small technological stiffness used in aeronautical vehicles.

Keywords: technological elastic deformations, gears, toothed wheels, satellites, low technological rigidity, technological heredity, distortion of shape from roundness, fixing error.

Acknowledgments

The work was funded by RFBR according to the research project No. 20-38-90226.

References

1. Pechenin V. A., Bolotov M. A. Matematicheskaya model' imitiruyushchaya bazirovaniye zubchatykh koles na KIM pri ispol'zovanii shtiftov [Mathematical model simulating the basing of gears on a CMM using pins] // *Nedelya nauki SPbPU. Nedelya Nauki SPbPU* / Ed. by M. S. Kokorina. Saint Petersburg, 2015. P. 285–287. ISBN 978-5-7422-5080-7. EDN: WIEAPZ. (In Russ.).
2. Galuzina T. V., Polyakov A. V. Issledovaniye izmeneniy formy i raspolozheniya kol'tsevykh zagotovok maloy zhestkosti [Research of changes in shape and location ring details with small rigidity] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta). Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta im. Akademika S. P. Koroleva (Natsional'nogo Issledovatel'skogo Universiteta)*. 2011. No. 3-3 (27). P. 222–226. EDN: RYZIDR. (In Russ.).
3. Konstantinova A. N. Eksperimental'noye obosnovaniye primeneniya podkhoda «snyagchennykh» rezhimov rezaniya dlya obrabotki tonkostennykh detaley [Experimental justification for the use of the «softened» cutting modes approach for machining thin-walled parts] // *Yevraziyskiy soyuz uchenykh. Eurasian Union of Scientists*. 2018. No. 4-1 (49). P. 22–25. EDN: XPIEVV. (In Russ.).
4. Frolov A. A., Vasil'yev A. S. Issledovaniye deformirovannogo sostoyaniya zagotovok tipa kolets pri ustanovke na stankakh tokarnoy gruppy [Study of the deformed state of ring-type workpieces during installation on turning machines]. URL: https://studvesna.ru/db_files/articles/1511/article.pdf (accessed: 25.07.2024). (In Russ.).
5. Zhargalova A. D., Gavryushin S. S., Lazarenko G. P., Semisalov V. I. O «myagkikh» rezhimakh rezaniya dlya obrabotki tonkostennykh detaley [About soft modes of cutting for processing thin-walled parts] // *Internet-zhurnal Naukovedeniye. Internet-Zhurnal Naukovedeniye*. 2016. Vol. 8, no. 6 (37). P. 117–128. EDN: XXYHIJ. (In Russ.).
6. Eremykin P. A., Zhargalova A. D., Gavryushin S. S. Raschetno-eksperimental'naya otsenka tekhnologicheskikh deformatsiy pri «myagkikh» rezhimakh tokarnoy obrabotki tonkostennykh detaley [Empirical evaluation of technological deformations for «Soft» cutting modes during thin-walled parts turning] // *Empirical evaluation of technological deformations for «Soft» cutting modes during thin-walled parts turning. Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2018. Vol. 20, no. 1. P. 22–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32. EDN: YQYOIH. (In Russ.).
7. Eremykin P. A., Zhargalova A. D., Gavryushin S. S. Avtomatizirovannaya sistema dlya inzhenernogo analiza deformatsiy tonkostennykh detaley pri tokarnoy obrabotke [Automated system for engineering analysis of deformations of thin-walled parts during turning] // *Matematicheskoye modelirovaniye i eksperimental'naya mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela. Mathematical Modelling and Experimental Mechanics of Deformable Solid Bodies* / Ed. by V. G. Zubchaninova, A. A. Alekseyeva. Tver'. 2018. Issue 2. P. 31–35. ISBN 978-5-7995-0975-0. EDN: XZBRXV. (In Russ.).

8. Kil'deyev T. A., Osipov T. A. Analiz sposobov obrabotki rezaniyem tonkostennykh trubchatykh zagotovok [Analysis of cutting methods for thin-walled tubular workpieces] // Nauchnyye issledovaniya v oblasti tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh system. *Nauchnyye Issledovaniya v Oblasti Tekhnicheskikh i Tekhnologicheskikh System*. Ufa, 2018. P. 117–120. EDN: YLCCDG. (In Russ.).

9. Zhed' O. V., Kopylov V. V. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye vtulok v zavisimosti ot sil zazhima v samotsentrirovushchem patrone [Stress-strain state of the sleeves depending on the clamping forces in the self-centering patron] // Gruzovik. *Truck*. 2018. No. 11. P. 24–28. (In Russ.).

10. Serkov A. S., Masyagin V. B., Serkova L. B. Uprugiyeh deformatsii kolets i vtulok pri ikh zakreplenii v samotsentrirovushchikh patronakh i ikh vliyaniye na tochnost' mekhanicheskoy obrabotki [Elastic deformations of rings and bushings when they are fixed in self-centering cartridges and their effect on the accuracy of machining] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskkiye nauki. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022. No. 2. P. 389–397. EDN: ZCPNEK. (In Russ.).

11. Boyarshinov S. V., Kuleshova Z. G., Shatilov A. A. Deformatsii zagotovok pri zakreplenii v stanochnykh prispособleniyakh i ikh vliyaniye na tochnost' mekhanicheskoy obrabotki [Deformations of workpieces during clamping in machine tool fixtures and their influence on machining accuracy]. Moscow, 1983. 43 p. (In Russ.).

12. Kuklev L. S., Tazetdinov M. M. Osnastka dlya obrabotki nezhestkikh detaley vysokoy tochnosti [Equipment for processing non-rigid high-precision parts]. Moscow, 1978. 104 p. (In Russ.).

13. Serkov A. S., Masyagin V. B., Serkova L. B. Optimizatsiya tekhnologii proizvodstva shesterney, zubchatykh kolets, satellitov [Optimization of the production technology of gears, gears, satellites] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. *Tekhnicheskkiye Nauki. News of the Tula state university. Technical Sciences*. 2021. No. 4. P. 134–139. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-134-139. EDN: TYYUXP. (In Russ.).

14. Eliseyev Yu. S. Proizvodstvo zubchatykh kolets gazoturbinnnykh dvigateley. [Production of gear wheels of gas turbine engines]. Moscow, 2001. 492 p. (In Russ.).

15. Chuprikov A. O. Tekhnologicheskoye obespecheniye tochnosti tokarnoy obrabotki tonkostennykh svarnykh korpusov na osnove ucheta uprugikh deformatsiy [Technological ensuring the accuracy of turning of thin-walled welded hulls on the basis of elastic deformations elastic deformations]. Tula, 2013. 180 p. (In Russ.).

16. Kalashnikov S. N., Kalashnikov A. S., Kogan G. I. [et al.]. Proizvodstvo zubchatykh kolets: sprav [Production of gears: Handbook] / Ed. by B. A. Taytsa. 3rd ed., revised and supplemented. Moscow, 1990. 464 p. (In Russ.).

17. Tayts B. A. Tochnost' i kontrol' zubchatykh peredach [Accuracy and control of transmissions gear]. 2nd ed., revised and supplemented. Leningrad, 1978. 137 p. (In Russ.).

18. Kalashnikov S. N., Kalashnikov A. S. Zubchatyye koleasa i ikh izgotovleniye [Gear wheels and their manufacture]. Moscow, 1983. 264 p. (In Russ.).

19. Ponomarev V. P., Batov A. S., Zakharov A. V. [et al.]. Konstruktorsko-tekhnologicheskoye obespecheniye kachestva detaley mashin [Design and technological support for the quality of machine parts]. Moscow, 1984. 184 p. (In Russ.).

20. Zhed' O. V., Kopylov V. V. Vliyaniye formy otverstiya zubchatogo ventsa na ego predvaritel'noye napryazhennoye sostoyaniye pri sborke s bazovoy detal'yu Chast' 1 [Influence of the form holes face on his prior stress state in the Assembly with the base detail. Part 1] // Gruzovik. *Truck*. 2017. No. 12. P. 14–15. EDN: YLTHBB. (In Russ.).

21. Zhed O. V. Vliyaniye formy otverstiya zubchatogo ventsa na ego predvaritel'noye napryazhennoye sostoyaniye pri sborke s bazovoy detal'yu. Chast' 2 [Influence of the shape of the gear rim hole on its preliminary stress state during assembly with

the base part. Part 2] // Gruzovik. *Truck*. 2018. No. 1. P. 18–22. EDN: YLVMHB. (In Russ.).

22. Rogov V. A. Vliyaniye predvaritel'nogo napryazhennoyego sostoyaniya zubchatogo ventsa vsledstviye natyaga s bazovoy detal'yu v raschetakh na izgibnuyu prochnost' zuba [The influence of the rim preliminary stressed state due to interference with the base part in calculating the flexural strength of the tooth] // Tekhnologiya mashinostroeniya. *Technology of Mechanical Engineering*. 2018. No. 8. P. 31–39. EDN: YLTHBB. (In Russ.).

23. Zhed O., Koshelenko A., Khishova K. The effect of the stressed state of the ring gear due to interference with the base part in calculating the flexural strength of the tooth // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. P. 022035-1–022035-8. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022035. (In Engl.).

24. Serkov A. S. Introduction of universal tooling in the process of grinding the hole and end of the satellite billet [Vnedreniye universal'noy osnastki v protsess shlifovaniya otverstiya i tortsa zagotovki satellita] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. *Tekhnicheskkiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020. No. 4. P. 316–320. EDN: NCEIXO. (In Russ.).

25. Povysheniye kachestva tsentirovaniya zubchatykh kolets [Improving the quality of gear centring]. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/20050244.htm> (accessed: 31.03.2023). (In Russ.).

26. Tsentrirovaniye zubchatykh kolets po evol'ventnomu shlitsevomu profilu bazovogo otverstiya [Centring of gears on the involute spline profile of the base bore]. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20041246.htm> (accessed: 31.03.2023). (In Russ.).

27. Malikov A. A., Malakhov G. V., Mikhailov A. V. Opredeleniye parametrov zubchatogo ventsa zagotovok s predvaritel'noy oformlennymi zub'yami [Determination of parameters of toothed crown of purveyances with the preliminary executed points] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. *Tekhnicheskkiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2017. No. 8-1. P. 344–353. EDN: ZEGJDH. (In Russ.).

28. Rogov V. A., Koshelenko A. S., Khishova E. S. Issledovaniye napryazhennoyego sostoyaniya zubchatogo ventsa na opticheskikh modelyakh ot sil zazhima v samotsentrirovushchem patrone [Investigation of stress state ring gear on the optical model from the forces of the clamps in the self-centering chuck] // Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2015. No. 4. P. 29–37. EDN: VBJUVH. (In Russ.).

29. Rogov V. A., Koshelenko A. S., Khishova E. S. Issledovaniye metodom fotomekhaniki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zubchatogo ventsa, vyzvannogo zazhimom v samotsentrirovushchem patrone pri mekhanicheskoy obrabotke [Research by photomechanics method strain intensity state of toothing through clamping forces in self-centering chuck at machining stage] // Vestnik MSUT «Stankin». *Vestnik MSUT «Stankin»*. 2015. No. (35). P. 36–41. EDN: VHIZCB. (In Russ.).

30. Rogov V. A., Koshelenko A. S., Zhed O. V., Khishova E. S. Issledovaniye metodom fotomekhaniki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zubchatogo ventsa ot sil zazhima v samotsentrirovushchem patrone na etapakh mekhanicheskoy obrabotki [Research by photomechanics method the intensity of toothing through clamping forces in self-centering chuck at machining stage] // Gruzovik. *Truck*. 2016. No. 2. P. 19–22. EDN: VOIPHT. (In Russ.).

31. Rogov V. A., Koshelenko A. S., Khishova E. S. Issledovaniye napryazhennoyego sostoyaniya zubchatogo ventsa na opticheskikh modelyakh ot sil zazhima v samotsentrirovushchem patrone [The stress state research of the toothed crone from the clamping forces in the self-centering chuck in the optical model] // Tekhnologiya Mashinostroeniya. *Technology of Mechanical Engineering*. 2016. No. 3. P. 10–14. EDN: WAOOBD. (In Russ.).

32. Serkov A. S., Masyagin V. B., Serkova L. B. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zagotovki zubchatogo koleasa na matematicheskikh modelyakh [Investigation of the stress-strain state of the workpiece gear on mathematical models] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020. No. 5. P. 362–373. EDN: RVGUEM. (In Russ.).
33. Serkov A. S., Masyagin V. B., Artyukh R. L., Serkova L. B. [et al.] Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zagotovki zubchatogo koleasa s primeneniym matematicheskikh modeley v zavisimosti ot sil zazhima v trekh- i shestikulachkovykh samotsentriruyushchikh patronakh [Studying stress-strain state of gear billet using mathematical models depending on clamping forces in 3 and 6 cam selfcentering chucks] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2020. No. 4 (172). P. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-13-18. EDN: QDXEER. (In Russ.).
34. Serkov A. S. Issledovaniye uprugikh deformatsiy tsentral'nykh otverstiy zubchatykh koleas, vyzvannykh silami zakrepleniya [Investigation of elastic deformations of the central holes of gears caused by fastening forces] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 9. P. 3–19. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-3-4. EDN: EOYKAH. (In Russ.).
35. Serkov A. S. Zavisimosti sily zakrepleniya zubchatogo koleasa pri shlifovanii tsentral'nogo otverstiya [Dependence of the force of fastening the gear wheel when grinding the central hole] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula state university. Technical sciences*. 2023. No. 7. P. 278–289. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-278-279. EDN: GNBLZX. (In Russ.).
36. GOST 2675–80. Patrony samotsentriruyushchiye trekhkulachkovyye. Osnovnyye razmery. [Self-centering three cam chucks. Basic dimensions]. Moscow, 1987. 11 p. (In Russ.).
37. GOST 4543–2016. Metalloproduktsiya iz konstruksionnoy legirovannoy stali. Tekhnicheskiye usloviya [Metal products from structural alloy steel. Technical conditions]. Moscow, 2019. 53 p. (In Russ.).
38. GOST 801–2022. Prokat iz podshipnikovoy stali. Tekhnicheskiye usloviya. [Rolled products from bearing steel. Technical conditions]. Moscow, 2023. 45 p. (In Russ.).
39. Serkov A. S., Masyagin V. B., Serkova L. B. Razrabotka graficheskoy metodiki rascheta konstruktivnykh elementov dlya zakrepleniya zubchatykh koleas [Development of a graphic method for calculating structural elements for fixing gears] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2021. No. 5. P. 389–397. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-389-398. EDN: HFFFGT. (In Russ.).
40. Raschet diametra rolikov pri zakreplenii po zub'yam: programma dlya EVM № 2022617841 [Calculation of roller diameters for tooth mounting: Computer program No. 2022617841] / Serkov A. S., Masyagin V. B. No. 2022616889. (In Russ.).
41. Idel'son N. I. Sposob naimen'shikh kvadratov i teoriya matematicheskoy obrabotki nablyudeniya [Method of least squares and theory of mathematical processing of observations]. Moscow, 1947. 358 p. (In Russ.).
42. Linnik Yu. V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniya [Method of least squares and the foundations of the mathematical and statistical theory of observation processing]. Leningrad, 1962. 352 p. (In Russ.).
43. Mazmishvili A. I. Teoriya oshibok i metod naimen'shikh kvadratov [Error theory and least squares method]. Moscow, 1978. 311 p. (In Russ.).
44. Ayvazyan S. A. Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki [Applied Statistics. Fundamentals of econometrics]. Moscow, 2001. Vol. 2. 432 p. (In Russ.).
45. Mazurov B. T., Padve V. A. Metod naimen'shikh kvadratov (statika, dinamika, modeli s utochnyayemoy strukturoy) [The method of least squares (statics, dynamics, and models with updated structure)] // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii (SGUGIT). Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2017. Vol 22, no. 2. P. 22–35. EDN: YZFXGB. (In Russ.).

SERKOV Alexander Sergeevich, Assistant of Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8065-4788

AuthorID (RSCI): 987557

Correspondence address: Sanya_93@bk.ru

DERKACH Valery Vasilievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3504-7789

AuthorID (SCOPUS): 57194834776

Correspondence address: Altair_73@mail.ru

MIKHAILENKO Stepan Viktorovich, Assistant of Metal Cutting Machines and Tools Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7414-6496

ORCID: 0000-0002-6806-9915

Correspondence address: Stepan_01.01@mail.ru

SERKOVA Lyubov' Borisovna, Senior Lecturer of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1236-8615

ORCID: 0000-0001-5918-2476

AuthorID (SCOPUS): 57211269167

Correspondence address: Lubashka_2010@mail.ru

For citations

Serkov A. S., Derkach V. V., Mikhailenko S. V., Serkova L. B. Experimental research of technological elastic deformations of the central holes of gears // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 4. P. 87–99. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-87-99.

Received August 27, 2024.

© A. S. Serkov, V. V. Derkach, S. V. Mikhailenko, L. B. Serkova