

Исследование технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни малой технологической жесткости, вызванных силами закрепления

© А.С. Серков¹, В.Б. Масыгин²

¹Омский завод транспортного машиностроения,
Омск, 644005, Российская Федерация

²Омский государственный технический университет,
Омск, 644050, Российская Федерация

В целях передачи вращательного движения в системах и между разными механизмами в летательных аппаратах как правило применяются шестерни. Представлено исследование возникновения технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни малой технологической жесткости, вызванных ее закреплением в самоцентрирующих кулачковых патронах, а также в интегральном патроне. Рассмотрены две схемы изменения геометрических параметров отверстия такой шестерни при ее закреплении в трехкулачковом самоцентрирующем патроне: за наружный диаметр и за эвольвенту. Определены места прогиба и выгибания контура отверстия шестерни. Приведены полученные в ходе исследования числовые значения технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни для схем ее закрепления; за наружный диаметр и за эвольвенту в двух-, трех-, шестиклачковых самоцентрирующих патронах, а также в интегральном самоцентрирующем патроне. Расчеты технологических упругих деформаций отверстия выполнены с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов в системе автоматизированного проектирования SolidWorks Simulation. Проведено сравнение полученных значений технологических упругих деформаций в зависимости от числа кулачков самоцентрирующего патрона, а также показаны соотношения между ними. Сделан вывод о том, что закрепление шестерни за эвольвенту является наиболее оптимальным решением, так как обеспечивает меньшие технологические упругие деформации и более короткую размерную цепь, чем при закреплении за наружный диаметр. Даны рекомендации по оптимизации изготовления шестерней малой технологической жесткости.

Ключевые слова: технологические упругие деформации, центральное отверстие шестерни, малая технологическая жесткость, короткая размерная цепь, сателлиты, зубчатые колеса, закрепление за наружный диаметр, закрепление за эвольвенту

Введение. Шестерни в летательных аппаратах обычно располагают в тех местах, где требуется передача вращательного движения между различными частями механизма. Их также могут использовать в гидравлических системах для передачи давления жидкости от насоса к исполнительным механизмам. В газораспределительных системах шестерни применяют для передачи вращения от приводного вала к распределительному валу, управляющему открытием и закрытием клапанов в двигателе. Это особенно важно в реактивных двигателях, где требуется точная синхронизация работы клапанов для обеспечения

оптимального сгорания топлива и эффективности работы двигателя. Следует отметить, что точность синхронизации работы клапанов зависит от точности и качества изготовления шестерней.

Погрешность закрепления, вызванная технологическими упругими деформациями во время механической обработки, оказывает непосредственное влияние на точность и качество изготовления шестерней, поэтому изучение и разработка методов минимизации погрешности их закрепления — важное направление исследований в данной области.

Кроме того, современные тенденции к снижению веса летательных аппаратов и повышению их эффективности приводит к расширению использования тонкостенных деталей, имеющих малую технологическую жесткость. В связи с этим возрастают требования к точности и качеству механической обработки таких деталей.

При эксплуатации шестерней погрешности их изготовления приводят и к увеличению динамических нагрузок, вибраций, шума в агрегатах и преждевременному выходу механизмов из строя [1]. Однако в данной работе эта проблема не будет рассмотрена, так как она более подробно изложена в [2–15].

В работах [16–19] с помощью метода фотомеханики исследуется напряженно-деформированное состояние шестерней малой технологической жесткости, у которых искажена (выполнена с погрешностями) форма отверстия на этапе финишной механической обработки вследствие действия технологических упругих деформаций, вызванных силой закрепления кулачками самоцентрирующего патрона. По этой причине при посадке с натягом шестерни на базовую деталь возникает неравномерное давление на контуре его отверстия, в связи с чем возникает предварительное неравномерное напряженно-деформированное состояние в переходных галтелях межзубного пространства, что снижает ресурс шестерни по изгибным напряжениям. Поэтому при изготовлении подобных деталей имеет смысл проводить расчет возникающих технологических упругих деформаций, что даст возможность прогнозировать погрешность закрепления и находить оптимальные решения для их уменьшения.

Далее приведены результаты исследования двух схем закрепления шестерни самоцентрирующими патронами с различным количеством кулачков, а именно закрепление за наружный диаметр и закрепление за эвольвенту. Вторая схема более оптимальна с точки зрения размерного анализа, так как обеспечивается короткая размерная цепь между диаметром центрального отверстия и диаметром делительной окружности [9; 12, с. 59; 14, с. 235; 20–24]. В работах [25–30] были выполнены исследования напряженно-деформированного состояния шестерней и по результатам сделан вывод о том, что возникает меньше напряжений при закреплении за эвольвенту, чем за наружный диаметр.

Таким образом, данная тема исследования остается актуальной и имеет большое практическое значение для развития конструкций летательных аппаратов и технологий их производства.

Цель работы — исследование технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни малой технологической жесткости, вызванных силами закрепления. Для ее достижения необходимо с помощью компьютерного моделирования выполнить расчеты упругих деформаций и искажения от круглости формы центрального отверстия шестерни при закреплении за ее наружный диаметр и за эвольвенту в двух-, трех-, шестикулачковых самоцентрирующих патронах, а также в интегральном патроне с разной силой закрепления, зависящей от коэффициента трения покоя f . Для более полного исследования следует сравнить полученные результаты и дать рекомендации, помогающие минимизировать погрешность закрепления.

Расчеты технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни малой технологической жесткости. Все расчеты выполнялись для шестерни, параметры которой приведены в работе [31]. Для того чтобы применять схему закрепления за эвольвенту, необходимо провести расчет диаметра установочных роликов и радиуса касания их с кулачками по методу, приведенному в [32], или с помощью компьютерной программы [33]. Расчет сил закрепления ранее выполнялся для шестерни малой технологической жесткости методом, представленным в [31]. Значения расчетной необходимой силы закрепления на один кулачок Q_n для разных схем закрепления взяты из таблицы, содержащейся в работе [31]. Согласно данным этой таблицы, при закреплении шестерни за наружный диаметр сила закрепления в 1,046 раза или на 4,4 % выше, чем при закреплении за эвольвенту. Поэтому для большей наглядности демонстрации влияния схем закрепления на технологические упругие деформации было решено принять для обоих случаев необходимую силу закрепления на один кулачок Q_n равной необходимой рассчитанной силе закрепления по схеме закрепления за эвольвенту. Значения принятой необходимой силы закрепления шестерни на один кулачок Q_n в самоцентрирующих двух- и трехкулачковых патронах приведены в табл. 1, а расчетной необходимой силы закрепления шестерни в шестикулачковом и интегральном патронах даны в табл. 2.

В момент закрепления шестерни в патроне за наружный диаметр в ней возникают технологические упругие деформации. При этом в местах A контакта кулачков радиус отверстия шестерни уменьшается (наибольший прогиб), а в точках B — увеличивается (наибольшее выгибание). В данном случае возникает искажение формы отверстия шестерни от круглости — $\Delta r'_{1n}$, которое рассчитывается по формуле

$$\Delta r'_{1n} = |y'_{1An} - y'_{1Bn}|$$

или

$$\Delta r'_{1n} = |r'_{1An} - r'_{1Bn}|,$$

где y'_{1An} — числовое значение прогиба отверстия шестерни в месте ее контакта с кулачками (закрепление за наружный диаметр), мм (n — индекс, который указывает число кулачков, шт.); y'_{1Bn} — числовое значение выгибания отверстия шестерни между кулачками (закрепление за наружный диаметр), мм; r'_{1An} — числовое значение радиуса прогиба отверстия шестерни в месте ее контакта с кулачками (закрепление за наружный диаметр), мм; r'_{1Bn} — числовое значение радиуса выгибания отверстия шестерни между кулачками (закрепление за наружный диаметр), мм.

Таблица 1

Принятая необходимая сила закрепления Q_n в двух- и трехкулачковых патронах

Параметр закрепления	Самоцентрирующий патрон							
	двухкулачковый				трехкулачковый			
f	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4
Q_n , Н	779,568	389,784	259,856	194,892	519,712	259,856	173,237	129,928

Таблица 2

Расчетная необходимая сила закрепления Q_n , в шестикулачковом и интегральном патронах

Параметр закрепления	Самоцентрирующий патрон							
	шестикулачковый				интегральный (18 установочных роликов)			
f	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4
Q_n , Н	259,856	129,928	86,619	64,964	86,619	43,309	28,873	21,655

Отклонение формы центрального отверстия от круглости в местах A механически обработанного отверстия у шестерни в местах B рассчитывается по формуле

$$\Delta r'_{1n \text{ обр}} = |r'_{1An \text{ обр}} - r'_{1Bn \text{ обр}}|,$$

где $r'_{1An\text{обр}}$ — числовое значение радиуса в местах A механически обработанного отверстия шестерни в раскрепленном состоянии (закрепление за наружный диаметр), мм; $r'_{1Bn\text{обр}}$ — числовое значение радиуса в местах B механически обработанного отверстия шестерни в раскрепленном состоянии (закрепление за наружный диаметр), мм.

Искажение формы отверстия от круглости у шестерни, закрепленной за наружный диаметр ($\Delta r'_{1n}$), численно равно отклонению формы отверстия от круглости (вызванного погрешностью закрепления) механически обработанного отверстия шестерни в раскрепленном состоянии ($\Delta r'_{1n\text{обр}}$):

$$\Delta r'_{1n} = \Delta r'_{1n\text{обр}}.$$

Схема изменения геометрических параметров отверстия шестерни при закреплении за наружный диаметр в трехкулачковом патроне представлена на рис. 1.

В момент закрепления шестерни в патроне за эвольвенту в ней возникают технологические упругие деформации, при этом в точках A контакта кулачков радиус отверстия уменьшается (наибольший прогиб), а в точках B увеличивается (наибольшее выгибание). В данном случае возникает искажение формы отверстия от круглости ($\Delta r'_{2n}$), которое рассчитывается по формуле

$$\Delta r'_{2n} = |y'_{2An} - y'_{2Bn}|$$

или

$$\Delta r'_{2n} = |r'_{2An} - r'_{2Bn}|,$$

где y'_{2An} — числовое значение прогиба отверстия шестерни в месте ее контакта с кулачками (закрепление за эвольвенту), мм; y'_{2Bn} — числовое значение выгибания отверстия шестерни между кулачками (закрепление за эвольвенту), мм; r'_{2An} — числовое значение радиуса прогиба отверстия шестерни в месте ее контакта с кулачками (закрепление за эвольвенту), мм; r'_{2Bn} — числовое значение радиуса выгибания отверстия шестерни между кулачками (закрепление за эвольвенту), мм.

Отклонение формы отверстия от круглости механически обработанного отверстия шестерни вычисляется по формуле

$$\Delta r'_{2n\text{обр}} = |r'_{2An\text{обр}} - r'_{2Bn\text{обр}}|,$$

где $r'_{2An\text{обр}}$ — числовое значение радиуса в местах A механически обработанного отверстия шестерни в раскрепленном состоянии (закрепление за эвольвенту), мм; $r'_{2Bn\text{обр}}$ — числовое значение радиуса в местах B механически обработанного отверстия шестерни в раскрепленном состоянии (закрепление за эвольвенту), мм.

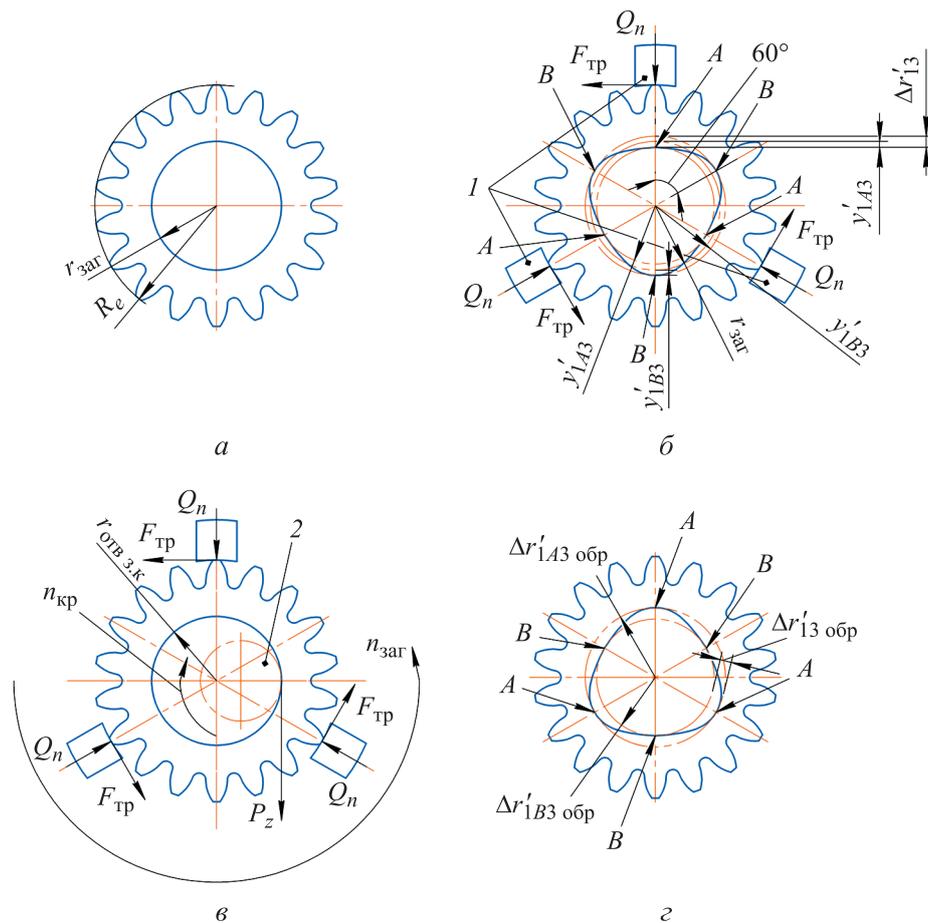


Рис. 1. Схема изменения геометрических параметров отверстия шестерни при закреплении за наружный диаметр:

a — до закрепления; b — в закрепленном состоянии (1 — кулачки самоцентрирующего патрона); c — после механической обработки в закрепленном состоянии (2 — шлифовальный круг); d — после механической обработки в раскрепленном состоянии; P_z — сила резания по оси z ; R_e — наружный диаметр шестерни, мм; $r_{зар}$ — радиус отверстия до механической обработки, мм; $F_{тр}$ — сила трения покоя, Н; $n_{зар}$ — скорость вращения обрабатываемого сателлита, об/мин; $n_{кр}$ — скорость вращения шлифовального круга (абразивного инструмента), об/мин; $r_{отв.з.к}$ — радиус механически обработанного отверстия зубчатого колеса (сателлита) в закрепленном состоянии, мм

Искажение формы центрального отверстия от круглости у шестерни, закрепленной за эвольвенту ($\Delta r'_{2n}$), численно равно отклонению формы отверстия от круглости (погрешность закрепления) механически обработанного отверстия шестерни в раскрепленном состоянии ($\Delta r'_{2n \text{обр}}$):

$$\Delta r'_{2n} = \Delta r'_{2n \text{обр}}$$

Схема изменения геометрических параметров отверстия шестерни при ее закреплении за эвольвенту в трехкулачковом патроне представлена на рис. 2.

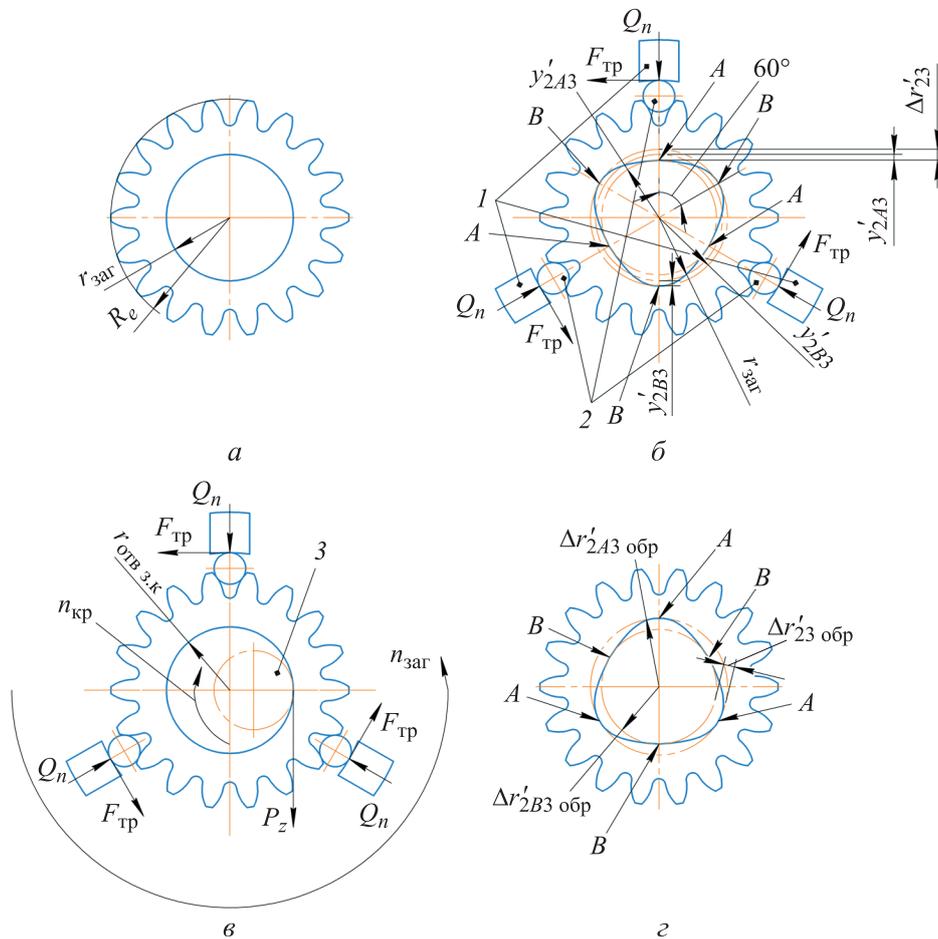
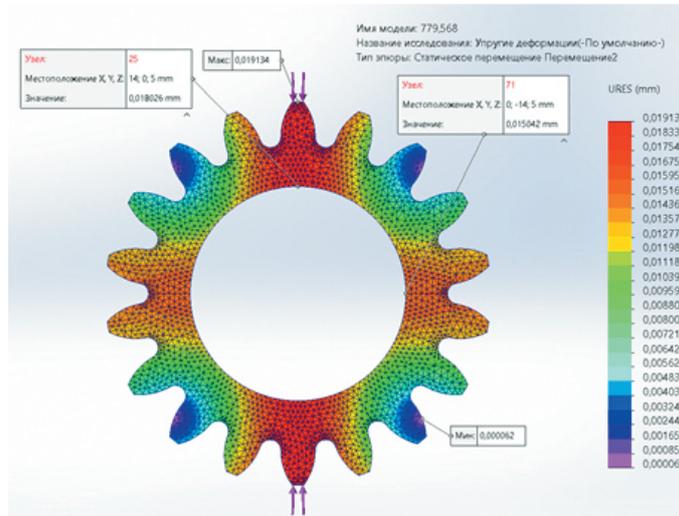


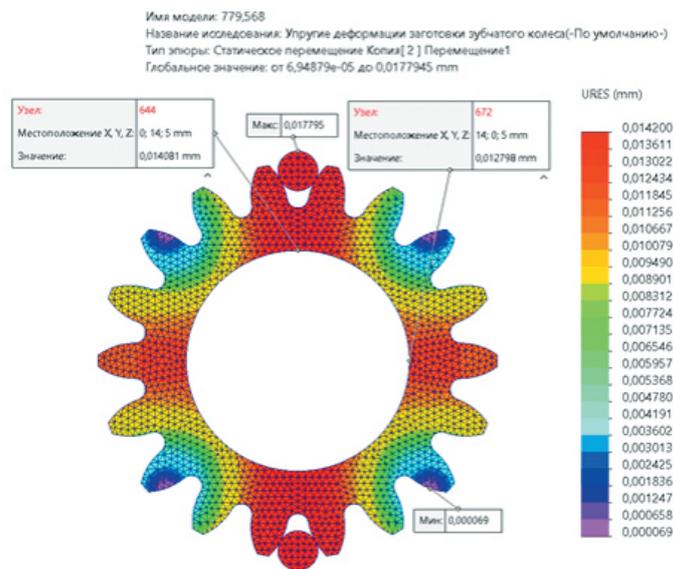
Рис. 2. Схема изменения геометрических параметров отверстия шестерни при закреплении за эвольвенту:

a — до закрепления; *б* — в закрепленном состоянии (*1* — кулачки самоцентрирующегося патрона; *2* — установочные ролики); *в* — после механической обработки в закрепленном состоянии (*3* — шлифовальный круг); *г* — после механической обработки в раскрепленном состоянии

Эпюры технологических упругих деформаций (результатирующих перемещений) при закреплении шестерни за наружный диаметр и за эвольвенту в двух-, трех-, шестикулачковых и интегральном самоцентрирующих патронах представлены на рис. 3–6.

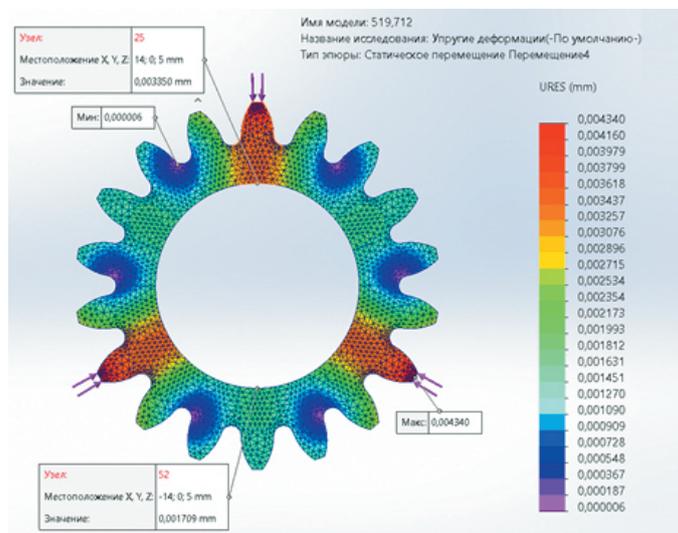


а

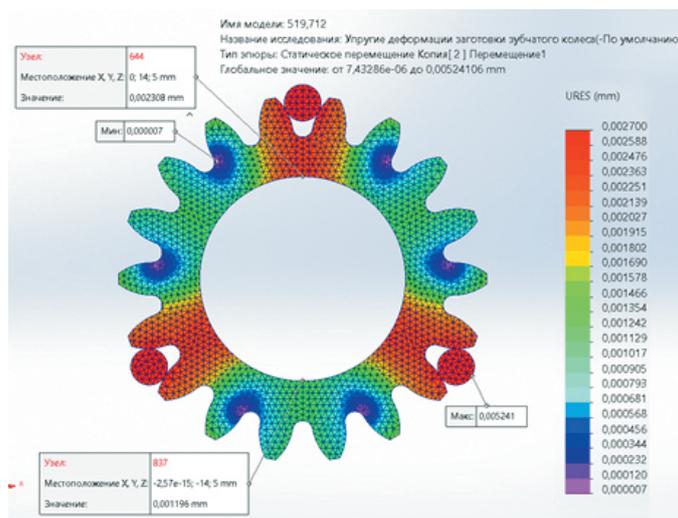


б

Рис. 3. Эпюры технологических упругих деформаций при закреплении в двухкулачковом самоцентрирующем патроне ($Q_n = 779,568$ Н) за наружный диаметр (а) и за эвольвенту (б)

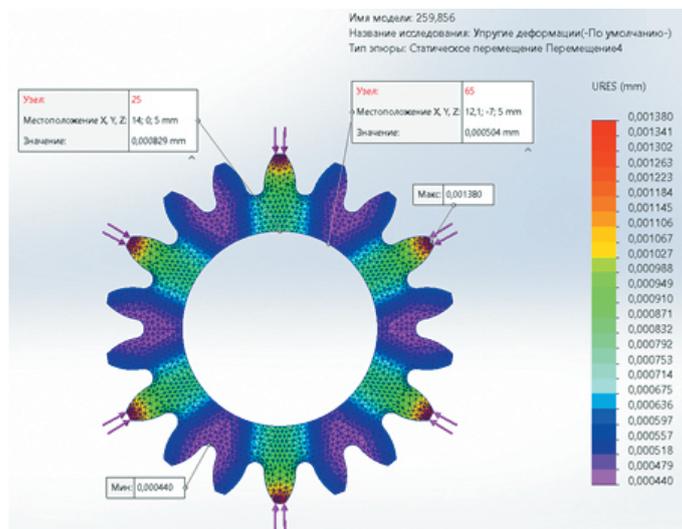


а

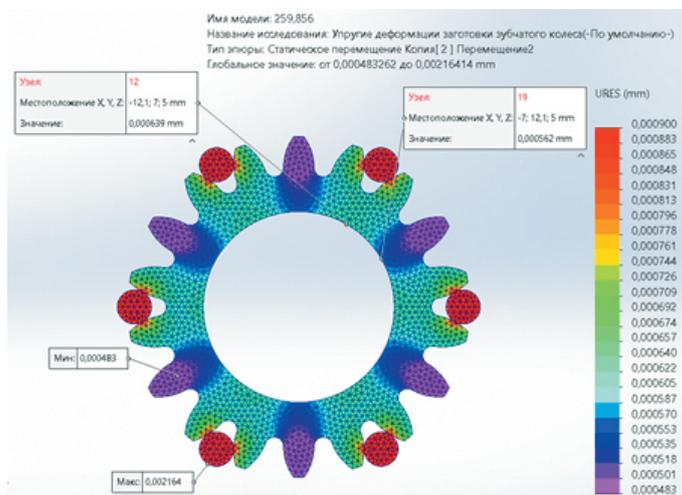


б

Рис. 4. Эпюра технологических упругих деформаций при закреплении в трех-кулачковом самоцентрирующем патроне ($Q_n = 519,712$ Н) за наружный диаметр (а) и за эвольвенту (б)

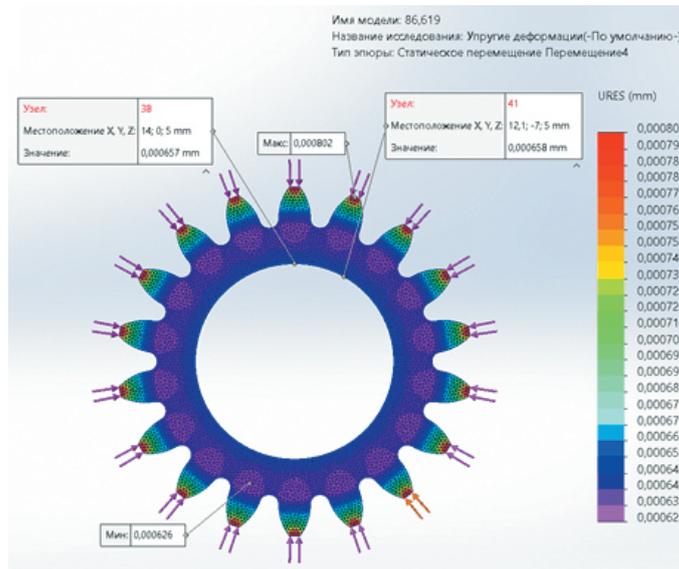


а

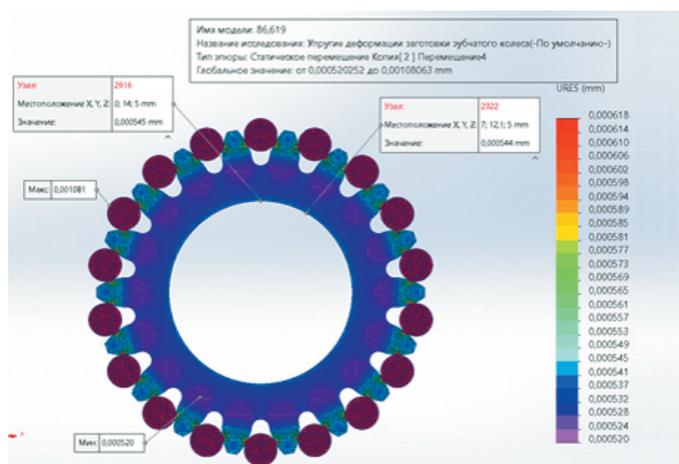


б

Рис. 5. Эпора технологических упругих деформаций при закреплении в шести-кулачковом самоцентрирующем патроне ($Q_n = 259,856$ Н) за наружный диаметр (а) и за эвольвенту (б)



а



б

Рис. 6. Эпора технологических упругих деформаций при закреплении шестерен в самоцентрирующем интегральном патроне ($Q_n = 86,619$ Н) за наружный диаметр (а) и за эвольвенту (б)

Значения геометрических параметров технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни малой технологической жесткости, вызванных ее закреплением в самоцентрирующих кулачковых патронах, для схемы закрепления за наружный диаметр шестерни приведены в табл. 3, а для схемы закрепления за эвольвенту — в табл. 4. Расчет значений выполнялся с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов в системе автоматизированного проектирования SolidWorks Simulation. Были заданы

количество кулачков n , коэффициент трения покоя f и расчетная необходимая сила закрепления на один кулачок Q_n , значения которой взяты из таблицы, приведенной в [31].

Таблица 3

Значения геометрических параметров технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни для схемы закрепления за наружный диаметр

n , шт.	f	Q_n , Н	y'_{1An} , мм	y'_{1Bn} , мм	$\Delta r'_{1n}$, мм
2	0,1	779,568	-0,018026	0,015042	0,033068
	0,2	389,784	-0,008997	0,007513	0,016510
	0,3	259,856	-0,005993	0,004987	0,010980
	0,4	194,892	-0,004494	0,003760	0,008254
3	0,1	519,712	-0,003350	0,001709	0,005059
	0,2	259,856	-0,001675	0,000855	0,002530
	0,3	173,237	-0,001116	0,000569	0,001685
	0,4	129,928	-0,000837	0,000427	0,001264
6	0,1	259,856	-0,000829	-0,000504	0,000325
	0,2	129,928	-0,000416	-0,000253	0,000163
	0,3	86,619	-0,000275	-0,000167	0,000108
	0,4	64,964	-0,000207	-0,000125	0,000082
18	0,1	86,619	-0,000657	-0,000658	0,000001
	0,2	43,309	-0,000328	-0,000329	0,000001
	0,3	28,873	-0,000219	-0,000219	0,000000
	0,4	21,655	-0,000164	-0,000164	0,000000

Таблица 4

Значения геометрических параметров технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни для схемы закрепления за эвольвенту

n , шт.	f	Q_n , Н	y'_{2An} , мм	y'_{2Bn} , мм	$\Delta r'_{2n}$, мм
2	0,1	779,568	-0,014081	0,012798	0,026879
	0,2	389,784	-0,007040	0,006399	0,013439
	0,3	259,856	-0,004694	0,004266	0,008960
	0,4	194,892	-0,003520	0,003200	0,006720
3	0,1	519,712	-0,002308	0,001196	0,003504
	0,2	259,856	-0,001154	0,000598	0,001752
	0,3	173,237	-0,000769	0,000399	0,001168
	0,4	129,928	-0,000577	0,000299	0,000876
6	0,1	259,856	-0,000639	-0,000562	0,000077
	0,2	129,928	-0,000320	-0,000281	0,000039
	0,3	86,619	-0,000213	-0,000187	0,000026
	0,4	64,964	-0,000160	-0,000141	0,000019
18	0,1	86,619	-0,000545	-0,000544	0,000001
	0,2	43,309	-0,000273	-0,000272	0,000001
	0,3	28,873	-0,000182	-0,000181	0,000001
	0,4	21,655	-0,000136	-0,000136	0,000000

Заключение. Анализ данных табл. 3 и 4 позволяет сделать вывод, что существенное искажение формы центрального отверстия от круглости у шестерни происходит только при ее закреплении в двух- и трехкулачковых самоцентрирующих патронах. При закреплении шестерни в шестикулачковом самоцентрирующем патроне за эвольвенту возникает незначительное искажение формы отверстия от круглости по сравнению с искажением при ее закреплении за наружный диаметр. При закреплении шестерни в шестикулачковом самоцентрирующем патроне происходит неравномерный прогиб контура ее отверстия, причем в основном меняется не форма отверстия, а его диаметр. При закреплении шестерни в интегральном патроне за наружный диаметр и за эвольвенту получается практически равномерный прогиб контура ее отверстия по всей окружности, в результате форма отверстия практически не искажается, а уменьшается только диаметр отверстия.

Согласно полученным результатам (см. табл. 3, 4), при закреплении шестерни за эвольвенту в двухкулачковом самоцентрирующем патроне искажение формы отверстия от круглости ($\Delta r'_{22}$) в среднем на 19 % меньше, чем искажение при закреплении за ее наружный диаметр ($\Delta r'_{12}$). При закреплении шестерни за эвольвенту в трехкулачковом самоцентрирующем патроне искажение формы отверстия от круглости ($\Delta r'_{23}$) на 31 % меньше, чем искажение ($\Delta r'_{13}$) при закреплении за ее наружный диаметр.

При закреплении шестерни за эвольвенту в шестикулачковом самоцентрирующем патроне искажение формы ее отверстия от круглости ($\Delta r'_{26}$) в среднем на 76 % меньше, чем искажение ($\Delta r'_{16}$) при закреплении за ее наружный диаметр, а максимальный прогиб контура ее отверстия меньше на 23 %. При закреплении шестерни за эвольвенту в интегральном патроне максимальный прогиб контура ее отверстия получается на 17 % меньше, чем при закреплении за ее наружный диаметр.

Результаты проведенных исследований показали, что при закреплении шестерни за эвольвенту будет меньше технологических упругих деформаций, чем при закреплении за наружный диаметр, независимо от количества кулачков самоцентрирующего патрона n , т. е. при изготовлении шестерней, особенно шестерней малой технологической жесткости в радиальном направлении, рационально применять схему закрепления за эвольвенту. Поскольку технологических упругих деформаций будет меньше и, следовательно, погрешность закрепления также будет меньше, а если еще учитывать и размерный анализ, то и размерная цепь будет короче, что, в совокупности, дает возможность повысить точность изготовления шестерней.

Если сравнивать искажения формы отверстия от круглости при закреплении шестерни за наружный диаметр в зависимости от количества кулачков самоцентрирующего патрона n , то можно сделать вывод, что при закреплении в трехкулачковом самоцентрирующем патроне искажение формы отверстия от круглости ($\Delta r'_{13}$) будет меньше на 85 %, чем искажение с закреплением в двухкулачковом самоцентрирующем патроне ($\Delta r'_{12}$). В шестикулачковом самоцентрирующем патроне искажение ($\Delta r'_{16}$) будет на 94 % меньше, чем искажение при закреплении в трехкулачковом самоцентрирующем патроне ($\Delta r'_{13}$). При закреплении в интегральном патроне искажение ($\Delta r'_{118}$) в среднем на 100 % меньше, чем при закреплении в шестикулачковом самоцентрирующем патроне ($\Delta r'_{16}$).

Если проводить сравнение равномерного максимального прогиба контура отверстия шестерни в зависимости от количества кулачков самоцентрирующего патрона n , то можно сделать вывод, что при закреплении в интегральном патроне равномерный максимальный прогиб контура ее отверстия в среднем на 21 % меньше, чем при закреплении в шестикулачковом самоцентрирующем патроне. Полученные значения можно представить в другой форме. Если возникаемое искажение формы отверстия от круглости с закреплением шестерни за наружный диаметр в двухкулачковом самоцентрирующем патроне принять за 100 %, то при закреплении за эвольвенту в трехкулачковом самоцентрирующем патроне оно в среднем составит 15,32 %, в шестикулачковом самоцентрирующем патроне — в среднем 0,99 %, а в интегральном патроне оно будет в среднем равно 0.

Сравнивая искажения формы отверстия от круглости при закреплении шестерни за эвольвенту в зависимости от количества кулачков самоцентрирующего патрона n , можно сделать вывод, что при закреплении в трехкулачковом самоцентрирующем патроне искажение формы отверстия от круглости ($\Delta r'_{23}$) будет меньше на 87 %, чем при закреплении в двухкулачковом самоцентрирующем патроне ($\Delta r'_{22}$), в шестикулачковом самоцентрирующем патроне ($\Delta r'_{26}$) — на 98 % меньше, чем при закреплении в трехкулачковом самоцентрирующем патроне ($\Delta r'_{23}$), при закреплении в интегральном патроне ($\Delta r'_{218}$) — в среднем на 98 % меньше, чем при закреплении в шестикулачковом самоцентрирующем патроне ($\Delta r'_{26}$).

Было проведено сравнение равномерного максимального прогиба контура отверстия шестерни в зависимости от количества кулачков самоцентрирующего патрона n , в результате которого выяснилось,

что при закреплении в интегральном патроне равномерный максимальный прогиб контура отверстия в среднем на 15 % меньше, чем при закреплении в шестикулачковом самоцентрирующем патроне. Полученные значения можно представить в другой форме: если возникаемое искажение формы отверстия от круглости при закреплении шестерни за эвольвенту в двухкулачковом самоцентрирующем патроне принять за 100 %, то при закреплении за эвольвенту в трехкулачковом самоцентрирующем патроне оно составит в среднем 13,04 %, в шестикулачковом — 0,29 %, в интегральном — 0,01 %.

Исходя из результатов проведенных исследований и сравнения полученных данных, можно дать рекомендации по оптимизации процесса изготовления шестерней, направленные на повышение их точности и качества. Так, предлагается уменьшить технологические упругие деформации отверстий шестерней путем закрепления их за эвольвенту в шестикулачковом самоцентрирующем спирально-реечном патроне [34] с кольцевыми канавками кулачков или кулачками, изготовленными из материала с высоким коэффициентом трения покоя f . Таким образом, можно уменьшить погрешность закрепления до минимальной, тем самым повысив точность механической обработки отверстий шестерней. Это особенно актуально для высокоточных шестерней, имеющих малую технологическую жесткость в радиальном направлении, которые применяются в газотурбинных и реактивных двигателях, а также в газораспределительных системах летательных аппаратов, где требуется точная синхронизация работы клапанов для обеспечения оптимального сгорания топлива и эффективности работы двигателя.

Данная работа дополняет исследования, представленные в [25–30], так как в ней приведены числовые значения технологических упругих деформаций и искажений формы отверстия шестерни, а также выполнено сравнение этих искажений и выявлены процентные соотношения между ними.

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Печенин В.А., Болотов М.А. Математическая модель, имитирующая базирование зубчатых колес на КИМ при использовании штифтов. *Материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта*. М.С. Кокорин, отв. ред. Санкт-Петербург, Изд-во СПбПУ, 2015, с. 285–287.
- [2] Галузина Т.В., Поляков А.В. Исследование изменений формы и расположения кольцевых заготовок малой жесткости. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Авиационная и ракетно-космическая техника*, 2011, № 3 (27), с. 222–226.

- [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.
- [4] Фролов А.А., Васильев А.С. Исследование деформированного состояния заготовок типа колец при установке на станках токарной группы. *Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая научная весна 2016: Машиностроительные технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
URL: https://studvesna.ru/db_files/articles/1511/article.pdf (дата обращения: 25.07.2024).
- [5] Жедь О.В., Копылов В.В. Напряженно-деформированное состояние втулок в зависимости от сил зажима в самоцентрирующем патроне. *Грузовик*, 2018, № 11, с. 24–28.
- [6] Серков, А.С., Масягин 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.
- [7] 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.
- [8] Куклев Л.С., Тазетдинов М.М. Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности. Москва, Машиностроение, 1978, 104 с.
- [9] Серков А.С., Масягин В.Б., Серкова Л.Б. Оптимизация технологии производства шестерней, зубчатых колес, сателлитов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2021, № 4, с. 134–139.
- [10] Елисеев Ю.С. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. Москва, Высшая школа, 2001, 492 с.
- [11] Калашников С.Н., Калашников А.С. Прогрессивные методы зубообработки цилиндрических зубчатых колес. Москва, Машиностроение, 1982, 44 с.
- [12] Калашников С.Н., Калашников А.С., Коган Г.И. [и др.]. Производство зубчатых колес: Справочник. Б.А. Тайц, ред. 3-е изд., перераб. и доп., Москва, Машиностроение, 1990, 464 с.
- [13] Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых передач. Ленинград, Машиностроение, 1978, 137 с.
- [14] Калашников С.Н., Калашников А.С. Зубчатые колеса и их изготовление. Москва, Машиностроение, 1983, 264 с.
- [15] Пономарев В.П., Батов А.С., Захаров А.В. [и др.]. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин. Москва, Машиностроение, 1984, 184 с.
- [16] Жедь О.В., Копылов В.В. Влияние формы отверстия зубчатого венца на его предварительное напряженное состояние при сборке с базовой деталью. Часть 1. *Грузовик*, 2017, № 12, с. 14–15.
- [17] Жедь О.В., Копылов В.В. Влияние формы отверстия зубчатого венца на его предварительное напряженное состояние при сборке с базовой деталью. Часть 2. *Грузовик*, 2018, № 1, с. 18–22.
- [18] Рогов В.А., Жедь О.В. Влияние предварительного напряженного состояния зубчатого венца вследствие натяга с базовой деталью в расчетах на изгибную прочность зуба. *Технология машиностроения*, 2018, № 8, с. 31–39.
- [19] 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, pp. 022035-1–022035-8.
DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022035

- [20] 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.
- [21] Серков А.С., Масыгин В.Б., Серкова Л.Б. Оптимизация технологии производства шестерней, зубчатых колес, сателлитов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2021, № 4, с. 134–139.
- [22] Клепиков В.В. Повышение качества центрирования зубчатых колес. Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2005, № 2, с. 44. *Avtomash.ru*
URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/20050244.htm> (дата обращения: 31.03.2021).
- [23] Клепиков В.В. Центрирование зубчатых колес по эвольвентному шлицевому профилю базового отверстия. Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2004, № 12, с. 46. *Avtomash.ru*
URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20041246.htm> (дата обращения: 31.03.2021).
- [24] 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.
- [25] Рогов В.А., Кошеленко А.С., Хишова Е.С. Исследование напряженного 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Серков А.С., Масыгин В.Б., Артюх Р.Л., Серкова Л.Б., Акимов В.В. Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки зубчатого колеса с применением математических моделей в зависимости от сил зажима в 3-х и 6-ти кулачковых самоцентрирующих патронах. *Омский научный вестник*, 2020, № 4 (172), с. 13–18.
- [31] Серков А.С. Зависимость силы закрепления зубчатого колеса при шлифовании центрального отверстия. *Известия Тульского государственного университета: Технические науки*, 2023, № 7, с. 278–289.
- [32] Серков А.С., Масыгин В.Б., Серкова Л.Б. Разработка графической методики расчета конструктивных элементов для закрепления зубчатых колес. *Известия Тульского государственного университета: Технические науки*, 2021, № 5, с. 389–397.
- [33] Серков А.С., Масыгин В.Б. *Расчет диаметра роликов при закреплении по зубьям*. Свидетельство о государственной регистрации программы для

ЭВМ 2022617841 Российская Федерация. № 2022616889; заявл. 19.04.2022; рег. 26.04.2022.

- [34] Серков А.С., Серкова Л.Б., Масыгин В.Б. *Шестикулачковый самоцентрирующий спирально-реечный патрон*. Пат. № 201747 Российская Федерация, 2020, бюл. № 1, 5 с.

Статья поступила в редакцию 23.07.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Серков А.С., Масыгин В.Б. Исследование технологических упругих деформаций центрального отверстия шестерни малой технологической жесткости, вызванных силами закрепления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 3. EDN WRPDKJ

Серков Александр Сергеевич — ведущий специалист, Омский завод транспортного машиностроения. Область интересов: приспособления для металлообрабатывающих станков, технологическая оснастка, технология машиностроения, упругие деформации, вызванные силами закрепления (технологические упругие деформации), зубчатые колеса малой технологической жесткости, компьютерное моделирование. e-mail: Sanya_93@bk.ru

Масыгин Василий Борисович — канд. техн. наук, профессор, Омский государственный технический университет, кафедра «Технология машиностроения». Область интересов: Математическая модель, компьютерное моделирование, конструкция, прочность, износостойкость, точность, технология, граф, размерный анализ. e-mail: MasaginVB@mail.ru

Studying technological elastic deformations of the central hole of a gear with low technological rigidity caused by the retaining pressure

© A.S. Serkov¹, V.B. Masyagin²

¹ Omsk Plant of Transport Engineering JSC, Omsk, 644005, Russian Federation

² Omsk State Technical University, Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk, 644050, Russian Federation

The paper presents a study devoted to technological elastic deformations of the central hole of a gear with the low technological rigidity caused by its fastening in the self-centering jaw chucks, as well as in the integral chuck. It provides two schemes for changing the hole geometric parameters with fastening such a gear in a three-jaw self-centering chuck by the outer diameter or by the involute. Areas of the gear hole contour deflection and bending are determined. The paper presents numerical values of technological elastic deformations of the central hole of a gear obtained in studying the schemes of fastening by the outer diameter and by the involute in two-, three-, six-jaw self-centering chucks, as well as fastening in the integral self-centering chuck. The technological elastic deformations are computed using simulation by the finite element method in the SolidWorks Simulation automated design system. Obtained results of the technological elastic deformations depending on the number of the self-centering chuck jaws are compared, and the corresponding relationships are revealed. The paper concludes that fastening the gear by the involute is the most optimal option in terms of the lowest technological elastic deformations and the short dimensional chain compared to fastening by the outer diameter. It provides recommendations for optimizing manufacture of gears with the low technological rigidity.

Keywords: *technological elastic deformations of the central hole of a gear with low technological rigidity, satellite, gear*

The presented study was funded by RFBR within the frames of the Research Project No. 20-38-90226.

REFERENCES

- [1] Pechenin V.A., Bolotov M.A. Matematicheskaya model, imitiruyushchaya bazirovaniye zubchatykh koles na KIM pri ispolzovanii shtiftov [A mathematical model simulating the basing of gears on CMM when using pins]. In: *Materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem. Institut metallurgii, mashinostroeniya i transporta* [Materials of the scientific forum with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport]. M.S. Kokorin, ed. St. Petersburg, SPBPU Publ., 2015, pp. 285–287.
- [2] Galuzina T.V., Polyakov A.V. Issledovanie izmeneniy formy i raspolozheniya koltsevykh zagotovok maloy zhestkosti [Research of changes in shape and location ring details with small rigidity]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika — Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2011, no. 3 (27), pp. 222–226.
- [3] Konstantinova A.N. Eksperimentalnoye obosnovaniye primeneniya podkhoda “smyagchennykh” rezhimov rezaniya dlya obrabotki tonkostennykh detaley [Experimental justification for the use of the “softened” cutting modes approach]

- for machining thin-walled parts]. *Evraziyskiy soyuz uchenykh — Eurasian Union of Scientists*, 2018, no. 4–1 (49), pp. 22–25.
- [4] Frolov A.A., Vasilyev A.S. Issledovanie 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]. In: *Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov. Studencheskaya vesna 2016: Mashinostroitelnye tekhnologii* [All-Russian Scientific and Technical Conference of Students. Student Scientific Spring 2016: Mechanical Engineering Technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 2016. Available at: https://studvesna.ru/db_files/articles/1511/article.pdf (accessed July 25, 2024).
- [5] Zhed O.V., Kopylov V.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye vtulok v zavisimosti ot sil zazhima v samotsentriruyushchem patrone [Stress-strain state of the sleeves depending on the clamping forces in the self-centering patron]. *Gruzovik — Truck*, 2018, no. 11, pp. 24–28.
- [6] Serkov A.S., Masyagin V.B., Serkova L.B. Uprugie deformatsii kolets i vtulok pri ikh zakreplenii v samotsentriruyushchikh patronakh i ikh vliyanie 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 Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskije nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2022, no. 2, pp. 389–397.
- [7] Boyarshinov S.V., Kuleshova Z.G., Shatilov A.A. *Deformatsiya zagotovok pri zakreplenii v stanochnykh prispособleniyakh i ikh vliyanie na tochnost mekhanicheskoy obrabotki* [Deformations of workpieces when fixed in the machine tools and their effect on accuracy of the mechanical processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 43 p.
- [8] Kuklev L.S., Tazetdinov M.M. *Osnastka dlya obrabotki nezhestkikh detaley vysokoy tochnosti* [Tooling for machining the non-rigid high-precision parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 104 p.
- [9] Serkov A.S., Masyagin V.B., Serkova L.B. Optimizatsiya tekhnologii proizvodstva shesterney, zubchatykh koles, satellitov [Optimization of the production technology of gears, gears, satellites]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskije nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2021, no. 4, pp. 134–139.
- [10] Eliseev Yu.S. *Proizvodstvo zubchatykh kolets gazoturbinnnykh dvigateley* [Production of gears of the gas turbine engines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2001, 492 p.
- [11] Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.S. *Progressivnyye metody zuboobrabotki tsilindricheskikh zubchatykh koles* [Progressive methods of gear turning of cylindrical gears]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 44 p.
- [12] Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.S., Kogan G.I. et al. *Proizvodstvo zubchatykh koles: Spravochnik* [Production of gears: Handbook]. B.A. Tayts, ed. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, 1990, Mashinostroenie Publ., 1990, 464 p.
- [13] Tayts B.A. *Tochnost i kontrol zubchatykh peredach [Precision and control of gears]*, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1978, 137 p.
- [14] Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.S. *Zubchatye kolea i ikh izgotovlenie* [Gears and their manufacture]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983, 264 p.
- [15] Ponomarev V.P., Batov A.S., Zakharov A.V. et al. *Konstruktorskotekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley mashin* [Design and technological quality assurance of the machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 184 p.
- [16] Zhed O.V., Kopylov V.V. Vliyaniye formy otverstiya zubchatogo ventsa na ego predvaritelnoe napryazhennoe sostoyaniye pri sborke s bazovoy detalyu [Influ-

- ence of the form holes face on the prior stress state in the assembly with the base detail]. Part 1. *Gruzovik — Truck*, 2017, no. 12, pp. 14–15.
- [17] Zhed O.V., Kopylov V.V. Vliyaniye formy otverstiya zubchatogo ventsa na ego predvaritelnoe napryazhennoe sostoyaniye pri sborke s bazovoy detalyu [Influence of the form holes face on the prior stress state in the assembly with the base detail]. Part 2. *Gruzovik — Truck*, 2018, no. 1, pp. 18–22.
- [18] Rogov V.A., Zhed O.V. Vliyaniye predvaritelnogo napryazhennogo sostoyaniya zubchatogo ventsa vsledstvie natyaga s bazovoy detalyu 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, pp. 31–39.
- [19] 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, pp. 022035-1–022035-8.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022035>
- [20] Serkov A.S. Vnedrenie universalnoy osnastki v protsess shlifovaniya otverstiya i tortsa zagotovki satellita [Introduction of universal tooling in the process of grinding the hole and end of the satellite billet]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2020, no. 4, pp. 316–320.
- [21] Serkov A.S., Masyagin V.B., Serkova L.B. Optimizatsiya tekhnologii proizvodstva shesterney, zubchatykh koles, satellitov [Optimization of the production technology of gears, gears, satellites]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2021, no. 4, pp. 134–139.
- [22] Klepikov V.V. Povyshenie kachestva tsentrirovaniya zubchatykh koles [Improving the quality of gear centring]. *Avtomash.ru* Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2005/20050244.htm> (accessed March 31, 2023).
- [23] Klepikov V.V. Tsentrirovaniye zubchatykh koles po evolventnomu shlitsevomu profilyu bazovogo otverstiya [Centring of gears on the involute spline profile of the base bore]. *Avtomash.ru* Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20041246.htm> (accessed March 31, 2023).
- [24] Malikov A.A., Malakhov G.V., Mikhailov A.V. Opredelenie parametrov zubchatogo ventsa zagotovok s predvaritelno oformlennymi zubyami [Determination of parameters of toothed crown of purveyances with the preliminary executed points]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2017, no. 8–1, pp. 344–353.
- [25] Rogov V.A., Koshelenko A.S., Khishova E.S. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya zubchatogo ventsa na opticheskikh modelyakh ot sil zazhima v samotsentriruyushchem 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 druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya — RUDN Journal of Engineering Research*, 2015, no. 4, pp. 29–37.
- [26] Rogov V.A., Koshelenko A.S., Khishova E.S. Issledovanie metodom fotomekhaniki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zubchatogo ventsa, vyzvannogo zazhimom v samotsentriruyushchem patrone pri mekhanicheskoy obrabotke [Research by photomechanics method strain intensity state of toothing through clamping forces in self-centering chuck at machining stage]. *Vestnik MGTU “Stankin” — Stankin Journal*, 2015, no. 4 (35), pp. 36–41.

- [27] Rogov V.A., Koshelenko A.S., Zhed O.V., Khishova E.S. Issledovanie metodom fotomekhaniki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zubchatogo ventsa ot sil zazhima v samotsentriruyushchem 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, pp. 19–22.
- [28] Rogov V.A., Koshelenko A.S., Khishova E.S. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya zubchatogo ventsa na opticheskikh modelyakh ot sil zazhima v samotsentriruyushchem 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, pp. 10–14.
- [29] Serkov A.S., Masyagin V.B., Serkova L.B. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zagotovki zubchatogo koleasa na matematicheskikh modelyakh [Investigation of the stress-strain state of the workpiece gear on mathematical models]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2020, no. 5, pp. 362–373.
- [30] Serkov A.S., Masyagin V.B., Artyukh R.L., Serkova L.B. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zagotovki zubchatogo koleasa s primeneniem 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), pp. 13–18.
- [31] Serkov A.S. Zavisimosti sily zakrepleniya zubchatogo koleasa pri shlifovanii tsentralnogo otverstiya [Dependence of the force of fastening the gear wheel when grinding the central hole]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2023, no. 7, pp. 278–289.
- [32] 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 Tulskogo gosudarstvennogo universiteta: tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University: Technical Sciences*, 2021, no. 5, pp. 389–397.
- [33] Serkov A.S., Masyagin V.B. *Raschet diametra rolikov pri zakreplenii po zubyami* [Computation of the diameter of the rollers when fixed by teeth]. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2022617841 Rossiyskaya Federatsiya. No. 20226186889: zayavl. 19/04/2022; reg. 26/04/2022 [Certificate of State Registration of the Computer Program 2022617841 Russian Federation. Application No. 2022616889 dated April 19, 2022; registration April 26, 2022].
- [34] Serkov A.S., Serkova L.B., Masyagin V.B. *Shestikulachkovyi samotsentriruyushchiy spiralno-reechnyi patron* [Six-cam self-centering spiral rack cartridge]. Patent No. 201747 Russian Federation, 2020, bul. no. 1, 5 p.

Serkov A.S., Leading Specialist, Omsk Plant of Transport Engineering JSC. Scientific interests: metalworking machine devices, technological equipment, mechanical engineering technology, elastic deformations caused by the fastening forces (technological elastic deformations), low technological rigidity gears, computer simulation.

e-mail: Sanya_93@bk.ru

Masyagin V.B., Cand. Sc. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, Omsk State Technical University. Scientific interests: mathematical model, computer simulation, construction, strength, wear resistance, accuracy, technology, graph, dimensional analysis. e-mail: MasaginVB@mail.ru