

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИЛ ЗАЖИМА В ТРЕХ- И ШЕСТИКУЛАЧКОВЫХ САМОЦЕНТРИРУЮЩИХ ПАТРОНАХ

В статье рассмотрены результаты исследования 3D-модели зубчатого колеса методом конечных элементов (МКЭ) на напряженно-деформированное состояние (НДС). Модель находится в статическом равновесии под действием сил зажима кулачками самоцентрирующего патрона при различных схемах базирования. Новизна заключается в исследовании влияния сил зажима на НДС зубчатого колеса при различных схемах базирования в трех- и шестикулачковых патронах. Производится сравнение полученных изображений с помощью МКЭ с изображениями, полученными физическим экспериментом (фотомеханика).

Ключевые слова: нежесткая заготовка зубчатого колеса, метод конечных элементов, математическое моделирование, математическая модель, 3D-моделирование, трехмерная модель, АРМ FEM, Компас 3D, напряженно-деформированное состояние (НДС).

Введение. Изготовление нежестких зубчатых колёс или шестерней повышенной точности, подвергающихся закалке или цементации на этапах технологического процесса, связано с проблемой обеспечения точности формы базового отверстия, эвольвентного профиля колеса и их относительного расположения друг относительно друга. При цементации или закалке заготовки колеса возникает коробление поверхностей, смещаются оси делительного диаметра и центрального отверстия друг относительно друга, возникает погрешность эксцентриситета. Поэтому в технологический процесс после термической обработки вводят финишные операции (шлифование базовых и рабочих поверхностей).

Если не вводить эти операции, то в процессе эксплуатации такие детали в большей степени будут подвержены повышенному износу, в результате чего будет сокращаться срок службы изделия.

Оценка погрешности базирования и измерения радиальных биений дана в работе [1].

Известно влияние усилия зажима заготовки на погрешность обработки [2]. Усилия зажима заготовок в приспособлениях вызывают упругие деформации, которые порождают погрешности ее формы (рис. 1).

При зажиме втулки в самоцентрирующем патроне возникает её упругая деформация, при этом в местах «А» контакта кулачков радиус заготовки уменьшается, а в точках «В» увеличивается. Погрешность геометрической формы обрабатываемого отверстия втулки рассчитывается по формуле $\Delta = r_A - r_B$, где r_A — наибольший радиус, а r_B — наименьший радиус (рис. 1в). Погрешность геометрической формы отверстия при ее закреплении в кулачковых патронах значительна. Геометрическая форма отверстия зависит от числа зажимных кулачков патрона. По данным работы [3] при увеличении количества

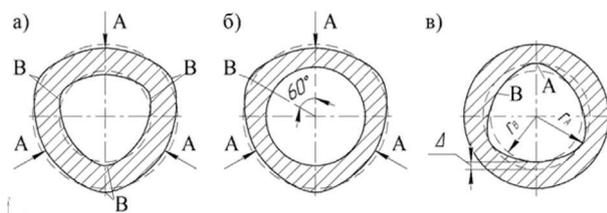


Рис. 1. Схема возникновения погрешности формы отверстия тонкостенной втулки: а) упругая деформация втулки при закреплении в трехкулачковом патроне; б) форма отверстия после шлифования; в) форма контура отверстия после раскрепления втулки

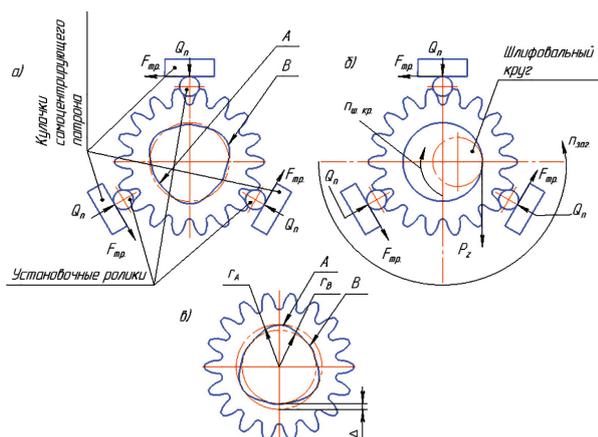


Рис. 2. Схема нагружения и возникновения погрешности формы отверстия заготовки зубчатого колеса: а) упругая деформация заготовки при закреплении в трехкулачковом патроне; б) форма отверстия после шлифования; в) форма контура отверстия после раскрепления заготовки

зажимных кулачков патрона погрешность геометрической формы втулки заметно уменьшается, т. е., если погрешность геометрической формы тонкостенной втулки после обработки с закреплением в двухкулачковом патроне принять за 100 %, то при закреплении в трехкулачковом патроне она составит 21 %, в четырехкулачковом — 8 %, в шестикулачковом — 2 %.

В производстве для окончательной обработки центрального отверстия зубчатого колеса в основном применяют три схемы базирования:

1) по эвольвентному профилю через установочные ролики в трехкулачковом самоцентрирующем патроне [4–8];

2) по внешнему контуру зубчатого колеса напрямую в трехкулачковом самоцентрирующем патроне;

3) по эвольвентному профилю через установочные ролики в шестикулачковом самоцентрирующем патроне.

Первая и третья схемы базирования являются наиболее оптимальными, так как обеспечивается короткая размерная цепь между отверстием зубчатого колеса и делительной окружностью. В случае применения второй схемы требуется дополнительно повышать точность промежуточной базы (наружный диаметр), что приводит к лишним материальным затратам.

На рис. 2 представлена схема нагружения и возникновения погрешности формы отверстия, где Q_n

— сила зажима; $F_{тр.}$ — сила трения; $n_{ш.кр.}$ — частота вращения шлифовального круга; $n_{заг.}$ — частота вращения заготовки; P_z — составляющая равнодействующей силы резания.

В рассмотренных трёх случаях отверстие зубчатого колеса перед обработкой (шлифование) упруго деформируется из-за приложенных сил зажима, что приводит к изменению его начальной формы (рис. 2а). В процессе обработки в патроне в зажатом состоянии обеспечивается правильная и точная форма отверстия (рис. 2б). После снятия с зубчатого колеса сил зажима упругие деформации восстанавливаются и достигнутая при обработке правильная и точная форма отверстия зеркально изменяется (рис. 2в) в соотношении с вариантом на момент начала обработки.

Рассмотрим информацию по данному вопросу из работы [9]. При чистовой обработке центрального отверстия зубчатого колеса следует учитывать отклонение от круглости $\Delta = r_A - r_B$, которое возникает при закреплении в патроне (рис. 2), отклонение от круглости можно рассчитать по формуле:

$$\Delta = K_n \frac{\sum F r^3}{J E},$$

где K_n — коэффициент, значение которого зависит от количества зажимных кулачков n (табл. 1); $\sum F$ — сумма сил зажима; r — средний радиус тела колеса без учета зубьев; J — момент инерции; E — модуль упругости материала зубчатого колеса.

Рассмотренная информация о деформациях тонкостенной втулки при закреплении в патронах может быть применима в данном исследовании для случая базирования по внешнему контуру зубчатого колеса.

Объектом исследования является трёхмерная модель заготовки зубчатого колеса. Предметом исследования является напряжённо-деформированное состояние трёхмерной модели заготовки зубчатого колеса в момент её закрепления кулачками в патроне с имитацией различных схем базирования.

Обзор литературы. В работе [10] рассмотрены теоретические основы, практика, методы, инструменты, материалы и оборудование фотомеханики. В работах [11–16], основанных на работе [10], рассмотрены исследования НДС на оптических моделях зубчатых колёс от влияния сил зажима и количества кулачков патрона, произведены достаточно сложные трудоёмкие физические эксперименты.

В качестве материала оптической модели зубчатого колеса выбрали пластину толщиной 5 мм из оптически чувствительного прозрачного полимера, выполненную на основе эпоксидной смолы ЭДБ, отвержденной метилтетрагидрофталевым ангидридом. Диск с отверстием $d_0 = 32$ мм и внешним радиусом $Re = 30$ мм, на котором нарезалось модульной червячной фрезой зубчатое колесо на зубофрезерном станке.

С целью проведения физических экспериментов методом фотомеханики была разработана и изготовлена конструкция универсального нагружающего устройства [12–16], на котором можно реализовать три схемы (по эвольвенте и по внешнему контуру) зажима модели зубчатого колеса в трех- и шестикулачковых патронах.

В работах [11–16] приведены результаты экспериментов о НДС контура отверстия модели зуб-

Зависимость коэффициента K_n от количества кулачков

n	3	4	5	6	7	8
K_n	0,009	0,0025	0,001	0,0005	0,0002	0,0001

чатого колеса при направленном зажиме в аналогах трех-, шестикулачкового и интегрального самоцентрирующего патрона. Установочные ролики рассчитывают по стандартной методике [17].

Был сделан следующий вывод: чем больше точек приложения составляющей силы зажима, тем меньше ее величина на каждый кулачок, поэтому отверстие оптической модели зубчатого колеса подвержено более равномерному НДС. Эксперименты по нагружению модели зубчатого колеса производились на поляризационно-проекторной установке ППУ-7 в лаборатории фотомеханики кафедры технологии машиностроения инженерного факультета РУДН. На цифровой фотоаппарат снимались изображения (фотограммы) в прямом потоке монохроматического света ртутной лампы и в белом свете. По цветным изображениям производили расшифровку нулевых и изотропных зон напряженной оптической модели, а по изображениям, снятым в монохроматическом свете ртутной лампы, выполняли подсчет полос и оценку напряженного состояния оптической модели зубчатого колеса. Были приведены эпюры напряжений.

На контуре отверстия оптической модели выявлялось наличие на нем нулевых точек. Нулевые точки свидетельствуют о смене знака контурных напряжений. Участки тела зубчатого колеса, на которых отсутствуют изохромы и которые окрашены в черный цвет при съёмке в потоке белого света, поляризованного по кругу, являются изотропными или нулевыми зонами (точками).

На контуре отверстия нагруженной оптической модели нулевая точка свидетельствует об отсутствии в ней каких-либо напряжений. Напряжения, которые расположены по разные стороны от нулевых точек, информируют о том, что в этих соседних участках напряженного контура происходит смена знака нормальных главных напряжений, которые направлены по касательной к контуру в точке касания.

В работе [12] сделан вывод о том, что вариант базирования по эвольвентному профилю является наиболее предпочтительным из-за минимальных напряжений, возникающих на контуре отверстия и, следовательно, минимальных упругих деформаций кольцевого контура отверстия от сил зажима до начала его обработки.

В работе [13] определено, что перераспределение силы зажима на большее число точек её приложения уменьшает как величину хода упругих напряжений, а следовательно, и деформаций, так и создает равномерное НДС одного знака на контуре отверстия, что, в свою очередь, минимизирует его влияние на искажение формы после снятия сил зажима.

Следует отметить, что такой физический эксперимент достаточно дорогостоящий и трудоёмкий как с точки зрения материальных ресурсов для обеспечения эксперимента, так и с точки зрения временных затрат, особенно при расшифровке картин

(изображений) напряжений. Ещё одним недостатком является то, что в данном эксперименте тяжело учесть остаточные напряжения, которые возникают в процессе изготовления оптических моделей, а также остаточные напряжения, которые накапливаются при проведении повторных экспериментов. Таким образом, это может исказить результаты картин (изображений) напряжений, поэтому предлагается произвести исследование с помощью МКЭ, которое не имеет вышеописанных затрат и недостатков в условиях применения высокопроизводительных ЭВМ.

Постановка задачи. Для установления влияния на напряжённо-деформированное состояние зубчатого колеса в зависимости от сил зажима кулачками самоцентрирующего патрона необходимо выполнить исследование с помощью метода конечных элементов. Для исследования моделируется напряжённо-деформированное состояние нежесткого зубчатого колеса от действия сил зажима в трех- и шестикулачковом патроне. Сила зажима для каждого варианта рассчитывается из условия постоянства момента сил трения, обеспечивающих надежное удержание заготовок в патроне от сил резания.

Теория. Геометрические параметры зубчатого колеса: модуль зуба $m=3$ мм; угол профиля $\alpha=20^\circ$; радиус делительной окружности $r=27$ мм; радиус вершин зубьев колеса $R_e=30$ мм; радиус основной окружности $r_0=25,37$ мм; радиус окружности точки касания ролика с зубьями $R\approx 28,6$ мм; число зубьев $Z=18$; расчетный диаметр установочного ролика $d=8$ мм; точка контакта ролика и кулачка $X_0=34,76$ мм; угол соответствующий половине шага зубьев $\varphi=10^\circ$; толщина зуба по делительной окружности $S=4,71$ мм. Для базирования по эвольвентному профилю зубьев колеса диаметр установочного ролика d приспособления рассчитан по стандартной методике [17]. Рассчитан радиус R контакта ролика с зубом и кулачка X_0 с роликом для установки зубчатого колеса в самоцентрирующем патроне (рис. 3).

Результаты экспериментов и обсуждение результатов. Моделирование напряженно-деформированного состояния зубчатого колеса при базировании по эвольвенте в трехкулачковом патроне.

Для расчета была разработана трёхмерная модель зубчатого колеса с числом зубьев $z=18$, модулем зуба $m=3$ мм, центральным отверстием $d=32$ мм (рис. 4). Толщина модели зубчатого колеса равна 5 мм, материал сталь 20X2H4A ГОСТ 4543-2016.

Исследования НДС трёхмерной модели зубчатого колеса производились на ЭВМ в программном продукте «Компас-3D V16.1 APM FEM: Прочностной анализ».

Закрепления в данном случае устанавливаются по торцевой поверхности и по эвольвенте зубьев колеса.

В результате расчётов было получено изображение напряжений трёхмерной модели зубчатого

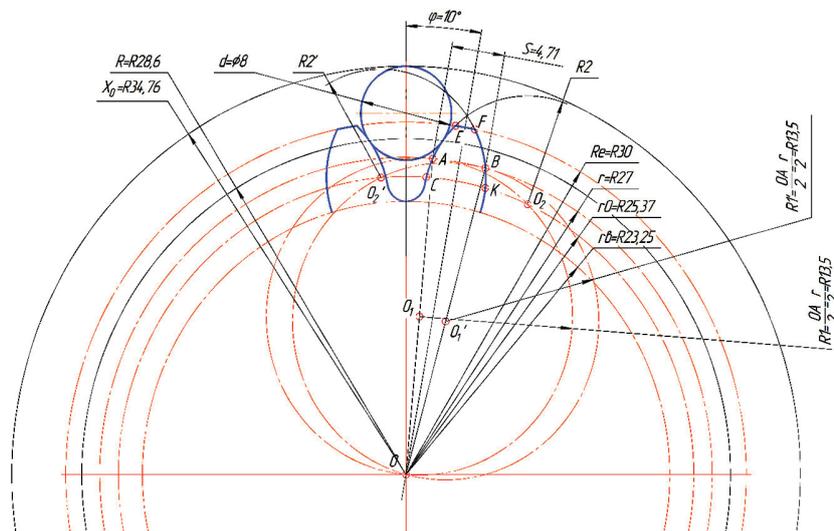


Рис. 3. Схема для расчета диаметра установочных роликов технологической оснастки

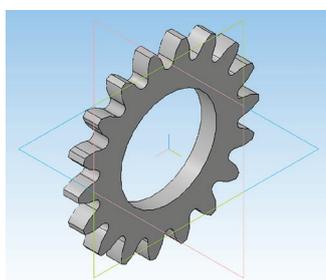


Рис. 4. Трёхмерная модель зубчатого колеса

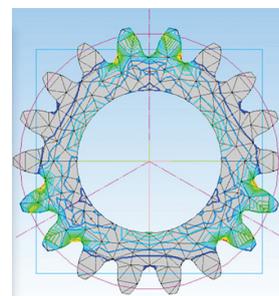


Рис. 6. Изображение с отображением изолиний

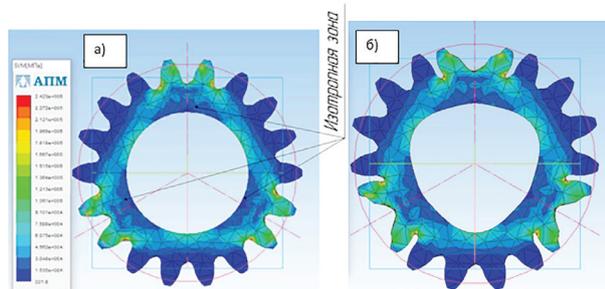


Рис. 5. Изображение нагруженного зубчатого колеса силами зажима по эвольвенте в случае применения трехкулачкового самоцентрирующего патрона:
а) без отображения перемещений;
б) с отображением перемещений

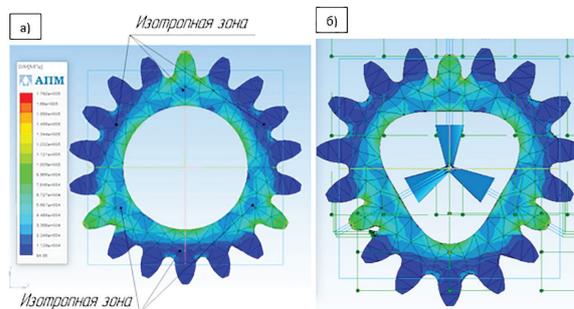


Рис. 7. Изображение нагруженного зубчатого колеса силами зажима по наружному диаметру в случае применения трехкулачкового самоцентрирующего патрона: а) без отображения перемещений;
б) с отображением перемещений

колеса (рис. 5). Визуально, по цвету, определяется величина напряжений: красным цветом — максимальное значение, синим — минимальное, нулевые или изотропные зоны также окрашены в синий цвет. Аналогично оптическим моделям [10–16], на свободном контуре отверстия нагруженной модели нулевая точка указывает на отсутствие в ней напряжений; те напряжения, которые располагаются по разные стороны от нулевых точек, указывают на то, что на таких напряженных участках происходит смена знака нормальных главных напряжений, которые направлены по касательной к контуру в точке касания. Для наглядности было построено изображение нагруженного зубчатого колеса с ото-

бражением изолиний (рис. 6). Полученная картина изолиний отображает максимальные касательные напряжения.

Моделирование напряженно-деформированного состояния зубчатого колеса при базировании по наружному диаметру в трехкулачковом патроне.

Производится аналогично методу, описанному выше, за исключением того, что закрепления устанавливаются по внешнему диаметру зубьев колеса. Была получена картина напряжений трёхмерной модели зубчатого колеса (рис. 7).

Для наглядности было построено изображение нагруженного зубчатого колеса с отображением изолиний (рис. 8).

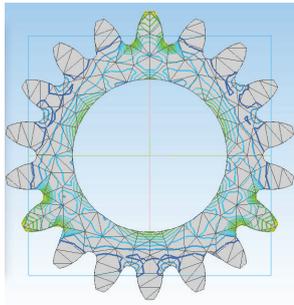


Рис. 8. Изображение с отображением изолиний

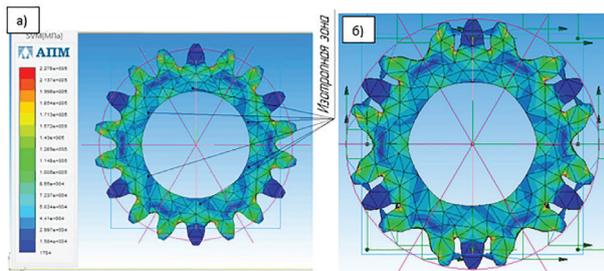


Рис. 9. Изображение нагруженного зубчатого колеса силами зажима по эвольвенте в случае применения 6-ти кулачкового самоцентрирующего патрона:
а) без отображения перемещений;
б) с отображением перемещений

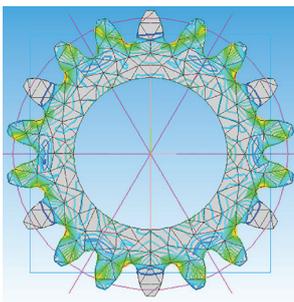


Рис. 10. Изображение с отображением изолиний

Моделирование напряженно-деформированного состояния зубчатого колеса при базировании по эвольвенте в шестиклачковом патроне.

Производится аналогично методу, описанному в первой схеме базирования. Закрепления в данном случае устанавливаются по торцевой поверхности и по эвольвенте зубьев колеса. В результате расчетов была получена картина напряжений трехмерной модели зубчатого колеса (рис. 9).

Для наглядности было построено изображение нагруженного зубчатого колеса с отображением изолиний (рис. 10).

Заключение. В варианте базирования по эвольвенте зуба в трехкулачковом патроне (рис. 5) имеет место значительное отличие в характере НДС контура отверстия от сил зажима. Анализируя количество изолиний (рис. 6 и рис. 8), лежащих вблизи контура отверстия колеса, был сделан вывод о том, что растягивающих и сжимающих напряжений при базировании по эвольвентному профилю зуба будет намного меньше, чем при базировании по внеш-

нему контуру зуба. Характер перемещений точек контура отверстия колеса будет аналогичным его напряженному состоянию. Это даёт право утверждать, что вариант базирования по эвольвентному профилю наиболее предпочтителен в связи с минимальными напряжениями, возникающими на контуре отверстия и, следовательно, упругими перемещениями точек контура отверстия от сил зажима до начала его обработки (шлифование), которые изменяют исходную форму, в доказательство приведены изображения напряжений с отображением перемещений (рис. 5б и рис. 7б).

В случае базирования по эвольвенте в шестиклачковом патроне и варианту базирования по эвольвенте в трехкулачковом патроне характер НДС контура отверстия для первой схемы базирования качественно отличается (рис. 9). Присутствуют как напряжения сжатия, так и напряжения растяжения, причём они равны друг другу. На окружности в каждом радиальном сечении напряженного тела колеса наблюдается изотропная зона, которая то приближается к зубчатому контуру в местах приложения силы зажима, то отдаляется от него, выходя на контур отверстия на участках под ненагруженными зубьями, в этих местах проявляются нулевые точки с короткими участками растягивающих напряжений с незначительными значениями.

Таким образом, при базировании в шестиклачковом патроне по эвольвенте зуба контур отверстия зубчатого колеса незначительно изменяет как свою форму, так и свой диаметральный размер (рис. 9б). Чем больше суммарный ход упругих напряжений с противоположным знаком, тем больше будут искажения формы отверстия, т.к. их влияние разнонаправлено [11 – 16].

Анализ результатов свидетельствует о том, что перераспределение силы зажима на большее число точек ее приложения уменьшает как величину хода упругих напряжений, следовательно, и перемещений, так и создает равномерное НДС одного знака на контуре отверстия, что минимизирует его влияние на изменение формы после снятия сил зажима [11 – 16]. Полученные результаты соответствуют реальной конструкции с учетом коэффициентов геометрического и силового подобия.

Изображения, полученные математическим моделированием, схожи с изображениями, которые были получены физическим экспериментом средствами фотомеханики [11 – 16].

МКЭ позволяет исследовать конструкции почти неограниченной степени сложности, в то время как это объективно невозможно с использованием аналитических методов [18].

В дальнейшем планируется исследовать численные значения перемещений точек контура отверстия, полученные физическим экспериментом с численными значениями перемещений, полученными математическим моделированием.

Библиографический список

1. Печенин В. А., Болотов М. А. Математическая модель, имитирующая базирование зубчатых колёс на КИМ при использовании штифтов // Неделя науки СПбПУ: сб. тр. конф. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2015. С. 285 – 287. ISBN 978-5-7422-5080-7.
2. Маталин А. А. Технология машиностроения. 4-е изд., стер. М.: Лань, 2016. 512 с. ISBN 978-5-8114-0649-4.
3. Основы технологии машиностроения / Под ред. В. С. Корсакова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 416 с.

4. Серков А. С., Сайфулин И. И., Палина О. В. [и др.]. Снижение себестоимости шлифования посадочных отверстий и торцов цилиндрических прямозубых зубчатых колес за счёт внедрения универсальной оснастки // *Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. тр. конф. Курск: Университетская книга, 2017. С. 323–328. ISBN 978-5-9908594-1-8.*
5. Серков А. С., Антропова Л. Б. Внедрения универсальной оснастки в операцию шлифования центральных отверстий цилиндрических прямозубых зубчатых колёс // *Метрология, стандартизация и управление качеством: сб. тр. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. С. 105–108.*
6. Серков А. С., Антропова Л. Б. Шлифование центрального отверстия цилиндрического прямозубого зубчатого колеса с помощью универсальной оснастки // *Проблемы эффективного использования научного потенциала общества: сб. ст. В 3 ч. Стерлитамак: АМИ, 2019. Ч. 2. С. 178–181.*
7. Серков А. С., Антропова Л. Б. Обработка отверстия и торца цилиндрического прямозубого зубчатого колеса с помощью универсальной оснастки методом шлифования // *Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники: сб. ст. В 2 ч. Стерлитамак: АМИ, 2019. Ч. 1. С. 33–36.*
8. Серков А. С., Серкова Л. Б., Елецкая С. Ф. Применение универсальных трёхкулачковых патронов для шлифования отверстий в цилиндрических прямозубых зубчатых колёсах // *Метрология, стандартизация и управление качеством: сб. тр. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 81–84.*
9. Калашников С. Н., Калашников А. С., Коган Г. И. [и др.]. Производство зубчатых колес: справ. / под общ. ред. Б. А. Тайца. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 464 с. ISBN 5-217-00398-7.
10. Кошеленко А. С., Позняк Г. Г. Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. М.: Граница, 2004. 296 с. ISBN 5-94691-109-0.
11. Бердашев Р. С. Исследование методом фотомеханики влияния на напряженно-деформированное состояние зубчатого колеса сил зажима в самоцентрирующем патроне // *Дню науки-2014 посвящается...: сб. науч. ст. М.: Изд-во РУДН, 2014. С. 76–80. ISBN 978-5-209-05679-9.*
12. 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.*
13. 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.*
14. 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.*
15. 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.*
16. 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 Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709, Issue 2. P. 022035-1–022035-8. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022035.*
17. Болотин Х. Л., Костромин Ф. П. Станочные приспособления. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1973. 344 с.
18. Горощев А. В. Желаемое и действительное в методе конечных элементов. URL: <http://www.cad.dp.ua/obzors/stat-new.php> (дата обращения: 15.03.2020).
-
- СЕРКОВ Александр Сергеевич**, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).
SPIN-код: 8065-4788
Адрес для переписки: Sanya_93@bk.ru
- МАСЯГИН Василий Борисович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ.
SPIN-код: 7032-2852
Адрес для переписки: masaginvb@mail.ru
- АРТЮХ Роман Леонидович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ.
SPIN-код: 1024-2344
Адрес для переписки: artukh_roman@rambler.ru
- СЕРКОВА Любовь Борисовна**, ассистент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ.
Адрес для переписки: lubashka_2010@mail.ru
- АКИМОВ Валерий Викторович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета.
Адрес для переписки: splavtini@mail.ru

Для цитирования

Серков А. С., Масягин 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 трех- и шестиклачковых самоцентрирующих патронах // *Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 13–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-13-18.*

Статья поступила в редакцию 17.04.2020 г.

© А. С. Серков, В. Б. Масягин, Р. Л. Артюх, Л. Б. Серкова, В. В. Акимов