

УДК 621.833

Г. В. Малахов, канд. техн. наук, доцент, **О. Л. Золотухина**, канд. техн. наук, доцент
Тульский государственный университет, г. Тула, Россия
Тел. / Факс: +7(4872) 254648, E-mail: tms@tsu.tula.ru

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРИПУСКА ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОФОРМЛЕННЫМИ ЗУБЬЯМИ

Установлены необходимые составляющие для аналитического определения припуска на боковых сторонах зубьев заготовок с предварительно оформленным штамповкой венцом для чистового зубонарезания. В основе их определения - специфические погрешности зубчатых колес, возникающие как в процессе изготовления зубчатой заготовки, так и ее чистовой зубообработки.

Ключевые слова: зубообработка, технологическая схема, заготовки с зубом, припуск, составляющие припуска, погрешности зубчатого колеса.

G. V. Malakhov, O. L. Zolotukhina

COMPONENTS OF THE ALLOWANCE FOR GEAR TEETH MACHINED FROM A FORGED WORKPIECE

Installed the necessary components for analytical determination of the allowance for the sides of the teeth of workpieces with pre-decorated with stamped crown for finishing upon ratana. Based on the specific error of gears that occurs in the process of manufacturing of gear blanks and finishing gear treatment.

Keywords: gear treatment, the technological scheme of the workpiece with the tooth, allowance components of the allowance, the error of the gears.

1. Введение

Производство зубчатых колес остается и в настоящее время одним из наиболее широкомасштабных и трудоемких видов производств современного машиностроения. Совершенствование его технологии для колес средних модулей в условиях массового и крупносерийного производств направлено на уменьшение металлоемкости вплоть до безотходных технологий и сокращение цикла зубообработки.

Первая задача решается при использовании заготовок, максимально приближенных к готовой детали, т. е. с предварительно оформленными зубьями. Вторая – за счет уменьшения удаляемого припуска и концентрация зубообработки в пределах одной операции. Их совместное решение особенно для зубчатых колес 8-й степени точности и выше, требующих применения нескольких методов их зубообработки, предполагает использование заготовок с предварительно оформленными зубьями [1]. Таким образом, для совершенствования производства зубчатых колес целесообразна технологическая схема, включающая:

- получение заготовок с зубьями (приближенных к готовой детали);
- чистовая зубообработка за одну операцию.

2. Основная часть

Внедрение прогрессивных заготовок цилиндрических зубчатых колес с предварительно оформленными зубьями окажется наиболее эффективно при использовании процесса зубонарезания, обладающего высокими исправляющими способностями. Именно поэтому на кафедре «Технология машиностроения» Тульского государственного университета (ранее Тульского политехнического института) разработана и исследована группа процессов чистового зубонарезания, обеспечивающих высокую произ-

водительность обработки и необходимую исправляющую способность, которые открывают возможность осуществления на их основе указанной технологической схемы [2, 3].

Однако эффективность работы этих способов и всей технологической схемы в значительной мере определяется самой заготовкой, т. е. ее материалом, размерами, способом получения, точностью, величиной припусков.

В технологии изготовления поковок со штампованным зубом можно выделить два направления.

1. Изготовление зубчатого венца заготовки без припуска на всех ее поверхностях. Такие заготовки не предусматривают последующей механической обработки и обеспечивают наименьшую материалоемкость. Однако из-за низкой точности зуба (в среднем не выше 9-й степени) зубчатые колеса, полученные из них, могут использоваться лишь в передачах с низкими эксплуатационными показателями.

2. Изготовление заготовки с профилем зуба, требующим только чистовой зубообработки.

У таких заготовок в зависимости от распределения (наличия) припуска между отдельными участками зуба можно выделить три формы впадины зубчатого венца [4]:

- впадины с припуском на всех поверхностях – на боковых (эвольвентных), переходных и дне впадины;
- впадины с припуском на боковых и переходных участках;
- впадины с припуском только на боковых участках.

Второе направление позволяет получать колеса более высоких степеней точности, чем первое. Но в этом случае независимо от формы впадины особую важность приобретает вопрос о назначении рациональных по величине припусков на боковых поверхностях зубьев.

В машиностроении применяется опытно-статистический метод определения и назначения припусков на механическую обработку, основанный на использовании справочных таблиц, которые составлены как обобщение опыта ряда отраслей промышленности. Однако опытно-статистические значения, как правило, не учитывают конкретных условий проведения технологических процессов обработки зубчатых заготовок, установлены с существенным «запасом» и приводят к завышению величин припусков. Расчетно-аналитический метод характеризуется большей трудоемкостью, но он позволяет устанавливать более точные значения припусков, что особенно важно при чистовой обработке предварительно оформленных зубьев.

Поэтому для определения припусков на чистовую обработку штампованных зубьев следует использовать расчетно-аналитический метод.

Будем считать, что припуск одинаков на всем эвольвентном участке поверхности зуба и профиль боковой стороны зуба заготовки – это эквидистанта к профилю зуба обработанного колеса.

Припуск обычно задается и измеряется по нормали к обработанной поверхности заготовки. Для зубьев заготовок цилиндрических колес возможно задание припуска по одному из двух направлений:

- по нормали к боковой (эвольвентной) стороне обработанного зуба;
- по хорде зуба обработанного зубчатого венца.

В первом случае припуск отсчитывается «на сторону» и представляет собой односторонний припуск, т.к. нормали к противоположным боковым сторонам одного зуба не параллельны. Во втором – припуск следует рассматривать как симметричный двусторонний припуск, отсчитываемый на обе стороны зуба, т. е. «на толщину» зуба. Ис-

пользование схемы с двусторонним припуском представляется более целесообразным, т. к. конечной целью определения припусков на выполнение чистовой ступени обработки зубьев является установление размеров заготовки, которые задаются их номинальными значениями и допустимыми отклонениями. Это задание удобнее для схемы двустороннего припуска.

Поэтому рассмотрим использование расчетно-аналитического метода для определения двустороннего «на толщину» зуба, симметричного припуска на чистовую обработку оформленных у заготовки зубьев цилиндрических колес.

В существующей методике [5, 6] приводится общая формула для определения численной величины Z_g операционного (или промежуточного) двустороннего припуска.

$$Z_g = K \sqrt{\delta_a^2 + 4(H_a^2 + T_a^2 + \Delta_a^2 + \rho_a^2 + \varepsilon_g^2)}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий возможные отклонения законов распределения отдельных составляющих припуска от нормального закона. Обычно $K=1,2 \div 1,3$ [6]; δ_a – составляющая припуска, учитывающая погрешность размера самой поверхности, подлежащей обработке, мкм; H_a и T_a – составляющие припуска, характеризующие соответственно высоту неровностей и глубину дефектного слоя, полученных на предшествующей ступени обработки, мкм; Δ_a – составляющая припуска, учитывающая погрешность размера, координирующего положение подлежащей обработке поверхности относительно установочной базы заготовки, мкм; ρ_a – составляющая припуска, характеризующая неопределенность положения поверхности, подлежащей обработке, из-за пространственных геометрических отклонений, мкм; ε_g – погрешность установки, являющаяся комплексной производственной погрешностью, мкм.

В общем случае

$$\bar{\varepsilon}_g = \bar{\varepsilon}_b + \bar{\varepsilon}_z + \bar{\varepsilon}_{np}, \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}_b$ – погрешность базирования, учитывающая несовпадение установочных баз заготовки и приспособления; $\bar{\varepsilon}_z$ – погрешность закрепления, возникает из-за смещения заготовки относительно установочных элементов приспособления, или относительно настроенного на размер инструмента под действием зажимных усилий; $\bar{\varepsilon}_{np}$ – погрешность положения установочных элементов приспособления относительно настроенной базы или относительно режущего инструмента настроенного на заданный размер.

Применять формулу (1) для расчета припусков на чистовую обработку зубьев колес, полученных точной штамповкой, следует с учетом особенностей заготовки и специфики технологического процесса ее механической обработки.

Рассмотрим все составляющие припуска для случая чистовой зубообработки.

1. В качестве составляющей δ_a следует принимать допустимую погрешность толщины зуба заготовки E_{cr} , т. е. $\delta_a = E_{cr}$. Если технические условия на изготовление штампованных заготовок основаны на нормах точности по ГОСТ 1643-81 [7], то в зависимости от способа задания размера зуба заготовки в соответствии с указанным стан-

дартном возможно различное задание отклонений толщины зуба и, следовательно, составляющей припуска δ_a .

ГОСТ 1643-81 определяет размеры зубьев цилиндрического колеса, используя следующие размерные параметры и их отклонения,

- толщину зуба по постоянной хорде S_c ;
- дополнительное смещение исходного контура E_{Hr} (не связано с корригированием зуба);
- длину общей нормали W .

Если размер зуба заготовки задается толщиной по постоянной хорде, то в качестве погрешности E_{cr} следует принимать нижнее отклонение допуска по постоянной хорде E_{cri} (рис. 1). $E_{cr} = E_{cri}$.

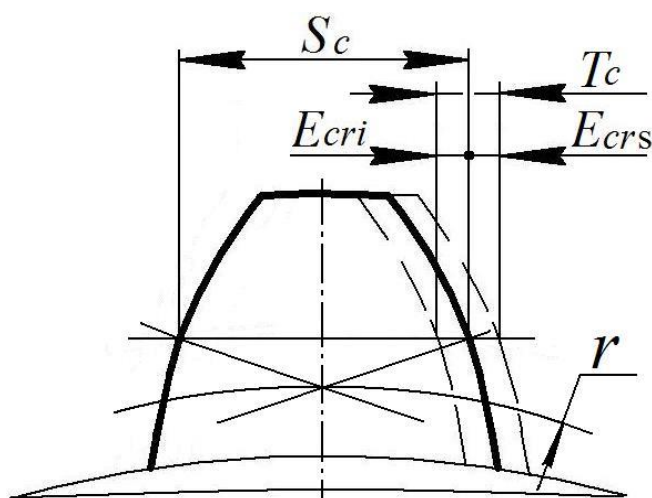


Рисунок 1. Отклонения толщины зуба по постоянной хорде S_c предварительно оформленного венца заготовки

Численная величина нижнего отклонения E_{cri} на основе норм точности ГОСТа 1643-81 должна быть назначена равной допуску на толщину зуба T_c , зависящему от принятой степени точности изготовления заготовок, модуля и диаметра колеса, т. е. $E_{cri} = T_c$.

Численное значение E_{cri} может быть также установлено по ГОСТ 7505-89 [8] в зависимости от массы поковок, номинальной толщины зуба детали (по постоянной хорде) и принятой группы точности изготовления штампованных поковок.

Если размер зуба заготовки задается дополнительным смещением исходного контура и допуском на него, то численная величина допустимой погрешности E_{cr} толщины зуба заготовки устанавливается из выражения

$$E_{cr} = 2(E_{HS} + T_H) \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где E_{HS} - верхнее отклонение смещения исходного контура, мкм; T_H - допуск на дополнительное смещение исходного контура, мкм; α - угол профиля исходного контура (производящей рейки), $\alpha = 20^\circ$, (рис. 2).

Величины E_{HS} и T_H зависят по ГОСТ 1643-81 от принятой степени точности изготовления заготовок, модуля и диаметральных размеров колеса.

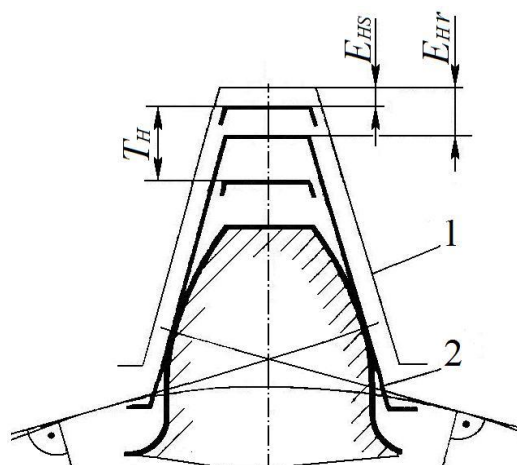


Рисунок 2. Смещение исходного контура: 1 – номинальное положение исходного контура; 2 – действительное положение исходного контура

Если толщина предварительно оформленного зуба задается через длину общей нормали W , то погрешность E_{cr} приобретает численное значение, устанавливаемое из выражения

$$E_{cr} = 2(E_{WS} + T_W) / \cos \alpha ,$$

где E_{WS} - верхнее отклонение средней длины общей нормали, мкм; T_W - допуск на среднюю длину общей нормали, мкм.

Включение в состав припуска составляющей E_{cr} компенсирует также погрешность профиля зуба заготовки f_f (рис. 3), которая не должна выходить за пределы половины допуска на толщину зуба.

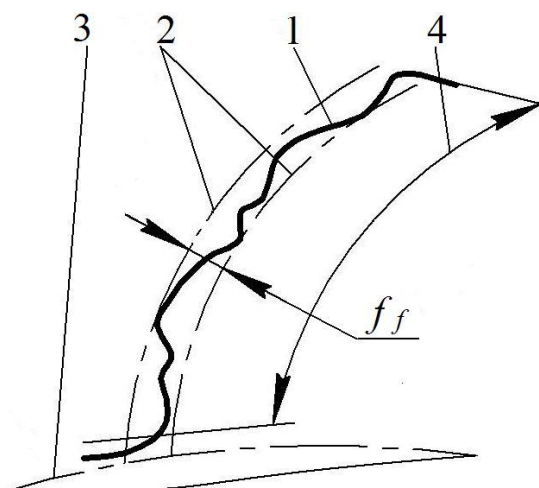


Рисунок 3. Погрешность профиля зуба: 1 – действительный торцовый активный профиль зуба; 2 - номинальные торцовые профили зуба; 3 – основная окружность; 4 - границы активного профиля зуба

2. Минимальный припуск на чистовую обработку зуба включает в себя высоту неровностей $H_a = R_z$ и глубину поверхностного дефектного слоя T_a , численные величины которых устанавливаются в зависимости от способа получения заготовки.

3. Под погрешностью Δ_a следует понимать возможное смещение боковых поверхностей зубьев заготовки, подлежащих обработке, относительно баз заготовки, т. е. относительно оси центрального отверстия и впадины зубчатого венца, используемой для его угловой ориентации. Следовательно, составляющая Δ_a должна быть представлена двумя производственными погрешностями заготовки.

Первая погрешность e_a – не совпадение осей зубчатого венца заготовки и ее базового отверстия (рис. 4).

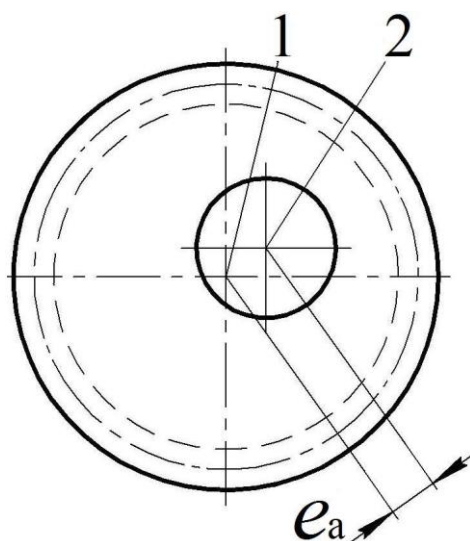


Рисунок 4. Эксцентриситет зубчатого венца:

1 – ось зубчатого венца заготовки; 2 – ось базового отверстия

Значение этой составляющей зависит от последовательности предшествующей обработки, принятой схемы базирования и закрепления заготовки. В общем случае численное значение составляющей e_a определяется путем размерного анализа предшествующей части технологического процесса. Если посадочное отверстие не подвергается предварительной механической обработке и все же служит базой для центрирования колеса при обработке его зубьев, то величина составляющей e_a может быть установлена по ГОСТ 7505-89 [8] в зависимости от принятого класса точности изготовления поковки и ее диаметра. Если же технические условия на изготовления штампованных заготовок основаны на нормах точности по ГОСТ 1643-81 [7], то значение составляющей e_a следует принимать равным половине допуска на радиальное биение зубчатого венца, в зависимости от степени точности штампованного колеса и его диаметра.

Вторая составляющая F_{Pr} – накопленная погрешность шага зубчатой заготовки. Эта составляющая учитывает возможное смещение подлежащих обработке поверхностей зубьев заготовки относительно базовой впадины, по которой ориентируется ее угловое положение на станке при чистовой зубообработке, из-за погрешности окружного шага. Ее численное значение должно приниматься равным допуску на накопленную

погрешность шага F_p , устанавливаемому по ГОСТ 1643-81 [7] в зависимости от степени точности заготовки зубчатого колеса, его диаметра и модуля.

4. Составляющая ρ_a при чистовой обработке зубьев в общем случае может учитывать влияние на величину припуска двух производственных погрешностей.

Первая ρ_1 – составляющая, определяемая пространственным отклонением обрабатываемых поверхностей из-за коробления заготовки

$$\rho_1 = \rho_0 l,$$

где ρ_0 – удельное коробление поковки, мкм/мм; l – расстояние от опорной поверхности до наиболее удаленного торца зубчатого венца, мм.

Вторая $F_{\beta r}$ – погрешность на направление зуба (рис. 5).

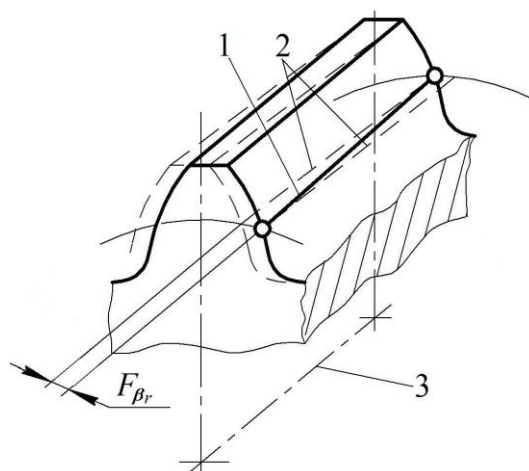


Рисунок 5. Отклонение направления прямолинейного зуба:

- 1 – действительная делительная линия зуба;
- 2 – номинальные делительные линии зуба;
- 3 – рабочая ось зубчатого колеса

Численная величина этой составляющей должна приниматься равной допуску на направление зуба F_{β} , устанавливаемому по ГОСТ 1643-81 [7] в зависимости от степени точности зубчатого венца заготовки и его ширины.

5. При чистовой обработке зубьев колеса следует учитывать влияния на величину припуска погрешности установки, определяемую по зависимости (2).

Погрешность базирования $\bar{\varepsilon}_{\delta}$ возникает из-за несовпадения установочных баз заготовки и приспособления. Это обстоятельство обуславливается двумя причинами.

Первая - это неточность центрирования заготовки, вызывающая смещение оси отверстия заготовки относительно оси оправки $\bar{\varepsilon}_{\delta 1}$. При установке заготовки на жесткой оправке (рис. 6) $\bar{\varepsilon}_{\delta 1}$ определяется как

$$\bar{\varepsilon}_{\delta 1} = \frac{d_o - d_n}{2},$$

где d_o – максимальный диаметр посадочного отверстия колеса, мкм; d_n – минимальный диаметр оправки, мкм.

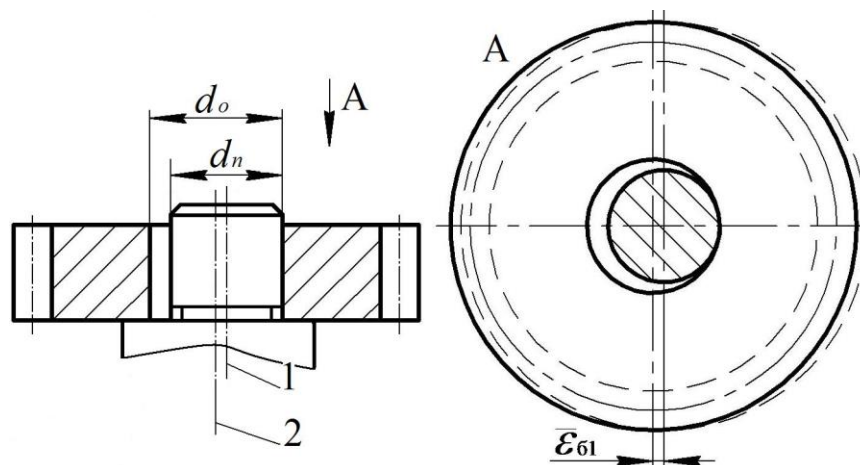


Рисунок 6. Схема установки заготовки на жесткой оправке
1 – ось установочной оправки; 2 – ось посадочного отверстия

При установке заготовок на разжимных оправках величина $\bar{\epsilon}_{\delta 1}$ зависит от конструкции оправки.

Вторая – эксцентричность оси зубчатого венца заготовки и оси оправки, обусловленная неперпендикулярностью опорного торца заготовки относительно оси зубчатого венца $\bar{\epsilon}_{\delta 2}$, определяется по зависимости [6].

$$\bar{\epsilon}_{\delta 2} = e \frac{l}{d},$$

где e – величина торцевого биения опорной поверхности заготовки (отклонение от перпендикулярности опорного торца к оси зубчатого венца), мкм; l – расстояние от опорной поверхности колеса до наиболее удаленного торца зубчатого венца, мм; d – диаметр опорного (базового) торца заготовки, мм.

Погрешностью закрепления $\bar{\epsilon}_3$ в радиальном направлении из-за ее малой величины при чистовой обработке зубьев колеса можно пренебречь, т. е. $\bar{\epsilon}_3 = 0$.

В качестве погрешности положения установочных элементов приспособления $\bar{\epsilon}_{np}$ следует учитывать погрешность положения фиксатора относительно режущего инструмента $\bar{\epsilon}_\phi$, обеспечивающего угловую ориентацию впадин зубчатой заготовки.

Таким образом, зависимость (1) для определения припуска на толщину зуба при чистовой зубообработке примет вид

$$Z_\epsilon = K \sqrt{E_{cr}^2 + 4 \left(H_a^2 + T_a^2 + e_a^2 + F_P^2 + \rho_I^2 + F_\beta^2 + \epsilon_{\delta 1}^2 + \epsilon_{\delta 2}^2 + \epsilon_\phi^2 \right)}.$$

3. Заключение

Рассмотренная методика расчета припуска была использована для зубчатого колеса $m = 2,5 \text{ мм}$, $Z = 18$ с точностью 10-8-7-С по ГОСТ 1643-81 из цементуемой стали 12ХН3А, получаемого из штампованных с зубьями заготовок (рис. 7), зубчатый венец которых обрабатывается окончательно резовыми головками с нулевым углом профиля за одну зубообрабатывающую операцию [1].

В результате расчетов численное значение двустороннего припуска на толщину зуба на чистовую зубообработку составило 0,89 мм. Это значение, обеспеченное у зубчатых заготовок, показало достаточность припуска при обработке зубчатых венцов партии заготовок и, следовательно, эффективность рассмотренного подхода.

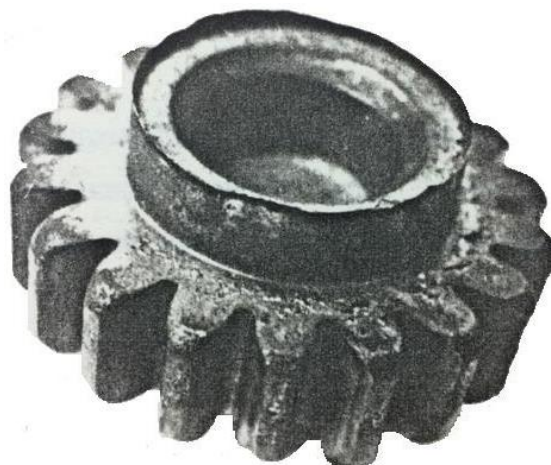


Рисунок 7. Заготовка со штампованным зубчатым венцом

Рассмотренный метод определения припусков может быть также использован для расчета припусков на чистовую обработку зубьев накатанных колес и зубчатых колес, полученных литьем.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Малахов, Г. В. Схемы чистовой зубообработки резцовыми головками методом огибания / Г. В. Малахов, А. В. Михайлов, И. А. Савичев // Известия Тульского государственного университета, Технические науки. Ч. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2016. – № 8 – С. 110-116.
2. Маликов, А. А. Расчет величины продольной модификации зубьев цилиндрических колес при зубонарезании резцовыми головками / А. А. Маликов, В. Д. Артамонов, О. Л. Золотухина // Известия Тульского государственного университета, Технические науки. Ч. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2018. – № 1. – С. 85-91.
3. Артамонов, В. Д. Технологические возможности способов зубообработки цилиндрических колес резцовыми головками / В. Д. Артамонов // СТИН: ежемесячный научно-технический журнал. – М.: ООО СТИН. – 2019. – № 6 – С. 20–24.
4. Малахов, Г. В. Оценка сочетаний параметров зубчатых колес из заготовок с предварительно оформленными зубьями / Г. В. Малахов, В. В. Птицын, А. В. Горохов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2013. – № 8. – С.297–303.
5. Ямников, А. С. Расчет припусков и проектирование заготовок / А. С. Ямников, Е. Ю. Кузнецов, М. Н. Бобков М.Н. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 341 с. – ISBN 978-5-7679-3787-5.
6. Станкеев, А. А. Аналитический метод определения припусков на обработку зубьев цилиндрических колес. Исследования в области технологии механической обработки и сборки машин / А. А. Станкеев – Тула: ТПИ. – 1978. – С. 104–109.
7. ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 44 с.
8. ГОСТ 7505-89 Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 36 с.

Поступила в редколлегию 25.01.2023 г.