

рической формы // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 5(56). – С. 89-93.

REFERENCES

1. Shorshorov, M.Kh. *Material Super-plasticity*. – M.: Science, 1973. – pp. 187.
2. Gadalov, V.N. Automatic plant for analysis of values and thermal effect distribution in metal alloys / V.N. Gadalov, P.V. Novichkov, A.S. Nagin et al. // *Matters of Physics of Solid*. – Voronezh: VPI, 1973. Issue 3. – pp. 272-278.
3. Grabsky, M.V. *Metal Structural Super-Plasticity*. – M.: Metallurgy, 1975. – pp. 270.
4. Zolotov, M.A., Skudnev, V.A., Vinogradov, V.E. et al. *VT20 Alloy Plasticity at 20-1000°C*// MITOM. – 1977. – No.5. – pp. 52-53.
5. Kaibyshev, O.A., Salishchev, G.A. *Super-Plastic Deformation – Method to Increase Stress-Strain Properties of Titanium Alloys* // MITOM. – 1979. – No.12. – pp. 15-18.
6. Kaibyshev, O.A. *Industrial Alloy Super-Plasticity*. – M.: Metallurgy, 1984. – pp. 263.
7. Gadalov, V.N., Vinokurov, O.V., Saveliev, V.I., Tolku-shev, A.A., Vornacheva, I.V. Study of quick-crystallized powders of OT4 and TT20 titanium alloys waste after electro-

pulse processing // *Pre-production in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.11. – pp. 42-46.

8. Gadalov, V.N. Application of super-plasticity effect at diffusion welding of titanium and aluminum alloy structures / V.N. Gadalov, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, A.A. Kalinin, I.V. Vornacheva, I.A. Makarova // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2017. – No.11-2. – pp. 164-170.

9. Gadalov, V.N. Investigation of thermo-cyclic processing impact upon sintered pseudo- α titanium alloys / V.N. Gadalov, S.V. Safonov, I.V. Vornacheva [et al.] // *Fundamental and Applied Investigations: Problems and Results. Proceedings of the XXXIVth Inter. Scientif.-Pract. Conf. (June 28-30, 2017)* – Novosibirsk: Publishers of “Center of Scientific Cooperation Development” (CSCD). – 2017. – pp. 78-93.

10. Gadalov, V.N. Electrolytic boride coatings with Cr_2O_3 , ZrO_2 and Ta_2O_5 oxide additive agents / V.N. Gadalov, I.V. Vornacheva, S.V. Kovalyov, [et al.] // *Strengthening Technologies and Coatings* – 2016. – No.10 (142). – pp. 28-30.

11. Filonovich, A.V., Kolmykov, V.I., Kutuev, A.N., Vornacheva, I.V. To skin-effect use of eddy current control of metal cylindrical products // *Proceedings of South-Western State University*. – 2014. – No.5 (56). – pp. 89-93.

Рецензент д.т.н. А.В. Зюзин

УДК 621.833

DOI: 10.30987/article_5d6518cd7e4976.28892134

В.И. Медведев, д.т.н., **А.Э. Волков**, д.т.н., **С.С. Бирюков**, магистрант (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 103055, Москва, Вадковский пер., 3А);
E-mail: vladimir.ivanovich.medvedev@gmail.com;
andrey.e.volkov@yandex.ru; bserg1234@mail.ru

Построение поверхности отштампованного прямого зуба конического колеса с учетом припуска под финишную обработку

Рассмотрена финишная операция штамповки прямозубого конического колеса – калибровка. Рабочая поверхность зубьев одного из колес представлена конической эвольвентной поверхностью, а другого – модифицированной конической эвольвентной поверхностью. В статье изложена методика построения формы поверхностей зуба после калибровки и до калибровки с учетом выбранного припуска. Предложен вариант распределения припуска под калибровку.

Ключевые слова: калибровка прямозубого конического колеса; коническая эвольвентная поверхность; продольная и профильная модификации боковой поверхности зуба; распределение припуска.

V.I. Medvedev, Dr. Sc. Tech., **A.E. Volkov**, Dr.Sc. Tech., **S.S. Biryukov**, Master's degree student (FSBEI HE “MSTU “STANKIN”, 3A, Vadkovsky Alleyway, Moscow, 103055)

Surface formation of forged straight tooth of bevel gear taking into account stock for finishing

Calibration – a finishing operation of conical spur die forming is considered. A working surface of teeth of one of spurs is presented as an involute surface, and other – a modified tapered involute surface. The paper reports the procedure for the formation of tooth surfaces after calibration and before calibration taking into account an allowance chosen. An option of allowance distribution for calibration is offered.

Keywords: calibration of conical spur; tapered involute surface; longitudinal and profiled modification of tooth side surface; allowance distribution.

Постановка задачи

При обработке конических колес резанием обычно используется метод обкатки, при этом обработка производится инструментом с прямолинейными или криволинейными режущими кромками [1]. Синтез таких передач производится путем подбора наладок зубообрабатывающего станка и параметров инструмента, приблизительно обеспечивающих заданные размеры, форму и положение пятна контакта, а также преднамеренное отклонение от константы передаточного отношения при зацеплении [2 – 7]. После этого определяется форма получаемых поверхностей путем математического моделирования процесса обработки [8, 9].

Обработка резанием является довольно медленным процессом. Штамповка зубчатых колес, рассматриваемая в предлагаемой работе, является значительно более производительным процессом. Этот вид обработки можно отнести к методу копирования, поскольку с точностью до технологических погрешностей поверхности зубьев изделия совпадают с поверхностями зубьев калибрующего инструмента. Эти поверхности, которые могут иметь самую разнообразную форму, могут быть изготовлены с использованием станков с числовым программным управлением. Поэтому разработку технологии изготовления необходимо начинать с расчета оптимальной формы зубьев готового изделия, а затем определять форму зубьев на предварительном этапе обработки с учетом выбранного припуска.

Штамповка зубчатого колеса из конической заготовки производится в несколько этапов. В статье рассмотрен лишь заключительный этап – финишная высокоточная операция – калибровка, при которой толщина снимаемого слоя припуска мала.

Целью настоящей работы является построение рабочих поверхностей зубьев изделия, обеспечивающих локализованный контакт, а также поверхностей зубьев, которые необходимо иметь перед калибровкой с учетом распределения припуска. Предложен вариант распределения припуска под калибровку.

Так как работа нацелена на конические зубчатые колеса дифференциала заднего моста автомобиля, то используя устоявшуюся в автомобильном производстве терминологию, будем называть сателлитом меньшее из колес пары, а большее – полуосевой шестерней или просто шестерней.

Так как не ставится задача получения переходной поверхности, то, для простоты, будем обеспечивать только гладкий переход на границе между рабочей и переходной поверхностями.

Коническая эвольвентная поверхность

Для расчета поверхности с учетом припуска сначала определим поверхность, которую необходимо изготовить. Построим зацепляющиеся поверхности зубьев на основе эвольвентных конических поверхностей, описанных в работе [10]. Такие поверхности обеспечивают кинематически точное зацепление и линейный контакт зубьев.

Рассмотрим систему координат Ox_iz , начало O которой находится в вершине делительного конуса, z – ось делительного конуса, а точки возврата сферических эвольвент расположены в плоскости Oxz .

Тогда координаты $x_i(L_i, \varphi_i)$, $y_i(L_i, \varphi_i)$, $z_i(L_i, \varphi_i)$ точек поверхности определяются двумя параметрами: конусным расстоянием L_i и углом φ_i [10]:

$$\begin{aligned} x_i &= x_i(L_i, \varphi_i) = L_i (\sin\varphi_i \sin\psi_i + \cos\varphi_i \cos\psi_i \sin\delta_{bi}); \\ y_i &= y_i(L_i, \varphi_i) = L_i (-\cos\varphi_i \sin\psi_i + \sin\varphi_i \cos\psi_i \sin\delta_{bi}); \\ z_i &= z_i(L_i, \varphi_i) = L_i \cos\psi_i \cos\delta_{bi} \varphi_i, \end{aligned} \tag{1}$$

где нижний индекс $i = 1$ определяет шестерню, $i = 2$ – сателлит; углы δ_{pi} – это углы делительных конусов; α – угол профиля; углы δ_{bi} основных конусов вычисляются так:

$$\delta_{bi} = \arcsin(\cos\alpha \sin\delta_{pi}). \tag{2}$$

Параметр ψ_i связан с параметром φ_i соотношением

$$\psi_i = \varphi_i \sin\delta_{bi}. \tag{3}$$

Модифицированная коническая эвольвентная поверхность

Поверхности, определенные соотношениями (1) – (3) обеспечивают постоянное передаточное отношение в процессе зацепления, однако, они не дают локализованного контакта. Без локализации пятна контакта может при наличии неизбежных погрешностей выходить на кромки зубьев, что будет приводить к резкой концентрации контактных давлений на кромках и способствовать быстрому износу и разрушению зубьев. Для локализации контакта введем профильный и продольный отводы поверхности зубьев шестерни внутрь зуба от поверхности, задаваемой с помощью (1) – (3) при $i = 1$.

В работе [11] введены параметры синтеза, определяющие форму модифицированной рабочей поверхности зуба шестерни. К ним относятся: L_c – требуемое конусное расстояние до центра пятна контакта; d – смещение центра пятна контакта на сфере радиусом L_c относительно точки с нулевой профильной модификацией; a_0 – полудлина мгновенного отиска контакта при заданной толщине ϵ слоя краски при испытании зацепления на контрольно-обкатном станке; C – коэффициент, определяющий степень неравномерности передачи вращения.

В соотношениях, описывающих модифицированную боковую поверхность зуба шестерни, временно опустим нижний индекс $i = 1$.

Представим модификацию поверхности как поворот вокруг оси вращения шестерни радиус-вектора каждой точки боковой поверхности зуба на угол:

$$\Delta\theta_m = \delta\theta_L + \delta\theta_1, \tag{4}$$

где $\Delta\theta_L$ – угол поворота, соответствующий продольной модификации боковой поверхности зуба, $\Delta\theta_1$ – угол поворота радиус-вектора точки, соответствующий профильной модификации боковой поверхности зуба. Оба поворота осуществляются вокруг оси вращения шестерни и вычисляются по формулам:

$$\Delta\theta_L = -\epsilon/r [(L - L_c)/a_0]^2; \tag{5}$$

$$\Delta\theta_1 = -C(\varphi - \varphi_0)^2, \tag{6}$$

где φ_0 – значение параметра φ , соответствующее центру пятна контакта (точке нулевой профильной модификации, лежащей на пересечении боковой поверхности со сферой радиусом L_c); r – расстояние от точки поверхности до оси вращения шестерни.

Параметр φ_0 связан со смещением d центра пятна контакта на сфере радиусом L_c

следующим образом.

Угол δ_0 конуса, на котором лежит точка нулевой модификации, определяется так:

$$\delta_0 = \delta_p + d/L_c. \tag{7}$$

Значение параметра ψ в точках пересечения сферической эвольвенты с углом конусом с углом δ при вершине, соосным основному конусу с углом δ_b , находится из уравнения:

$$L^2(\sin^2\psi + \cos^2\psi \sin^2\delta_b) = L^2 \sin^2\delta. \tag{8}$$

В левой части (8) квадрат расстояния от точки до оси колеса вычислен на основании выражения (1), поскольку рассматриваемая точка принадлежит эвольвенте. В правой части эта же величина вычислена на основании того, что точка принадлежит поверхности конуса с углом δ .

Угол ψ не зависит от L и определяется равенством:

$$\sin \psi = \pm \frac{\sqrt{\sin^2 \delta - \sin^2 \delta_b}}{\cos \delta_b}. \tag{9}$$

Правой стороне зуба соответствует знак «минус», левой стороне – знак «плюс». Связь величин φ и ψ определяется соотношением (3).

Таким образом, с помощью соотношений (7) – (9) по заданному значению d рассчитывается величина φ_0 .

Значения параметров синтеза выбирают с помощью алгоритма имитации испытания пары на контрольно-обкатном станке [12] или алгоритма имитации работы пары под заданной нагрузкой [13]. Эти алгоритмы в предлагаемой работе не рассматриваются.

Модифицированная поверхность зуба шестерни вместо равенств (1) определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} x_1^* &= x_1 \cos \Delta\theta_m - y_1 \sin \Delta\theta_m; \\ y_1^* &= x_1 \sin \Delta\theta_m + y_1 \cos \Delta\theta_m; \quad z_1^* = z_1 \end{aligned} \tag{10}$$

Поверхность зуба сателлита не модифицируется, поэтому

$$x_2^* = x_2; \quad y_2^* = y_2; \quad z_2^* = z_2. \tag{11}$$

Уравнения (10), (11) определяют поверхности зубьев, подлежащие изготовлению.

Боковая поверхность зуба с учетом припуска

Припуск будем задавать в трех точках в сечении определенного радиуса отдельно для сателлита и шестерни. Далее нижний индекс, определяющий шестерню или сателлит, будет опущен. Каждую из трех точек будем задавать смещением h_j ($j = 1, 2, 3$) относительно вер-

шинной ленточки готового зуба и припуском Δh_j в этой точке. Будем считать припуск $\Delta h > 0$, если точка с припуском расположена вне сечения готового зуба, и $\Delta h < 0$, если точка с припуском расположена внутри сечения готового зуба.

Припуск определяется семью параметрами, которые задаются в сферическом сечении, проходящем вблизи средней точки зуба. К ним относятся:

- радиус L_c сферы, в сечении которой задают значения смещений и припуска в трех точках;

- смещение h_1 вершинной кромки зуба в направлении перпендикулярном кромке (положительное смещение направлено вниз). Смещение h_1 равно расстоянию между вершинными ленточками готового зуба и зуба перед калибровкой;

- значения припуска $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$, равные половине увеличения окружной толщины зуба в заданном сечении. Величина Δh_1 определена на вершинной ленточке заготовки зуба перед калибровкой. Величины Δh_2 и Δh_3 определены соответственно на расстояниях h_2 и h_3 от вершинной ленточки готового зуба.

Точки 1, 2, 3, лежащие на окружности радиусом L_c , показаны на рис.1. Там же показана тонкой линией вершина готового зуба, отстоящая от вершины заготовки на расстоянии h_1 .

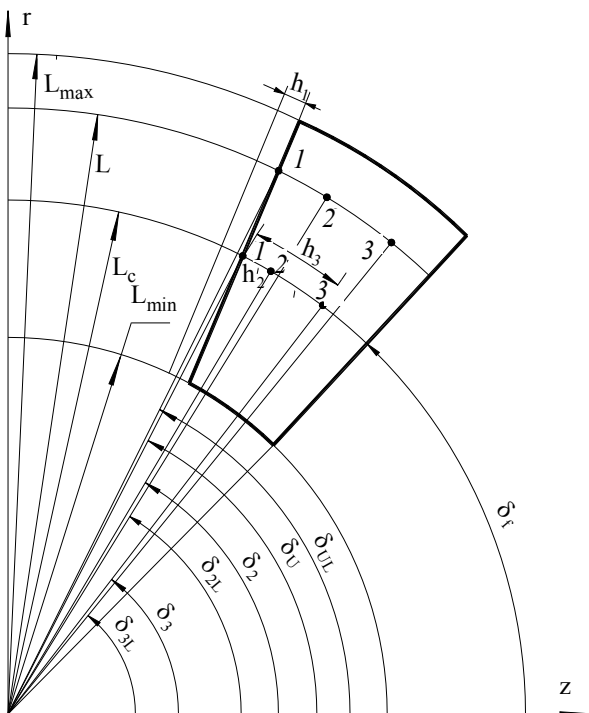


Рис. 1. Параметры, определяющие припуск

Пусть x^*, y^*, z^* – координаты точки поверхности готового зуба, тогда координаты этой

же точки перед калибровкой определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_b &= x^* \cos \theta_p - y^* \sin \theta_p; \\ y_b &= x^* \sin \theta_p + y^* \cos \theta_p; \quad z_b = z^*, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\theta_p = \Delta h / r, \quad (13)$$

r – расстояние от точки до оси вращения колеса; Δh – припуск в рассматриваемой точке.

Каждую точку боковой поверхности зуба определим двумя параметрами L и δ . Здесь δ – полярный угол, отсчитываемый от оси изделия (оси z), точки пересечения сферы радиусом L с поверхностью зуба. Тогда окружная толщина Δh слоя припуска может быть представлена как функция переменных L и δ :

$$\Delta h = \Delta h(L, \delta). \quad (14)$$

Обозначим Δh_L толщину слоя припуска вдоль линии пересечения боковой поверхности зуба со сферой радиусом L .

Толщина Δh_L при $\delta \geq \delta_e$ изменяется по параболическому закону:

$$\Delta h_L(\delta, L) = A_0(L) + A_1(L) \delta + A_2(L) \delta^2, \quad (15)$$

а при $\delta \leq \delta_e$ – по линейному закону:

$$\Delta h_L(\delta, L) = A_0(L) + A_1(L) \delta_e + A_2(L) (\delta_e)^2 + [A_1(L) + 2A_2(L)] (\delta - \delta_e), \quad (16)$$

где δ_e – угол наклона границы эвольвентной части зуба к оси z ($\delta_e > \delta_b$).

На рис.1 представлены следующие величины. Угол δ_{3L} – это полярный угол точки 3, лежащей на сфере произвольного радиуса L , т.е. это угол между осью колеса и прямой, проходящей через вершину делительного конуса и точку 3. Аналогичные полярные углы для точек 1 и 2 на сфере радиуса L обозначены δ_{UL} и δ_{2L} соответственно. Полярные углы δ_3, δ_U и δ_2 определяются аналогично δ_{3L}, δ_{UL} и δ_{2L} , но для сферы радиусом L_c .

Коэффициенты A_0, A_1, A_2 определим из следующего условия: в точках 1, 2 и 3, лежащих на окружности с радиусом L , функция Δh принимает заданные значения $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$, т.е. такие же, как в точках 1, 2, 3 на окружности радиуса L_c . Это условие может быть записано в виде системы уравнений относительно неизвестных коэффициентов:

$$\begin{aligned} \Delta h(\delta_{UL}) &= A_0 + A_1 \delta_{UL} + A_2 (\delta_{UL})^2 = \Delta h_1; \\ \Delta h(\delta_{2L}) &= A_0 + A_1 \delta_{2L} + A_2 (\delta_{2L})^2 = \Delta h_2; \\ \Delta h(\delta_{3L}) &= A_0 + A_1 \delta_{3L} + A_2 (\delta_{3L})^2 = \Delta h_3. \end{aligned} \quad (17)$$

Коэффициенты A_0, A_1, A_2 одинаковы для всех точек произвольной окружности радиуса L и равны

$$A_2 = [(\Delta h_1 - \Delta h_2) (\delta_{UL} - \delta_{3L}) - (\Delta h_1 - \Delta h_3) (\delta_{UL} - \delta_{2L})] / b;$$

$$A_1 = (\Delta h_1 - \Delta h_2) / (\delta_{UL} - \delta_{2L}) - A_2 (\delta_{UL} + \delta_{2L});$$

$$A_0 = \Delta h_1 - A_1 \delta_{UL} - A_2 (\delta_{UL})^2,$$

где $b = (\delta_{UL} - \delta_{2L}) (\delta_{UL} - \delta_{3L}) (\delta_{2L} - \delta_{3L})$. (19)

Полярные углы δ_2, δ_3 точек 2 и 3 на окружности радиуса L_c определяются приближенными соотношениями:

$$\delta_2 \approx \delta_U - \arctg \frac{h_2 - h_1}{L_c};$$

$$\delta_3 \approx \delta_U - \arctg \frac{h_3 - h_1}{L_c}. \quad (20)$$

При условии, что точки 2 и 3 на любой окружности радиуса L делят угол $(\delta_{UL} - \delta_{fL})$ между образующими конуса вершин и конуса впадин в той же пропорции, в которой делят угол $(\delta_U - \delta_f)$ точки 2 и 3, заданные на окружности L_c , получим выражения:

$$(\delta_U - \delta_2) / (\delta_U - \delta_f) = p_2 = (\delta_{UL} - \delta_{2L}) / (\delta_{UL} - \delta_{fL}); \quad (21)$$

$$(\delta_U - \delta_3) / (\delta_U - \delta_f) = p_3 = (\delta_{UL} - \delta_{3L}) / (\delta_{UL} - \delta_{fL}). \quad (22)$$

Из формул (21) и (22) следует, что

$$\delta_{2L} = \delta_{UL} - p_2 (\delta_{UL} - \delta_{fL});$$

$$\delta_{3L} = \delta_{UL} - p_3 (\delta_{UL} - \delta_{fL}). \quad (23)$$

При этом величины p_2 и p_3 , не зависящие от величины L , определяются первыми равенствами в соотношениях (21) и (22).

Распределение припуска по поверхности зуба

Требуемое распределение припуска по поверхности зуба может быть получено путем подбора шести параметров припуска: $h_1, h_2, h_3, \Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$. Подбор параметров припуска предлагается осуществлять из следующих соображений. На рис. 2 показаны половины сечений зуба сферой радиусом L_c до калибровки (с учетом припуска, рис. 2, а) и после калибровки (готового зуба, рис. 2, б). На рис. 2, в оба сечения наложены друг на друга. Разница между этими сечениями представлена в виде трех площадей: S_1, S_2 и S_3 . Причем каждая из них имеет знак «+», если площадь расположена за границей готового зуба, и «-», если площадь расположена внутри границы готового зуба. Точка 4 обозначает границу между рабочей (эвольвентной) и переходной поверхностями.

Например, (см. рис. 2) $S_1 < 0; S_2 > 0; S_3 < 0$ и $\Delta h_3 = 0$.

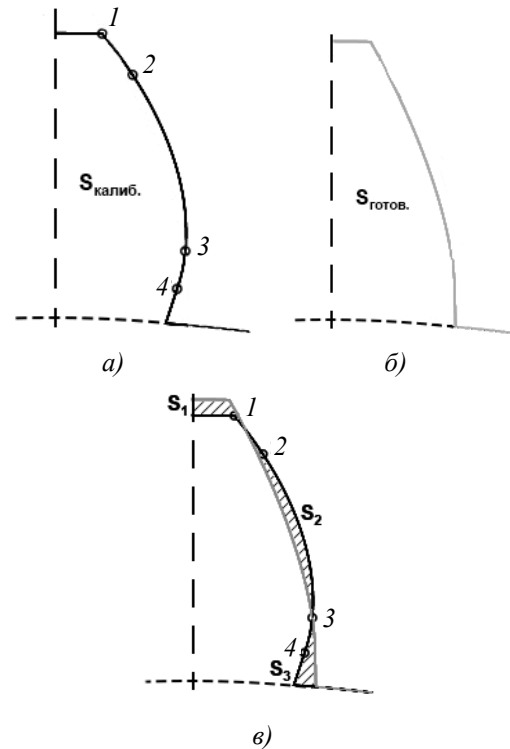


Рис. 2. Площади для расчета припуска

Сумма площадей $S_1 + S_2 + S_3$ показывает разницу между половиной площади готового зуба и половиной площади зуба под калибровку, т.е.

$$S_{\text{калиб.}} - S_{\text{готов.}} = S_1 + S_2 + S_3. \quad (24)$$

Предполагается, что металл из области с площадью сечения S_2 должен распределиться на две области с площадями сечения S_1 и S_3 .

Если $S_1 + S_2 + S_3 < 0$, то это будет означать, что металла, оставленного на припуск перед калибровкой, не хватит для заполнения готового зуба.

Упомянутые площади являются площадями криволинейных трапеций, расположенных на сфере радиусом L (рис.3).

Расчет этих площадей осуществляется с помощью интеграла:

$$S = L^2 \int_{\delta_u}^{\delta_d} \theta(\delta) \sin \delta d\delta. \quad (25)$$

Для этого использована сферическая система с координатами δ и θ , где δ – широта, отсчитываемая от плоскости $x = 0$; θ – долгота, отсчитываемая от плоскости xz (см. рис. 3).

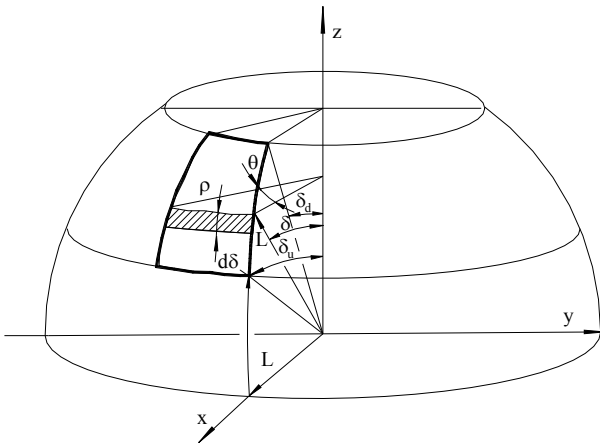


Рис. 3. Криволинейная трапеция на сфере

В этой системе четыре линии, ограничивающие трапецию, могут быть записаны в виде: $\delta = \delta_u$, $\delta = \delta_d$, $\theta = \theta_1(\delta)$ и $\theta = \theta_2(\delta)$. Площадь S трапеции представляется как сумма бесконечно узких полос, каждая из которых имеет площадь $dS = \rho \cdot \theta(\delta)L d\delta$, где $\rho = L \sin\delta$, а функции $\theta_1(\delta)$ и $\theta_2(\delta)$ определены своими дискретными значениями $\theta_{ik} = \theta_i(\delta_k)$ ($i = 1,2$) в нечетном числе M равноотстоящих друг от друга узлах

$$\delta = \delta_k = \delta_u - (\delta_u - \delta_d) \frac{(k-1)}{(M-1)}, \quad (k = 1, 2, \dots, M). \quad (26)$$

Углы δ_u и δ_d определяют головку и ножку зуба соответственно.

Интеграл (25) вычисляется с помощью формулы Симпсона.

В качестве примера расчета рассмотрим прямозубую коническую ортогональную передачу с числами зубьев 11 – 20, внешний окружной модуль $m_e = 5$ мм, среднее конусное расстояние $R = 50,06$ мм. На рис. 4 а, б показано распределение припуска в сечении зуба сателлита сферой радиусом 50,09 мм, полученное при двух различных значениях параметра Δh_3 и одинаковых значениях всех остальных параметров припуска.

Значения параметров припуска для двух вариантов даны в табл.1. Результаты расчета площадей представлены в табл. 2.

Анализ результатов расчета для двух вариантов показал следующее. В варианте 1 половина площади $S_{\text{калиб}}$ сечения зуба с припуском под калибровку меньше на $0,639 \text{ мм}^2$ по сравнению с половиной площади $S_{\text{готов}}$ сечения готового зуба. Это означает, что оставленного на припуск металла не хватит на формирование готового зуба.

В варианте 2 $S_{\text{калиб}} > S_{\text{готов}}$, что является необходимым условием для правильного фор-

мирования припуска. Однако окончательное суждение о том, какое значение $S_1+S_2+S_3$ является оптимальным, можно сделать только на основании экспериментов.

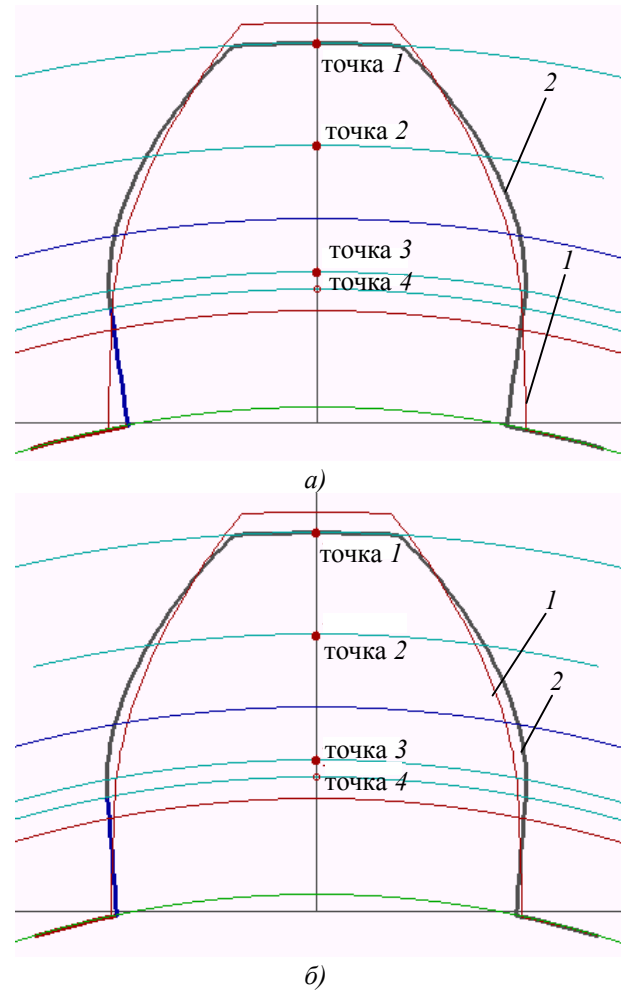


Рис. 4. Распределение припуска:

а – вариант 1; б – вариант 2; 1 – окончательная форма готового зуба; 2 – сечение зуба с учетом припуска перед калибровкой

1. Значения параметров припуска

Вариант	Размерность	h_1	h_2	h_3	Δh_1	Δh_2	Δh_3
1	мм	0,5	3,0	6,0	-0,2	0,2	0,1
2	мм	0,5	3,0	6,0	-0,2	0,2	0,2

2. Результаты расчета площадей

Вариант	Размерность	$S_{\text{готов}}$	$S_{\text{калиб}}$	S_1	S_2	S_3	$S_1+S_2+S_3$
1	мм ²	30,572	29,933	-0,854	0,707	-0,492	-0,639
2	мм ²	30,572	30,596	-0,854	0,961	-0,083	0,024

Заключение

Описанная в статье методика может быть использована технологами для целенаправленного выбора припуска перед финишной штамповочной операцией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медведев, В.И., Шевелева, Г.И. Обработка боковых поверхностей зубьев конических и гипоидных колес инструментом с тороидальной поверхностью // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – № 2. – С. 69-75.
2. Литвин, Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука. 1968. – 584 с.
3. Лопато, Г.А., Кабатов, Н.Ф., Сегаль, М.Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. – М.: Машиностроение. 1977. – 424 с.
4. Сызранцев, В.Н. Методы синтеза зацеплений цилиндрических передач с бочкообразными, корсетобразными и арочными зубьями // Передачи и трансмиссии. – 1996. – №2. – С. 34-44.
5. Медведев, В.И. Синтез обкатных неортогональных конических и гипоидных зубчатых пар // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 5. – С. 3-12.
6. Медведев, В.И., Шевелева, Г.И. Синтез спирально-конических зубчатых передач по условиям контактной прочности зубьев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – № 4.
7. Volkov A.E., Akimov V.V., Lagutin S.A. New Approach to the Local Synthesis of Spiral Bevel Gears // Proceedings of the 10th Int. ASME Power Transmission And Gearing Conference. September 4-7. 2007. Las Vegas. Nevada. USA. PP.13-17.
8. Медведев, В.И., Матвеевков, Д.С. О построении оптимальных поверхностей круговых зубьев конических пар // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – № 1(5). – С. 59-64.
9. Шевелева, Г.И., Волков, А.Э., Медведев, В.И., Шухарев, Е.А. Компьютерное моделирование конических и гипоидных зубчатых передач // Конверсия в машиностроении. – 1997. – № 6. – С. 57-65.
10. Колчин, Н.И. Аналитический расчет плоских и пространственных зацеплений (с приложением к профилированию режущего инструмента и расчету погрешностей в зацеплениях). – М.-Л.: Машгиз. 1949. – С.19-95.
11. Медведев, В.И., Волков, А.Э., Бирюков, С.С. Алгоритмы синтеза и анализа зацепления эвольвентных прямозубых конических колес с локализованным контактом // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 1(48). – С. 98-105.
12. Шевелева, Г.И., Волков, А.Э., Медведев, В.И. Алгоритм геометро-кинематического анализа зацепления зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2004. – № 8.

13. Шевелева, Г.И., Волков, А.Э., Медведев, В.И. Расчет контактных давлений в конических передачах при разных моделях зубьев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 2. – С. 63.

REFERENCES

1. Medvedev, V.I., Sheveleva, G.I. Tooth side surface machining in conical and hypoid gears by tools with toroidal surface // *Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability*. – 2002. – No.2. – pp. 69-75.
2. Litvin, F.L. *Theory of Gearings*. – M.: Science. 1968. – pp. 584.
3. Lopato, G.A., Kabatov, N.F., Segal, M.G. *Tapered and Hypoid Gearings with Circular Teeth*. – M.: Mechanical Engineering. 1977. – pp. 424.
4. Syzrantsev, V.N. Methods of synthesis of gears mesh with barrel-shaped, corset and arched teeth / *Gears and Transmissions*. – 1996. – No.2. – pp. 34-44.
5. Medvedev, V.I. Synthesis of run-in non-orthogonal tapered and hypoid gear pairs // *Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability*. – 1999. – No.5. – pp. 3-12.
6. Medvedev, V.I., Sheveleva, G.I. Synthesis of spiral bevel gears on conditions of teeth contact strength // *Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability*. – 2002. – No.4.
7. Volkov A.E., Akimov V.V., Lagutin S.A. New Approach to the Local Synthesis of Spiral Bevel Gears // Proceedings of the 10th Int. ASME Power Transmission And Gearing Conference. September 4-7. 2007. Las Vegas. Nevada. USA. PP.13-17.
8. Medvedev, V.I., Matveenkov, D.S. On formation of circular teeth optimum surfaces in conical pairs // *Bulletin of MSTU "Stankin"*. – 2009. – No.1 (5). – pp. 59-64.
9. Sheveleva, G.I., Volkov, A.E., Medvedev, V.I., Shukharev, E.A. Computer modeling of tapered and hypoid gears // *Conversion in Mechanical Engineering*. – 1997. – No.6. – pp. 57-65.
10. Kolchin, N.I. *Analytical Calculation of Flat and Spatial Meshes (with appendix to cutter profiling and error calculations in meshes)*. – M.-L.: Machgiz. 1949. – pp. 19-95.
11. Medvedev, V.I., Volkov, A.E., Biryukov, S.S. Algorithms of synthesis and analysis of involute tapered spurs with localized contact // *Bulletin of MSTU "Stankin"*. – 2019. – No.1 (48). – pp. 98-105.
12. Sheveleva, G.I., Volkov, A.E., Medvedev, V.I. Calculation of contact pressures in tapered gears at different tooth types // *Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability*. – 2003. – No.2. – pp. 63.

Рецензент д.т.н. А.А. Кутин