

**М.О. МОРНЕВА**, к.т.н., доцент каф. метрологии ВНУ им. В. Даля, Луганск;  
**Н.Н. КУЗЬМЕНКО**, ст. преп. каф. метрологии ВНУ им. В. Даля

### РАСЧЕТ УСИЛИЯ КАЛИБРОВКИ ЗУБЬЕВ ШЕСТЕРНИ РАЗДАЧЕЙ КОНИЧЕСКИМ ПУАНСОНОМ

Рассматривается технология изготовления зубчатых колес штамповкой с разделением операций предварительного и окончательного формообразования. Получено решение для напряжений и деформирующего усилия операции калибровки зубьев шестерни в штампе коническим пуансоном.

Розглядається технологія виготовлення зубчатих коліс штампуванням з розділенням операцій попереднього і остаточного формоутворення. Отримано рішення для напруги і деформуючого зусилля операції калібрування зубів шестерні в штампі конічним пуансоном.

Technology of making of gear-wheels stamping is examined with the division of operations of preliminary and final formoобразования. A decision is got for tensions and deforming effort of operation of calibration gear teeth in a stamp a conical puncheon.

Штамповка шестерен с зубьями является эффективной технологией, позволяющей снижать расход металла, энергии и трудоемкость изготовления, а также повышать эксплуатационные свойства изделий.

В настоящей работе предлагается технология изготовления зубчатых колес с разделением операций предварительного и окончательного формообразования. При этом степень окончательного деформирования невелика, деформирование осуществляется в холодном состоянии и финишной операцией является калибровка, т.е. достигается высокая точность геометрических размеров зубьев. Заготовкой под калибровку может служить полуфабрикат с не полностью оформленными зубьями, полученный горячей, холодной или полугорячей штамповкой или же из металлических порошков после прессования и спекания.

Калибровка осуществляется в специальном штампе. Заготовка под калибровку выполняется такой, чтобы она входила в полость калибровочного штампа с зазором, обеспечивающим ее свободное введение. На ее поверхность и на поверхность штампа наносится технологическая смазка, в качестве которой может служить машинное масло с дисульфидом молибдена. Степень деформации на операции калибровки, рассчитанная по изменению высоты зуба, не превышает 5...10%, что позволяет обеспечить 8-9 степень точности параметров зубчатого колеса и шероховатость  $R_a=0,32$ .

В рассматриваемой технологии операция калибровки реализуется по схеме деформации зубьев с радиальным течением металла, осуществляемым под действием конического пуансона, который раздает центральное отверстие в шестерни и заставляет течь металл в радиальном направлении. При разработке технологического процесса и проектировании оснастки необходимо определить рабочие напряжения в штампе и величину максимального деформирующего усилия на последней стадии калибровки, соответствующей полному оформлению зубьев.

Расчетная схема калибровки зубьев шестерни с радиальным течением металла приведена на рисунке 1. Деформируемый объем металла представляем состоящим из двух областей. В области I имеет место течение металла в зуб, область II представляет собой кольцо с коническим отверстием, находящееся под внутренним (со стороны пуансона) и наружным (со стороны зуба) давлением. Для вывода расчетных формул применим метод совместного решения уравнений равновесия и пластичности.

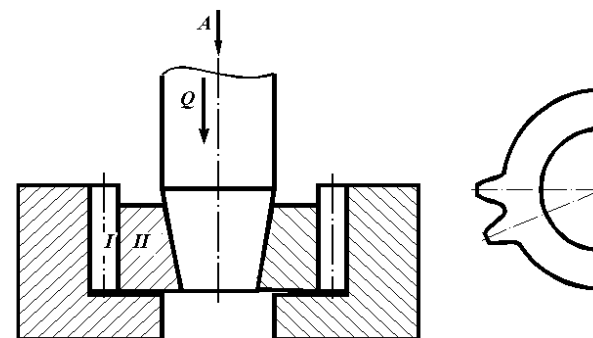


Рисунок 1 – Схема калибровки зубьев шестерни с радиальным течением металла

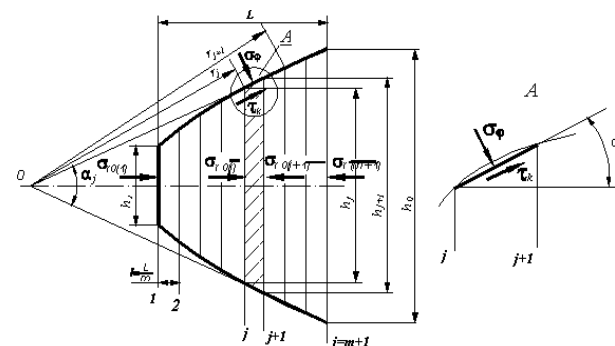


Рисунок 2 – Расчетная схема для области I с разбиением ее на конечное число элементарных объемов

В связи с тем, что зуб шестерни имеет длину значительно большую, чем высоту его, то течение металла в направлении длины будет пренебрежительно мало. Тогда, не делая большой погрешности, можно принять, что в области I металл находится в условиях плоского деформированного состояния.

Для анализа разбиваем объем области I на конечное число  $m$  элементарных объемов, заменив при этом их криволинейную конфигурацию на прямолинейную клиновую (рисунок 2).

Размеры блоков  $h_j, h_{j+1}, \alpha_j$  вычисляются с использованием уравнения линий контура зацепления для заданного их числа  $m$ .

Напряжения в деформированном металле при заполнении полости зуба определяем с использованием приближенных уравнений равновесия и пластичности, которые для плоского пластического течения клиновидного элементарного объема в полярных координатах  $r$  и  $\rho$  имеют вид [1]

$$\frac{d\sigma_r}{dh_r} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\phi)}{h_r} + \frac{2\tau_k}{\alpha h_r} = 0, \quad (1)$$

где  $\tau_k = \mu \cdot 2k$  – значение касательного напряжения на контактной поверхности;  $k = \sigma_s / \sqrt{3}$  – постоянная пластичности,  $\mu$  – коэффициент контактного трения.

Интегрируя уравнение (1) с определением постоянной интегрирования из условия, что на левой границе элементарного клинового объема при  $h_r = h_j$ , нормальные напряжения  $\sigma_r = \sigma_{r0(j)}$ , получаем выражение

$$\sigma_{rj} = -2k \left( 1 + \frac{2\mu}{\alpha} \right) \ln \frac{h_r}{h_j} + \sigma_{r0(j)}, \quad (2)$$

где  $j$  – номер сечения.

Вычисление нормального напряжения на границе областей I и II  $\sigma_{r(m+1)}$  с использованием формулы (2) производится численным методом последовательно, начиная со второго сечения от левой границы области I. При этом для свободного течения металла в полости зуба принимается значение  $\sigma_{r0(1)} = 0$ , а для конечной стадии, когда происходит оформление углов  $\sigma_{r0(1)} = 4k$ .

Упрочение металла при формообразовании зубьев учитывается принятием средних значений постоянных пластичности по элементарным объемам

$$k_{cp} = \frac{k_j + k_{j+1}}{2}; \quad k_j = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \sigma_{s0} + A \left( \frac{h_0 - h_j}{h_0} \cdot 100 \right)^n \right], \quad (3)$$

где  $\sigma_{s0}, A, n$  – начальное напряжение текучести и коэффициенты линейной аппроксимации кривой упрочения [2].

Область II – кольцо, ограниченное цилиндрической поверхностью, проходящей через основание зубьев и конической поверхностью пуансона. В конечной стадии калибровки длина кольцевых волокон в области II почти не изменяется, т. к. течение металла в полость под зуб весьма незначительно. Следовательно, можно считать, что в конечной стадии калибровки в сечениях кольцевой области II имеет место плоское деформированное состояние.

В области II напряжения находим из совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и пластичности. Использование линейного закона касательных напряжений позволяет получить замкнутое решение, при котором произвольные функции по координатам  $r$  и  $\theta$  находятся из уравнения пластичности с последующим вычислением постоянной интегрирования из условия равенства напряжений на границе областей I и II

$$\sigma_{\theta} = 2k \left( \frac{2\mu}{\beta} + \sqrt{1 - 4\mu^2} \right) \ln \frac{r}{r_a} + \sigma_{r(m+1)}; \quad \sigma_r = -2k \left[ \left( \frac{2\mu}{\beta} + \sqrt{1 - 4\mu^2} \right) \ln \frac{r}{r_a} - \sqrt{1 - \frac{4\mu\theta}{\beta}} \right] + \sigma_{r(m+1)}. \quad (4)$$

Величину осевого деформирующего усилия, передаваемого через пуансон, найдем, взяв сумму проекций всех сил на вертикальную ось

$$Q = \iint_s |\sigma_s| \sin \beta dS + \iint_s |\tau_k| \cos \beta dS. \quad (5)$$

Конечная формула для усилия калибровки зубьев шестерни будет иметь вид

$$Q = 2\pi d_c \left[ \left( \frac{2\mu}{\beta} + \sqrt{1 - 4\mu^2} \right) \left( 2,3b_2 \ln \frac{b_2}{b_1} - b_2 + b_1 \right) + \mu H + \frac{\sigma_{r(m+1)}}{2k} (b_2 - b_1) \right]. \quad (6)$$

При определении напряжений на границе областей I и II выполнено решение численными методами, при этом точность зависит от количества разбиений  $m$ .

Выполнена экспериментальная проверка полученного решения для усилия калибровки шестерни редуктора стартера, исходной заготовкой для которой служил полуфабрикат, полученный из железного порошка и подвергшийся спеканию. Эксперимент показал удовлетворительное совпадение расчетных данных, отклонение составило 15%.

**Вывод.** Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния при калибровке зубьев шестерни с радиальным течением металла. Методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и пластичности получена формула для деформирующего усилия, необходимого для калибровки зубьев коническим пуансоном.

**Список литературы:** 1. Теория обработки металлов давлением / *Сторожев М.В., Попов Е.А.* – М.: Машиностроение, 1977. – 423с. 2. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании: Справочник / Ред. совет: *А.В. Третьяков* и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 63с.

*Поступила в редколлегию 06.04.12*

УДК 621.9.20.001.24

**В.С. НАДЕИН**, к.т.н., доцент каф. МС и С КНТУ, Кировоград;  
**М.Г. СТОРЧАК**, к.т.н., научный сотрудник ИМВ ШУ, Штуттгарт, Германия;  
**А.В. КРИВОШЕЯ**, к.т.н., старший научный сотрудник ИСМ НАНУ, Киев;  
**С.Н. ЗАЙКА**, аспирант КНТУ;  
**Д.В. ГРЫНЬ**, к.т.н., ведущий конструктор, Кировоград

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ШЕВИНГОВАНИЯ ОБЛЕГАЮЩИМИ ШЕВЕРАМИ

Погрешности шевингования облегающими шеверами и сложности изготовления и эксплуатации инструмента ограничивают применение этого способа в производстве, несмотря на присущие преимущества. В работе выявлены причины возникновения погрешностей и предложен способ их уменьшения.

Похибки шевингування облягаючими шеверами та складності виготовлення та експлуатації інструмента обмежують застосування цього способу у виробництві, незважаючи на притаманні переваги. В роботі виявлено причини виникнення похибок та запропоновано спосіб їх зменшення.

Errors shaving tight shever and complexity of manufacture and operation of the tool limit the application of this method in production despite the inherent advantages. The paper identified the causes of errors and a method for reducing them.