

УДК 621.787

И. В. Батинов, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Е. С. Петрова, магистрант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОРНОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОТВЕРСТИЯ СБОРОЧНОГО УЗЛА «ВАЛ С ТОРСИОНОМ» ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Статья посвящена моделированию процесса дорнования нетехнологичного отверстия малого диаметра в сборочном узле «вал с торсионом» электромеханического усилителя рулевого управления. Предлагаемая модель позволяет учитывать физико-механические свойства обрабатываемых деталей в сборе, а также неравномерность стенки отверстия.

Ключевые слова: электрический усилитель руля, дорнование отверстий.

Достижение высоких требований точности и качества при обработке глубоких отверстий малого диаметра является актуальной проблемой в машиностроении. При этом обработка нетехнологичных отверстий, например с неравномерной стенкой, является мало изученной. К деталям, содержащим такие отверстия, относятся корпуса миниатюрных гидроцилиндров, трубки волноводов. В автомобилестроении такие отверстия встречаются в цилиндре ТНВД, главном тормозном цилиндре. Наибольшую сложность при обработке составляют нетехнологичные отверстия в сборочных узлах вследствие разности физико-механических свойств обрабатываемых материалов. Примером такого отверстия является отверстие в сборочном узле «вал с торсионом» электромеханического усилителя рулевого управления. Применение процесса дорнования при обработке данного отверстия позволяет значительно повысить исходную точность отверстия.

Математическое моделирование процесса дорнования является важным этапом подготовки к производству. Обычно моделирование процесса дорнования рассматривает обработку деталей с постоянной толщиной стенки, однако данные зависимости не могут использоваться при рассмотрении обработки нетехнологичного отверстия с неравномерной стенкой. При математическом моделировании обработки отверстия сборочного узла электромеханического усилителя рулевого управления поверхность обработки разбивалась на девять участков. Участки 1, 2, 3, 4 равны участкам 9, 8, 7, 6 соответственно, поэтому все зависимости будут приводиться для 1, 2, 3, 4-го участков.

При моделировании процесса дорнования важным является разделение деталей на тонкостенные и толстостенные, так как для описания процесса обработки в толстостенных деталях используются зависимости, отличающиеся от зависимостей для тонкостенных деталей. Это вызвано различиями в проявлении упругой и пластической деформации при дорновании тонкостенных и толстостенных деталей. В результате экспериментов было выявлено, что при превышении наружного диаметра над внутренним менее чем в 3 раза при обработке дорном появляется

зона внеконтактной деформации, и деталь можно считать тонкостенной. При рассмотрении участков 1 и 9 используются зависимости для тонкостенных деталей, а для участков 2, 3, 4, 5, 6, 7, и 8 используются зависимости для толстостенных деталей. На рисунке представлена схема обработки отверстия [1].

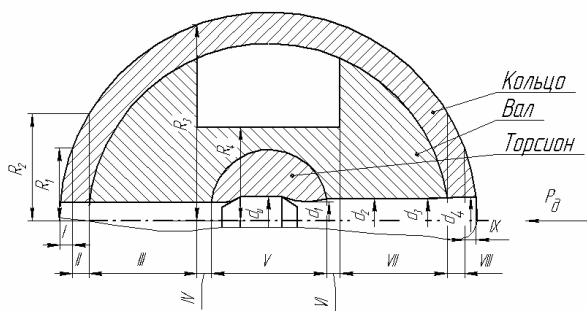


Схема обработки отверстия сборочного узла электромеханического усилителя рулевого управления

Наибольший теоретический натяг дорнования, при котором пластическая деформация может распространиться на максимальную толщину стенки, определяем по формуле. Индексы к, в и т соответствуют характеристикам материала кольца, вала и торсиона [2].

$$N_{\max} = \begin{cases} 2\sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{T_k}}{E_k} \cdot \frac{R^2}{r_1} \cdot (1 - \mu_k) & \text{при } 0 \leq R \leq R_2, \\ 2\sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{T_v}}{E_v} \cdot \frac{R^2}{r_1} \cdot (1 - \mu_v) & \text{при } R_2 \leq R \leq R_4, \\ 2\sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{T_t}}{E_t} \cdot \frac{R^2}{r_1} \cdot (1 - \mu_t) & \text{при } R = R_4, \end{cases}$$

где R – наружный радиус заготовки; σ_T – предел текучести материала заготовки; E и μ – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала заготовки; r_1 – внутренний радиус заготовки.

Результаты расчета максимального натяга дорнования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения максимального натяга дорнования при обработке сборочного узла

Максимальный натяг дорнования, мм			
$0 \leq R \leq R_2$	$R_2 \leq R \leq R_3$	$R_3 \leq R \leq R_4$	R_4
0,276	$0,673 \leq N \leq 1,554$	$1,554 \leq N \leq 0,237$	0,419

Минимальный натяг дорнования исходя из допуска на диаметр исходного отверстия в заготовке и допуска на диаметр дорна по цилиндрической ленточке определяется по формуле [2]

$$N_{\min} = 2\sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot r_1 \cdot (1 - \mu).$$

Результаты расчета минимального натяга дорнования приведены в табл. 2.

$$U_{\text{ост}} = \begin{cases} N/2 - \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{T_k}}{E_k} \cdot \frac{R^2 r_1 (1 - \mu_k)}{(R^2 - r_1^2)} \cdot \left\{ \frac{1}{m_k} \cdot \left[\left(\frac{N \cdot E_k}{2\sqrt{3} \cdot \sigma_{T_k} \cdot r_1 (1 - \mu_k)} \right)^{m_k} - 1 \right] + 1 \right\} + \frac{N \cdot r_1^2}{2 \cdot (R^2 - r_1^2)} & \text{при } 0 \leq R \leq R_2, \\ N/2 - \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{T_b}}{E_b} \cdot \frac{R^2 r_1 (1 - \mu_b)}{(R^2 - r_1^2)} \cdot \left\{ \frac{1}{m_b} \cdot \left[\left(\frac{N \cdot E_b}{2\sqrt{3} \cdot \sigma_{T_b} \cdot r_1 (1 - \mu_b)} \right)^{m_b} - 1 \right] + 1 \right\} + \frac{N \cdot r_1^2}{2 \cdot (R^2 - r_1^2)} & \text{при } R_2 \leq R \leq R_4, \\ N/2 - \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_{T_r}}{E_r} \cdot \frac{R^2 r_1 (1 - \mu_r)}{(R^2 - r_1^2)} \cdot \left\{ \frac{1}{m_r} \cdot \left[\left(\frac{N \cdot E_r}{2\sqrt{3} \cdot \sigma_{T_r} \cdot r_1 (1 - \mu_r)} \right)^{m_r} - 1 \right] + 1 \right\} + \frac{N \cdot r_1^2}{2 \cdot (R^2 - r_1^2)} & \text{при } R = R_4. \end{cases}$$

Результаты расчета остаточной деформации после дорнования приведены в табл. 3.

После определение натяга дорнования и остаточной радиальной деформации можно определить диаметр отверстия в узле после обработки дорнованием [2]:

$$d = d_{\text{зар}} + 2U_{\text{ост}},$$

где $d_{\text{зар}}$ – диаметр отверстия в заготовке.

В табл. 4 приведены результаты расчета диаметра размера отверстия после обработки.

Из результатов расчета видно, что наибольшее восстановление происходит в сечении торсиона, поэтому в данном сечении диаметр отверстия принимает наименьшее значение.

Для определения осевой силы дорнования воспользуемся выражением для осевой силы при дорновании с жидкостным трением, выведенного энергетическим методом баланса работ, поэтому оно обеспечивает наиболее полный учет силовых условий деформации [2, 3]:

Таблица 2. Значения минимального натяга дорнования при обработке сборочного узла.

Значение минимального натяга дорнования, мм		
Кольцо	Вал	Торсион
0,007	0,016	0,029

При обработке отверстия инструментом-дорном возникают внутренние упругие силы, стремящиеся вернуть слои металла в исходное положение. Степень восстановления металла для каждой детали в сборочном узле будет разной вследствие разности физико-механических свойств материала деталей. Поэтому наиболее важным параметром для обеспечения заданной точности размера является остаточная радиальная деформация после дорнования, которая определяется по формуле [2]

где ρ_m – радиус границы, разделяющей упругую и пластическую области заготовки; f – коэффициент трения по нормальному давлению; ε – деформация, осуществляемая деформирующим элементом; α – угол переднего конуса инструмента; C_q, x, y, r, m – коэффициенты, зависящие от обрабатываемого материала; t – толщина стенки.

$$P = \begin{cases} C_q \cdot (HB) \cdot t_0^x \cdot d_0^y \cdot N^{-r} \cdot \varepsilon^m; & \text{при } 0 \leq R \leq R_1, \\ \pi \cdot (\rho_m^2 - r_1^2) \cdot \sigma_T \cdot \left[\ln A + \frac{\alpha}{2} + \frac{f}{\alpha} \left(1 + \frac{1}{2} \ln A \right) \cdot \ln A \right], & \text{при } R_1 \leq R \leq R_4, \end{cases}$$

Таблица 3. Значения остаточной деформации после обработки

Значение натяга дорнования, мм	Остаточная деформация, мм			
	$0 \leq R \leq R_2$	$R_2 \leq R \leq R_3$	$R_3 \leq R \leq R_4$	R_4
0,1	0,036	$0,0256 \leq R \leq 0,0253$	$0,0253 \leq R \leq 0,0269$	0,017
0,15	0,05	$0,046 \leq R \leq 0,046$	$0,046 \leq R \leq 0,049$	0,036
0,2	0,083	$0,069 \leq R \leq 0,068$	$0,068 \leq R \leq 0,072$	0,056

Таблица 4. Размеры отверстия получаемые после обработки дорном

Значение натяга дорнования, мм	Размеры отверстия d , мм			
	$0 \leq R \leq R_2$	$R_2 \leq R \leq R_3$	$R_3 \leq R \leq R_4$	R_4
0,1	3,472	3,451	$3,451 \leq d \leq 3,454$	3,434
0,15	3,5	3,492	$3,492 \leq d \leq 3,498$	3,472
0,2	3,566	$3,538 \leq d \leq 3,536$	$3,536 \leq d \leq 3,544$	3,512

Таблица 5. Значение силы дорнования при обработке сборочного узла

Значение натяга дорнования, мм	Сила дорнования P , Н			
	$0 \leq R \leq R_1$	$R_1 \leq R \leq R_2$	$R_2 \leq R \leq R_4$	R_4
0,1	263	440	1127	2102
0,15	321,5	742	1900	3536
0,2	413	1600	4349	7172

Параметр A определяем по формуле

$$A = \frac{(\rho_m - r_1)}{\rho_m - r_1 - N/2}$$

Оптимальные значения угла переднего конуса инструмента определяем по формуле [2]

$$\alpha = \sqrt{2 \cdot f \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \ln A\right) \ln A}$$

Полученные при расчете значения силы дорнования показывают, что осевая сила возрастает с увеличением радиуса обработки, максимальное значение она принимает в сечении торсиона (см. табл. 5).

Давление в зоне контакта дорна с поверхностью отверстия определим по формуле [2]

$$P_k = \begin{cases} \frac{P}{\pi \cdot d_n \cdot l \cdot (\sin \alpha + f \cos \alpha)} & \text{при } 0 \leq R \leq R_1, \\ \frac{\sigma_{T_k}}{\sqrt{3}} \cdot \left\{ \frac{1}{m_k} \cdot \left[\left(\frac{N \cdot E_k}{2\sqrt{3} \cdot \sigma_{T_k} \cdot r_1 (1 - \mu_k)} \right)^{m_k} - 1 \right] + 1 \right\} + \frac{N \cdot E_k \cdot r_1}{6 \cdot R^2 \cdot (1 - \mu_k)} & \text{при } R_1 \leq R \leq R_2, \\ \frac{\sigma_{T_n}}{\sqrt{3}} \cdot \left\{ \frac{1}{m_n} \cdot \left[\left(\frac{N \cdot E_n}{2\sqrt{3} \cdot \sigma_{T_n} \cdot r_1 (1 - \mu_n)} \right)^{m_n} - 1 \right] + 1 \right\} + \frac{N \cdot E_n \cdot r_1}{6 \cdot R^2 \cdot (1 - \mu_n)} & \text{при } R_2 \leq R \leq R_4, \\ \frac{\sigma_{T_r}}{\sqrt{3}} \cdot \left\{ \frac{1}{m_r} \cdot \left[\left(\frac{N \cdot E_r}{2\sqrt{3} \cdot \sigma_{T_r} \cdot r_1 (1 - \mu_r)} \right)^{m_r} - 1 \right] + 1 \right\} + \frac{N \cdot E_r \cdot r_1}{6 \cdot R^2 \cdot (1 - \mu_r)} & \text{при } R = R_4, \end{cases}$$

где d_n – диаметр инструмента; l – длина обработки.

В табл. 6 приведены значения контактного давления на ленточке дорна при обработке.

Таблица 6. Значение контактного давления на ленточке дорна при обработке

Значение натяга дорнования, мм	Контактное давление p_k , МПа			
	$0 \leq R \leq R_1$	$R_1 \leq R \leq R_2$	$R_2 \leq R \leq R_3$	R_4
0,1	295	$540,86 \leq p_k \leq 783,24$	$1330 \leq p_k \leq 1206$	1710
0,15	356	$520,5 \leq p_k \leq 884,06$	$1543 \leq p_k \leq 1357$	2028
0,2	445	$396,43 \leq p_k \leq 1002,38$	$1807 \leq p_k \leq 1497$	2397

Предложенная математическая модель позволяет определить параметры процесса дорнования при обработке дорном отверстия в сборочном узле с учетом физико-механических свойств обрабатываемых материалов и неравномерной толщины стенки.

Полученные в результате экспериментальных исследований значения диаметральных размеров отверстия после обработки дорном, а также значения силы дорнования подтверждают возможность использования приведенных зависимостей для определения параметров обработки.

Библиографические ссылки

1. Проскуряков Ю. Г., Романов В. Н., Исаев А. Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с.
2. Янченко И. И., Тарасов В. В., Сивцев Н. С. Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием: в 2 ч. – Ч. 1. Теория управления контактно-кинematicкими условиями при дорновании. – Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2002. – 138 с.
3. Розенберг А. М., Розенберг О. А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – АН УССР, Ин-т сверхтвердых материалов, 1990. – 319 с.

I. V. Batinov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

E. S. Petrova, Master's degree student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Mathematical Modeling of Burnishing by Example of Hole of "Shaft With Torsion" Subassembly for Electric Power Steering

The article is devoted to modeling the burnishing process for a low-tech pinhole in the "shaft with torsion" subassembly for electric power steering. The proposed model takes into account physical and mechanical properties of assembled machined parts as well as uneven walls of the hole.

Key words: electric power steering, hole burnishing.