

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.787.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-7-10

С. Ю. Абакумова, С. Н. Ольштынский, И. В. Литвинов, А. Г. Минаева

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО КОНТАКТА ОБКАТНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ГАЛТЕЛЕЙ КРУПНЫХ ВАЛОВ ПРИ ИХ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: Lighta_06@mail.ru, for_lead22@mail.ru,
lightwave.go@gmail.com, minaeval2000@mail.ru

Приведены результаты теоретического исследования по технологическому и инструментальному обеспечению упрочняющей обработки галтелей крупных ступенчатых валов путем их обкатки тороидальными роликами. Рассмотрены условия контактного взаимодействия и кинематика движения обкатных инструментов по галтелям разных геометрических форм, представленных фрагментами поверхностей второго порядка, и особенности физических процессов, протекающих в зонах их деформационного упрочнения.

Ключевые слова: упругопластическая контактная деформация, упрочняющая обкатка, вал, галтель

S. Yu. Abakumova, S. N. Olshtynsky, I. V. Litvinov, A. G. Minaeva

ANALYTICAL STUDY OF POWER CONTACT OF ROLLING TOOLS WITH FILLET SURFACES OF LARGE SHAFTS DURING THEIR HARDENING TREATMENT

Volgograd State Technical University

The results of a theoretical study on the technological and instrumental support for hardening treatment of fillets of large stepped shafts by rolling them with toroidal rollers are presented. The article examines the conditions of contact interaction and the kinematics of the movement of rolling tools on fillets of different geometric shapes, represented by fragments of second-order surfaces, and the features of the physical processes occurring in the zones of their strain hardening.

Keywords: elastic-plastic contact deformation, strengthening the rolling, shaft, fillet

Прямые валы, как основные несущие элементы приводов механических передач трансмиссий и ходовых систем машин, находят широкое распространение в машиностроении. Для удобства размещения и надежной фиксации в осевом направлении насаженных на них деталей (зубчатых колес, шкивов, звездочек и пр.), валы часто делают ступенчатыми, что неизбежно вызывает концентрацию напряжений вблизи этих переходных участков, приводящую к снижению сопротивления усталостному разрушению.

Многочисленными исследованиями усталостной прочности крупных валов (диаметром более 50 мм), проводимыми в разное время на предприятиях УЗТМ (завод «Уралмаш») [1]

и в лабораториях ЦНИИТМАШ [2], доказано, что одним из основных факторов, сдерживающих возникновение и развитие усталостных трещин, являются остаточные сжимающие напряжения. Среди технологических методов упрочняющей обработки, позволяющих создавать эти напряжения, наиболее эффективным является поверхностное пластическое деформирование (ППД), в частности, обкатка валов (в том числе и галтелей) роликами или шариками [3, 4]. Однако к настоящему времени не существует единой методики определения рациональных режимов их упрочнения: она разработана только для гладких участков валов [5, 6], в то время как режимы обработки галтелей продолжают назначаться на основании экспериментальных

данных, что ограничивает их практическое применение.

Как известно, надежность и долговечность валов зависит, помимо прочностных характеристик и способов фиксации на них деталей и пр., еще и от геометрической формы поверхностей в местах сопряжений участков валов разных диаметров. У крупных валов эти сопряжения (или галтели) выполняются, как правило, поверхностями второго порядка постоянных или переменных радиусов кривизны в осевом сечении; при этом наиболее опасными зонами являются сечения в местах перепада диаметров и у торцов ступиц посаженных на них деталей [2–4, 7]. Поэтому рассматриваемая задача будет иметь две стороны: физическую и геометрическую.

Физическая сторона задачи. Согласно положениям, выдвинутым и обоснованным в работах [5, 6], наибольшей эффективности от применения обработки ППД, оцениваемой максимальным приращением предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$, можно добиться, если в процессе ППД контролировать интенсивность деформации $\varepsilon_{i,0}$ поверхностного слоя, которая в оптимальном варианте должна быть близкой по значению к предельной равномерной деформации ε_p материала упрочняемой детали. Предельное значение этой деформации определяют либо по результатам испытаний на растяжение стандартных образцов, либо находят по приближенной зависимости [2]:

$$\varepsilon_p = 0,6 \cdot \Delta\varepsilon \cdot E / HД \approx 245 / HД, \quad (1)$$

в которой $HД$ – пластическая твердость (ГОСТ 18835–73), $\Delta\varepsilon = 0,002$ – стандартный допуск на остаточную деформацию и $E = 2,05 \cdot 10^5$ МПа – модуль нормальной упругости материала вала.

Задача состоит в назначении технологических режимов обработки, обеспечивающих при заданной глубине z_s наклепа получение на поверхности требуемой интенсивности деформации, т.е. $\varepsilon_{i,n} \approx \varepsilon_p$. Ее значение, зависящее от силы обкатки F , материала и размеров вала, формы и геометрических размеров обкатного инструмента, находится по известной зависимости [6]

$$\varepsilon_{i,n} \approx \varepsilon_{i,0} = k_\beta \cdot \ln(\varepsilon_{i,0} / \Delta\varepsilon) \cdot h / z_s, \quad (2)$$

где k_β – коэффициент, учитывающий объемный характер контактной деформации под обкатным инструментом, h – глубина начального

следа обкатного инструмента на поверхности вала, определяемая по формуле

$$h = \frac{F - F_s}{\pi D_{np} HД}. \quad (3)$$

Здесь важным параметром является приведенный диаметр D_{np} контактирующих тел, зависящий только от их формы и размеров. В его определении применительно к технологическому процессу упрочняющей обкатки галтелей и заключается геометрическая сторона поставленной задачи. Значение D_{np} находят по формуле

$$D_{np} = (A \cdot B)^{-0,5}, \quad (4)$$

где A и B – наименьшая и наибольшая по значениям главные кривизны сопряженных поверхностей тел в контакте, определяемые выражениями

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} \pm \frac{1}{R_{12}} \right) \text{ и } B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{21}} \pm \frac{1}{R_{22}} \right); \quad (5)$$

здесь R_{ij} – главные радиусы кривизн поверхностей (индексы j); знаки «плюс» или «минус» берутся в случаях, когда сечение одного из тел в рассматриваемой плоскости (индексы i) ограничено выпуклым или вогнутым контурами.

Рассмотрим случай обкатки галтели вала (размеры ступеней D и d), образованной поверхностью эллипсоидного тора с большой a_z и малой b_z полуосями сечения, тороидальным роликом с диаметром D_p в плоскости обкатки и радиусом r профиля. Схема обкатки показана на рисунке.

В обычной декартовой системе координат (ось Ox направлена вдоль оси вала в сторону большей его ступени) уравнение контура галтели будет

$$x^2/a_z^2 + y^2/b_z^2 = 1. \quad (6)$$

В процессе качения тороидального ролика по поверхности вала диаметром d и его одновременном перемещении вдоль оси Ox с подачей S до точки C_2 значения главных кривизн A и B в поперечном (радиальном) и осевом сечениях по отношению к валу будут неизменными и определяться формулами

$$A = d^{-1} + D_p^{-1} \text{ и } B = (2r)^{-1}, \quad (7)$$

а при входе ролика на галтель они начнут изменяться в зависимости от угла α , определяемого положением нормали $n-n$ к контактирующим поверхностям относительно оси Oy .

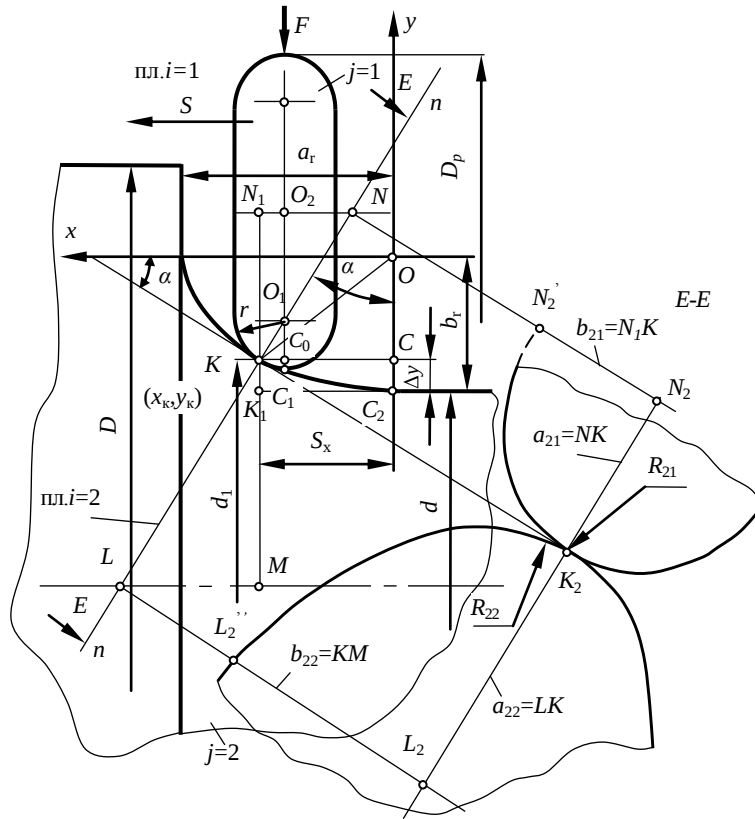


Схема обкатки торoidalным роликом эллипсоидной поверхности галтели ступенчатого вала с осевой подачей инструмента

В некотором промежуточном положении ролика на галтели (контакт в точке K с координатами x_k и y_k) сечения тел в одной из двух взаимно перпендикулярных плоскостей, проходя-

щих через эту точку (плоскость $i = 2$, сечение $E-E$ по нормали), будут ограничены овалами, близкими по форме к эллипсам с полуосями: малыми b_{21} , b_{22} и большими a_{21} , a_{22} :

$$b_{21} = KN_1 = O_2C_1 - C_0C_1 = D_p/2 - r(1 - \cos\alpha), \quad a_{21} = KN_1/\cos\alpha = b_{21}/\cos\alpha; \quad (8)$$

$$b_{22} = KM = K_1M + CC_2 = d/2 + b_e - |y_k|, \quad a_{22} = KM/\cos\alpha = b_{22}/\cos\alpha. \quad (9)$$

Главные радиусы кривизны R_{21} и R_{22} поверхностей тел в этой плоскости определяются

по формулам геометрии [8] как для эллипсов у их больших осей:

$$R_{21} = b_{21}^2/a_{21} = b_{21} \cdot \cos\alpha = (D_p/2 - r(1 - \cos\alpha)) \cos\alpha, \quad (10)$$

$$R_{22} = b_{22}^2/a_{22} = b_{22} \cdot \cos\alpha = (d/2 + b_e - |y_k|) \cos\alpha. \quad (11)$$

В другой плоскости ($i = 1$) аналогичные радиусы кривизны R_{11} у ролика и R_{12} у галтели вала в точке $K(x_k, y_k)$ согласно [8] будут:

$$R_{11} = r \text{ и } R_{12} = a_e^2 b_e^2 \left(\frac{x_k^2}{a_e^2} + \frac{1}{b_e^2} \left(1 - \frac{x_k^2}{a_e^2} \right) \right)^{1.5}. \quad (12)$$

Угол α , зависящий от размеров галтели a_e и b_e и осевого перемещения ролика (координата x_k), определяют по формуле

$$\alpha = \arctan \left(\frac{b_e}{a_e} \cdot \frac{x_k}{\sqrt{a_e^2 - x_k^2}} \right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (13)$$

Далее, по зависимостям (5) находятся значения главных кривизн A и B тел, по формуле (4) приведенный диаметр D_{np} , а совместным решением уравнений (1–3) при заданной глубине наклепа z_s – необходимая сила обкатки.

Если галтель образована традиционным кру-

говым тором с радиусом сечения R_z , то следует принять $a_z = b_z = R_z$ и далее определить D_{np} .

Теперь оценим возможное предельное осевое перемещение S_x ролика. С учетом того, что: 1) наиболее уязвимым с позиций усталостной прочности вала является сечение у начала галтели с наибольшей вероятностью зарождения в нем микротрещин [2, 3, 7], 2) «статическая» прочность вала на изгиб возрастает с увеличением его диаметра пропорционально росту момента сопротивления сечения $W_x = 0,1d^3$ и 3) повышение пределов выносливости валов при ППД может в среднем достигать до 30 % и более [1–6] можно определить место на галтели (координату $x_k = x_{np} = S_x$ осевого перемещения ролика до сечения вала с диаметром d_1) и приращение $\Delta u = \Delta u_{np}$ диаметра d , что обеспечит аналогичное увеличению изгибной прочности вала. Согласно расчетам Δu_{np} составляет не более 0,05d, и именно на эту величину будет происходить «отжатие» ролика от галтели при ее обкатке. Поэтому упрочняющую обработку вала следует проводить до этого места на галтели, контролируя при этом либо предельный

угол α_{np} , полагая в формуле (13) $x_k = x_{np}$, либо соответствующее ему осевое перемещение S_x ролика.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браславский, В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1975. – 321 с.
2. Исследования по упрочнению деталей машин / под ред. И. В. Кудрявцева. – М. : Машиностроение, 1972. – 328 с.
3. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Школьник, Л. М. Полые оси и валы / Л. М. Школьник, Ю. Е. Коваленко, Н. И. Мартинов, Л. А. Усова. – М. : Машиностроение, 1968. – 183 с.
5. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Сидякин, Ю. И. Повышение эффективности упрочняющей механической обработки валов обкаткой их роликами или шариками / Ю. И. Сидякин // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 43–49.
7. Лейкин, А. С. Концентрация напряжений в галтелях ступенчатых осесимметричных валов при изгибе и кручении / А. С. Лейкин // Проблемы прочности в машиностроении, вып. 4 / АН СССР, 1959.
8. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1967. – 608 с.