

УДК 621.83.053.3

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-14-22

Оценка точности функций твердости упрочненного слоя рабочих поверхностей зубчатых передач

С. Ю. Лебедев, аспирант, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

В. Н. Сызранцев, доктор технических наук, профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

М. Н. Михайлова, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Поверхностное упрочнение рабочих поверхностей зубьев позволяет повысить долговечность и безотказность передач. В зубчатых передачах широкое распространение получило химико-термическое упрочнение азотированием, цементацией и нитроцементацией. При выполнении проектных и проверочных расчетов зубчатых передач необходимо знать закон изменения твердости по глубине упрочненного слоя зуба, от точности которого зависит корректность расчетов передачи. Цель статьи – оценить точность существующих функций распределения твердости по глубине упрочненного слоя рабочих поверхностей зубчатых передач на основе известных экспериментальных данных; предмет исследования – функции распределения твердости цементованных и нитроцементованных поверхностей зубчатых передач.

Выполнен анализ существующих функций распределения твердости цементованных и нитроцементованных поверхностей зубчатых передач, используемых при проверочных расчетах зубчатых передач на сопротивление изгибной и глубинной контактной усталости. В статье представлены функции твердости, предложенные Тескером Е.И., Короткиным В. И., Mack Aldener M., Dang Van K., Thomas J.

Для оценки точности рассмотренных функций произведен расчет погрешности аппроксимации. Аппроксимирующими функциями являлись функции твердости, а действительными значениями – результаты известных экспериментов по определению твердости по глубине упрочненного слоя цементованных и нитроцементованных роликов. Расчет реализован в пакете MathCad, в котором также были построены представленные в статье графики функций твердости для всех используемых результатов экспериментов.

В результате расчета определены наиболее точные функции распределения твердости цементованных и нитроцементованных слоев. Функция твердости, предложенная Mack Aldener M., дает наименьшую погрешность при цементации (не более 1,1 %). Функция твердости, предложенная Короткиным В. И. для нитроцементации, дает наименьшую погрешность (не более 2,3 %). Наименее точные значения показала функция твердости, разработанная Dang Van K. (более 5 %).

Выполненная работа является частью исследования, нацеленного на совершенствование методологии оценки надежности поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач, основанной на применении методов численного моделирования и инструментов непараметрической статистики.

Ключевые слова: функция твердости, градиент твердости, поверхностное упрочнение, химико-термическая обработка, зубчатая передача.

Введение

Работоспособность зубчатых передач зависит от различных факторов: геометрия профилей и продольной формы зубьев, технология изготовления, качество сборки, материал и химико-термическая обработка (ХТО) зубчатых колес.

Процесс ХТО заключается в диффузии в поверхностный слой углерода, азота, легирующих элементов за счет воздействия среды на нагретую заготовку. ХТО рабочих поверхностей зубчатых передач позволяет увеличить твердость зубьев, что положительно влияет на контактную выносливость. Существуют различные виды ХТО: для зубчатых передач чаще всего применяются азотирование, цементация и нитроце-

ментация. Контролируемыми параметрами ХТО являются: толщина упрочненного (диффузионного) слоя, твердость на поверхности и в сердцеvine зуба, эффективная толщина упрочненного слоя (расстояние от поверхности до определенного значения твердости упрочненного слоя).

Недостатками ХТО зубчатых колес являются следующие факторы: снижение изгибной выносливости из-за снижения упругопластических свойств зубьев передачи и возможность возникновения глубинных разрушений внутри тела зуба при недостаточной глубине или твердости упрочненного слоя [1]. Оба этих фактора учитываются при проектных и проверочных расчетах зубчатых передач. При выполнении расче-

тов на сопротивление глубинной контактной усталости используется функция распределения твердости по глубине упрочненного слоя [2, 3]. Наиболее точное соответствие этой функции действительному градиенту твердости упрочненного слоя позволяет снизить погрешность расчетов.

Цель статьи – оценить точность существующих функций распределения твердости по глубине упрочненного слоя рабочих поверхностей зубчатых передач на основе известных экспериментальных данных.

Анализ существующих функций распределения твердости

Существует множество различных функций распределения твердости, используемых отечественными и зарубежными инженерами и исследователями при расчетах зубчатых передач.

В большинстве русскоязычных методик расчета на сопротивление глубинной контактной усталости теоретической основой является гипотеза Геста – Мора: определение касательных напряжений с учетом положительного влияния нормальных напряжений. Целью расчета в [4, 5] является определение минимального коэффициента запаса прочности по глубине упрочненного слоя зуба. Для определения предела выносливости по глубине упрочненного слоя используются функции твердости для различных видов ХТО, предложенные Е.И. Тескером [6]:

– азотирование

$$HV(z) = \frac{H_0 - H_c}{\delta_c^2} z^2 - 1,8(H_0 - H_c) \left(\frac{z}{\delta_c} \right)^{1,1} + H_0; \quad (1)$$

– цементация и нитроцементация

$$HV(z) = \frac{H_0}{\left[\left(\frac{H_0}{H_c} - 1 \right) \left(\frac{z}{\delta_c} \right)^2 + 1 \right]}; \quad (2)$$

– лазерная обработка

$$HV(z) = \frac{H_0}{\left[\left(\frac{H_0}{H_c} - 1 \right) \left(\frac{z}{\delta_c} \right)^4 + 1 \right]}; \quad (3)$$

где H_0 – твердость поверхности зуба; H_c – твердость сердцевины; δ_c – толщина упрочненного слоя (расстояние от поверхности до сердцевины); z – текущая координата глубины в упрочненном слое.

В [7] расчет действующих эффективных напряжений по глубине упрочненного слоя осно-

ван на обобщенном критерии предельного состояния Лебедева – Писаренко [8] для структурно неоднородного материала. В методике используются функции твердости для определения параметра пластичности материала и допускаемых эффективных напряжений. В зависимости от вида ХТО используются следующие уравнения [9]:

– цементация

$$HV(z) = (H_0 - H_c) \times \left[\frac{\delta_c - z}{\delta_c - z_{\max}} \exp \left(\frac{\delta_c - z}{\delta_c - z_{\max}} \right) \right]^B + H_c, \quad z \leq \delta_c, \quad (4)$$

где

$$B = \ln \left(\frac{H_0 - H_c}{H_{\text{eff}} - H_c} \right) \left(\ln \frac{\delta_c - z_{\max}}{\delta_c - z_{\text{eff}}} - \frac{z_{\text{eff}} - z_{\max}}{\delta_c - z_{\max}} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где H_{eff} – эффективная твердость упрочненного слоя; z_{\max} – глубина максимальной твердости упрочненного слоя; z_{eff} – эффективная толщина упрочненного слоя;

– нитроцементация

$$\left\{ \begin{aligned} HV(z) &= \frac{(H_{\max} - H_0)(\delta_c - z)}{\delta_c - 0,05} + H_0 && \text{при } 0 < z \leq z_{\max}, \\ HV(z) &= (H_c - H_0) \times && \\ &\times \left[\frac{z - z_{\max}}{\delta_c} \exp \left(1 - \frac{z - z_{\max}}{\delta_c} \right) \right]^B + H_0 && \text{при } z_{\max} < z \leq \delta_c, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где H_{\max} – максимальная твердость упрочненного слоя;

$$B = \ln \left(\frac{H_{\text{eff}} - H_0}{H_c - H_0} \right) \left[\ln \left(\frac{z_{\text{eff}}}{\delta_c} \exp \frac{\delta_c - z_{\text{eff}}}{\delta_c} \right) \right]^{-1}; \quad (7)$$

– азотирование

$$HV(z) = \frac{H_0 - H_c}{\delta_c^2} z^2 - 1,8(H_0 - H_c) \left(\frac{z}{\delta_c} \right)^{1,1} + H_0. \quad (8)$$

В расчете [10] учитывается роль остаточных напряжений внутри тела зуба [11]. Методика использует подход, предложенный Финдли [12], суть которого заключается в том, что существует плоскость в теле зуба, на которой при максимальном нормальном напряжении амплитуда касательных напряжений максимальна. В этой

критической плоскости определяется эффективное напряжение. В расчетах используется параметр материала зуба, который именуется критерием Финдли. От значения твердости по глубине упрочненного слоя зависят значения пределов материала на изгиб и кручение, используемых для определения критерия Финдли, остаточных напряжений, допускаемых эквивалентных напряжений. Уравнение для любых типов ХТО имеет вид [13]

$$HV(z) = H_0 g(z) + H_c (1 - g(z)), \quad (9)$$

где

$$g(z) = 1 - 3 \left(\frac{z}{\delta_c} \right)^2 + 2 \left(\frac{z}{\delta_c} \right)^3. \quad (10)$$

Существуют и другие разновидности методик расчета, использующие подход Финдли. В [14] критерий Финдли заменен на критерий Данг Вана, а для определения твердости по глубине упрочненного слоя используется следующая функция [15]:

$$HV(z) = H_0 g(z) + H_c (1 - g(z)), \quad (11)$$

где

$$g(z) = 10^{-0,0381 \left(\frac{z}{\delta_c} \right) - 0,2662 \left(\frac{z}{\delta_c} \right)^2}. \quad (12)$$

Для расчета точки по глубине упрочненного слоя зуба с минимальным значением коэффициента запаса прочности и последующим определением в этой точке усталостного ресурса передачи [16, 17] используется следующая функция твердости [18]:

$$HV(z) = \begin{cases} a_a z^2 + b_a z + c_a & \text{for } 0 \leq z \leq z_{eff}, \\ a_b z^2 + b_b z + c_b & \text{for } z_{eff} \leq z \leq \delta_c, \\ H_c & \text{for } z \geq \delta_c, \end{cases} \quad (13)$$

где

$$a_a = \frac{550 H_0}{z_{eff}^2 \cdot 2 z_{max} z_{eff}}; \quad (14)$$

$$b_a = 2 a_a z_{max}; \quad (15)$$

$$c_a = H_0; \quad (16)$$

$$a_b = \frac{z_{eff}'}{2(z_{eff} - \delta_c)}; \quad (17)$$

$$b_b = -2 a_b \delta_c; \quad (18)$$

$$c_b = 550 - a_b z_{eff}^2 - b_b z_{eff}; \quad (19)$$

$$z_{eff}' = 2 a_a z_{eff} + b_a; \quad (20)$$

$$\delta_c = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad (21)$$

$$A = -z_{eff}'; \quad B = 2 z_{eff} z_{eff}' + 2(H_c - 550); \quad (22)$$

$$C = -z_{eff}^2 z_{eff}' - 2 z_{eff} (H_c - 550). \quad (23)$$

Из представленных выше выражений функций твердости упрочненного слоя важно отметить, что функции (4), (6) и (13) учитывают наличие финишной обработки рабочих поверхностей зубьев, для этого в формулах указывается глубина максимальной твердости упрочненного слоя; это связано с тем, что максимальное значение твердости упрочненного слоя при отсутствии финишной обработки находится на небольшом расстоянии от поверхности (0,1...0,3 мм).

Оценка точности функций распределения твердости

Из предыдущего раздела можно заключить, что функция твердости упрочненного слоя имеет существенное значение при выполнении расчетов на сопротивление глубинной контактной усталости по любым методикам. Поэтому важно использовать функцию, которая будет наиболее точно отображать реальную картину изменения твердости по глубине упрочненного слоя. Чтобы определить функцию, которая будет давать наиболее точные значения, произведем расчет погрешности аппроксимации. Аппроксимируемыми функциями будут являться функции твердости, а действительными значениями – результаты известных экспериментов определения твердости по глубине упрочненного слоя цементованных и нитроцементованных роликов из [19, 20].

Расчет погрешности был выполнен для пяти экспериментов. Погрешность аппроксимации для каждого эксперимента рассчитывалась по формуле

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n |HV(z_i) - HV_i^{fact}|}{n}, \quad (24)$$

где $HV(z_i)$ – значение функции твердости в точки z_i , НВ; HV_i^{fact} – экспериментальное значение твердости на глубине z_i , НВ; z_i – глубина измеренного значения твердости HV_i^{fact} упрочненного слоя в эксперименте, мм; n – количество измерений, используемых при расчете для одного эксперимента.

В расчете не использовались экспериментальные значения твердости сердцевины, так как в ней все функции дают значения твердости сердцевины из исходных данных.

На рисунках 1–5 представлены графики функций твердости для всех используемых результатов экспериментов, на графиках также нанесены

точки экспериментальных данных. (В легендах на рисунках 1–5 указаны соответствующие номера уравнений, описанных в предыдущем разделе.)

В таблице представлены результаты оценки средней арифметической погрешности аппроксимации (24) экспериментальных данных функциями распределения твердости в %.

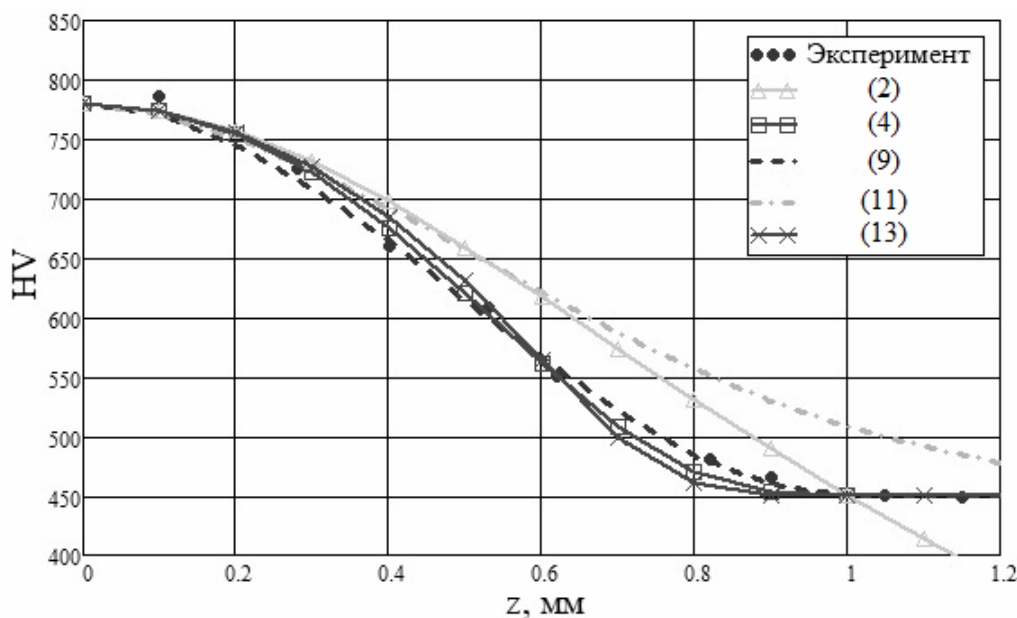


Рис. 1. Экспериментальные данные изменения твердости цементованного ролика: $H_0 = 780$ HV; $H_c = 450$ HV; $H_{max} = 780$ HV; $H_{eff} = 550$ HV; $\delta_c = 1$ мм; $z_{max} = 0$ мм; $z_{eff} = 0,62$ мм

Fig. 1. Experimental data of the hardness gradient of the carburized roller: $H_0 = 780$ HV; $H_c = 450$ HV; $H_{max} = 780$ HV; $H_{eff} = 550$ HV; $\delta_c = 1$ мм; $z_{max} = 0$ мм; $z_{eff} = 0,62$ мм

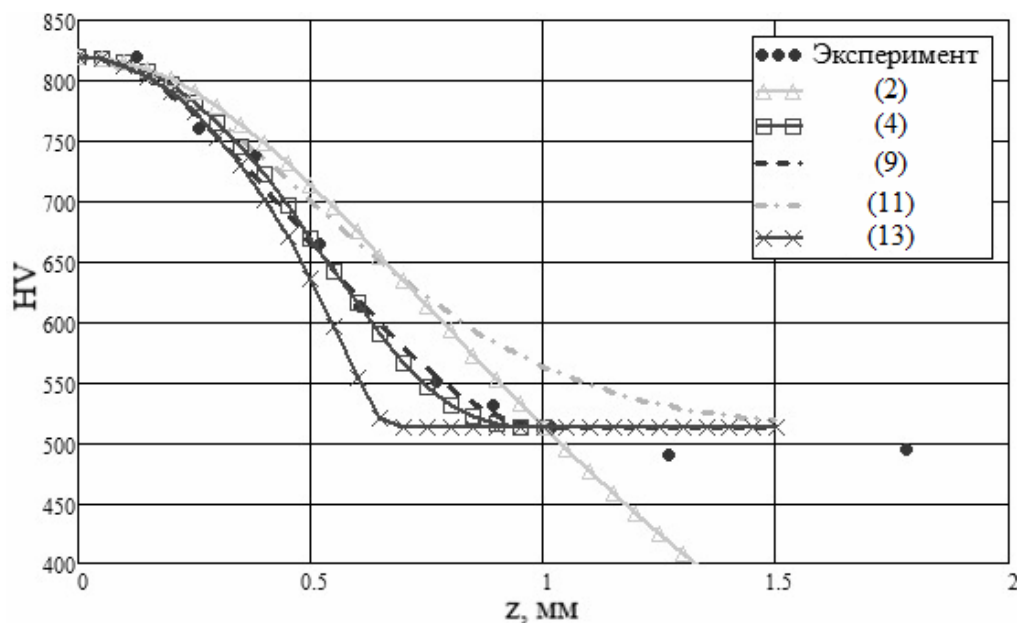


Рис. 2. Экспериментальные данные изменения твердости цементованного ролика: $H_0 = 820$ HV; $H_c = 513$ HV; $H_{max} = 820$ HV; $H_{eff} = 613$ HV; $\delta_c = 1$ мм; $z_{max} = 0$ мм; $z_{eff} = 0,604$ мм

Fig. 2. Experimental data of the hardness gradient of the carburized roller: $H_0 = 820$ HV; $H_c = 513$ HV; $H_{max} = 820$ HV; $H_{eff} = 613$ HV; $\delta_c = 1$ мм; $z_{max} = 0$ мм; $z_{eff} = 0,604$ мм

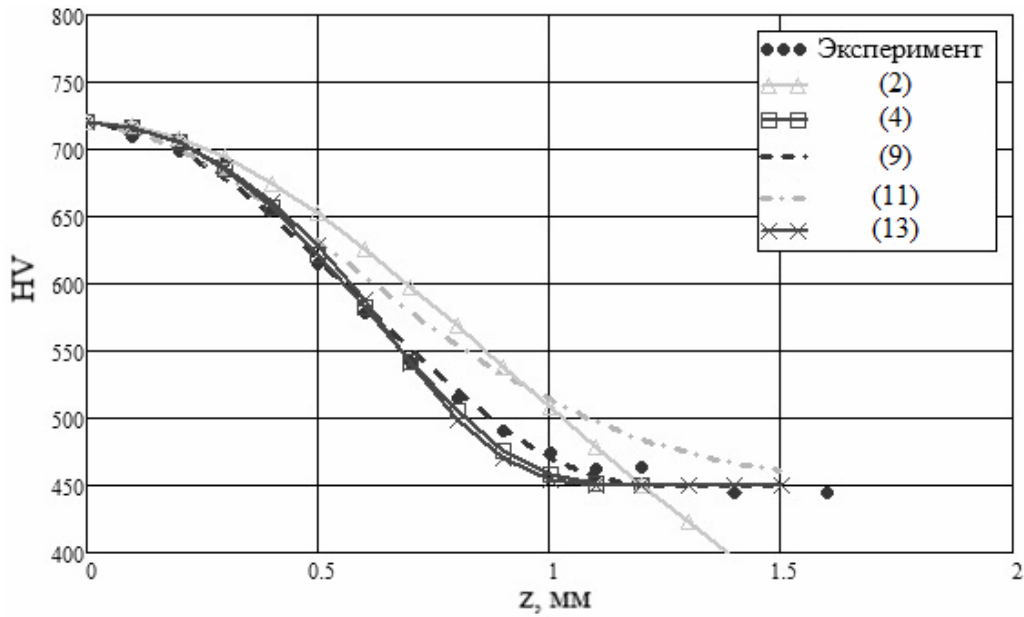


Рис. 3. Экспериментальные данные изменения твердости цементованного ролика:
 $H_0 = 720 \text{ HV}$; $H_c = 450 \text{ HV}$; $H_{\max} = 720 \text{ HV}$; $H_{\text{eff}} = 550 \text{ HV}$; $\delta_c = 1,2 \text{ мм}$; $z_{\max} = 0 \text{ мм}$; $z_{\text{eff}} = 0,68 \text{ мм}$

Fig. 3. Experimental data of the hardness gradient of the carburized roller:
 $H_0 = 720 \text{ HV}$; $H_c = 450 \text{ HV}$; $H_{\max} = 720 \text{ HV}$; $H_{\text{eff}} = 550 \text{ HV}$; $\delta_c = 1,2 \text{ мм}$; $z_{\max} = 0 \text{ мм}$; $z_{\text{eff}} = 0,68 \text{ мм}$

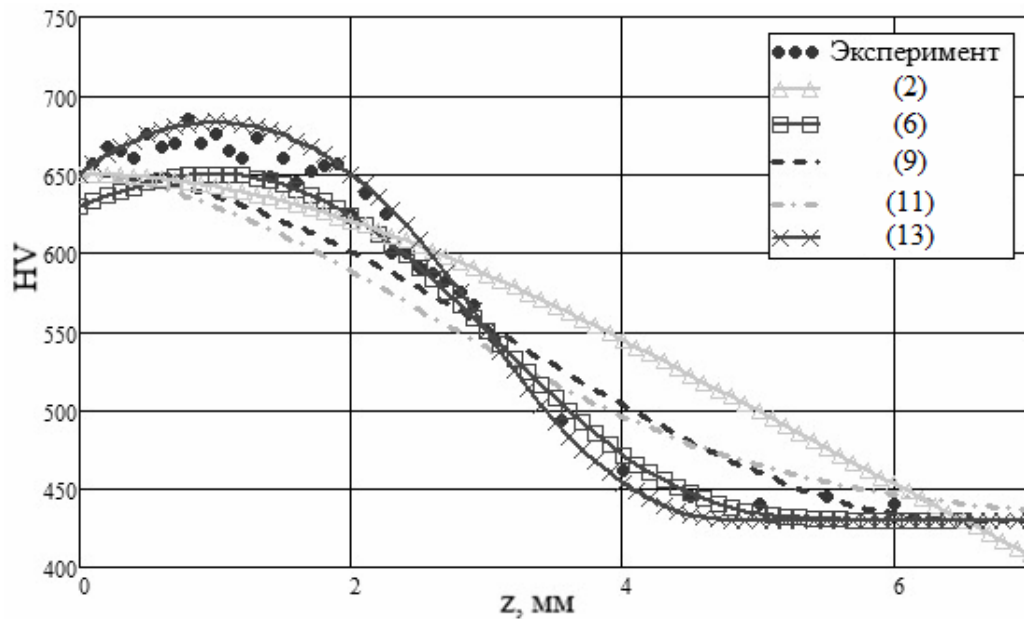


Рис. 4. Экспериментальные данные изменения твердости цементованного ролика:
 $H_0 = 650 \text{ HV}$; $H_c = 430 \text{ HV}$; $H_{\max} = 700 \text{ HV}$; $H_{\text{eff}} = 550 \text{ HV}$; $\delta_c = 6,5 \text{ мм}$; $z_{\max} = 1 \text{ мм}$; $z_{\text{eff}} = 3 \text{ мм}$

Fig. 4. Experimental data of the hardness gradient of the nitrocarburized roller:
 $H_0 = 650 \text{ HV}$; $H_c = 430 \text{ HV}$; $H_{\max} = 700 \text{ HV}$; $H_{\text{eff}} = 550 \text{ HV}$; $\delta_c = 6,5 \text{ мм}$; $z_{\max} = 1 \text{ мм}$; $z_{\text{eff}} = 3 \text{ мм}$

Роль погрешности функций твердости на погрешность результатов расчета эксплуатационных характеристик передачи будет зависеть от используемой методики расчета. Так, при расчете долговечности передачи по методике, основанной на обобщенном критерии предельного со-

стояния Лебедева – Писаренко, значение твердости используется как для определения параметра пластичности, используемого трижды в расчетных формулах, так и для определения допускаемых эффективных напряжений, что в итоге дает значительную суммарную погрешность расчета.

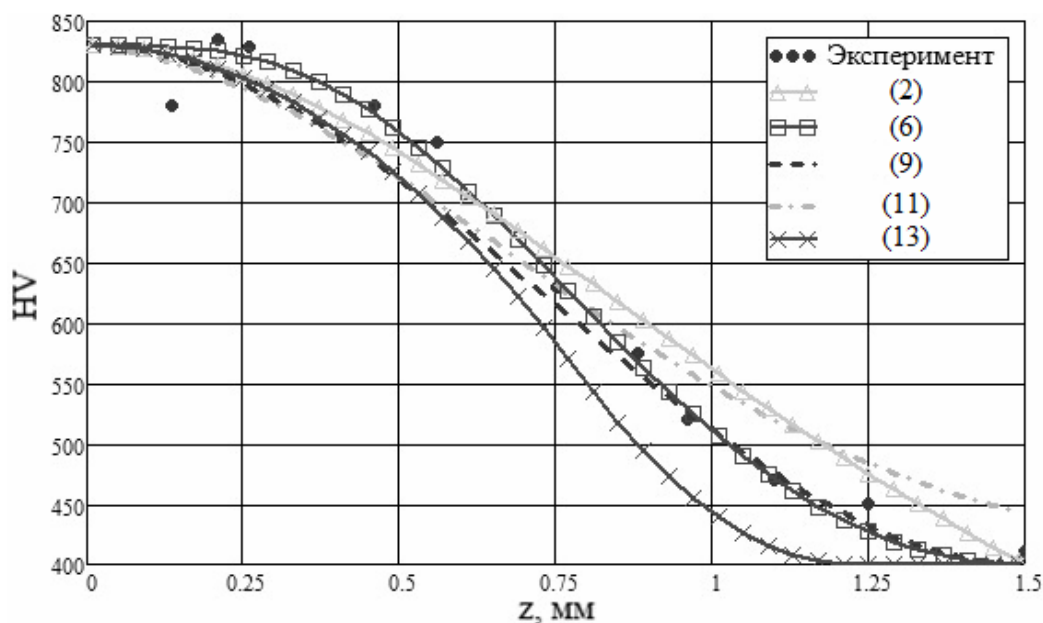


Рис. 5. Экспериментальные данные изменения твердости цементованного ролика: $H_0 = 830$ HV; $H_c = 400$ HV; $H_{max} = 830$ HV; $H_{eff} = 610$ HV; $\delta_c = 1,5$ мм; $z_{max} = 0$ мм; $z_{eff} = 0,8$ мм

Fig. 5. Experimental data of the hardness gradient of the nitrocarburized roller: $H_0 = 830$ HV; $H_c = 400$ HV; $H_{max} = 830$ HV; $H_{eff} = 610$ HV; $\delta_c = 1,5$ mm; $z_{max} = 0$ mm; $z_{eff} = 0,8$ mm

Результаты оценки погрешности аппроксимации, %

Approximation error estimation results, %

Функция \ Эксперимент	Рис. 1	Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 5
(2)	5,528	4,843	5,326	4,795	4,881
(4)/(6)	1,403	1,25	1,228	2,308	2,069
(9)	0,97	1,13	1,145	4,255	3,314
(11)	8,1	5,986	4,418	5,407	5,156
(13)	1,881	4,148	2,034	1,787	6,901

Выводы

Оценка аппроксимации показала следующее.

1. Функция твердости по глубине упрочненного слоя (9) дает наиболее точные значения (не более 1,1 %) для поверхностей, подвергнутых цементации.

2. Функция твердости по глубине нитроцементованного упрочненного слоя (6) дает наиболее точные значения (не более 2,3 %) при поверхностном упрочнении нитроцементацией.

3. Наименее точные значения показала функция твердости (11) (более 5 %).

Выполненная работа является частью исследования, нацеленного на совершенствование методологии оценки надежности поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач. На основе выполненной оценки точности функций твердости рекомендуется применять в расчете вероятности безотказной работы цементованных зубчатых цилиндрических передач по критерию глубинной контактной вынос-

ливости функцию (9), а для нитроцементованных зубчатых колес – функцию (6).

Библиографические ссылки

1. Сопротивление контактной усталости крупномодульных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. А. Шишко, П. Г. Карпович // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 1 (46). С. 58–63.
2. Тескер Е. И., Гуревич Л. М. Современные требования к свойствам поверхностных слоев высоконагруженных деталей машинного оборудования в нефтегазхимии // Известия ВолгГТУ. 2019. № 4 (227). С. 56–60.
3. Hein M., Tobie T., Stahl K. Parameter study on the calculated risk of tooth flank fracture of case hardened gears. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2017, no. 11, pp. 1-6.
4. Руденко С. П., Валько А. Л. Определение параметров химико-термической обработки высоконапряженных зубчатых колес на основе расчетных моделей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, № 8. С. 353–358.

5. Tesker E. I. Перспективы применения лазерной обработки (ЛО) для повышения надежности и технического уровня зубчатых колес трансмиссий и приводов // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 2. С. 97–102. DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-97-102.

6. Kosenko V.V., Tesker E.I. Effect of axial play on the sealing ability of the radial single-lip seal in an abrasive environment. *Journal of friction and wear*, 2017, vol. 38, no. 3, pp. 237-241.

7. Короткин В. И., Колосова Е. М., Онишков Н. П. Оценка нагрузочной способности химико-термически упрочненных зубчатых передач с локальным контактом зубьев // Вестник машиностроения. 2020. № 8. С. 34–37. DOI: 10.46652/0042-4633-2020-8-34-37.

8. Онишков Н. П., Короткин В. И. К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. № 3 (90). С. 5–13.

9. Короткин В. И., Колосова Е. М., Онишков Н. П. Прогнозирование контактной выносливости упрочненных зубьев и нагрузочной способности эвольвентных зубчатых передач по критерию предельного состояния материала // Вестник машиностроения. 2021. № 12. С. 35–37.

10. Yao Li, Caichao Zhu, Xu Chen, Jianjun Tan. Fatigue Reliability Analysis of Wind Turbine Drivetrain Considering Strength Degradation and Load Sharing Using Survival Signature and FTA. *Energies*, 2020, no. 13, pp. 1-21. DOI: 10.3390/en13082108.

11. Brecher Ch., Löpenhaus Ch., Brimmers J., Hensler J. Influence of the Defect Size on the Tooth Root Load Carrying Capacity. *Gear Technology*, November/December, 2017, pp. 92-100.

12. Concli F., Fraccaroli L., Maccioni L. Gear Root Bending Strength: A New Multiaxial Approach to Translate the Results of Single Tooth Bending Fatigue Tests to Meshing Gears. *Metals*, 2021:11:863. DOI: 10.3390/met11060863.

13. Glodež S., Šori M., Vučković K., Risović S. Determination of Service Life of Sintered Powder Metallurgy Gears in Regard to Tooth Bending Fatigue. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, no. 39, pp. 129-137.

14. Zhou Ye, Zhu Caichao, Huaiju Liu, Hailan Song. Investigation of Contact Performance of Case-Hardened Gears Under Plastoelastohydrodynamic Lubrication. *Tribology Letters*, 2019, pp. 67-92. DOI: 10.1007/s11249-019-1202-7.

15. Houyi B., Caichao Z., Ye Zh., Xiaojin Ch., Houbin F., Wei Ye. Study on Tooth Interior Fatigue Fracture Failure of Wind Turbine Gears. *Metals*, 2020, no. 10, 1497, pp. 1-18. DOI: 10.3390/met10111497.

16. Wang W., Liu H., Zhu C., Tang J., Jiang Ch. Evaluation of contact fatigue risk of a carburized gear considering gradients of mechanical properties. *Friction*, 2020, no. 8, pp. 1039-1050. DOI: 10.1007/s40544-019-0317-z.

17. Yuan Tao Sun, Chao Liu, Qing Zhang, XianRong Qin. Multiple Failure Modes Reliability Modeling and

Analysis in Crack Growth Life Based on JC Method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, pp. 1-5. DOI: 10.1155/2017/2068620.

18. ZonglinGu, Caichao Zhu, Huaiju Liu, Xuesong Du. A comparative study of tribological performance of helical gear pair with various types of tooth surface finishing. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, no. 71, pp. 474-485.

19. Heli Liu, Huaiju Liu, Philippe Bocher, Caichao Zhu, Peitang Wei. Effects of the case hardening properties on the contact fatigue of a wind turbine gear pair. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, no. 4, pp. 3-24. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.04.010.

20. Baydu C., Rupesh P., Langlois P. Comparison of Tooth Interior Fatigue Fracture Load Capacity to Standardized Gear Failure Modes. *Gear solutions*, 2017, pp. 47-57.

References

1. Rudenko S.P., Valko A.L. Shishko S.A., Karpovich P.G. [Contact fatigue resistance of large-modulus gear wheels made of chromium-nickel steels]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov*, 2019, no. 1, pp. 58-63 (in Russ.).

2. Tesker E.I., Gurevich L.M. [Modern requirements for the properties of surface layers of highly loaded details of machine equipment in oil and gas]. *Izvestija VolgGTU*, 2019, no. 4, pp. 56-60 (in Russ.).

3. Hein M., Tobie T., Stahl K. Parameter study on the calculated risk of tooth flank fracture of case hardened gears. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2017, no. 11, pp. 1-6.

4. Rudenko S.P., Valko A.L. [Determination of the parameters of chemical-thermal treatment of high-stress gears based on calculation models]. *Uprochnjajushhie tehnologi i ipokrytija*, 2018, vol. 14, no. 8. pp. 353-358 (in Russ.).

5. Tesker E.I. [Prospects for the use of laser processing (LT) to improve the reliability and technical level of gear wheels of transmissions and drives]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 97-102 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2017-2-97-102.

6. Kosenko V.V., Tesker E.I. Effect of axial play on the sealing ability of the radial single-lip seal in an abrasive environment. *Journal of friction and wear*, 2017, vol. 38, no. 3, pp. 237-241.

7. Korotkin V.I., Kolosova E.M., Onishkov N.P. [Evaluation of the load capacity of chemically-thermally hardened gears with local tooth contact]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 8, pp. 34-37 (in Russ.). DOI: 10.46652/0042-4633-2020-8-34-37.

8. Onishkov N.P., Korotkin V.I. [On the assessment of contact fatigue life of chemically heat-strengthened gears]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 5-13 (in Russ.).

9. Korotkin V.I., Kolosova E.M., Onishkov N.P. [Predicting the contact endurance of hardened teeth and the load capacity of involute gears by the criterion of the limit state of the material]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021, no. 12. pp. 35-37 (in Russ.).

10. Yao Li, Caichao Zhu, Xu Chen, Jianjun Tan. Fatigue Reliability Analysis of Wind Turbine Drivetrain Considering Strength Degradation and Load Sharing Using Survival Signature and FTA. *Energies*, 2020, no. 13, pp. 1-21. DOI: 10.3390/en13082108.
11. Brecher Ch., Löpenhaus Ch., Brimmers J., Henser J. Influence of the Defect Size on the Tooth Root Load Carrying Capacity. *Gear Technology*, November/December, 2017, pp. 92-100.
12. Concli F., Fraccaroli L., Maccioni L. Gear Root Bending Strength: A New Multiaxial Approach to Translate the Results of Single Tooth Bending Fatigue Tests to Meshing Gears. *Metals*, 2021:11:863. DOI: 10.3390/met11060863.
13. Glodež S., Šori M., Vučković K., Risović S. Determination of Service Life of Sintered Powder Metallurgy Gears in Regard to Tooth Bending Fatigue. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, no. 39, pp. 129-137.
14. Zhou Ye, Zhu Caichao, Huaiju Liu, Hailan Song. Investigation of Contact Performance of Case-Hardened Gears Under Plastoelastohydrodynamic Lubrication. *Tribology Letters*, 2019, pp. 67-92. DOI: 10.1007/s11249-019-1202-7.
15. Houyi B., Caichao Z., Ye Zh., Xiaojin Ch., Houbin F., Wei Ye. Study on Tooth Interior Fatigue Fracture Failure of Wind Turbine Gears. *Metals*, 2020, no. 10, 1497, pp. 1-18. DOI: 10.3390/met10111497.
16. Wang W., Liu H., Zhu C., Tang J., Jiang Ch. Evaluation of contact fatigue risk of a carburized gear considering gradients of mechanical properties. *Friction*, 2020, no. 8, pp. 1039-1050. DOI: 10.1007/s40544-019-0317-z.
17. Yuan Tao Sun, Chao Liu, Qing Zhang, Xian Rong Qin Multiple Failure Modes Reliability Modeling and Analysis in Crack Growth Life Based on JC Method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, pp. 1-5. DOI: 10.1155/2017/2068620.
18. ZonglinGu, Caichao Zhu, Huaiju Liu, Xuesong Du. A comparative study of tribological performance of helical gear pair with various types of tooth surface finishing. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, no. 71, pp. 474-485.
19. Heli Liu, Huaiju Liu, Philippe Bocher, Caichao Zhu, Peitang Wei. Effects of the case hardening properties on the contact fatigue of a wind turbine gear pair. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, no. 4, pp. 3-24. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.04.010.
20. Baydu C., Rupesh P., Langlois P. Comparison of Tooth Interior Fatigue Fracture Load Capacity to Standardized Gear Failure Modes. *Gear solutions*, 2017, pp. 47-57.

Hardening Gradient Accuracy of Contact Surfaces of Gears

S.Yu. Lebedev, Post-graduate, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

V.N. Syzrantsev, DSc in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

M.N. Mikhailova, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Case-hardening of contact surfaces of teeth can increase durability and reliability of gears. In gears, chemical-thermal hardening by nitriding, carburizing and nitrocarburizing has become widespread. When performing design and verification calculations of gears, it is necessary to know the hardness gradient of the tooth hardened case, the accuracy of which determines the correctness of transmission calculations. The purpose of the article is to evaluate the accuracy of the existing functions of hardness gradient over the depth of the hardened case of gear contact surfaces based on known experimental data; the subject of research is the hardness gradient of carburized and nitrocarburized surfaces of gears.

The analysis of the existing hardness gradient of carburized and nitrocarburized surfaces of gears used in verification calculations of gears for resistance to bending fatigue and tooth interior fatigue fracture is carried out. The article presents the hardness gradient proposed by Tesker E.I., Korotkin V.I., Mack Aldener M., Dang Van K., Thomas J.

To estimate the accuracy of the considered hardness gradient, the approximation error was calculated. The approximating functions were the hardness gradient, and the actual values were the results of well-known experiments to determine the hardness by the depth of the hardened case of carburized and nitrocarburized rollers. The calculation was implemented using the MathCad package, in which the figure of the hardness gradient presented in the article were also built for all the experimental results used.

As a result of the calculation, the most accurate hardness gradient of carburized and nitrocarburized cases were determined. The hardness gradient proposed by MackAldener M. gives the least error during carbonization (up to 1.1 %). The hardness function proposed by V. I. Korotkin for nitrocarburizing gives the least error (up to 2.3 %). The least accurate values were shown by the hardness gradient developed by Dang Van K. (up to 5 %).

The work performed is part of the study aimed at improving the methodology for assessing the reliability of case-hardened cylindrical gears based on the use of numerical modeling methods and non-parametric statistics tools.

Keywords: hardness profile, hardness gradient, case hardening, chemical-thermal treatment, gear.

Получено 18.03.2022

Образец цитирования

Лебедев С. Ю., Сызранцев В. Н., Михайлова М. Н.
Оценка точности функций твердости упрочненного
слоя рабочих поверхностей зубчатых передач // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 2. С. 14–22. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-14-22.

For Citation

Lebedev S.Yu., Syzrantsev V.N., Mikhailova M.N.
[Hardening Gradient Accuracy of Contact Surfaces of
Gears]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*,
2022, vol. 25, no. 2, pp. 14-22 (in Russ.). DOI:
10.22213/2413-1172-2022-2-14-22.