

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ПРИ ИХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Для химико-термической обработки (ХТО) шестерен в настоящее время наиболее часто используются газовые цементация, нитроцементация и азотирование. Азотирование обеспечивает малую глубину упрочненного слоя (0,2 – 0,6 мм) и рекомендуется для зубчатых колес с  $m < 3$  мм. Объектом исследования были высоконагруженные цилиндрические зубчатые колеса тракторов и грузовых автомобилей с  $m = 3,5 - 5,0$  мм из сталей 25ХГТ и 20ХНЗА. Для таких шестерен рекомендуется глубина упрочненного слоя в пределах  $h = 0,8 - 1,2$  мм [1, 2]. Эта глубина может быть обеспечена при цементации и нитроцементации. Использование для нитроцементации более низкой температуры, чем при газовой цементации ( $840^\circ$  вместо  $930^\circ$ ), и применение ступенчатой закалки в горячем масле обеспечивают значительное снижение деформации изделий. Биение зубчатого венца цилиндрических шестерен с  $m = 4$  мм при этом составляет 0,08 мм вместо 0,12 мм, обычно получаемых после газовой цементации, деформация по профилю зуба не превышает 0,04 мм. При производстве шестерен в условиях МТЗ 53% наименований, а в условиях МЗШ 77% наименований подвергают нитроцементации. Поэтому этот процесс был выбран нами в качестве объекта исследования.

При выполнении цементации и нитроцементации используют безмуфельные агрегаты (БМА), шахтные печи, однокамерные печи многоцелевого назначения (фирм Ipsen – ФРГ, Aichelin – Австрия, Holcroft – США и др.).

Применение автоматизированных БМА непрерывного действия особенно, в условиях крупносерийного производства, которое характерно для изготовления тракторов и грузовых автомобилей, имеет ряд преимуществ: повышение на 50% удельной производительности и снижение на 25% удельного расхода жаропрочных сталей. Весь цикл ХТО, вплоть до промывки и отпуска, полностью автоматизирован.

При производстве шестерен в условиях МТЗ 83%, а в условиях МЗШ 100% наименований проходят ХТО в БМА. Поэтому в качестве оборудования для выполнения процесса нитроцементации с последующей термообработкой нами был принят БМА.

Данное исследование было выполнено в производственных условиях Минского завода шестерен (МЗШ) для 4-х партий колес (по 2 партии для каждого материала). ХТО производилось после шевингования зубьев. Обработка каждой партии колес объемом 20 – 30 шт. на отдельной операции выполнялась при постоянных рациональных условиях, с соблюдением требований НТД к оборудованию и оснастке. Измерения параметра шероховатости  $R_a$  и микротвердости боковой поверхности зубьев  $H_c$  до и после ХТО производились на одних и тех же шестернях и зубьях. На каждой шестерне измерения выполнялись на 4-х зубьях, равномерно расположенных по окружности зубчатого венца (через  $90^\circ$ ). Для измерений в основном использовались вырезанные из зубьев сегменты.

Измерения  $R_a$  на каждом зубе или сегменте выполнялись в 3-х зонах по высоте зуба: у вершины, в зоне делительной окружности и у впадины зуба. В расчет далее принималось усредненное значение параметра  $R_a$  для каждого зуба. Для измерений  $R_a$  использовался профилограф - профилометр мод. 202. Измерения микротвердости поверхности зубьев производились в зоне делительной окружности, т. к. основными причинами выхода из строя изучаемых шестерен тракторов и автомобилей являются усталостные выкрашивание и отслаивание поверхности

зубьев в зоне делительной окружности. Измерения производились с помощью прибора ПМТ-1 в трех точках по длине зуба (сегмента) и усреднялись.

На первом этапе обработки экспериментальных данных нами были построены эмпирические линии регрессии, характеризующие взаимосвязи изученных параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен после ХТО с их исходными значениями перед данной операцией, т.е. после шевингования.

Пример таких линий показан на рис. 1.

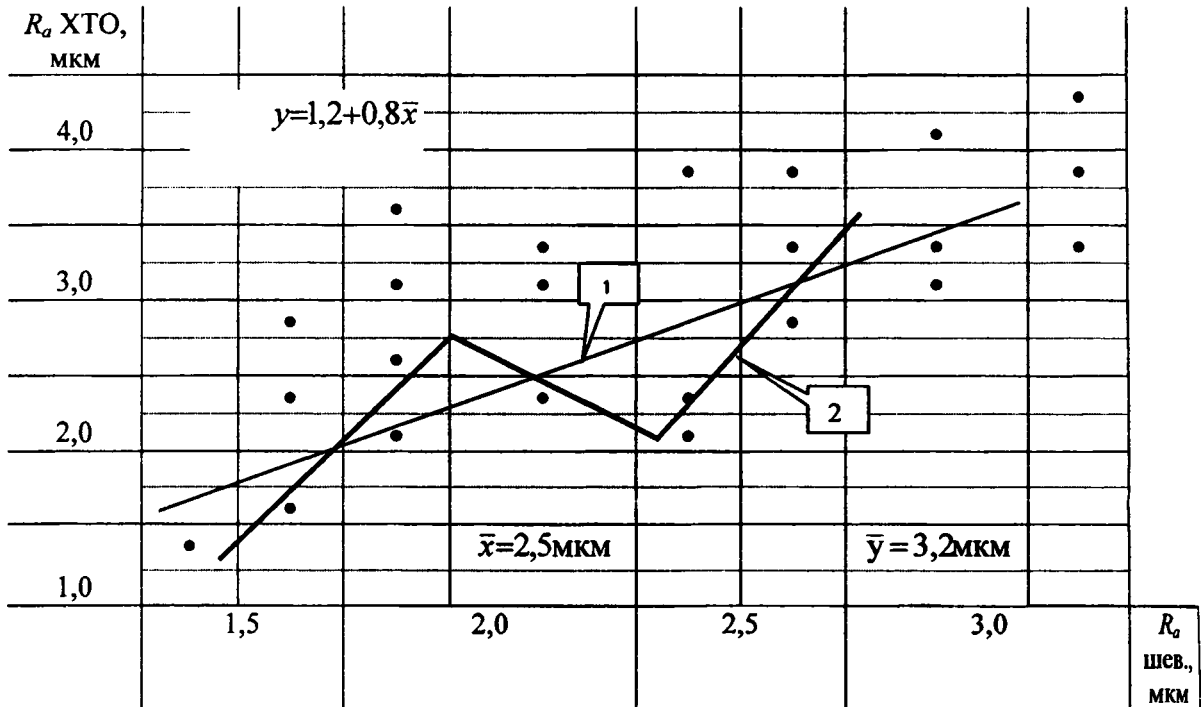


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности зубьев цилиндрических шестерен после ХТО от исходных значений (зубчатое колесо  $m = 2,5$  мм,  $z = 20$ , материал детали – сталь 25ХГТ):  
1 – теоретическая линия регрессии; 2 – эмпирическая линия регрессии

Анализ этих линий свидетельствует о том, что между рассмотренными показателями качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен после ХТО и их исходными значениями существует достаточно тесная взаимосвязь и она близка к линейной.

Затем нами были выполнены расчеты характеристик этих взаимосвязей.

В таблице 1 приведены усредненные результаты выполненных расчетов для исследованных зубчатых колес, в которой приняты следующие обозначения:

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $S_x$ ,  $S_y$  – средние арифметические значения и средние квадратические отклонения рассматриваемого параметра качества до и после ХТО;

$V = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$  – коэффициент изменения данного параметра качества при ХТО;

$a$ ,  $b$  – коэффициенты уравнения регрессии  $\bar{y} = a + b\bar{x}$ , описывающего изменение данного параметра качества при ХТО;

$\eta_z$ ,  $\eta_r$ ,  $\gamma_{xy}$  – эмпирическое и теоретическое (для полинома второй степени) корреляционные отклонения, коэффициент парной корреляции между значениям данного параметра качества до и после ХТО;

$t_r$  – критерий Стьюдента достоверности значения  $\gamma_{xy}$ ;

$\epsilon_{ср}$  – средняя относительная ошибка уравнения регрессии  $\bar{y} = f(\bar{x})$ ;

$F$  – критерий Фишера адекватности уравнения регрессии;

$A\%$ ,  $B\%$  – доли  $S_y^2$ , которые возникают на операции ХТО ( $A\%$ ) и наследуются с предыдущей операцией ( $B\%$ ).

**Таблица 1 – Статистические характеристики процессов изменения параметров качества поверхностей зубьев при химико-термической обработке (ХТО) цилиндрических шестерен**

Материал зубчатых колес	Основные статистические характеристики							
	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$S_x$	$S_y$	$V$	$a$	$b$	$\eta_z$
$R_a \text{ ХТО} = f(R_a \text{ шев.}), \text{ мкм}$								
Сталь 25ХГТ	2,762	2,979	0,825	0,95	0,93	1,11	0,75	0,72
Сталь 20ХНЗА	1,22	1,235	0,12	0,35	0,99	0,48	0,62	0,73
$H_u \text{ ХТО} = f(H_u \text{ шев.}), \text{ кг/мм}^2$								
Сталь 25ХГТ	1887,8	8844,6	147,5	1158,4	0,21	2938,3	3,13	0,45
Сталь 20ХНЗА	1682,2	7607,7	97,3	477,1	0,22	4969,0	1,57	0,37

Продолжение таблицы 1

Материал зубчатых колес	Основные статистические характеристики						
	$\eta_T$	$r_{xy}$	$t_r$	$\varepsilon_{cp}, \%$	$F$	$A, \%$	$B, \%$
$R_a \text{ ХТО} = f(R_a \text{ шев.}), \text{ мкм}$							
Сталь 25ХГТ	0,68	0,65	4,23	12,4	0,81	57,8	42,2
Сталь 20ХНЗА	0,70	0,67	4,15	12,38	0,83	44,9	55,1
$H_u \text{ ХТО} = f(H_u \text{ шев.}), \text{ кг/мм}^2$							
Сталь 25ХГТ	0,43	0,40	2,8	10,38	0,955	84,0	16,0
Сталь 20ХНЗА	0,34	0,32	3,06	11,3	0,923	90,0	10,0

Была показана адекватность приведенного выше уравнения регрессии при описании взаимосвязи рассмотренных параметров качества поверхности после ХТО с их исходными значениями. С помощью критерия  $\xi$  Романовского была доказана несущественность различий между значениями  $\eta_z$ ,  $\eta_T$  и  $r_{xy}$ . Поэтому для оценки тесноты взаимосвязи рассмотренных параметров качества поверхности зубьев после ХТО с их исходными значениями можно использовать значения  $r_{xy}$ .

Укажем основные результаты выполненных нами исследований изменения характеристик качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен при их ХТО (нитроцементации и безмуфельных агрегатах).

**Параметр  $R_a$  шероховатости боковых поверхностей зубьев.**

При ХТО имеет место достаточно тесная взаимосвязь значений  $R_a$  с их исходными величинами ( $r_{xy} = 0,65 - 0,67$ ), что свидетельствует о их пооперационном наследовании.

Уменьшение дисперсии  $R_a$  после ХТО может быть достигнуто почти в равной степени как за счет совершенствования процесса ХТО ( $A = 44,9 - 57,8\%$ ), так и за счет улучшения процесса шевингования зубьев, как предшествующей операции ( $B = 42,2 - 55,1\%$ ). Значения  $R_a$  при ХТО незначительно возрастают (в 1,01 – 1,07 раз).

**Микротвердость  $H_u$  боковых поверхностей зубьев.**

Операция ХТО не только значительно (в среднем на 326%) повышает микротвердость поверхностей зубьев, что соответствует назначению этого процесса, но и существенно преобразует набор исходных значений микротвердости ( $r_{xy} = 0,32 - 0,40$ ), т.е. служит барьером на после шевингования и ХТО. На рисунке 2 показан пример микроструктур зубьев из стали 25ХГТ после шевингования (рис. 2,а) и ХТО (рис. 2,б). Установлено, что после ХТО происходит значительное уменьшение размера зерна и пористости, что способствует увеличению прочности зубьев.

## Выводы

1. Принятая методика обработки и анализа результатов экспериментального исследования учитывает случайный характер изучаемого процесса, позволяет оценить степень тесноты и форму рассматриваемых зависимостей, разложить общую дисперсию параметров качества после данной операции на унаследованную с предыдущей операции (В) и сформированную на данной операции (А).

2. Все рассмотренные показатели качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен ( $R_a$ ,  $H_\mu$ ) после ХТО (нитроцементации в безмуфельном агрегате) для изученных материалов (стали 25ХГТ, 20ХН3А) достаточно тесно взаимосвязаны с их исходными значениями (после шевингования) ( $r_{xy} = 0,32-0,67$ ) и эти взаимосвязи с достаточной точностью ( $\epsilon_{cp} = 10,38-12,4\%$ ) могут быть описаны полиномом первой степени.

3. Значения параметра шероховатости  $R_a$  поверхностей зубьев после ХТО достаточно тесно связаны с их исходными значениями ( $r_{xy} = 0,65 - 0,67$ ). Регулирование значений  $R_a$  после ХТО должно производиться как за счет оптимизации исходных значений (В = 42,2 – 55,1%), так и за счет управления процессом ХТО (А = 44,9 – 57,8%). ХТО незначительно увеличивает исходные значения  $R_a$  (в 1,01 – 1,07 раз).

4. Значения микротвердости  $H_\mu$  поверхности зубьев при ХТО значительно увеличиваются (в среднем на 326%) и менее тесно по сравнению с другими характеристиками качества поверхностей зубьев взаимосвязаны со своими исходными значениями ( $r_{xy} = 0,32 - 0,40$ ). Управление значениями  $H_\mu$  после ХТО следует осуществлять в основном за счет самого процесса ХТО (А = 74,0 – 90,0%). Оптимизация исходных перед ХТО значений  $H_\mu$  на 10,0 – 16,0% обеспечивает дисперсию  $H_\mu$  после ХТО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кораблев А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зуб-передач. –М.: Машиностроение, 1968. –288с.

УДК 621.793

*Шелег В.К., Присевок А.Ф., Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусский национальный технический университет  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

**Введение.** Порошковые материалы, получаемые методами порошковой металлургии, в отличие от литейных обладают рядом полезных и управляемых в определенных пределах свойств. К их числу относят пористость, твердость, тугоплавкость, особые триботехнические, электрические и магнитные свойства, экономичность и экологичность, что обуславливает широкое применение подобных материалов в машиностроении для изготовления изделий различного назначения, а также для нанесения функциональных покрытий [1]. Легирование металлических порошков компонентами твердой смазки (графитом, дисульфидом молибдена и т.п.), а также присадками, повышающими прочностные свойства материала, позволяет увеличить срок их службы в несколько раз. Для формирования покрытий из порошковых материалов используют такие способы, как газопламенное, плазменное и детонационное напыление, электроконтактное, электроимпульсное, индукционное припекание, электродуговая и индукционная наплавка. Однако большинство из этих методов обладает значительной энергоемкостью, требуют