

УДК 621.833

**ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ПРИ ИХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

*д-р техн. наук, проф. М.М. КАНЕ,
канд. техн. наук, доц. А.И. МЕДВЕДЕВ, канд. техн. наук Б.В. ИВАНОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Показана целесообразность выполнения исследования процесса газовой цементации с последующими закалкой и отпуском шестерен в безмуфельном агрегате. Представлены основные результаты выполненных исследований изменения характеристик качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен при их химико-термической обработке (нитроцементации в безмуфельных агрегатах).

Приведены методика и основные результаты экспериментального исследования изменения параметра шероховатости R_a , микротвердости H_{μ} , остаточных напряжений I и II рода в поверхностях зубьев при химико-термической обработке, выполнен их анализ.

Введение. Решение задачи повышения надежности многооперационного технологического процесса обработки детали по параметрам качества возможно как за счет совершенствования на всех операциях оборудования, оснастки, назначения оптимальных режимов резания, так и за счет рационального проектирования технологического процесса, обоснованного назначения требований к качеству детали на всех промежуточных операциях ее обработки. Эти требования должны учитывать закономерности пооперационного изменения параметров качества.

Выполненные исследования процессов обработки зубьев цилиндрических шестерен (шевингования, химико-термической обработки (ХТО), зубошлифования, зубохонингования и др.) позволили оценить возможности этих процессов, влияние различных факторов на параметры качества колес при реализации этих процессов, разработать рекомендации по выбору свойств технологических систем, обеспечивающих требуемое качество зубчатых колес. Однако не были установлены закономерности пооперационного изменения параметров качества цилиндрических шестерен. В настоящее время отсутствует общепризнанная методика выбора требований к характеристикам качества зубчатых колес на различных операциях их изготовления, которая бы учитывала явления технологической наследственности на всех этапах обработки шестерен.

Нами поставлена задача – установить основные закономерности пооперационного изменения параметров качества поверхностей зубьев на операциях их обработки и предложить методику назначения требований к этим параметрам на всех операциях обработки шестерен.

В данной статье приведены основные результаты экспериментального исследования изменения основных характеристик качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен (параметра шероховатости R_a , микротвердости H_{μ} , остаточных напряжений I и II рода σ_1 и σ_2) при их химико-термической обработке.

Постановка задачи. Для химико-термической обработки 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 нашего исследования являются 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]. Эта глубина может быть обеспечена при цементации и нитроцементации. Использование для нитроцементации более низкой температуры, чем при газовой цементации (840 °С вместо 930 °С), 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 Минского тракторного завода (МТЗ) 53 %, а в условиях Минского завода шестерен (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.).

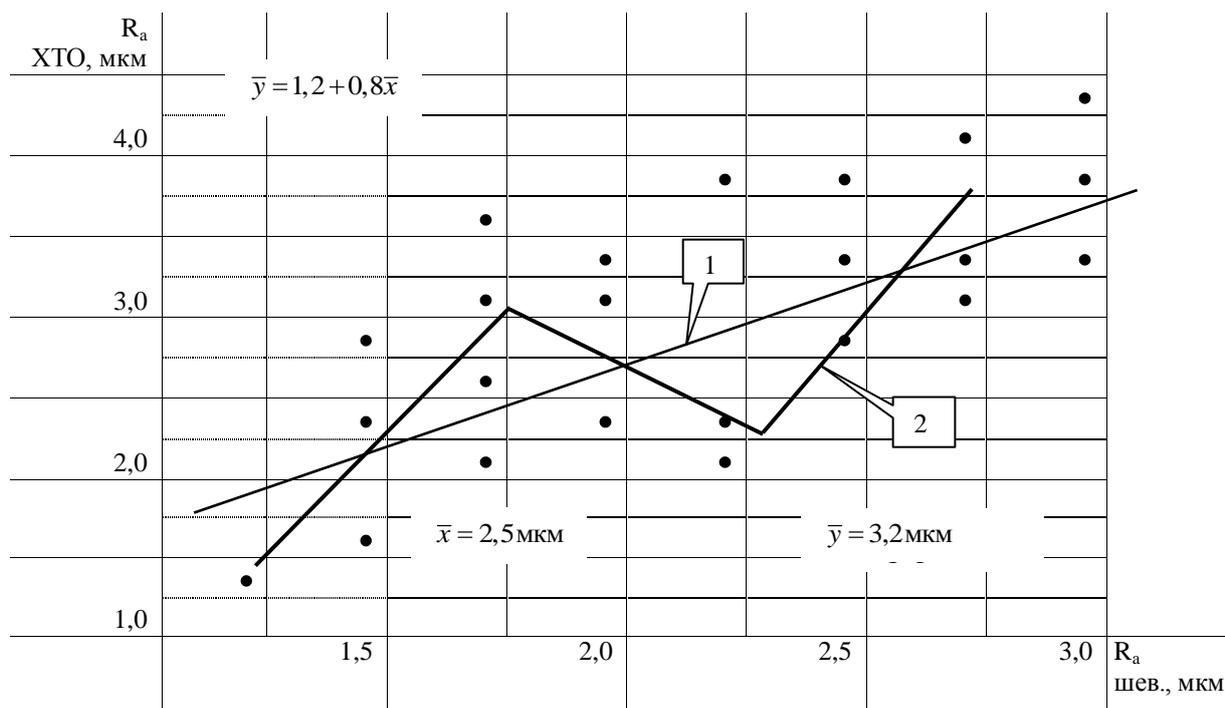
Применение автоматизированных БМА непрерывного действия, особенно в условиях крупносерийного производства, которое характерно для изготовления тракторов и грузовых автомобилей, имеет ряд преимуществ: повышение на 50 % удельной производительности и снижение на 25 % удельного расхода жаропрочных сталей. 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 безмуфельных агрегатах. Поэтому в качестве оборудования для выполнения процесса нитроцементации с последующей термообработкой нами был принят БМА.

Методы исследований. Данное исследование было выполнено в производственных условиях МЗШ для 4-х партий колес (по 2 партии для каждого материала). Химико-термическая обработка производилась 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_{μ} , остаточных напряжений I и II рода 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°). 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, так как 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-3 в трех точках по длине зуба (сегмента) и усреднялись.

Измерения остаточных напряжений I (σ_1) и II (σ_2) рода в поверхности зубьев выполнялись рентгеновским методом. Этот метод был использован нами потому, что он позволяет оценить значения напряжений I и II рода, в отличие от других распространенных методов (механических, магнитоэлектрических, оптических и др.), которые предназначены в основном для измерений остаточных напряжений I рода. Рентгеновский метод определения остаточных напряжений I рода имеет некоторые недостатки. В частности, при его использовании исследуемое тело рассматривается как плосконапряженное, так как составляющая напряжений, направленная в глубь тела не принимается во внимание из-за малой глубины (3...50 мкм) проникновения рентгеновских лучей внутрь металла. Однако в последние годы этот метод все более широко распространяется, и исследователи накопили большой опыт повышения его точности. Такой опыт имеется и в Физико-техническом институте НАН Беларуси, где выполнялись данные измерения. К тому же наши исследования имеют сравнительный характер. Их целью является анализ пооперационного изменения остаточных напряжений при обработке зубьев. В этих условиях даже при наличии систематической ошибки измерений можно получить достоверные результаты. Рентгеновская съемка производилась в $Co_{K\alpha}$ -излучении на дифрактометре ДРОН-3 с монохроматором с неподвижных образцов, установленных в специальном держателе. В качестве эталонов использовались образцы, изготовленные из той же стали, что и исследуемые шестерни, отожженные при соответствующей температуре и медленно охлажденные вместе с печью. Методика измерений σ_1 и σ_2 описана в [2]. 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 рисунке 1.



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 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;

$V = \bar{x}/y$ – 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;

$\eta_{\text{э}}$, η_m , r_{xy} – соответственно 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 r_{xy} ;

$\varepsilon_{\text{ср}}$ – 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 операции (B , %).

Для расчета значений A и B нами было выполнено разложение дисперсии параметра оптимизации S_y^2 на две части, одна из которых (S_{yx}^2) возникает на данной операции, а другая (δ_{yx}^2) – наследуется с предыдущей операции:

$$S_y^2 = S_{yx}^2 + \delta_{yx}^2; \quad (1)$$

$$S_{yx}^2 = S_y^2(1 - r_{xy}^2); \quad (2)$$

$$\delta_{yx}^2 = b^2 S_x^2 = \left(r_{xy} \frac{S_y}{S_x} \right) \cdot S_x^2. \quad (3)$$

Здесь r_{xy} – коэффициент парной корреляции между значениями данного параметра качества на предшествующей и данной операции; b – коэффициент в уравнении регрессии (4), связывающего значения y и x .

$$\bar{y} = a + b\bar{x} \quad (4)$$

Обозначения S_y^2 и S_x^2 расшифрованы выше.

Затем определяли значения A и B .

$$A = \frac{S_{yx}^2}{S_y^2} \cdot 100; \quad (5)$$

$$B = \frac{\delta_{yx}^2}{S_y^2} \cdot 100. \quad (6)$$

Информация об A , %, и B , %, позволяет объективно установить эффективность управления «у» на данной и предшествующей операциях с точки зрения уменьшения дисперсии S_y^2 .

Результаты исследования. Показана адекватность приведенного выше уравнения регрессии (4) при описании взаимосвязи рассмотренных параметров качества поверхности после ХТО с их исходными значениями. С помощью критерия ξ Романовского [3] была доказана несущественность различий между значениями $\eta_{\text{э}}$, η_m 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 в безмуфельных агрегатах).

Параметр R_a шероховатости боковых поверхностей зубьев

При ХТО имеет место достаточно тесная взаимосвязь значений R_a с их исходными величинами ($r_{xy} = 0,65 \dots 0,67$), 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 ($A = 44,9 \dots 57,8 \%$), так и за счет улучшения процесса шевингования зубьев как предшествующей операции ($B = 42,2 \dots 55,1 \%$). Значения R_a при ХТО незначительно возрастают (в 1,01...1,07 раз).

Микротвердость H_{μ} 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 ($r_{xy} = 0,32 \dots 0,40$), т.е. служит барьером на пути пооперационного наследования значений микротвердости. Регулирование значений H_{μ} после ХТО может быть осуществлено в основном за счет самой операции ХТО ($A = 84,0 \dots 90,0 \%$). Выбор рациональных значений H_{μ} после шевингования лишь на 10,0...16,0 % обуславливает изменение значений H_{μ} после ХТО. Нами было выполнено исследование микроструктуры зубьев цилиндрических шестерен 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.

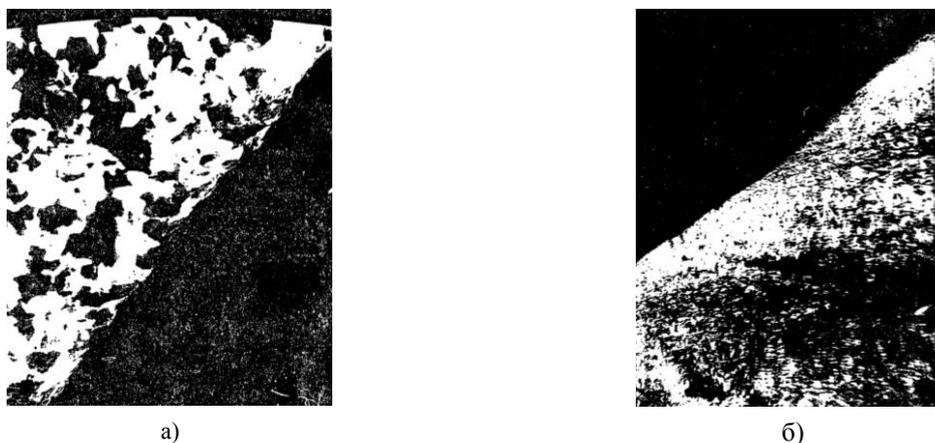


Рис. 2. Микроструктура поверхности зубьев цилиндрических шестерен:
а – после шевингования; б – после ХТО

Остаточные напряжения первого рода σ_1 в поверхностном слое зубьев цилиндрических шестерен

При химико-термической обработке происходит значительное увеличение сжимающих остаточных напряжений I рода, возникших в поверхности зубьев шестерен после шевингования (в 4,5...10 раз). При этом отмечается достаточно тесная взаимосвязь значений σ_1 после ХТО с исходными величинами ($r_{xy} = 0,55 \dots 0,56$). Однако дисперсия σ_1 после ХТО на 71,0...73,0 % обуславливается самим процессом ХТО и лишь на 27,0...29,0 % – исходными значениями σ_1 . То есть регулирование исходных значений σ_1 позволяет на 27,0...29,0 % обеспечить значения σ_1 после ХТО. Это является существенным резервом обеспечения требуемых значений σ_1 после ХТО. С целью проверки наличия технологической наследственности при формировании остаточных напряжений I рода в поверхностном слое зубьев при ХТО, установленного нами в описываемых исследованиях, был выполнен дополнительный эксперимент. Партия зубчатых колес из стали 25ХГТ после зубофрезерования и шевингования была подвергнута отжигу для полного снятия внутренних напряжений, а затем обработана по обычному маршруту (ХТО, зубохонингование). После всех операций были измерены остаточные напряжения I и II рода в поверхностном слое зубьев. Полученные результаты были сопоставлены с результатами, полученными при обработке деталей второй партии таких же зубчатых колес, но подвергнутых после шевингования отжигу (табл. 2).

Остаточные напряжения I и II рода в поверхностном слое зубьев шестерен, прошедших после шевингования операцию отжига, оказались меньшими после ХТО и зубохонингования, чем у зубчатых колес, не подвергнутых отжигу, на величину остаточных напряжений в поверхностном слое зубьев после шевингования, что видно из таблицы 2. Это дополнительно подтвердило наличие явления технологической наследственности при формировании остаточных напряжений I и II рода в поверхности зубьев на различных операциях обработки цилиндрических зубчатых колес, в том числе и при ХТО. Следовательно, химико-термическая обработка цилиндрических зубчатых колес не является непреодолимым барьером для наследования исходных значений остаточных напряжений в поверхностном слое зубьев.

Таблица 2

Влияние ХТО на изменение остаточных напряжений в поверхностном слое зубьев цилиндрических шестерен из стали 25ХГТ

Вид остаточных напряжений	Партия зубчатых колес					
	подвергнута отжигу после шевингования			не подвергнута отжигу после шевингования		
	Операции обработки зубчатых колес					
	шевингование, отжиг	ХТО	зубохонингование	шевингование, отжиг	ХТО	зубохонингование
I рода, МПа	–	–1894,8	–527,3	–202,6	–2050,0	–703,0
II рода, МПа	–	431,0	352,0	126,3	548,0	466,0

Остаточные напряжения второго рода σ_2 в поверхностном слое зубьев цилиндрических шестерен

Установлено, что для рассмотренных материалов цилиндрических зубчатых колес при ХТО существует тесная взаимосвязь значений σ_2 с их исходными перед ХТО величинами ($r_{xy} = 0,70 \dots 0,75$), т.е. имеет место явление технологической наследственности при формировании значений σ_2 после ХТО. При этом происходит увеличение исходных значений σ_2 в 4,0...4,3 раз. Управление значениями σ_2 после ХТО может быть осуществлено примерно в равной степени как за счет оптимизации исходных значений σ_2 ($B = 48,9 \dots 56,0$ %), так и за счет регулирования условий проведения операции ХТО ($A = 44,0 \dots 56,0$ %).

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 (B) и сформированную на данной операции (A).

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

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

4. Значения микротвердости H_{μ} 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 ($r_{xy} = 0,32 \dots 0,40$). Управление значениями H_{μ} после ХТО следует осуществлять в основном за счет самого процесса ХТО ($A = 74,0 \dots 90,0$ %). Оптимизация исходных перед ХТО значений H_{μ} на 10,0...16,0 % обеспечивает дисперсию H_{μ} после ХТО.

5. Химико-термическая обработка сохраняет характер исходных значений остаточных напряжений I рода σ_1 в поверхностях зубьев (сжимающие) и вызывает их существенное увеличение (в 4,5...10,0 раз). Доказана, в том числе и с помощью специального эксперимента, тесная взаимосвязь значений σ_1 после ХТО с исходными величинами ($r_{xy} = 0,52 \dots 0,54$). Управление значениями σ_1 после ХТО должно осуществляться в основном за счет регулирования самого процесса ХТО ($A = 71,0 \dots 73,0$ %). Однако и оптимизация исходных значений σ_1 позволяет существенно повлиять на значения σ_1 после ХТО ($B = 27,0 \dots 29,0$ %).

6. Значения остаточных напряжений II рода σ_2 в поверхности зубьев после ХТО существенно увеличиваются (в 4,0...4,3 раз) и тесно взаимосвязаны со своими исходными значениями ($r_{xy} = 0,70 \dots 0,75$). Обеспечение требуемых значений σ_2 после ХТО примерно в равной степени может быть выполнено как за счет самого процесса ХТО ($A = 44,0 \dots 51,1$ %), так и за счет оптимизации исходных значений σ_2 перед ХТО ($B = 48,9 \dots 56,0$ %).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кораблев, А.И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А.И. Кораблев, Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1968. – 288 с.
2. Реатинография в физическом металловедении / под ред. Ю.А. Богоряцкого. – М.: Гос. изд-во науч.-техн. лит. по черной и цветной металлургии, 1961. – 325 с.
3. Райбман, Н.С. Корреляционные методы определения характеристик сложных взаимосвязанных комплексов / Н.С. Райбман // Приборостроение и средства автоматизации: справ. Т. 1; под общ. ред. А.Н. Гаврилова. – М.: Машгиз, 1963.

Поступила 28.05.2009