DOI: 10.15593/2224-9982/2015.42.09
УДК 621.912

В.Ф. Макаров[1], Н.А. Ворожцова[1], А.С. Горбунов[1, 2]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
[2] ОАО «Редуктор-ПМ», Пермь, Россия

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СПИРАЛЬНО-КОНИЧЕСКИХ ЗУБЬЕВ ШЕСТЕРЕН

Приведены результаты исследования влияния последовательности выполнения технологических операций обработки зубьев шестерен на параметры качества поверхностного слоя: шероховатость, остаточные напряжения, наклеп, усталостную прочность. В результате проведенных расчетов установлено образование сжимающих и растягивающих напряжений. Наиболее опасное значение растягивающих напряжений наблюдается в радиусе перехода от впадины к боковой поверхности зуба. Доказано, что в переходной зоне обработки сопряженных поверхностей (от боковой поверхности к впадине зуба), обрабатываемых по разным технологическим процессам, наблюдаются максимальные изгибные напряжения в результате резкого изменения (градиента) остаточных напряжений и микротвердости. В этих местах во время эксплуатации могут образовываться микротрещины, которые при дальнейшей эксплуатации могут вызвать разрушение шестерен. Для ослабления воздействия отрицательных факторов технологической наследственности нужно ввести операцию дробеструйной обработки. Проведено исследование таких параметров качества поверхностного слоя, как шероховатость, наклеп и остаточные напряжения, которые оказывают существенное влияние на усталостную прочность зубьев шестерен. Применение операции закалки с последующей обдувкой песком и дополнительно обдувкой микрошариками дает наибольшие сжимающие напряжения. При этом микротвердость поверхности возрастает на 15–20 %. По результатам усталостных испытаний установлено, что наибольший предел выносливости имеют образцы, изготовленные с применением упрочнения дробью, он на 15 % выше по сравнению с серийным маршрутом обработки.

Ключевые слова: зубообработка, технологическая наследственность, спирально-коническая шестерня, остаточные напряжения, качество поверхностного слоя, дробеструйная обработка.

V.F. Makarov[1], N.A. Vorozhtsova[1], A.S. Gorbunov[1, 2]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2] OJSC “Reductor-PM”, Perm, Russian Federation

ENHANCEMENT OF FATIGUE STRENGTH OF TEETH OF SPIRAL BEVEL GEAR

It is presented the results of influence of technological operation sequence of processing gear wheel teeth on such parameters of surface layer as roughness, residual stress, cold hardening and fatigue strength. As a result of calculations it is established formation of compression and tension stress. The most dangerous tension stress is observed within transition radius from tooth space to tooth

flank. It is proved, that in a transition zone of fillet surface (from tooth flank to tooth space), which is treated by different technological processes, are observed maximum bending stress by reason of drastic change of residual stress and microhardness. At these places during operation micro cracks can be formed, that on further operation may cause gear destruction. To reduce the influence of negative factors of a technological heredity it is necessary to enter bead blasting operation. It is carried out research of such parameters of surface layer as: a roughness, cold hardening and residual stress, which make essential influence on fatigue strength of gear wheel teeth. Application of hardening with the subsequent sand blow-off and additional blow-off by micro balls gives the greatest compression stress. Therewith microhardness of a surface grows by 15–20 %. By fatigue test results it is established, that samples produced with fraction hardering have the greatest limit of endurance, which above by 15 % in comparison with a serial route of processing.

Keywords: gear treatment, technological heredity, spiral bevel gear, residual stresses, the quality of the surface layer, bead blasting.

Введение

В современном машиностроении наиболее сложным и ответственным является производство газотурбинных двигателей, авиационных редукторов и трансмиссий. С каждым годом растут требования к безопасности полетов военной и гражданской техники, что, в свою очередь, отражается на ужесточении требований к показателям качества и надежности, предъявляемых к агрегатам и изделиям в целом. Надежность авиационной техники во многом зависит от эксплуатационных свойств зубчатых передач, которые работают в тяжелых условиях агрессивных сред, повышенных температур и знакопеременных нагрузок. Такие условия работы приводят к появлению и накоплению различных дефектов в поверхностном слое. Эти дефекты в поверхностном слое зубьев шестерен, объединяясь в микротрещины, под действием знакопеременных нагрузок приводят к появлению усталостных трещин, что, в конечном счете, приводит к разрушению зубчатых колес. Известно, что разрушение деталей начинается с поверхностного слоя, и именно поверхностному слою зубчатых колес следует уделять особое внимание в процессе их изготовления [1].

В связи с этим возникает одна из актуальных проблем современного машиностроения – повышение усталостной прочности зубьев шестерен. Решение проблемы может быть как конструкторское, так и технологическое. Конструкторские методы связаны с увеличением усталостной прочности за счет увеличения габаритов и веса деталей. В связи с тем, что увеличение габаритов и веса ограничено, наиболее эффективными являются технологические методы повышения надежности и ресурса работы шестерен. Эти методы сводятся к созданию такой цепочки последовательности операций обработки, при которой

создаются геометрические, физико-механические и химические свойства поверхностного слоя, обладающего максимальными эксплуатационными свойствами в рабочих условиях.

Формирование свойств поверхностного слоя деталей происходит на протяжении всего технологического процесса. Каждая операция технологического процесса, начиная с заготовительных и заканчивая сборочными, влияет на качество поверхностного слоя. Явление переноса качественных характеристик поверхностного слоя от предыдущих к предстоящим операциям, которое сказывается в дальнейшем на эксплуатационных характеристиках, называется технологической наследственностью [2]. Таким образом, технологическая наследственность устанавливает связь методов обработки с эксплуатационными свойствами. Изменение свойств и структуры поверхностного слоя при проведении операций может иметь положительный или отрицательный характер. В связи с этим ставится задача сохранения полезных свойств и минимизации вредных.

В настоящее время ведутся научные исследования для изучения методов управления процессами технологического наследования.

В.М. Смелянский и В.Ю. Блюменштейн предлагают использовать феноменологический подход к технологическому обеспечению качества поверхностного слоя и долговечности деталей машин, в соответствии с которым состояние поверхностного слоя деталей на всех стадиях изготовления и эксплуатации рассматривается как результат процесса непрерывного накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности металла, протекающего под влиянием программы и истории нагружения [3].

В исследованиях А.С. Васильева представлен аппарат трансформации свойств с помощью коэффициентов изменения показателей качества изделия [4]. Эффективность предлагаемого аппарата трансформации свойств в значительной мере определяется достаточностью информационного обеспечения, основой которого являются сведения о значениях коэффициентов трансформации свойств для соответствующих условий взаимодействия технологических сред различных уровней с изделием.

В.Ф. Безъязычный и А.Л. Водолагин [5] исследовали явление наследования свойств методом конечных элементов. С помощью программного продукта ANSYS строили модели напряженнно-деформи-

рованного состояния поверхностного слоя на различных операциях технологического процесса.

В работе П.И. Ящерицына [6] научно доказано, что в технологическом процессе существуют своеобразные барьеры. Некоторые технологические факторы не могут преодолеть барьеры и в таком случае не влияют на конечные свойства изделия. Например, существенными барьерами служат термические и упрочняющие операции. Другие факторы преодолевают барьеры, но при этом значительно теряют исходную силу и влияют на конечные эксплуатационные характеристики очень слабо.

Равным образом вопросы технологического наследования можно решать с помощью метода графов, основоположником которого является А.М. Дальский. Для этого проектируется структурная модель процесса формирования параметров качества в виде графа. Вершины графов представляют собой свойства изделия, а ребра характеризуют передачу – наследование свойств. Данный метод позволяет выявить причинно-следственные связи при формировании свойств поверхностного слоя, которые важны при рассмотрении вопроса технологического наследования, когда вся цепочка обработки рассматривается не изолированно, а во взаимосвязи.

Анализ причин разрушения шестерен

Для научно-обоснованного определения взаимосвязи последовательности операций проведен анализ возможного влияния технологических факторов на формирование основных параметров качества поверхностного слоя на примере изготовления спирально-конических шестерен (СКШ) коробки приводов двигателя ПС-90А (рис. 1, *а*). Спирально-конические шестерни работают в тяжелых условиях знакопеременных нагрузок и имеют два режима работы: стартовый (пусковой) и рабочий. На рабочем режиме шестерня обеспечивает передачу мощности от КВД двигателя к различным его агрегатам. На стартерном режиме спирально-коническая шестерня обеспечивает передачу мощности от стартера к ротору высокого давления при запуске двигателя. Этот режим характеризуется малой протяженностью по времени и высокими нагрузками на шестерню. В результате зубья шестерен испытывают значительные знакопеременные изгибающие нагрузки, поэтому к спирально-коническим шестерням предъявляются особые требо-

вания по точности изготовления, контактной, изгибной прочности и износостойкости поверхности зуба. Зубчатый венец помимо зубьев имеет впадины (рис. 1, *б*), которые, как известно, являются концентраторами напряжений при эксплуатационных знакопеременных нагрузках. Качество поверхностного слоя впадин, риски во впадинах (рис. 1, *в*), безусловно, влияют на усталостную прочность и возможное разрушение зубчатых колес в процессе эксплуатации.

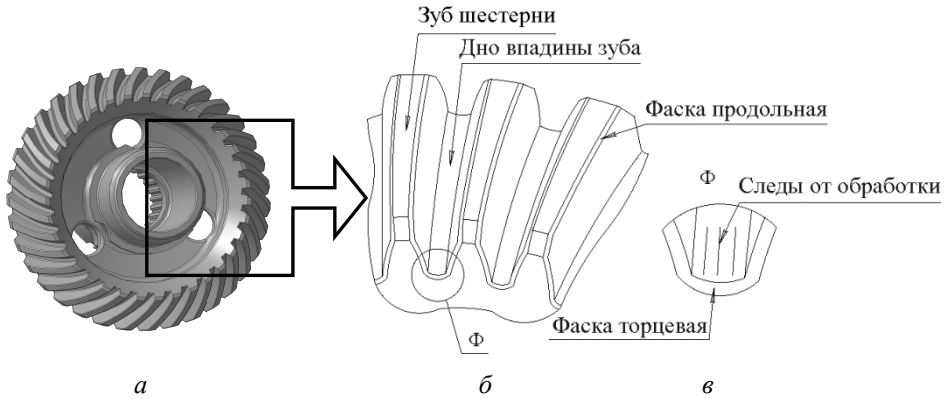


Рис. 1. Общий вид спирально-конической шестерни и впадины

Для определения наиболее опасных участков и величины опасных напряжений с позиции зарождения микротрещин и снижения усталостной прочности проведено с помощью программы ANSYS математическое моделирование возникающих напряжений от действия на зубья изгибающих контактных сил P в процессе работы зацепления по схеме на рис. 2. Величину образующихся напряжений (МПа) (рис. 2) можно рассчитать по известной зависимости

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и}}}{W_{\text{и}}} = \frac{6W_a h_x \cos\gamma_k}{S_1^2},$$

где W_a – нагрузка, действующая по линии зацепления; h_x – плечо изгиба; S_1 – толщина зуба в опасном сечении; a – угол действия изгибающей силы P (см. рис. 2).

В результате проведенных расчетов установлено образование сжимающих и растягивающих напряжений. Наибольшее опасное значение растягивающих напряжений наблюдается в радиусе перехода от впадины к боковой поверхности зуба (см. рис. 2).

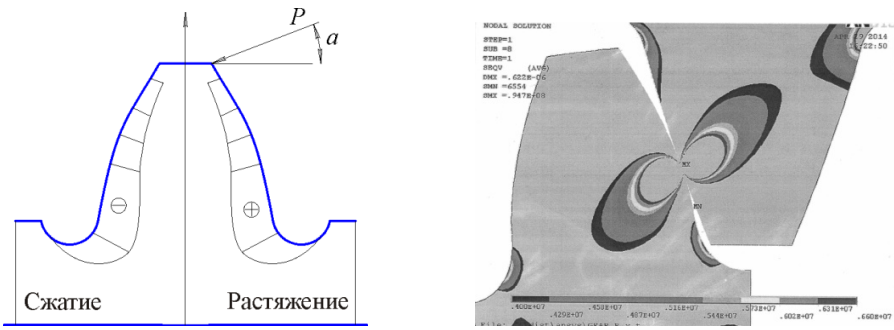


Рис. 2. Схема модели образования контактных и изгибных напряжений от силы *P*, приложенной к профилю зуба

Для установления причинно-следственных связей между операциями обработки зубьев и параметрами качества поверхности были построены графы (рис. 3, 4). Максимальные рабочие напряжения сосредоточены на стыке двух поверхностей: впадины и боковой поверхности зуба, имеющих разную технологическую цепочку операций.

Целями построения графов являются:

– исследование влияния технологической наследственности на формирование параметров качества поверхностного слоя;

– установление причины расположения максимальных напряжений в радиусе перехода;

– устранение вредной технологической наследственности для обеспечения максимальной усталостной прочности.

Качество поверхностного слоя при исследовании усталостной прочности определяется такими параметрами, как шероховатость, наклеп и остаточные напряжения. Эти параметры заготовки пронумерованы так же, как и операции технологического процесса. Ребра графа, прежде всего ориентированные на параметры качества поверхностного слоя, характеризуются передачей ребра *k*. Индексы расшифровываются следующим образом: первая цифра – параметр поверхностного слоя; вторая цифра – номер предыдущей операции, включая заготовительную; третья цифра – номер последующей операции, на которой проявляется наследование свойств. Свойство *x*, выраженное любой вершиной графа, изменяется в ходе технологического процесса и характеризуется величиной x_1. Таким образом, $x_1 = x_0 / k$. Отсюда следует, что передача представляет собой коэффициент, показывающий количественное изменение свойства. Для рассматриваемых графов имеем

$k_1 = \dfrac{\mathrm{Ra}_i}{\mathrm{Ra}_{i+n}}$ – коэффициент изменения шероховатости;

$k_2 = \dfrac{\sigma_i}{\sigma_{i+n}}$ – коэффициент изменения остаточных напряжений;

$k_3 = \dfrac{H_i}{H_{i+n}}$ – коэффициент изменения наклепа.

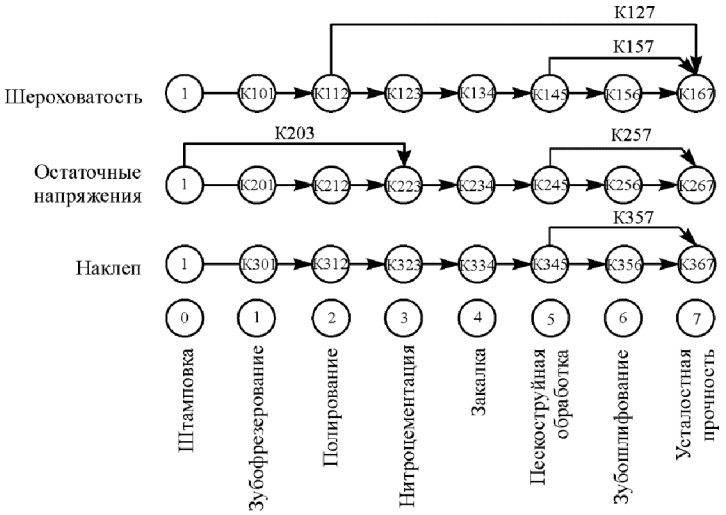


Рис. 3. Граф наследования параметров качества поверхностного слоя боковой поверхности в процессе изготовления СКШ

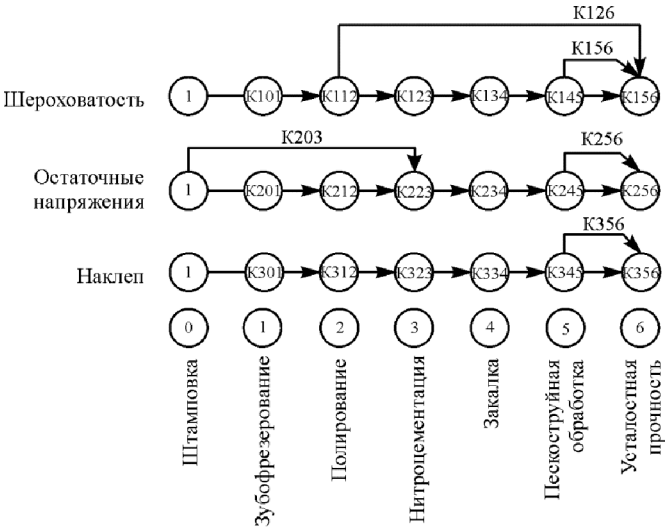


Рис. 4. Граф наследования параметров качества поверхностного слоя впадины в процессе изготовления СКШ

Из теоретической части можно сделать следующие выводы: в переходной зоне обработки сопряженных поверхностей (от боковой поверхности к впадине зуба), обрабатываемых по разным технологическим процессам, наблюдаются максимальные изгибные напряжения в результате резкого изменения (градиента) остаточных напряжений и микротвердости. В этих местах во время эксплуатации могут образовываться микротрещины. Для ослабления воздействия отрицательных факторов технологической наследственности нужно ввести операцию дробеструйной обработки. Основной эффект состоит в том, что значительное количество микротрещин, находящихся в поверхностном слое металла, при пластической деформации смыкается и поверхность становится более цельной – залечивается. Поверхностный наклеп должен выровнять физико-механические свойства в смежных зонах поверхностей, обработанных по разным технологическим процессам, устраняя повышенные напряжения, возникающие на границах участков с различной структурой и микротвердостью [7–9].

Методика проведения экспериментальных исследований

Для установления влияния технологических факторов и взаимосвязи между последовательностью и типами операций обработки зубьев и параметрами качества поверхности дна впадины проведены экспериментальные исследования по специальной методике. Сравнивались технологические процессы зубообработки без ППД и с ППД.

На первом этапе проведена обработка заготовок конических шестерен из стали 20Х3МВФ-Ш по серийному технологическому процессу без ППД: штамповка → подготовка базовых поверхностей → зубонарезание → нитроцементация → закалка.

1. Операция зуборезная (станок – мод. 528, инструмент – 9-дюймовая резцовая головка с резцами из материала Р6М5К5; режимы: скорость резания 37 м/мин; подача 150 с/зуб → 3,2 мм/мин движение обката; СОТС – МР-7).

2. Операция газовой нитроцементации (печь Ц-60, нагрев – $T = 925$ °С, время выдержки $t = 4…7$ ч, охлаждение – воздух).

3. Операция закалки (установка FL-2000, нагрев $T = 910$ °С, время выдержки $t = 30$ мин, охлаждение – масло) + обработка холодом (охлаждение $T = –130$ °С, время выдержки $t = 2$ ч) + отпуск (печь ПН-34, нагрев $T = 300$ °С, время выдержки $t = 2$ ч, охлаждение – воздух).

4. Обдувка песком (ручная камера А-6-1650, электрокорунд 24А F180…F220, давление воздуха p = 2 кгс/см^2).

В качестве дополнительной упрочняющей операции (ППД) проведена дробеструйная обработка дна впадин конических шестерен (упрочнение) (установка Blast, микрошарики WS-70 (Франция), фракция 180–420 мкм, давление воздуха p = 4,6 кгс/см^2). Для определения остаточных напряжений по методу Н.Н. Давиденкова спроектированы и вырезаны специальные образцы из конического зубчатого колеса (рис. 5, *а*) согласно схеме вырезки (рис. 5, *б*). Для определения микротвердости поверхности во впадинах зубчатого венца спроектированы и вырезаны образцы из конического зубчатого колеса (рис. 5, *в*). Образцы вырезались последовательно после выполнения каждой из операций.

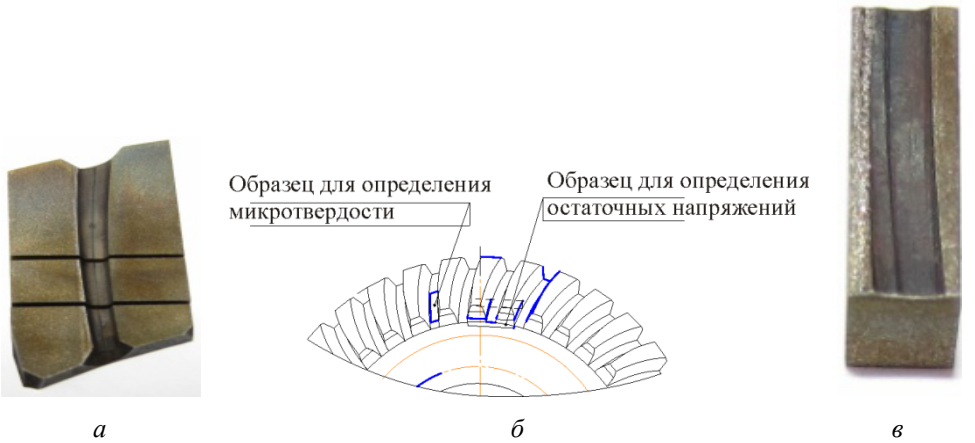


Рис. 5. Схема вырезки образцов из впадины зуба: *а* – для определения остаточных напряжений; *б* – схема вырезки; *в* – для измерения микротвердости

Образцы для определения остаточных напряжений и микротвердости вырезались проволочным электродом на прецизионном электроэрозионном станке с ЧПУ фирмы Sodick (Япония).

Остаточные напряжения определялись на установке АПООН методом Н.Н. Давиденкова (по схеме на рис. 6).

Микротвердость измерялась на микротвердомере LM-700 фирмы LECO при нагрузке 25 г (рис. 7).

В итоге заготовки СКШ, прошедшие по серийному технологическому маршруту до операции «закалка», обрабатывались по трем различным вариантам маршрута обработки: «А» – серийный вариант об-

работки зуба – зубошлифование (когда поверхность дна впадины зуба не шлифуется, рис. 8, *а*); «Б» – вариант зубошлифования совместно с поверхностью дна впадины зуба (рис. 8, *б*); «В» – вариант упрочнения ППД поверхности впадины зуба (рис. 8, *в*). Также были выполнены исследования влияния упрочняющей операции ППД – обработки дробью и операции обдувки песком.

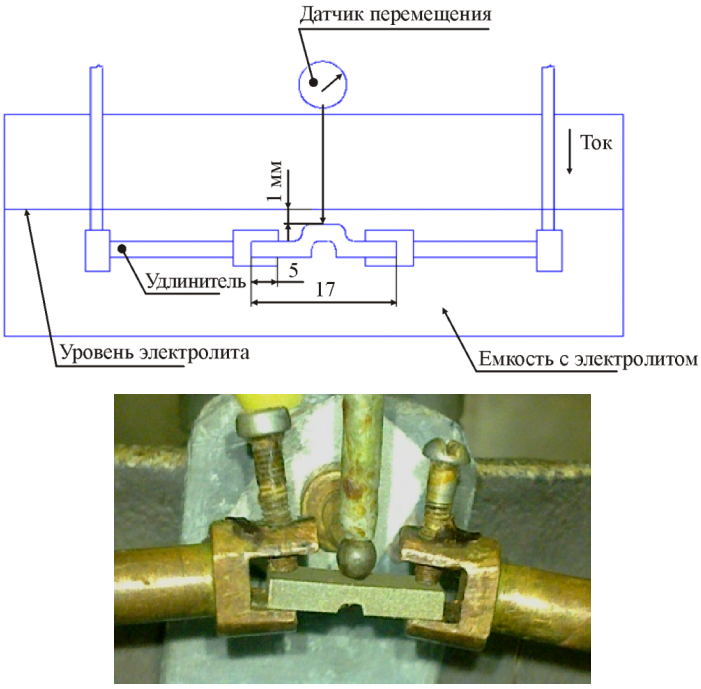
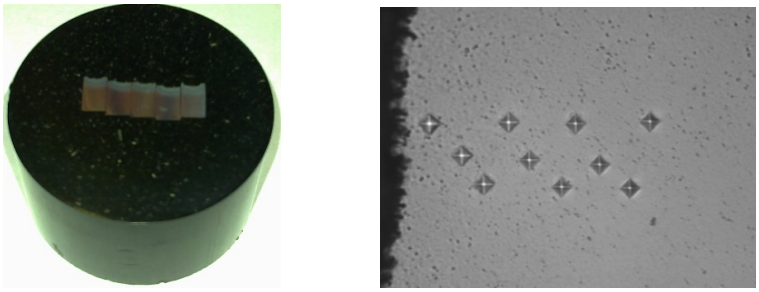
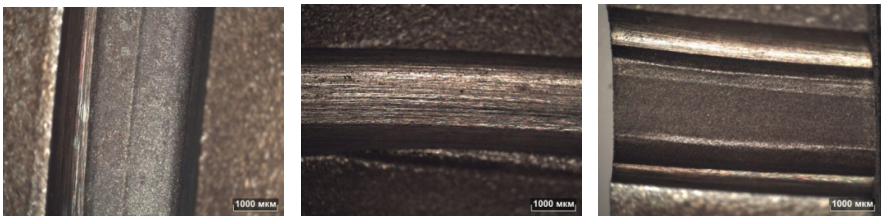


Рис. 6. Схема и общий вид измерения остаточных напряжений методом травления образцов на установке АПООН



а *б*

Рис. 7. Образцы для исследования микротвердости (*а*) и микроструктура по глубине поверхности дна впадины конического зубчатого колеса (*б*)



а *б* *в*

Рис. 8. Фото поверхности дна впадины СК зуба шестерни (увел. ×2) различных вариантов маршрута обработки: *а* – вариант «А» – серийный ТП; *б* – вариант «Б» – шлифование дна впадины; *в* – вариант «В» – дробеструйная обработка (ППД)

Определение предела выносливости производилось на вибрационном электродинамическом стенде ВЭДС-400А при изгибных колебаниях по симметричному циклу напряжений с частотой основного тона по специальным образцам (см. рис. 8), изготовленным из СКШ по вариантам «А», «Б» и «В».

Уровень переменных напряжений задавался по тензорезистору № 1, наклееному в месте действия максимальных напряжений, дополнительный контроль в процессе испытаний осуществлялся по тензорезистору № 2. Схема зажатия образца в замке-зажиме и наклейки тензорезисторов приведена на рис. 9. Для сравнительной оценки сопротивления усталости по трем вариантам использовался метод ступенчато увеличивающейся нагрузки. База сравнительных испытаний 20 млн циклов, частота 625 Гц. В каждой серии испытано по 10 образцов. Подготовка и проведение испытаний выполнены в соответствии с требованиями ОСТ 101049–83.

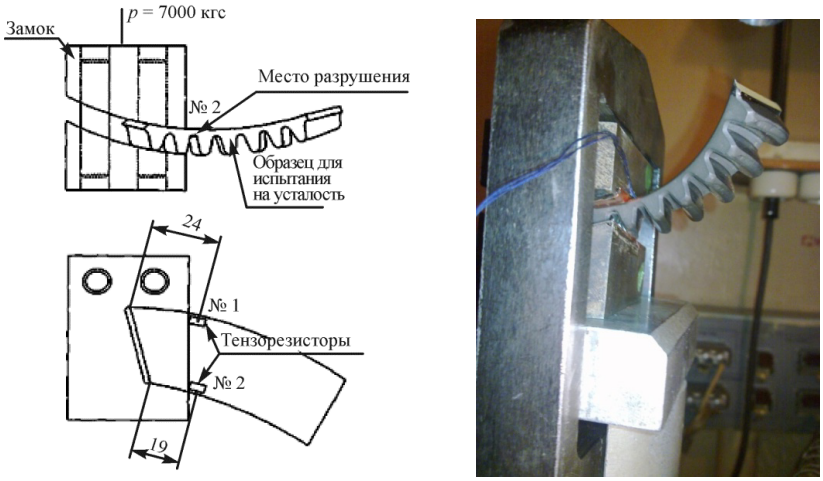


Рис. 9. Схема зажатия образца в замке-зажиме и наклейки тензорезисторов с базой 5 мм на вибрационном электродинамическом стенде типа ВЭДС-400А

Характер изменения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ во впадине конического зубчатого венца по глубине поверхностного слоя *h* после различных видов обработки приведен на рис. 10.

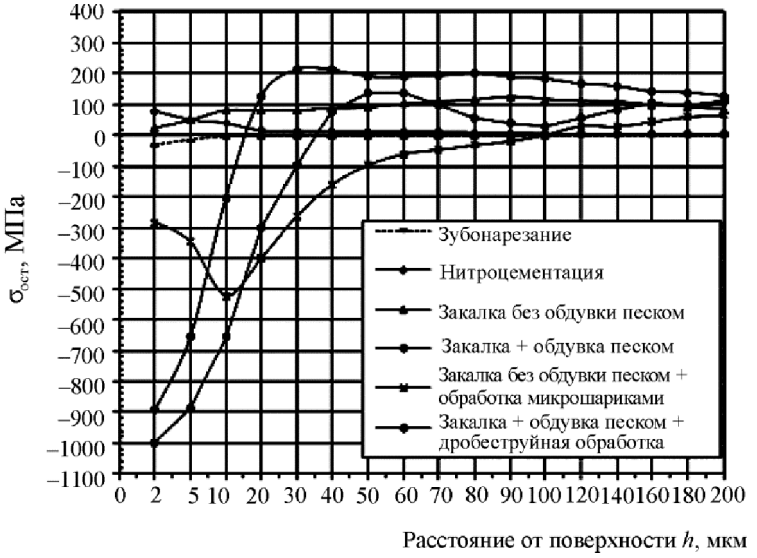


Рис. 10. Характер распределения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ на дне впадины конического зубчатого колеса по глубине поверхностного слоя *h* после различных видов обработки

В результате анализа измерений остаточных напряжений установлены следующие особенности.

После выполнения операции зубонарезания на поверхности дна впадины залегают незначительные сжимающие остаточные напряжения до –31 МПа, при этом наклеп на поверхности также минимален, что свидетельствует о взаимно уравновешивающем влиянии теплового и силового факторов процесса резания.

В последующем процессе нитроцементации без обдувки сжимающие напряжения переходят в область незначительных растягивающих напряжений у поверхности дна впадины до величины +79 МПа.

Применение последующей операции закалки без обдувки песком приводит к некоторому увеличению растягивающих напряжении до величины +126 МПа.

Последующая операция обдувки песком переводит остаточные напряжения в область сжатия. На поверхности появляются значительные сжимающие напряжения до –900 МПа, переходящие на глубине

15 мкм в растягивающие – до +315 МПа. Это можно объяснить поверхностно-пластическим деформированием поверхности ударным воздействием частичек абразива при невысокой температуре процесса.

Выполнение операции закалки с последующим дополнительным упрочнением дна впадины микрошариками (ППД) вместо обдувки песком приводит к появлению меньших сжимающих напряжений до –530 МПа, но на большей глубине 100 мкм.

Применение операции закалки с последующей обдувкой песком и дополнительно обдувкой микрошариками (ППД) образует наибольшие сжимающие напряжения до –1017 МПа, переходящие на небольшой глубине 35 мкм в растягивающие – до +15 кгс/мм^2. При этом микротвердость поверхности возрастает до 809–834 HV 0,025. Общий характер изменения остаточных напряжений по ходу техпроцесса изображен на рис. 11.

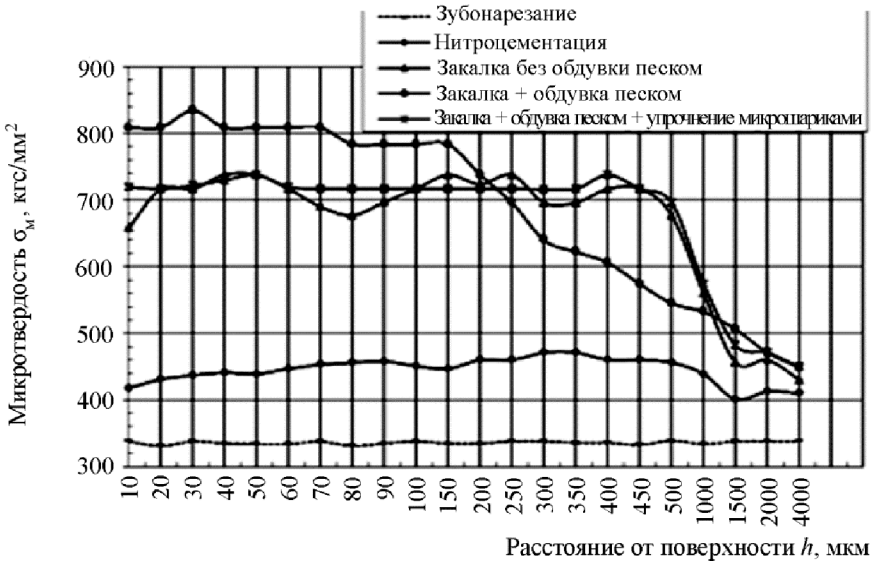


Рис. 11. Диаграмма изменения остаточных напряжений по маршруту обработки на глубине 20 мкм от поверхности впадины

В результате анализа влияния последовательности обработки впадины зубьев на различных операциях на изменение микротвердости поверхностного слоя (рис. 12) установлено, что наименьший наклеп (до 340 кгс/мм^2) образуется при зубонарезании колес. Последующая закалка без обдувки песком резко повышает микротвердость до 650–740 кгс/мм^2 на глубине до 500 мкм. Наибольший наклеп до 780–

810 кгс/мм^2 вызывает применение обдувки песком и микрошариками после закалки. Применение обдувки микрошариками после закалки обеспечивает микротвердость до 710 кгс/мм^2 на значительной глубине до 500 мкм.

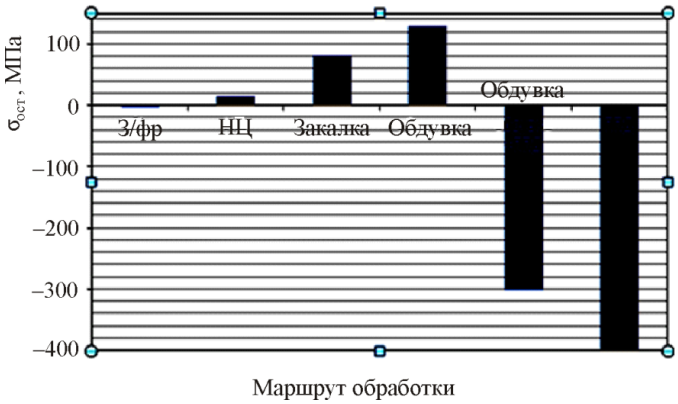


Рис. 12. Диаграмма изменения микротвердости поверхности на образцах, вырезанных из дна впадины конического зубчатого колеса после различных видов обработки

По результатам усталостных испытаний (таблица) установлено, что наибольший предел выносливости σ_{-1} = 41 кгс/мм^2 имеют образцы, изготовленные по варианту «В» с применением упрочнения дробью (ППД), что выше на 15 % по сравнению с серийным маршрутом обработки [10]. Таким образом, благоприятное воздействие метода ППД и формирование высоких остаточных напряжений сжатия способствуют увеличению усталостной прочности СКШ.

Влияние маршрутов обработки СКШ на усталостную прочность

№ п/п	Маршрут обработки	Среднее напряжение $\sigma_{-1}^{ср}$, кгс/мм^2
1	Вариант А	35,5
2	Вариант Б	32,5
3	Вариант В	41

Заключение

На основании анализа результатов исследований можно сделать вывод, что наиболее благоприятная картина распределения остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое дна впадины зубчатого венца наблюдается после выполнения последовательности следующих

операций: нитроцементации, закалки, упрочнения микрошариками (метод ППД). При этом микротвердость поверхностного слоя увеличивается в 2–2,5 раза по сравнению с зубонарезанием. Метод ППД способствует увеличению усталостной прочности на 30–40 %.

Библиографический список

1. Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Повышение качества и надежности зубьев спирально-конических шестерен технологическими методами // Вестник Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 8–12.

2. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.]. – М.: Изд-во Моск. авиац. ин-та, 2000. – 364 с.

3. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю. Концепция инженерии поверхностного слоя в категориях пластичности и технологического наследования // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 17–20.

4. Васильев А.С. Направленное формирование качества изделий машиностроения в многосвязных технологических средах: дис. … д-ра техн. наук. – М., 2001. – 407 с.

5. Безъязычный В.Ф., Водолагин А.Л. Исследование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин с учетом технологической наследственности // Вестник Рыбинск. гос. авиац. технол. акад. им. П.А. Соловьева. – 2008. – № 1. – С. 15–20.

6. Ящерицын П.И. Технологическое наследование эксплуатационных параметров деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. – 2004. – № 9. – С. 20–22.

7. Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Влияние последовательности обработки спирально-конических шестерен на распределение остаточных напряжений и величину наклепа поверхностного слоя зубьев // Технология машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 9–12.

8. Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Применение методов ППД при обработке деталей ГТД // Наукоемкие технологии в машиностроении: материалы всерос. науч.-практ. конф., Ишимбай, 10–12 июня 2012 г. – Ишимбай, 2012. – С. 12–13.

9. Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Исследование влияния технологической наследственности при обработке зубьев шестерен на качество

поверхностного слоя и усталостную прочность // Надежность и качество: тр. междунар. симпоз. – Пенза, 2013. – Т. 2. – С. 158–161.

10. Разработка методов усталостных испытаний деталей машин как средство объективной оценки конкурентоспособности и качества новых технологических процессов в машиностроении / В.Ф. Макаров, А.С. Горбунов, М.В. Песин, А.Х. Сакаев // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ–2013): сб. науч. ст. V Междунар. НТК, 22–24 мая 2013 г., Курск / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. – С. 321–325.

References

1. Makarov V.F., Gorbunov A.S. Povyshenie kachestva i nadezhnosti zubev spiralno-konicheskikh shesteren tekhnologicheskimi metodami [Improvement of quality and reliability of teeth of spiral bevel gears by technological methods]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 8-12.

2. Dalskiy A.M., Bazrov B.M., Vasilev A.S. [et al.]. Tekhnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroitelnom proizvodstve [A technological heredity in machine-building manufacture]. Moskovskiy aviatsionnyy institut, 2000. 364 p.

3. Smelyanskiy V.M., Blyumenshteyn V.Yu. Kontseptsiya inzhenerii poverkhnostnogo sloya v kategoriyakh plastichnosti i tekhnologicheskogo nasledovaniya [The concept of engineering surface layer in categories of plasticity and technological inheritance]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2001, no. 4, pp. 17-20.

4. Vasilev A.S. Napravlennoe formirovanie kachestva izdeliy mashinostroeniya v mnogosvyaznykh tekhnologicheskikh sredakh [Direct formation of quality of mechanical engineering products in multicoherent technological environments]. Doctoral thesis in Technical Sciences. Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni N.E. Baumana, 2001. 407 p.

5. Bezyazychnyy V.F., Vodolagin A.L. Issledovanie vliyaniya technologicheskikh usloviy obrabotki na ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin s uchetom tekhnologicheskoy nasledstvennosti [Research of influence of processing technological conditions on operational properties of machine elements taking into account a technological heredity]. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii imeni P.A. Soloveva*, 2008, no. 1, pp. 15-20.

6. Yashcheritsyn P.I. Tekhnologicheskoe nasledovanie ekspluatatsionnykh parametrov detaley mashin [Technological inheritance of operational parameters of machine elements]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2004, no. 9, pp. 20-22.

7. Gorbunov A.S., Makarov V.F. Vliyanie posledovatelnosti obrabotki spiralno-konicheskikh shesteren na raspredelenie ostatochnykh napryazheniy i velichinu naklepa poverkhnostnogo sloya zubev [Influence of sequence of processing spiral bevel gear on distribution of residual stress and magnitude of cold work hardening surface layer of teeth]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2012, np. 3, pp. 9-12.

8. Makarov V.F., Gorbunov A.S. Primenenie metodov PPD pri obrabotke detaley GTD [Application of SPD methods in processing of GTE details]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii"*. Ishimbay, 2012, pp. 12-13.

9. Makarov V.F., Gorbunov A.S. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri obrabotke zubev shesteren na kachestvo poverkhnostnogo sloya i ustalostnuyu prochnost [Research of influence of a technological heredity in processing of teeth of gear wheels on quality of surface layer and fatigue strength]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo"*. Penza, 2013, vol. 2, pp. 158-161.

10. Makarov V.F., Gorbunov A.S., Pesin M.V., Sakaev A.Kh. Razrabotka metodov ustalostnykh ispytaniy detaley mashin kak sredstvo obektivnoy otsenki konkurentosposobnosti i kachestva novykh tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii [Developmen of fatigue tests of machine elements as a mean of an objective estimation of competitiveness and quality of new technological processes in mechanical engineering]. *Sbornik nauchnykh statey V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Mashinostroenie – osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii (TM–2013)"*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2013, pp. 321-325.

Об авторах

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Ворожцова Наталья Александровна (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Горбунов Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: makarovv@pstu.ru), инженер ОАО «Редуктор-ПМ» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93).

About authors

Vladimir F. Makarov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Natalya A. Vorozhtsova (Perm, Russian Federation) – Master's Degree Student, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Alexander S. Gorbunov (Perm, Russian Federation) – Doctoral Student, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: makarovv@pstu.ru), Engineer, OJSC "Reductor-PM" (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Получено 15.05.2015