

В. Ф. Макаров, А. С. Горбунов

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ЗУБЬЕВ СПИРАЛЬНО-КОНИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Приведены результаты исследования влияния последовательности выполнения технологических операций обработки зубьев шестерен на параметры качества поверхностного слоя – шероховатость, остаточные напряжения и наклеп. Установлено, что наиболее благоприятная картина распределения остаточных напряжений в поверхностном слое дна впадины зубчатого венца наблюдается после операции закалки с последующим упрочнением микрошариками (метод ППД). При этом микротвердость поверхностного слоя увеличивается в 2–2,5 раза. *Газотурбинный двигатель; спирально-коническая шестерня; зубья; надежность; ресурс; зубообработка; качество поверхностного слоя; впадина; микротвердость; остаточные напряжения*

### ВВЕДЕНИЕ

Один из основных показателей качества и конкурентоспособности изделий – надежность (безотказность и долговечность) определяется эксплуатационными свойствами их деталей и соединений: прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, герметичность и т. д. [1]. В процессе изготовления изделий их свойства непрерывно изменяются в результате двух взаимодействующих процессов: трансформирования и сохранения свойств изделий. Трансформирование свойств происходит в основном вследствие прямого технологического воздействия на предмет производства. Сохранение же этих свойств связано с явлениями технологической наследственности. При этом неизменно приходится обращаться к фактору времени. Для того чтобы использовать явления технологической наследственности для практики изготовления прецизионных изделий, необходим грамотный проведенный анализ. Такой анализ позволяет принять соответствующие технологические меры, которые могут, в первую очередь, быть сведены к изменению условий формообразования на заготовительной операции или при термообработке [2].

Одна из актуальных проблем на ОАО «Пермский Моторный Завод» – это проблема повышения надежности и ресурса работы спирально-конических зубьев шестерен коробки приводов ГДТ. 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 основного производимого газотурбинного двигателя ПС-90А ограничено, наиболее эффективными являются технологические методы повышения надежности и ресурса работы конических зубчатых шестерен (КЗК). Эти методы сводятся к созданию такой цепочки операций и видов операций, при которых создаются геометрические, физико-механические и химические свойства, обеспечивающие надежную эксплуатацию и ресурс конических шестерен и газотурбинного двигателя в целом. Зубчатые колеса работают в условиях агрессивных сред, высоких температур, действия значительных знакопеременных нагрузок. Воздействие этих факторов может привести к появлению и накоплению различных дефектов в структуре материала, чаще всего – в виде развития усталостных трещин, изменения структуры и физико-механических свойств, коррозии металла. Обычно эти дефекты образуются в тонком поверхностном слое деталей и развиваются вглубь детали с последующими разрушением. Качество поверхностного слоя таких деталей определяется последовательностью технологических операций механической обработки зубьев шестерен.

Известно, что различные виды (как механическая, так и химико-термическая) обработки поверхностей деталей формирует определенный, свойственный каждому методу обработки, свой макро-, микро-, субмикрорельеф обработанной поверхности со своими физико-химическими свойствами. Каждому виду обработки соответствуют свои характерные свойства поверхности, которые с точки зрения эксплуатационных свойств детали могут быть как положительными (т. е. желаемые, например остаточные напряжения сжатия), так и отрицательные

(т. е. нежелательные, например остаточные напряжения растяжения). В связи с этим ставится задача сформировать за счет подбора последовательности выполнения операций зубообработки такие свойства поверхностного слоя детали, которые обеспечивали бы надежную эксплуатацию изделия современных авиационных двигателей, т. е. создание положительной технологической наследственности.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Для научно-обоснованного определения этой последовательности проведен анализ возможного влияния технологических факторов на формирование основных параметров качества поверхностного слоя на примере изготовления конических шестерен 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 режимы. На рабочем режиме шестерня обеспечивает передачу мощности от КВД двигателя к различным агрегатам двигателя. На стартерном режиме спирально-коническая шестерня обеспечивает передачу мощности от стартера к ротору высокого давления (КВД) при запуске двигателя. Этот режим характерен 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 требования 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.

Для определения наиболее опасных участков и величины опасных напряжений с позиции зарождения микротрещин и снижения усталостной прочности с помощью программы ANSYS проведено математическое моделирование возникающих напряжений от действия на зубья изгибающих контактных сил  $P$  в процессе работы зацепления по схеме на рис. 2.

Величину образующихся напряжений (рис. 2) можно рассчитать по известной зависимости [3].

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и}}}{W_{\text{и}}} = \frac{6W_a h_x \cos \gamma_k}{S_1^2}, \quad (1)$$

где  $h_x$  – плечо изгиба,  $S_1$  – толщина зуба в опасном сечении,  $W_a$  – нагрузка, действующая по линии зацепления,  $\gamma_k$  – угол действия изгибающей силы  $P$ .

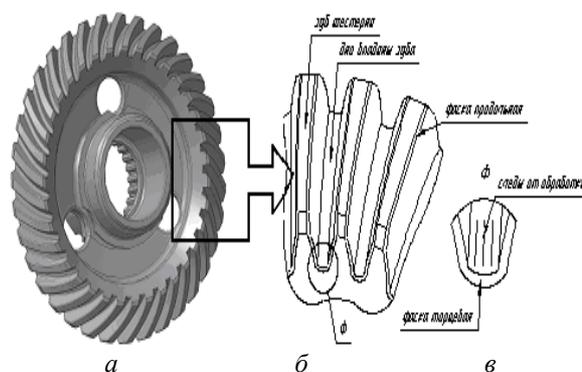


Рис 1. Общий вид спирально-конической шестерни (а) и впадины (б, в)

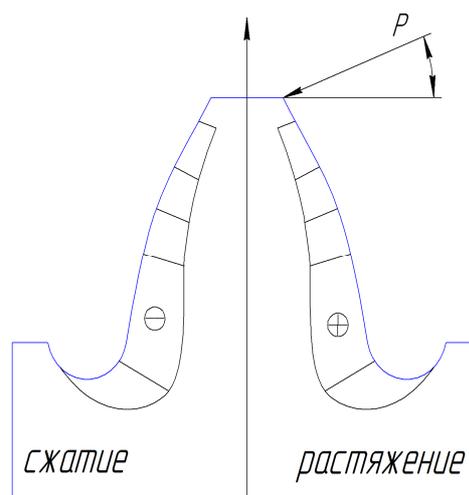


Рис. 2. Схема модели образования контактных напряжений  $\tau$  от изгибающей силы  $P$ , приложенной к вершине зуба

В результате проведенных расчетов установлено образование сжимающих и растягивающих напряжений  $\tau$ . Наибольшее опасное значение растягивающих напряжений наблюдается в радиусе перехода от впадины к боковой поверхности зуба (рис. 3).

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. Сравнились технологические процессы зубообработки без ППД и с ППД.

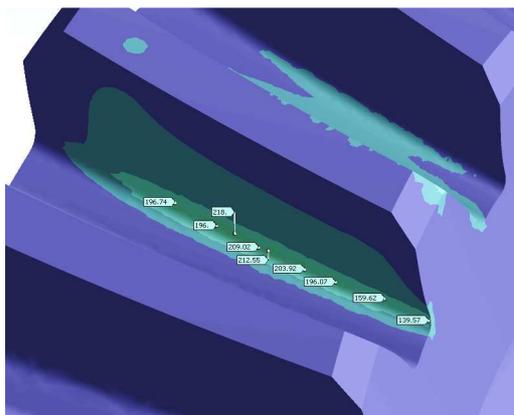


Рис. 3. Изгибные напряжения во впадине зуба от действия сил в зацеплении

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

Операция «зубонарезание»: станок мод. 528, инструмент: 9 дюймовая резцовая головка с резами из материала Р6М5К5, режимы: скорость резания 37 м/мин; подача 150 с/зуб → → 3,2 мм/мин движение обката; СОТС: МР-7.

Операция «газовая нитроцементация»: печь Ц-60, нагрев  $T = 925$  °С, время выдержки  $t = 4-7$  ч, охлаждение – воздух.

Операция «закалка»: 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).

Обдувка песком: ручная камера А-6-1650, электрокорунд 24А F180...F220, давление воздуха  $P = 2$  кгс/см<sup>2</sup>.

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<sup>2</sup>). Для определения остаточных напряжений по методу Н. Н. Давиденкова спроектированы и вырезаны специальные образцы из конического зубчатого колеса (рис. 4, а), согласно схеме вырезки (рис. 4, б). Для определения микротвердости поверхности во впадинах зубчатого венца спро-

ектированы и вырезаны образцы из конического зубчатого колеса (рис. 4, в). Образцы вырезались последовательно после выполнения каждой из операций.

Образцы для 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. 5).

Микротвердость измерялась на микротвердомере LM-700 фирмы LECO при нагрузке 25 г по схеме на рис. 6.

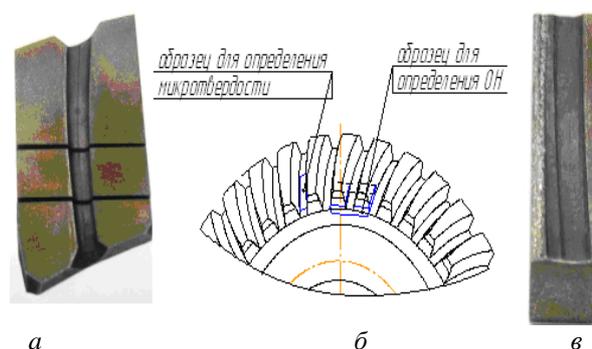


Рис. 4. Схема вырезки образцов из впадины зуба

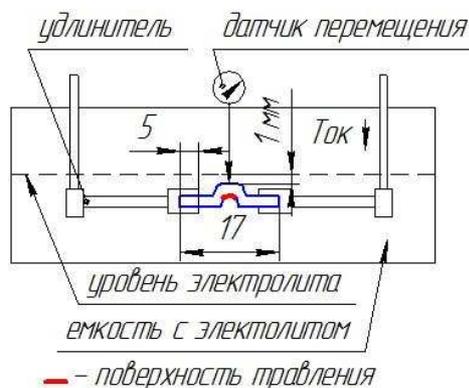
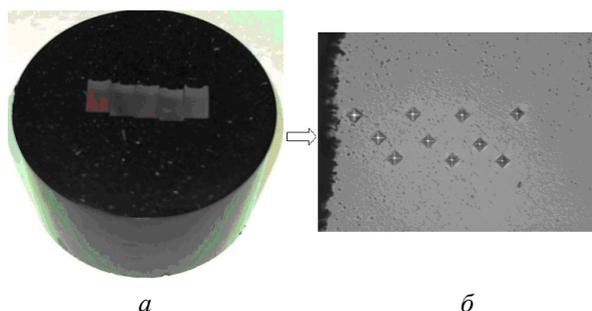


Рис. 5. Схема и общий вид измерения остаточных напряжений методом травления образцов на установке АПООН



**Рис. 6.** *a* – образцы для исследования микротвердости, *б* – микроструктура по глубине поверхности дна впадины конического зубчатого колеса

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характер изменения остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  во впадине конического зубчатого венца по глубине поверхностного слоя  $h$  после различных видов обработки приведен на рис. 7. Результаты измерения микротвердости поверхности дна впадины конического зубчатого венца после различных видов обработки приведены на рис. 8.

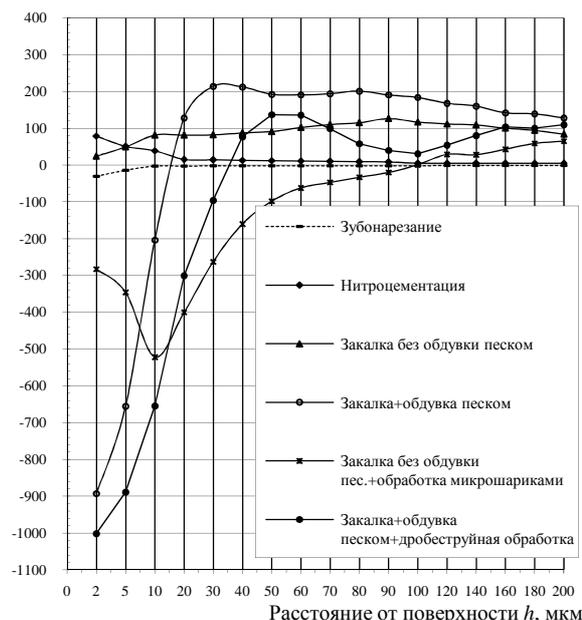
В результате анализа измерений остаточных напряжений установлено следующее.

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 напряжений 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.



**Рис. 7.** Характер распределения  $\sigma_{ост}$  остаточных напряжений на дне впадины конического зубчатого колеса по глубине поверхностного слоя  $h$  после различных видов обработки

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) наводит наибольшие сжимающие напряжения до  $1017$  МПа, переходящие на небольшой глубине  $35$  мкм в растягивающие до  $+15$  кгс/мм<sup>2</sup>. При этом микротвердость поверхности возрастает до  $809...834$  HV 0,025. В результате анализа влияния последовательности обработки впадины зубьев на различных операциях на изменение микротвердости поверхностного слоя установлено, что наименьший наклеп до  $340$  кгс/мм<sup>2</sup> образуется при зубонарезании колес.

Последующая закалка без обдувки песком резко повышает микротвердость до  $650-740$  кгс/мм<sup>2</sup> на глубину до  $500$  мкм. Наибольший наклеп, до  $780-810$  кгс/мм<sup>2</sup>, вызывает применение обдувки песком и микрошариками после закалки. Применение обдувки микрошариками после закалки обеспечивает микротвердость до  $710$  кгс/мм<sup>2</sup> на значительную глубину до  $500$  мкм.



**Рис. 8.** Диаграмма изменения микротвердости поверхности на образцах, вырезанных из дна впадины конического зубчатого колеса после различных видов обработки

### ВЫВОДЫ

Из 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: нитроцементация, закалка, упрочнение микрошариками — метод ППД. При этом микротвердость поверхностного слоя увеличивается в 2–2,5 раза по сравнению с зубонарезанием.

Таким образом, пришедшая из предыдущей обработки совокупность параметров качества поверхностного слоя проявляется в настоящем, требуя учета в особенностях функционирования технологических систем. В свою очередь совокупность технологических методов, используемых в конкретном технологическом процессе, вполне закономерным образом определяет поведение детали в будущем времени, то есть при функционировании ее в собранной и эксплуатируемой машине. Поэтому процесс создания изделий, начиная с выбора материала для заготовки конкретной детали, обработки заготовки и т. д. приводит к необходимости рассмотрения в целом технологического процесса изготовления изделия во времени. При этом появляется понятие и о технологической наследственности с целью направленного формирования эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей [4].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 318 с.
2. Васильев А. С., Дальский А. М. Роль технологической наследственности в обеспечении качества изделий // Сб. докл. Межд. НТК «ТМ 2010». Воронеж, 2010. С. 22–26.
3. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
4. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А. С. Васильев [и др.]. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Макаров Владимир Федорович**, проф., зав. каф. технологии машиностроения Пермск. нац. иссл. политехн. ун-та. Д-р техн. наук. Иссл. в обл. повышения качества и надежности зубьев спирально-конических шестерен технологическими методами.

**Горбунов Александр Сергеевич**, асп. того же ун-та, вед. технолог ОАО «Редуктор».