

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ НА НАГРУЗОЧНУЮ СПОСОБНОСТЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В.А. Терниченко

Д.П. Коновалов

Е.А. Перевертень

tvlad4991@yandex.ru

dmitrykonovalov1995@gmail.com

asto-morgan@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Рассмотрены основные способы обработки зубчатых колес различного модуля. Отмечены преимущества и недостатки каждого метода. Особое внимание уделено отделочным операциям (зубошлифованию, зубохонингованию, притирке, приработке), в ходе выполнения которых формируется окончательный микрорельеф поверхностного слоя. Сделаны выводы о том, что выбор операции механической отделочной или управляющей обработки зависит от назначения и точности зубчатых колес.*

### Ключевые слова

*Нагрузочная способность зубчатых колес, технологические способы обработки, шероховатость поверхности, микрорельеф поверхностного слоя*

Поступила в редакцию 03.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

Одной из наиболее актуальных задач при производстве зубчатых колес является повышение их нагрузочной способности — износостойкости контактной и изгибной прочностей. В итоге обеспечение надежности зубчатых колес заключается в совершенствовании методов механической, отделочной и химико-термической обработки. Производители данного вида деталей вынуждены искать новые конструкторско-технологические решения, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя зубьев и нетребующие неоправданных затрат [1–3].

При лезвийной обработке колес основная проблема заключается в обеспечении качества поверхности с заданными параметрами точности и шероховатости, в повышении стойкости зуборезного инструмента при обработке материалов с твердостью больше HRC 40. Совершенствование методов химико-термической обработки зубчатых колес связано с разработкой и внедрением процессов ионной цементации, нитроцементации и азотирования, обеспечивающих высокие механические свойства поверхностного слоя зубьев при снижении уровня внутренних напряжений и коробления деталей. В качестве отделочной обработки, может применяться операция шлифования зубьев, поскольку она не имеет аналогов при обеспечении точности выполнения всех элементов зацепления [4].

Совершенствование процесса зубошлифования заключается в использовании высокотемпературных и высокопористых шлифовальных кругов в сочетании с оптимизацией режимов шлифования и подбором оптимального состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [5, 6].

В данной работе рассмотрены основные способы механической, химико-термической и отделочной обработки зубчатых колес и их влияние на качество

поверхности, и, следовательно, на нагрузочную способность зубчатых колес.

Далее проанализируем влияние каждого технологического метода на нагрузочную способность зубчатых колес.

**Зубофрезерование** является основным методом механической обработки для тяжело нагруженных зубчатых колес, в том числе и закаленных до высокой твердости. Исследования шероховатости поверхности зубьев после процесса зубофрезерования показали, что шероховатость в значительной степени влияет на параметры нагрузочной способности зубчатых колес [1–4].

В результате обкатывания профиля режущими лезвиями фрезы появляется огранка и волнистость поверхности зубьев. Это обусловлено ударными нагрузками при обкатывании, погрешностью механизма передачи и циклической погрешностью делительной пары зубофрезерных станков, вследствие чего линия наибольшего врезания на поверхности изделия имеет волнистый характер. Волнистость оказывает гораздо большее влияние на качество контакта зубчатых колес, нежели шероховатость. Исследования проводились на фрагментах зубчатого колеса с модулем  $m = 2,5$  мм и числом зубьев  $z = 112$  из стали 3СП. В ходе исследований было установлено, что на характер микронеровностей на поверхности зубчатого колеса также влияют величина осевой подачи, величина переднего угла фрезы и сила резания. Например, увеличение переднего угла фрезы от 0 до  $5^\circ$  позволило в несколько раз снизить шероховатость зубьев [3]. Также с целью уменьшения шероховатости поверхности увеличивают твердость обрабатываемого материала. Так, для стали 50ХН повышение твердости от HRC 14 до HRC 42 способствует уменьшению высоты неровностей почти в два раза, но при этом увеличивается расход дорогостоящего инструмента [4].

**Цементация** обеспечивает контактную выносливость зубьев при изгибе и стойкость к заеданию. Наиболее перспективными видами цементации являются вакуумная и ионная цементация. Они позволяют добиться высокой несущей способности поверхностного слоя наравне с увеличением прочности и твердости сердцевины [6]. Высокая твердость поверхности обуславливается зоной карбидов. Протяженность активной карбидной зоны должна быть не менее 0,3 мм, поскольку значительная ее часть, составляющая 0,2 мм, удаляется при шлифовании [7]. Шлифование необходимо для устранения возникших в результате химико-термической обработки деформаций. Припуск после термообработки составляет 0,1–0,15 мм на сторону, поэтому шлифование не может быть заменено на прочие отделочные операции. Окончательная твердость цементированных поверхностей достигает 60–64 HRC, для вязкой сердцевины — 38–43 HRC [1, 7].

**Азотирование.** Ионное азотирование применяют для повышения твердости поверхности, износостойкости и теплостойкости рабочей поверхности. Данный метод обработки является альтернативой цементации. Основным его достоинством, по сравнению с цементацией, является меньшая температура протекания процесса (480...580 °С), вследствие чего отсутствуют фазовые превращения в структуре металла, снижается деформация зубчатых колес. Эти

факторы позволяют повысить точность получаемой детали, а значит уменьшить объем дальнейшей механической обработки, что приводит к снижению себестоимости производства. Азотированный слой имеет более высокую твердость, по сравнению с цементированным, обладает высокими теплостойкостью и сопротивлением к заеданию зубчатого зацепления. Исследования разработки режимов ионного азотирования сталей 15X16K5H2МВФАБШ, 30X2НВФА, 20X3МВФАШ показали, что после упрочнения данных сталей азотированием достигается высокая твердость поверхностного слоя, превышающая 63 HRC [2].

**Притиркой** называют отделочную обработку профиля зуба при помощи притиров и мелкозернистого абразива с целью получения гладкой поверхности зуба, применяют в основном для удаления дефектного слоя после зубошлифования или после химико-термической обработки, когда шлифование невозможно. Процесс притирки весьма прост, высокопроизводителен и не требует дорогостоящего оборудования. Таким способом может быть получен параметр шероховатости боковых поверхностей зубьев  $Ra = 1...2$  мкм [4, 8].

К основным достоинствам метода относят увеличение износостойкости, получение удобного пятна контакта для данного конкретного зацепления, высокую производительность, простоту реализации процесса, не требующую специального оборудования. Существенным недостатком притирки является невозможность исправления короблений, поэтому большой популярностью метод не пользуется.

**Зубохонингование** применяют в качестве отделочной операции для цементованных и закаленных тяжело нагруженных зубчатых колес. При этом удаляется дефектный слой толщиной 0,03–0,04 мм, шероховатость поверхности  $Ra$  уменьшается с 2,5 до 1,25 мкм. При толщине снимаемого слоя до 0,01–0,04 мм зубохонингование не позволяет повысить точность обрабатываемых зубчатых колес. Преимущество этого метода заключается в высокой производительности.

Исследования, проведенные В.П. Пономоревым и другими учеными, показывают, что в результате зубохонингования зубчатых колес  $m = 6$  мм,  $z = 29$ , изготовленных из стали 12X2Н4А с твердостью 60–63 HRC, радиальное биение и отклонение основного шага уменьшилось соответственно на 30 и 50 % [8]. При этом необходимо контролировать величину снимаемого слоя, так как с его увеличением наблюдается значительное искажение эвольвенты (при съеме 12 мкм искажение достигает 20 мкм). Необходимо придерживаться величины съема равной 5–7 мкм, тогда искажение профиля отсутствует.

Процесс зубохонингования применяют для обработки зубчатых колес с модулем  $m = 2–6$  мм, диаметром  $d = 30–500$  мм и шириной  $b = 150$  мм, при этом точность обработки повышается на 1 квалитет, шероховатость  $Ra$  уменьшается до 1,25 мкм [3, 8].

**Зубошлифование** является в настоящее время практически единственным методом окончательной обработки высокоскоростных зубчатых колес. Шлифование зубчатых колес сопровождается процессом, который характеризуется кратковременным нагревом тонких поверхностных слоев до высоких темпера-

тур. Температура на поверхности металла достигает 1200 °С, причем 70–80 % общего количества выделившегося в зоне резания тепла тратится на обрабатываемое изделие. В зависимости от параметров термомеханического процесса (температуры, скорости нагрева и др.) в поверхностном слое в зоне резания возникают два вида структурных изменений: прижоги закалки и прижоги закалки с отпуском, значительно снижающие долговечность зубчатых колес. При наличии прижогов у основания зубьев глубиной 40–50 мкм зубья разрушаются в 2–3 раза быстрее, чем при их отсутствии [9]. Однако даже при отсутствии явных прижогов шлифование может вызвать структурные изменения. Детали со шлифованными поверхностями имеют большое количество остаточного аустенита [10]. Отрицательное влияние шлифовочных прижогов на усталостную прочность проявляется, главным образом, в изменении структуры цементованного слоя, ухудшении его физико-механических свойств (снижении твердости, образовании остаточных напряжений растяжения). Проблемы, связанные с прижогами после шлифования, можно решить путем подбора оптимальных режимов шлифования.

В целях уменьшения дефектов поверхностного слоя в процессе зубошлифования разработаны шлифовальные круги с прерывистой рабочей поверхностью, также отмечается тенденция использования более теплостойких сталей для зубчатых колес, например 20Х3МВФ, и другие мероприятия. Однако производство шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью в настоящее время не освоено абразивной промышленностью в полной мере.

Существенно улучшить структуру и свойства шлифованной поверхности помогают методы поверхностно-пластического деформирования (ППД). К примеру, поверхности, обработанные алмазным выглаживанием, изнашиваются в 5 раз меньше, чем после шлифовальной обработки. ППД может выполнять функцию технологического «барьера», ослабляющего или исключаящего проявление отрицательных факторов, наследуемых готовым изделием после шлифовальной операции [9].

**Приработка.** В ходе приработки шероховатых поверхностей благодаря изменению высоты неровностей и формы их вершин дискретные пятна с повышенным давлением существенно изменяют форму и увеличиваются в размерах, что улучшает условия образования смазочного слоя и способствует повышению нагрузочной способности зубчатых колес.

Даже незначительная приработка может повысить нагрузку заедания на 44 %, а достаточно хорошая приработка — в восемь раз [6]. После трех часов приработки зубчатых колес из улучшенной стали 30ХН3А (63 HRC) параметры шероховатости Ra снижаются в два раза [7].

В ходе изучения влияния приработки рабочих поверхностей зубьев (при параметрах  $m = 6$  мм,  $z = 25$ ) установлено, что при нагрузке меньшей номинальной и при числе циклов нагружения  $N = 10$ , параметры шероховатости поверхностей зубьев существенно не изменяются. Однако при увеличении нагрузки от 70 до 133 кН/м, то есть больше номинальной, высота неровностей уменьшается в 1,5–2 раза,

радиусы закругления их вершин увеличиваются почти в 10 раз, параметры опорной кривой уменьшаются. При увеличении нагрузки до 196 кН/м наблюдается значительное заедание у вершин, а также пластические деформации в полюсе зацепления [8–11]. Увеличение количества и кратности нагрузок создает опасность повреждения зубчатых колес и появления изломов зубьев.

Из вышеизложенного следует, что положительное влияние приработки на состояние поверхностного слоя зубчатых колес проявляется только в узком диапазоне оптимальных нагрузок, что на практике труднодостижимо. Это обстоятельство и длительность процесса являются существенными недостатками метода.

Решение проблем, связанных с повышением нагрузочной способности зубчатых колес, имеет важное народнохозяйственное значение. Непрерывно увеличивающийся выпуск зубчатых колес требует внедрения новых химико-термических, механических и отделочных технологий обработки, а также использования новейшего оборудования и привлечения высококвалифицированных кадров.

В заключение отметим, что обработка зубчатых колес — сложный комплексный процесс, который зависит от множества факторов и подразумевает многоуровневый контроль технологического процесса изготовления изделия. Исследования в области повышения нагрузочной способности рассмотренных деталей планируется продолжить.

## Литература

- [1] Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. Москва, Высшая школа, 2001, 492 с.
- [2] Фомина Л.П., Крымов В.В. Совершенствование технологий упрочнения зубчатых колес авиадвигателей. *Двигатель*, 2016, № 2, с. 6–8.
- [3] Павликов П.Я., Шаталов В.К., Яковлева А.П. Комбинированная упрочняющая обработка крупногабаритных зубчатых колес. *Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы. Сб. ст.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, с. 141–151.
- [4] Исаев А.И., Коткина М.Г. Шероховатость поверхности зубьев зубчатых колес. *Вестник машиностроения*, 1967, № 12, с. 64–66.
- [5] Феофилов Н.Д., Воробьев И.А., Янов Е.С. Исследование поверхностного слоя детали при зубофрезеровании сборными червячными фрезами. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2015, № 10, с. 92–99.
- [6] Яковлева А.П. Упрочняющая обработка зубчатых колес крупного модуля. *Авиационная промышленность*, 2014, № 2, с. 31–33.
- [7] Витенберг Ю.Р., Петрусевич А.И. Влияние приработки на сопротивление заеданию смазываемых шероховатых поверхностей при трении качения со скольжением. *Вестник машиностроения*, 1976, № 6, с. 12–17.
- [8] Пономарев В.П., Батов А.С., Захаров А.В., Мурзин В.А., Толмачевский Н.Н. *Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1984, 184 с.
- [9] Яковлева А.П., Савельева Л.В., Наумов В.А., Шарапов С.Н., Бессуднов Л.И. Причины разрушений зубчатых колес. *Главный механик*, 2017, № 1, с. 43–48.

- [10] Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. Москва, Машиностроение, 1981, 232 с.
- [11] Забровски Т.У. Повышение эффективности процесса зубошлифования на основе управления точностью и качеством поверхностного слоя зубьев. Москва, МГТУ Станкин, Янус-К, 2006, 186 с.

**Терниченко Владимир Александрович** — студент кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Коновалов Дмитрий Павлович** — студент кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Перевертень Елизавета Александровна** — студентка кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — А.П. Яковлева, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PROCESSING TECHNIQUES ON LOAD-CARRYING CAPACITY OF GEAR WHEELS

V.A. Ternichenko

tlad4991@yandex.ru

D.P. Konovalov

dmitrykonovalov1995@gmail.com

E.A. Pereverten

asto-morgan@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

We consider the main processing techniques of gear wheels of different modules and note the advantages and disadvantages of every method. The special attention is given to finishing operations (gear grinding, honing, lapping, burnishing). Due to these the surface layer microrelief is formed. Findings of the research show that the choice between the mechanical finishing or control processing operations depends on the purpose and precision of gear wheels.

### Keywords

Load-carrying capacity of gear wheels, technological processing techniques, surface roughness, surface layer microrelief

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

### References

- [1] Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Nezhurin I.P. Proizvodstvo zubchatykh koles gazoturbinykh dvigateley [Production of gears for gas-turbine engines]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2001, 492 p.
- [2] Fomina L.P., Krymov V.V. Improvement hardening technology for aircraft engine gears. *Dvigatel'* [Engine], 2016, no. 2, pp. 6–8.
- [3] Pavlikov P.Ya., Shatalov V.K., Yakovleva A.P. Kombinirovannaya uprochnyayushchaya obrabotka krupnogabaritnykh zubchatykh koles [Combined strengthening treatment of large gears]. *Energotekhnologicheskie protsessy. Problemy i perspektivy. Sb. st.* [Energy-technical processes. Problems and prospects. Collection of articles]. Moscow, Bauman Press, 2000, pp. 141–151.
- [4] Isaev A.I., Kotkina M.G. Surface roughness of gears. *Vestnik mashinostroeniya*, 1967, no. 12, pp. 64–66.
- [5] Feofilov N.D., Vorob'yev I.A., Yanov E.S. Research on part surface layer under hobbing by interlocking hob cutters. *Izvestiya TulGu. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 10, pp. 92–99.
- [6] Yakovleva A.P. Strengthening of coarse pitch gears. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation Industry], 2014, no. 2, pp. 31–33.
- [7] Vitenberg Yu.R., Petrusovich A.I. Effect of treatment on sliding strength of lubricated rough surfaces with combined rolling and sliding friction. *Vestnik mashinostroeniya*, 1976, no. 6, pp. 12–17.
- [8] Ponomarev V.P., Batov A.S., Zakharov A.V., Murzin V.A., Tolmachevskiy N.N. Konstruktorsko-tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley mashin [Design-engineering quality assurance of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984, 184 p.
- [9] Yakovleva A.P., Savel'yeva L.V., Naumov V.A., Sharapov S.N., Bessudnov L.I. Causes of gear wheels damage. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2017, no. 1, pp. 43–48.

- [10] Genkin M.D., Ryzhov M.A., Ryzhov N.M. Povyshenie nadezhnosti tyazhelonagruzhennykh zubchatykh peredach [Increasing of power gears reliability]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 232 p.
- [11] Zabrovski T.U. Povyshenie effektivnosti protsessa zuboshlifovaniya na osnove upravleniya tochnost'yu i kachestvom poverkhnostnogo sloya zub'yev [Increasing of gear-tooth grinding process effectiveness based on control of tooth surface layer accuracy and quality]. Moscow, MSTU Stankin publ., Yanus-K publ., 2006, 186 p.

**Ternichenko V.A.** — student, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Konovalov D.P.** — student, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Pereverten E.A.** — student, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — A.P. Yakovleva, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.