

<sup>1</sup> В. В. Поветкин, <sup>1</sup> М. Ф. Керимжанова, <sup>1</sup> А. Т. Альпеисов, <sup>2</sup> З. А. Ибрагимова, <sup>1</sup> И. Н. Исаева

<sup>1</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан,

<sup>2</sup> Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауэзова, г.Шымкент, Казахстан)

Тел./Факс: 8 (727) 292-69-19; E-mail: [vv1940\\_povetkin@mail.ru](mailto:vv1940_povetkin@mail.ru)

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

*В данной статье приводится анализ исследований по проблемам повышения качества передач. Преимущества модификации профиля колес как способ повышения эксплуатационных характеристик зубчатых колес, наиболее перспективных технологических процессов механического упрочнения и фланкирования рабочей поверхности зубчатых колес, в том числе тяжело нагруженных.*

**Ключевые слова:** долговечность, тяжело нагруженные зубчатые передачи, модификация профиля, упрочнение дробью

V. V. Povetkin, M. F. Kerimzhanova, A. T. Alpeisov, Z. A. Ibragimova, I. N. Isaeva

## TO THE PROBLEM OF INCREASING LONGEVITY COARSE – GRAINED HEAVILY LOADED GEARINGS

*This article gives an analysis of studies on the problems of improving the quality of gears. The advantages of modifying the profile of the wheels as a way to improve the operational performance of gears. The most promising technological processes are mechanical hardening of the working surface of the gears, including running-wheels and shot-peening.*

**Key words:** durable, heavy duty gears, profile modification, shot peening, peening

### Введение

Повышение долговечности тяжелонагруженных зубчатых колес является весьма сложным и взаимоувязанным комплексом различных проблем. Недооценка факторов, влияющих на срок службы колес на всех этапах их изготовления и эксплуатации, резко снижает сроки службы оборудования в целом. Решение проблем эксплуатации долговечности требует использования всего арсенала технологических средств с целью обеспечения высокого качества рабочих поверхностей, так как именно поверхностный слой оказывает большое влияние на их эксплуатационные характеристики.

Повышение плавности передачи, и тем самым снижение динамических нагрузок и шума может быть достигнуто различными способами. Жесткость зацепления, оказывающая определенное влияние на плавность работы передачи, существенно зависит от толщины обода  $h_0$  зубчатого колеса. Изменением конфигурации тела колес можно добиться снижения жесткости зацепления, однако, значительное уменьшение толщины обода и толщины тела венца приводит к уменьшению их прочности [1].

В работе [2] показано, что снижения параметрических колебаний системы и некоторые повышения плавности работы передачи можно достичь уменьшением величины упругих деформаций зубьев в точках пересопряжения. Коэффициент перекрытия  $\varepsilon$  должен быть равен целому числу, тогда в зацеплении будет находиться всегда одно и то же число пар зубьев. Однако, вследствие износа кромок зубьев, упругих деформаций элементов конструкции колес и других факторов, поддерживать коэффициент перекры-

тия точно равным числу очень трудно. Поэтому эффективным и широко распространенным в практике методом, повышающим эксплуатационные показатели работы зубчатых передач, является модификация профиля зубьев.

Как показано в работе [3], имеются два понятия модификации: естественная и полученная преднамеренным изменением формы профиля зубьев. Под естественной модификацией профилей зубьев понимают некоторый износ головки зубьев в процессе работы колес или некоторые сошлифовывание части профиля на головке, вызываемое уменьшением отжата шлифовального круга в момент его выхода из зацепления с колесом. Однако, как отмечается в работе [4], модификация преднамеренным изменением формы профиля зубьев, как способ улучшения эксплуатационных показателей передач, является более эффективной. Применение профильной модификации позволяет снизить неравномерность распределения нагрузки по ширине зуба и в некоторой степени компенсирует действие ошибок изготовления и упругих деформаций, тем самым повышая плавность работы передачи.

Существует несколько видов профильной модификации колес, хотя на практике применяют в основном два вида модификации ведущих и ведомых колес, которые показаны на рисунке 1, это фланкирование головок зубьев, а также головок и ножек зубьев. Экспериментальными исследованиями было установлено, что в результате увеличения такого параметра как высота среза головки зуба, эффективность профильной модификации повышается.

На эффективность профильной модификации оказывают влияние не только параметры, но и форма фланкирования. Эффективность различных форм профильной модификации, а именно прямолинейной и криволинейной (круговая форма), авторы оценивали по снижению удельной окружной динамической силы и уровня шума зубчатых колес. Было установлено, что для тяжело нагруженных колес круговая форма является более эффективной, так как для этой формы значение коэффициента снижения удельной окружной динамической силы, представляющий собой отношение до профильной модификации к после модификации, выше, чем для прямолинейной формы.

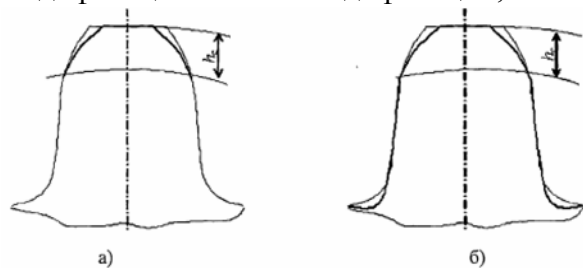


Рис. 1. Параметры профильной модификации: а - профильная модификация головки зуба, б - профильная модификация головки и ножки зуба

Наряду с модификацией профиля, влияние на прочностную надежность зубьев колес, особенно по допускаемым напряжениям изгиба, оказывает значение модуля. Однако крупномодульные колеса менее чувствительны к перегрузкам, а неоднородности материала и погрешности изготовления в меньшей степени влияют на прочность зубьев. Поэтому для тяжело нагруженных зубчатых передач рекомендуется применять крупномодульные колеса, однако при увеличении модуля снижается их контактная выносливость и противозадирная стойкость.

С увеличением относительной ширины венца снижается сопротивление зубьев всем видам разрушения. Нагрузка по ширине зубчатого венца распределяется неравномерно, что связано с деформацией зубьев, кручением ободьев и валов, изгибом валов и др.

Как отмечалось выше, под естественной модификацией профилей зубьев понимают некоторый износ головок зубьев в начальный период их работы. Иначе этот пе-

риод можно представить как заключительный этап процесса изготовления изделия или его технологическую приработку.

В современных машинах к зубчатым колесам предъявляют высокие требования. Зубчатые колеса шаровых мельниц являются тяжело нагруженными деталями. Зубья колес испытывают высокие давления в зоне контакта. Удельные давления в контакте достигают 0,025 - 0,035 МПа.

Установлено, что большинство зубчатых колес в процессе работы испытывает динамические нагрузки, изменяющиеся по симметричному знакопеременному или асимметричному знакопеременному циклу. Неизбежные дефекты формы и взаимного расположения зубьев в передачах вызывают неплавную работу передаточного механизма, характеризующую шумом, вибрациями и дополнительными динамическими нагрузками, возникающими как непосредственно на зубьях передачи, так и в узлах привода.

Наиболее распространенным способом получения зубчатых колес является нарезание червячной фрезой на зубофрезерных станках. Такая обработка приводит к отклонению основного шага на всех сопряженных зубьях передачи, которое для 7 - 8-й степени точности зубчатых колес может достигать до 22 - 25 мк. Поэтому, чтобы полнее и правильнее оценивать прочность зубчатых колес и энергетические резервы материала, нужно обязательно оценивать сопротивляемость материалов циклическим и ударно циклическим нагрузкам.

В тех случаях, когда эксплуатационная прочность зубчатых колес определяется усталостной прочностью зуба, состояние поверхностного слоя приобретает особое значение. Следует отметить, что приведенные в литературе данные о выходе из строя 10 - 40% зубчатых колес в результате усталостных поломок зуба недостаточно полно отражают истинное состояние вопроса. Авторы этих работ не учитывают конструктивных изменений деталей, применения более легированных сталей, увеличения модуля зубчатых колес. Все эти меры позволили снизить процент усталостных поломок зубчатых пар, но привели к существенному удорожанию и утяжелению конструкций. Повышение модуля колес, кроме того, привело в ряде случаев к снижению контактной прочности зубьев, к снижению их стойкости против заедания.

Существенное влияние на прочность тяжело нагруженных зубчатых колес оказывают конструктивные и технологические концентраторы напряжений, такие, например, как форма галтели и чистота обработки впадин.

При проектировании и нарезании зубчатых колес не всегда выбираются оптимальные формы и размеры галтелей зубьев. Выбор оптимального радиуса переходной галтели зуба позволяет снизить величину на 20-25%. Малая величина радиуса галтели зуба приводит к высокой концентрации напряжений в галтели) и быстрому разрушению зуба.

Прочность зубьев зубчатых колес зависит не только от радиуса галтели, но и от шероховатости поверхности галтели зуба. Влияние шероховатости галтели и дефектов на ее поверхности может оказаться гораздо сильнее, чем наличие самой галтели, особенно для твердых материалов. При изготовлении зубчатых колес 7-8-й степени точности шлифовка по галтелям часто не проводится, в галтелях зубьев остаются риски, шероховатость поверхности соответствует 12,5-6,3.

Приработка зубчатых колес представляет собой относительно непродолжительную их работу в условиях, близких к эксплуатационным, с целью обнаружения и устранения скрытых дефектов, и происходит в результате пластической контактной деформации или изнашивания контактных поверхностей. Технологическая приработка зависит от степени неравномерности распределения нагрузки, твердости рабочих по-

верхностей, окружной скорости, времени работы, смазочных материалов и других факторов. Обычно приработка происходит более интенсивно в первые часы работы передачи, когда нагрузка по ширине венца распределяется наиболее равномерно.

Для обеспечения надежности и долговечности тяжело нагруженных зубчатых передач во время эксплуатации, сохранения регламентирующих зазоров и предохранения от повреждений трущихся сопряжений обкатку пар трения проводят вхолостую с постепенным их нагружением. В основе процесса приработки, т.е. перехода от исходного состояния к рабочему, лежат сложные механические, физические и химические процессы. Главным в процессе приработки следует считать коренное изменение свойств тонких поверхностных слоев трущихся рабочих поверхностей зубьев, связанное с возникновением специфических вторичных структур на поверхностях сопряженных деталей. Возникшие структуры блокируют рабочие поверхности деталей от непосредственного контакта и неизбежно связанных с этим повреждений.

Значение периода приработки особенно велико для тяжело нагруженных зубчатых передач, так как они работают в условиях высоких удельных нагрузок, увеличенных температур, и при недостаточном подводе смазки. Вследствие этого смазка должна бесперебойно поступать в необходимом количестве в узел трения с целью улучшения условий его работы и, соответственно, повышения долговечности оборудования в целом.

Все эти технологии способны улучшить прирабатываемость и несколько повысить долговечность зубчатых колес, но радикально изменить ситуацию они не могут. По видимому, они уместны при совместном использовании с другими технологиями, в частности, с технологиями поверхностного упрочнения, которые полностью меняют состояние поверхности деталей как по структуре, так и по физико-механическим свойствам.

При всех основных видах нагрузок поверхностные слои металла оказываются наиболее напряженными. Вместе с тем эти слои наиболее ослаблены, так как на рабочей поверхности зубчатых колес сосредоточено максимальное количество концентраторов напряжений (риски, подрезы, галтели и т. д.).

Поэтому технологические процессы, связанные с механическим упрочнением рабочей поверхности зубчатых колес и вызывающие повышение изгибной прочности их, являются перспективными для современного машиностроения.

Широкое распространение получает один из методов поверхностного деформационного упрочнения зубчатых колес – наклеп дробью. Многочисленные эксперименты и заводская практика доказали высокую эффективность упрочнения дробью разнообразных деталей, изготовленных из черных и цветных металлов. Особенно эффективно применение деформационного упрочнения дробью сказалось на деталях с поверхностными концентраторами напряжений и с обезуглероженной поверхностью, работающими при циклических нагрузках.

Этим вопросам посвящены работы М.М. Саверина, Алмена, И.В. Кудрявцева, И.М. Шашина, Н.А. Карасева и других. Сущность процесса наклепа дробью заключается в том, что поверхность окончательно изготовленной детали подвергается холодной пластической деформации посредством ударного импульса чугунной или стальной дробью диаметром от 0,3 до 2,5 мм.

Положительный эффект поверхностного деформационного упрочнения сталей, подвергнутой химико – термической обработке, объясняется собственным упрочнением металла в результате пластической деформации и возбуждением сжимающих напряжений в наклепанных поверхностных слоях деталей.

В процессе наклепа имеет место качественное изменение мартенсита (дисперсионное твердение) и выпадение карбидов не во всем объеме образца (как в результате отпуска), а по плоскостям скольжения. Выпавшие дисперсные карбиды заклинивают плоскости, вызывают скольжение по новым плоскостям, в результате чего металл упрочняется.

Структурные превращения в поверхностном слое, а также пластическая деформация этого слоя, возникающая при наклепе, приводят к увеличению его объема и, вследствие сопротивления со стороны недеформированных внутренних слоев, к упругому сжатию, вызывающему в поверхностных слоях остаточные сжимающие напряжения, а внутри детали – остаточные растягивающие напряжения. Сжимающие напряжения, складываясь с рабочими растягивающими, уменьшают вредное действие последних.

Широкое внедрение в производство зубчатых колес процессов деформационного упрочнения дробью объясняется большим упрочняющим эффектом наклепа дробью применительно к высокопрочным сталям, работающим в условиях циклического изгиба.

Имеющиеся данные свидетельствуют о значительном повышении предела выносливости, долговечности и ударно – усталостной прочности цементованных образцов и зубчатых колес. Так, в работе [5] отмечалось, что предел выносливости цементованных образцов, изготовленных из сталей 18ХГТ, 12ХНВА, в результате наклепа дробью повышался на 6 - 60% в зависимости от режимов наклепа; ударно – циклическая прочность аналогичных образцов из стали 30ХГТ при наклепе дробью повысилась в 2 раза.

Исследования, проведенные на неупрочненных и упрочненных зубчатых колесах [6], показали, что предел выносливости зубьев в результате наклепа дробью повышается на 10 - 18%.

Об эффективности наклепа дробью свидетельствует повышение эксплуатационной долговечности цементованных зубчатых колес. Проведенные исследования на зубчатых колесах изготовленных из сталей 20ХНМ, 25ХГМ и 30ХГТ, показывают, что эксплуатационная долговечность в результате наклепа повышается в 2,5 - 3 раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Большакова М. Ю. Исследования влияния состава и структуры упрочненного поверхностного слоя на долговечность тяжело нагруженных зубчатых колес: дис. канд. техн. наук: 05.16.09. – Пермь: РГППУ, 2011. – 149 с.
2. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В. И., Волков В. И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
3. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В. И., Волков В. И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
4. Генкин М. Д., Рыжов М. А., Рыжов Н. М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
5. Бутенко В. И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 126 с.
6. Яковлева А. П. Поверхностное пластическое деформирование цементованных зубчатых колес // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборостроении и машиностроении: Труды Всероссийской научно-технической конференции. – М.: 2001. – Т.1. – С.48-50.

Поступила в редколлегию 21.05.2016