

УДК 621.09

**В.В. Поветкин, М.Ф. Керимжанова, З.А. Ибрагимова,
М.К. Татыбаев, И.Н. Исаева**АО Казахский национальный технический университет им. К.И.Сатпаева,
Республика Казахстан,E-mail: vv1940_povetkin@mail.ru**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС**

В статье приведены результаты исследований технологических способов повышения долговечности зубчатых колес. Представлено устройство для энергетической активации поверхностного слоя зубчатых зацеплений и повышения их износостойкости. Показаны результаты экспериментальных исследований методов поверхностно-пластического деформирования.

Ключевые слова: *тяжелонагруженные зубчатые колеса, долговечность, поверхностно-пластическое деформирование, износостойкость, термоимпульсная обработка.*

V. Povetkin, M. Kerimzanova, Z. Ibrahimov, M. Tatybaev, I. Isayeva**JUSTIFICATION TECHNOLOGICAL WAYS TO IMPROVE THE DURABILITY OF GEARS**

In the article the results of research on technological ways to improve the durability of gears. Submitted by device for energy gearing surface layer activation and increase their durability. Showing results of experimental research of methods of surface plastic deformation.

Keywords: *heavy-loaded gears, durability of surface plastic deformation, wear resistance, thermoimpulse processing.*

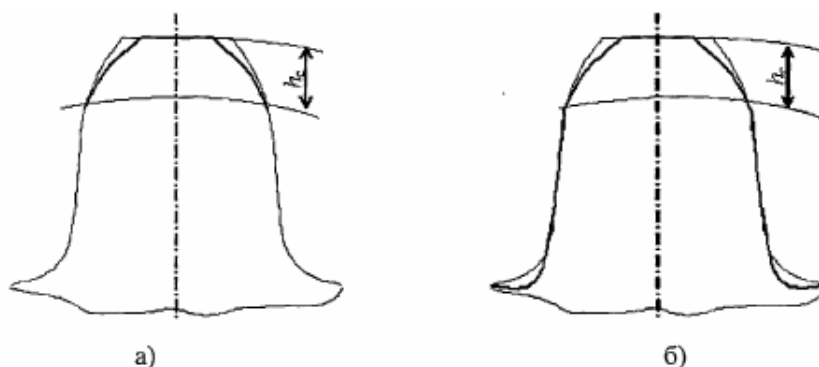
Повышение долговечности тяжелонагруженных зубчатых колес является весьма сложным и взаимосвязанным комплексом различных проблем. Решение проблем эксплуатации тяжелонагруженных зубчатых колес требует использования всего арсенала технологических средств, с целью обеспечения высокого качества их рабочих поверхностей.

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].

Широко распространенным в практике методом, повышающим эксплуатационные показатели работы зубчатых передач, является модификация профиля зубьев. Существуют естественная и профильная модификации. 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. На рисунке 1 приведены параметры профильной модификации. Проведенными ранее исследованиями установлено, что для тяжелонагруженных зубчатых колес круговая форма является более эффективной.

Наряду с модификацией профиля, влияние на прочностную надежность зубьев

колес, особенно по допускаемым напряжениям изгиба, оказывает значение модуля m . Для тяжело нагруженных зубчатых передач рекомендуется применять крупномодульные колеса, однако при увеличении модуля снижается их контактная выносливость и противозадирная стойкость.



а – профильная модификация головки зуба; б – профильная модификация головки и ножки зуба

Рисунок 1 – Параметры профильной модификации

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.

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.

Существенное влияние на прочность тяжело нагруженных зубчатых колес оказывают конструктивные и технологические концентраторы напряжений, такие, например, как форма галтели и чистота обработки впадин. Эксплуатационная прочность зубчатых колес определяется усталостной прочностью зуба, при этом 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. Авторами не учитываются конструктивные изменения деталей, возможность 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.

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 мкм.

Для тяжело нагруженных зубчатых передач особое значение имеет период приработки зубчатых колес. Такие колеса работают в условиях высоких удельных нагрузок, увеличенных температур, и при недостаточном подводе смазки. 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 в холостую с постепенным их нагружением. В процессе приработки происходит коренное изменение свойств тонких поверхностных слоев трущихся рабочих поверхностей зубьев, связанное с возникновением специфических вторичных структур на поверхностях сопряженных деталей [2].

Для современного машиностроения технологические процессы, связанные с механическим упрочнением рабочей поверхности зубчатых колес и повышением их изгибной прочности, являются наиболее перспективными.

Широкое распространение получил 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.

Вопросам дробеструйного наклепа посвящены работы М.М. Саверина, 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.

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.

Имеющиеся данные свидетельствуют о значительном повышении предела выносливости, долговечности и ударно-усталостной прочности цементованных образцов и зубчатых колес. Так, в работе [3] 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.

Важное значение при разработке технологии деформационного упрочнения дробью имеет правильный выбор параметров режима наклепа.

При выборе режимов наклепа должна быть учтена значительная неравномерность фазового состава и прочностных характеристик поверхностных слоев зубчатых колес, подвергнутых цементации и нитроцементации.

Важнейшей задачей повышения твердости и износостойкости поверхности тяжело нагруженных зубчатых передач является создание такой технологии упрочнения зубчатых зацеплений, которая бы позволила увеличить срок службы привода шаровой мельницы.

Анализ существующих способов и технологий упрочнения деталей машин показал, что дробеструйный способ, являющийся бесконтактным, позволяет

произвести модификацию поверхностного слоя металла, т.е. произвести наклеп, который значительно повышает твердость поверхности металла и, тем самым, создает предпосылки значительного увеличения износостойкости поверхности.

Для повышения процесса активизации металла требуется подготовка поверхности обработки металла под дробеструйное воздействие, путем создания энергетических тепловых полей в металле, способствующих активизации процесса дробеструйного воздействия. Мгновенные температурные поля, вводимые в металл, позволяют создать благоприятные условия для механического воздействия дробью и развития на поверхностном слое остаточных напряжений сжатия.

Для реализации указанных условий, авторами разработан способ упрочнения зубчатых колес на базе совмещения тепловых потоков мгновенно вводимых в поверхность металла, и механическое (ударное) воздействие дробью или воздействием профилированным деформирующим инструментом (ролик или шарик).

Изобретение относится к области технологии машиностроения, а именно к зубчатым передачам. Предназначено для обеспечения высокой износостойкости зубчатого зацепления, позволяет повысить долговечность зубчатых передач; например тяжело нагруженных колес привода шаровых мельниц.

Известна зубчатая передача (патент № 2086837, F16H55/08, 19.10.1993), в которой на рабочие поверхности зубчатого зацепления нанесен износостойкий материал: на ведомое колесо равномерным слоем, а на ведущее - в виде выступающих частей износостойкого материала. При вращении зубчатых колес выступающие части износостойкого материала ведущего колеса, контактируя с износостойким покрытием ведомого колеса, воспринимают часть нагрузки на себя. Недостатком устройств, в которых повышение износостойкости достигается объемным упрочнением (термическая обработка), является недостаточная твердость поверхностей зубьев зубчатого зацепления, работающего в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Поверхностное упрочнение (химико-термическое и др.) малоэффективно, поскольку тонкий слой упрочненного материала поверхности зуба быстро истирается абразивными частицами измельчаемого материала.

Авторами предложен способ, основанный на энергетической активации поверхностного слоя зубчатых зацеплений и повышения их износостойкости с применением специального устройства – термоинструмента [4].

Предлагаемый способ позволит увеличить ресурс работы тяжело нагруженных зубчатых зацеплений шаровых мельниц. Сущность способа заключается в том, что после приработки и перед дробеструйной обработкой дополнительно нагревают поверхностный слой зубьев колеса до температуры ниже структурных фазовых превращений посредством высокотемпературного и высокоскоростного факела ракетной горелки и путем создания пятна контакта факела горелки по всей высоте зуба, включая дно зуба, что обеспечивает предельную плотность внутренней энергии поверхностного слоя.

Под воздействием такого теплового поля в поверхностном слое зубьев возникают механические, тепловые и структурно-фазовые изменения, приводящие к их упрочнению и, как следствие, формированию качественно нового поверхностного слоя с более высокими физико-механическими характеристиками, влияющими на повышение таких эксплуатационных свойств деталей, как усталостная прочность, контактная выносливость, износостойкость.

В качестве рабочего органа для термоимпульсной обработки зубьев выбрана малогабаритная ракетная горелка для напыления абразивных порошков на поверхности трения металлов.

На рисунке 2 представлен рабочий орган термоструйной горелки. Термоинструмент состоит из камеры сгорания, в которую через завихритель подается воздух и через форсунку подается горючее внутрь камеры сгорания, где оно воспламеняется. В качестве горючего можно использовать горючие газы или горючие углеводородные (бензин, керосин, сояровое масло) жидкости. В действующих стандартах расчета цилиндрических зубчатых передач на прочность (ГОСТ 21354-87, СВ СЭВ 5744-86 и др.) основные параметры передач (межосевое расстояние, модуль и т.п.) определяются с учетом одной из характеристик кривых контактной или изгибной усталости – пределов выносливости – σ_{Hlim} , σ_{Flim} , усредненные значения которых для различных материалов и способов упрочнения рекомендуется определять через твердость рабочих (σ_{Hlim}) или переходных (σ_{Flim}) поверхностей зубьев. При этом недостаточно полно учитываются такие важные параметры и факторы, как показатели кривых усталости (m_H, m_F) и глубина упрочненного слоя переходной поверхности.



Рисунок 2 – Термоинструмент в работе

Для установления действительной нагрузочной способности и долговечности зубчатых передач необходимо проведение широкомасштабных ресурсных испытаний передач как новых, так и после капитального ремонта, в условиях, близких к эксплуатационным. Это требует больших затрат времени и рационально при создании высоконадежных передач (самолетных, высоко-скоростных и пр.).

Были проведены исследования поверхностно-пластического упрочнения на моделях заготовок из сталей, применяемых при изготовлении зубчатых венцов приводов шаровых мельниц в стендовых условиях лаборатории университета на образцах из сталей 35Л и 35ХМЛ.

Для ППД зубчатой передачи принят дробеструйный метод, как наиболее эффективный, способствующий увеличению твердости поверхности зубьев на 30-40 %, позволяющий повысить ресурс работы зубчатой передачи привода и самой барабанной мельницы.

В качестве моделирующего способа обработки принят механический способ ППД шариком или роликом, при котором в поверхностном слое металла создается наклеп и остаточные напряжения, по глубине упрочненного слоя, что моделирует процесс дробеструйной обработки.

В результате процесса ППД определяли параметры шероховатости R_z от усилия давления P шарика или ролика и режимов обработки (S , n), на поверхности заготовки, выполненной в виде вала из сталей 35Л и 35ХМЛ, параметры твердости поверхности НВ заготовки при различных усилиях давления P и различных оборотах n при обкатке шариком или роликом, а также характер изменения твердости НВ по глубине h упрочненного слоя.

При проведении эксперимента использовалось следующее оборудование: токарно-винторезный станок марки GH2060ZH; динамометр 5 тс, твердомер универсальный 54-459 м по НВ 95-470, резец токарный проходной отогнутый ($\varphi = 45^\circ$, $r = 0,5$ мм), шарик в державке $d = 4$ мм; ролик в державке $d = 22 \times 7$ мм; штангенциркуль 250 мм и микрометр.

Режимы предварительной обработки ступеней детали: наружное обтачивание $n = 800$ об / мин, $S = 0,05$ мм / об, $t = 0,5$ мм.

На рисунке 3 представлен фрагмент технологического процесса накатки роликовым обкатником.

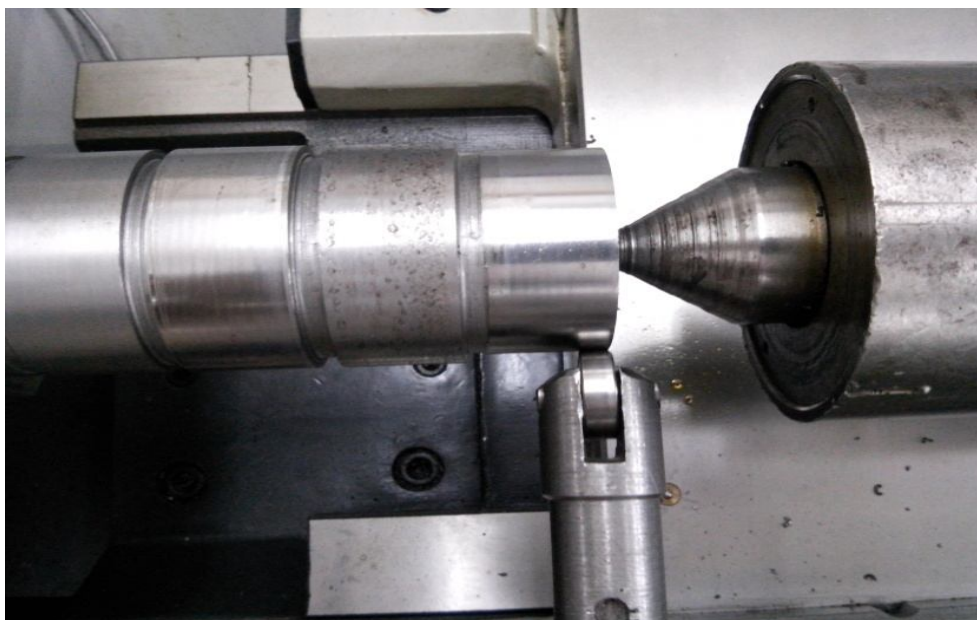


Рисунок 3 – Процесс работы роликового обкатника

На рисунке 4 представлен график зависимости твердости поверхности НВ вала от числа оборотов n для сталей 35Л и 35ХМЛ, при $P = 400$ Н обработке роликом.

Таким образом, установлено, что повышения плавности работы передач можно достичь применением профильной модификации, которая позволяет снизить неравномерность распределения нагрузки по ширине зуба и, в некоторой степени, компенсировать действия ошибок изготовления и упругих деформации в зацеплении.

Приработка зубчатых колес в условиях близких к эксплуатационным позволяет обнаружить и устранить скрытые дефекты в результате пластической контактной деформации или изнашивание контактных поверхностей.

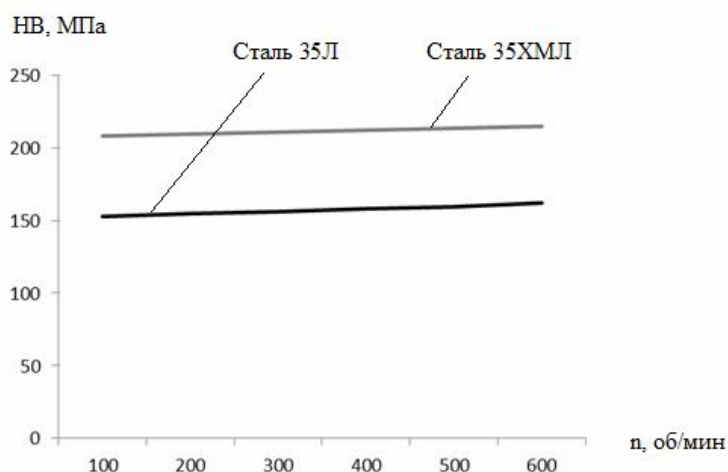


Рисунок 4 – Графики зависимости твердости поверхности $HV = f(n)$ для сталей 35Л и 35ХМЛ при усиллии обработки роликом $P = 400$ Н

Установлен положительный эффект поверхностно-деформационного упрочнения сталей, подвергнутых химико-термической обработке, что объясняется собственным упрочнением металла и созданием сжимающих напряжений в наклепанных поверхностных слоях деталей в которых предел выносливости зубьев, в результате наклепа дробью, повышается до 10-18 %, а эксплуатационная долговечность повышается в 2,5-3 раза.

Моделирование процесса дробеструйной обработки обеспечивается применением поверхностно-пластического деформирования механическим способом - накаткой шариковым или роликовым обкатником. При этом выявлены функциональные зависимости шероховатости поверхности от основных параметров режима накатывания. В результате установлено, что данный способ поверхностно-пластического деформирования можно рекомендовать в качестве упрочняющей технологии, учитывая, что упрочнение металла происходит по глубине свыше 2 мм.

Список литературы:

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. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 688 с.
3. Бутенко В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 126 с.
4. Положительное решение по заявке № 2014 0190.1 Способ упрочнения зубчатых колес привода шаровых мельниц. Поветкин В.В., Сушкова О.А., Ибрагимов З.А.

Поступила в редколлегию 24.04 2015 г.