

УДК 621.793.620.172

**Б.А. Ляшенко, проф., д-р техн.наук**

*Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины*

**Э.К. Посвятенко, проф., д-р техн.наук**

*Национальный транспортный университет*

**С.А. Довжук, инж., Ф.Й. Златопольский, проф., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет*

## Основные направления развития поверхностного упрочнения зубчатых колес

Проанализированы тенденции развития поверхностного упрочнения зубчатых колес, преимущества и недостатки отдельных технологий, а также дана оценка наиболее перспективным решениям. Из многооперационных технологий наиболее широкое распространение для зубчатых колес получает комбинация ХТО (цементация, азотирование) и дробеструйной обработки. Одна из прогрессивных технологий поверхностного упрочнения – ХТО в тлеющем разряде.

**поверхностное упрочнение, зубчатые колеса, шестерни, химико-термическая обработка в тлеющем разряде**

**Введение.** Наиболее массовыми деталями в машиностроении являются зубчатые колеса. Тенденция роста мощности, нагрузок и скоростей в транспортном машиностроении требует разработки зубчатых передач для высокоскоростных прецизионных машинных агрегатов. Надежность трансмиссий транспортных средств, особенно большегрузных автомобилей, автосамосвалов, особо большой грузоподъемности и энергонасыщенных тракторов требует разработки высоконагруженных зубчатых передач. Тенденция снижения веса в транспортном машиностроении требует применения высокопрочных зубчатых колес.

Неаддитивность разупрочняющего воздействия эксплуатационных факторов – статических и динамических нагрузок, высоких температур и резких теплосмен, активных рабочих сред – приводит к ошибкам уже на стадии проектирования. Теории расчета на прочность и долговечность с учетом неаддитивности разупрочняющего воздействия еще не обладают силой прогноза.

Наиболее актуальное направление в машиностроении – это поверхностное упрочнение и нанесение упрочняющих покрытий. В практике поверхностного упрочнения сложилось и действует свыше 130 различных технологий. Большинство из них - альтернативны. Ущерб экономике Украины может наносить применение экономически неэффективных альтернативных решений в связи с ограниченностью информации, а также противоречий и противоположных тенденций развития отдельных технологий. Из-за неудачных конструктивных и технологических решений обществу может наноситься существенный ущерб.

**Цель работы.** Поэтому цель работы – проанализировать основные направления развития поверхностного упрочнения зубчатых колес, сравнительные преимущества и недостатки отдельных технологий, а также оценить наиболее перспективные решения.

**Условия работы и основные причины отказа шестерен.** В ходовых механизмах транспортных средств наиболее нагруженными деталями являются шестерни. Они работают в условиях ударно-циклического контактного нагружения со скольжением. Несущая способность зубчатой передачи определяется такими

характеристиками зуба, как контактная прочность, изгибная усталостная прочность и износостойкость (чаще абразивная износостойкость). Поэтому наиболее частыми причинами отказа является разупрочнение зуба у его основания, усталостное выкрашивание контактной поверхности и износ профиля зуба. По результатам дефектовки зубчатых колес коробок передач тракторов К-700А сделан вывод о том, что чаще шестерни выбраковываются по питтингу [1]. За последнее время зафиксировано увеличение количества аварий зубчатых зацеплений редукторов ГТУ [2]. Главной причиной разупрочнения зубьев считают неправильное их прилегание, связанное с дефектами сборки или эксплуатации. Отклонение профиля зуба из-за износа снижают в 2 раза долговечность шестерни [3].

Повреждение зубчатых колес может наступать в результате волнистого износа. Это явление вызвано пластическим течением поверхностного слоя вследствие циклического контактирования в режиме скольжение-качение, а также недостаточной твердостью.

**Анализ существующих способов упрочнение шестерен.** Ключевыми вопросами при проектировании зубчатых передач является выбор материала и способа его упрочнения. Большинство новых сталей для тяжело нагруженных зубчатых передач являются комплексно легированными композициями, повышение стойкости которых достигается поверхностным упрочнением. Современные данные о химическом составе сталей для зубчатых колес показывают их большое разнообразие [4]. Наряду с разработкой новых сталей наиболее развивается поверхностное упрочнение и нанесение покрытий [5]. В автомобилестроении для зубчатых колес сложилась стандартная технология: цементация, высокий отпуск и повторный нагрев под закалку при непрерывном цикле производства. Около 80% всех зубчатых колес подвергаются этому виду обработки [5]. При закалке зубчатых колес возникают большие искажения формы зубьев, точность шестерен падает. Из-за остаточных напряжений и закалочных трещин снижается предел выносливости. Тенденции снижения закалочных деформаций заключаются в выборе закалочных жидкостей, автоматизированной закалке под прессом, закалке в газе высокого давления, различных конструкциях закалочного бака [5].

Для закалки шестерен после ХТО применяются три типа специально разработанных масел с различными температурными интервалами применения: 40...80<sup>0</sup>С, 100...140<sup>0</sup>С, 160...190<sup>0</sup>С [5]. Закалка в масле с температурой 180<sup>0</sup>С обеспечивает в 2...4 раза меньше изменения размеров колес, чем закалка в холодном масле. С целью оптимизации условий охлаждения изучают влияние температуры закалочных сред (масло – 155...232<sup>0</sup>С, соляная ванна – 220...280<sup>0</sup>С) на изменение размеров и деформацию автомобильных приводных зубчатых колес [14]. Устранить закалочные трещины в шестернях позволяет переход от закалки в жидких средах к закалке сжатым газом. Переход к закалке газом при высоком давлении следует считать положительной тенденцией. С целью снижения закалочных деформаций переходят к низкотемпературной (570<sup>0</sup>С) нитроцементации с закалкой. Эта технология представляет собой модификацию кратковременного газового азотирования и отличается, в основном, разновидностями добавок С-содержащих газов. Из всех видов ХТО при этом обеспечивается наименьшее изменение размеров шестерни. Низкая температура процесса, отсутствие фазовых превращений в стали, позволяют снизить коробление до минимума [5]. Доводочная операция после нитроцементации – полирование.

Тенденция развития ХТО проявляется в постадийных процессах. Прогрессируют многоступенчатые газовые режимы, которые позволяют получать заданный оптимальный профиль распределения элементов в упрочненном слое [5]. Одна из прогрессивных технологий поверхностного упрочнения – ХТО в тлеющем разряде. Наиболее распространены азотирование и цементация в плазме тлеющего разряда. В

практике авиадвигателестроения от традиционных цементации и нитроцементации перешли к ионному азотированию шестерен [7]. Этот процесс в 1,5...2 раза сокращает трудоемкость изготовления, так как детали обрабатываются при невысокой твердости материала и поступают на упрочнение в окончательно обработанном виде.

#### **Прогрессивные технологии поверхностного упрочнения зубчатых колес.**

Одна из прогрессивных технологий поверхностного упрочнения – ХТО в тлеющем разряде. Процесс ионного азотирования более стабильный и управляемый с простым и надежным способом предохранения неупрочняемых поверхностей. Деформация и усадки фактически отсутствуют, что позволяет заменять окончательное зубошлифование на хонингование, тем самым, сохраняя требуемую точность, оставляя равномерный высокопрочный поверхностный слой. В сравнении с другими видами азотирования, ионное азотирование обеспечивает большую глубину упрочненного слоя. Ионные цементация и нитроцементация обеспечивают более равномерную толщину диффузионного слоя и более высокие толщины. При 860<sup>0</sup>С через 2 часа глубина ионной цементации достигает 0,8мм, а при обычном методе – 0,25мм [5].

По сравнению с другими видами ХТО ионное азотирование имеет следующие преимущества:

- производительность процесса повышается в 3...5 раз;
- исключаются поводки изделий;
- высокая экономичность процесса (снижается расход электроэнергии в 2 раза, расход газа в 5...10 раз);
- чистота поверхности не ухудшается, в некоторых случаях повышается, поверхностный слой не имеет микротрещин, снижается градиент концентрации N по глубине.

Технология безводородного ИА прошла опытно-промышленную проверку на предприятиях Украины и СНГ.

Температура нанесения покрытия и длительность процесса определяют энергозатраты. Большинство способов ХТО требует относительно высоких температур и длительной обработки. Высокие температуры отрицательно сказываются на прочности изделия. Поэтому естественно стремление снижать температуру нанесения покрытия.

Сложилось две противоположно направленные тенденции в ХТО: с одной стороны, применение низкотемпературных процессов, с другой – тенденция снижения удельных энергозатрат путем интенсификации при повышенных температурах. [5].

Наряду с традиционными и новыми методами ХТО находит дальнейшее развитие также индукционная закалка. Этот способ преимущественно используется для упрочнения прямозубых зубчатых колес.

К традиционным процессам, подвергшимся модернизации, относится автоматизированная плазменная закалка шестерен в условиях контролируемого нагрева [5]. Локальное лазерное упрочнение при сканирующем облучении рекомендуется для крупномодульных шестерен во избежание их коробления. Отсутствие деформации шестерни позволяет практически полностью исключить финишную обработку. Недостатком лазерной и электронно-лучевой технологий является высокая стоимость оборудования и невысокая энергетическая эффективность процесса, а сдерживающим фактором внедрения является необходимость повышения квалификации обслуживающего персонала.

В производстве зубчатых колес распространено поверхностное пластическое деформирование (ППД) как отделочно-упрочняющая обработка. Этот простой, и эффективный способ обеспечивает повышение несущей способности и долговечности шестерен. Упрочняющий эффект обеспечивается за счет наклепа и наведения

остаточных сжимающих напряжений. Обеспечивается также снижение шероховатости и волнистости поверхности [12].

Применяются такие методы ППД: обкатывание роликами, шариками или зубчатыми валками, алмазное выглаживание, дробеструйная, вибрационная, гидроабразивная или центробежно-ротационная обработка, дорнование, обработка вращающимися щетками [5]. ППД является финишной операцией. Накатке подвергаются рабочие поверхности зубьев, поверхность впадин и основание ножки зуба. ППД зубчатых колес методом непрерывной обкатки может осуществляться на универсальном зуборезном оборудовании [13].

Сложилось мнение о недостаточной прочности покрытий в экстремальных условиях эксплуатации зубчатых колес. При повышении контактных нагрузок упрочняющий эффект покрытий уменьшается. Считают благоприятными условиями работы нитроцементированных шестерен небольшие контактные нагрузки. Низкотемпературная нитроцементация не обеспечивает контактную прочность шестерни из-за малой глубины диффузионного слоя. Кроме того, наблюдается иногда образование дефектного подповерхностного слоя высокой пористости. Поэтому наиболее благоприятные условия работы нитроцементированных деталей – изнашивание при небольших контактных нагрузках [5].

При эксплуатации шестерен в пиковых режимах после цементации и закалки наблюдается отслаивание упрочненного слоя, что вызвано мягкостью сердцевин и большим градиентом твердости от покрытия в глубь детали.

Из анализа многочисленных видов покрытий и технологий их нанесения вытекают негативные явления, которые необходимо учитывать при выборе альтернативных вариантов поверхностного упрочнения зубчатых колес:

- снижение прочности основного материала;
- деформационные поводки, коробление и необходимость финишных операций;
- различия свойств покрытий в зависимости от способа упрочнения.

Характерной особенностью методов поверхностного упрочнения является то, что не удается получить одновременного повышения всех эксплуатационных свойств шестерен для всех режимов эксплуатации. Поэтому рекомендуют дифференцированный подход целевого применения технологий для повышения отдельных служебных характеристик – износостойкости, контактной и изгибной прочности [5].

Из многооперационных технологий наиболее широкое распространение для зубчатых колес получает комбинация ХТО (цементация, азотирование) и дробеструйной обработки [14].

Существенное повышение несущей способности покрытия на контактных поверхностях зубьев колес возможно следующими способами:

- введение толстого низко модульного подслоя;
- введение подслоя с линейно возрастающим  $E_{подсл.}$  от  $E_0$  к  $E_{покр.}$ ;
- уменьшением толщины покрытия.

Подобный методологический подход реализуется технологически в процессах цементации и нитроцементации зубчатых колес с программируемым изменением С- и N-потенциалов насыщающих атмосфер, стабильно обеспечивающих целенаправленное конструирование композиционного строения зубчатых колес [14].

**Выводы.** Зубчатые колеса будут оставаться одной из важнейших деталей транспортных средств. Тенденции снижения веса, а также увеличения скоростей и мощности требует применения новых материалов и технологий упрочнения зубчатых колес. Неаддитивность разупрочняющего воздействия эксплуатационных факторов приводит к ошибкам уже на стадии проектирования. Необходимо обеспечить ресурс зубчатых колес по изгибной и контактной выносливости, а также по износу.

Традиционные методы поверхностного упрочнения обладают рядом недостатков. Наиболее перспективен метод ионного азотирования как финишный процесс. Для обеспечения максимальной несущей способности зубчатого колеса необходимо оптимизировать компоновку поверхностного слоя по принципу минимизации напряженно-деформированного состояния.

### Список литературы

1. Корнилович С.А., Паутов П.И., Корнилович П.А. Повышение контактно-усталостной выносливости зубчатых колес // Исполз. и обеспеч. работоспособ. машин и оборуд. в с.х. Зап.Сиб. Омск. гос. аграр. ун-т -Омск, 1996.-С.18-19.
2. Вороненко Б.И. Современные высокопрочные стали для тяжелонагруженных зубчатых передач // МиТОМ – 1996 - № 8.-С.12-18.
3. Елисеев Ю., Архипенков А., Оводков В. Изготовление зубчатых колес – дело тонкое // Авиапанорама – 1997-май-июнь.-С.58.
4. Каплун В.Г., Каратаев А.М., Пастух И.М., Паршенко А.В., Ляшенко Б.А., Цыгулев О.В. Способ азотирования стальных изделий. А.с. СССР № 1687645, С23С 8/12, БИ №40.
5. Гурченко П.С., Быков В.М., Шумаков Ю.И. Поверхностная закалка при индукционном нагреве бортовых шестерен автомобилей МАЗ // МиТОМ – 1990. - №6. – С. 9-13.
6. Кашкаров А.А., Мамонтов В.А. Методика исследования влияния шероховатости переходных поверхностей зубьев, упрочненных поверхностным пластическим деформированием, на их изгибную выносливость // Пробл. динамики и прочности исполнительных механизмов и машин: Материалы научн. Конф., Астрахань, 1-5 окт, 2002. Астрахань: Изд-во АГТУ. 2002. – С. 278-280.
7. Кустовский В.Н., Гудым Л.Н., Кринсберг Ц.З. Опыт внедрения чистовой обработки зубчатых профилей пластическим деформированием // Вестн. Машиностроения. – 1992. - №10-11. – С. 50-52.
8. Nadano Hiromasa. Повышенная стойкость азотированных ножек зубьев цилиндрической передачи из нержавеющей SUS440C стали // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. С – 2002 –68, №680.-С.1840-1847.
9. Guo Rui, Wang Rong-hua. Дробеструйная обработка зубчатых колес // Jinshu rechuli=Heat Treat. Metals. 2001-№ 6.-С.21-23.
10. Ariura Yasutsune, Morikawa Hiroshi. Качество поверхности колес после дробеструйной обработки // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. С. –2000-66, № 643.-С.240-247.
11. Matsui Katsuyuki, Eto Hirohito, Kawasaki Kazuhiro et al. Повышение усталостной прочности шестерен посредством контурного индукционного воздействия и использования дробеструйной обработки // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. А. –1995-65, № 637.-С.92-97.
12. Руденко С.П. Сопротивление контактной усталости цементованных зубчатых колес // Вестн. машиностр. – 1999.-№4.-С.13-15.
13. Сызранцев В.Н., Перинов С.Н., Гунин А.А. Разработка методики оценки влияния параметров упрочненного слоя на величину допускаемых напряжений при расчете зубьев на изгиб // Деп. в ВИНТИ 11.05.1999.-№ 1463-В99.
14. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки // М.: Изд-во МГТУ. –2001.-303 с.

*Б. Ляшенко, Е. Посвятенко, С. Довжук, Ф. Златопольський*

#### **Основні напрямки розвитку поверхневого зміцнення зубчастих коліс**

Проаналізовані тенденції розвитку поверхневого зміцнення зубчастих коліс, переваги і недоліки окремих технологій, а також дана оцінка найбільш перспективним рішенням Збагатоопераційних технологій найбільш широкое поширення для зубчастих коліс отримує комбінація ХТО (цементация, азотування) і дробеструменева обробка. Одна з прогресивних технологій поверхневого зміцнення – ХТО в тліючому розряді.

*B. Lyashenko, E.Posvyatenko, S. Dovzhuk, F. Zlatopolskiy*

#### **Basic directions of development of the superficial consolidating of gear-wheels**

Progress of the superficial consolidating of gear-wheels trends, advantages and lacks of separate technologies, are analysed, and also estimation to the most perspective decisions. From technologies the most wide distribution for gear-wheels combination of cementation, nitriding and treatment One of progressive technologies of the superficial consolidating – *khimiko-termicheskaya* of treatment in a smouldering discharge

Одержано 07.04.11