

– допускаемая рычага консольная нагрузка на выходном валу редуктора в плоскости расположения рычага (Н);  $P_c$  – дополнительная консольная нагрузка на выходном валу редуктора в плоскости расположения рычага от веса тормоза (Н).

Данный способ используется в испытательном центре ООО "НИИ "Редуктор" и выполняется следующим образом.

Стенд состоит из редуктора 1 (например, одноступенчатого червячного редуктора), который с помощью муфты соединен с электродвигателем 2, редуктор с электродвигателем установлены на опорной поверхности стенда 3. Нагрузка номинальным крутящим моментом на выходном валу редуктора  $M_n$  (Н·м) осуществляется с помощью тормоза колодочного типа 4, соединенным с рычагом 5 контактирующим с тарировочным устройством 6, который также установлен на опорной поверхности стенда 3. При испытаниях выполняют следующую последовательность действий:

- сначала с помощью тарировки фиксируется зависимость между величиной суммарной радиальной консольной нагрузки  $P_c$  (Н), действующей на середину выходного вала и параллельным перемещением  $\Delta$ , мм, фиксирующее индикатор в той же плоскости тарировочного устройства.

Под суммарной радиальной консольной нагрузкой в общем случае надо понимать  $P_c = [P_k] + P_c$  (сумма сил направлена вертикально вверх, как наиболее опасный вариант нагрузок).

Если принять во внимание рекомендации [6], где  $[P_k] = 250\sqrt{M_n}$ , то получим

$$l = \frac{M_n}{250\sqrt{M_n + P_c}} \cdot (\text{м}) \quad (3)$$

Дальнейшие действия включают следующую последовательность:

- размещают на рычаге опорное устройство с возможностью продольного смещения и поворота (если потребуются испытания в реверсном направлении) относительно центральной оси рычага таким образом, что ось, которая проходит через опорные точки устройства, будет совпадать по направлению с измерительной осью индикатора;

- после чего фиксируют на рычаге опорное устройство на расстоянии  $l$  от центральной оси выходного вала;

- затем вводят опорное устройство 7 в контакт с тарировочным устройством, центральная ось которого совпадает с центральной осью рычага;

- в завершении нагружают редуктор моментом  $M_n$ , который контролируют с помощью индикатора 8 по значению  $\Delta_c$ , что отвечает значению  $P_c$  по тарировочному графику.

Предложенные способ и стенд для испытания редуктора общемашиностроительного назначения имеют преимущество по сравнению с известными, так как за счет упрощения способа и конструкции стенда при совместном испытании с номинальным крутящим моментом и консольной нагрузкой, нормированной от величины крутящего момента позволяет выполнять испытания редукторов с большим количеством преимуществ, экономией материальных ресурсов и времени испытаний.

Дальнейшее совершенствование методов испытаний МП ОМП позволяет:

- разработчикам сокращать сроки поставки на серийное производство новых изделий;

- производителям снижать уровень затрат при изготовлении и сборке приводной техники;

- потребителям уменьшать затраты при эксплуатации более качественных механических приводов как общемашиностроительного так и специального применения.

При реализации такого комплекса работ разработчики и производители должны предусматривать меры по защите технических решений по методам испытаний их патентованием или обеспечением защиты от несанкционированного их использования конкурентами.

#### Выводы:

1. Развитие современных методов испытаний является эффективным инструментом в защите прав интеллектуальной собственности разработчиков и производителей МП ОМП и активным оружием в конкурентной борьбе на машиностроительном рынке.

2. Разрабатываемые испытательными центрами и предприятиями МИ и МР должны предусматривать эффективную защиту от несанкционированного использования третьей стороной.

**Список литературы:** 1. ГОСТ 29285. Приводы механические. Методы испытаний. – К.: Держстандарт Украины, 1994. – 20с. 2. Web: [www.i.com.ua/~niiredut](http://www.i.com.ua/~niiredut). 3. Власенко В.М., Добровольська І.В. Сучасний стан та перспективи розвитку нормативної бази на методи випробувань в ТК 47 "Механічні приводи" // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – 2012. – Вип.35. – С.25-28. 4. Власенко В.Н., Добровольська І.В. Современное состояние нормативной базы ТК 47 "Механические приводы" по методам испытаний ремней и лент конвейеров // Вісник національного технічного університету "ХПІ": Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – 2013. – Вип.40. – С.30-34. 5. Добровольська І.В. Спосіб випробування редуктора загальномашинобудівного призначення. – П. України №83773, G01M 13/02, 2013. – 4с. 6. ГОСТ 16162. Редукторы зубчатые. Общетехнические условия. – К.: Держстандарт Украины, 1993. – 22с.

Поступила (received) 03.03.2014

УДК 621.833

**Я. ЗАПОТОЧНЫ**, инженер, каф. машиностроительной технологии и материалов факультета специальной техники Тренчинского университета А.Д., Словакия;  
**М. БОШАНСКИ**, к.т.н., проф., институт транспортной техники и конструирования Словацкого технического университета, Братислава, Словакия;  
**Б. КОПИЛАКОВА**, инженер, каф. технической механики и деталей машин факультета специальной техники Тренчинского университета А.Д.;  
**Д. РАКУСОВА**, к.э.н., кафедра мобильной и специальной техники факультета специальной техники Тренчинского университета А.Д.

#### ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ПОВЕРХНОСТИ ШЕСТЕРНИ

Статья описывает возможности повышения поверхностной твердости шестерни с применением современных лазерных технологий как условие для применения тонких твердых покрытий. При их применении исходим из требования достижения определенной толщины упрочненного слоя. Требуемая толщина упрочненного слоя важна не только из точки зрения повышения предельной нагрузки поверхности шестерни, а также как требование упрочненного слоя при применении твердых тонких слоев в шестернях чтобы они не проломались. В статье описываются коротко возможности достижения таких слоев не только с помощью классических методов, но статья, прежде всего, уделяет внимание возможностям применения лазерной закалки.

**Ключевые слова:** закалка, лазер, зуб, твердость.

**Введение.** Настоящий доклад является частью проекта VEGA 1/0277/12, VEGA 1/1035/12, направленных на изучение влияния отдельных геометрических, структурных и материальных параметров зубчатых передач для достижения оптимальной прочности и трибологических характеристик.

© Я. Запоточны, М. Бошански, Б. Копилакова, Д. Ракусова, 2014

У основного материала в конструкции нет таких свойств, которые бы удовлетворяли эксплуатационным требованиям на твердость либо поверхностную предельную нагрузку зубчатой передачи. Однако существует несколько методов, с помощью которых возможно существенным образом совершенствовать качественные параметры поверхностной предельной нагрузки боковой поверхности зуба и тем самым повысить его предельную нагрузку, что значит также срок службы и надежность.

Совершенствование поверхностных слоев боковой поверхности зуба можно достичь следующими методами:

- механическая обработка поверхности;
- термообработка поверхности;
- химико-термическая обработка поверхности;
- лазерная закалка поверхности.

В случае повышения только поверхностной предельной нагрузки боковой поверхности зуба на практике применяют как метод объемной, но и, прежде всего, поверхностной закали. В случае подогрева пламенем температура преимущественно оценивалась по цвету поверхности на основании опыта работника. Результатом является неравномерная твердость и глубина прокаленной части, а также существенное термическое воздействие на всю деталь, связанное с изменением механических свойств и большой дисперсией размеров из-за конфигурационных изменений. В случае индукционной закалики сверх этого необходимо применить индуктор соответствующей формы в зависимости от размера закаливаемого колеса, значит, размеры шестерни лимитированы минимальным и максимальным размерами индуктора.

При индукционной закалке шестерни кроме того необходимо изготовить для каждого размера колеса индуктор, размер которого зависит также от ширины зацепления и модуля.

**Материалы и методы.** В настоящее время все больше в технической практике применяется пленочное покрытие для повышения предельной нагрузки и срока службы деталей машин. Понятно, что оно в большей мере начинает применяться также в зубчатых передачах. Применение твердых тонких покрытий, учитывая их толщину обычно в пределах от 2 до 4 мкм, требует достаточную твердость боковой поверхности зуба требуемой толщины. Таким образом, с точки зрения их применения в зубчатых передачах требуется, чтобы толщина закаленного слоя была как минимум 0,8 мм для общепринятых величин модулей и передаточных отношений зубчатых передач, причем очень важна также шероховатость упрочненного слоя. Поскольку в случае лазерной закалики глубина закалики около 1,5 мм, это толщина, соответствует требованиям для применения твердого тонкого слоя. Пример такого поверхностного упрочнения боковой поверхности зуба приведен на рисунке 1.

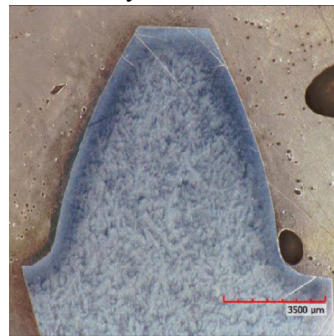


Рисунок 1 – Прокалка зубчатого зацепления

В случае применения классического метода закалики в шестернях обычно происходят малые либо большие деформации, которые обычно устраняют шлифовкой. В случае эвольвентных зубчатых зацеплений здесь нет никаких проблем, но в случае неэвольвентных зубчатых зацеплений, как выпукло-вогнутые зацепления, это вызывает увеличение производственных расходов. Поэтому лазерная закалка представляет собой большую выгоду, так как дает возможность достичь требуемой толщины закаленного слоя, необходимой для применения

твердых тонких покрытий при требуемой шероховатости. При этом деформации имеют малые величины – нет необходимости применять шлифовку.

**Характеристика и принцип лазерной закалики.** В настоящее время самым прогрессивным способом поверхностного калиения шестерен является закалка лазером. При лазерном луче возможно точно определить ширину следа посредством оптики и тем самым обеспечить также плотность падающей энергии на мм<sup>2</sup>. Посредством пирометра можно полностью следить за процессом, а мощность лазера отрегулирована таким образом, чтобы соблюдать постоянную температуру закаливаемой поверхности и тем самым также требуемую твердость. Необходимые данные регистрируются в компьютере, обеспечивая, таким образом, повторяемость для деталей в возможной серии. Движение луча в 3D по установленной траектории выполняет манипулятор, обеспечивающий равномерность его движения.

Программное обеспечение можно запрограммировать еще до поставки материала, что ускоряет сроки поставки в производстве. Достоинством является также скорость обогрева, которая может быть вплоть до 1000C/s, минимальное воздействие на окружающий материал, минимальная деформация деталей, нет необходимости во внешнем охлаждении, причем технологический цикл также сокращается в сравнении с закалкой пламенем либо индукцией.

При поверхностях, закаленных классическим способом, поверхности зубчатых зацеплений после нагрева охлаждаются водяным душем. Поскольку самая высокая температура возникает на поверхности, высокий перепад температур приводит к большим разностям в напряжениях и возможному появлению трещин. Лазер не нуждается в экстремальном охлаждении, тепло отводится в материал. Температура в закаленном слое падает вовнутрь с более благоприятным градиентом температур и остаточных напряжений.

Так как теплосъем проводимостью более интенсивный, достигаются твердости несколько выше, окисление поверхности меньше и нет необходимости в водяном хозяйстве.

При испытаниях мы установили, что для шестерен из строительной стали 12051, после закалики возросла твердость с 24 на 56HRC, что с точки зрения требований на применение твердых тонких покрытий достаточно. Результаты испытаний также показывают, что посредством лазерной закалики поверхности шестерен мы обеспечили равномерную структуру без геометрических изменений и, следовательно, нет необходимости в шлифовке поверхности зубов с нестандартным зубчатым зацеплением после их закалики. Достоинством является то, что этот метод можно применить как для малых шестерен размером от 30 мм – рисунок 2, так и для больших шестерен размером несколько метров – рисунок 3.

Ширина лазерного луча для лазера мощностью 3,6 kW колеблется от нескольких мм до около 50 мм (рисунок 4). Ширина пучка лучей зависит от мощностной плотности и скорости закалики.

Для того чтобы обеспечить равномерную твердость при закалке по всей ширине закалики, рекомендуется перекрыть отдельные калильные лучи где-то на 3-5 мм.

Головка лазерного излучателя укреплена в манипуляторе КУКА – КР16, обеспечивающем точное движение луча таким способом, чтобы он падал на боковую поверхность зацепления перпендикулярно, что важно с точки зрения обеспечения качества твердости боковой поверхности зуба. После закалики первого слоя следует калиние следующего слоя пока не закаленная вся высота наслоенных шестерен – рисунок 5.

Высокая скорость нагревания и охлаждения приводит в закаленной поверхности зацепления к появлению очень тонких структур с маленьким зерном. Отличие структуры основного материала и закаленного материала очевидно из рисунка 6 и рисунка 7.



Рисунок 2 – Шестерня с диаметром  $d=50$  мм с поверхностной закалкой посредством лазерного луча [5]

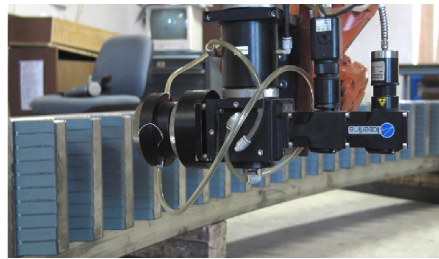


Рисунок 3 – Шестерня с диаметром  $d=2500$  мм с поверхностной закалкой посредством лазерного луча [5]

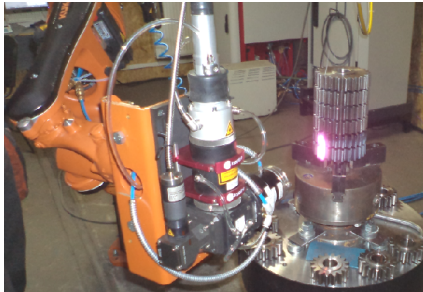


Рисунок 4 – Постепенная закалка зацепления лазерным лучом шириной 40 мм

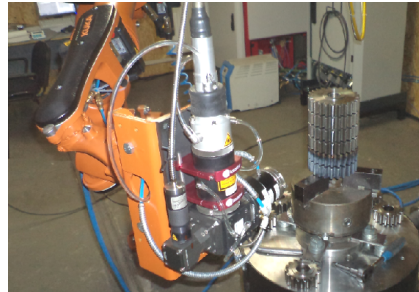


Рисунок 5 – Наладка манипулятора лазера для закалки следующего слоя

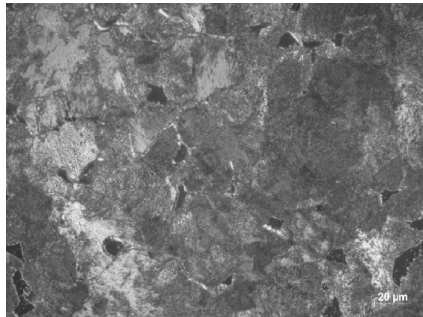


Рисунок 6 – Сталь 12 051, основная структура, Нитал 3%

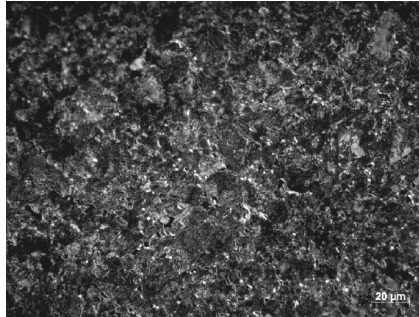


Рисунок 7 – Сталь 12 051, мелкозернистая структура после закалки лазером, Нитал 3%

В случае требования, чтобы зацепление было закаленное по всему контуру с постоянной толщиной, необходимо программой обеспечить движение манипулятора таким образом, чтобы лазерный луч был по возможности перпендикулярен закаливаемой поверхности. На рисунке 8 показан образец зацепления, когда требование постоянной ширины закалки боковой поверхности зуба не выполнено. Это зависит от настройки манипулятора. Чтобы такие ошибки при закалке шестерен не появлялись, необходимо процесс закалки обеспечить программой таким образом, чтобы выполнялось требование постоянной толщины закаленного слоя.

В зубчатых передачах без реверса возможна закалка только одной стороны зуба, при этом обеспечивается отсутствие изменений формы из-за термической обработки – рисунок 9.

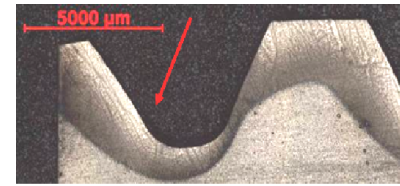


Рисунок 8 – Закаленное зубчатое зацепление с непостоянной толщиной: фото компании MATEX PM

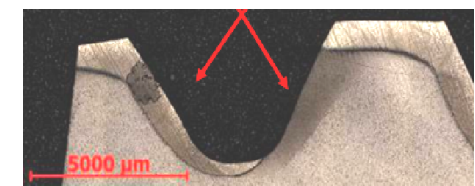


Рисунок 9 – Одностороннее закаленное зубчатое зацепление: фото компании MATEX PM

**Заключение.** Результаты выполнения диссертационной работы "Определение качественных и количественных характеристик депонированных покрытий в систему "покрытие – боковая поверхность зуба" с трибологической точки зрения подтверждают, что метод обеспечения поверхностной твердости боковой поверхности зуба лазерным методом с точки зрения возможностей применения твердых тонких покрытий является очень перспективным.

Эта технология закалки кажется очень перспективной, прежде всего для маленьких шестерен, поскольку у них также необходимо выполнить необходимые трибологические требования для применения твердых тонких покрытий.

Практические испытания доказали, что все исследуемые технологические параметры лазерной закалки (твердость, износостойкость, гомогенность поверхности, термическое воздействие на окружающую среду) дают лучшие качественные параметры, чем у стандартных методов термической обработки.

**Список литературы:** 1. Němeček, S. Tribotechnika, 2-2011, str.34-36. 2. Maršálek, P. Únavové zkoušky ozubených kol, [Dizertační práce]. VŠB Ostrava, 2013. 3. Němeček, S., Mužík, T. Tribotechnika, 1-2012, str.14-15. 4. Building, D. Tribotechnika, 2-2012, str.52-53. 5. [15.03.2014], <http://www.matexpm.com/cz/>. 6. Kadnár, M., Rusnák, J. Ecological oils applied in sliding journals. Monograph. Faculty of Engineering, Slovak University of Agriculture in Nitra, 2008, 87p. ISBN 978-80-8069-998-7. 7. Krantz, T., L., et al. Increased Surface Fatigue Lives of Spur Gears by Application of a Coating. NASA/TM-2003-212463 (ARL-TR-2971), 2003. 8. Mao, K., Sun, Y., Bell, T. An initial approach to the link of multi-layer coatings contact stresses and the surface engineered gears, In Surface & Coatings Technology 201(2007) 5796–5803. 9. Šumichrast, J., Rusnák, J., Benda, I., Kadnár, M. Biodegradable oils and their usage. In: New trends in design and technical documentation creation 2006. Proceedings of scientific publications, pp.136-140. ISBN 80-8069-701-9. 10. Tököly, P. Stanovenie hrúbky vrstvy povrchovej časti boku zuba z hľadiska odolnosti voči opotrebeniu, Dizertačná práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave – Strojnícka fakulta, 2009, 92s., Bratislava, 2009. 11. Tököly, P., Bošanský, M., Vanya, A. The effect of gear geometry on the thickness of tooth face hardened layer. Visnik Nacional'noho Techničnoho Univerzitetu No.27. S.10-19. ISSN 2079-0791.

Поступила (received) 16.03.2014

УДК 620.178.16 : 621.892

**А.В. ЗАХАРЧЕНКО**, старший преподаватель каф. автомобильного транспорта Университета "Украина", Киев

### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ТОНКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИСАДКАМИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по механическим свойствам тонких поверхностных слоев трибосопряжений определённого смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений результата совместного действия тепловых и механических нагрузок

© А.В. Захарченко, 2014