



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.793

М.М. КАНЕ, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры «Технология машиностроения»¹
E-mail: kane_08@mail.ru

О.Г. ДЕВОЙНО, д-р техн. наук, проф.
заведующий ОНИЛ плазменных и лазерных технологий²
E-mail: plazteh@bntu.by

И.В. ШВЕЦ
доцент кафедры «Машиноведение и детали машин»¹
E-mail: apshvec@mail.ru

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 07.10.2024.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ЗУБЬЕВ НАГРУЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Показана актуальность замены дорогих легированных сталей, из которых в настоящее время изготавливают нагруженные цилиндрические зубчатые колеса, более дешевыми (до 2,5 раз) конструкционными сталями, совершенствования процессов упрочнения зубьев нагруженных цилиндрических шестерен и снижения их стоимости. Показаны недостатки наиболее распространенного метода упрочнения нагруженных зубчатых колес. Описаны возможности современных методов поверхностного упрочнения металлов с помощью лазерного излучения. Приведены основные результаты изучения влияния условий лазерного упрочнения образцов из конструкционной стали 40X сканирующим лазерным лучом на твердость и шероховатость поверхностей образцов. Для типовых условий эксплуатации цилиндрических шестерен автотракторных трансмиссий выполнена расчетная оценка возможности обеспечить необходимый ресурс передачи при использовании конструкционной стали 40X для изготовления шестерен с последующим упрочнением зубьев сканирующим лазерным лучом.

Ключевые слова: цилиндрические зубчатые колеса, лазер со сканирующим лучом, лазерная закалка металлов, лазерное упрочнение стали 40X, глубинная выносливость зубьев

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-53-58>

Введение. Зубчатые колеса являются в настоящее время наиболее сложными, ответственными и распространенными деталями машин. От качества зубчатых колес во многом зависят эксплуатационные характеристики машин, в которых они используются. Наряду с ограничениями технических возможностей машин зубчатые колеса снижают их экономическую эффективность. Нагружен-

ные шестерни изготавливаются из дорогостоящих легированных сталей, подвергаются трудоемким, дорогим процессам упрочнения, которые требуют, как правило, последующей отделки базовых поверхностей колес и зубчатого венца. Альтернативой применению в настоящее время в основном легированных сталей для изготовления нагруженных шестерен является использование конструкци-

онных сталей с последующим эффективным поверхностным упрочнением зубьев. Как известно, стоимость легированных сталей до 2,5 раз выше стоимости конструкционных сталей. Длительность процесса цементации (наиболее распространенного процесса упрочнения зубчатых колес) с помощью наиболее совершенной в настоящее время линии фирмы Irsen (Германия) находится в пределах 25–40 часов для зубчатых колес с $m = 2 \dots 6$ мм. Это значительно удлиняет производственный цикл, усложняет организацию и удорожает процесс изготовления шестерен. Себестоимость цилиндрического зубчатого колеса среднего модуля в отечественных производственных условиях составляет примерно 60 долл. США. Все это указывает на необходимость существенного совершенствования процессов изготовления шестерен, в том числе за счет удешевления используемых материалов шестерен и улучшения процесса их упрочнения.

Цель исследования — оценка возможности изготовления нагруженных цилиндрических шестерен из конструкционных сталей с последующим лазерным упрочнением рабочих поверхностей шестерен.

Объект исследований — нагруженная цилиндрическая зубчатая передача трактора BELARUS, которую предлагается изготавливать из конструкционной стали 40X с последующим лазерным упрочнением шестерен. Условия эксплуатации выбранной передачи характерны для нагруженных цилиндрических шестерен автотракторных трансмиссий (грузовых автомобилей и тракторов).

Структура исследования. Для достижения поставленных целей данное исследование было выполнено за два этапа.

1. Экспериментальная оценка возможностей лазерного упрочнения со сканирующим лучом стали 40X, изучение влияния режимов упрочнения на физико-механические характеристики упрочненных поверхностей, моделирование данного процесса.

2. Расчетная оценка работоспособности нагруженной цилиндрической зубчатой передачи, изготовленной из стали 40X с лазерным упрочнением шестерен, на примере нагруженной цилиндрической зубчатой передачи трактора BELARUS.

Наиболее распространенным методом упрочнения нагруженных шестерен является газовая цементация с закалкой в масле и последующим низким отпускком [1, 2]. Другие методы упрочнения шестерен рассмотрены в работах [3–7]. Основными недостатками указанного процесса являются: вероятность отслаивания упрочненного слоя, появления в нем микротрещин, неравномерной твердости, что снижает эксплуатационные свойства шестерен, деформации шестерен после ХТО, высокие стоимость и трудоемкость процесса.

Весьма перспективным для упрочнения нагруженных шестерен представляется метод лазер-

ного упрочнения, существенно отличающийся от всех ранее применявшихся методов поверхностного упрочнения деталей машин. Возможности, достоинства и недостатки лазерного упрочнения деталей машин рассмотрены ниже.

Возможности, достоинства и недостатки лазерного упрочнения деталей машин. Лазерное упрочнение металлов имеет ряд преимуществ перед другими методами термоупрочнения:

- возможность получения поверхностей с более высоким уровнем физико-механических свойств по сравнению с традиционными методами упрочнения [8, 9];

- обеспечение более высоких твердости, износостойкости и задиростойкости упрочненных поверхностей, большей производительности и меньшей стоимости процесса упрочнения [10–12, 15, 16];

- уменьшение до 20 раз деформаций упрочненных деталей по сравнению с ХТО и закалкой ТВЧ [10], равномерность свойств упрочненного слоя [13].

К недостаткам лазерного упрочнения деталей машин можно отнести трудности упрочнения фасонных поверхностей и обеспечения равномерности тепловых деформаций упрочняемой детали в ее различных сечениях при изменении размеров детали в этих сечениях. Эти трудности могут быть преодолены при использовании робота(ов) для управления траекторией перемещения источника лазерного излучения или детали или обоими субъектами, а также использования лазера с переменной мощностью излучения [10, 14].

Методики исследований. Экспериментальное исследование процесса лазерного упрочнения конструкционной стали проводилось на образцах из стали 40X после их улучшения до твердости 180...220 НВ.

Лазерную сканирующую термообработку производили на иттербиевом волоконном лазере непрерывного действия MLS-1-3DF производства НТО «ИРЭ-Полус» (Россия) ЛС-2 мощностью 1 кВт.

Изучалось влияние на твердость HRC и шероховатость Ra упрочненной поверхности скорости перемещения сканирующего луча V (мм/мин) вдоль образца (X_1), амплитуды B (мм) сканирования луча (X_2), ширины луча d (мм) (X_3). Лазерный луч в поперечном сечении имел прямоугольную форму высотой 1 мм. Независимые переменные изменялись в следующих пределах: $V = 300 \dots 1000$ мм/мин, $B = 4 \dots 8$ мм, $d = 0,5 \dots 3$ мм.

Наиболее распространенной причиной выхода из строя нагруженных шестерен автотракторных трансмиссий является пitting [15, 16], что вызвано их недостаточной контактной выносливостью. Поскольку речь идет о шестернях с поверхностным упрочнением зубьев на определенную глубину, было принято решение выполнить проверочные расчеты глубинной контактной выносливости зубьев шестерен из стали 40X после их лазерного упрочнения для условий их работы в автотрактор-

ных трансмиссиях. Такая проверка рекомендована ГОСТ 21354-87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность». Была выбрана пара шестерен, характерная для трактора BELARUS. Расчеты были выполнены по ГОСТ 21354-87 с помощью компьютерной программы GNS. Согласно ГОСТ 21354-87 глубинная выносливость зубьев обеспечена при соблюдении следующих условий:

$$\sigma_H \leq \frac{\sigma_{Hкр}}{S_{Hкр}}; \quad (1)$$

$$h_H < h_t, \quad (2)$$

где σ_H — расчетное контактное напряжение в полюсе зацепления, МПа; $\frac{\sigma_{Hкр}}{S_{Hкр}}$ — допустимое глубинное контактное напряжение, МПа; $\sigma_{Hкр}$ — допускаемое глубинное напряжение, МПа; $S_{Hкр}$ — коэффициент запаса прочности по глубинной контактной выносливости; h_H — глубина расположения зоны наибольших глубинных касательных напряжений, мм; h_t — толщина упрочненного слоя до исходной структуры упрочненной поверхности, мм.

Кроме того, значения твердости H_z по толщине упрочненного слоя зубьев должны быть не меньше значений, рассчитанных по формуле (3):

$$H_z = \frac{H_o}{\left(\frac{H_o}{H_k} - 1\right) \left(\frac{Z}{h_t}\right)^2 + 1}, \quad (3)$$

где H_z — твердость материала на глубине z , HV, кгс/мм²; H_o — твердость активных поверхностей зубчатых колес (средняя) HV, кгс/мм²; H_k — твердость сердцевины зубчатых колес (средняя), HV, кгс/мм²; z — расстояние от поверхности зуба в его глубину по нормали к профилю зуба, мм.

Исходные данные, использованные при проведении проверочных расчетов, приведены в таблице 1.

Результаты исследований. При экспериментальном изучении процесса лазерного упрочнения конструкционной стали 40X был установлен линейный характер рассмотренных парных взаимосвязей и с учетом этого принята модель рассмотренных многофакторных взаимосвязей в виде полинома первой степени с учетом парных эффектов взаимодействия. Были получены уравнения регрессии $HRC = f(V, B, d)$ и $Ra = f(V, B, d)$ в относительных единицах. Оценка достоверности коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента позволила исключить незначимые коэффициенты и получить уточненные многофакторные зависимости между исследованными факторами. Анализ адекватности полученных уравнений в относительных единицах с помощью критерия Фишера подтвердил их адекватность. На основании этих уравнений

с учетом условий выполненных экспериментов были получены многофакторные взаимосвязи между изученными факторами в натуральных единицах (см. зависимости (4), (5)):

$$HRC = 94,16 + 0,04V - 6,43B - 20,65d + 0,85Bd; \quad (4)$$

$$Ra = 4,10 + 0,0008V - 0,10B - 0,36d. \quad (5)$$

Эти зависимости могут быть использованы для предварительного выбора рассмотренных условий (значений V, B, d) лазерного упрочнения сканирующим лучом хромистых конструкционных сталей. Эти условия позволят обеспечить необходимые значения HRC и Ra упрочненных поверхностей.

Данные исследования позволили установить: - при рациональных режимах лазерное упрочнение сканирующим лучом позволяет увеличить твердость

Таблица 1 — Исходные данные для проверочного расчета глубинной контактной выносливости шестерен из стали 40X после лазерного упрочнения

Table 1 — Initial data for the verification calculation of the deep contact endurance of gears made of 40Kh steel after laser hardening

Наименование и обозначение параметра зубчатой передачи	Значение параметра
Число зубьев шестерни Z_1	18
Число зубьев колеса Z_2	47
Суммарное число зубьев Z_z	65
Модуль передачи m , мм	5
Ширина венца шестерни b_1 , мм	68
Ширина венца колеса b_2 , мм	61,5
Коэффициент смещения шестерни x_1	0,4176
Коэффициент смещения колеса x_2	0,11
Угол наклона зубьев шестерни и колеса, градус	0
Модификация головки зуба шестерни и колеса	нет
Степень точности передачи по ГОСТ 1643-81	8-Ba
Частота вращения шестерни, об/мин	1460
Требуемый ресурс, ч	10 000
Марка стали зубчатых колес	40X
Толщина упрочненного слоя до исходной структуры, мм	1,5
Способ упрочняющей обработки	Лазерное упрочнение
Твердость поверхностей зубчатых колес, HRC	62
Твердость сердцевины зубьев, HB	230
Делительный диаметр шестерни d_1 , мм	90
Делительный диаметр колеса d_2 , мм	235
Начальный диаметр шестерни d_{w1} , мм	91,3849
Начальный диаметр колеса d_{w2} , мм	238,6153
Межосевое расстояние a_w , мм	165,0001

поверхности образца из стали 40X до 55...60 HRC на глубину до 1,5 мм. Твердость сердцевины образца составляет 25...40 HRC. Эти результаты практически аналогичны характеристикам, достижимым после ХТО шестерен из легированных сталей;

- установлено, что при лазерном упрочнении шестерен после их зубофрезерования или шевингования могут быть обеспечены значения R_a , соответствующие требованиям для шестерен 7–8 степеней точности по ГОСТ 1643-81;

- показан одинаковый характер влияния рассмотренных условий лазерного упрочнения сканирующим лучом (V, B, d) конструкционной стали 40X на значения HRC и R_a упрочненных поверхностей. С увеличением V значения HRC и R_a увеличиваются, с увеличением B, d указанные параметры уменьшаются. Наибольшее влияние на изменение значений HRC и R_a оказывает параметр d . Все рассмотренные парные взаимосвязи имеют линейный характер. Уменьшение значений HRC и R_a при увеличении значений B и d возможно связано с уменьшением удельного значения передаваемой энергии на единицу площади упрочняемой поверхности. Увеличение значений HRC и R_a при увеличении V возможно вызвано изменением фазовых превращений в металле при изменении скорости нагрева упрочняемого металла [9].

Результаты расчетов глубинной контактной выносливости выбранной передачи приведены в таблице 2.

Рассчитанные по формуле (3) согласно ГОСТ 21354-87 и определенные экспериментально значения микротвердости H_z по глубине упрочненного волоконным лазером со сканирующим лучом образцов из стали 40X показаны на рисунке.

Анализ приведенных результатов выполненных расчетов позволяет сделать следующие выводы.

1. Изготовление нагруженных цилиндрических зубчатых колес из стали 40X с поверхностной лазерной закалкой сканирующим лучом позволяет обеспечить глубинную контактную выносливость зубьев при режимах и условиях эксплуатации, характерных для высоконагруженных шестерен автотракторных трансмиссий, в режиме постоянной нагрузки в течение всего срока эксплуатации

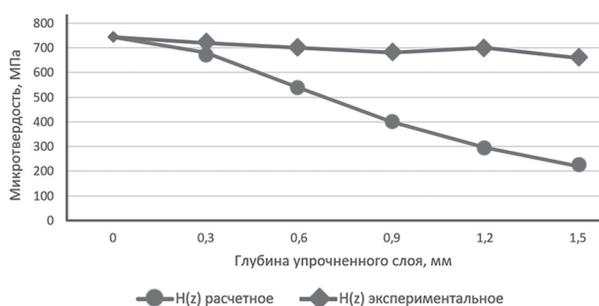


Рисунок — Расчетные и экспериментальные значения микротвердости упрочненного лазером со сканирующим лучом слоя образцов из стали 40X

Figure — Calculation and experimental values of microhardness of a layer of 40Kh steel samples hardened by a laser with a scanning beam

(10 тыс. часов), т. е. условие (1) соблюдается для всех рассмотренных условий эксплуатации шестерен. Причем до окружной силы 25 000 Н заготовка шестерни из стали 40X может подвергаться нормализации (HB 215...253), а при окружных силах 30 000...35 000 Н заготовка должна подвергаться улучшению (HB 300...358).

2. В рассмотренных условиях эксплуатации в зубьях шестерен, изготовленных из стали 40X и подвергнутых лазерной закалке сканирующим лучом, максимальные глубинные касательные напряжения не выходят за пределы упрочненного слоя, имеющего глубину 1,5 мм, т. е. условие (2) также соблюдается.

3. Фактический градиент изменения микротвердости упрочненного лазерной закалкой сканирующим лучом слоя в образцах из стали 40X по его глубине значительно меньше допустимого для рассматриваемых условий эксплуатации шестерен, т. е. условие (3) также соблюдено.

4. Таким образом, учитывая возможности лазерного упрочнения стали 40X, высока вероятность того, что изготовленные из стали 40X и подвергнутые лазерному упрочнению сканирующим лучом при определенных условиях шестерни могут быть использованы в качестве высоконагруженных шестерен автотракторных трансмиссий. Это позволит улучшить качество продукции и повысить эффективность производства грузовых автомобилей и тракторов. Указанные шестерни

Таблица 2 — Результаты оценки глубинной контактной выносливости для шестерен из стали 40X с лазерным упрочнением
Table 2 — Results of the evaluation of the deep contact endurance for gears made of 40Kh steel with laser hardening

Окружная сила $F_{H\beta}$, Н	Крутящий момент на шестерне T_1 , Н·м	Расчетное контактное напряжение $\sigma_{H\beta}$, МПа	$\frac{\sigma_{H\beta}}{S_{H\beta}}$, МПа	Допускаемое предельное глубинное напряжение $\sigma_{H\beta}^*$, МПа	Глубина расположения зоны наибольших глубинных касательных напряжений $h_{H\beta}$, мм	Микротвердость сердцевины шестерни, HV(HB)
11 000	500	716,185	1251,984	1752,778	0,507	220 (215)
15 000	675	832,745	1157,365	1620,311	0,586	220 (215)
20 000	900	958,75	1058,305	1481,628	0,674	220 (215)
25 000	1125	1069,778	1093,831	1531,364	0,752	260 (253)
30 000	1350	1170,758	1183,836	1657,37	0,8234	320 (300)
35 000	1575	1269,55	1271,98	1780,777	0,889	380 (358)

могут быть использованы также для изготовления широкой номенклатуры машин.

Заключение. Резервами совершенствования процессов изготовления нагруженных зубчатых передач, повышения их качества и снижения стоимости являются применение при их изготовлении более дешевых конструкционных сталей типа 40X вместо легированных и высокоуглеродистых, использование более эффективной лазерной закалки зубьев и базовых поверхностей колес вместо традиционных методов упрочнения (цементации, нитроцементации, закалки ТВЧ). При использовании конструкционных сталей для изготовления нагруженных шестерен расходы на материалы снижаются примерно в 2,5 раза. Применение лазерного упрочнения сканирующим лучом зубчатых колес из стали 40X может существенно повысить производительность упрочнения, увеличить износостойкость и задиростойкость зубьев, значительно уменьшить деформации шестерен по сравнению с цементацией и закалкой ТВЧ, обеспечить глубинную контактную выносливость зубьев высоконагруженных шестерен для условий эксплуатации автотракторных трансмиссий. Производительность лазерного упрочнения, отсутствие вредных выбросов позволяют встраивать эту операцию в поточную линию механической обработки. Применение конструкционных сталей с последующим лазерным упрочнением сканирующим лучом в определенных условиях перспективно для изготовления нагруженных шестерен для широкой номенклатуры машин.

Список литературы

1. Зинченко, В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В.М. Зинченко. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 302 с.
2. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В.Б. Альгин, В.Е. Антонок, П.Н. Громько [и др.]; под общ. ред. В.Б. Альгина, В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 406 с.
3. Калашников, А.С. Упрочнение зубчатых колес / А.С. Калашников // РИТМ машиностроения. — 2019. — № 3. — С. 32–38. — URL: <https://ritm-magazine.com/en/node/3328>.
4. ラジカル窒化ステンレス鋼SUS440C齒車のスコアリング強度 / 灘野宏正, 中迫正一, 河野正来, 野田善友, 深一徳 // 日本機械学会論文集(C編). — 2002. — 68巻, 670号. — P. 1840–1847. — DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.68.1840>. = Scoring resistance of radical nitrated stainless steel SUS440C spur gears / H. Nadano, M. Nakasako, M. Kohno [et al.] // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C. — 2002. — Vol. 68, iss. 670. — P. 1840–1847. — DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.68.1840>.
5. Компьютерная программа «Расчет прокаливаемости конструкционных сталей (H-Steel)»: св-во № 846. Респ. Беларусь; правообладатель Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — № С20150109; заявл. 03.11.15; опубл. 12.01.16 // Реестр зарегистр. компьютерных программ / Нац. центр интеллектуальной собственности. — 2016.
6. Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 126 с.
7. 郭锐, 喷丸强化对25MoCr5钢渗碳齿轮组织及性能的影响 / 郭锐, 王荣华 // 金属热处理. — 2001. — 6期. — P. 21–23. = Guo, R. Influence of shot peening strengthening on structure and properties of 25MoCr5 steel carburized gears / R. Guo, R. Wang // Jinshu Rechuli – Heat Treatment of Metals. — 2001. — Iss. 6. — P. 21–23.
8. Антонок, В.Е. Зубчатые передачи. Нормативно-методическое обеспечение точности зубчатых передач на этапе проектирования / В.Е. Антонок, В.Л. Басинюк, П.С. Серенков. — Минск: Беларус. навука, 2016. — 251 с.
9. Астапчик, С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. — Минск: Белорус. наука, 2008. — 251 с.
10. Влияние лазерного упрочнения круглым, профилированным и колеблющимся лучом на повышение ресурса работы деталей машин / В.П. Бирюков, А.А. Фишков, Д.Ю. Татаркин, Е.В. Хриптович // ФОТОНИКА. — 2017. — № 3. — С. 28–34.
11. Евстюнин, Г.А. Лазерное упрочнение в оборонной промышленности / Г.А. Евстюнин, В.М. Журавель, И.Ф. Буханова // РИТМ машиностроения. — 2017. — № 5. — С. 38–41. — URL: <https://ritm-magazine.com/en/node/1884> (дата обращения 05.08.2024).
12. Матвеев, Ю.И. Лазерные технологии в судовом машиностроении / Ю.И. Матвеев. — Нижний Новгород: Изд-во ГОУ ВПО ВГАВТ, 2003. — 98 с.
13. Тескер, Е.И. Современные методы повышения несущей способности высоконагруженных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е.И. Тескер, С.И. Тескер // Теория и практика зубчатых передач: сб. тр. междунар. симпозиума, г. Ижевск, 21–23 янв. 2014 г. / ИжГТУ. — Ижевск, 2014. — С. 316–323.
14. Бирюков, В.П. Влияние распределения плотности мощности лазерного луча на повышение износостойкости поверхностей трения / В.П. Бирюков // Вестник машиностроения. — 2008. — № 3. — С. 33–37.
15. Лебедев, С.Ю. Вероятность безотказной работы поверхностно-упрочненных зубьев колес цилиндрических передач / С.Ю. Лебедев, В.Н. Сызранцев // Тракторы и сельхозмашины. — 2024. — Т. 91, № 3. — С. 341–353. — DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625954>.
16. Девойно, О.Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием лазерных технологий / О.Г. Девойно, И.В. Швец // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-технич. сб. / БНТУ; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.). — Минск, 2019. — Вып. 34. — С. 266–270.

KANE Mark M., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department “Mechanical Engineering Technology”¹

E-mail: kane_08@mail.ru

DEVOINO Oleg G., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Applied Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies²

E-mail: plazteh@bntu.by

SHVETS Irina V.

Associate Professor of the Department “Mechanical Engineering and Machine Parts”¹

E-mail: apshvec@mail.ru

¹Belarus National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Research Polytechnic Institute of BNTU, Minsk, Republic of Belarus

Received October 7, 2024.

ANALYSIS OF LASER HARDENING POSSIBILITY OF TEETH OF LOADED CYLINDRICAL GEARS MADE OF STRUCTURAL STEELS

The relevance is shown for replacing expensive alloy steels, of which loaded cylindrical gears are currently made, with cheaper (up to 2.5 times) structural steels, improving the processes of hardening the teeth of loaded cylindrical gears and reducing their cost. The disadvantages of the most common methods of hardening loaded gears are presented. The possibilities of modern methods of surface hardening of metals using laser radiation are described. The main results of studying the influence of the conditions of laser hardening of 40X (40Kh) structural steel samples by a scanning laser beam on the hardness and roughness of the sample surfaces are given. For typical operating conditions of cylindrical gears of automotive transmissions, a calculated assessment was performed for the possibility of providing the required transmission life when using 40Kh structural steel for the manufacture of gears with subsequent hardening of the teeth with a scanning laser beam.

Keywords: cylindrical gears, laser with a scanning beam, laser hardening of metals, laser hardening of 40X (40Kh) steel, deep endurance of teeth

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-53-58>

References

- Zinchenko V.M. *Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki* [Engineering of the surface of gears by methods of chemical and thermal treatment]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. N.E. Bauman Publ., 2001. 302 p. (in Russ.).
- Algin V.B., et al. *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: proektirovanie, tekhnologiya, otsenka svoystv* [Gears and transmissions in Belarus: design, technology, evaluation of properties]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 406 p. (in Russ.).
- Kalashnikov A.S. Uprochnenie zubchatykh koles [Hardening of gears]. *RHYTHM of machinery*, 2019, no. 3, pp. 32–38. Available at: <https://ritm-magazine.com/en/node/3328> (in Russ.).
- Nadano H., Nakasako M., Kohno M., Noda Y., Fukada K. Scoring resistance of radical nitrided stainless steel SUS440C spur gears. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, series C*, 2002, vol. 68, iss. 670, pp. 1840–1847. DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.68.1840> (in Japanese).
- Rudenko S.P., Kuzmenkov O.V., Valko A.L., Shipko A.A. *Raschet prokalivaemosti konstruktsionnykh staley (H-Steel). Kompyuternaya programma* [Calculation of hardenability of structural steels (H-Steel). Computer program]. Certificate BY, no. 846, 2016 (in Russ.).
- Rudenko S.P., Valko A.L. *Kontaktная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин* [Contact fatigue of gears of transmissions of energy-saturated machines]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 126 p. (in Russ.).
- Guo R., Wang R. Influence of shot peening strengthening on structure and properties of 25MoCr5 steel carburized gears. *Jinshu rechuli – Heat treatment of metals*, 2001, iss. 6, pp. 21–23 (in Chinese).
- Antonyuk V.E., Basiniuk V.L., Serenkov P.S. *Zubchatye peredachi. Normativno-metodicheskoe obespechenie tochnosti zubchatykh peredach na etape proektirovaniya* [Gears. Regulatory and methodological support for the accuracy of gears at the design stage]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2016. 251 p. (in Russ.).
- Astapchik S.A., Golubev V.S., Maklakov A.G. *Lazernye tekhnologii v mashinostroenii i metalloobrabotke* [Laser technologies in mechanical engineering and metalworking]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2008. 251p. (in Russ.).
- Biriukov V.P., Fishkov A.A., Tatarkin D.Yu., Hriptovich E.V. Vliyanie lazernogo uprochneniya kruglym, profilirovannym i koleblyushchimsya luchom na povyshenie resursa raboty detaley mashin [Influence of laser hardening by round, profiled and oscillating beam on the increase of service life of machine parts]. *Photonics Russia*, 2017, no. 3, pp. 28–34 (in Russ.).
- Evstyunin G.A., Zhuravel V.M., Bukhanova I.F. Lazernoe uprochnenie v oboronnoy promyshlennosti [Laser strengthening in the defense industry]. *RHYTHM of machinery*, 2017, no. 5, pp. 38–41. Available at: <https://ritm-magazine.com/en/node/1884> (accessed August 5, 2024) (in Russ.).
- Matveev Yu.I. *Lazernye tekhnologii v sudovom mashinostroenii* [Laser technologies in marine engineering]. Nizhny Novgorod, GOU VPO VGAVT Publ., 2003. 98 p. (in Russ.).
- Tesker E.I., Tesker S.I. Sovremennyye metody povysheniya nesushchey sposobnosti vysokonagruzhennykh zubchatykh peredach transmissiy i privodov [Theory and methods of deep contact strength calculation for highly loaded laser-hardened gear drives and power transmissions]. *Proceedings of international symposium "Theory and practice of gearing"*, 2014, pp. 316–323 (in Russ.).
- Biryukov V.P. Vliyanie raspredeleniya plotnosti moshchnosti lazernogo luchu na povyshenie iznosostoykosti poverkhnostey treniya [Influence of power density distribution of laser beam upon friction surfaces wearing capacity enhancement]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 3, pp. 33–37 (in Russ.).
- Lebedev S.Yu., Syzrantsev V.N. Veroyatnost bezotkaznoy raboty poverkhnostno-uprochnennykh zubev koles tsilindricheskikh peredach [The reliability function of the case-hardened teeth of wheels of cylindrical gears]. *Tractors and agricultural machinery*, 2024, vol. 91, no. 3, pp. 341–353. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625954> (in Russ.).
- Devoino O.G., Shvets I.V. Obespechenie resursnykh parametrov otvetstvennykh elementov mekhanicheskikh transmissiy s ispolzovaniem lazernykh tekhnologiy [Providing resource parameters of responsible elements of mechanical transmissions by using surface layers formed by laser technologies]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2019, iss. 34, pp. 266–270 (in Russ.).