

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ ЛАЗЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

¹ Девойно О.Г., ¹ Швец И.В.

¹ *Белорусский Национальный Технический Университет, Минск, Беларусь*

Одними из наиболее важных элементов механических трансмиссий являются зубчатые колеса, которые работают в широком диапазоне режимов и зачастую их ресурс лимитирует долговечность механизма в целом. От качества их работы зависят такие характеристики как кинематическая точность и уровень шума. Поэтому обеспечение высокого уровня физико-механических свойств зубчатых колес во многом определяет качество работы всей машины.

Для решения указанных задач предлагается использовать наиболее универсальный способ получения требуемых характеристик зубчатых колес при любой серийности производства с использованием современных высокоскоростных методов обработки концентрированными потоками энергии, наиболее перспективным из которых является лазерная обработка. Современный уровень развития лазерной техники позволяет расширить сферу ее эффективного применения в машиностроении и в частности добиться решения задачи обеспечения высокого уровня физико-механических свойств и долговечности зубчатых колес при снижении себестоимости упрочнения.

В частности, лазерная закалка рассматривается в качестве альтернативы поверхностного упрочнения цементацией и последующей объемной закалке для снижения коробления зубьев, а также ионно – плазменному азотированию (рис. 1). При цементации технология изготовления состоит из шести этапов (улучшение, черновая и чистовая обработки, цементация, закалка + отпуск и шлифование), при ионно-плазменном азотировании из пяти (улучшение, черновая обработка, отжиг, чистовая обработка, азотирование), а при лазерном упрочнении поверхности из четырех (улучшение, черновая и чистовая обработки, лазерная закалка), что неизбежно приведет к уменьшению себестоимости изготовления. Технология лазерной закалки сканирующим лучом без оплавления позволяет отказаться от шлифования поверхности после упрочнения, а также нет необходимости в закалке с отпуском и отжиге.

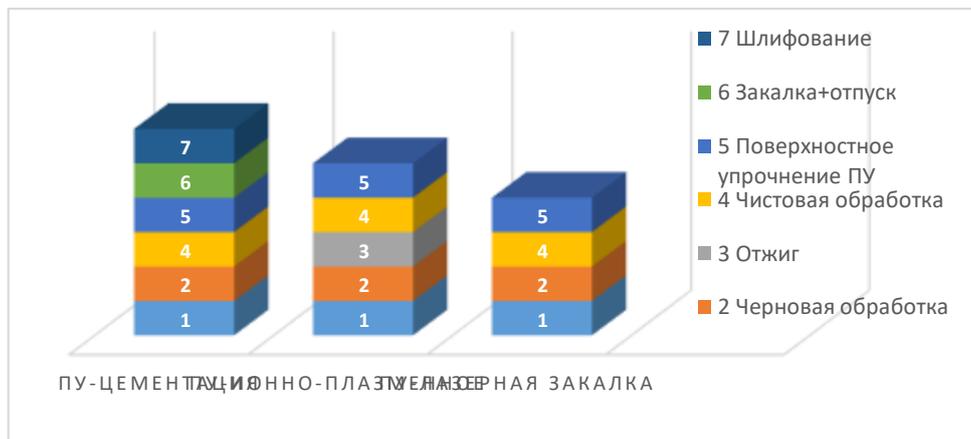


Рис. 1. Технологические этапы изготовления зубчатых колес

Лазерная закалка боковых поверхностей зубчатых колес с использованием сканирующего излучения позволяет обеспечить оптимальный энерговклад в каждый элемент поверхности и, соответственно, эффективное распределение свойств согласно распределению факторов износа по рабочей поверхности зубьев. Следует обратить внимание на наиболее нагруженные локальные зоны, подвергающиеся наибольшему износу. Возможности лазера позволяют дополнительно обработать данные зоны (рис 2). Также сформировать управляемое распределение твердости и глубины упрочненной поверхности за счет варьирования режимами обработки для передач с определенной геометрией и условиями работы.

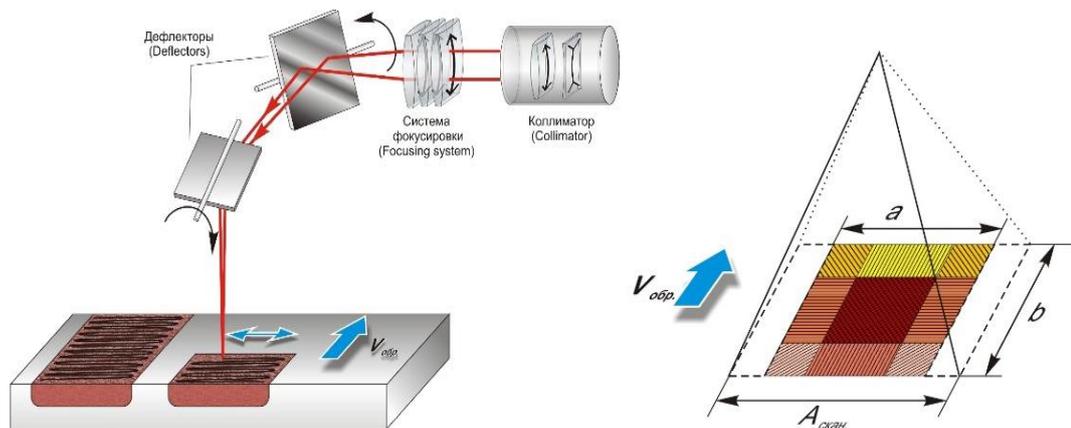


Рис. 2. Оптическая сканирующая система и пятно лазерного сканирования

Для обеспечения эффективности лазерной закалки зубчатых колес на первый план выходит необходимость предварительного расчета требуемой твердости и толщины упрочненного слоя для конкретных условий работы передачи. По результатам этих расчетов далее производится выбор материала зубчатых колес и режимов лазерной закалки на конкретном оборудовании.

Расчет колес на глубинную контактную прочность при залегании опасной зоны в упрочненном слое или на границе слоя позволяет определить вариант упрочнения, когда глубину закалки можно минимизировать и обеспечить при этом эффективную и долговечную работу зацепления. Если опасная зона находится в закаленном слое, то необходимую глубину упрочнения можно найти, используя выражение, полученное из расчетов на допустимое глубинное контактное напряжение [2]

$$h_i \geq h_{\text{eff}} \sqrt{\frac{\sigma_H S_H (H_o - H_K)}{H_K (3,6H_o - \sigma_H S_H)}}.$$

Выполняя расчеты на прочность зубчатых колес средней нагруженности с поверхностным упрочнением до твердости поверхностного слоя более 55 HRC установили, что условие глубинной контактной прочности выполняется, если зона наибольших глубинных касательных напряжений находится в пределах толщины упрочненного слоя, а не в более мягкой сердцевине. При этом глубина этой зоны обычно составляет до 1 мм и не превышает толщины упрочненного слоя. Вариант расположения зоны наибольших глубинных касательных напряжений в сердцевине не рассматриваем, так как твердость сердцевины заведомо невелика, а глубину упрочняемого слоя при лазерной закалке можно варьировать за счет режимов обработки в пределах более 1 мм. Поэтому целью исследований являлось проверить условие глубинной контактной прочности при расположении зоны наибольших глубинных касательных напряжений в пределах упрочненного слоя, удовлетворяющего условию работоспособности передачи.

Для изучения лазерного воздействия на поверхностные слои была выбрана сталь 40X в улучшенном и закаленном виде, которая получила широкое распространение при изготовлении зубчатых колес. Закалку производили на волоконном иттербиевом лазере мощностью 1 кВт с объективом для фокусировки лазерного излучения, системой перемещения и сканирующей лазерный луч головкой.

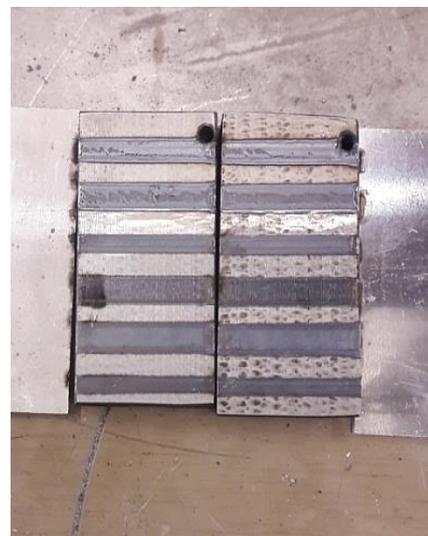
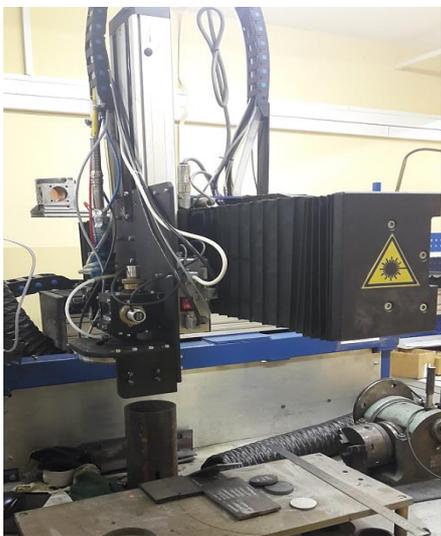


Рис. 3. Волоконный иттербиевый лазер со сканирующей системой и образцы из стали 40X после воздействия сканирующим лучом с варьируемыми параметрами

По приведенной методике выполнен расчет на глубинную контактную прочность подвергнутых лазерной закалке зубчатых колес из стали 40X с твердостью поверхностного слоя шестерни 62 HRC, колеса 60 HRC, частотой вращения колеса 258 мин^{-1} , частотой вращения шестерни 100 мин^{-1} , передаточное число $n = 2,85$, ресурс привода $L_h = 10000 \text{ ч}$, модулем $m = 2 \text{ мм}$, с окружной скоростью $0,972 \text{ м/с}$, 9-ой степени точности, межосевым расстоянием 140 мм, шириной шестерни 44 мм, шириной колеса 48 мм, делительным диаметром шестерни 72 мм, колеса 208 мм, приведенный радиус кривизны профиля 9,0935 мм для различных значений передаваемого крутящего момента. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетная глубина упрочнения зубьев колес из стали 40X при различных величинах крутящего момента

Передаваемый крутящий момент, Нм	Окружная сила, Н	Удельная окружная сила, Н/мм	Эффективная толщина упрочненного слоя, мм	Необходимая глубина упрочнения, мм
500	4807,7	117,4	0,527	0,645
1000	9615,4	234,8	0,662	0,81
1500	14423	352,1	0,766	0,938
2000	19230,8	469,5	0,854	1,046
2500	24038,5	586,9	0,93	1,138

Анализируя параметры, используемые для определения глубины наибольших глубинных касательных напряжений, можно заметить, что необходимая глубина упрочнения увеличивается с ростом нагруженности передачи и модуля зацепления. Также важным является твердость поверхности и сердцевины колес, особенно в высоконагруженных передачах. Для конкретных условий работы передачи необходимо производить расчет требуемой глубины упрочнения и делать вывод о возможности обеспечения заданной долговечности лазерной закалкой на лазерной установке с определенными технологическими параметрами.

Расчет колес на глубинную контактную прочность при залегании опасной зоны на границе слоя позволяет определить вариант упрочнения, когда глубину закалики можно минимизировать и обеспечить при этом эффективную и долговечную работу зацепления.

Возможность упрочнения и модифицирования поверхностей широчайшей номенклатуры материалов с повышением их эксплуатационных характеристик позволяет во многих случаях заменять дорогостоящие, сложнолегированные материалы, используемые часто с целью обеспечения необходимой износостойкости поверхностей, на более простые, дешевые и доступные с приданием им нужных эксплуатационных характеристик. Лазерное упрочнение обеспечивает распределение твердости по глубине так, что по всей ширине зуба твердость превышает величины напряжений, возникающих в процессе работы передачи. Хорошие качественные показатели обработанной лазером поверхности, такие как мелкозернистая структура, отсутствие трещин на поверхности, повышенная сопротивляемость контактными нагрузкам, уменьшение коэффициента трения позволяет получить твердость поверхности у среднеуглеродистых низколегированных сталей 40X, 40XH и др. 63...65 HRC, при которой достигается максимальное сопротивление выкрашиванию, в широком диапазоне геометрических размеров зубчатых колес. Традиционно добиться такой твердости возможно для сталей 20X, 20XH2M, 18XГТ, 25XГМ с помощью улучшения, цементации, нитроцементации или азотирования поверхности с последующим низкотемпературным отпуском. Возникающие при химико-термической обработке дефекты микроструктуры, снижающие контактную и изгибную прочность, отсутствуют при лазерной закалке, а обработанный слой обладает некоторой пластичностью, способствующей повышенной сопротивляемости усталостным разрушениям и перегрузкам.

Однако, остаются не достаточно изученными вопросы связи технологии упрочнения на лазерной установке с определенными технологическими параметрами в

зависимости от условий работы передачи с учетом требуемой глубины упрочнения и возможности обеспечения заданной долговечности, точности эвольвентных профилей после фазовых превращений в поверхностном слое, а также необходимости обеспечения оптимального распределения свойств по поверхности зуба с учетом неравномерного нагружения зубчатых передач и лазерной закалкой.

Целью дальнейшего изучения будет исследование закономерностей формирования упрочненных слоев боковых поверхностей зубчатых колес в зависимости от варьируемых технологических параметров лазерного сканирующего излучения в совокупности с анализом оптимальной требуемой глубины упрочнения для обеспечения ресурсных параметров механических трансмиссий, а также получение регрессионных зависимостей влияния технологических характеристик лазерной обработки на геометрические и точностные параметры зубчатых колес различных размеров с учетом режимов нагружения.

Проанализированные данные будут использованы для разработки технологического процесса изготовления зубчатых колес механических трансмиссий с лазерной закалкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скойбеда А.Т. Детали машин и основы конструирования: учебник / А.Т. Скойбеда, А.В. Кузьмин, Н.Н. Макейчик; под общ. Ред. А.Т. Скойбеда. – 2-е изд., перераб. – Мн. 6 Выш. Шк., 2006. – 560 с.
2. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность, 1988.
3. Девойно О.Г. и др. Расчет на контактную прочность для эффективного лазерного упрочнения зубьев зубчатых колес. Теоретическая и прикладная механика: межд. научно-техн. сб. - Мн., 2016. - Вып. 31, с.129-135.
4. Devoino O.G. и др. The features of gear teeth laser hardening process. Beam Technologies and Laser Application: Proceedings of the international scientific and technical conference. SPb.: Publishing house SPbSPU, 2016. – P. 158-163.
5. Девойно О.Г. и др. Эффективность использования лазерной закалки для увеличения прочности зубчатых колес. Сб. трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 11-15 сентября 2017 г., Одесса, Украина. Киев: Международная Ассоциация «Сварка», с. 83-86.