

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКОЙ

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Авсиевич А.М., Швец И.В.

(Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

Тел/Факс +375 017331-00-45, E-mail: scvdmmed@bntu.by

Abstract: *The assessment of possibility of use of laser radiation for superficial treatment of teeth of cogwheels is carried out. Settlement estimates of necessary depth of laser treatment proceeding from the hardness of the tempered layer reached at such processing are executed. It is shown that laser treatment can be effectively used for hardening of cogwheels as from the point of view of the reached level of properties, and technical and economic indicators of process.*

Key-words: *laser treatment, teeth of cogwheels, hardness of the tempered layer, contact endurance, cogwheels of various modules, the increased resilience to contact loadings.*

Среди методов поверхностного упрочнения рабочих поверхностей деталей машин находит лазерная поверхностная термообработка. Это связано, во-первых, с возможностью локального воздействия на рабочую зону без объемного разогрева деталей и, во-вторых, с возможностью получения повышенного по сравнению с объемной закалкой уровня свойств за счет сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения зоны воздействия лазерного луча. Возможность точно дозированного энергозаклада дает возможность реализовывать процесс лазерной закалки без нарушения микрогеометрии поверхности, что в свою очередь, позволяет использовать лазерную закалку как финишную операцию. Указанное обстоятельство делает привлекательным использование указанной технологии для упрочнения сложно профильных поверхностей. В этом случае возможно получать сложный профиль более дешевыми лезвийными методами и минимизировать дорогие процессы финишной абразивной обработки. Сказанное показывает перспективность использования для упрочнения зубьев зубчатых колес.

Традиционно, для обеспечения высокого уровня механических свойств и долговечности зубчатых передач зубчатые колеса изготавливают из низкоуглеродистых легированных сталей, которые обеспечивают объемную прочность. Для получения высокопрочного поверхностного слоя для них необходима нитроцементация или азотирование с последующей закалкой в печи, чтобы повысить твердость поверхности до 60...65 HRC. Лазерная обработка позволяет заменить дорогие низкоуглеродистые легированные стали на более дешевые среднеуглеродистые низколегированные и при этом получить твердость поверхности зубьев до 63...65 HRC при максимальной стойкости к скалыванию, что невозможно при использовании термической обработки [1]. Толщина упрочненного слоя зависит от мощности лазерного излучения и скорости перемещения луча и достигает 1 мм. Лазерная обработка позволяет избежать дефектов структуры, характерных для химико-термической обработки. После нее наблюдается слоистость структуры, что препятствует возникновению и развитию трещин [1]. Недостатком среднеуглеродистой низколегированной стали по сравнению с легированной низкоуглеродистой может быть недостаточная твердость и прочность сердцевины зуба.

Существует прямо пропорциональная зависимость контактной выносливости от твердости поверхности [2]. Поэтому можно провести анализ уже используемых деталей, изготовленных с использованием традиционных методов термической обработки и лазерной обработки поверхности. Как уже отмечалось выше, материал заготовок можно заменить на более дешёвый низколегированный.

Для сравнения прочности зубчатых колес из низкоуглеродистой легированной и среднеуглеродистой стали выполнен расчет зубчатых колес из подвергнутой цемента-

ции и закалке стали 15ХГН2ГА, а также из закаленной лазером стали 40Х. Для стали 15ХГН2ГА глубина цементации составляет 1,0...1,4 мм при твёрдости поверхности зубьев 59...65 HRC, сердцевины 29...45 HRC. Поверхность зубьев подвергается шлифованию, что приведёт к возможному уменьшению упрочнённого слоя до 0,7 мм. Для стали 40Х твёрдость поверхности после лазерной закалки может достигать 62 HRC, твёрдость сердцевины в состоянии поставки – 220 НВ. При лазерной закалке отсутствует переplав, последующая механическая обработка, уменьшающая толщину закаленного слоя, не производится. Эта операция может являться финишной.

Расчет передачи осуществлялся согласно ГОСТ 21354-87 "Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность". Расчетный передаваемый крутящий момент 500 Нм, модуль зацепления 5 мм.

Контактная выносливость поверхностного слоя определяется его твердостью. Так как твердость боковых поверхностей зубьев в обоих случаях достигает 62 HRC, условие контактной прочности выполняется для обоих вариантов. Также с большим запасом для сталей 15ХГН2ГА и 40Х выполняется условие прочности зубьев на изгиб.

Наибольший интерес представляет расчёт на предотвращение глубинного контактного разрушения.

Эффективная твёрдость упрочнённого слоя

$$H_{eff} = \frac{H_o}{\left(\frac{H_o}{H_K} - 1\right) \left(\frac{h_{teff}}{h_t}\right)^2 + 1}, \quad (1)$$

h_{teff} - эффективная толщина упрочнённого слоя

$$h_{teff} = h_H + 0.2,$$

h_H - глубина расположения зоны наибольших глубинных касательных напряжений

$$h_H = 1.52 \sqrt{\frac{\omega_{Ht}}{E}} \rho_V,$$

ρ_V - приведённый радиус кривизны профиля

$$\rho_V = \frac{0.17d_1u}{(u+1)\cos^2 \beta},$$

d_1 - делительный диаметр шестерни;

u – передаточное число передачи;

β - угол наклона линии зуба;

ω_{Ht} - удельная окружная сила при расчёте на контактную выносливость:

$$\omega_{Ht} = \frac{F_{tH}}{b_w} K_H,$$

E – модуль упругости материала.

Анализируя параметры, используемые для определения глубины наибольших глубинных касательных напряжений, можно заметить, что глубина h_H увеличивается с ростом габаритов передачи и модуля зацепления.

K_H – коэффициент нагрузки в зоне контакта,

$$K_H = K_A \cdot K_{Hv} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}. \quad (2)$$

Коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку в зацеплении до зоны резонанса:

$$K_{Hv} = 1 + \frac{\omega_{Hv} \cdot b_2}{F_t \cdot K_A}, \quad (3)$$

где K_A – коэффициент, учитывающий внешнюю динамическую нагрузку;

$$\omega_{Hv} = \delta_H \cdot g_0 \cdot v \cdot \sqrt{\frac{a_w}{u}} \text{ – удельная окружная динамическая сила;}$$

δ_H – коэффициент, учитывающий влияние вида зубчатой передачи и модификации профиля головок зубьев;

g_0 – коэффициент, учитывающий влияние разности шагов зацепления зубьев шестерни и колеса, зависящий от модуля и степени точности;

V – окружная скорость:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60 \cdot 1000}. \quad (4)$$

В зависимости от скорости и типа зубчатых колес определяется степень точности передачи.

$K_{H\alpha}$ – коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями, зависящий от окружной скорости и степени точности;

ε_β – осевой коэффициент перекрытия;

$K_{H\beta} = f(\psi_{bd})$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по длине контактных линий, принимают в зависимости от твердости колёс и коэффициента ширины колеса относительно делительного диаметра ψ_{bd}

$$\psi_{bd} = \frac{b_2}{d_2};$$

F_{tH} – окружная сила:

$$F_{tH} = \frac{2 \cdot T_1}{d_1},$$

T_1 – крутящий момент на шестерне;

h_t – толщина упрочненного слоя до исходной структуры (сердцевины);

H_o – твердость поверхностей зубчатых колёс (средняя);

H_k – твердость сердцевины зубчатых колёс (средняя).

$$\sigma_H \leq \frac{\sigma_{HKP}}{S_{HK}}$$

Условие глубинной контактной прочности выполняется, если расчетные максимальные контактные напряжения σ_H будут меньше, чем предел глубинной контактной выносливости σ_{HKP} с учетом коэффициента запаса прочности.

Выполняя расчеты на прочность зубчатых колес различных модулей 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 составляет до 1 мм и не превышает толщины упрочненного слоя, достигаемой современными методами упрочнения.

Для стали 15XГН2ГА, подвергнутой цементации, закалке и последующему шлифованию, зона максимальных напряжений находится при данных условиях нагружения на глубине 0,5...0,6 мм, т.е. в пределах упрочненного слоя, условие глубинной контактной прочности выполняется.

При рассмотрении в качестве альтернативного материала для изготовления зубчатых колес стали 40X 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 и найти оптимальную толщину закаленного слоя, удовлетворяющую условию работоспособности передачи. Расчет колес на глубинную контактную прочность при залегании опасной зоны на границе слоя позволяет определить вариант упрочнения, когда глубину закалки можно минимизировать и обеспечить при этом эффективную и долговечную работу зацепления.

Расчет производился для модулей колес от 1,5 до 4,5 мм. Результаты представлены на рис. 1.

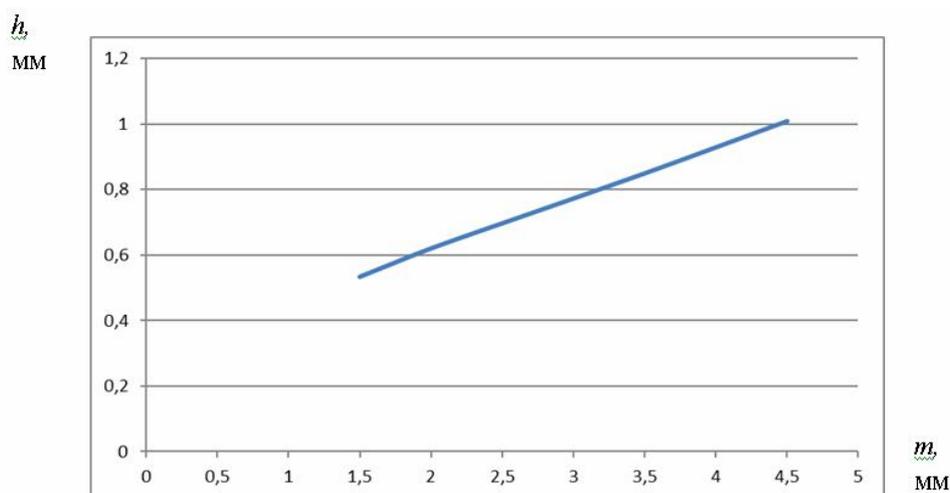


Рис. 1. Зависимость необходимой толщины упрочненного слоя от модуля зубчатого колеса при упрочнении лазерной закалкой

Полученная зависимость близка к линейной. Требуемая глубина упрочнения возрастает с увеличением модуля колес.

Лазерная закалка позволяет производить упрочнение боковых поверхностей зубьев в соответствии с эпюрой факторов нагруженности эвольвентного участка боковой поверхности колеса. Следует обратить внимание на наиболее нагруженные локальные зоны [3], подвергающиеся наибольшему износу, провоцирующему образование трещин. Возможности лазера позволяют дополнительно обработать данные зоны. Также может быть сформировано управляемое распределение твердости за счет варьирования режимами обработки для конкретных передач с определенной геометрией и условиями работы. Для неревверсивных передач может быть выполнена закалка только одной рабочей боковой поверхности.

Хорошие качественные показатели обработанной лазером поверхности, такие как мелкозернистая структура, отсутствие трещин на поверхности, повышенная сопротивляемость контактным нагрузкам, уменьшение коэффициента трения, а также управление распределением твердости 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. Поэтому исследование лазерной закалки зубчатых колес является перспективным направлением, позволяющим удешевить как стоимость материала зубчатых передач, так и технологию их изготовления.

Список литературы: 1. Тескер Е.И., Тескер С.Е. Современные методы повышения несущей способности высоконагруженных зубчатых передач трансмиссий и приводов. Международный симпозиум «Теория и практика зубчатых передач - 2014», Ижевск, Россия. – с. 316-323. 2. Петрусевич А.И. Контактная прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1970 - 64 с. 3. Ермичев В.А., Тихомиров П.В. Износ и трибоусталость зубчатых колес. / Состояние и перспективы развития дорожного комплекса. Сб. науч. трудов. Вып. 3.- Брянск: БГТА, 2001 - с. 16-18.