

УДК 621.793
UDC 621.793

АНАЛИЗ ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ ФАЗОВЫХ
ПРЕВРАЩЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ
ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

ANALYSIS OF THE PHASE TRANSFORMATIONS DURING LASER
HARDENING AND THEIR INFLUENCE ON THE CHANGE IN THE
GEOMETRY OF THE GEAR PROFILES

Швец И.В.
Shvets I.V.

Белорусский Национальный Технический Университет, Минск, Беларусь
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Изменение толщины зубьев после лазерной закалки зависит от остаточных напряжений, формируемых при первичной термической обработке. Оптимизировать процесс упрочнения позволит исследуемая взаимосвязь зависимостей влияния технологических характеристик лазерной обработки на геометрические и точностные параметры зубчатых колес различных размеров с учетом режимов нагружения.

Summary. The change in the thickness of the teeth after laser hardening depends on the residual stresses formed during the primary heat treatment. Optimizing the hardening process will allow the studied relationship of the influence of the technological characteristics of laser processing on the geometric and precision parameters of gears of different sizes, taking into account the loading conditions.

Эвольвентное зубчатое зацепление получило наиболее широкое применение, как позволяющее значительно увеличивать несущую способность передач и повышать их качественные показатели за счет применения смещения и модификации профиля зубьев, допускающее изменение межосевого расстояния без нарушения передаточного числа и полную взаимозаменяемость независимо от числа зубьев колес.

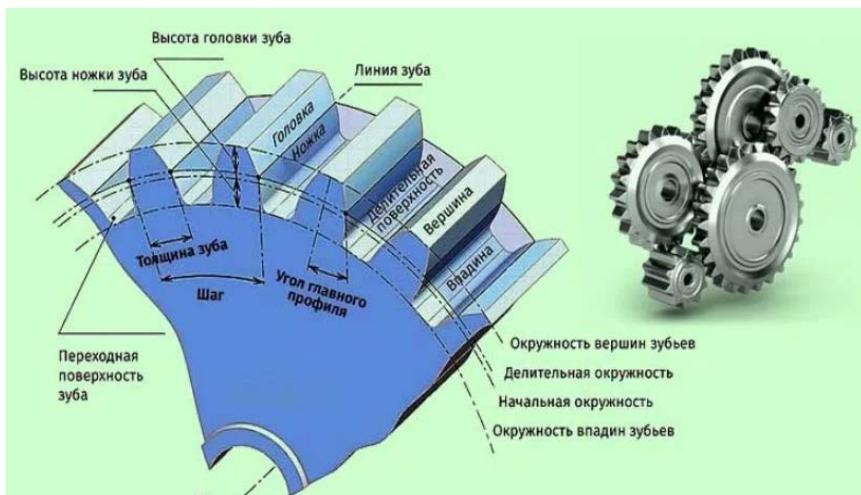


Рис. 1. Части зубьев и геометрические параметры зубчатого колеса

Исследование геометрии эвольвентных профилей колес из стали 40Х проводилось с помощью координатно-измерительной 3D сканирующей системы ATOSCore. Работа сканирующей системы заключается в оценке множества (порядка $10^4 - 10^5$) изображений. Принцип измерения основан на проецировании интерференционных полос, гарантирующем получение точных и прослеживаемых трехмерных координат. Анализировалось изменение толщины зубьев ΔS . В качестве эталонного образца принимали зубья неупрочненного колеса. Изменение вычислялось как среднее значение отклонений в указанных точках с двух сторон зубьев (расстояние между точками на полученных профилях, представленных на рисунках 2, 4, 5). Наблюдаемая погрешность углового шага наиболее вероятно связана с процессом формообразования зубьев, и при расчете изменения толщины она не учитывалась.

При анализе изменения толщины зубьев колеса, прошедших лазерную закалку после формообразования, следует отметить, что в исследованном диапазоне скоростей перемещения луча от 500 до 1000 мм/мин наблюдается уменьшение толщины зуба. Наиболее существенное уменьшение имеет место при скоростях, соответствующих середине интервала – 750 мм/мин, и оно достигает 0,53 мм. При закалке со скоростью 500 мм/мин максимальное утоньшение зуба составляет 0,43 мм, а при 1000 мм/мин – 0,2...0,3 мм. На рисунке 2 можно проследить существенное уменьшение диаметра впадин колеса после лазерной обработки.

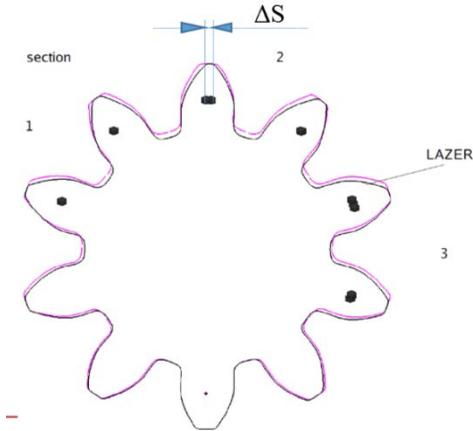


Рис. 2. Профиль сечения колеса до и после лазерной обработки

Пары зубьев, закаленных при перемещении луча лазера со скоростью: 1 – 500 мм/мин, 2 – 750 мм/мин, 3 – 1000 мм/мин.

Полученные результаты свидетельствуют о формировании в упрочненных зубьях напряжений сжатия, что положительно скажется на их прочности. Степень утоньшения зубьев позволяет предположить значительную величину напряжений сжатия. Также на это указывает тот факт, что фазовые превращения в поверхностном слое с образованием пресыщенного раствора α -железа сопровождаются увеличением периода кристаллической решетки, что предполагает наоборот некоторое увеличение толщины зубьев.

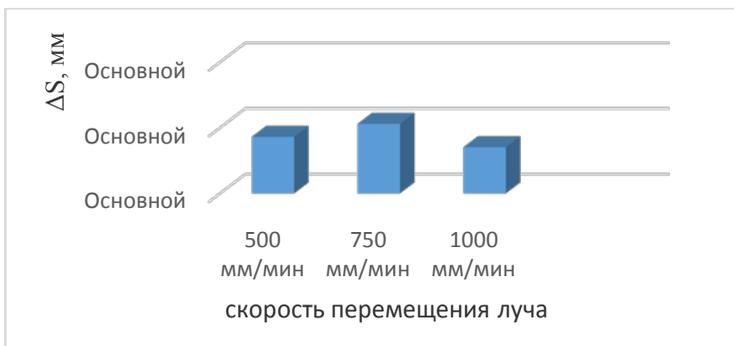


Рис. 3. Зависимость изменения толщины зубьев от скорости перемещения луча при лазерной закалке

По визуальной оценке приведенных результатов, величина утоньшения возрастает от радиуса впадин до радиуса вершин. При этом не происходит значительного отклонения формы профиля зуба от эвольвенты. Изгиб и иные виды деформаций зубьев не отмечаются.

Существенное утоньшение зуба при сохранении эвольвентной формы профиля после лазерной закалки свидетельствует о необходимости коррекции геометрии зубьев при их формообразовании и необходимости продолжения исследований в данном направлении для определения количественных показателей такой коррекции для различных материалов, диапазонов плотности мощности лазерного излучения и режимов обработки.

На результат лазерной обработки оказывает существенное влияние состояние исходного материала [2]. Поэтому было проведено исследование по изменению геометрии зубьев колес, предварительно прошедших объемную закалку (рисунок 4) и объемную закалку с последующим отпуском (рис. 5).

На рисунке 4 заметно, что при лазерном упрочнении предварительно закаленного колеса со скоростью 500 мм/мин имеет место существенное искажение эвольвентного профиля в верхней части зуба, что связано с плавлением поверхностного слоя. Результаты измерений показывают, что изменение толщин зубьев по сравнению с состоянием до лазерной закалки, в отличие от колеса не прошедшего предварительную термообработку, практически не наблюдается.

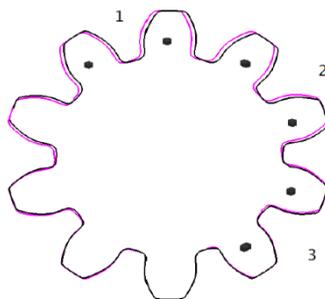


Рис. 4. Профиль сечения колеса, подверженного объемной закалке перед лазерной обработкой. Пары зубьев, закаленные при перемещении луча лазера со скоростью: 1 – 500 мм/мин, 2 – 750 мм/мин, 3 – 1000 мм/мин

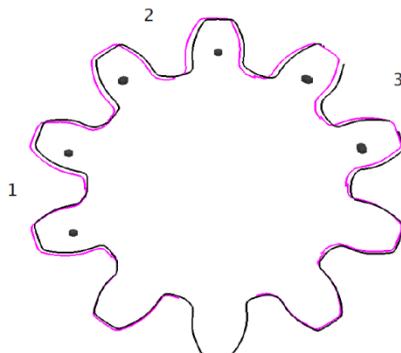


Рис. 5. Профиль сечения колеса, подверженного перед лазерной обработкой объемной закалке и отпуску. Пары зубьев, закаленные при перемещении луча лазера со скоростью: 1 – 500 мм/мин, 2 – 750 мм/мин, 3 – 1000 мм/мин

Для зубьев колеса, предварительно подвергнутого объемной закалке и отпуску (рис. 5), также характерно искажение эвольвенты в результате плавления поверхностного слоя при скорости перемещения лазерного луча 500 мм/мин. Это не позволяет достоверно оценить изменение толщин зуба в результате фазовых превращений и появления остаточных напряжений. При скорости перемещения луча 750 мм/мин изменение толщины зубьев практически равно нулю. Для зубьев, подвергнутых лазерной обработке со скоростью 1000 мм/мин, наблюдается увеличение толщины на 0,3 мм.

Изменения величины радиусов вершин и впадин у колес, прошедших предварительную термообработку, не наблюдается.

Полученные результаты указывают на то, изменение толщин зубьев обусловлено в первую очередь формированием остаточных напряжений. Уровень остаточных напряжений формируется при первой термической обработке. Если зубья подвергались только лазерной закалке, то в них формируются значительные напряжения сжатия. Если предварительно проводилась объемная закалка, то толщина зубьев и остаточные напряжения в них после лазерной обработки практически не меняются. При предварительной объемной закалке с отпуском и последующей лазерной закалке с высокими скоростями перемещения луча происходит увеличение толщины зубьев и формирование относительно невысоких напряжения растяжения. В целом предварительная объемная термообработка приводит к формированию остаточных напряжений, которые незначительно меняются после лазерной обработки.

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. Скойбеды. – 2-е изд., перераб. – Мн. 6 Выш. Шк., 2006. – 560 с.

2. Заракет, А. Технология формирования износостойких поверхностей комбинированным лазерным легированием: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08, 05.03.07 – Мн., 1999. – 144 с.

3. 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.

УДК 621.923.6

UDC 621.923.6

МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ

MODEL OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE HARDENED LAYER

Колесников Л.А.

Kalesnikau L.A.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Исследовались остаточные напряжения после лазерной закалки венца зубчатого колеса. Посредством МКЭ определены сжимающие напряжения для различных конфигураций упрочненного слоя.

Summary. The residual stresses after laser hardening of the gear rim were investigated. Compressive stresses are determined by means of FEM for various configurations of the hardened layer.

Для повышения долговечности зубчатые колеса подвергают поверхностному упрочнению. Обычно это цементация, закалка ТВЧ и т.д. В результате на поверхности зуба формируются тонкий слой с физико-механическими свойствами, отличающимися от основного металла. Контакт, фактически, двух различных материалов приводит к возникновению остаточных сжимающих напряжений на поверхности зуба.