

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ
ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКОЙ**

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Проведен анализ факторов, определяющих долговечность цилиндрических зубчатых передач. Показано, что лазерная закалка обеспечивает комплекс физико-механических свойств зубчатых колес не ниже, чем при объемных видах термической обработки. Выявлена взаимосвязь физико-механических свойств материалов, конструктивных и геометрических характеристик зубьев колес, технологических параметров процесса лазерной закалки. Определено их влияние на долговечность зубчатой передачи.

Для изготовления колес зубчатых передач используется широкая номенклатура сталей. Для обеспечения необходимых физико-механических свойств колес применяют различные виды термической обработки: нормализацию, улучшение, закалку с предварительным азотированием или цементацией. Выбор материала зубчатых колес и способа термообработки зависит от условий эксплуатации и требований к габаритам передачи [1,2]. После закалки колеса, как правило, подвергают отпуску [3,4]. Традиционные виды термической обработки проводятся в несколько этапов (операций), например, цементация – закалка – отпуск. Они являются весьма энергоемкими и длительными (несколько часов) процессами, требующими наличия дорогостоящего оборудования. Им сопутствует существенное коробление упрочняемых деталей. При этом не всегда может быть обеспечен требуемый комплекс физико-механических свойств, что связано с ограниченными возможностями управления структурой материалов и с тем, что увеличение твердости после закалки приводит одновременно к уменьшению вязкости материала и пониженной сопротивляемости ударным нагрузкам. Решение комплекса указанных проблем является актуальной задачей и может быть достигнуто с использованием современных высокоскоростных методов обработки концентрированными потоками энергии, наиболее перспективным из которых является лазерная обработка. В частности лазерная закалка (ЛЗ) рассматривается в качестве альтернативы цементации и последующей объемной закалке для снижения коробления зубьев [5].

Термическое упрочнение металлов лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и последующем охлаждении этого поверхностного участка со сверхвысокими скоростями в результате теплоотвода теплоты во внутренние слои металла. При этом время нагрева и время охлаждения незначительны, практически отсутствует выдержка при температуре нагрева. Эти условия обеспечивают высокие скорости нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностных участков.

Варьируемыми технологическими параметрами процесса лазерной закалки являются [6]: мощность излучения; диаметр пятна фокусирования; скорость перемещения пятна излучения; распределение мощности по облучаемой поверхности. По сравнению с термообработкой в печи себестоимость упрочнения при ЛЗ уменьшается в 2-5 раз. Нагрев при лазерной закалке является не объемным, а поверхностным процессом, что исключает изменение макро- и микрогеометрии обрабатываемых деталей. 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. Условия протекания процесса лазерной закалки обеспечивают высокие скорости нагрева и охлаждения обрабатываемых поверхностных участков. Вследствие указанных особенностей формирование структуры, при лазерной термообработке имеет свои специфические особенности.

Согласно результатам многочисленных исследований, физико-механические свойства различных сталей после лазерной закалки (ЛЗ), как минимум, не уступают свойствам, достигаемым после традиционной объемной термообработки.

Так согласно исследованиям [7], твердость стали 65Г после ЛЗ достигает 50...70 HRC при глубине прокаливаемой зоны до 1,4 мм. Максимальные значения твердости достигаются при глубине закалки 1,2 мм. У стали пониженной прокаливаемости 60ПП эти показатели заметно ниже – 50...55 HRC при глубине упрочнения до 0,8 мм. При этом микроструктура закаленного слоя получается значительно более измельченной по сравнению объемным упрочнением.

Для стали 30ХГСА [8] достигаемая максимальная твердость после ЛЗ составляет 59 HRC при глубине закаленного слоя 0,65 мм. Максимальная глубина упрочнения составляет 1,05 мм при достигаемой твердости 52 HRC. Структура упрочненного слоя представляет собой мелкоигольчатый мартенсит.

В работе [9] приводятся данные о том, что для сталей 45 твердость упрочненного слоя достигает 61 HRC при глубине упрочнения до 0,8 мм. Глубина упрочнения и достигаемая твердость возрастают с увеличением содержания углерода в сталях. Увеличение зоны упрочнения при лазерной закалке достигает 25-30 % с применением поглощающего покрытия. Эффективность процесса ЛЗ растет с применением сканирующего лазерного излучения. При данной технологии проявляются более существенные структурные изменения, в образцах появляются фрагменты с более значительным измельчением элементов структуры и деформации кристаллической решетки.

Таким образом, максимальная глубина упрочнения и максимальные значения твердости упрочненного слоя варьируются для разных сталей и получаются при различных режимах обработки (в большинстве исследований варьируемым параметром являлась скорость перемещения лазерного луча). Это свидетельствует о необходимости оптимизации режимов упрочнения при разработке технологии для конкретных условий нагружения упрочняемой пары зубчатых колес. Толщина закаленного слоя после ЛЗ по различным источникам на различных сталях составляет 0,8...1,5 мм. При этом толщина упрочненного слоя при цементации зависит от ее продолжительности и редко превышает 2 мм [10], а при азотировании, например, стали **38ХМЮА** - не превышает 1 мм [11]. Таким образом, по максимальной твердости упрочненного слоя лазерная закалка превосходит традиционные способы упрочняющей термообработки, а по глубине упрочненного слоя – практически не уступает им.

Известна возможность проведения повторной лазерной обработки, когда лазерный луч неоднократно проходит по обрабатываемой поверхности с разными скоростями и при различных плотностях мощности излучения. [12]. При этом могут формироваться зоны с различными степенями упрочнения. Предположительно эффективной может быть двукратная лазерная обработка сначала с целью достижения максимально возможной глубины закаленного слоя, а затем – максимальной твердости поверхности.

Для высокой долговечности по контактным напряжениям необходимо максимально увеличивать твердость рабочей поверхности зубьев. для повышения прочности на изгиб важно также иметь вязкую сердцевину зуба. разделяют долговечность по изгибным и по контактным напряжениям. расчет зубчатых передач на прочность и выносливость производится согласно гост 21354-87 и может выполняться с помощью соответствующего программного обеспечения. в качестве исходных данных для определения долговечности зубчатых передач выступают: марка стали; режим нагружения; расчетный момент; частота вращения; твердость активной поверхности зуба hrc; способ термообработки; способ получения заготовки; тип переходной поверхности зуба; упрочнение переходной поверхности зуба.

Из данного перечня к варьируемым за счет технологических параметров физико-механическим свойствам относится только твердость активной поверхности зуба. из анализа методики расчета можно заключить, что объемные прочностные свойства зубьев зубчатых колес (прочность на изгиб) для данных условий работы определяется выбором марки стали, а также технологии получения заготовки. прочность зуба по контактным напряжениям определяется твердостью и микроструктурой поверхностного слоя. наиболее высокие свойства поверхностного слоя могут быть получены лазерной закалкой. в работе [13] показано, что при лазерной закалке происходит повышение сопротивления усталости и усталостной долговечности цилиндрических образцов от 10 до 40%. это позволяет заключить, что поверхностная лазерная закалка положительно повлияет на объемные прочностные свойства зубчатых колес, в частности, на долговечность по изгибным напряжениям. в работе [14] отмечается, что усталостная прочность зубьев после лазерной закалки может быть ниже, чем после цементации и последующей объемной закалки ввиду более высокого содержания остаточного аустенита. однако данный показатель в высокой степени зависит от химического состава конкретных марок стали и режимов лазерной закалки.

В целом комплекс физико-механических свойств зубьев зубчатых колес после лазерной закалки окажется выше, чем при традиционных видах термической обработки. Наиболее существенным отличием в свойствах материалов зубьев после поверхностной лазерной закалки и объемной закалки в печи (или закалки после цементации) является глубина закаленного слоя и влияние данного параметра на прочность зубьев на изгиб. При объемной закалке зуб может быть прокален на всю глубину, а при лазерной закалке толщина упрочненного слоя будет составлять не более 1,5 мм. Это может быть как положительным фактором ввиду формирования вязкой сердцевины зуба и недопущения его хрупкого разрушения, так и отрицательным ввиду, возможно, недостаточной прочности и жесткости зубьев на изгиб при чрезмерно мягкой сердцевине. Данный вопрос требует дополнительного изучения.

Известно, что интенсивность изнашивания в парах трения зависит от величины контактного давления и относительной скорости скольжения сопряженных поверхностей. При этом наиболее существенное влияние на нее оказывает изменение давления, тогда как с изменением относительной скорости скольжения интенсивность изнашивания изменяется в меньшей степени [15]. Контактное давление характеризует напряженное состояние локального участка поверхности трения. Относительная скорость определяет время существования единичной фрикционной связи между микровыступами сопряженных поверхностей. Оба этих параметра для каждой точки изнашиваемых поверхностей являются переменными величинами.

В зубчатом зацеплении различные участки поверхностей зубьев характеризуются разной длительностью нахождения под воздействием факторов износа. Показателем, определяющим длительность воздействия факторов износа на данном элементе поверхности трения, является коэффициент удельного скольжения λ .

В литературе [16] λ рассматривается как геометрический аналог диссипации энергии, учитывающий путь скольжения сопряженных профилей. Известно также, что контактное напряжение в разных точках профилей обратно пропорционально приведенному радиусу кривизны профилей в точке контакта ρ_{Π} . Показателем, определяющим контактную нагруженность участка поверхности определяется коэффициентом удельного давления – отношением модуля зацепления к приведенному радиусу кривизны

$$q = \frac{m}{\rho_{\Pi}} \quad (1)$$

Данный показатель можно рассматривать как геометрический аналог контактного давления [17]. Исходя из этого, известную формулу для расчета интенсивности изнашивания [15]

$$I = k \cdot p^m \cdot V^n \quad (2)$$

можно записать в виде

$$I = k \cdot \lambda \cdot q^m \cdot V^n, \quad (3)$$

где k , m , и n – определяемые эмпирическим путем коэффициенты, зависящие от материалов поверхностей трения и условий смазки;

p – контактное давление;

V – относительная скорость скольжения в точке контакта взаимодействующих профилей.

Здесь коэффициент удельного скольжения λ характеризует удельный путь трения для некоторого элементарного участка поверхности элемента высшей пары. В соответствии с основной теоремой зубчатого зацепления, получены выражения для определения λ_1 и λ_2 в контактной точке профиля зубьев

$$\lambda_1 = 1 - \frac{\rho_2 \cdot \omega_2}{\rho_1 \cdot \omega_1} = 1 - \frac{\rho_2 \cdot Z_1}{\rho_1 \cdot Z_2} \dots \lambda_2 = 1 - \frac{\rho_1 \cdot \omega_1}{\rho_2 \cdot \omega_2} = 1 - \frac{\rho_1 \cdot Z_2}{\rho_2 \cdot Z_1}, \quad (4)$$

где ρ_1, ρ_2 – радиусы кривизны поверхностей в точке контакта;

ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения зубчатых колес;

Z_1, Z_2 – числа зубьев зубчатых колес.

Всякая высшая пара, образованная криволинейными поверхностями, подчиняется условию основной теоремы зубчатого зацепления, но передаточное отношение и радиусы начальных окружностей r_w в такой паре являются переменными. Поэтому в общем случае для некоторого i -го элементарного участка поверхности элемента высшей пары можно записать

$$\lambda_{1i} = 1 - \frac{\rho_{2i} \cdot r_{w1i}}{\rho_{1i} \cdot r_{w2i}}, \dots \lambda_{2i} = 1 - \frac{\rho_{1i} \cdot r_{w2i}}{\rho_{2i} \cdot r_{w1i}}. \quad (5)$$

Быстроходность пары трения при одинаковой геометрии контактирующих профилей может оказывать существенное влияние на интенсивность изнашивания. Для i -го участка поверхности элемента высшей пары скорость относительного скольжения зависит от скорости вращения начального звена ω_1 и непосредственно определяется как разность тангенциальных составляющих скоростей в точке контакта [18]. Для элементов поверхностей каждого из звеньев высшей пары

$$V_{S1} = V_{T1} - V_{T2}, \quad V_{S2} = V_{T2} - V_{T1}. \quad (6)$$

Выражая скорости скольжения через ω_1 , получим

$$V_{S1} = V_{T1} - V_{T2} = \omega_1 \rho_1 - \omega_2 \rho_2 = \omega_1 (\rho_1 - u_{21} \rho_2) \quad (7)$$

Тогда в конечном итоге формула (2) для расчета интенсивности изнашивания в i -й точке поверхности элемента ведущего звена высшей кинематической пары примет вид

$$I_{i1} = k \cdot \left(1 - \frac{r_{w1i} \rho_{2i}}{r_{w2i} \rho_{1i}} \right) \cdot q_i^m \cdot [\omega_{1i} (\rho_{1i} - u_{21i} \rho_{2i})]^n, \quad (8)$$

а для ведомого звена

$$I_{i2} = k \cdot \left(1 - \frac{r_{w2i} \rho_{1i}}{r_{w1i} \rho_{2i}} \right) \cdot q_i^m \cdot [\omega_{1i} (u_{21i} \rho_{2i} - \rho_{1i})]^n \quad (9)$$

Данные формулы справедливы не только для эвольвентного зацепления, но и для любых высших пар с криволинейными профилями контактирующих поверхностей, которые подчиняются условию основной теоремы зацепления, но отличаются тем, что начальные радиусы, передаточное отношение и, возможно, скорость вращения начального звена являются переменными.

Формулы (8) и (9) справедливы для однопарного зацепления, когда вращение все время передается через одну пару зубьев. На практике такое практически не встречается, поэтому в формулы необходимо вносить коэффициент многопарности зацепления. В те моменты, когда движение передается несколькими парами зубьев, интенсивность изнашивания нужно разделить на количество пар зубьев, находящихся в данный момент в зацеплении. С учетом данных поправок по формулам можно построить теоретическую эпюру интенсивности изнашивания.

Лазерная обработка характеризуется возможностью варьирования технологическими параметрами в широких пределах, в том числе геометрическими: диаметр луча, распределение плотности мощности излучения по упрочняемой поверхности, наложение лазерных дорожек. При любом сочетании режимов лазерной закалки может возникнуть в большей или меньшей степени неравномерность распределения свойств по упрочняемой поверхности. Чем меньше модуль, тем

более вероятно влияние данных параметров на неравномерное распределение свойств. При малых модулях также возможно изменение свойств, обусловленное краевыми эффектами при упрочнении материала у кромок зубьев. При невозможности обеспечения равномерного распределения свойств важно обеспечить максимальные свойства на наиболее нагруженных участках боковых поверхностях зубьев. Поэтому при выборе параметров технологии лазерной закалки необходимо учитывать теоретическую эпоху интенсивности изнашивания.

Современные устройства позволяют проводить лазерную обработку при сканирующем перемещении лазерного луча по пятну обработки, обеспечивать различную геометрическую форму пятна излучения и распределение энергии в нем. ЛЗ боковых поверхностей зубчатых колес с использованием сканирующего излучения позволяет обеспечить оптимальный энерговклад в каждый элемент поверхности и, соответственно, оптимальное распределение свойств согласно распределению факторов износа по рабочей поверхности зубьев.

Взаимовлияние параметров технологии лазерной закалки и показателей, определяющих долговечность зубчатых передач, представлена на рисунке 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин/ П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – М.: Высшая школа, 2001. – 416 с.
2. Фролов, М.И. Техническая механика. Детали машин/ М.И. Фролов. – М.: Высшая школа, 1990.– 352 с.
3. Гинзбург Е.Г. Производство зубчатых колес. Л: «Машиностроение», 1978. – 521с.
4. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.
5. Surface hardening of gears by laser beam processing. Zhang, H., Shi, Y., Xu, C.Y., Kutsuna, M. / Surface Engineering, Volume 19, Issue 2, April 2003, P. 134 – 136.
6. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2008. – 664 с.
7. Исследование влияния параметров лазерной обработки на поверхностный слой конструкционной стали / В.Ю.Наскевич, В.А. Струк, О.Г. Девойно, П.В. Веремей // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. Тэхніка. №4, 2013. – С. 59 – 65.

УДК 621. 9. 06

Каштальян И.А.

УПРАВЛЕНИЕ КИНЕМАТИКОЙ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ НА МНОГООПЕРАЦИОННЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Рассмотрена задача повышения эффективности использования многооперационных станков с ЧПУ путем введения в процесс резания кинематической неустойчивости. Представлены математические модели и алгоритмы управления подачей и скоростью резания в функции пути. Приведены примеры их использования при синтезе структуры циклов обработки отверстий.

Одной из приоритетных задач современного машиностроения является автоматизация мелкосерийного и серийного производства. В настоящее время она решается главным образом путем внедрения оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), в том числе многооперационных станков. Большинство станков этого типа используется для обработки сложных корпусных деталей, плит, кронштейнов и других деталей, имеющих большое число отверстий. Главным образом это крепежные отверстия небольшого диаметра и отверстия, предназначенные для базирования присоединяемых при сборке деталей (основные отверстия). Основные отверстия могут быть гладкими или ступенчатыми, односторонними и двусторонними, могут располагаться в одной плоскости или соосно в нескольких параллельных стенках.