

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОГО ЗУБОФОРМООБРАЗОВАНИЯ

М. В. Райник

Рассмотрены особенности метода лазерного зубоформообразования, показаны преимущества и недостатки данного метода, представлены рекомендации по применению зубчатых колес, изготовленных лазером. Предложен метод разработки автоматизированной системы конструкторско-технологической подготовки производства и приведены основные этапы её реализации на примере прямозубой цилиндрической зубчатой передачи

Ключевые слова: венец, зубчатое колесо, лазерная обработка, технологический процесс

Известно, что зубчатые передачи являются составной частью подавляющего большинства современных машин. Как правило, они выполняют функцию связующих звеньев между приводами (двигателями) и исполнительными механизмами, оказывая при этом решающее или, по крайней мере, значительное влияние на эксплуатационные, массогабаритные, стоимостные и эргономические характеристики машин. Тема совершенствования качества зубчатых передач, поиск новых технологических возможностей для их изготовления остается, и долго еще будет оставаться, в центре внимания многих ученых и инженеров передовых промышленно развитых стран, что в первую очередь продиктовано интересами тех отраслей промышленности, в которых зубчатые передачи находят широкое применение[1]. Технология обработки зубчатых колес занимает особое место в машиностроении, что связано с высокой сложностью и трудоемкостью производства. Традиционные технологии изготовления зубчатых колес из-за многоэтапности зубообработки не обеспечивают высокую эффективность.

Решение задачи по сокращению количества этапов технологического цикла направлено на создание высокоэффективных процессов зубообработки. К такому методу можно отнести лазерную обработку цилиндрических зубчатых колес.

В процессе резки металла лазерным лучом происходит упрочнение обработанной поверхности детали, основанное на локальном нагреве участка поверхности под воздействием лазера с последующим охлаждением этого участка со сверхкритической скоростью, в результате тепловода во внутренние слои формируемой детали. При этом обеспечивается высокая твердость (до 64 HRC), даже при обработке сталей не содержащих легирующих элементов, кроме

того не возникает коробления. Данное свойство лазерной резки и современное развитие станков для лазерного раскроя позволяют применять лазер для изготовления венца зубчатых колес, при этом комбинировать формообразование и поверхностное упрочнение рабочей поверхности зубьев, тем самым сократить производственный цикл и повысить нагрузочную способность зубчатой передачи.

Недостатком предлагаемого способа формообразования зубчатого венца является ухудшающееся качество обрабатываемой поверхности при увеличении ширины венца зубчатого колеса, но при этом увеличивается толщина поверхностной закалки, что дает возможность использовать чистовую обработку для получения необходимой шероховатости зуба. Например, зубошлифовальную операцию, которая позволяет получить шероховатость поверхности зуба Ra1,25... Ra2,5 при снятии припуска ориентировочного равного 20% от упрочненного слоя. После проведения чистовой обработки твердость и толщина поверхностного слоя соизмерима с параметрами поверхности после химико-технической обработки (ХТО).

Основываясь на проведенных исследованиях, разработан технологический маршрут изготовления зубчатого венца, основные операции которого представлены на рис. 1. Сравнивая с типовым технологическим маршрутом, приведенном на рис. 2, можно сделать вывод о значительном сокращении числа операций производственного цикла зубоформообразования лазером.



Рис. 1. Основные этапы разработанного технологического маршрута изготовления зубчатого венца лазером:

I – термическое упрочнение (улучшение), II – лазерная обработка зубьев, III – чистовая обработка зубьев

Важно, что помимо сокращения количества этапов производственного цикла формо-

образования зубчатого колеса, сокращается также расход материала. Для доказательства данного утверждения достаточно сравнить пять зубчатых колес с различными методами упрочнения, изготовленных из различных сталей (табл. 1). В связи с тем, что при лазерной обработке происходит поверхностное упрочнение, даже при применении стали не содержащей легирующих элементов, то рассмотрим зубчатое колесо, изготовленное разработанным методом из стали 40Х.

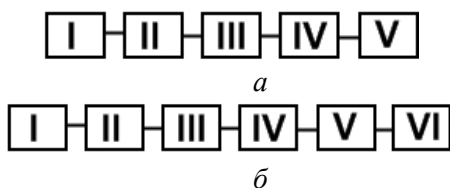


Рис.2. Основные этапы типового технологического маршрута изготовления зубчатого венца:

а) зубчатые колеса из улучшаемой стали:

I – черновая обработка заготовки, II – термическое упрочнение (улучшение), III – чистовая обработка заготовки, IV – обработка зубьев, V – чистовая обработка зубьев

б) зубчатые колеса из цементируемой или закаливаемой стали:

I – черновая обработка заготовки, II – чистовая обработка заготовки, III – обработка зубьев, IV – химико-термическая обработка, V – отделка посадочных поверхностей колеса (баз), VI – чистовая обработка зубьев

Таблица 1

Механические характеристики сталей примененных для изготовления зубчатых колес

№ п/п образца	Марка стали	Вид упрочняющей обработки	Твердость, HRC
1	40Х	Улучшение	27...32
2	40Х	Улучшение + закалка ТВЧ	42...50
3	40ХН2МА	Улучшение + азотирование	50...56
4	20ХН2М	Улучшение + цементация + закалка	56...63
5	40Х	Улучшение + лазерная закалка (при формообразовании)	58...64

Для упрощения анализа сделано допущение, что зубчатые колеса имеют дисковую форму и выполнены без посадочных отверстий и ступиц, при этом передаваемый вращающий момент  $T$  равен 23Н·м, передаточное число  $u$  равно 4. Кроме того, для удобства проведения расчетов принято, что модуль  $m$  и число зубьев

$z$  постоянны во всех рассматриваемых вариантах, а ширина зубчатого венца - варьируемая. Аналитически определены необходимые параметры, обеспечивающие работоспособность зубчатой передачи. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Расчет стоимости материала производим на основании данных на сегодняшний день (стоимость стали 40Х составляет 29850 руб/т, 40ХН2МА – 45400 руб/т, 20ХН2М – 45500руб/т), результаты расчетов представлены также в табл.2.

Таблица 2

Результаты расчета зубчатых передач

№ п/п образца	Допускаемое контактное напряжение, МПа	Нормальный модуль, мм	Число зубьев шестерни	Ширина зубчатого колеса, мм	Масса зубчатого колеса, г	Стоимость материала, руб.
1	610	1,5	21	32	194,4	5,8
2	818	1,5	21	16	97,2	2,9
3	875	1,5	21	14,4	87,5	4,0
4	1140	1,5	21	8,8	53,5	2,5
5	1169	1,5	21	8	48,6	1,5

Таким образом, масса зубчатого колеса при обработке разработанным методом снижается на 75% относительно зубчатого колеса упрочненного улучшением, на 50% – улучшение + закалка ТВЧ, 45% – улучшение + азотирование, 9% – улучшение + цементация + закалка, а затраты на материал уменьшаются на 75%, 50%, 62%, 40% соответственно.

Просуммировав затраты на электроэнергию и инструмент при зубообработке, а также, затраты на материал, были получены данные, представленные на рисунке 3. Затраты представлены в условных единицах.

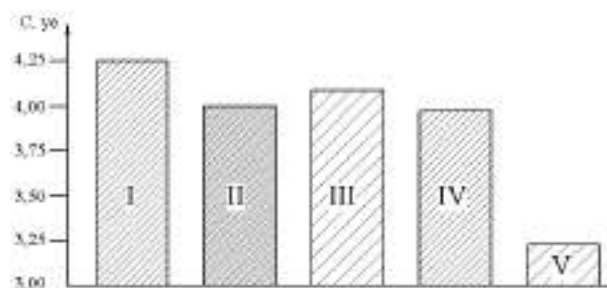


Рис. 3. Гистограмма условных затрат на материал, инструмент и энергоресурсы при зубоформовании зубчатых колес:

I – сталь 40X улучшение, II – сталь 40X улучшение + закалка ТВЧ, III – сталь 40XH2MA улучшение + азотирование, IV – сталь 20XH2M улучшение + цементация + закалка, V – сталь 40X улучшение + закалка лазером (при зубоформовании)

Следовательно, применение метода лазерного формования венца зубчатого колеса позволяет не только сократить количество этапов производственного цикла, но снизить массогабаритные показатели, уменьшить материальные затраты и затраты на изготовление зубчатого колеса.

Учитывая преимущества и недостатки лазерного зубоформования, сформулированы рекомендации по применению зубчатых колес, изготовленных разработанным способом.

1. Основываясь на условии размещения опор, в связи с высокой твердостью контактной поверхности зубьев, рекомендуется применять лазерную обработку для изготовления узких зубчатых колес,  $\psi_{ba}$  которых ориентировочно равно 0,1.

2. В связи с ухудшающимся качеством обработанной поверхности, при увеличении толщины обрабатываемого материала, необходимо вводить ограничения ширины зубчатого венца по рекомендациям производителя лазерного оборудования.

3. При необходимости изготовления зубчатых колес, с шириной венца, превышающей максимальную толщину обрабатываемого металла, на конкретном лазерном оборудовании, рекомендуется изготавливать сборные зубчатые колеса, состоящие из пакета зубчатых дисков стянутых между собой.

4. Учитывая, что способ является универсальным, то его рекомендуется применять для изготовления элементов различных видов передач зацеплением с параллельными осями, в том числе и для зубчатых колес.

Кроме того, немаловажной задачей в современном машиностроении, также является совершенствование подготовки производства, в том числе и его ускорение. Созданный метод разработки автоматизированной системы конструкторско-технологической подготовки производства позволяет сократить временные и трудовые затраты на подготовку производства. Разработанный метод является универсальным, его структура представлена на рис. 4.

Входными данными для автоматизированной системы конструкторско-технологической подготовки производства являются условия эксплуатации передачи, на основе которых производится расчет основных параметров

элементов передаточного механизма, с учетом формования венца на существующих станках для лазерного раскроя. Затем рассчитанные данные передаются для создания пояснительной записки и в графический модуль, где происходит построение 3D-модели, на основе которой автоматически создается конструкторская документация (КД). Данные, полученные при построении геометрической модели, передаются в модуль управляющей программы в виде траектории перемещения лазерного луча.

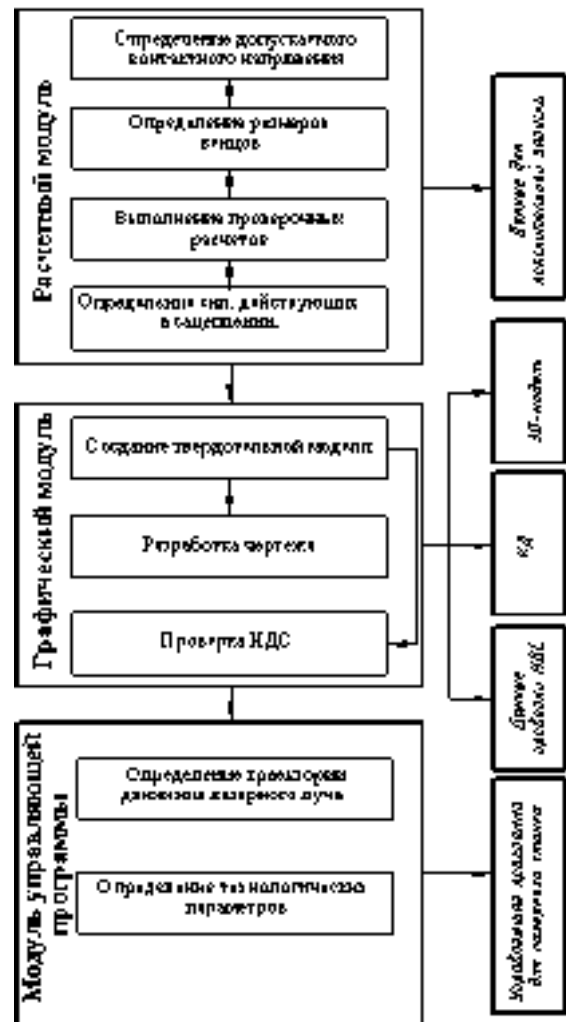


Рис. 4. Структура автоматизированной системы конструкторско-технологической подготовки производства

По разработанному методу создана автоматизированная система конструкторско-технологической подготовки производства изготовления венца прямозубых цилиндрических колес, расчетный модуль которой создан в программной среде Delphi. Расчет производится по известным формулам, согласно специально разработанному алгоритму. Данные расчета передаются в таблицу параметров программы MicrosoftExcel, по адресу указанному пользова-

телем, на основе, которой происходит построение 3D-модели зубчатого колеса в графическом модуле.

Графический модуль создан на базе CAD системы SolidWorks. Построение твердотельной модели зубчатого колеса производится методом перестроения ранее созданной параметрической 3D-модели, по данным полученным в расчетном модуле, переданным через таблицу Microsoft Excel. На основании построенной модели в автоматическом режиме происходит перестроение ранее созданной конструкторской документации зубчатого колеса. Разработанная твердотельная модель может быть использована в построении сборочных единиц, также её можно использовать для проведения исследования НДС. Использование результатов анализа НДС зубьев цилиндрического колеса наиболее полно определяют условия эксплуатации передачи. SolidWorks транслирует данные в более 20 форматов (IGES, VDAFS, STEP, Parasolid, ACIS, STL, VRML, DXF, DWG, Pro/ENGINEER, CADKEY, Uni-graphics, SolidEdge, Inventor, AutoCAD, MechanicalDesktop, AdobePDF и т.д.), что позволяет форматировать данные чертежа для управляющей программы станка для лазерного раскроя.

Разработанный чертеж в графическом модуле сохраняется в универсальном формате и передается в управляющую программу лазерного станка, где он преобразовывается в координаты траектории движения лазерного луча. После того как определена траектория перемещения лазерного луча, оператор в диалоговом режиме вносит технологические параметры обработки.

Часть ввода технологических параметров не автоматизирована в связи с тем, что разработанная система не адаптирована под конкретное оборудование (лазерный станок), а технологические параметры обработки зависят от применяемого оборудования на промышленном предприятии.

Использование автоматизированной системы конструкторско-технологической подготовки производства, разработанного по предлагаемому методу, на промышленных предприятиях позволяет реализовать следующие преимущества:

- Повышение производительности труда работников инженерных служб;
- Сокращение длительности подготовительного этапа производства зубчатых колес;
- Анализ проектных решений;
- Повышение точности расчетов;
- Проведение виртуальных испытаний;

- Исключение вероятности внесения ошибочных данных.

На примере зубчатых колес, входящих в состав электропривода для трубопроводной арматуры, была проведена апробация разработанного метода по схеме, представленной на рис. 5.

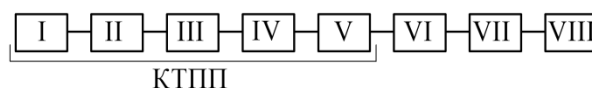


Рис. 5. Этапы проведения эксперимента:

I – выполнение проектировочных расчетов, II – построение твердотельной модели, III – проведение виртуальных испытаний, IV – оформление КД, V – разработка управляющей программы для лазерного станка, VI – обработка зубчатого колеса, VII – проведение анализа параметров обрабатываемого зубчатого колеса, VIII – проведение ресурсных испытаний в составе электропривода трубопроводной арматуры.

По результатам расчетов масса зубчатых колес была снижена на 75%, в сравнении с применяемыми и серийно изготавливаемыми колесами, входящими в состав электропривода трубопроводной арматуры. По результатам произведенной наработки, в соответствии с требованиями технических условий изделия, 250 часов в повторно-кратковременном реверсивном режиме с числом включений 320 в час и продолжительностью включений 25% не было выявлено повреждений, которые в дальнейшем могут привести к отказу.

#### Выводы:

- Разработанный метод зубоформообразования на станках для лазерного раскроя, применяемых в промышленном производстве, позволяет комбинировать формообразование зубчатого венца и его поверхностное упрочнение, что дает возможность сократить количество этапов производственного цикла изготовления зубчатых колес.
- Разработанный метод лазерного зубоформообразования может быть применен как для изготовления венца зубчатых колес, так и для зубьев звездочек и других видов передач зацеплением с параллельными осями.
- Учитывая преимущества и недостатки лазерного зубоформообразования, сформулированы рекомендации по применению зубчатых колес, изготовленных разработанным способом.
- Проведенный экономический анализ доказывает эффективность применения разработанного способа в промышленном производстве.
- Разработанная посозданному методу автоматизированная система конструкторско-технологической подготовки производства из-

готовления прямозубых цилиндрических колес лазером позволяет сократить трудовые и временные затраты на подготовительном этапе.

- Экспериментальные исследования доказали правильность теоретических выкладок.

доктора технических наук / Е. С. Трубачев.-Ижевск, 2004.- 355 с.

2. Развитие техники цельнометаллических CO<sub>2</sub>-лазеров, возбуждаемых электромагнитным полем, с внутрирезонаторным управлением параметрами излучения / И.К. Архипов, И.М. Кириллов, Р.П. Краснов, В.И. Юдин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т.7. №1. С.211-213.

#### Литература

1. Трубачев Е. С. Основы анализа и синтеза зацепления реальных спироидных передач текст.: диссертация

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

## PECULIARITIES OF METHOD BY LASER OF GEAR FORMING

**M.V. Raynik**

Peculiarities of method by laser of gear forming are considered, advantages and disadvantages of this method are demonstrated recommendations on usage of tooth gears formed by laser are presented. Method of elaborating automatic system of technological designing preparation to production is offered and main stages of realization applied on spur gearing are given

Key words: ring gear, tooth wheel, industrial laser machining, technical process