

## 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.

При работе зуба у его основания возникают растягивающие напряжения, большие, чем сжимающие напряжения после упрочнения (рисунок 1, а). В итоге в этом месте развивается усталостная трещина, приводящая, в конце концов, к разрушению колеса (рисунок 1, б).

Современные способы поверхностного упрочнения (лазерная закалка или легирование, обработка ионными пучками и т.д.) позволяют формировать упрочненный слой с управляемой толщиной и, в принципе, любой конфигурации. Поэтому была предпринята попытка найти конфигурацию упрочненного слоя, при которой на поверхности зуба сохраняются сжимающие напряжения при работе зубчатой передачи.

В качестве тестовой модели было выбрано зубчатое колесо с параметрами  $m = 5$  мм,  $Z = 33$ , радиус скругления ножки зуба  $r = 1.4$  мм. Для сокращения объема расчетов из середины колеса был вырезан слой толщиной 0.2 мм и оставлен только один зуб. Для МКЭ-расчета была сформирована сетка твердотельных конечных элементов с характерным размером 0.1 мм. Материал зуба – сталь,  $E = 2.1 \times 10^5$  МПа,  $\mu = 0.3$ . Тестовая нагрузка прикладывалась на делительном диаметре под углом  $20^\circ$  (рисунок 1, в). Компоненты тестовой силы (0, 110, 330), Н, выбирались из условия достижения значений максимальных главных напряжений, равных 1000 МПа для неупрочненного зуба.

Для валидации МКЭ-модели предварительно исследовалась тестовая модель зуба, на поверхности которого был сформирован упрочненный слой толщиной 0.5 мм. В материале упрочненного слоя формировались остаточные напряжения порядка 300 МПа. Геометрические и силовые параметры задавались в соответствии с рекомендациями [1–3]. Расчеты показали, что значения главных напряжений на боковой (рабочей) поверхности зуба лежат в диапазоне 350...400 МПа, что близко к данным [4] и, таким образом, подтверждает корректность допущений, принятых при моделировании.

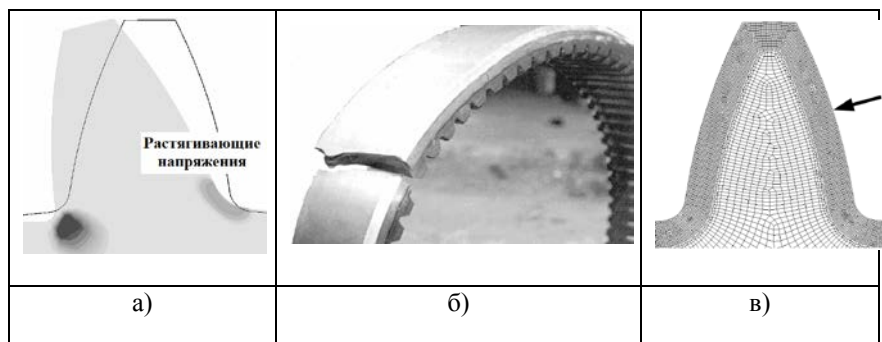


Рис. 1. Постановка задачи

В дальнейшем было исследовано порядка 20 различных конфигураций упрочненного слоя. Краткое описание некоторых из них представлено в таблице 1. На диаграмме (рисунок 2) приведено ориентировочное значение растягивающих напряжения под нагрузкой в зависимости от конфигурации упрочненного слоя. Максимальные растягивающие напряжения наблюдаются в районе скругления зуба со стороны приложения нагрузки. У зуба с упрочненным слоем различной конфигурации главные напряжения на поверхности, в целом, падают (рисунок 2). При этом зона максимальных растягивающих напряжений перемещается на границу упрочненного слоя и основы. Максимальные напряжения на границе слоя одного порядка с напряжениями на поверхности.

Таблица 1 – Краткое описание конфигурации упрочненного слоя

| № п/п | Конфигурация упрочненного слоя   |
|-------|--|
| 1     | равномерный по толщине на глубину 0.5 мм   |
| 2     | равномерный по толщине на глубину 0.5 мм и плавное уменьшение толщины в районе скругления зуба до 0  |
| 3     | равномерная толщина 1 мм   |
| 4     | равномерный по толщине на глубину 0.5 мм, напряжения в котором плавно уменьшаться от поверхности (300 МПа) до нуля на внутренней границе слоя                      |
| 5     | равномерный по толщине на глубину 0.5 мм и резкое увеличение толщины до 1 мм в районе начала и окончания скругления зуба   |
| 6     | равномерный по толщине на глубину 0.5 мм и два полукруглых выступа 0.5 мм с центрами в начале и окончании скругления зуба  |
| 7     | равномерное по толщине на глубину 0.5 мм и два полукруглых выступа 0.5 мм, размещенных вовне скругления зуба   |
| 8     | равномерный по толщине на глубину 0.5 мм и плавное увеличение и уменьшение глубины до 1 мм в районе скругления зуба  |
| 9     | равномерный по толщине на глубину 0.5 мм до начала скругления зуба и серповидное «пятно» на глубине от 0.5 до 1 мм в районе скругления зуба                        |
| 10    | равномерное по толщине на глубину 0.5 мм и два полукруглых выступа 0.5 мм, размещенных вовне скругления зуба, причем на самом скруглении упрочнение не проводилось |

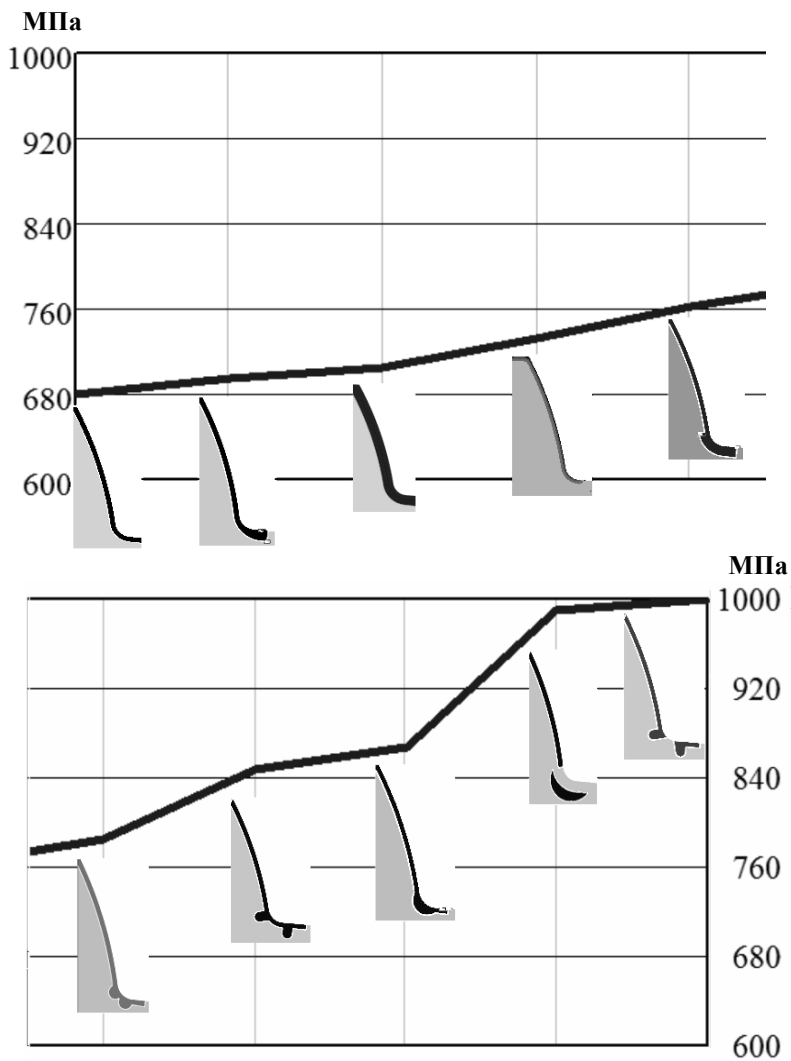


Рис. 2. Максимальные растягивающие напряжения на рабочей поверхности зуба

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко, В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.

2. Радченко, В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. Москва, Машиностроение–1, 2005. – 226 с.

3. Каратушин, С.И., Остаточные напряжения в цилиндрических изделиях // С.И. Каратушин, Д.В. Спиридонов, Ю.А. Плешанова / Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – №6, с. 53–55.

4. Плешанова, Ю.А. Моделирование остаточных напряжений в деталях машин : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.02.02 / Ю.А. Плешанова; ФГБОУВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова». – Санкт-Петербург, 2016. – 18 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

UDC 621.9.011:517.962.1

### МКЭ–МОДЕЛИРОВАНИЕ 5-ОСЕВОГО СТАНКА

#### FEM-SIMULATION OF A 5-AXSIS MACHINE

Довнар С.С., Авсиевич А.М., Колесников Л.А.,

Мищенко Е.Ф., Ермилова А.А.

Dovnar S.S., Avsievich A.M., Kalesnikau L.A.,

Mishchenko E.F, Yermilova A.A.

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

*Аннотация.* Описана методика подготовки модели станка для МКЭ-расчета. Представлены результаты статических и динамических расчетов перспективного 5-осевого станка.

*Summary.* The technique of preparing a model of a machine tool for FEM-analysis is described. The results of static and dynamic analysis of a promising 5-axis machine tool are presented

Для вновь проектируемого вертикального пятикоординатного обрабатывающего центра с ЧПУ мод. SGV720-5X белорусского производителя были проведены виртуальные испытания посредством МКЭ-моделирования. Оп-