

УДК 621.923

М.С. СТЕПАНОВ, А.А. КЛОЧКО, О.А. АНЦЫФЕРОВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ

Одним из основополагающим фактором обеспечения высокой долговечности закаленных зубчатых колес является изучение состояния напряжений в поверхностном слое, определяющимся видом и условиями технологического воздействия в процессе зубошлифования. Рассмотрено влияние остаточных напряжений на прочность зубчатых колес в зависимости от тепла, возникающего в зоне резания и приводящие к образованию растягивающих напряжений, изменению твердости и структуры. Причиной структурных напряжений являются изменения объема по сечению материала, вызванные превращением аустенита меньшего удельного объема в структуре большего удельного объема.

**Ключевые слова:** зубошлифование, поверхностный слой, технологическое воздействие, закаленное зубчатое колесо.

**Введение.** Состояние напряжений в поверхностном слое определяется видом и условиями технологического воздействия на эвольвентную поверхность зубчатого колеса в процессе зубошлифования.

Изменение состояния поверхностного слоя происходят в результате внесения в него энергии, необходимой для удаления материала в процессе зубошлифования.

Увеличение глубины резания сопровождается ростом сил резания, что способствует уменьшению величины растягивающих напряжений в поверхностном слое шлифованной поверхности зубьев зубчатого колеса.

**Основная часть.** Остаточные напряжения влияют на прочность зубчатых колес и зависят от тепла, возникающего в зоне резания, что приводит к образованию растягивающих напряжений, изменению твердости и структуры. В связи с этим возникает необходимость разработки математического моделирования описания степени влияния сил резания на процесс образования остаточных напряжений. Причиной структурных напряжений являются изменения объема по сечению материала, вызванные превращением аустенита меньшего удельного объема в структуре большего удельного объема (мартенсит, бейнит, перлит, феррит) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Структурные остаточные напряжения в поверхностном слое зубчатых колес при различных схемах зубошлифования (рис. 1) появляются всегда совместно с тепловыми напряжениями и вызывают возникновение растягивающих напряжений, а в сердцевине - напряжений сжатия.

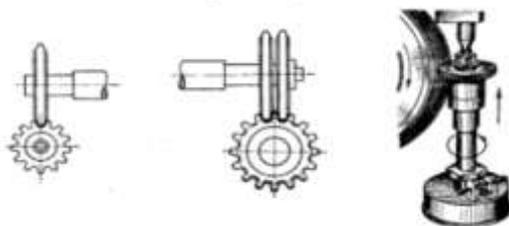


Рис. 1 – Схемы зубошлифования цилиндрических зубчатых колес: а – одним абразивным кругом; б – двумя абразивными кругами; в – абразивным винтовым кругом

В некоторых случаях [2, 5] превращение аустенита происходит раньше, что ведет к возникновению в сердцевине напряжений сжатия, а в верхнем слое растя-

гивающих [3, 4]. Такое распределение начальных напряжений, вызванных фазовыми превращениями, показано на рис. 2 [2, 5].

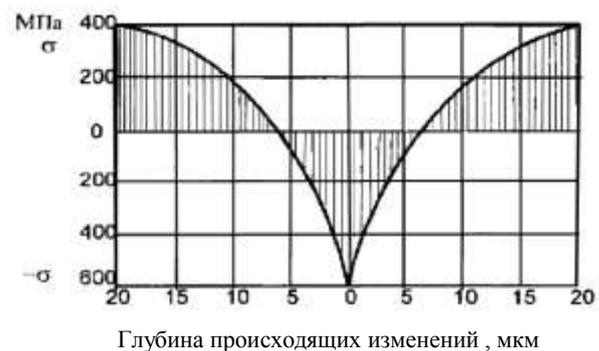


Рис. 2 – Распределение структурных напряжений, вызванных фазовыми превращениями

При зубошлифровании имеет место переход напряжений от внешней поверхности в сторону сердцевины, которые превращаются из растягивающих напряжений в напряжения сжатия. Причины этого явления находятся в изменениях, происходящих в поверхностном слое эвольвентной поверхности зубчатого колеса при зубошлифровании. Измерение величины остаточных напряжений и оценка их развития дает возможность оценивать воздействия, как тепла, так и связанных с ним структурных изменений. Поэтому исследование развития и характера начальных напряжений, как по глубине поверхностного слоя, так и на самой поверхности обрабатываемого материала имеет важное значение.

Анализируя распределение микротвердости в поверхностном слое, можно сделать вывод, что на структурные изменения верхнего слоя решающим образом влияет распределение тепла, так как в верхней части верхнего слоя могут появляться температуры, которые являются достаточными для создания мартенситных структур [2, 3, 6]. Влияние температуры и воздействие трения уменьшается с достижением более глубоких зон поверхностного слоя.

Распределение остаточных напряжений и распределение твердости [2, 5] позволяют предполагать, что напряжения, возникающие в результате зубошли-

фовання при воздействии шлифовального круга являются довольно существенными.

Возникающие напряжения сжатия своим постепенным убыванием противодействуют растягивающим напряжениям, а уменьшение твердости сопровождается непосредственно растущими растягивающими напряжениями [4, 6].

Структурные изменения приводят также к росту погрешности отклонения эвольвентного профиля зуба и отклонению шага зацепления [1, 7].

Для поверхностного слоя начальные остаточные напряжения являются основным фактором при его формировании.

Все напряжения можно разделить на:

- напряжения, появляющиеся в зубчатых колесах, во время воздействия на них внешних сил,
- напряжения, остающиеся в телах, после того как внешние силы перестают действовать на них.

Именно в случае напряжений в телах, на которые не воздействуют внешние силы, применяется определение остаточные напряжения [2, 6].

Существует также и другая классификация напряжений, а именно: напряжения первого рода, напряжения второго рода, напряжения третьего рода. С учетом ограничения области напряжений можно разделить на макронапряжения и микронапряжения [2, 4, 5].

Используя термин искажение кристаллической решетки [2, 3, 6] следует принимать во внимание, что область распространения остаточных напряжений сравнима с размером элементарной кристаллической ячейки.

При формообразовании поверхностного слоя зубчатых колес, независимо от примененного метода обработки резанием лезвийной или абразивной, всегда образуются остаточные напряжения [1, 2, 3, 7]. В процессе эксплуатации, когда поверхности зубчатых колес подвергаются различного вида нагрузкам, появляются дополнительные напряжения с переменной динамической амплитудой [3, 5]. Если динамическое напряжение является нулевым, а статическое напряжение не превышает сопротивления разрыву, то прочность такого элемента является неограниченной [3, 6]. Причиной ограниченной прочности является появление динамических напряжений величиной превышающей предел усталости (выносливости) (рис. 3) [3, 4, 5].

В общем случае напряжения вызывают в материале сложное сочетание явлений, сопровождающихся различными изменениями, которые зависят от величины этих напряжений и числа циклов [2, 4], что является, как правило, фактором, определяющим вид разрушения материала [1, 3, 6].

Применительно к зубьям зубчатых колес усталостная трещина зарождается на поверхности, подвергнутой деформации (в присутствии растягивающих остаточных напряжений) [4, 6]. При этом существенную роль играет состояние напряжений, то есть, величина, направление и изменения остаточных напряжений в поверхностном слое [2, 6].

Уменьшение сил резания и глубины резания приводит к росту влияния сил трения [3, 5, 6].

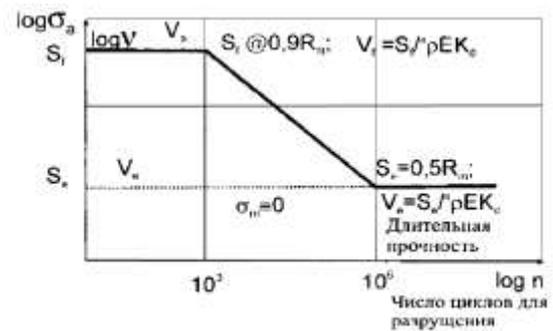


Рис. 3 – Общая диаграмма напряжений для конструкционных сталей

Количество тепла в зоне резания увеличивается, что ведет к возникновению термических напряжений, которые определяются как [140, 218]:

где:  $E$  - модуль Юнга;  $p$  - коэффициент Пуассона;  $I$  - коэффициент теплопроводности;  $t_{cp}$  - средняя температура;  $t$  - текущая температура поверхности.

Воздействие тепла во время зубошлифования может привести к возникновению новой закаленной зоны и находящегося под ней «мягкого» слоя [4, 6]. Этот процесс может сопровождаться преобразованием напряжений в поверхностном слое. В общем случае остаточные напряжения

$$\sigma = \frac{E}{1 - \mu} \lambda (t_{\psi} - t)$$

оказывают влияние на механические, физические и химические свойства обрабатываемого материала зубчатых колес (рис. 4).



Рис. 4 – Влияние остаточных напряжений на свойства поверхностного слоя обрабатываемого предмета

Если в процессе технологического воздействия не происходят разовые и структурные изменения в материале, то преобладающее термическое влияние вызовет появление растягивающих напряжений, а механическое воздействие в случае растягивающих деформаций вызовет появление остаточных напряжений сжатия. Во время шлифования изменяются условия резания в зоне соприкосновения шлифовального круга с обрабатываемым зубом зубчатого колеса.

При использовании нерациональных параметров шлифования на шлифуемой поверхности зубчатого колеса появляется белый слой вторичной закалки, отпущенный мартенсит и остаточный аустенит [4, 6]. Поэтому условия обработки имеют важное значение в процессе шлифования, а их несоответствующий под-

бор может привести к росту сил резания, увеличенному износу шлифовального круга, засаливаемости круга, росту температуры шлифования и увеличению остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной поверхности, к появлению трещин и росту количества остаточного аустенита. Трещины возникают в результате отпуска мартенситной структуры, что прямо связано с образованием остаточных напряжений [2, 3, 5].

Огромную роль в процессе шлифования играет шлифовальный круг [3, 4, 5, 6]. Во время шлифования активное участие в резании принимает только часть рабочей поверхности шлифовального круга:

- 10 - 15% шлифовальных зерен, находящихся на рабочей части поверхности шлифовального круга участвуют в резании;
- 85 – 90% шлифовальных зерен рабочей поверхности шлифовального круга участвуют в пластических и упругих деформациях;
  - остальная часть абразивных зерен не принимает участия в резании;
- рост скорости резания вызывает рост температуры в зоне контакта;
- рост температуры способствует изменению адгезионных свойств в зоне контакта материала шлифовальных зерен и обрабатываемой поверхности зубчатого колеса.

Все отмеченное способствует зарождению остаточных напряжений, связанных в основном, с термическими влияниями. При этом большое значение имеет положение шлифовального круга по отношению к зубу в точке контакта. Процесс контактирования шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью рассматривался во многих работах [1, 4, 6, 6].

При построении теоретической модели необходимо учитывать одновременное влияние трения, температуры в зоне контакта и сил резания, что позволит установить зависимость глубины резания на засаливаемость шлифовального круга. Корундовый шлифовальный круг ведет к образованию в зоне резания в два раза большей температуры, чем при применении боразонового шлифовального круга.

Очень важным моментом при зубошлифовании является обеспечение уменьшения температуры в зоне контактирования абразивного круга и обрабатываемой эвольвентной поверхности зубчатого колеса, сил резания с одновременным увеличением объема снимаемого металла и уменьшением степени засаливаемости круга.

Силы резания и температура зависят от характеристики шлифовального круга и способа шлифования, тем более, что шлифование эвольвентных поверхностей зубьев зубчатых колес отличается некоторой спецификой протекания тепла [1, 4, 5, 6] с неравномерными силами шлифования [2, 4, 5, 6, 7]. Поэтому процесс зубошлифования трудно поддается моделированию по сравнению с другими способами шлифования [3, 4, 8].

Огромную роль в процессе зубошлифования играет также смазочно-охлаждающая жидкость [4, 5e,

7]. Расход СОЖ влияет на величину температуры [2, 4, 7]. С увеличением расхода СОЖ температура во время шлифования понижается [2, 7]. При этом деформации поверхностного слоя обрабатываемого материала, на которые оказывается тепловое воздействие [3], могут быть разными и зависят они от скорости распространения энергии [4, 5].

Следует подчеркнуть, что кинематика процесса шлифования зубьев зубчатых колес, а также особенно параметры процесса шлифования, имеют большое значение для возникновения остаточных напряжений [6]. Возникающие колебания во время шлифования зубчатых колес приводят к нарушению стабильности процесса шлифования [2, 3, 5, 6] и, тем самым, к переменной толщине срезаемого слоя.

В процессе шлифования могут иметь место три существенных фактора, влияющих на изменения остаточных напряжений в поверхностном слое [4]:

- термические;
- структурные;
- механически деформационные.

Микротрещины появляются также в результате, прежде всего, высокой временной температуры зубошлифования - свыше точки АСз а также структурных изменений [5, 7], происходящих в верхнем слое под влиянием разницы температур в микрообластях обрабатываемого материала [3, 4, 5]. Когда величина остаточных напряжений превысит предел прочности обрабатываемого материала, тогда происходит процесс микроразрушения поверхностного слоя [2, 4, 5, 6]. Это явление свидетельствует также о концентрации остаточных напряжений и высокой их интенсивности [3, 5, 6, 7].

Структурные напряжения вызываются изменением объема (мартенситно - аустенитных превращений [2]) при переходе через интервал критических температур (например, в аустенит, перлит, мартенсит, бейнит) [6, 7]. Поэтому усиление диффузии наблюдается только в некотором интервале средних температур [3, 5], а в высоких температурах преобладают эффекты, вызванные тепловыми колебаниями [3, 5, 98].

Рост растягивающих напряжений, вызванный теплым воздействием ведет к понижению усталостной прочности [4, 5, 6] (рис. 5).

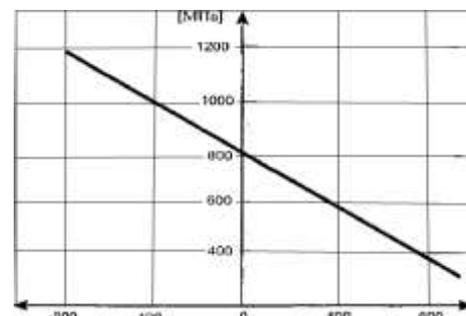


Рис. 5 – Зависимость усталостной прочности от максимальных напряжений в поверхностном слое после обработки

Во время шлифования обнаружено возникновение очень высоких растягивающих начальных напряжений в поверхностном слое зубчатых колес [3, 6, 7],

достигающих 1000 [МПа] (рис. 6).

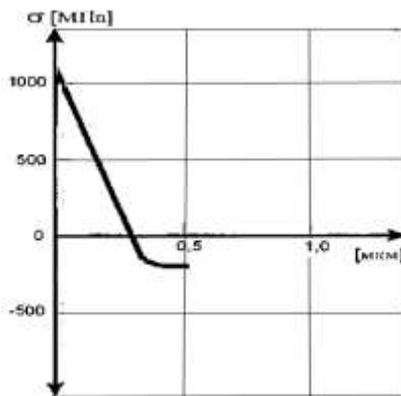


Рис. 6 – Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое зубчатых колес, зубошлифование методом обкатки двухсторонним конусным шлифовальным кругом [4, 6]

Тепло в поверхностном слое, на глубине свыше 10 мкм, ведет к значительному приращению остаточных растягивающих напряжений, и только на больших глубинах (рис. 6) – к напряжениям сжатия [3, 5, 6]. Таким образом, связь тепла с остаточными напряжениями является очевидной. Однако характер этой связи требует проведения дальнейших исследований, связанных с изменением свойств поверхностного слоя, особенно при шлифовании зубьев зубчатых колес.

**Выводы.** Воздействие тепла при зубошлифовании приводит к возникновению новой закаленной зоны и находящегося под ней «мягкого» слоя. Этот процесс сопровождается преобразованием напряжений в поверхностном слое. В общем случае остаточные напряжения оказывают влияние на механические, физические и химические свойства обрабатываемого материала зубчатых колес. Во время зубошлифования изменяются условия резания в зоне соприкосновения шлифовального круга с обрабатываемым зубом зубчатого колеса. При использовании нерациональных параметров зубошлифования на шлифуемой поверхности зубчатого колеса появляется белый слой вторичной закалки, отпущенный мартенсит и остаточный аустенит. Трещины возникают в результате отпуска мартенситной структуры, что прямо связано с образованием остаточных напряжений.

**Список литературы:** 1. *Кане М.М.* Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко и др. под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки мате-

риалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 3. Влияние термомеханических напряжений на трещинообразование при шлифовании цементуемых сталей / Якимов А.В., Григорьян Г.Д., Усов А.В., Сазонов И.П. // Резание алмазно-абразивными инструментами: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. «Алмазы -81», Харьков, октябрь, 1981/ ХПИ. - Харьков, 1981. - С.290-292. 4. Якимов А.В. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес / А.В. Якимов // - Астропринт. 2003. - 453 с. 5. Новоселов Ю.К. Моделирование операций при оценке отклонений формы деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Д.А. Кайнов // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових статей. – Том 2. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – С. 391-400. 6. Новиков Ф.В. Теория высококачественной обработки деталей машин: монография / Ф.В. Новиков. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2013. – 384 с. 7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. "Термофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с. 8. Шелковой А.Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, Е.В. Мироненко, А.А. Ключко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Kane M. M.* quality Management of engineering products / M. M. Kane, A. G. Suslov, O. A. Gorlenko, etc. under the General editorship of D. M. Kan. – Moscow : Mashinostroenie, 2010. – 416 P. 2. Physico-mathematical theory of processes of processing of materials technology and engineering / ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. – Vol. 10. "The concept of development of engineering technologies", Odessa: ONPU, 2005. – 565 P. 3. The influence of thermomechanical stresses on cracking in grinding case hardening steels / Yakimov A. V., Grigoryan G. D., Usov V. A., Sazonov I. P. // Cut of diamond-abrasive tools: proc. Dokl. Vses. scientific.-tech. Conf. "Diamonds -81", Kharkov, October, 1981/ KPI. - Kharkov, 1981. - P. 290-292. 4. Yakimov A. V. the Technological basis for ensuring and stabilizing the quality of the surface layer when the grinding of gears / A. V. Yakimov // - Astroprint. 2003. - 453 P. 5. Novoselov Y. K. Modeling of operations in the evaluation of deviations of the shape of the parts when grinding / Y. K. Novoselov, D. A. Kainov // Modern technology in mashinobuduvannya: collected articles g. – Volume 2. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2006. – PP. 391-400. 6. Novkov F. V. Theory visalakshi treatment of details of machines: monograph / F. V. Novkov. – H.: Hnew, 2013. – 384 P. 7. Physico-mathematical theory of processes of processing of materials technology and engineering / ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. – Vol. 2. "Thermophysics of cutting materials" – Odessa: ONPU, 2003. – 625 P. 8. Sheilkovoy A. N. General principles of modeling of optimal control parameters of precision, quality and productivity-pitch gears hardened gears / A. N. Sheilkovoy E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Bulletin of SevNTU : CG. Sciences. etc. Series "Machinereadable the transport." –Sevastopol, 2013. – The No. 140. – PP. 203-210.

Поступила (received) 20.11.2015

**Степанов Михаил Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, декан машиностроительного факультета, НТУ «ХПИ»;

**Stepanov Mikhail Sergeevich** – doctor of technical Sciences, Professor, Dean of the Mechanical Engineering Faculty, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

**Ключко Александр Александрович** – доктор технических наук, профессор НТУ «ХПИ»;

**Klochko Alexander Alexandrovich** – doctor of technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25;

**Анцыферова Олеся Александровна** – инженер I категории НТУ «ХПИ»;

**Antsyferova Olesya Aleksandrovna** – engineer of I category, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».