

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ МИКРОТВЕРДОСТИ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

*Ю.И. СИДЯКИН, доктор техн. наук, профессор,
С.И. АГАПОВ, канд. техн. наук, доцент,
Л.М. ГУРЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
А.Ф. ТРУДОВ, канд. техн. наук, доцент,
А.С. СЕРОВ, магистрант
(ВолгГТУ, г. Волгоград)*

Статья поступила 16 декабря 2011 года

Агапов С.И. – 400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28,
Волгоградский государственный технический университет, e-mail: @vstu.ru

Приведены результаты исследования по влиянию режимов резания на микротвердость эвольвентных поверхностей зубьев мелко модульных колес, изготовленных традиционным зубофрезерованием и с наложением ультразвуковых колебаний на заготовку. Установлены закономерности изменения микротвердости поверхности в различных сечениях зуба.

Ключевые слова: зубчатое колесо, микротвердость, ультразвуковые колебания.

Нагрузочная способность и долговечность зубчатых передач существенно зависят от физического состояния и качества обработки рабочих поверхностей зубьев. Служебные свойства этих поверхностей формируются в процессе изготовления колес, а также при последующей термической или механической обработке. Применительно к мелко модульным зубчатым колесам (с модулем $m < 1$ мм) использование последних малоэффективно, а порой и нецелесообразно [1]. В этих условиях обеспечение требуемых высоких показателей точности и качества обработки видится только в совершенствовании технологии изготовления колес, в частности, применения совмещенной обработки, когда традиционное зубофрезерование осуществляется в условиях ультразвукового воздействия на заготовку.

Известно, что процесс формирования поверхности при лезвийной обработке, включая и многолезвийную с применением различных фрез, происходит в несколько этапов, каждый из которых характеризуется последовательным и относительно упорядоченным чередованием зон пластического течения материала у режу-

щей кромки и последующим упругим его восстановлением после снятия стружки. При введении в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) регулярность этих процессов частично нарушается [2], неоднородность структурного состояния поверхностных слоев, вызванная различной степенью и глубиной распространения микропластических деформаций в глубь материала, усиливается, что приводит к качественным и количественным изменениям твердости и шероховатости обработанной поверхности. Поэтому для полноты оценки служебных свойств итогового состояния контактных поверхностей зубьев традиционных показателей становится недостаточно, в связи с чем несомненный интерес представляют исследования микротвердости на различных участках этих поверхностей в зависимости от режимов обработки и технологических особенностей процесса изготовления колес. Решение этих вопросов и является целью настоящей работы.

Исследования проводились на зубчатых колесах ($m = 0,9$ мм, число зубьев $z = 24$), изготовленных из улучшенной стали 40Х твердостью

235–245 НВ. Зубофрезерование проводилось на универсальном полуавтомате модели 5Б310П с применением червячно-модульной фрезы из стали Р6М5 за один проход при постоянной подаче $S = 0,48$ мм/об и при двух скоростях резания – 0,25 и 0,5 м/с. Нарезание зубьев осуществлялось по двум технологиям – традиционной (без применения УЗК) и при совмещенном зубофрезеровании, когда в зону резания дополнительно вводились УЗК.

Совмещенное зубофрезерование проводилось с использованием универсального ультразвукового приспособления, схема которого показана на рис. 1 и подробно описана в работах [3 и 4]. Основным элементом приспособления является пьезоэлектрический преобразователь 6, позволяющий создавать ультразвуковые колебания с частотой 18 кГц, и концентратор 5, который служит для передачи этих колебаний на заготовку 4 с амплитудой 4...6 мкм. В качестве источника возбуждения колебаний преобразователя используется ультразвуковой генератор УЗГ 3...0,25 мощностью 0,25 кВт с блоком поднастройки по частоте в пределах 16,65... 19,35 Гц.

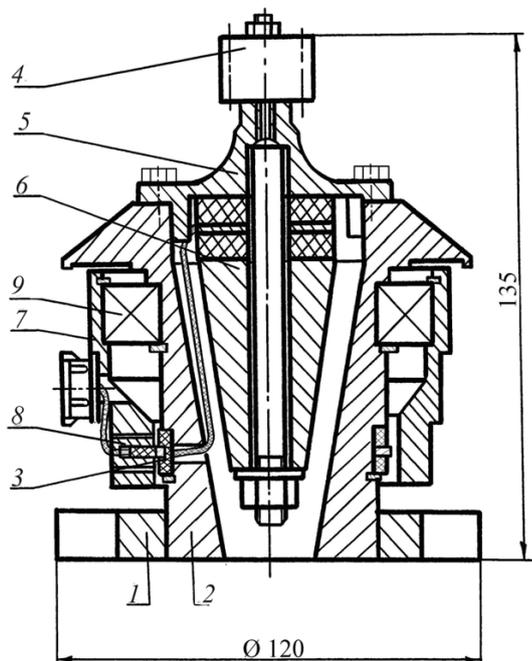


Рис. 1. Универсальное ультразвуковое приспособление для нарезания мелкозубчатых колес:

- 1 – основание; 2 – корпус; 3 – токосъемный узел;
- 4 – заготовка; 5 – концентратор; 6 – ультразвуковой блок;
- 7 – наружное кольцо; 8 – токоподводящее устройство;
- 9 – подшипник

Применительно к операциям совмещенного зубофрезерования, когда введение УЗК требует передачи интенсивного ультразвукового воздействия на заготовку, разработана специальная конструкция концентратора с экспоненциальной внешней поверхностью [4], составные элементы которого образованы соединением стержней переменного сечения. Методика расчета геометрических размеров концентраторов изложена в работе [5].

Для исследования твердости на различных участках торцевой и эвольвентной поверхностей зуба использовали разработанную ранее методику [6]. Схема измерения микротвердости H_{μ} на этих участках показана на рис. 2. На торце контроль H_{μ} проводился с двух сторон вдоль эвольвентного профиля с шагом 0,1 мм от вершины зуба до впадины (20 точек замера) на глубинах 0,05 и 0,10 мм от рабочей поверхности (зоны С и D), а также в поперечном направлении вдоль делительной окружности.

Поскольку шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев, обработанных входными (поверхность А) и выходными (поверхность В) режущими кромками зуборезного инструмента, получилась различной [3], то контроль твердости осуществлялся на каждой из указанных сторон зуба вдоль трех образующих в направлении подачи S (10 точек замера) с шагом 0,5 мм; расстояние образующих от вершины зуба составляло 0,1, 0,9 и 1,8 мм соответственно.

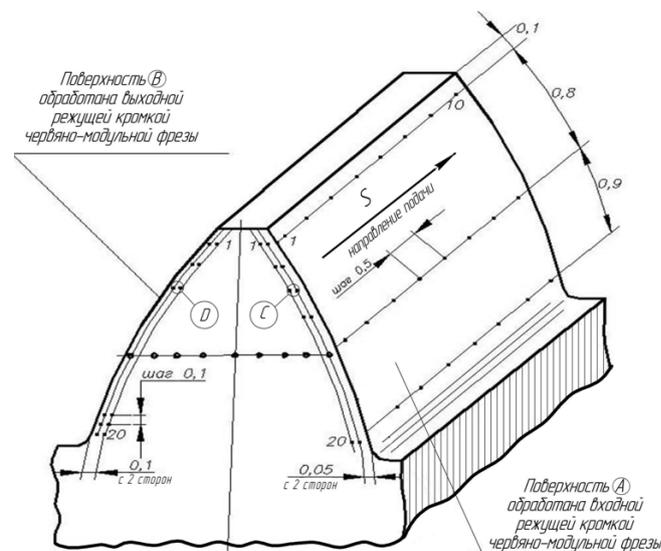


Рис. 2. Расположение точек замера микротвердости на поверхностях зуба

Для изготовления микрошлифов зубчатый венец заливался эпоксидным компаундом. Микротвердость измеряли на твердомере ПМТ-3М с нагрузкой на индентор 0,2 и 0,5 Н.

Результаты измерений представлены в табл. 1 и 2 и частично показаны на рис. 3. Их анализ позволяет не только сделать некоторые обобщения относительно характера изменения микротвердости поверхностных слоев различных участков зубьев, но и косвенно оценить по итоговому состоянию обработанных поверхностей количественную и качественную стороны каждого из двух исследованных технологических процессов изготовления колес.

Судя по данным рис. 3, совмещенное зубофрезерование формирует вблизи рабочих поверхностей зуба относительно «плотные» структуры материала, причем около поверхностей, обработанных «выходными» режущими кромками инструмента, уровень твердости несколько выше, чем у сформированных «входными» кромками. Заметим, что в этих зонах указанное превышение незначительно и для используемых скоростей резания 0,25 и 0,5 м/с составляет всего 6 и 4 % соответственно, однако по отношению к исходному уровню твердости заготовки ($H_{\mu(\text{исх})} \approx 2,4$ ГПа) оно уже заметно: при совмещенном зубофрезеровании для этих скоростей соответственно 19 и 11 % и около 14 и 7 % – при традиционном.

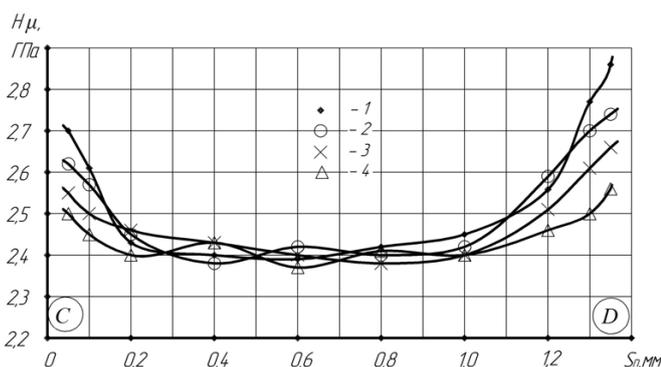


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине зуба вблизи делительной окружности:

- 1 – $V = 0,25$ м/с с УЗК; 2 – $V = 0,25$ м/с без УЗК;
3 – $V = 0,50$ м/с с УЗК; 4 – $V = 0,50$ м/с без УЗК

Характерно, что эта тенденция относительно устойчива, поскольку сохраняется при всех методах обработки, хотя при традиционном зубофрезеровании она заметно слабее. Видно также, что

обработка при повышенных скоростях резания в меньшей степени «упрочняет» поверхностные слои, хотя и тут заметной разницы в глубинах проникновения микропластических деформаций не наблюдается: в обоих случаях она мала и для данных условий обработки не превышает 0,3 мм на каждой из сторон зуба.

Что касается областей *C* и *D* (см. рис. 2) на торцевой поверхности зуба, то, как видно из данных табл. 1, микротвердость на всем протяжении от его вершины до ножки практически не меняется и поэтому речь может идти о некотором среднем значении $H_{\mu \text{ ср}}$. Исключение составляют лишь зоны у ножки колеса, где уровень твердости заметно выше по сравнению со средним значением. Например, при скорости резания $V = 0,25$ м/с это превышение составляет $\approx 4,5$ % при совмещенной обработке и около 3,5 % – при традиционной. Характерно, что и здесь вновь области, близкие к поверхностям, обработанным выходными кромками режущего инструмента, тверже тех, которые сформированы входными кромками: в среднем на 5,5 % при обработке с УЗК и на 4 % – без него. Эта закономерность подтверждается и данными исследования [6], относящимися к традиционному зубофрезерованию среднемодульных колес.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе изготовления колес нормальная по отношению к эвольвентным поверхностям зуба составляющая силы резания остается практически одинаковой, а аномальное повышение твердости на отдельных участках связано только с особенностями кинетики формирования поверхности при фрезеровании по методу обката. На близлежащих к этим зонам участках рабочих поверхностей зубьев срезаются относительно тонкие слои металла [2], что вызывает даже при умеренном проскальзывании инструмента большую степень деформации поверхностных слоев, которая обусловлена, в первую очередь, возникновением повышенных сдвиговых деформаций. Роль и значение последних особенно заметны, когда на процесс традиционного фрезерования накладывается УЗК вдоль оси заготовки.

Благоприятное влияние УЗК сказывается и на распределении твердости вдоль образующих на эвольвентных поверхностях зубьев. По данным табл. 2, где представлено изменение H_{μ} по длине

Таблица 1

Изменение микротвердости на торцах зуба вблизи его эвольвентных профилей после традиционного (без УЗК) и совмещенного (с УЗК) фрезерования со скоростью резания 0,25 м/с

Метод обработки	Исследуемая зона поверхности	Расстояние от вершины зуба, м	Микротвердость H_{μ} (в ГПа) в точках замера (1–20) вдоль эвольвентных профилей зуба на расстояниях (в миллиметрах) от вершины зуба																H_{μ} ср, ГПа
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	
С УЗК	С	0,05	2,78	2,76	2,74	2,72	2,72	2,70	2,69	2,71	2,72	2,75	2,69	2,78	2,76	2,79	2,82	2,85	2,76
		0,10	2,68	2,66	2,65	2,64	2,63	2,62	2,63	2,64	2,65	2,72	2,66	2,76	2,75	2,76	2,77	2,78	2,65
		0,05	2,91	2,88	2,86	2,81	2,84	2,86	2,84	2,87	2,88	2,89	2,91	2,96	2,94	2,96	2,99	3,02	2,90
	D	0,10	2,83	2,82	2,80	2,78	2,77	2,78	2,77	2,77	2,78	2,80	2,82	2,88	2,90	2,88	2,92	2,94	2,82
		0,05	2,67	2,65	2,64	2,63	2,63	2,63	2,62	2,63	2,64	2,66	2,69	2,72	2,71	2,72	2,73	2,74	2,69
		0,10	2,64	2,63	2,62	2,60	2,59	2,59	2,58	2,57	2,59	2,61	2,62	2,65	2,66	2,67	2,68	2,70	2,61
Без УЗК	D	0,05	2,81	2,80	2,79	2,80	2,76	2,74	2,75	2,76	2,77	2,78	2,80	2,84	2,83	2,85	2,86	2,88	2,80
		0,10	2,75	2,74	2,72	2,72	2,70	2,68	2,67	2,70	2,72	2,74	2,76	2,78	2,80	2,78	2,81	2,82	2,72

Примечания: 1. С и D – области торцевой поверхности зуба, примыкающие к его рабочим поверхностям, которые обработаны соответственно входной и выходной режущими кромками зубьев фрезы (см. рис. 2).

2. Значения микротвердости H_{μ} получены как средние арифметические результатов 4–6 измерений (разброс значений относительно среднего не превышает 5 %).

Таблица 2

Изменение микротвердости вдоль образующих на эвольвентных поверхностях зубьев после традиционной (без УЗК) и совмещенной (с УЗК) обработок со скоростью резания 0,25 м/с

Метод обработки	Исследуемые поверхности (по рис. 2)	Расстояние от вершины зуба, мм	Микротвердость H_{μ} (в ГПа) в точках замера (1–10) в направлении подачи на расстояниях (в миллиметрах) от торца зуба										$H_{\mu, \text{ср}}$ ГПа
			0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	
С УЗК	A	0,1	2,78	2,76	2,79	2,75	2,73	2,74	2,72	2,68	2,66	2,62	2,72
		0,9	2,71	2,70	2,68	2,67	2,64	2,62	2,63	2,60	2,61	2,58	2,64
		1,8	2,79	2,77	2,75	2,74	2,70	2,68	2,65	2,66	2,63	2,61	2,70
	B	0,1	2,91	2,89	2,88	2,86	2,85	2,82	2,79	2,77	2,76	2,74	2,83
		0,9	2,85	2,84	2,82	2,83	2,80	2,78	2,76	2,74	2,72	2,71	2,78
		1,8	2,96	2,94	2,92	2,93	2,88	2,85	2,82	2,80	2,78	2,76	2,87
Без УЗК	A	0,1	2,67	2,66	2,63	2,64	2,62	2,58	2,56	2,58	2,54	2,52	2,60
		0,9	2,62	2,60	2,59	2,56	2,55	2,52	2,54	2,52	2,50	2,49	2,55
		1,8	2,72	2,70	2,69	2,66	2,64	2,62	2,59	2,58	2,56	2,54	2,63
	B	0,1	2,81	2,80	2,78	2,76	2,77	2,72	2,70	2,68	2,66	2,65	2,73
		0,9	2,75	2,74	2,72	2,73	2,70	2,70	2,68	2,65	2,63	2,62	2,69
		1,8	2,85	2,83	2,81	2,78	2,78	2,76	2,74	2,70	2,68	2,66	2,76

Примечания: 1. A и B – условные обозначения поверхностей зуба, полученные соответственно входной и выходной кромками зубьев фрезы. 2. Значения микротвердости H_{μ} получены как средние арифметические результатов 4–6 измерений (разброс значений относительно среднего не превышает 5 %).

каждой из рабочих сторон зуба (см. поверхности *A* и *B* на рис. 2) на различных расстояниях от его вершины, видно, что и здесь добавление УЗК к традиционной обработке в среднем на 6 % повышает твердость рабочих поверхностей. По сравнению же с исходным уровнем этот прирост твердости существенно выше и составляет по поверхности *A*: 12 % при совмещенном фрезеровании и 8 % – при традиционном; а по поверхности *B*: соответственно 18 и 13 %.

Как известно, уровень основных физико-механических свойств материалов достаточно хорошо коррелируется с их твердостью, а она, в свою очередь, – с износостойкостью поверхностей в местах их сопряжений [1]. Следовательно, с достаточным для практики основанием можно утверждать, что совмещенное (с УЗК) зубофрезерование мелко модульных колес обеспечивает более высокий уровень обработки поверхностей, обладающих повышенной нагрузочной способностью. Если к этому добавить, что введение в зону резания УЗК улучшает качество обработки, т.е. уменьшает шероховатость поверхностей с одновременным повышением точности изготовления колес [3], то преимущества технологии зубофрезерования, основанной на применении УЗК, вполне очевидны, и поэтому она является весьма важ-

ным и перспективным направлением не только как объект исследования, но и в практической реализации на производстве.

Список литературы

1. *Серенсен С.В.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
2. *Медведицков С.Н.* Экспериментальные исследования деформации срезаемых слоев смежными кромками резца / С.Н. Медведицков // Технология и автоматизация машиностроения: научн. тр. ВолгГТУ. – Волгоград, 1972. – С. 157–165.
3. *Агапов С.И.* Нарезание зубчатых колес с использованием ультразвука: монография / С.И. Агапов, Ю.И. Сидякин. – Волгоград: ИУНЛ, ВолгГТУ, 2010. – 148 с.
4. *Агапов С.И.* Ультразвуковое приспособление для зубодолбления высокоточных деталей / С.И. Агапов, Н.А. Харламов, Д.Е. Парецкий // Материалы межвуз. сб. науч. тр. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 1999. – С. 3–5.
5. *Меркулов Л.Г., Харитонов А.В.* Теория и расчет составных концентраторов // Акустический журнал. – Т. 5. – Вып. 2. – 1959. – С. 183–190.
6. *Саютин Г.И.* Об эффектах деформационного упрочнения обрабатываемого материала в условиях зубофрезерования / Г.И. Саютин, Г.Г. Скребнев // Трение и износ. – Т. 12. – 1991. – С. 744–747.

Research on influence of cutting modes on microhardness of involute surfaces of gears

J.I. Sidyakin, S.I. Agapov, L.M. Gurevich, A.F. Trudov, A.S. Serov

Results of researches on influence of cutting modes on the surface microhardness of involute surfaces of gears made with conventional milling and milling with ultrasonic vibrations are shown. Regularities of changing of surface microhardness in different sections of gear are established.

Key words: gear, microhardness, ultrasonic vibrations.