

*к.т.н. Рутковский Ю.А.,
к.т.н. Чекалов А.Н.,
к.т.н. Мосягин Н.А.,
Ревакин А.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ КОЛЁС

Наведено аналіз способів підвищення продуктивності фінішної обробки високоточних зубчастих коліс і причин, що утрудняють цей процес; розглянута можливість застосування високошвидкісного фрезерування замість зубошліфування і дана оцінка доцільності його.

Ключові слова: *ефективність зубообробки, зубошліфування; високошвидкісне фрезерування.*

Проведен анализ способов повышения производительности финишной обработки высокоточных зубчатых колес и причин, затрудняющих этот процесс; рассмотрена возможность применения высокоскоростного фрезерования взамен зубошлифования и дана оценка его целесообразности.

Ключевые слова: *производительность зубообработки, зубошлифование; высокоскоростное фрезерование.*

Напряженный циклический ритм и тяжелые условия работы, высокие динамические нагрузки предъявляют высокие требования к надежной работе металлургического оборудования, что достигается за счет завышенных коэффициентов запаса либо резервированием. Наиболее уязвимым местом системы являются редукторы привода, которые не имеют резервирования. В связи с этим предъявляются повышенные требования к безотказной работе редукторов, особенно к зубчатым колесам.

Постоянное повышение требований к точности и качеству зубчатых передач, которые, как правило, изготавливаются из легированных, термически упрочняемых сталей, требует непрерывного совершенствования технологических приемов их изготовления и создания новых видов отделочных операций для повышения производительности и точности изготовления зубчатых колес.

В настоящее время основным способом окончательной обработки закаленных зубьев высокоточных колес является зубошлифование.

Наивысшую точность и качество профиля зубьев позволяют получить зубошлифовальные станки, имеющие ме-

ханизмы обката с эталонным элементом. Станки, работающие двумя тарельчатыми шлифовальными кругами, вследствие очень короткой кинематической цепи обката, простоты изготовления точных обкатных барабанов и наличия механизма компенсации износа шлифовальных кругов, позволяют получать зубчатые колеса 4-5 степени точности по ГОСТ 1643-81.

Шлифовальные круги тарельчатой формы, работая узкой кромкой, имеют очень небольшую рабочую поверхность, контактирующую с поверхностью шлифуемого зуба. Сочетания движения обката и продольной подачи приводит к непрерывной смене места контакта поверхности зуба с рабочей поверхностью круга, ввиду чего температура резания сравнительно невелика и обработка производится без охлаждения, что является значительным достоинством как с точки зрения качества поверхности, так и экологической чистоты, так как дополнительно производится отсос абразивной пыли.

В то же время зубошлифование имеет и существенные недостатки, а именно: низкую производительность обработки; возможность возникновения на поверхности шлифованных зубьев прижогов, микротре-

щин и остаточных напряжений, являющихся следствием высокой температуры, сопровождающей процесс резания.

В связи с этим задача повышения производительности окончательной обработки зубьев остаётся актуальной.

Учитывая, что затраты вспомогательного времени во много раз меньше времени шлифования, существенное повышение производительности может быть достигнуто прежде всего снижением затрат основного времени обработки.

Анализ отечественных и зарубежных исследований и публикаций [1,2,3,4] показывает, что попытки уменьшить время зубошлифования путем рационального отвода шлифовальных кругов из зоны обработки; сокращения времени холостых ходов; обеспечения равенства припусков на обработку, уменьшения длины хода обката не обеспечивают существенного сокращения основного времени шлифования. Повышение скорости шлифования ограничивается опасностью разрыва кругов и возможностью прижога обработанных поверхностей. Уменьшение числа проходов при шлифовании также затруднено. Одной из причин низкой производительности является малая жесткость технологической системы. При этом податливость шлифовальных кругов может достигать 40-60% от общей, что требует дополнительного выхаживания для компенсации упругих деформаций.

В настоящее время получает распространение высокоскоростное фрезерование (ВСФ) [High Speed Milling (HSM)] - современный метод обработки, позволяющий получать наименьшее сечение среза металла при использовании высоких скоростей съема. Обработка ведется со скоростями резания в диапазоне 500-1500 м/мин и подачами более 1000 мм/мин. Одним из важных факторов при ВСФ является не только снижение сил резания и величины крутящего момента в зоне высоких скоростей, но и перераспределение тепла в зоне резания. При небольших сечениях среза в данном диапазоне скоростей основная

масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в инструмент и заготовку (около 75% произведенного тепла отводится со стружкой, 20% – через инструмент и 5% – через обрабатываемую деталь). Поэтому высокоскоростное фрезерование считается одним из перспективных процессов для обработки закаленных конструкционных сталей и сплавов, где его эффективность наибольшая, не боясь при этом термического отпуска обрабатываемой поверхности и повышенного износа инструмента[5,6,7].

ВСФ предъявляет высокие требования к конструкции инструмента, его техническому состоянию и инструментальному материалу. Инструментальный материал должен быть химически инертен по отношению к обрабатываемому материалу, иметь высокую стойкостью к окислению и высокую теплостойкостью (не менее 1000 °С), обеспечивать остроту режущих кромок, т.е. малые радиусы их округления, иметь большой предел прочности на изгиб. Указанным требованиям соответствуют новые ультрамелкозернистые твердые сплавы марок BK60M, VHM, DK460UF, DK120, HM-UF, UWC, KHA S и кубический нитрид бора [6,7]. Инструмент для эффективной и безотказной работы должен иметь малые биения и быть отбалансированным, обеспечивать эффективное удаление стружки из зоны резания и демпфирование вибраций. Геометрия режущей части рассчитывается с учетом далекого отброса мелкой стружки и использования устройств для ее отсоса. Благодаря небольшим поперечным сечениям среза снижается риск возникновения вибраций, силы резания невелики, что благоприятно сказывается на точности обработки. Кроме того получается высокое качество поверхности, отсутствует дробление при резании; шероховатость при подачах 0,1-0,2 мм/зуб составляет R_a 0,5-0,63 мкм.

Затраты на ВСФ достаточно велики, так как при этом, как правило, используются дорогостоящие высокоскоростные станки и специальные концевые фрезы. Предвари-

тельный анализ показывает, что режимы обработки, рекомендуемые для ВСФ, соизмеримы с применяемыми при зубошлифовании, а достоинства ВСФ позволяют считать его перспективным для чистовой обработки зубьев.

Оценка целесообразности использования ВСФ для чистовой обработки зубьев возможна путем сравнения затрат основного времени обработки при шлифовании и ВСФ.

Зубошлифовальный станок мод. 5851 предназначен для обработки зубчатых колес с модулем 3-10 мм двумя тарельчатыми кругами диаметром 225 мм. Паспортные значения частот вращения шпинделя могут иметь 2388 об/мин или 3345 об/мин. Конструкция шпинделя станка мод. 5851 позволяет установить взамен шлифовальных кругов одноугловые дисковые фрезы.

Основное время T_0 шлифования на станке с двумя тарельчатыми кругами зубьев прямого зубчатого колеса определяется по формуле [1].

$$T_0 = L \times Z \times \left[\frac{K_{\text{черн}}}{n \times S_{\text{черн}}} + \frac{K_{\text{чист}}}{n \times S_{\text{чист}}} \right], \text{ мин}; \quad (1)$$

где: L – длина продольного хода стола при двустороннем делении, мм;

$$L = e + 2 \sqrt{H_{\text{ш}} \times (D_{\text{ру}} - H_{\text{ш}})} + 10; \quad (2)$$

где $K_{\text{черн}}$, $K_{\text{чист}}$ – соответственно количество черновых и чистовых проходов;

n – число двойных ходов обката в минуту;

$D_{\text{ру}}$ – диаметр режущего инструмента, мм;

$H_{\text{ш}}$ – глубина захода кругов во впадины, мм;

e – ширина зубчатого венца, мм.

Как видно из формулы, уменьшение основного времени обработки возможно за счет уменьшения длины продольного хода стола, что возможно при уменьшении диаметра инструмента, а также числа черновых и чистовых проходов.

Для сравнения определим основное время зубошлифования и ВСФ при одина-

ковых исходных условиях. Например, для обработки прямого зубчатого колеса модулем 6 мм с числом зубьев, равным $Z = 54$ и шириной венца $e = 30$ мм, с шероховатостью поверхности $R_a 1,25$ мкм требуется три одинарных черновых и два двойных чистовых прохода. Табличные режимы обработки: при ходе обкатки $H = 87$ мм, число двойных ходов обкатки равно 150 дв. ход/мин, продольная черновая подача $S_{\text{черн}} = 3,7$ мм/дв.ход; чистовая подача $S_{\text{чист}} = 1,3$ мм/дв.ход. Расчетное основное время, без учета выхаживания, составляет 200 мин.

При шлифовании зубчатого колеса с модулем $m=3$ мм, $Z=54$, $e = 30$ мм, шероховатостью $R_a 1,25$ мкм требуется два одинарных черновых и два двойных чистовых прохода при ходе обкатки $H = 43$ мм. Число двойных ходов обкатки равно 300 дв. ход/мин, продольная черновая подача $S_{\text{черн}} = 3,7$ мм/дв.ход; чистовая подача $S_{\text{чист}} = 1,3$ мм/дв.ход. Расчетное основное время составляет более 74 мин.

Для возможности фрезерования зубьев с модулями 3-10 мм достаточно иметь диаметр фрезы $\Phi 100$ мм. Принимаем число зубьев $Z=25$, со специальной геометрией, рекомендуемой для ВСФ [7]. Материал фрез – сплав ВК60М. Он позволяет получить острозаточенные режущие кромки, имеет теплостойкость более 1000°C , твердость не менее 90,5 HRA и высокую размерную стойкость. Рекомендуемые для ВСФ скорости резания находятся в диапазоне 500-1500 м/мин, подача на зуб $S_z = 0,05-0,2$ мм/зуб.

Обработка ведется расположенными на периферии режущими кромками, торцовая часть в работе не участвует. Требования по биению фрезы: радиальное биение не более 0,02 мм; торцовое – не более 0,005 мм.

При частоте вращения шпинделя 3345 об/мин скорость резания для фрезы диаметром 100 мм будет равна 1050 м/мин, что находится в рекомендуемом для ВСФ диапазоне. Рекомендуемая глубина резания при ВСФ находится в пределах 0,015-

0,3 мм, что позволяет весь припуск под чистовую обработку зуба удалить за один черновой и один чистовой проход. Подача $S_Z = 0,2$ мм/зуб позволяет получить шероховатость не ниже R_a 1,25-0,63 мкм.

Сравнение по затратам основного времени при обработке ВСФ проводим для аналогичных колес $Z=54$, $v = 30$ с модулями 3 и 6 мм.

При частоте вращения фрезы 3345 об/мин минутная подача, соответствующая скорости движения обкатки, будет равна $S_M = 0,2 \cdot 25 \cdot 3345 = 16725$ мм/мин.

Необходимое число ходов обката $n = S_M / (2 \times L)$ будет равно:

Для колеса $Z=54$, $m=3$ мм, $L=43$ мм $n = 16725 / (2 \times 43) = 194,5$ дв.ход/мин; принимаем $n = 200$ дв.ход/мин. Для колеса $Z = 54$, $m=6$ мм, $L=87$ мм : $n = 16725 / (2 \times 87) = 96$ дв.ход/мин; принимаем $n = 100$ дв.ход/мин. Продольная черновая подача $S_{\text{черн}} = 3,7$ мм/дв.ход; чистовая подача $S_{\text{чист}} = 1,3$ мм/дв.ход.

Расчетное основное время обработки с использованием ВСФ составляет: для колеса с модулем 3 мм при одном черновом и одном чистовом проходе - 25 минут, что практически в 3 (2,98) раза меньше, чем при зубошлифовании; а для колеса с модулем 6 мм - 59,5 минут, что в 3,36 раза быстрее.

Результаты расчетов показывают, что вследствие уменьшения числа проходов и сокращения длины продольного перемещения стола, основное время, несмотря на некоторое снижение скорости обката, значительно уменьшается. С уменьшением ширины зубчатого венца выигрыш в производительности ВСФ возрастает.

Рекомендуемые режимы ВСФ не имеют существенных отличий от применяемых на зубошлифовальных станках, работающих двумя тарельчатыми кругами и здесь не требуется существенного изменения кинематики станка, а скорость движения обката будет, в основном, ограничиваться деформациями лент. Наибольшая величина погрешности $f_{\text{п}}$ профиля будет опре-

деляться мгновенным изменением длины лент на линии действия сил.

$$f_{fr} = d_b \cdot \Delta L = H \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{C_{\text{л.пр}}} \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot n^2}{60^2}; \quad (3)$$

где H – длина хода каретки обката, мм;
 $m_{\text{пр}}$ - приведенная масса изделия, кг;
 $m_{\text{пр}} = (2 \times I) / R^2$;

I - приведенный момент инерции, кг/м²;
 R - приведенный радиус качающихся масс, м;

$C_{\text{л.пр}}$ - суммарная приведенная жесткость лент;

Зная предельную допустимую величину погрешности профиля f_{frmax} можно из зависимости (3) определить допустимое число ходов n каретки обката.

$$n^2 = 182,5 \cdot \frac{C_{\text{л}}}{I} \cdot \frac{R^2}{H} \cdot f_{\text{frmax}};$$

откуда:

$$n = 13,5 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{C_{\text{л}} \times f_{\text{frmax}}}{I \times H}}, \text{ дв.ход/мин.}$$

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения ВСФ для чистовой обработки зубьев колес и позволяют сделать следующее заключение:

К основным достоинствам замены зубошлифования на ВСФ можно отнести:

- Повышение производительности чистовой обработки зубьев за счет уменьшения необходимого числа проходов для съема припуска и уменьшения длины продольного хода стола.

- Обеспечение требуемого качества обработанной поверхности: исключение возможности появления прижогов, исключение отпуска и снижения твердости рабочих поверхностей зубьев, обеспечение требуемой шероховатости.

- Замена шлифовальных кругов на более жесткие фрезы позволит снизить податливость системы, а характер приложения и минимальные значения сил резания - обеспечить удаление припуска за минимальное число проходов и высокую точность обработки.

- Возможность обработки зубьев с малыми модулями.

В дальнейшем необходима практическая проверка фактической стойкости фрез и шероховатости обработанной поверхности, более полное исследование влияния условий обработки, кинематических и ди-

намических факторов. Кроме того требуется некоторое расширение диапазона ходов обката и скорости продольного перемещения стола, обеспечение точного и надежного закрепления фрез, а также разработка рекомендаций по применению ВСФ для обработки зубьев колес.

Библиографический список

1 Коган Г.И. Расчет и примеры наладок зубошлифовальных станков / Г.И. Коган. - М.-Л.: Машигиз, 1957. - 135 с.

2 Pat / 2641554 (BDR) / *Walzverfahren und Vorrichtung zum Schleifen zylindrischer Zahnräder* / *Maag-Zahnräder* / *Erfinder: Fivian, D.A.* Of. 23.03.78.

3 А. С.1585098 СССР, М. Кл³. В 23 Р 23/00, В 23 Р 5/00. Механизм обката / Н. А. Мосягин, А. Н. Чекалов (СССР). - № 4283239/31-08; заяв. 13.07.87; опубл. 15.08.90, Бюл. № 30. - 3 с.

4 Чекалов А.Н. Повышение производительности шлифования зубьев колес / А.Н.Чекалов, Н.А. Мосягин, С.Ю. Стародубов, Д.А. Дрыгула // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії; збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. - №2 (27). – С.117-121.

5 Васин С.А. Резание материалов ДЖУ Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учеб. для техн. вузов / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 448 с.

6 Везуб Н.В. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: учебное пособие / Н.В. Везуб, Е. Весткемпер, А.И. Грабченко и др.; Под ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГТУ, 1999. – 436 с.

7 Залого В.А. Анализ экономической эффективности высокоскоростного фрезерования / В.А.Залого, Д.В. Криворучко, С.С. Емельяненко; Д. Г. Голдун // Вісник СумДУ. - №11(83). - 2005.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.