

УДК 621.834



Н.В. Лищенко,
к.т.н., доцент
Одесская
национальная
академия пищевых
технологий
e-mail:
odmnv@rabler.ru



В.П. Ларшин,
д.т.н., профессор,
Одесский
национальный
политехнический
университет
e-mail: vplar-
shin@rambler.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ОПЕРАЦИИ ПРОФИЛЬНОГО ЗУБОШЛИФОВАНИЯ

Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин. Технологическое проектирование и диагностика операции профильного зубошлифования. Разработана прикладная методика определения режимов профильного зубошлифования на основе показателей удельной скорости съёма припуска Q_w и удельного объёма удаляемого материала V_w , которые одновременно используются для технологической диагностики операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ.

N.V. Lishchenko, V.P. Larshin. Profile gear grinding operation design and diagnostics. An applied technique for determining the profile gear grinding conditions is developed on the basis of both the specific material removal rate Q_w and the material removal rate V_w which the two are simultaneously used for the profile gear grinding operation diagnostics on CNC machine.

Введение. Задачу технологического проектирования операции зубошлифования решают на этапе технологической подготовки производства (ТПП) в рамках задачи проектирования всего процесса изготовления зубчатого колеса (ЗК), затем полученное решение корректируют на этапе производства при зубошлифовании. Решения, принимаемые на этапе ТПП, являются начальными условиями для этапа производства, особенно после установки нового оборудования (станок с ЧПУ), изменении элементов технологической системы (новые характеристики шлифовальных кругов обычных, высокопористых и других), изменении вида СОЖ, её температуры, давления, расхода и т.п.

Этап ТПП отличается от этапа производства отсутствием фактических данных об индивидуальных особенностях элементов технологической системы и параметрах её состояния. Поэтому на этом этапе используют эмпирические данные, полученные ранее в аналогичных ситуациях или взятые из технологических справочников. Следует отметить, что эмпирические данные при их использовании на этапе ТПП могут быть основаны либо на

избыточных, либо на недостаточных технологических ресурсах (припуски, эксплуатационные характеристики шлифовальных кругов и т.п).

Этап ТПП в ряде случаев дополняют экспериментальными исследованиями проектируемой операции, которые проводят работники технологических лабораторий. В этом случае результаты предварительного проектирования корректируют, учитывая фактические экспериментальные данные. Например, исследуют фактическую стойкость режущего инструмента, теплонапряженность обработки, определяют оптимальные режимы резания для фактических условий. Однако эти корректировочные работы, являясь прогрессивным направлением, не учитывают индивидуальные особенности заготовок ЗК и выполняемой операции, которые можно учесть только в режиме реального времени (on-line) при наличии системы технологической диагностики.

По мере работы установленного оборудования (накопление фактических данных) при выбранных элементах технологической системы указанные выше начальные условия корректируются с учетом возникающих при обработке ситуаций, непредсказуемых на этапе ТПП. Указанная корректировка выполняется на основании опыта и мастерства обслуживающего персонала и зачастую является субъективной. Эффективным средством устранения этого недостатка является использование мониторинга и технологической диагностики операции зубошлифования на станке с ЧПУ. Современные станки с ЧПУ имеют встроенный мониторинг параметров состояния технической системы станка, включающей контроль работоспособности всех элементов станка, начиная от контроля температуры СОЖ и заканчивая определением мощности привода шлифовального круга [1].

Математическое обеспечение системы автоматизированного проектирования (САПР) зубошлифовальной операции является одним и тем же для этапов производства его подготовки. Указанные выше особенности технологического проектирования отражаются на характеристике исходных данных: обобщённые статистические данные или детерминированные, т.е. измеренные при зубошлифовании (на этапе наладки станка). Если припуск измеряют на этапе наладки зубошлифовального станка, то разработанная САПР является встроенной, и её используют на этапе производства. Если этот же припуск задают исходя из наиболее вероятных его значений, то разработанную САПР используют на этапе подготовки производства. Далее рассматривается математическое обеспечение САПР для определения режимных параметров зубошлифования.

Для оценки производительности и проектирования шлифовальной операции используется ряд характеристических величин (characteristic values), к числу которых относятся: объём удаляемого в единицу времени материала (material removal rate) Q_w (в мм³/с), общий объём удаляемого материала V_w (в мм³). В зарубежной литературе первые два показателя до-

полнительно приведены к единице эффективной (далее активной) ширины (width) ШК и обозначены соответственно: \dot{Q}'_w в $\text{мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$ и \dot{V}'_w в $\text{мм}^3/\text{мм}$ [2]. В работе [3] отмечается связь показателя \dot{Q}'_w с теплонапряженностью процесса зубошлифования, в работе [4] параметр \dot{V}'_w является характеристикой ресурса работы шлифовального круга по мере его износа. В работе [5] дана методика определения \dot{Q}'_w . Однако в литературе не описаны прикладные методики определения режимов зубошлифования на основе указанных показателей технологической операции, нет сведений о технологической диагностике в режиме реального времени.

Целью статьи является разработка методики определения режимных параметров профильного зубошлифования на основе показателей \dot{Q}'_w и \dot{V}'_w на основе их совместного использования с теплофизической моделью операции шлифования, а также разработка способа технологической диагностики операции.

Материал и результаты исследования. Температурное поле на этапе нагрева T_n описывается математической зависимостью, представляющей собой решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности. Эта зависимость при $x = 0$ имеет вид [6]

$$T_n = \frac{2q\sqrt{a\tau_n}}{\lambda\sqrt{\pi}}, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; a, λ – коэффициенты температуры – и теплопроводности, в $\text{м}^2/\text{с}$ и $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, соответственно; $\tau_n = \frac{\sqrt{D t_v}}{V}$ – время действия теплового источника на этапе нагрева, с; t_v – вертикальная глубина шлифования, мм; D – мгновенный диаметр шлифовального круга в рассматриваемом сечении его профиля, мм; V – осевая подача, мм/с.

Плотность теплового потока q (в $\text{Вт}/\text{мм}^2$) может быть найдена по формуле [7]

$$q = A_{y\partial}\psi \frac{Vt_v \sin \alpha}{\sqrt{Dt_v}}, \quad (2)$$

где ψ – доля теплоты, попадающей в заготовку; $A_{y\partial}$ – удельная работа шлифования, $\text{Дж}/\text{мм}^3$; α – угол профиля, рад.

Формула (1) с учетом формулы (2) может быть представлена в виде

$$T_n = \frac{2 \left(A_{y\partial}\psi \frac{Vt_v \sin \alpha}{\sqrt{Dt_v}} \right) 10^6 \sqrt{a\tau}}{\lambda\sqrt{\pi}} \quad (3)$$

По результатам испытаний высокопористых шлифовальных кругов, возможный диапазон изменения показателя \dot{Q}'_w составляет $8 < \dot{Q}'_w < 15$ $\text{мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$, выбираем, например, $\dot{Q}'_{w0} = 8,6$ $\text{мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$. Теперь для определения осевой подачи (скорости детали) воспользуемся известной вели-

чиной $Q'_w = Q'_{w0}$. Таким образом, исходя из определения показателя Q'_w , получаем уравнение для $(i+1)$ -ого рабочего хода

$$Q'_{w(i+1)} = t_{i+1} V = Q'_{w0}. \quad (4)$$

Вертикальную глубину шлифования в уравнении (4) определяют из условия бездефектной обработки $T_n < T_{кр}$, где $T_{кр}$ – критическая температура шлифования. С учётом формулы (3) получим

$$t_{i+1} = \left(\frac{T_{кр}}{C} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (5)$$

$$C = \frac{2 \cdot 10^6 \psi \cdot A_{y\partial} \cdot \sin(\alpha) \cdot D^{-0,25} \sqrt{aV}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}}. \quad (6)$$

Таким образом, при указанных выше условиях получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{cases} Q'_{w(i+1)} = t_{i+1} V \\ t_{i+1} = \left(\frac{T_{кр} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot 10^6 \psi \cdot A_{y\partial} \cdot \sin(\alpha) \cdot D^{-0,25} \sqrt{aV}} \right)^{\frac{4}{3}} \end{cases} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7), получаем

$$Q'_{w(i+1)} = \left(\frac{T_{кр} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot 10^6 \psi \cdot A_{y\partial} \cdot \sin(\alpha) \cdot D^{-0,25} \sqrt{aV}} \right)^{\frac{4}{3}} V \quad (8)$$

Из уравнения (8) определяем осевую подачу V

$$V = \frac{Q_w'^3 \cdot a^2 \cdot (2 \cdot 10^6 \cdot \Psi \cdot A_{y\partial} \cdot \sin \alpha)^4}{D(T_{кр} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi})^4} \quad (9)$$

Принимаем следующие исходные данные: $T_{кр} = 525$ °C; $\psi = 0,8$; $A_{y\partial} = 50$ Дж/мм³; $\alpha = 20^\circ$ (или $\frac{20\pi}{180}$ рад); $a = 5,68276 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 24$ Вт/(м·°C).

Для указанных выше численных значений переменных величин по формуле (9) получаем $V = 115,3$ мм/с или $V = 6919$ мм/мин. Принимаем $V = 116,67$ мм/с (7000 мм/мин), тогда $Q'_w = 8,6333$ мм³/(с·мм). Назначаем осевую подачу V по этапам обработки следующим образом.

Первый этап: $V = 1000$ мм/мин (первый пробный ход), на остальные рабочие хода $V = 7000$ мм/мин. Второй этап: на все рабочие хода $V = 7000$ мм/мин, кроме последнего хода, который выполняют при $V = 3000$ мм/мин. Третий этап: осевая подача $V < 3000$ мм/мин и уменьшается в направлении от первого рабочего хода к последнему, например, от 2500 мм/мин до 1500 мм/мин.

Зная осевую подачу V , находим бездефектную глубину шлифования по уравнению (4). Получаем

$$t_{i+1} = \frac{Q'_{w(i+1)}}{V} = \frac{Q'_{w0}}{V} \quad (10)$$

При $Q'_{w0} = 8,6333 \text{ мм}^3/(\text{с} \cdot \text{мм})$ и $V = 116,67 \text{ мм/с}$ (7000 мм/мин) получаем $t_{i+1} = 0,074 \text{ мм}$.

Так как припуск на обработку исчисляют в нормальном направлении к обрабатываемой поверхности (сумма подач на сторону), то при определении числа ходов необходимо определить нормальную глубину шлифования (подачу на сторону). Можно использовать следующую упрощенную зависимость между этими глубинами резания,

$$t_n = t_v \sin \alpha, \quad (11)$$

где α – угол профиля в радианах, т.е. при $\alpha = 20^\circ$ получаем $t_n = 0,025 \text{ мм}$.

Зная припуск на первый (z_1) и второй (z_2) этапы (нормальное исчисление припуска), определяем число рабочих ходов для первого и второго этапов зубошлифования: $i_1 = \frac{z_1}{t_n}$; $i_2 = \frac{z_2}{t_n}$. Получаем, соответственно,

$$i_1 = \frac{0,5}{0,025} = 20; \quad i_2 = \frac{0,25}{0,025} = 10.$$

Третий этап зубошлифования имеет отличия, связанные с необходимостью обеспечить требуемую шероховатость поверхности и наименьшие упругие отжатия в технологической системе, чтобы выбрать натяг от предыдущих этапов. Для этого необходимо уменьшать не только осевую подачу V исходя из требований шероховатости, но и глубину резания t_n в связи с отличием лимбовой глубины и фактической.

Зная припуск на третий (z_3) этап (нормальное исчисление припуска), определяем число рабочих ходов по формуле $i_3 = \frac{z_3}{t_n}$. Т.е. $i_3 = \frac{0,02}{0,005} = 4$.

Осевую подачу V изменяем (уменьшаем) по рабочим ходам следующим образом: 2500 мм/мин; 2500 мм/мин; 2000 мм/мин; 1500 мм/мин.

На основе полученных данных заполняем таблицы режимов зубошлифования с указанием расчётной температуры в зоне резания (таблицы 1-3).

Таблиця 1. Режимы зубошлифования на 1 этап зубошлифования (черновой)

№	Подача на сторону (t_n), мм	Радиальная подача (t_v), мм	Осевая подача, мм/мин	Q_w , мм ³ /мм·с	V_w , мм ³ /мм	T , °С
1	0,025	0,074	1000	1,233	1,776	199
2	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
3	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
4	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
5	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
6	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
7	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
8	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
9	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
10	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
11	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
12	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
13	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
14	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
15	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
16	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
17	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
18	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
19	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
20	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525

Таблиця 2. Режимы зубошлифования на 2 этап зубошлифования (получистовой)

№	Подача на сторону, мм	Радиальная подача, мм	Осевая подача, мм/мин	Q_w , мм ³ /мм·с	V_w , мм ³ /мм	T , °С
1	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
2	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
3	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
4	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
5	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
6	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525

7	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
8	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
9	0,025	0,074	7000	8,6333	1,776	525
10	0,025	0,074	3000	3,7	1,776	344

Таблиця 3. Режимы зубошлифования на 3 этап зубошлифования (чистовой)

№	Подача на сторону, мм	Радиальная подача, мм	Осевая подача, мм/мин	Q'_w , мм ³ /мм·с	V'_w , мм ³ /мм	T, °C
1	0,005	0,015	2500	0,625	0,36	95
2	0,005	0,015	2500	0,625	0,36	95
3	0,005	0,015	2000	0,5	0,36	85
4	0,005	0,015	1500	0,375	0,36	73

Используемые при расчёте показатели Q'_w (рис.1) и V'_w (рис.2) используют в качестве параметров состояния в технологической системе диагностики.

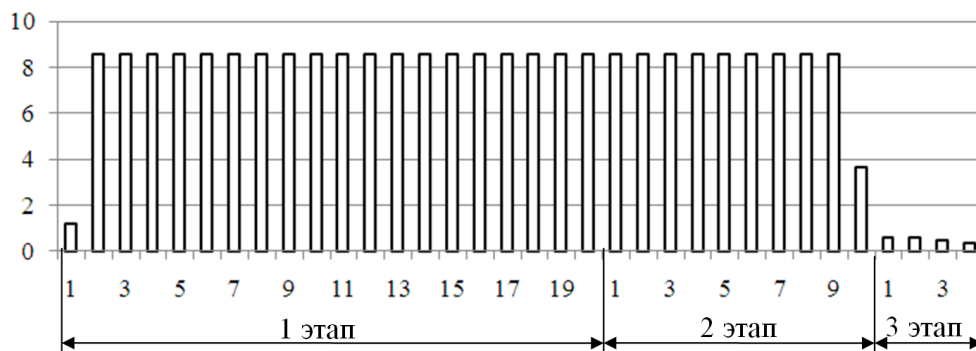
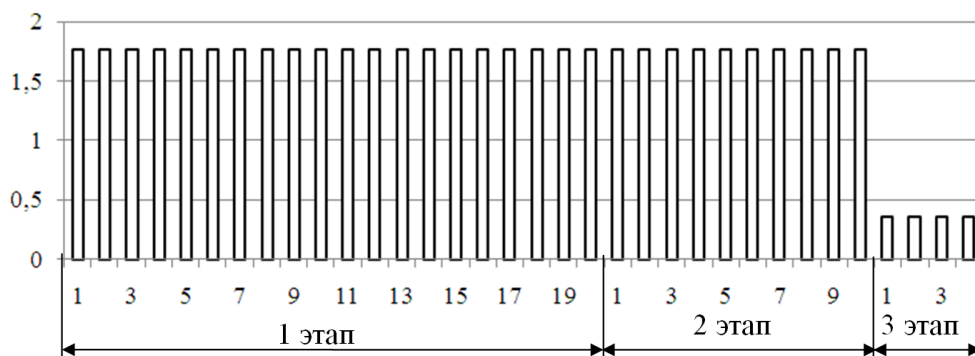


Рис. 1. Изменение параметра Q'_w по этапам и рабочим ходам

Рис. 2 Изменение параметра V'_w по этапам и рабочим ходам

Нормирование технологической операции зубошлифования по этапам обработки (табл.4) позволяет оценивать её трудоёмкость.

Таблица 4. Нормирование технологической операции зубошлифования

Номер этапа	1	2	3
Число рабочих ходов	20	10	4
Припуск z , мм	0,5	0,25	0,02
Сумма Q'_w , мм ³ /мм·с	165,266	81,397	2,125
Сумма V'_w , мм ³ /мм	35,52	17,76	1,44
Время на обработки 40 впадин, мин (с учетом времени правки)	15 мин. 46 сек	9 мин. 41сек	8 мин. 2 сек
Число впадин ЗК между правками	6	6	20
Последовательность обработки	стандарт (последов.)	стандарт (последов.)	секторная (2 сектора)
Общее время обработки – 33 мин 29 сек			

Выводы

1. Разработана прикладная методика определения режимов зубошлифования на станках с ЧПУ, работающих по методу копирования, исходя из разделения показателей Q'_w и V'_w по функциональному назначению: теплонапряженность процесса и ресурс стойкости шлифовального круга, соответственно.

2. Выполнен контрольный пример расчёта режимных параметров зубошлифования: подачи на сторону (нормальная глубина шлифования),

радиальной подачи (вертикальная глубина шлифования) и осевой подачи (скорости детали).

3. Предложено использовать показатели Q'_w и V'_w не только для определения режимов зубошлифования, но одновременно для технологической диагностики операции профильного зубошлифования, когда эти показатели являются параметрами состояния технологической системы.

Литература

1. Klocke F. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping / Fritz Klocke. – Berlin: Springer, 2009. – 433 с.
2. Brecher C. Local simulation of the specific material removal rate for generating gear grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Markus Brumm, Florian Hübner / Gear Technology. – September/October 2015. – P.86-90.
3. Türich A. Innovative concepts for grinding wind power energy gears /A. Türich, C. Kobialka, D. Vucetic // Gear technology. – June 2009. – P. 39-44.
4. Gorgels C. Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Gorgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology. – November/December 2006. – P.34-41
5. Лищенко Н.В. / Определение производительности профильного шлифования на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 11. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – С. 150-162.
6. Лищенко Н.В. Влияние принудительного охлаждения на температуру шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць. – Д.: Ліра. – 2015. – С. 48-54.
7. Ларшин В.П. Технология многониточного резьбошлифования прецизионных ходовых винтов / В.П. Ларшин // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1999. – Вып.2(8) . – С. 87-91.