

7. Булавкин В.В. и др. Особенности маркетинга высоких технологий в машиностроении // Вестник машиностроения. 1995. №10. С. 29 – 33.
8. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для машиностроительных спец. вузов. М.: Высшая школа, 1999. 591 с.
9. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
10. Худобин Л.В., Белов М.А., Унянин А.Н. Базирование заготовок и расчеты точности механической обработки: Учебное пособие. Ульяновск: УлПИ, 1994. 188 с.
11. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. ГОСТ 21495-76. Изд-во стандартов, 1982. 35 с.

Ульяновский государственный технический университет

УДК 621.9.048.4

Д.В.КРАВЧЕНКО, К.Е.ФЕДОСЕЕВ

НОРМИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ВЫРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЗУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ

Предложены для практической реализации три способа электроэрозионного формообразования боковых поверхностей зубьев цилиндрических эвольвентных зубчатых изделий проволочным электродом-инструментом. Разработана методика расчета суммарного машинного времени обработки зубчатого венца при предлагаемых способах электроэрозионного формообразования боковых поверхностей зубьев. Проведены теоретико-экспериментальные исследования по оценке технико-экономической эффективности предлагаемых способов зубоформообразования.

Электроэрозионное вырезание является одним из альтернативных способов размерной обработки сложнопрофильных цилиндрических эвольвентных мелко-модульных и среднемодульных (с модулем $m < 4$ мм) зубчатых изделий (ЗИ) (колёс, секторов, литьевых матриц, пуансонов) в условиях инструментальных производств на предприятиях автомобилестроения, приборостроения, машиностроения для текстильной промышленности.

Нормирование операций электроэрозионного вырезания венцов ЗИ, как и любых других операций размерной обработки заготовок, является одним из ответственных этапов технологической подготовки производства. При электроэрозионном зубо-вырезании венец цилиндрического эвольвентного ЗИ формируется за счёт согласованных, подчинённых законам описания эквидистант эвольвентных боковых поверхностей, поверхностей вершин и впадин между зубьями, координатных перемещений проволочного электрода-инструмента (ЭИ) в осях X и Y (контурная обработка) по траектории, задаваемой от управляющей программы (УП). Для электроэрозионного формообразования боковых поверхностей зубьев ЗИ заданной точности, с целью поиска оптимального с точки зрения технико-экономической эффективности решения, от УП в устройстве ЧПУ электроэрозионного вырезного станка, например, при работе линейного интерполятора, может быть задана такая траектория координатных перемещений ЭИ, при которой:

- шаг между формообразующими точками торцевого эвольвентного профиля боковой поверхности зуба будет неизменным ($nl = \text{const}$), что с одной стороны обеспечивает одинаковые технологические условия протекания процесса формообразования элементарных

участков этого профиля, но с другой стороны приводит к непостоянству погрешности аппроксимации Δ_{a_n} по длине дуги L_{Σ} этого профиля ($\Delta_{a_n} = \text{var}$). Исходя из заданной степени точности ЗИ, условие равенства действительной $\Delta_{a_n}^{\Delta}$ и допустимой $\Delta_{a_n}^{\text{Доп}}$ погрешностей аппроксимации будет обеспечиваться только на первом элементарном участке аппроксимации – у ножки зуба, на остальных $\Delta_{a_n}^{\Delta} \lll \Delta_{a_n}^{\text{Доп}}$, а число N_1 формообразующих точек торцового эвольвентного профиля зуба не будет соответствовать оптимальному (минимально допустимому) [1, 2];

- шаг между формообразующими точками торцового эвольвентного профиля боковой поверхности зуба будет переменным ($nl = \text{var}$) [3], при этом обеспечивается неизменность $\Delta_{a_n}^{\Delta}$ ($\Delta_{a_n} = \text{const}$). Исходя из заданной степени точности ЗИ, на любом из элементарных участков аппроксимации торцового эвольвентного профиля зуба ЗИ $\Delta_{a_n}^{\Delta}$ будет равна $\Delta_{a_n}^{\text{Доп}}$, а N_1 будет весьма близко к оптимальному;

- наиболее ответственный «активный» участок торцового эвольвентного профиля боковой поверхности зуба будет сформирован при выполнении условия $\Delta_{a_n} = \text{const}$ и $\Delta_{a_n}^{\Delta} = \Delta_{a_n}^{\text{Доп}}$, а менее ответственные участки у ножки и модификации головки зуба при $nl = \text{const}$ и числе формообразующих точек, удовлетворяющем минимально допустимым значениям (2 – 3 точки). При окончательной обработке (по предварительно сформированным зубьям) менее ответственные участки формируются на форсированных режимах с более высокой производительностью, отличных от режима обработки «активного» участка, т.е. реализуется способ комбинированной обработки и распределения формообразующих точек. Реализация этого способа позволяет при прочих равных условиях сократить N_1 в 1, 8 раза в сравнении со способом при $nl = \text{const}$ и в 1, 2 раза в сравнении со способом при $\Delta_{a_n} = \text{const}$, что в свою очередь приводит к уменьшению длины L траектории перемещений ЭИ и следовательно нормы суммарного машинного времени $T_{\text{о.э.}\Sigma}$ обработки [4].

Суммарное машинное время обработки венца ЗИ (τ) можно определить по следующим зависимостям:

- при $nl = \text{const}$

$$T_{\text{о.э.}\Sigma}^{\text{C}} = \frac{L_{\text{л}}^{\text{C}} \cdot b \cdot (2 \cdot \delta_{\text{МЭЗ}} + d_{\text{И}})}{Q'} + \frac{L_{\text{л}}^{\text{C}} \cdot b \cdot Z_{\text{min}}}{Q''}; \quad (1)$$

- при $\Delta_{a_n} = \text{const}$

$$T_{\text{о.э.}\Sigma}^{\Delta} = \frac{L_{\text{л}}^{\Delta} \cdot b \cdot (2 \cdot \delta_{\text{МЭЗ}} + d_{\text{И}})}{Q'} + \frac{L_{\text{л}}^{\Delta} \cdot b \cdot Z_{\text{min}}}{Q''}; \quad (2)$$

- при комбинированной обработке и распределении формообразующих точек торцового эвольвентного профиля боковой поверхности зуба ЗИ

$$T_{\text{о.э.}\Sigma}^{\text{K}} = \frac{L_{\text{л}}^{\text{K}} \cdot b \cdot (2 \cdot \delta_{\text{МЭЗ}} + d_{\text{И}})}{Q'} + \left[\frac{L_{\text{л}\Sigma}^{\text{K}} \cdot b \cdot Z_{\text{min}}}{Q'} + \frac{L_{\text{л}}^{\text{K.A}'} \cdot b \cdot Z_{\text{min}}}{Q''} \right]; \quad (3)$$

где b , $\delta_{МЭЗ}$, $d_{и}$, z_{min} , Q' , Q'' – соответственно ширина зубчатого венца, мм; боковой межэлектродный зазор, мм; диаметр ЭИ, мм; припуск на доводку, мм; производительность предварительного и окончательного электроэрозионного зубовырезания, мм³/ч; $L_n^C, L_n^{\Delta}, L_n^K$ – длина траекторий перемещения ЭИ при предварительном зубовырезании и соответственно $nl=const$, $\Delta_a = const$ и комбинированном распределении формообразующих точек, мм

$$L_n^C = F_1(m; z_1; \alpha; h_a^*; x_1; \Delta y; r_{и}; z_{min}; \delta_{МЭЗ}; N_{1_n}^C; N_{2_n}'; N_{3_n}');$$

$$L_n^{\Delta} = F_2(m; z_1; \alpha; h_a^*; x_1; \Delta y; r_{и}; z_{min}; \delta_{МЭЗ}; N_{1_n}^{\Delta}; N_{2_n}'; N_{3_n}');$$

$$L_n^K = F_3(m; z_1; z_2; \alpha; h_a^*; x_1; x_2; \Delta y; r_{и}; z_{min}; \delta_{МЭЗ}; N_{1_n}^K; N_{2_n}'; N_{3_n}'),$$

где m – модуль ЗИ, мм; z_1, z_2 – соответственно число зубьев рассматриваемого ЗИ и сопрягаемого с ним; α – угол профиля, град.; h_a^* – коэффициент высоты головки зуба; x_1, x_2 – соответственно коэффициент смещения исходного контура рассматриваемого ЗИ и сопрягаемого с ним; Δy – коэффициент уравнивающего смещения; $r_{и}$ – радиус ЭИ, мм; $N_{1_n}^C$ [2], $N_{1_n}^{\Delta}$ [3], $N_{1_n}^K$ [4] – число формообразующих точек торцового эвольвентного профиля боковой поверхности зуба при предварительном зубовырезании и соответственно $nl=const$, $\Delta_a = const$ и комбинированном распределении формообразующих точек: $N_{1_n}^K = (N_{1_n}^{H'} + N_{1_n}^{\Delta'} + N_{1_n}^{\Gamma'}) - 2$, где $N_{1_n}^{H'}$, $N_{1_n}^{\Delta'}$, $N_{1_n}^{\Gamma'}$ – число формообразующих точек эвольвентного профиля соответственно у ножки зуба, на «активном» участке, у головки зуба: $N_{1_n}^{H'} = N_{1_n}^{\Gamma'} = 2$; N_{2_n}', N_{3_n}' – число формообразующих точек профиля поверхности соответственно вершины и впадины между зубьями при предварительном вырезании: $N_{2_n}' = N_{3_n}' = 3$; L_n^C, L_n^{Δ} – тоже, что и L_n^C, L_n^{Δ} , только при окончательном зубовырезании, мм

$$L_n^C = F_4(m; z_1; \alpha; h_a^*; x_1; \Delta y; r_{и}; z_{min}; \delta_{МЭЗ}; N_{1_n}^C; N_{2_n}''; N_{3_n}'');$$

$$L_n^{\Delta} = F_5(m; z_1; \alpha; h_a^*; x_1; \Delta y; r_{и}; z_{min}; \delta_{МЭЗ}; N_{1_n}^{\Delta}; N_{2_n}''; N_{3_n}''),$$

где $N_{1_n}^C$ [2], $N_{1_n}^{\Delta}$ [3] – тоже, что и $N_{1_n}^C, N_{1_n}^{\Delta}$, только при окончательном зубовырезании; N_{2_n}'', N_{3_n}'' – тоже, что и N_{2_n}', N_{3_n}' , только при окончательном зубовырезании: $N_{2_n}'' = N_{3_n}'' = 4$; L_{Σ}^K – длина траектории перемещения ЭИ при комбинированной обработке и окончательном зубовырезании поверхностей ножки, вершины, впадины и головки зуба, мм:

$$L_{\Sigma}^K = F_6(m; z_1; z_2; \alpha; h_a^*; x_1; x_2; \Delta y; r_{и}; z_{min}; \delta_{МЭЗ}; N_{1_n}^{H''}; N_{1_n}^{\Gamma''}; N_{2_n}''; N_{3_n}''),$$

где $N_{1_n}^{H''}, N_{1_n}^{\Gamma''}$ – тоже, что и $N_{1_n}^{H'}, N_{1_n}^{\Gamma'}$, только при окончательном зубовырезании: $N_{1_n}^{H''} = 2$, $N_{1_n}^{\Gamma''} = 3$ при $z_1 = 20 - 40$; $N_{1_n}^{H''} = 3, N_{1_n}^{\Gamma''} = 2$ при $z_1 = 40 - 80$; $L_{\Sigma}^{K, \Delta}$ – длина траектории перемещения ЭИ при комбинированной обработке и окончательном зубовырезании поверхностей «активных» участков, мм

$$L_{\Sigma}^{K, \Delta} = F_7(m; z_1; z_2; \alpha; h_a^*; x_1; x_2; \Delta y; r_{и}; z_{min}; \delta_{МЭЗ}; N_{1_n}^{\Delta}),$$

где $N_{1,x}^{A'}$ [4] тоже, что и $N_{1,x}^A$, только при окончательном зубовырезании.

Рассмотрим операцию электроэрозионного зубовырезания при следующих условиях:

№	Исходные данные для расчета $T_{0,э.Σ}$ при различных способах формообразования боковых поверхностей зубьев	Степень точности ЗИ					
		8-ая		7-ая		6-ая	
		Пред-вар. обра-ботка	Окон-чат. обра-ботка	Пред-вар. обра-ботка	Окон-чат. обра-ботка	Пред-вар. обра-ботка	Окон-чат. обра-ботка
1	Электроэрозионный вырезной станок	СВЭИ – 7					
2	Генератор импульсов	ГКИ – 300 – 200 А					
3	Устройство ЧПУ	2М43 – 55					
4	m, мм (рекомендуемые значения по источнику [5])	1; 2; 3; 4		1; 2; 3		1; 1,5; 2	
5	z_1, z_2	45; 45					
6	$α; h_a^*; x_1; x_2; Δy$	$20^0; 1; 0; 0; 0$					
7	$d_{нн}$, мм; b, мм	0,2; 6					
8	$δ_{мэзэ}$, мм	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03	0,007
9	$Z_{мин}$, мм	–	0,022	–	0,01	–	0,008
10	Q' , мм ³ /ч	171	–	171	–	171	–
11	Q'' , мм ³ /ч	–	29,5	–	25,4	–	17,8
12	Шероховатость обработанной поверхности венца ЗИ по параметру R_n , мкм	3,2	1,6	3,2	0,8	3,2	0,4

При известных исходных данных и предварительно полученных по программе «LWEG – ZUB» значениях $L_n^C, L_n^{A'}, L_n^{K'}, L_n^C, L_n^{A'}, L_n^{K,A'}, L_n^{K'}$ были рассчитаны значения $T_{0,э.Σ}^C, T_{0,э.Σ}^{A'}, T_{0,э.Σ}^{K'}$ и построены зависимости $T_{0,э.Σ}$ от модуля m ЗИ различной степени точности.

На основе полученных зависимостей сделаны следующие выводы.

1. Независимо от рассматриваемой степени точности ЗИ и способа электроэрозионного формообразования боковых эвольвентных поверхностей зубьев норма суммарного машинного времени $T_{0,э.Σ}$ возрастает пропорционально увеличению размеров ЗИ (модуля m). Наблюдается линейная зависимость $T_{0,э.Σ}$ от m.
2. С ужесточением требований к точности ЗИ затраты времени на формобразование зубчатых венцов возрастают, например, на 6 % для ЗИ седьмой степени точности по сравнению с обработкой ЗИ восьмой степени точности и на 22 % для ЗИ шестой степени точности по сравнению с обработкой ЗИ восьмой степени точности независимо от способа электроэрозионного формообразования боковых эвольвентных поверхностей зубьев.

3. Наиболее эффективным в своей реализации является способ комбинированной электроэрозионной обработки и распределения формообразующих точек торцового эвольвентного профиля боковой поверхности зуба ЗИ. Независимо от степени точности ЗИ и их размеров при прочих равных условиях способ комбинированной обработки позволяет сократить $T_{0.9, \Sigma}$ на 25 % по сравнению со способом при $nl=const$, на 20 % по сравнению со способом при $\Delta_{a_1}=const$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко Д.В. Обеспечение точности цилиндрических зубчатых изделий на операциях электроэрозионного вырезания, выполняемых на станках с ЧПУ: Дис.... канд. техн. наук. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 333 с.
2. Худобин Л.В., Рязанов С.И., Кравченко Д.В. Точность формы эвольвентных боковых поверхностей зуба, обеспечиваемая электроэрозионным вырезанием на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. 1998. №10. С. 32 – 36.
3. Кравченко Д.В., Юдаков Д.В. К вопросу обеспечения точности формы эвольвентных боковых поверхностей зубьев электроэрозионным вырезанием на станках с ЧПУ при линейной интерполяции // Вестник УлГТУ. Серия «Машиностроение, строительство». Ульяновск: УлГТУ, 1999. Вып. 3. С.77 – 81.
4. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка научных основ ресурсосберегающих технологий изготовления деталей машин» (заключительный). г/б НИР № 34 – 48. Ульяновск: УлГТУ, 2001. 118 с.
5. Худобин Л.В., Кравченко Д.В., Рязанов С.И. Точность взаимного расположения боковых поверхностей зубьев колеса при электроэрозионной обработке // СТИН. 1999. №4. С. 34–38.

Ульяновский государственный технический университет

УДК 621.315.592

О.Г. КРУПЕННИКОВ, А.В. КИНЬШИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРЕЗАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СТАБИЛИЗИРОВАННЫМИ ОТРЕЗНЫМИ КРУГАМИ

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса разрезания заготовок из неметаллических материалов алмазными отрезными кругами с наружной и внутренней режущей кромкой с использованием гидро- и пневмостабилизирующих устройств, а также пассивной контактной стабилизации.

На современном этапе развития микроэлектроники к качеству подложек, на которых формируют элементы топологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, предъявляют беспрецедентно высокие требования. При этом известно, что наибольшее количество дефектов на подложках возникает в ходе проведения операции разрезания заготовок (слитков). Применение устройств, стабилизирующих режущую кромку отрезного круга, позволяет не только улучшить качество полученных пластин, но и снизить потери дорогостоящего материала на пропил [1].