

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При проектировании технологических процессов изготовления деталей и совершенствовании существующих назначение условий формообразования поверхностей деталей на различных операциях механической обработки осуществляется, как правило, на основе использования общемашиностроительных, либо отраслевых нормативов по режимам резания. Однако выбранные условия далеко не всегда являются рациональными. Применение теории оптимизации при проектировании технологических процессов является одним из перспективных направлений повышения производительности и качества обработки деталей. При этом роль оптимизации условий обработки значительно возрастает на предприятиях, где реализуется цифровое производство изделий, в частности газотурбинных двигателей. На этих предприятиях автоматизации подготовки производства уделяется очень большое внимание. Вместе с тем следует отметить, что оптимизация всех операций технологического процесса является очень сложной задачей. Поэтому определение рациональных условий обработки в первую очередь следует осуществлять на окончательных и финишных операциях, где обеспечиваются заданная геометрическая точность деталей и качество поверхностного слоя [1]. К этим операциям, безусловно, принадлежат процессы шлифования. Из всего многообразия этих процессов наиболее широко распространены процессы круглого наружного и внутреннего шлифования, а также плоского шлифования. Поэтому тема научно-квалификационной работы, направленная на повышение эффективности процессов шлифования на основе определения рациональных условий резания, безусловно, является актуальной.

В работе проанализированы математические модели управления процессами механической обработки и методы реализации этих моделей. Проанализированы факторы, влияющие на производительность обычного и прерывистого шлифования, такие как стойкость шлифовального инструмента, силы резания, тепловые явления в заготовке и инструменте, состояние поверхностного слоя после проведения обработки, шероховатость поверхности и остаточные напряжения.

Математическая модель для определения рациональных условий обработки при плоском шлифовании периферией круга на станках с прямоугольным столом имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 \leq b_1; \\ 0,7x_1 + 0,7x_2 + 0,7x_3 \leq b_2; \\ x_1 + x_2 + x_3 \leq b_3 \\ 0,2x_1 + 0,7x_2 + 0,45x_3 \leq b_4; \\ 0,5x_1 + 0,5x_2 + 0,25x_3 \leq b_5; \\ n_{\sigma_\tau} x_1 + m_{\sigma_\tau} x_2 + k_{\sigma_\tau} x_3 \leq b_6; \\ x_1 \geq b_7; \\ x_1 \leq b_8; \\ x_2 \geq b_9; \\ x_2 \leq b_{10}; \\ x_3 \geq b_{11}; \\ x_3 \leq b_{12}; \end{array} \right.$$

$$11. f_0 = c_0 - x_1 - x_2 - x_3,$$

где

$$x_1 = \ln v_\delta; \quad x_2 = \ln(10S_x); \quad x_3 = \ln(1000S_{t_x});$$

$$b_1 = \ln \frac{0,35 \cdot 10^8 B_\kappa^2}{T_\kappa} k_1^T k_2^T k_3^T; \quad b_2 = \ln \frac{10^{2,8} \cdot N_{\text{эд.ун}} \eta}{0,63 B_\kappa^{0,25} k_1^N k_2^N k_3^N};$$

$$b_3 = \ln \frac{C_S D_\kappa \Delta^{0,32} \cdot 10^4}{T^{0,75}} K_H K_B K_l K_D K_\delta K_M;$$

$$b_4 = \ln \frac{0,1816 \cdot 10^{-5,45} \lambda B_\kappa^{0,75} D_\kappa^{0,25} (\theta_{\kappa p} - \theta_0)}{a^{0,5} k_Q k_1^N k_2^N k_3^\theta};$$

$$b_5 = \ln \frac{Ra(60 \cdot 10 v_\kappa B_\kappa)^{0,5} (1000 D_\kappa)^{0,25}}{C_{Ra} (k_{\text{общ}} d_{\text{зеп}})^{0,5} k_{Ra} n^{m_{Ra}}};$$

$$b_6 = \ln \frac{\sigma_{\tau \max}^* \cdot 10^{m_{\sigma_\tau}} \cdot 1000^{k_{\sigma_\tau}}}{C_{\sigma_\tau}}; \quad b_7 = \ln v_{\delta, cm \min}; \quad b_8 = \ln v_{\delta, cm \max};$$

$$b_9 = \ln(10S_{x cm \min}); \quad b_{10} = \ln(10S_{x cm \max});$$

$$b_{11} = \ln(1000S_{t_x cm \min}); \quad b_{12} = \ln(1000S_{t_x cm \max});$$

$$f_0 = \ln t_{0,нл.у}; \quad c_0 = \ln \frac{11 \cdot L_u B_u \Delta}{q_\delta}.$$

В уравнениях-неравенствах:

v_δ – скорость движения (продольная) стола шлифовального станка, м/мин; S_x – поперечная подача на один ход стола, мм/ход; S_{t_x} – подача на глубину на один ход стола, мм/ход; B_κ – высота круга, мм; T_κ – период стойкости шлифовального круга, мин; k_1^T – коэффициент, учитывающий влияние физико-механических

свойств группы сталей и сплавов, к которой относится обрабатываемый материал, и их состояния на период стойкости круга; k_2^T, k_3^T – коэффициенты, учитывающие, соответственно, влияние размера и конструкции круга на его период стойкости; $N_{эдшб}$ – мощность электродвигателя шлифовальной бабки станка, кВт; η – КПД механизма шлифовальной бабки; k_1^N, k_2^N, k_3^N – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние соответственно изменения твёрдости шлифовального круга, физико-механических свойств группы сталей и сплавов, к которой относится обрабатываемый материал, и конструкции круга на эффективную мощность; C_S – коэффициент, учитывающий условия обработки при определении величины подачи; D_k – диаметр шлифовального круга, мм; Δ – припуск на обработку при шлифовании, мм; K_H – коэффициент, учитывающий толщину обрабатываемой детали; K_B – коэффициент, учитывающий ширину детали; K_l – коэффициент, учитывающий длину детали; K_D – коэффициент, учитывающий диаметр шлифовального круга; K_δ – коэффициент, учитывающий точность (калитет) обработки; K_M – коэффициент, учитывающий группу сталей и сплавов, к которой относится обрабатываемый материал; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\theta_{кр}$ – величина критической температуры в зоне контакта круга с заготовкой, °С; θ_0 – начальная температура поверхности заготовки; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; k_Q – коэффициент, показывающий, какая доля выделившейся при шлифовании тепловой мощности поступила в обрабатываемую заготовку; k_3^θ – коэффициент, учитывающий влияние конструкции шлифовального круга на изменение температуры в зоне контакта круга с деталью; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; v_k – скорость круга, м/с; C_{Ra}, m_{Ra} – коэффициент и показатель степени, зависящие от группы обрабатываемых материалов и вида шлифования; $k_{общ}$ – коэффициент, учитывающий влияние марки абразивного материала, поверхностной пористости и структуры шлифовального круга, а также условий его правки на формирование шероховатости поверхности; k_{Ra} – коэффициент, учитывающий влияние конструкции шлифовального круга на шероховатость поверхности; $d_{зеп}$ – размер абразивного зерна, мм; n – число ходов выхаживания; $\sigma_{\tau \max}^*$ – максимальная величина допустимых значений окружных растягивающих остаточных напряжений, МПа; $n_{\sigma_\tau}, m_{\sigma_\tau}, k_{\sigma_\tau}$ – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния, со-

ответственно, v_o, S_x, S_{t_x} на величину окружных растягивающих остаточных напряжений; C_{σ_τ} – коэффициент, учитывающий влияние условий обработки на величину окружных остаточных напряжений; $v_{o.cm \min}$ – минимальная скорость движения стола плоскошлифовального станка, м/мин; $v_{o.cm \max}$ – максимальная скорость движения стола плоскошлифовального станка, м/мин; $S_{x.cm \min}$ – минимальная поперечная подача стола станка, мм/ход; $S_{x.cm \max}$ – максимальная поперечная подача стола станка, мм/ход; $S_{t_x.cm \min}$ – минимальная подача на глубину, обеспечиваемая механизмом подач станка, мм/ход; $S_{t_x.cm \max}$ – максимальная подача на глубину, обеспечиваемая механизмом подач станка, мм/ход; t_o – основное (машинное) время обработки, мин; $l_{ш}$ – длина пути шлифовального круга в направлении продольной подачи, мм; $B_{ш}$ – ширина шлифования или габаритная ширина расположения шлифуемых поверхностей на столе станка, мм; q_o – количество одновременно обрабатываемых деталей, шт.

Решение задачи по определению рациональных условий резания при плоском шлифовании, также, как и при решении задачи при определении рациональных условий резания при круглом наружном и внутреннем шлифовании, было упрощено путём приведения системы с тремя неизвестными к системе с двумя неизвестными. Для осуществления данного преобразования x_1 выражено из четвертого ограничения неравенства, связанного с температурой:

$$x_1 = 5b_4 - 3,5x_2 - 2,25x_3.$$

После проведения преобразований система приняла следующий вид [2]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} -5x_2 & -2,5x_3 \leq b_1 - 10b_4; \\ -1,75x_2 & -0,875x_3 \leq b_2 - 3,5b_4; \\ -2,5x_2 & -1,25x_3 \leq b_3 - 5b_4; \\ -1,25x_2 & -0,875x_3 \leq b_5 - 2,5b_4; \\ (m_{\sigma_\tau} - 3,5n_{\sigma_\tau})x_2 + (k_{\sigma_\tau} - 2,25n_{\sigma_\tau})x_3 \leq b_6 - 5n_{\sigma_\tau}b_4; \\ -3,5x_2 & -2,25x_3 \geq b_7 - 5b_4; \\ -3,5x_2 & -2,25x_3 \leq b_8 - 5b_4; \\ x_2 & \geq b_9; \\ x_2 & \leq b_{10}; \\ & x_3 \geq b_{11}; \\ & x_3 \leq b_{12}. \end{array} \right.$$

$$f_0 = c_0 - 5b_4 + 2,5x_2 + 1,25x_3.$$

В данной модели за x_{1-3} приняты режимные параметры обработки, а за b_{1-12} ограничения. При этом b_1 – ограничение, связанное со стойкостью шлифовального круга, b_2 – ограничение, связанное с мощностью станка, b_3 – ограничение, связанное с точностью обработки, b_4 – ограничение, связанное с температурой обработки, b_5 – ограничение, связанное с шероховатостью после обработки, b_6 – ограничение, связанное с остаточными напряжениями, b_{7-12} – ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка, f_0 – целевая функция оптимизации.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет отойти от нормативного принципа назначения режимов резания и подобрать наиболее оптимальный режим с точки зрения производительности обработки.

Библиографический список

1. Скуратов, Д.Л. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Ч.1: учеб. пособие / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов. – Самара: изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 196 с.
2. Skuratov D.L., Fedorov D.G. Temperature fields in grinding by abrasive wheels / Russian Engineering Research // Allerton Press Inc., Volume 37, Issue 6, 2017, Pages 557-560.

УДК 621.787:539.319

Злобин А.С., Вакулюк В.С., Кочерова Е.Е., Сургутанов Н.А., Пилипив О.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛТОВ М6 ИЗ СПЛАВА ВТ16 В ВЕРШИНЕ КОЛЬЦЕВОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Под малоцикловой усталостью понимается усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании [1].

Разрушение от малоцикловой усталости – это разрушение в условиях повторного упругопластического деформирования с числом циклов (к моменту образования макротрещины или окончательному разрушению) до $5 \cdot 10^4 \dots 10^5$, которое является условной границей малоцикловой $10 \dots 10^5$ и многоцикловой $10^5 \dots 10^8$ усталости для пластичных материалов и определяет среднее число циклов для зоны перехода от упругопластического к упругому циклическому деформированию. Для высокопрочных материалов переходная зона смещена в сторону большей долговечности, для хрупких – в сторону меньшей долговечности [2].