

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ
НА ОПЕРАЦИЯХ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ И**

© 2006 С.Ю. Сидоров, Д.Л. Скуратов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Разработана математическая модель для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания при изготовлении ответственных деталей аэрокосмической техники, на базе которой созданы алгоритм и программа расчета.

Применение теории оптимизации на этапе совершенствования существующих и разработки новых технологических процессов изготовления деталей дает реальную возможность повышения качества продукции, снижения трудоемкости и себестоимости ее изготовления. Однако оптимизация всего технологического процесса является сложной и очень трудоемкой задачей. Поэтому данное направление совершенствования проектирования технологических процессов в первую очередь целесообразно использовать на финишных операциях, на которых обеспечиваются заданные геометрические параметры и окончательно формируется поверхностный слой деталей, то есть на операциях, которые в большей степени по сравнению с другими влияют на надежность деталей.

Исходя из вышеизложенного, был разработан метод определения рациональных условий формообразования поверхностей на финишных операциях механической обработки заготовок [5]. Этот метод базируется на использовании принципа структурно-параметрической оптимизации с последующим уточнением полученных результатов на основе анализа кинетики тепловых процессов рассматриваемых видов обработки. Сам процесс оптимизации основан на использовании математических моделей, описывающих рассматриваемые процессы механической обработки.

Учитывая, что формообразование наружных и внутренних цилиндрических поверхностей и конических поверхностей с небольшим углом конусности, наиболее часто осуществляется методом продольной подачи инструмента с использованием процессов чистового точения и растачивания и

круглого наружного и внутреннего шлифования, эти виды обработки введены в управляемые параметры [6, 7].

В настоящей работе предлагается математическая модель для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания, что позволит в определенной мере расширить возможности вышеупомянутого метода.

Алмазное выглаживание является одним из наиболее распространенных методов отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических и конических поверхностей деталей различного назначения. Так, например, алмазному выглаживанию подвергаются шпиндельные узлы высокоточных станков, гильзы, ролики подшипников, поршни, золотники, валы компрессоров и турбин ГТД, втулки торцовых контактных уплотнений, детали шасси самолетов и другие детали, изготавливаемые из сталей 45, 20Х, 40Х, 35ХН, 40ХНМА, 30ХГСНА ($\sigma_B = 1600 \dots 1700$ МПа), ШХ15, 1Х12Н2ВМФ, азотированных сталей Х12Н20ТЗР и 38ХМЮА, жаропрочных никелевых сплавов, бронз, алюминиевых сплавов [1, 2, 3, 4]. Алмазному выглаживанию подвергаются также детали до и после нанесения покрытия (хромовые, никелевые и др.) [1, 2, 3].

В качестве управляемых параметров алмазного выглаживания используются: скорость выглаживания (скорость обработки) - v , м/мин; подача - S , мм/об; радиальная сила (сила выглаживания) - P_y , Н.

В качестве целевой функции при алмазном выглаживании заготовок целесообразно использовать уравнение, определяющее машинное время обработки [6, 7].

Уравнение целевой функции будет иметь вид:

$$f_m = 100 \frac{i \cdot l_m}{100 S \cdot n}, \quad (1)$$

где i - число проходов; l_m - длина пути инструмента в направлении подачи, мм; S - подача, мм/об; n - частота вращения заготовки, мин^{-1} .

В уравнении (1) и последующих технических ограничениях для удобства вычислений принято $100S$ вместо S с соответствующими поправками.

Ограничение, связанное со стойкостью инструмента.

При алмазном выглаживании большинства обрабатываемых материалов, так же как и при алмазном точении, основным видом износа является абразивно-адгезионный износ. Причем адгезионное взаимодействие в практическом диапазоне не зависит от режимов обработки [1, 2]. Поэтому наработка (пройденный путь) выглаживающего алмазного инструмента будет определяться абразивно-адгезионными свойствами обрабатываемого материала и физико-механическими свойствами материала инструмента. В связи с этим на период стойкости инструмента будет оказывать только скорость обработки:

$$T = \frac{C_v}{v},$$

где $C_v = 70000 \dots 200000$ м (для синтетического алмаза) – коэффициент (наработка), зависящий от свойств материалов заготовки и инструмента.

Скорость обработки при алмазном выглаживании определяется на основании неравенства:

$$v \leq \frac{C_v}{T}.$$

Получим первое техническое ограничение:

$$n \leq \frac{318 k_m C'_v}{TD}, \quad (2)$$

где k_m - поправочный коэффициент, учитывающий изменение реальных условий обработки относительно тех, при которых определялся коэффициент C'_v ; $T = 600 \dots 1800$ мин ($0 \dots 30$ час) – заданная стойкость выглаживателя; D - диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

Ограничение, связанное с мощностью станка.

При алмазном выглаживании необходимо, чтобы эффективная мощность $N_{эф}$ не превышала мощности, подводимой к шпинделю станка, то есть выполнялось условие

$$N_{эф} \leq N_{инп},$$

где $N_{эф}$ - эффективная мощность, кВт; $N_{инп}$ - мощность, подводимая к шпинделю станка, кВт.

Практические значения эффективной мощности выглаживания обычно не превышают 0,2 кВт (при $P_y \leq 30$ Н, $v \leq 400$ м/мин [1]), поэтому данное ограничение можно исключить из рассмотрения.

Ограничение, связанное с точностью обработки.

В процессе алмазного выглаживания обрабатываемый размер уменьшается на величину [1]:

$$\Delta d = \frac{4}{3} (Rz_{ucx} - Rz).$$

Для обработки заданной поверхности заготовки с погрешностью, не превышающей допуск на диаметральный размер обрабатываемой поверхности, необходимо выполнить следующее условие:

$$\frac{4}{3} C_{Rz} (Ra_{ucx} - Ra) \leq k_3 \delta,$$

где C_{Rz} - коэффициент перевода параметра шероховатости Ra в Rz ; Rz_{ucx} или Ra_{ucx} - параметр исходной шероховатости, мкм; k_3 - коэффициент, показывающий, в какую часть допуска должна укладываться погрешность, вызванная деформацией обработки; δ - допуск на размер обрабатываемой поверхности, мм.

При алмазном выглаживании зависимость $Ra = f(P_y)$ имеет выраженный минимум, который определяет границу сглаживающего и упрочняющего режимов.

Величина шероховатости обработанной поверхности в области практического изменения управляемых параметров выглаживания для названных типов выглаживания адекватно описывается выражением:

$$Ra = C_s S^y P_y^x Ra_{ucx}^n R^m v^z,$$

где C_s, n, m, x, y, z - коэффициент и показатели степени, зависящие от обрабатываемого материала; R - радиус инструмента, мм. При этом для сглаживающего режима пока-

затель степени $x < 0$, а для упрочняющего режима $x > 0$.

Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$n^z (100S)^y P_y^x \geq 318^z 100^y \frac{C_{Rz} Ra_{ucx} - 0,75k_3 \delta}{C_s C_{Rz} D^z Ra_{ucx}^n R^m}. \quad (3)$$

Неравенство (3) является вторым техническим ограничением.

Ограничение, связанное с предельно допустимой шероховатостью обрабатываемой поверхности

$$C_s S^y P_y^x Ra_{ucx}^n R^m v^z \leq Ra.$$

Обработка заданной поверхности заготовки с допуском шероховатостью поверхности может быть осуществлена при условии:

$$n^z (100S)^y P_y^x \leq \frac{100^y 318^z Ra}{C_s D^z Ra_{ucx}^n R^m}. \quad (4)$$

Неравенство (4) является третьим техническим ограничением.

Ограничение, связанное с температурой обработки.

При алмазном выглаживании заготовок температура в зоне резания, а также время нагрева и охлаждения могут быть достаточными для того, чтобы в поверхностном слое произошли структурно-фазовые превращения. Кроме того, практически у всех металлов и сплавов при температуре более 550...600°C резко возрастает адгезионное взаимодействие с алмазом и, вследствие этого, происходит катастрофический износ инструмента. Поэтому необходимо, чтобы температура в зоне резания не превышала критических значений, то есть должно выполняться условие:

$$\theta \leq \theta_{кр},$$

где θ - температура в зоне резания, °C; $\theta_{кр}$ - критическая температура в зоне резания, °C.

Температура в зоне резания при алмазном выглаживании заготовок монотонно изменяется с изменениями параметров P_y , S , v и может быть описана эмпирической зависимостью:

$$\theta = C_\theta P_y^{x_\theta} S^{y_\theta} v^{z_\theta} R^{m_\theta},$$

где C_θ - коэффициент, отражающий влияние условий обработки на температуру в зоне резания; $x_\theta, y_\theta, z_\theta, m_\theta$ - показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно P_y , S , v и R на величину температуры резания.

Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$n^{z_\theta} (100S)^{y_\theta} P_y^{x_\theta} \leq \frac{\theta_{кр} \cdot 318^{z_\theta} \cdot 100^{y_\theta}}{C_\theta D^{z_\theta} R^{m_\theta}}. \quad (5)$$

Ограничения, связанные с кинематическими возможностями станка, используемого для точения или растачивания заготовки.

При обработке заготовки частота ее вращения и продольная подача, сообщаемая инструменту, должны быть ограничены, соответственно, максимальной и минимальной частотами вращения шпинделя и наибольшей и наименьшей подачами, приведенными в паспорте станка. Тогда технические ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка, будут иметь вид:

$$n \geq n_{cm \min}, \quad (6)$$

где $n_{cm \min}$ - минимальная частота вращения шпинделя станка, мин⁻¹;

$$n \leq n_{cm \max}, \quad (7)$$

где $n_{cm \max}$ - максимальная частота вращения шпинделя станка, мин⁻¹;

$$100S \geq 100S_{cm \min}, \quad (8)$$

где $S_{cm \min}$ - минимальная продольная подача станка, мм/об;

$$100S \leq 100S_{cm \max}, \quad (9)$$

где $S_{cm \max}$ - максимальная продольная подача станка, мм/об.

Значение радиальной силы должно соответствовать условию смятия исходных микронеровностей при сглаживающем или условию упрочнения при упрочняющем выглаживании. Величина силы выглаживания

$$P_y = \pi \epsilon HV \left(\frac{DR}{D+R} \right)^2$$

определяется относительным внедрением инструмента $\epsilon = h/R$, где h , мм - глубина выглаживания, HV - твердость обрабатываемого материала по Викерсу.

В зависимости от режима (сглаживающего или упрочняющего) задается глубина выглаживания

$$h = k_i R z_{ucx},$$

где $k_i = 0,7 \dots 1,3$ - коэффициент вдавливания инструмента, $i = 1, 2$ - индексы соответственно нижнего и верхнего пределов глубины выглаживания.

Технические ограничения, обусловленные требованиями выглаживания, будут иметь вид:

$$P_y \geq \pi HV \frac{k_1 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left(\frac{DR}{D+R} \right)^2, \quad (10)$$

$$P_y \leq \pi HV \frac{k_2 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left(\frac{DR}{D+R} \right)^2 \quad (11)$$

Для сглаживающего режима $k_1 = 0,7$, $k_2 = 1,0$; для упрочняющего режима $k_1 = 1,1$, $k_2 = 1,3$.

Преобразуем полученные выше неравенства, связывающие технические ограничения с элементами режима выглаживания, а также целевую функцию, в линейные ограничения-неравенства и линейную целевую функцию. Решение полученной системы линейных уравнений при заданных определяющих и управляемых параметрах позволит на стадии проектирования технологического процесса определить рациональные условия обработки для алмазного выглаживания заготовок и гарантированно обеспечить при этом заданное значение конструктивных параметров.

Для получения системы линейных ограничений-неравенств и линейной целевой функции, моделирующих процесс алмазного выглаживания, прологарифмируем зависимости (1) - (11), которые после введения соответствующих обозначений будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 \leq b_1; \\ z x_1 + y x_2 + x x_3 \geq b_2; \\ z x_1 + y x_2 + x x_3 \leq b_3; \\ z_{\theta} x_1 + y_{\theta} x_2 + x_{\theta} x_3 \leq b_4; \\ x_1 \geq b_5; \\ x_1 \leq b_6; \\ x_2 \geq b_7; \\ x_2 \leq b_8; \\ x_3 \geq b_9; \\ x_3 \leq b_{10}; \end{array} \right. \quad (12)$$

$$f_0 = c_0 - x_1 - x_2; \quad (13)$$

где $x_1 = \ln n$; $x_2 = \ln(100S)$; $x_3 = \ln P_y$;

$$b_1 = \ln \frac{318 k_M C'_v}{TD};$$

$$b_2 = \ln 318^z 100^y \frac{C_{Rz} Ra_{ucx}^{-0,75} k_3 \delta}{C_s C_{Rz} D^z Ra_{ucx}^n R^m};$$

$$b_3 = \ln \frac{100^y 318^z Ra}{C_s D^z Ra_{ucx}^n R^m};$$

$$b_4 = \ln \frac{\theta_{кр} \cdot 318^{z_{\theta}} \cdot 100^{y_{\theta}}}{C_{\theta} D^{z_{\theta}} R^{m_{\theta}}}; \quad b_5 = \ln n_{cm \min};$$

$$b_6 = \ln n_{cm \max}; \quad b_7 = \ln(100 S_{cm \min});$$

$$b_8 = \ln(100 S_{cm \max});$$

$$b_9 = \ln \left(\pi HV \frac{k_1 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left(\frac{DR}{D+R} \right)^2 \right);$$

$$b_{10} = \ln \left(\pi HV \frac{k_2 C_{Rz} Ra_{ucx}}{R} \left(\frac{DR}{D+R} \right)^2 \right);$$

$$f_0 = \ln f_m; \quad c_0 = \ln(100 \cdot i \cdot l_m)$$

Полученная система линейных ограничений-неравенств (12) и линейная функция (13) представляют собой математическую модель для определения рационального режима обработки при алмазном выглаживании заготовок.

На основании полученной математической модели созданы алгоритм и программа расчета для определения рациональных условий алмазного выглаживания заготовок.

Список литературы

1. Горбило В.М. Алмазное выглаживание. - М.: Машиностроение, 1972, - 105 с.

2. Абразивная и алмазная обработка материалов /Под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. - 391 с.

3. Модифицирование поверхностей деталей ГТД по условиям эксплуатации / В.С. Мухин, А.М. Смыслов, С.М. Боровский. - М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.

4. Митряев К.Ф. Повышение эксплуатационных свойств деталей путем регулирования состояния поверхностного слоя при механической обработке: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1986, 91 с.

5. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н. Определение рациональных условий формообразования на этапе проектирования окончательных операций обработки цилиндрических поверхностей деталей газотурбинных двигателей // Известия Тульского государственного

университета. Сер. Машиностроение. Тула, 2003. Вып. 2. С. 324-328.

6. Скуратов Д.Л. Разработка математической модели для определения рациональных условий обработки на операциях чистового точения и растачивания при изготовлении деталей авиакосмической техники // РК техника. Сер. XII. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. Научно – технич. сб. Самара, 2001. Вып. 1. С. 182-193.

7. Скуратов Д.Л. Разработка математической модели для определения рациональных условий обработки на операциях круглого шлифования при изготовлении деталей авиационной техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Сер. Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Самара, 2001. Вып. 5. Ч. 2. С. 115-130.

DEVELOPMENT OF MATHEMATIC MODEL FOR DETERMINATION OF RATIONAL PROCESSING ENVIRONMENTS ON DIAMOND BURNISHING OPERATIONS USED FOR MANUFACTURING PARTS OF AEROSPACE TECHNICS

© 2006 S.U. Sidorov, D.L. Skuratov

Samara State Aerospace University

Mathematic model for determination of rational processing environments on diamond burnishing operations used for manufacturing responsible parts of aerospace technics was developed. Algorithm and calculation program were made basing on this model.