

УДК 621.787.4

О.Н. Федонин, С.В. Степошина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ППД

Выведена целевая функция для выбора оптимальных скорости и подачи, обеспечивающих максимальную производительность и минимальные затраты при обработке ППД.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, ППД, скорость, подача, производительность, приведенные затраты.

Основной целью технологического процесса в машиностроении является обеспечение заданных параметров качества детали наиболее производительным путем при минимальных затратах.

При анализе возможностей методов ОУО ППД для повышения качества поверхности деталей машин было выявлено, что одно и то же сочетание параметров качества поверхностного слоя (ПКПС) можно получить различными методами ОУО ППД. Следовательно, необходимо обосновать эффективность технологической операции пластического деформирования и ее элементов [13, 14].

В связи с этим необходимо составить математическую модель для выбора рациональных условий ППД по комплексному критерию, включающему в себя производительность и приведенные затраты.

Основными параметрами режима ППД являются сила ( $P$ ), подача ( $S_0$ ) и скорость обработки ( $V$ ). Сила оказывает влияние как на физико-механические, так и на геометрические характеристики качества поверхностного слоя деталей машин. С помощью варьирования силы можно формировать требуемый вид ОУО ППД (отделочная, отделочно-упрочняющая или упрочняющая) [10].

Продольная подача  $S_0$  оказывает влияние на формирование параметров шероховатости поверхностного слоя. Меньшие подачи рекомендуется применять для получения более качественных поверхностей, а также при более грубой исходной шероховатости и малой жесткости заготовки.

Скорость обработки  $V$  при ППД основное влияние оказывает на физико-механические параметры качества поверхностного слоя (за счет тепловых явлений в зоне контакта инструмент-заготовка) [10-12].

При выборе рациональных условий процесса ППД допустимо оптимизировать значения подачи и скорости, как вспомогательных составляющих режима ППД. Сила является определяющим параметром для обеспечения качества поверхности детали, поэтому ее изменять не рекомендуется [10-12].

Штучная производительность технологической операции обратна штучно-калькуляционному времени на эту операцию [1; 2; 6; 9]:

$$\Pi = \frac{1}{t_{шт.к}},$$

где  $t_{шт.к}$  - штучно-калькуляционное время, мин.

$$t_{шт.к} = t_{шт} + \frac{T_{пз}}{N},$$

где  $t_{шт}$  - штучное время, мин;  $T_{пз}$  - подготовительно-заготовительное время, мин;  $N$  - число деталей в партии [1; 2; 6; 9].

Составными элементами штучного времени являются основное  $t_o$  и вспомогательное время  $t_b$ , время перерывов на отдых и естественные надобности  $t_{отд}$  и время на обслуживание рабочего места  $t_{обс}$ . От режима обработки зависят только  $t_o$  и  $t_{см}$  - часть времени  $t_{обс}$ , затрачиваемая на смену и подналадку инструмента.

Таким образом, штучное время, зависящее от режимов резания, определяется по зависимости

$$t_{шт.р} = t_o + t_{см} \cdot$$

$$t_o = \frac{l\pi d}{1000VS_o},$$

где  $l$  - длина заготовки, мм;  $d$  - диаметр заготовки, мм;  $V$  - скорость резания, м/мин;  $S_o$  - подача, мм/об.

$$t_{см} = \frac{T_{см}t_o}{T},$$

где  $T_{см}$  - время, затрачиваемое на каждую смену инструмента, мин;  $T$  - период стойкости инструмента, мин.

Следовательно, штучное время обработки заготовки

$$t_{шт.р} = t_o \left( 1 + \frac{T_{см}}{T} \right).$$

На период стойкости деформирующего инструмента оказывают влияние сила, скорость обработки и подача [4; 10]:

$$T = 16,7 \frac{L_{доп}}{V},$$

где  $L_{доп}$  - путь приработки.

$$L_{доп} = 7 \cdot 10^6 \frac{P}{pS_oVHV},$$

где  $p$  - контактное давление;  $HV$  - твердость обрабатываемого материала.

Так как стойкость инструментов со стальными деформирующими элементами в среднем в 4 раза ниже стойкости алмазных выглаживателей [4; 5; 9], для инструментов со стальным деформирующим элементом:

$$L_{доп} = 1,75 \cdot 10^6 \frac{P}{pS_oVHV}.$$

Для алмазных инструментов

$$L_{доп} = 7 \cdot 10^6 \frac{P}{pS_oVHV}.$$

Таким образом, целевая функция для минимизации штучного времени обработки поверхности ППД примет вид

$$t_{шт.р} = \frac{l\pi d}{1000VS_o} \left( 1 + \frac{T_{см}pSV^2HV}{7 \cdot 10^6 \cdot 16,7P} \right) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Затраты технологической операции, зависящие от режимов обработки и приведенные к одному периоду стойкости инструмента, вычисляются по зависимости [1; 2; 6; 9]

$$C_{оп.р} = Rt_{шт.р} + \frac{t_o M}{T},$$

где  $R = C_{з.с} + C_a + C_{пр} + C_{эн} + C_{п}$ ;  $C_{з.с}$  - заработная плата станочника (с начислением в фонд соцстраха);  $C_a$  - амортизационные отчисления на замену станка;  $C_{пр}$  - затраты на амортизацию и ремонт универсальных приспособлений;  $C_{эн}$  - затраты на силовую электроэнергию;  $C_{п}$  - затраты по эксплуатации помещений;  $M$  - инструментальные расходы, приведенные к одному периоду стойкости [3].

$$M = S_{ин} + C_{пер} + C_{зам.ин}$$

где  $S_{ин}$  - покупная стоимость инструмента;  $C_{пер}$  - стоимость переточки инструмента, приведенная к одному периоду стойкости;  $C_{зам.ин}$  - стоимость замены затупившегося инструмента, приведенная к одному периоду стойкости.

Так как при ОУО ППД деформирующие инструменты не перетачиваются, то  $M = S_{ин}$ .

При подстановке ранее вычисленных зависимостей для расчета  $C_{оп.р}$  получим

$$\begin{aligned} C_{оп.р} &= Rt_{шт.р} + \frac{t_o M}{T} = Rt_o \left( 1 + \frac{T_{см}}{T} \right) + \frac{t_o}{T} M = t_o \left( R \left( 1 + \frac{T_{см}}{T} \right) + \frac{M}{T} \right) = \\ &= \frac{l\pi d}{1000VS_o} \left( R \left( 1 + \frac{T_{см} p S_o V^2 HV}{7 \cdot 10^6 P} \right) + \frac{Mp S_o V^2 HV}{7 \cdot 10^6 P} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Так как имеющаяся задача оптимизации является многокритериальной, необходимо рассчитать обобщенный (комплексный) критерий оптимизации, который основан на объединении частных критериев  $t_{шт.р}(V, S_o)$  и  $C_{оп.р}(V, S_o)$  в один интегральный критерий:

$$F(V, S) = \Phi(t_{шт.р}(V, S_o), C_{оп.р}(V, S_o)).$$

Существуют следующие основные методы объединения частных критериев в общий:

1. Аддитивный. Целевая функция в общем виде [8]:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n C_i \frac{F_i(X)}{F_i^o} = \sum_{i=1}^n C_i f_i(X) \rightarrow \max(\min),$$

где  $n$  - количество объединяемых частных критериев;  $C_i$  - весовой коэффициент  $i$ -го частного критерия;  $F_i(X)$  - числовое значение  $i$ -го частного критерия;  $F_i^o$  -  $i$ -й нормирующий делитель;  $f_i(X)$  - нормированное значение  $i$ -го частного критерия.

2. Мультипликативный. Целевая функция записывается следующим образом [8]:

$$F(X) = \prod_{i=1}^n C_i F_i(X) \rightarrow \max(\min),$$

где  $C_i$  - весовой коэффициент  $i$ -го частного критерия;  $F_i(X)$  - числовое значение  $i$ -го частного критерия.

3. Максиминный (минимаксный). Основывается на идее равномерности: стараются найти такие значения переменных  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , при которых нормированные значения всех частных критериев равны между собой, т.е.

$$C_i f_i(X) = K,$$

где  $C_i$  - весовой коэффициент  $i$ -го частного критерия;  $f_i(X)$  - нормированное значение  $i$ -го частного критерия;  $K$  - константа.

При наличии нескольких критериев выбирают:

1) аддитивный критерий, если существенное значение имеют абсолютные значения критериев при выбранном векторе параметров  $X$ ;

2) мультипликативный критерий, если существенную роль играет изменение абсолютных значений частных критериев при вариации вектора  $X$ ;

3) максиминный (минимаксный) критерий, если стоит задача достижения равенства нормированных значений противоречивых (конфликтных) частных критериев.

Используем аддитивный критерий, так как существенное значение имеют абсолютные значения критериев при выбранном векторе параметров  $X = \{t_{шт.р}(V, S_o), C_{оп.р}(V, S_o)\}$ .

Для получения совмещенного критерия из зависимостей (1) и (2), имеющих различную размерность, одним из методов свертки необходимо привести величины  $t_{шт.р}$  и  $C_{оп.р}$  к безразмерному виду. Для этого разделим правые и левые части выражений (1) и (2) на некоторые условно принятые средневзвешенные нормирующие делители  $t_{шт.ср}$  и  $C_{оп.ср}$ . В качестве нормирующих делителей могут использоваться значения рассматриваемых критериев оптимальности при некоторых фиксированных значениях оптимизируемых параметров. Так, наиболее удобно значения  $t_{шт.ср}$  и  $C_{оп.ср}$  вычислять при заранее известных табличных значениях скорости и подачи, определяемых кинематикой станка.

Способ определения средневзвешенных значений штучного времени и приведенных затрат операции зависит от вида оптимизируемых параметров. В случае оптимизации непрерывных значений скорости и подачи берется интегральное среднее. При дискретном множестве значений скорости и подачи, например, в качестве  $t_{шт.ср}$  и  $C_{оп.ср}$  берется среднее арифметическое значение  $t_{шт.р}$  и  $C_{оп.р}$  числа пар  $kl$  значений  $V$  и  $S_o$ .

$$t_{шт.ср} = \frac{1}{kl} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{l\pi d}{1000V_i S_{o_j}} \left( 1 + \frac{T_{см} l\pi d p V_i^2 H V}{7 \cdot 10^9 \cdot 16,7 P} \right).$$

Аналогично

$$C_{оп.ср} = \frac{1}{kl} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \left( R + \frac{l\pi d p V_i H V S_{o_j}}{7 \cdot 10^9 \cdot 16,7 P} \right).$$

После приведения критериев оптимальности к безразмерному виду получим:

$$\tau = \frac{t_{шт.р}}{t_{шт.ср}}, \quad \sigma = \frac{C_{оп.р}}{C_{оп.ср}},$$

$$F = \tau C_\tau + \sigma C_\sigma \rightarrow \min,$$

где  $C_\tau$  и  $C_\sigma$  - весовые коэффициенты производительности и приведенных затрат, определяемые методом экспертных оценок.

В конечном итоге целевая функция примет вид

$$F(V, S) = \left[ \frac{l\pi d}{1000 V S_o} \left( 1 + \frac{T_{см} p S V^2 H V}{7 \cdot 10^6 \cdot 16,7 P} \right) \right] \frac{C_\tau}{t_{шт.ср}} + \frac{l\pi d}{1000 V S_o} \left( R \left( 1 + \frac{T_{см} p S_o V^2 H V}{7 \cdot 10^6 \cdot 16,7 P} \right) + \frac{M p S_o V^2 H V}{7 \cdot 10^6 \cdot 16,7 P} \right) \frac{C_\sigma}{C_{оп.ср}} \rightarrow \min.$$

Качественное применение данной математической модели и ее достоверность значительно зависят от технических ограничений, которые накладываются на описываемый процесс и его параметры. Выбор конкретного ограничения обусловлен технологическими, конструкционными и организационно-производственными условиями. Выделим основные особенности построения модели для ОУО ППД.

Методика, разработанная в данной работе, применима только к процессам ОУО ППД, при протекании которых натяг инструмента и заготовки меньше очага деформации обрабатываемой поверхности.

Для тонкостенных  $\left(\frac{D_n}{S} = 12,5 \dots 40\right)$ , нежестких  $\left(\frac{1}{D} > 12\right)$  деталей и деталей высокой твердости ( $HRC_s > 50$ ) может быть применимо только алмазное выглаживание.

Для деталей с другими характеристиками необходимо определить ограничение, которое устанавливает взаимосвязь силы при обработке с допустимым усилием по жесткости заготовки.

В основе ограничения по жесткости лежит условие, при котором величина прогиба  $y_c$  заготовки под действием радиальной силы  $P$  должна быть не более допустимого прогиба  $y_{доп}$ :

$$y_c \leq y_{доп},$$

где  $y_{доп} \leq 0,5\delta$  ( $\delta$  - допуск на размер).

$$y_c = \frac{Px_p^2(L_{заг} - x_p)^2}{3EI_M L_{заг}},$$

где  $L_{заг}$  - длина заготовки;  $x_p$  - расстояние от правого торца до места приложения силы;  $I_M$  - момент инерции сечения в месте прогиба [7].

Для детали типа «вал» момент инерции вычисляется по зависимости [8]

$$I_M = \pi \frac{D^2}{64},$$

где  $D$  - диаметр вала.

Для детали типа «втулка» момент инерции вычисляется по зависимости [8]

$$I_M = \pi \frac{D^2}{64} - \pi \frac{d^2}{64} = \pi \frac{D^2 - d^2}{64},$$

где  $D$  - диаметр вала;  $d$  - диаметр отверстия.

Таким образом, получим техническое ограничение по жесткости заготовки [8]:

$$P \leq \frac{1,5\delta EI_M L_{заг}}{x_p(L_{заг} - x_p)^2}.$$

Также необходимо определить максимальные и минимальные значения  $S_0$  и  $V$ . С учетом обзора литературы вводим ограничения:  $S_0 = 0,02 \dots 0,1$  мм/об - для алмазного выглаживания,  $S_0 = 0,05 \dots 2,5$  мм/об - для раскатывания и обкатывания,  $V = 20 \dots 200$  м/мин [1; 4; 5; 9-14].

Таким образом, получена целевая функция, использование которой позволяет выбрать рациональные условия операции ППД (подачу и скорость обработки). Подход, представленный в данной работе, возможно применять и для других методов механической обработки, используя выражения для расчета периода стойкости инструмента в зависимости от соответствующих параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учеб. пособие для вузов/ А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, В.А. Лебедев, Ю.П. Анкудимов; под ред. А. П. Бабичева. - Ростов н/Д:Феникс, 2006. - 410 с.
2. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей/ В.Ф. Безъязычный [и др.]-М.: Изд-во МАИ, 1993.- 184с.

3. Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник/ под общ. ред. К.М. Великанова.- 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990.- 448с.
4. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием/ В.К. Яценко [и др.]- М.: Машиностроение, 1985.- 235с.
5. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием/Д.Д.Папшев.-М.:Машиностроение,1978.-152с.
6. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: в 2 кн.: [пер. с англ.]/ Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел.- М.: Мир, 1986.- Кн. 1.-350с.
7. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: в 2-х кн. [пер. с англ.]/ Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел.- М.: Мир, 1986.- Кн. 2.-320с.
8. Рыжов, Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки/ Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков.- Киев: Наукова думка, 1989.-192с.
9. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание/ В.М. Торбило.- М.: Машиностроение, 1972.-108с.
10. Федонин, О.Н. Научное обоснование выбора режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании/ О.Н. Федонин, С.В. Степошина// Вестник Брянского государственного технического университета.- 2011.- №1(29).- С. 4-8.
11. Федонин, О.Н. Определение параметров режима обработки при обкатывании наружных цилиндрических поверхностей / О.Н. Федонин, С.В. Степошина, А.Н. Прокофьев, О.А. Горленко //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.- 2011.- №6-3(290).- С.66-73.
12. Федонин, О.Н. Влияние условий алмазного выглаживания на качество поверхности отверстий/ О.Н. Федонин, С.В. Степошина//Научные технологии- 2013.- №1(31).- С.34-39.
13. Киричек, А.В. Конкурентоспособные технологии ОУО ППД в машиностроении / А.В. Киричек, А.П. Бабичев // Научные технологии в машиностроении. – 2013. - № 6(24). – С. 19 – 24.
14. Киричек, А.В. Перспективные методы комбинированного упрочнения на основе статико-импульсной обработки ППД / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. - № 10. – С.44-47.

Материал поступил в редколлегию 10.11.14.