

УДК 621.9.1

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

© 2013 О.С. Сурков<sup>1</sup>, А.А. Степанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС», г. Самара

Поступила в редакцию 02.12.2013

В данной статье рассмотрена методика расчета параметров процесса механической обработки на основе моделей конструкторско-технологических параметров инструмента и детали (эквивалентного напряжения  $y$ , максимального касательного напряжения  $i$ , смещения  $p$  зубьев, коэффициента  $K_L$  усадки стружки, шероховатости  $Rz$ , износа  $h$ ). Показана возможность прогнозирования величин параметров при изменении условий обработки на многоцелевых станках с программным управлением и марок инструментальных и обрабатываемых материалов. Использование разработанной методики позволяет назначить рациональные режимы обработки, оптимальную геометрию режущей кромки инструмента, оценить прочностные параметры инструментов и деталей.

Ключевые слова: автоматизированный расчет, прогнозирование параметров, напряженно-деформированное состояние, режимы резания, режущий инструмент.

Протяжки – металлоемкий, сложный в изготовлении и поэтому дорогой режущий инструмент. Экономическая целесообразность их применения оправдана при обеспечении оптимальных элементов конструкций и режимов резания, качественном изготовлении протяжек и правильной эксплуатации [1]. В связи с этим, для снижения себестоимости изготовления протяжек в условиях современного производства необходимо выявить дополнительные источники эффективности процессов системы проектирования протяжек, разработать методики прогнозирования геометрических и технологических параметров протяжек на ранних стадиях проектирования.

Для обработки сложных, точных внутренних и наружных профилей, к параметрам шероховатости поверхностей которых предъявляются высокие требования, процесс протягивания часто является незаменимым. Производительность протягивания в 3–12 раз выше производительности других способов механической обработки металла (развертывания, фрезерования, долбления, строгания, шлифования). Режущая протяжка обеспечивает точность обработки в пределах 7-9 квалитетов. Параметр шероховатости протягиваемой поверхности  $Ra = 0.32 \div 2.5$  мкм.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для компьютерного эксперимента выбрана эвольвентная протяжка  $20 \times 1 \times 20$ , напряженно-деформированное состояние которой было получено методом МКЭ в соответствии с [2]. На каждый зуб протяжки действуют сила резания  $Rz$ , перпендикулярно передней грани зуба, и  $Ry$ , перпендикулярная задней грани зуба. Диапазон параметров, выбранных для компьютерного моделирования, определен в табл. 1. Усилие резания при компьютерном моделировании определялось с учетом работы [4].

В результате компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния протяжек, на основе математического планирования экспериментов [3] получены следующие зависимости:

– для коэффициента усадки стружки  $K_L$

$$K_L = C_{K_L} \times S^{Z_{K_L}} \times t^{Y_{K_L}} \times V^{X_{K_L}}; \quad (1)$$

– для усредненных напряжений  $\sigma$ , Н/м<sup>2</sup> (по Мизесу)

$$\sigma = C_{\sigma} \times S_z^{C_{sz\sigma}} \times \beta^{C_{\beta\sigma}} \times V^{C_{v\sigma}}; \quad (2)$$

– для интенсивности усилий  $i$ , Н/м<sup>2</sup>

$$i = C_i \times S_z^{C_{szi}} \times \beta^{C_{\beta i}} \times V^{C_{vi}}; \quad (3)$$

– для статических перемещений  $p$ , мм

$$p = C_p \times S_z^{C_{szp}} \times \beta^{C_{\beta p}} \times V^{C_{vp}}; \quad (4)$$

Сурков Олег Станиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство двигателей летательных аппаратов». E-mail: ossvbm@mail.ru

Степанов Андрей Александрович, соискатель кафедры «Производство двигателей летательных аппаратов». E-mail: pochta201002@mail.ru

**Таблица 1.** Диапазон экспериментальных данных для оценки параметров напряженно-деформированного состояния протяжек

Номер параметра	Наименование параметра	Диапазон значений параметра	Размерность параметра
1	Подъём на зуб $S_z$	0.03 ÷ 0.0625	мм
2	Угол заострения $\beta = 90^\circ - \alpha - \gamma$	69.5 ÷ 84.5	°
3	Скорость резания $V$	2 ÷ 150	м/мин

– для коэффициентов запаса прочности  $K_\sigma$  по усредненным напряжениям

$$K_\sigma = C_{K_\sigma} \times S_z^{C_{szK_\sigma}} \times \beta^{C_{\beta K_\sigma}} \times V^{C_{VK_\sigma}} ; (5)$$

– для коэффициентов запаса прочности  $K_\phi$  по касательным напряжениям

$$K_\tau = C_{K_\tau} \times S_z^{C_{szK_\tau}} \times \beta^{C_{\beta K_\tau}} \times V^{C_{VK_\tau}} ; (6)$$

– для интенсивности износа  $h$  получены зависимости вида

$$h = C_h \times S_z^{Z_h} \times t^{Y_h} \times V^{X_h} , (7)$$

В зависимостях (1)-(7)  $C_{KL}$ ,  $C_\sigma$ ,  $C_{S_z\sigma}$ ,  $C_{\beta\sigma}$ ,  $C_{V\sigma}$ ,  $C_i$ ,  $C_{S_zi}$ ,  $C_{\beta i}$ ,  $C_{Vi}$ ,  $C_p$ ,  $C_{S_zp}$ ,  $C_{\beta p}$ ,  $C_{Vp}$ ,  $X_{KL}$ ,  $Y_{KL}$ ,  $Z_{KL}$ ,  $X_h$ ,  $Y_h$ ,  $Z_h$  – постоянные величины,  $S_z$  – подъём на зуб, мм/зуб;  $\beta$  – угол заострения, град;  $V$  – скорость резания, м/мин.

Стойкостные зависимости при известных значениях усредненных напряжений  $\sigma$ , интенсивности усилий  $i$ , статических перемещений  $s$ , коэффициентов запаса прочности  $K_\sigma$  и  $K_\tau$  показаны на рис. 2. По зависимостям, приведенным на рис. 2, необходимо определить совокупность параметров  $\{S_z, V\}$ , которые определяют режимы резания при допустимых напряжениях  $\sigma$  в режущем инструменте и гарантируют обеспечение требуемого качества изготовления деталей в течение заданного периода стойкости  $T$  режущего инструмента.

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $S_{OHKL}$  в зависимости от коэффициента усадки стружки  $K_L$ :

$$S_{OHKL} = \left( \frac{a_1 \times S^{X_{KL}^{-1} - Z_{KL}^{-1}}}{a_2} \right)^{\frac{n-x}{y-n+x}} , (8)$$

где  $a_1 = \left( \frac{K_L}{C_{K_L} \times t^{Y_{K_L}}} \right)^{X_{K_L}^{-1}} \times (X_{K_L}^{-1} - Z_{K_L})$ ,

$$a_2 = \left( \frac{B_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{n-x}} \frac{y}{n-x} .$$

Уравнение для вычисления оптимальной скорости резания  $V_{0HKL}$  в зависимости от коэффициента усадки стружки  $K_L$ :

$$V_{0HKL} = (B_q / B_0)^{\frac{1}{n-x}} \left( \frac{a_1 \times S^{X_{KL}^{-1} - Z_{KL}^{-1}}}{a_2} \right)^{\frac{y}{y-n+x}} . (9)$$

Оптимальную стойкость протяжки  $T_{0KL}$  в зависимости от коэффициента усадки стружки  $K_L$  определяют по формуле:

$$T_{0KL} = T_{чKL} = B_0 (B_q / B_0)^{\frac{x}{x-n}} \left( \frac{a_1 \times S^{X_{KL}^{-1} - Z_{KL}^{-1}}}{a_2} \right)^{\frac{-ny}{y-n+x}} . (10)$$

Из формулы (2) определяют фактическую скорость резания  $V_y$  в зависимости от усредненного напряжения  $\sigma$ :

$$V_\sigma = \left( \frac{\sigma}{C_\sigma \times S_z^{C_{sz\sigma}} \times \beta^{C_{\beta\sigma}}} \right)^{C_{V\sigma}^{-1}} . (11)$$

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $S_{OH\sigma}$  в зависимости от усредненного напряжения  $\sigma$ :

$$S_{OH\sigma} = \left( \frac{a_1 \times S^{C_{V\sigma}^{-1} - C_{sz\sigma} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{n-x}{y-n+x}} , (12)$$

где  $a_1 = \left( \frac{\sigma}{C_\sigma \times \beta^{C_{\beta\sigma}}} \right)^{C_{V\sigma}^{-1}} \times (C_{V\sigma}^{-1} - C_{S_z\sigma})$ ,

$$a_2 = \left( \frac{B_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{n-x}} \frac{y}{n-x}.$$

Уравнение для вычисления оптимальной скорости резания  $V_{0H\sigma}$  в зависимости от усредненного напряжения  $\sigma$ :

$$V_{0H\sigma} = (B_q / B_0)^{\frac{1}{n-x}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{v\sigma}^{-1} - C_{sz\sigma} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{y}{y-n+x}}. \quad (13)$$

Оптимальную стойкость протяжки  $T_{0\sigma}$  в зависимости от усредненного напряжения  $\sigma$  определяют по формуле:

$$T_{0\sigma} = T_{q\sigma} = B_0 (B_q / B_0)^{\frac{x}{x-n}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{v\sigma}^{-1} - C_{sz\sigma} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{-ny}{y-n+x}}. \quad (14)$$

Из формулы (3) определяют скорость резания  $V_i$  в зависимости от интенсивности усилий  $i$ :

$$V_i = \left( \frac{i}{C_i \times S_z^{C_{szi}} \times \beta^{C_{\beta i}}} \right)^{C_{vi}^{-1}}. \quad (15)$$

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $S_{0Hi}$  в зависимости от интенсивности усилий  $i$ :

$$S_{0Hi} = \left( \frac{a_1 \times S^{C_{vi}^{-1} - C_{szi} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{n-x}{y-n+x}}, \quad (16)$$

где  $a_1 = \left( \frac{i}{C_i \times \beta^{C_{\beta i}}} \right)^{C_{vi}^{-1}} \times (C_{vi}^{-1} - C_{szi}),$

$$a_2 = \left( \frac{B_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{n-x}} \frac{y}{n-x}.$$

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $V_{0Hi}$  в зависимости от интенсивности усилий  $i$ :

$$V_{0Hi} = (B_q / B_0)^{\frac{1}{n-x}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{vi}^{-1} - C_{szi} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{y}{y-n+x}}. \quad (17)$$

Оптимальную стойкость протяжки  $T_{0i}$  в зависимости от интенсивности усилий  $I$  определяют по формуле:

$$T_{0i} = T_{qi} = B_0 (B_q / B_0)^{\frac{x}{x-n}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{vi}^{-1} - C_{szi} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{-ny}{y-n+x}}. \quad (18)$$

Из формулы (4) определяют фактическую скорость резания  $V_p$  в зависимости от смещения  $p$  зуба протяжки:

$$V_p = \left( \frac{P}{C_p \times S_z^{C_{szp}} \times \beta^{C_{\beta p}}} \right)^{C_{vp}^{-1}}. \quad (19)$$

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $S_{0Hp}$  в зависимости от смещения  $p$  зуба протяжки:

$$S_{0Hp} = \left( \frac{a_1 \times S^{C_{vp}^{-1} - C_{szp} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{n-x}{y-n+x}}, \quad (20)$$

где  $a_1 = \left( \frac{P}{C_p \times \beta^{C_{\beta p}}} \right)^{C_{vp}^{-1}} \times (C_{vp}^{-1} - C_{szp}),$

$$a_2 = \left( \frac{B_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{n-x}} \frac{y}{n-x}.$$

Уравнение для вычисления оптимальной скорости резания  $V_{0Hp}$  в зависимости от смещения  $p$  зуба протяжки:

$$V_{0Hp} = (B_q / B_0)^{\frac{1}{n-x}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{vp}^{-1} - C_{szp} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{y}{y-n+x}}. \quad (21)$$

Оптимальную стойкость протяжки  $T_{0p}$  в зависимости от смещения  $p$  зуба протяжки определяют по формуле:

$$T_{0p} = T_{qp} = B_0 (B_q / B_0)^{\frac{x}{x-n}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{vp}^{-1} - C_{szp} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{-ny}{y-n+x}}. \quad (22)$$

Из формулы (5) определяют скорость резания  $V_{Ky}$  в зависимости от коэффициента  $K_\sigma$  запаса прочности по усредненным напряжениям:

$$V_{K\sigma} = \left( \frac{K_\sigma}{C_{K\sigma} \times S_z^{C_{szK\sigma}} \times \beta^{C_{\beta K\sigma}}} \right)^{C_{vK\sigma}^{-1}}. \quad (23)$$

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $S_{0HK\sigma}$  в зависимости от коэффициента  $K_\sigma$  запаса прочности по усредненным напряжениям:

$$S_{0HK\sigma} = \left( \frac{a_1 \times S^{C_{vK\sigma}^{-1} - C_{szK\sigma} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{n-x}{y-n+x}}, \quad (24)$$

где  $a_1 = \left( \frac{K_\sigma}{C_{K\sigma} \times \beta^{C_{\beta K\sigma}}} \right)^{C_{vK\sigma}^{-1}} \times (C_{vK\sigma}^{-1} - C_{szK\sigma}),$

$$a_2 = \left( \frac{B_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{n-x}} \frac{y}{n-x}.$$

Уравнение для вычисления оптимальной скорости резания  $V_{0HK\sigma}$  в зависимости от коэффициента  $K_\sigma$  запаса прочности по усредненным напряжениям:

$$V_{0HK\sigma} = (B_q / B_0)^{\frac{1}{n-x}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{VK\sigma}^{-1} - C_{szK\sigma} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{y}{y-n+x}}. \quad (25)$$

Оптимальную стойкость протяжки  $T_{0Ky}$  в зависимости от коэффициента  $K_\sigma$  запаса прочности по усредненным напряжениям определяют по формуле:

$$T_{0K\sigma} = T_{чK\sigma} = B_0 (B_q / B_0)^{\frac{x}{x-n}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{VK\sigma}^{-1} - C_{szK\sigma} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{-ny}{y-n+x}}. \quad (26)$$

Из формулы (6) определяют фактическую скорость резания  $V_{K\phi}$  в зависимости от коэффициента  $K_\tau$  запаса прочности по касательным напряжениям:

$$V_{K\tau} = \left( \frac{K\tau}{C_{K\tau} \times S_z^{C_{szK\tau}} \times \beta^{C\beta K\tau}} \right)^{C_{VK\tau}^{-1}}. \quad (27)$$

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $S_{0HK\tau}$ : в зависимости от коэффициента  $K_\tau$  запаса прочности по касательным напряжениям:

$$S_{0HK\tau} = \left( \frac{a_1 \times S^{C_{VK\tau}^{-1} - C_{szK\tau} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{n-x}{y-n+x}}, \quad (28)$$

где  $a_1 = \left( \frac{K\tau}{C_{K\tau} \times \beta^{C\beta K\tau}} \right)^{C_{VK\tau}^{-1}} \times (C_{VK\tau}^{-1} - C_{szK\tau})$ ,

$$a_2 = \left( \frac{B_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{n-x}} \frac{y}{n-x}.$$

Уравнение для вычисления оптимальной скорости резания  $V_{0HK\tau}$  в зависимости от коэффициента  $K_\tau$  запаса прочности по касательным напряжениям:

$$V_{0HK\tau} = (B_q / B_0)^{\frac{1}{n-x}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{VK\tau}^{-1} - C_{szK\tau} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{y}{y-n+x}}. \quad (29)$$

Оптимальную стойкость протяжки  $T_{0K\phi}$  в зависимости от коэффициента  $K\tau$  запаса прочности по касательным напряжениям определяют по формуле:

$$T_{0K\tau} = T_{чK\tau} = B_0 (B_q / B_0)^{\frac{x}{x-n}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{VK\tau}^{-1} - C_{szK\tau} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{-ny}{y-n+x}}. \quad (30)$$

Из формулы (7) определяют фактическую

скорость резания  $V_h$  в зависимости от износа  $h$ :

$$Vh = \left( \frac{h}{C_h \times S_z^{C_{szh}} \times \beta^{C\beta h}} \right)^{C_{Vh}^{-1}}. \quad (31)$$

Уравнение для вычисления оптимальной подачи  $S_{0Hh}$ :

$$S_{0Hh} = \left( \frac{a_1 \times S^{C_{Vh}^{-1} - C_{szh} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{n-x}{y-n+x}}, \quad (32)$$

где  $a_1 = \left( \frac{h}{C_h \times \beta^{C\beta h}} \right)^{C_{Vh}^{-1}} \times (C_{Vh}^{-1} - C_{szh})$ ,

$$a_2 = \left( \frac{B_q}{B_0} \right)^{\frac{1}{n-x}} \frac{y}{n-x}.$$

Уравнение для вычисления оптимальной скорости резания  $V_{0Hh}$ :

$$V_{0Hh} = (B_q / B_0)^{\frac{1}{n-x}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{Vh}^{-1} - C_{szh} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{y}{y-n+x}}. \quad (33)$$

Оптимальную стойкость протяжки  $T_{0h}$ , определяют по формуле:

$$T_{0h} = T_{чh} = B_0 (B_q / B_0)^{\frac{x}{x-n}} \left( \frac{a_1 \times S^{C_{Vh}^{-1} - C_{szh} - 1}}{a_2} \right)^{\frac{-ny}{y-n+x}}. \quad (34)$$

В результате анализа [1] получена зависимость

$$l_0 = \frac{A_0 K_P \pi D}{K_{II} P_{\max}} \left( \frac{a}{S_0} + b \right) \left( l + 3 \sqrt{KIS_0} \right), \quad (35)$$

где  $A_0$  – припуск, срезаемый черновой частью протяжки;  $D$  – диаметр протягивания;  $K_P$  – поправочный коэффициент, учитывающий условия обработки;  $K_{II}$  – поправочный коэффициент, учитывающий уменьшение подачи на переходных зубьях;  $a, b, S_0$  – параметры эмпирической зависимости удельной силы резания  $P_{\max}$  (приходящейся на 1 мм режущей кромки) от подачи;  $K$  – коэффициент помещаемости стружки. Эта зависимость имеет экстремальный характер, и из нее может быть найдено значение  $S_{0p}$ , обеспечивающее минимальную длину  $l_0$ . Точки  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7$  (рис. 2) соответствуют условиям минимумам функции (34) в зависимости от коэффициента усадки стружки  $K_L$  (1), напряжений  $y$  (2) в режущем инструменте, интенсивности усилий  $i$  (3) в режущем инструменте, статического перемещения  $p$  (4) режущей кромки под воздействием сил резания  $P_z$  и  $P_y$  коэффициента запаса прочности  $K_\sigma$  (5) по напряжениям Мизеса, коэффициента запаса прочности  $K_\tau$  (6) по касательным напряжениям, интенсивности износа зубьев

h (7). При использовании разработанных моделей (1)-(7) и наличии необходимых экспериментальных данных принцип равной стойкости [1] черновой и чистовой частей протяжек может быть обеспечен и при обработке с повышенными (до 150 м/мин) скоростями резания. В совокупности с моделями (8)-(34) возможно уточнение существующих режимов протягивания и выдача рекомендаций для высокоскоростного протягивания. Разработанные модели реализованы в виде программного, методического и информационного обеспечения интегрированной системы проектирования протяжек. Совокупности знаний, полученные на основе проектных данных, позволяют выбирать геометрические параметры режущей части протяжки для обеспечения мини-

муму напряженно-деформированного состояния зоны резания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
2. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ – Петербург, 2006. С. 27-28.
3. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1976. С. 155.
4. Методика определения оптимальных параметров при ортогональном резании на основе аналитической модели очага пластической деформации / А.И. Хаймович, О.С. Сурков, И.Н. Хаймович // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т.13. №6. С.186-193.

### AUTOMATED CALCULATION OF CUTTING PROCESS PARAMETERS

© 2013 O.S. Surkov<sup>1</sup>, A.A. Stepanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov  
(National Re-search University)

<sup>2</sup>FSUE SRPSRC “TsSKB-Progress”, Samara

In this article the method of calculation of machining process parameters on the basis of models of design tool and part technological parameters (equivalent stress  $\sigma$ , the maximum shear stress ( $\tau$ ), offset  $p$  of teeth, the coefficient  $K_u$  of shrinkage of chips, roughness  $R_z$ , wear  $h$ ). The possibility of predicting values as conditions change on multi-task machines with program control and the stamp tool and workpiece material is presented. The use of the developed method allows you to assign rational machining modes, the optimum cutting edge geometry tool to estimate the strength parameters of tools and parts.

Keywords: automated calculation, prediction of parameters, the stress-strain state, machining modes, cutting tool.

---

Oleg Surkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Aircraft Engines Production Department.  
E-mail: ossvbm@mail.ru

Andrey Stepanov, competitor at the Aircraft Engines Production Department. E-mail: pochta201002@mail.ru.